

O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta-maxsus ta’lim vazirligi

Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti

Fizika-matematika fakulteti

“Fizika o‘qitish metodikasi” kafedrası

**NAZARIY FIZIKA
(ELEKTRODINAMIKA)**

fanidan

O‘QUV USLUBIY MAJMUA

Bilim sohasi: 100000 – Ta’lim

Ta’lim sohasi: 110000 – Pedagogika

Ta’lim yo‘nalishi: 5110200 – Fizika va astronomiya o‘qitish metodikasi

Nukus – 2020

Fanning O'quv-uslubiy majmuasi O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta-maxsus ta'lim vazirligi tomonidan ma'qullangan (2018-yil 18-avgust kuni, Ro'yxat raqami BD-5110200-2.06) "Nazariy fizika" Fan dasturiga muvofiq ishlab chiqilgan hamda O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta-maxsus ta'lim vazirligi 107-sonli buyrug'i (2017-yil 1-mart kuni) talablariga uyg'un shaklda rasmiylashtirilgan.

Tuzuvchi:

Yavidov B. "Fizika o'qitish metodikasi" kafedrasida dotsenti, f-m.f.d.

Taqrizchilar:

Atashov B. "Fizika o'qitish metodikasi" kafedrasida dotsenti, f-m.f.n.

Turdanov K. "Fizika o'qitish metodikasi" kafedrasida dotsenti, f-m.f.n.

Fanning ishchi o'quv dasturi "Fizika o'qitish metodikasi" kafedrasining 2020- yil «____» - _____
dagi № ____ - sonli yig'ilishida muhokamadan o'tgan va fakultet kengashida muhokama qilish uchun
tavsiya etilgan.

Kafedra mudiri:

Kamalov A.

Fanning ishchi o'quv dasturi Fizika-mehnat fakulteti Kengashida muhokama etilgan va foydalanishga
tavsiya qilingan (2020-yil «____» _____ № __ - sonli bayonnoma).

Fakultet kengashi raisi:

Jiyemuratov R.

Fanning ishchi o'quv dasturi Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti Ilmiy-uslubiy
Kengashida ko'rib chiqilgan va tasdiqlangan (2020-yil "____" _____ dagi ____sonli majlis
bayoni).

Kelishildi:

O'quv-uslubiy boshqarma boshlig'i

_____ Abdiev A

O‘QUV USLUBIY MAJMUA

MUDARIJASI

1. O‘quv materiallari
 - Ma’ruza materiallari (matnlar)
 - Amaliy mashg‘ulot materiallari
 - Seminar mashg‘ulot materiallari
2. Mustaqil ta’lim materiallari
3. Glossariy
4. Ilovalar
 - Namunaviy dastur
 - Ishchi fan dasturi
 - Tarqatma materiallar
 - Testlar
 - Baholash mezonlari
 - Qo‘shimcha (boshqa) materiallar
 - Masalalar to‘plami
 - Nazarot savollari
 - Umumiy savollar
 - Adabiyotlar ro‘yxati
 - Xorijiy manbalar
 - Foydali maslahatlar

Ma'ruza № 4**Mavzu: Barqaror elektr va magnit maydoni (1- qism)****Auditoriya ishlari:**

Reja:

1. Zaryadlar tizimining elektr maydoni.
2. Puasson tenglamasi. Laplas tenglamasi.
3. Fazoda taqsimlangan zaryadlarning potentsiali.
4. Chiziqli va sirtiyl zaryadlarning potentsiali.
5. Cheklangan zaryadlar tizimining potentsiali (Multipol yoyish).

Mustaqil ta'lim topshiriqlari:

1. Ikki qatlam hosil qilgan elektr potentsial.
2. Bog'langan zaryadlar hosil qilgan maydon.
3. Zaryadlangan o'tkazgichlarning maydoni.

1. Zaryadlar tizimining elektr maydoni.

Elektromagnit maydonning eng sodda masalalari bu barqaror (statsionar) masalalardir. Barqaror holda elektromagnit maydonni tavsiflovchi Maksvel tenglamasiga kiruvchi fizikaviy kattaliklar vaqtga bevosita bog'liq bo'lmaydi.

Keling Maksvel tenglamasining integral va differentsial shakllarini eslab o'tamiz.

INTEGRAL SHAKL (SGS-o'lchov birliklar tizimida).

$$\oint_S \vec{D} d\vec{s} = 4\pi \int_V \rho dV \qquad \oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0 \qquad \oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \oint_S \left(\frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{s}$$

DIFFRENTSIAL SHAKL (SGS-o'lchov birliklar tizimida).

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho \qquad \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$t = 0$ bo'lganda Maksvel tenglamalari bir-biriga bog'liq bo'lmagan ikki tenglamalar tizimiga ajraladi:

E-tizim:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= 4\pi\rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \\ \vec{D} &= \vec{E} + 4\pi\vec{P} \end{aligned}$$

M-tizim:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \vec{B} &= \vec{H} + 4\pi\vec{M} \end{aligned}$$

E-tizim tenglamalaridan **elektrostatika** masalalarini yechishda foydalaniladi.

M-tizim tenglamalaridan **magnitostatika** masalalarini yechishda foydalaniladi.

Agar elektr toki mavjud bo'lsa unda E- va M-tizimddan birgalikda foydalanamiz, chunki elektr toki zichligi

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^{tashqi})$$

Formulaga muvofiq E- tizim tenglamasi orqali aniqlanadigan elektr maydoni kuchlanganligiga bog'liq.

O'tkazuvchanlik toklar mavjud bo'lgan magnitostatika masalalari, umuman olgandan, statsionar (barqaror) tizimda qaralsada, ularda uzliksiz ravishda issiqlik ajralishi munosabati bilan nomuvozanatli jarayon (tizim) sodir bo'ladi.

Elektrostatika masalalari esa har doim muvozanatli jarayon hisoblanadi.

Elektrostatika masalalariga o'z e'tiborimizni qarataylik.

E-tizim tenglamalari quyidagi hollarda elektr maydoni kuchlanganlik vektorini topishga imkon beradi:

1. Butun fazoda zaryadlar taqsimoti ma'lum bo'lsa;
2. V hajmda zaryadlar taqsimoti va uning S sirtidagi chegaraviy shartlarga ko'ra shun hajm ichidagi elektr maydoni;
3. Dielektrik muhitda zaryadlangan o'tkazgichlar mavjud hollarda;
4. Tashqi elektr maydoni E_0 mavjud bo'lganda dielektrik muhitda.

Misol uchun 1- masalani qaraylik. Vakuumd elektrostatika tenglamalari

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

ko'rinishga ega. Maboda masala dielektrikda qarayotgan bo'lsa birinchi tengalamaning o'ng tomoniga bog'langan zaryadlar zichligini tavsiflovchi

$$\rho^b = -\operatorname{div} \vec{P}$$

hadini qo'shish kerak. Bu holda elektr maydonini dielektrik muhitda topishimiz mumkin.

$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ bo'lgani uchun $\vec{E}$ ni biror skalyar funktsiyaning gradient sifatida yozsak bo'ladi

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad \text{yoki} \quad \vec{E} = -\nabla \varphi.$$

Bu yerda φ – elektrostatik potentsial.

2. Puasson tenglamasi. Laplas tenglamasi.

Oxirgi ifodani E-tizimning birinchi tenglamasi

$$\nabla \vec{E} = 4\pi\rho$$

ga qo'yamiz. U holda

$$\nabla \vec{E} = \nabla(-\nabla \varphi) = 4\pi\rho \quad (*)$$

Shu yerda, yuqoridagi ifodani soddalashtirish uchun

$$\nabla \varphi = \sum_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \vec{e}_i \quad \text{va} \quad \nabla \vec{A} = \sum_i \frac{\partial A_i}{\partial x_i}$$

tengliklarni esga tushiramiz. Natijada,

$$\nabla(\nabla \varphi) = \nabla^2 \varphi = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} (\nabla \varphi)_i = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \sum_i \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = \Delta \varphi \quad \text{yani}$$

$$\nabla(\nabla \varphi) = \Delta \varphi \quad \text{yoki} \quad \Delta \varphi = \operatorname{div} (\operatorname{grad} \varphi)$$

ekanligini topamiz. Bu yerda Δ - Laplas operatori deb ataladi va Dekart koordinatalar tizimida quyidagicha yoziladi:

$$\Delta = \sum_i \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$

Dekart koor.tizimida

$$\nabla^2 = \Delta$$

munosabat o`rinli!!!

Shu o`rinda quyidagi ikki ayniyatni eslab qolish lozim:

$$\operatorname{div}(\operatorname{rot} \vec{a}) = 0! \quad \text{va} \quad \operatorname{rot}(\operatorname{grad} \varphi) = 0!$$

Yuqoridagilarni inobatga olib (*) formuladan)

$$\Delta \varphi = -4\pi\rho$$

tenglamani qo`lga kiritamiz. Bu tenglama **Puasson tenglamasi** deb atalib, u elektrostatikada katta ahamiyat kasb etadi va zaryadlarning fazoda taqsimotini bilgan holda ular tashkil qilgan potentsialni ixtiyoriy nuqtada topishga imkon beradi. Agar zaryadlar zichligi noga teng bo`lsa, yani

$$\rho = 0$$

bo`lsa Puasson tenglamasi

$$\Delta \varphi = 0$$

ko`rinishga keladi va **Laplas tenglamasi** deb ataladi.

Laplas va Puasson tenglamalari ikkinchi tartibli xususiy hosilali differentsial tenglamalar bo`lib, elliptic turdagi differentsial tenglamalar sinfiga kiradi. Bunday tenglamalarning yechilishi uchun *chagaraviy*

shartlar berilgan bo`lishi yani biror S sirtida potentsial  $\varphi$  ning yoki  $(\vec{n} \cdot \vec{E})$  qiymati berilgan bo`lishi darkor. Odatda S sirt sifatida cheksizlikda joylashgan sirt tanlanadi, chunki bu holda potentsial ham sekli biror qiymatga intiladi:

$$r \rightarrow \infty \quad \text{da} \quad \varphi(\vec{r}) \rightarrow \text{const} \quad \text{yoki} \quad \varphi(\vec{r}) \rightarrow 0$$

Laplas tenglamasining umumiy yechimi quyidagicha yoziladi:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{l=0}^{\infty} (a_l r^l + b_l r^{-l-1}) \sum_{m=0}^l P_l^m(\cos \vartheta) (c_m \cos m\alpha + d_m \sin m\alpha).$$

Bu yerda a_l, b_l, c_m, d_m - lar ixtiyoriy doimiylar.

3. Fazoda taqsimlangan zaryadlarning potentsiali.

Nuqtaviy e zaryadning r masofada hosil qilgan potentsiali

$$\varphi = \frac{e}{r}.$$

Bu yecheimni fazoda taqsimlangan zaryadlar tizimi hosil qilgan potentsialni topish uchun foydalanish mumkinligini ko'rsatamiz. Buning uchun δ - funktsiya yordamida zaryadlarning hajmiy zichligini

$$\rho(\vec{r}) = \int \rho(\vec{r}') \delta(\vec{r} - \vec{r}') d^3 r'$$

shaklida yozamiz va uni Puasson tenglamasiga qo'yamiz:

$$\Delta \varphi(\vec{r}) = -4\pi \int \rho(\vec{r}') \delta(\vec{r} - \vec{r}') d^3 r'.$$

$$\Delta \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = -4\pi \delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

munosabatni inobatga olsak Puasson tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\Delta \varphi(\vec{r}) = \int \rho(\vec{r}') \Delta \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) d^3 r' = \Delta \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'$$

Demak, Puasson tenglamasining yechimi

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_0(\vec{r}) + \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'$$

bilan beriladi. Bu yerda $\varphi_0(\vec{r})$ Laplas tenglamasining biror yechimi. Odatda otentsial $\varphi_0(\vec{r})$ - cheksizlikda joylashgan va $\rho(\vec{r})$ bilan inobatga olinmagan zaryadlar hosil qilgan potentsial deb talqin qilinadi. Agar biz $\rho(\vec{r})$ orqali hatto cheksizlikdagi zaryadlarni ham inobatga olingan deb hisoblasak, unda $\varphi_0(\vec{r}) = 0$ deb yozsak bo'ladi. Puasson tenglamasi yechimi esa faqat bitta had bilan aniqlanadi:

$$\varphi(\vec{r}) = \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'.$$

Bu yechim Kulon qonuniga zid emas bo'lib, $\nabla \varphi_0 = 0$ shart bajariladagina o'rinlidir.

Agar zaryadlar tizimi biror hajm bilan cheklangan bo'lsa, yechim

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_0(\vec{r}) + \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'$$

bilan beriladi. Bunda chegaraviy shartlar bajarilishi lozim. Fizikaviy masalalarda uch turdagi chegaraviy shartlar uchraydi:

1. S sirtida potentsial φ berilgan (Dirixle masalasi);

2. S sirtida $(\vec{n} \cdot \vec{E})$ ning normal tashkil etuvchisi berilgan (Neyman masalasi);
3. S sirtning bir qismida potentsial φ , bosqa qismida $(\vec{n} \cdot \vec{E})$ ning normal tashkil etuvchisi berilgan (aralash masala)

Bu uchta sart elektr maydoni kuchlanganligini bir qiymatli aniqlaydi. Chegaraviy shartlarni qanoatlantiruvchi Puasson tenglamasining yechimi yagonadir. Bu ta'kidlanish yagonallilik teoremasi deb ataladi.

4. Chiziqli va sirtiy zaryadlarning potentsiali.

Agar zaryad biror S sirt bo'ylab taqsimlangan bo'lsa, va taqsimot σ sirt zichligi funktsiyasi bilan berilsa,

$$\sigma = \frac{dq}{ds}$$

u holda potentsial formulasiga muvofiq

$$\varphi(\vec{r}) = \int \frac{\sigma(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds'.$$

Agar zaryad biror egri chiziq bo'yicha taqsimlangan, tadsimlanish qonuni zaryadning chiziqli zichligi τ bilan berilgan bo'lsa,

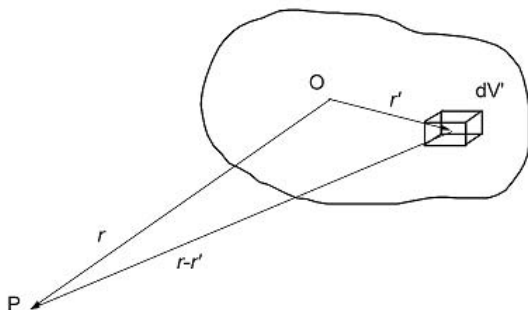
$$\sigma = \frac{dq}{dl}$$

u holda potentsial formulasiga muvofiq

$$\varphi(\vec{r}) = \int \frac{\tau(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dl'.$$

5. Cheklangan zaryadlar tizimining potentsiali (Multipol yoyish).

Biror V hajmda joylashgan zaryadlar tizimini qaraylik. Hajm ichida zaryadlar zichligi nolga teng emas: $\rho \neq 0$. Hajm cheklangan bo'lib, a radiusli shar ichiga sig'adi deb faraz qilamiz. O buqtani shar markazi, kuzatish nuqtasi koordinatasini $\vec{r}$, ixtiyoriy zaryad koordinatasini $\vec{r}'$ deb belgilaymiz (rasm).



Bu zaryadlar tizimining potentsiali

$$\varphi(\vec{r}) = \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'$$

formuladan hisoblash lozim. Bizni olis masofalardagi maydon potentsiali qiziqtiradi $r \gg a$. Cheksizlikda $\rho = 0$ va potentsial φ Laplas tenglamasini qanoatlantiradi, shu sabab yechim kamayuvchi bo'lishi kerak:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l r^{-l-1} P_l^m(\cos \vartheta) (a_{lm} \cos m\alpha + b_{lm} \sin m\alpha) (***)$$

Potentsialning bunday qator ko'rinishida yozilishi **multipol yoyish** deb ataladi. Qatorning koeffitsientlari a_{lm} va b_{lm} (l,m) tartibli multipol momentlari, $n = 2^l$ soni esa multipollik deb ataladi. 2^l maydon hosil qilgan potentsiali

$$\varphi_l = \sum_{m=0}^l r^{-l-1} P_l^m(\cos \vartheta) (a_{lm} \cos m\alpha + b_{lm} \sin m\alpha)$$

munosabat orqali aniqlanadi va u $r \rightarrow \infty$ da r^{-l-1} kabi kamayadi.

$l = 0$ ($n = 1$) multipol bitta nuqtaviy zaryad **monopol** maydonini tavsiflaydi.

$l = 1$ ($n = 2$) multipol ikkita nuqtaviy zaryadlar tizimi **dipol** maydonini tavsiflaydi.

$l = 2$ ($n = 4$) multipol to'rtta nuqtaviy zaryadlar tizimi **kvadrupol** maydonini tavsiflaydi.

Multipol yoyilish qatorining koeffitsientlari zaryadlarning taqsimoti $\rho(\vec{r})$ ga bog'liq. Buni ko'rsatish uchun potentsial ifodasiga kiradigan

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

ni $r > a > r'$ da to'g'ri bo'ladigan Teylor qatoriga yoyamiz:

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l!} (\vec{r}' \nabla)^l \frac{1}{r}.$$

Ma'ruza № 5

Mavzu: Barqaror elektr va magnit maydoni (2- qism)

Auditoriya ishlari:

Reja:

1. Elektrostatik maydon energiyasi.
2. Zaryadlangan o'tkazgichlar tizimining energiyasi.

Mustaqil ta'lim topshiriqlari:

1. Tashqi maydondagi o'tkazgichlar va dielektriklar.
2. Elektrostatik maydonda o'tkazgichlarga va dielektriklarga ta'sir etuvchi kuchlar.

1. Elektrostatik maydon energiyasi.

Fazoning cheklangan sohasida dielektrik muhitda ixtiyoriy ravishda taqsimlangan zaryadlar tizimi hosil qilgan elektrostatik maydon energiyasi ifodasini topamiz. Berilgan zaryadlar tizimini o'z ichiga qamrab olgan S sirtini tanlaymiz. Uning hajmi V_0 yetarlicha katta bo'lsin. U holda hajm V_0 ichida joylashgan elektrostatik maydoni energiyasi

$$W_e = \frac{1}{8\pi} \int_{V_0} (\vec{D} \cdot \vec{E}) dV. \quad (5.1)$$

$\vec{E} = -\nabla\varphi$ ekanligini inobatga olib va yuqoridagi ifodada bo'laklab integrallash amalini bajarib

$$W_e = \frac{1}{8\pi} \int_{V_0} \varphi \operatorname{div} \vec{D} dV - \frac{1}{8\pi} \int_S \varphi (\vec{n} \cdot \vec{D}) dS \quad (5.2)$$

S sirtini cheksiz katta R radiusga ega sfera deb hisoblamiz. $R \rightarrow \infty$ da potentsial

$$\varphi \sim \frac{Q}{\epsilon_\infty R} \quad (5.3)$$

kabi kamayadi. Bu yerda Q - tizimning to'liq elektr zaryadi, ϵ_∞ - cheksizlikda muhitning dielektrik singdiruvchanligi. Elektr maydoni induksiyasi (siljish) vektori uchun Gauss teoremasiga binoan

$$Q = \frac{1}{4\pi} \oint_S (\vec{n} \cdot \vec{D}) ds. \quad (5.4)$$

Gauss teoremasidan foydalanib ikkinchi integralni quyidagicha baholash mumkin:

$$\frac{1}{8\pi} \left| \int_S \varphi (\vec{n} \cdot \vec{D}) dS \right| = \frac{Q^2}{2\epsilon_\infty R} + O\left(\frac{1}{R^2}\right) \quad (5.5)$$

Ko'rinib turganidek $R \rightarrow \infty$ da, bu ifoda (va bilan birga ikkinchi integral) nolga intiladi. U holda (5.2) formula quyidagi ko'rinishga keladi

$$W_e = \frac{1}{8\pi} \int_{V_0} \varphi \operatorname{div} \vec{D} dV. \quad (5.6)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho \quad (5.7)$$

Ekanligini inobatga olsak (5.6) formula yanada sodda ko'rinishga keladi:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \rho \varphi dV \quad (5.8)$$

Oxirgi formulada integrallash zaryadlar egallab turgan V hajm bo'yicha bajariladi. Agar biz elektrostatik maydon potentsiali φ

$$\Delta\varphi = -4\pi(\rho + \rho_p) \quad (5.9)$$

Puasson tenglamasini qanoatlantirishini va bu tenglamaning yechimi

$$\varphi(\vec{r}) = \int_{V'} \frac{\rho' + \rho_p}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \quad (5.10)$$

ekanligini inobatga olsak, (...) formula quyidagicha yozilishi mumkin:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \int_{V'} \frac{\rho(\rho' + \rho_p)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV dV'. \quad (5.11)$$

(5.11) tenglama umumiy hol uchun yozilgan, va u vakuumda ham, dielektrik muhitda ham elektrostatik maydon energiyasini tavsiflaydi. Xususan, vakuumda $\rho_p = 0$ bo'lganligi sabab, (5.11) formula simmetrik shaklga keladi:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \int_{V'} \frac{\rho\rho'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV dV'. \quad (5.12)$$

Agar zaryadlar nuqtaviy bo'lsa, (5.12) formuladagi integrallar cheksizlikka intiluvchi integrallardan iborat bo'lib, ular zaryadning xususiy energiyalarini tavsiflaydi. Rostdan ham, agar q zaryad a radiusli shar hajmida bir jinsli ravishda taqsimlangan bo'lsa, elektrostatik energiya maydoni

$$W_e = \frac{q^2}{2a} \quad (5.13)$$

ga tengdir. Bu ifoda $a \rightarrow 0$ da cheksizlikka intiladi: $W_e \rightarrow \infty$. Shu sabab diskret (nuqtaviy) zaryadlar tizimi hosil qilgan elektrostatik maydon energiyasini hisoblaganda, shu xususiy yani cheksizlikka intiluvchi energiyasi tashlab yuboriladi. Bu maydon energiyasi xususiy energiyadan boshlanishini anglatadi. Buning oqibatida nuqtaviy zaryadlar tizimi hosil qilgan elektrostatik maydon energiyasi

$$W_e' = \frac{1}{2} \sum_{i \neq k} \frac{q_i q_k}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|} = \frac{1}{2} \sum_i q_i \varphi_i \quad (5.14)$$

formula orqali hisoblanishini topamiz. Bu yerda φ_i i - zaryad joylashgan nuqtada i - zaryaddan boshqa barcha k - zaryadlarning hosil qilgan maydoni potentsiali.

Elektromagnit maydonning eng sodda masalalari bu barqaror (statsionar) masalalardir. Barqaror holda elektromagnit maydonni tavsiflovchi Maksvel tenglamasiga kiruvchi fizikaviy kattaliklar vaqtga bevosita bog'liq bo'lmaydi.

Irnshteyn teoremasi: Faqat elektrostatik kuchlar ta'sirida elektr zaryadlar tizimi (уточивой) muvozanat holatida bo'lishi mumkin emas.

Irnshteyn teoremasi (5.14) formula yordamida isbotlanadi.

Endi dielektrik muhitning elektrostatik maydon energiyasiga qo'shadigan ulushini to'liqroq o'rganamiz.

Elektr maydon kuchlanganligi, siljish va qutblanish vektorlari orasidagi $\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P}$ formulasidan foydalanib myhitning qutblanishi natijasida hosil bo'lgan elektr maydoni energiyasini

$$W_p = \frac{1}{2} \int_{V_0} (\vec{E} \vec{P}) dV \quad (5.15)$$

deb yozsak bo'ladi. Muhitning qutblanishi vektori ta'rifga ko'ra

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} q_i \vec{r}_i = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} q^+ \vec{l}_i. \quad (5.16)$$

Bu yerda $|\vec{l}_i|$ i -molekula-dipolda musbat va manfiy zaryad $q^\pm$ lar orasidagi effektiv masofa. Molekulani o'zaro kvazitarang (kvazielastik) kuchlar bilan bog'langan qarama-qarshi zaryadlar tizimi deb qarab va taranglik koeffitsienti k ni kiritib, taranglik kuchi va elektrostatik kuchlar muvozanatini

$$q_i^+ \vec{E}_i = k \vec{l}_i \quad (5.17)$$

deb yozsak bo'ladi. (5.16) va (5.17) formulalarni inobatga olib, (5.15) formulani

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_i q^+ (\vec{l}_i \vec{E}_i) = \frac{1}{2} \sum_i k l_i^2 \quad (5.18)$$

shaklda yozsak bo'ladi. Demak, dielektrik muhitning elektrostatik maydoni energiyasini undagi molekula-dipollarning taranglashish potentsial energiyasi deb talqin qilish mumkin.

Yuqoridagi natijaviy xulosaga o'xshash yakunga yani (5.15) formula muhitda $\vec{P}$ qutblanish hosil qilish uchun sarflangan ish ekanligiga, biror molekula-dipol modelidan foydalanmagan holda, faqat qutblanish vektori va kuchlanganlik vektori orasida chiziqli bog'lanish mavjud deb faraz qilibgina kelish mumkin.

Rostdan ham $\vec{P}(\vec{E}) = \chi \vec{E}$ bo'lsin. U holda (5.16) formuladan foydalanib va $\vec{E}$ maydon ΔV hajm doirasida kam o'zgaradi deb hisoblab, muhitning bog'langan zaryadlari ustida bajarilgan elementar ish uchun

$$\delta W_e = \sum_i q_i (\vec{E}_i \delta \vec{r}_i) = \int (\vec{E} \delta \vec{P}) dV \quad (5.19)$$

formulani yozsak bo'ladi. (5.19) formulaga $\vec{P}(\vec{E}) = \chi \vec{E}$ ni qo'yib, integrallash amalini bajarib (5.15) formulani qo'lga kiritamiz. Shu sabab (5.15) formula bilan aniqlanadigan energiya dielektrik muhitda kuchlanganligi $\vec{E}$ bo'lgan elektr maydoni hosil qilish uchun sarflangan va muhitda zahiralangan energiya bo'lib hisoblanadi.

2. Zaryadlangan o'tkazgichlar tizimining energiyasi.

Static elektr zaryad o'tkazgichning faqat sirti bo'yicha taqsimlanganligi va bu sirtida potentsialning doimiyligi bois, bunday tizimning elektrostatik energiyasi (5.8) ga muvofiq

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_i \oint_{S_i} \varphi_i \sigma ds = \frac{1}{2} \sum_i \varphi_i \oint_{S_i} \sigma ds = \frac{1}{2} \sum_i \varphi_i Q_i \quad (5.20)$$

ga teng. (5.20) da φ_i va Q_i mos ravishda i - o'tkazgichning zaryadi va potentsiali.

Ma'ruza № 6**Mavzu: Barqaror elektr va magnit maydoni (3- qism)****Auditoriya ishlari:**

Reja:

1. Toklarning hosil qilgan maynit maydoni.
2. Vektor potentsial.
3. Cehklangan toklar tizimi hosil qilgan magnit maydoni (Magnit multipol yoyish).

Mustaqil ta'lim topshiriqlari:

1. O'zgarmas tok hosil qilgan magnit maydoni energiyasi.
2. O'zgarmas elektr toki.

1. Toklarning hosil qilgan maynit maydoni. 2. Vektor potentsial.

O'tgan mashg'ulotlarimizda biz elektrostatika masalalarini qarab, ularni muhokama qilgan edik. Endi bugun magnitostatika masalalarini qarashni boshlaymiz. Magnitostatika masalalarini o'rganishda biz uchun dastlabki tenglamalar M- tizim tenglamalari bo'lib hisoblanadi.

M-tizim:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (6.1)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (6.2)$$

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{M}, \quad (6.3)$$

Bu yerda $\vec{B}$ – va $\vec{H}$ – mos ravishda magnit maydonining induksiya va kuchlanganliklari, $\vec{j}$ - o'tgazuvchanlik toki zichligi, $\vec{M}$ - moddaning qutblanishi vektori. Bir jinsli, izotro va ferromagnit bo'lmagan muhitlar uchun (6.3) munosabat soda ko'rinishga keladi:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (6.4)$$

(6.4) formuladagi μ - moddaning magnit singdiruvchanligi. Yuqoridagi formulalar yordamida

- 1) toklar zichligi $\vec{j}$ berilganda;
- 2) doimiy magnitlar mavjudligida;
- 3) kuchlanganligi $\vec{H}_0$ bo'lgan tashqi magnit maydoni mavjudligida;
- 4) o'tkazgichlar mavjudligida (to'liq toklar berilgan bo'lsa)

magnit maydoni induksiyasi $\vec{B}$ ni hisoblash mumkin.

Keling oldiniga vakuumda berilgan toklar hosil qilgan magnit maydoni induksiyasini topamiz. Buning uchun

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

tenglamalar tizimini yechishimiz lozim. Tok zichligi $\vec{j}$ qanday tenglamaga bo'ysinishini aniqlash uchun (6.5) tenglamalar tizimining birinchi tenglamasining ikkala tomonidan divergentsiya olamiz:

$$\operatorname{div}(\operatorname{rot} \vec{B}) = \frac{4\pi}{c} \operatorname{div} \vec{j} \quad (6.6)$$

Vektor tahlil kursidan ixtiyoriy $\vec{a}$ uchun $\operatorname{div}(\operatorname{rot} \vec{a}) = 0$ munosabat o'rinli bo'lganligidan, tok zichligi vektori qanoatlantiruvchi

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad (6.7)$$

tenglamani qo'lga kiritamiz. Tenglamalar tizimining ikkinchi tenglamasi $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ har doim bajarilishi uchun

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (6.8)$$

bo'lishi shart! $\vec{A}$ miqdor **vektor-potentsial** deb ataladi. (6.8) ni (6.5) tenglamalar tizimining birinchi tenglamasiga qo'yamiz

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \frac{4\pi}{c} \vec{j}. \quad (6.9)$$

Vektor tahlil kursidan ixtiyoriy $\vec{a}$ uchun o'rinli bo'lgan

$$\Delta \vec{a} = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{a}) - \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{a}). \quad (6.10)$$

Munosabatdan foydalanib, (6.9) formulani

$$\Delta \vec{A} - \nabla(\operatorname{div} \vec{A}) = -\frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (6.11)$$

deb yozamiz. Berilgan magnit maydoni induktsiyasi $\vec{B}$ uchun (6.8) formuladan cheksiz ko'p vektor-potentsiallar $\vec{A}$ ni topish mumkin. Yani $\vec{A}$ ning aniqlanishi bir qiymatli emas! Rostdan ham ixtiyoriy skalayr funktsiya ψ uchun

$$\operatorname{rot}(\operatorname{grad} \psi) = 0 \quad (6.12)$$

munosabat o'rinli bo'lganligidan, $\vec{A}$ vektor-potentsial o'rniga, undan biror skalyar funktsiya ψ gradientiga farq qiladigan boshqa bir

$$\vec{A}' = \vec{A} + \text{grad } \psi \quad \text{yani} \quad \vec{A}' = \vec{A} + \nabla \psi \quad (6.13)$$

vektor-potentsialni olish mumkin. Vektor-potentsialning (6.13) formula bo'yicha almashtirilishi **gradient almashtirish** yoki **kalibrli (darjali) almashtirish** deb ataladi. (6.13) ni har doim

$$\text{div } \vec{A}' = 0 \quad (6.14)$$

tanlanishi shart bajariladigan qilib tanlash mumkin. Buning uchun skalyar funktsiya ψ ni

$$\Delta \psi = -\text{div } \vec{A} \quad (6.15)$$

tenglamani qanoatlantiradigan qilib tanlashimiz lozim. U holda, doimo $\text{div } \vec{A} = 0$ deb qabul qilishimiz va vektor-potentsialni

$$\begin{cases} \Delta \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j} \\ \text{div } \vec{A} = 0 \end{cases} \quad (6.16)$$

tenglamalar tizimi yechimi sifatida topishimiz mumkin. Yani vektor-potentsial Puasson tenglamasini qanoatlantirar ekan. Shu Puasson tenglamasini yechib, yechimlar ichidan $\text{div } \vec{A} = 0$ shartni qanoatlantiradiganini olishimiz darkor. Puasson tenglamasining yechimi

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r' \quad (6.17)$$

ko'rinishda yoziladi. (6.17) formula bilan topilgan vektor-potentsial $\vec{A}$ $\text{div } \vec{A} = 0$ shartni qanoatlantiradi.

Uyga topshiriq: (6.17) formula bilan topilgan vektor-potentsial $\vec{A}$ $\text{div } \vec{A} = 0$ shartni qanoatlantirishini tekshiring.

(6.17) yechimga $\Delta \vec{A}_0 = 0$ Laplas tenglamasini va $\text{div } \vec{A} = 0$ shartni qanoatlantiruvchi boshqa yechimni qo'shish mumkin. Agar toklar tizimi fazoda cheklangan bo'lsa va cheksizlikda nolga intiladiga yechimlar talab qilingan bo'lsa, $\vec{A}_0 = 0$ bo'ladi! Chunki vektor-potentsial garmonik funktsiya hisoblanadi va maksimum qoidasiga ko'ra

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \vec{A}_0 = 0$$

bo'lishi uchun $\vec{A}_0 = 0$ bo'lishi shart!

(6.17) formulaga rotor amaliyotini qo'llab magnit maydoni induktsiyasini topamiz:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \int \text{rot} \left(\frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) d^3 r' = \frac{1}{c} \int \left[\nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \vec{j}(\vec{r}') \right] d^3 r'. \quad (6.18)$$

(6.18) dan Bio-Savar-Laplas formulasini qo'lga kiritamiz:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \int \frac{[\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')] }{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3 r'. \quad (6.19)$$

Demak, (6.5) va (6.19) tenglamalari o'zaro ekvivalent ekanligi ko'rsatildi. Agar muhitda magnit maydoni o'rganilayotgan bo'lsa, $\vec{B}$ o'niga $\vec{H}$ qo'yilishi, $\vec{j}$ esa muhitning magnit singdiruvchanligi μ ga ko'paytirilishi kerak.

3. Cehklangan toklar tizimi hosil qilgan magnit maydoni (Magnit multipol yoyish).

a radiusli sferaning hajmi V bo'lib, uning ichida toklarning taqsimoti $\vec{j}$ bilan berilgan bo'lsin. Bu toklarning hosil qilgan magnit maydoni vektor-potentsiali

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3 r'$$

bilan aniqlanadi. Vektor-potentsial ifodasiga kiradigan

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

ni $r > a > r'$ da to'g'ri bo'ladigan Teylor qatoriga yoyamiz

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l!} (\vec{r}' \nabla)^l \frac{1}{r}.$$

va uni (6.17) ga qoyib vektor-potentsial uchun

$$\vec{A}(\vec{r}) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{cl!} \int_V \vec{j}' (\vec{r}' \nabla)^l \frac{1}{r} dV' = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l!} M^{i_1 \dots i_l} \partial_{i_1} \dots \partial_{i_l} \frac{1}{r}. \quad (6.20)$$

ni olamiz. (6.20) ifodaga $M^{i_1 \dots i_l}$ tenzor kiritilgan bo'lib, u 2^l - tartibli (pol) magnit momentni tavsiflaydi va

$$M^{i_1 \dots i_l} = \frac{1}{c} \int_{V'} x'^{i_1} \dots x'^{i_l} \vec{j}' dV' . \quad (6.20)$$

formula bilan aniqlanadi. $M^{i_1 \dots i_l}$ tenzorning har bir komponenti vektordan iborat. Eng kichik tartibli multipol moment

$$M_{(0)} = M^1 = \int_V \vec{j} dV = 0. \quad (6.21)$$

Multipol yoyishning birinchi tartibli hadi

$$\vec{A}_1 = -\frac{1}{c} \int_{V'} \vec{j}' (\vec{r}' \cdot \nabla) \frac{1}{r} dV' = -\frac{1}{2c} \int_{V'} [(\vec{r}' \times \vec{j}') \times \nabla] \frac{1}{r} dV' \quad (6.22)$$

ko'rinishga ega. (6.20) ifodani

$$\vec{m} = \frac{1}{2c} \int_V [\vec{r} \times \vec{j}] dV \quad (6.23)$$

formula bilan aniqlanadigan va **toklar tizimining magnit moment** deb ataluvchi kattalikni kiritib,

$$\vec{A}_1 = \frac{[\vec{m} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (6.24)$$

shaklda yozish mumkin. $r > 0$ da bajariladigan

$$\text{rot} \frac{[\vec{m} \times \vec{r}]}{r^3} = -\nabla \frac{(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^3} \quad (6.25)$$

ayniyatdan foydalanib va elektrostatika analogiyasidek (6.24) ni $\vec{m}$ magnit momentiga ega magnit dipolini tavsiflovchi magnit skalyar potentsiali gradient sifatida yozish mumkin:

$$\vec{B} = -\nabla \frac{(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^3} = -\nabla \psi_1. \quad (6.26)$$

Bu yerda ψ_1 magnit skalyar potentsiali

$$\psi_1 = \frac{(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^3}. \quad (6.27)$$

Misol tariqasida biror kontur Γ bo'yicha o'tayotgan cheklangan chiziqli toklar I tizimini qaraylik. Chiziqli toklar uchun

$$\vec{j}dV = Id\vec{l} \quad (6.28)$$

uchun (6.17) formulaga muvofiq vektor-potentsial

$$\vec{A} = \frac{I}{c} \oint_{\Gamma} \frac{d\vec{l}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (6.29)$$

ba binoan topiladi. Stoks teoremasini qo'llab (6.29) ni Γ konturga tortilgan S sirt orqali oqim orqali ifodalashimiz mumkin:

$$\vec{A} = \frac{I}{c} \oint_S [\vec{n}' \times \nabla'] \frac{ds'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = \frac{I}{c} \oint_S \frac{[\vec{n}' \times (\vec{r} - \vec{r}')] ds'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}. \quad (6.30)$$

(6.30) ni elementar magnit momenti

$$d\vec{m}' = \frac{1}{c} I \vec{n}' ds' \quad (6.31)$$

ni kiritib, magnit juft-qatlamning vektor-potentsiali shaklida tasvirlash mumkin:

$$\vec{A} = \oint_S \frac{[d\vec{m}' \times (\vec{r} - \vec{r}')] }{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (6.32)$$

Agar biz (6.30) ga mos keladigan skalyar magnit potentsialini kiritadigan bo'lsak, u magnit juft-qatlamning vektor-potentsiali formulasiga o'xshash bo'ladi:

$$\psi = \oint_S \frac{(d\vec{m}' \cdot (\vec{r} - \vec{r}'))}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = \frac{I}{c} \Omega. \quad (6.33)$$

Bu yerda Ω – qarayotgan nuqtadan Γ konturning ko'rinish fazoviy burchagi.

Ma'ruza № 7**Mavzu: O'zgaruvchan elektromagnit maydon****Auditoriya ishlari:**

Reja:

1. Bir jinsli muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon.
2. Yassi elektromagnit to'lqin.
3. Zaryadlar va toklarning vakuumda hosil qilgan maydoni
4. Harakatlanayotgan zaryad maydoni.

Mustaqil ta'lim topshiriqlari:

1. Elektromagnit to'lqinlarning muhitlarning yassi chegarasida qaytishi va sinishi
2. Gertsning elektr va magnit vibratorlarining maydoni.
3. Potentsiallarning multipol yoyilishi.

1. Bir jinsli muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon.

Dielektrik va magnit singdiruvchanliklari mos ravishda ε – va μ – bo'lgan muhitda Maksvel tenglamalari quyidagicha yoziladi (differentsial shakli):

$$\text{rot } \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (7.1)$$

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi\rho, \quad (7.2)$$

$$\text{rot } \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad (7.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (7.4)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (7.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (7.6)$$

Erkin elektr zaryadlar va erkin toklar mavjud bo'lmagan fazoning sahosi qaraymiz. Fazoning bu qismida yuqoridagi (7.1) va (7.2) tenglamalar

$$\text{rot } \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0, \quad (7.7)$$

$$\text{div } \vec{D} = 0, \quad (7.8)$$

ko'rinishda yoziladi. ε – va μ – larning doimiyligini e'tiborga olib yuqoridagi tenglamalarni

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (7.9)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0, \quad (7.10)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (7.11)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (7.12)$$

shaklda yozib olamiz. (7.9) tenglamani vaqt bo'yicha differentsiallaymiz:

$$\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (7.13)$$

$$\operatorname{rot} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (7.14)$$

(7.11) formula yordamida (7.14) tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$-\frac{c}{\mu} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (7.15)$$

Vektorlar tahlili kursidan

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \nabla \operatorname{div} \vec{E} - \Delta \vec{E}. \quad (7.16)$$

formuladan foydalanamiz. (7.10) formula tufayli (7.16)

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = -\Delta \vec{E} \quad (7.17)$$

bo'ladi. Natijada (7.15) formula

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{V_f^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (7.18)$$

ko'rinishga keladi. Bu yerda

$$V_f = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (7.19)$$

(7.18) tenglama elektromagnit maydonning fazoda V_f tezlik bilan tarqalishini tavsiflovchi **to'lqin tenglama** deb ataladi. V_f elektromagnit to'lqinning **fazaviy tezligi** deb ataladi. Elektromagnit maydonning elektr

kuchlanganligi vektori $\vec{E}$ (7.18) kabi to'liq tenglamani qanoatlantirgani singari uning magnit maydoni kuchlanganligi $\vec{H}$ ham (7.18) tenglamaga o'xshash

$$\Delta \vec{H} - \frac{1}{V_f^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (7.20)$$

to'liq tenglamasini qanoatlantiradi. Demak, elektromagnit maydonning fazoda tarqalishini tavsiflovchi jaroyon, elektromagnit to'liqning $\vec{E}$ va $\vec{H}$ vektorlar, umumiy ko'rinishi

$$\Delta \psi - \frac{1}{V_f^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (7.21)$$

kabi ikkinchi tartibli differentsial tenglamalarni qanoatlantirar ekan. (7.21) tenglamaning yechimini bir o'lchamli holat, yani ψ faqat x va t ga bog'liq bo'lgan holda, yozish qulayroq. Bir o'lchamli holda (7.21) tenglama

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{V_f^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \psi = 0. \quad (7.22)$$

ko'rinishda yoziladi. (7.22) formuladagi qavni ko'paytiruvchilarga ajratamiz:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{V_f^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \right).$$

$\xi = x - V_f t$ va $\eta = x + V_f t$ kabi yangi o'zgaruvchilarni kiritib,

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \quad \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial \eta}$$

ekanligini inobatga olib, (7.22) tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta} = 0. \quad (7.23)$$

(7.23) ning umumiy yechimi

$$\psi(x, t) = f_1(\xi) + f_2(\eta) = f_1(x - V_f t) + f_2(x + V_f t) \quad (7.24)$$

ko'rinishda yoziladi. Bu yerda f_1 va f_2 lar ixtiyoriy funktsiyalar. (7.24) x o'qi bo'yicha qarama qarshi yo'nalishlarda tarqaluvchi ikki to'liqinni tavsiflaydi.

(7.22) tenglamani d'Alamber operatorini

$$\square = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}. \quad (7.25)$$

ni kiritib soda

$$\square \psi = 0 \quad (7.26)$$

ko'rinishda yozsa bo'ladi. (7.26) ko'rinishdagi tenglama d'Alamber tenglamasi deb ataladi. d'Alamber tenglamasining yechimini topish uchun boshlang'ich ($t=0$ da ψ ning va $\partial \psi / \partial t$ ning qiymatlari) va chegaraviy shartlar (biror S sirtida ψ ning yoki $(\vec{n} \nabla) \psi$ qiymatlari) berilgan bo'lishi shart. Tenglamaning yechimi yagonadir. d'Alamber tenglamasining yechimi boshlang'ich vaqtda berilgan ψ va $\partial \psi / \partial t$ larga mos keluvchi ikki doimiy bilan aniqlanadi. Agar har qanday ψ yechimga $\partial \psi / \partial t$ yechimni mos qo'yich mumkinligini inobatga olsak, faqat bitta doimiy bilan aniqlanadigan yechimni topish bilan kifoyalansak ham bo'ladi.

Agar qidirilayotgan yechim sferik-simmetrik bo'lsa, $\psi = \psi(r, t)$ bo'ladi, (7.26) tenglama esa

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (7.27)$$

deb yoziladi. (7.27) yechim esa

$$\psi(r, t) = \frac{1}{r} [f(r - ct) + g(r + ct)] \quad (7.28)$$

kabi yoziladi.

Elektromagnit maydon nazariyasida d'Alamberning $D_0(r, t)$ bilan belgilanadigan xususiy yechimi alohida ahamiyat kasb etadi. $D_0(r, t)$ yechim sferik-simmetrik bo'lib, quyidagi boshlang'ich shartlarga bo'ysinadi:

$$D_0(r, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial}{\partial t} D_0 \right|_{t=0} = \delta(\vec{r}). \quad (7.29)$$

(7.28) ni (7.29) ga qo'yib

$$f(r) = -g(r), \quad \frac{c}{r} [-f'(r) + g'(r)] = -\frac{\delta'(r)}{2\pi r} \quad (7.28)$$

larni topamiz. (7.28) ni olishda $\delta(\vec{r})$ - funktsiyaning sferik koordinatalar tizimidagi tasvirlanishi

$$\delta(\vec{r}) = \frac{\delta(r)}{2\pi r} \quad (7.30)$$

va uning

$$\delta'(r) = -\delta(r) \quad (7.31)$$

xossasidan foydalandik.(7.28) dan

$$f(r) = \frac{\delta(r)}{2\pi c} \quad (7.32)$$

ni topamiz. U holda d'Alambertning xususiy yechimi uchun

$$D_0(r, t) = \frac{1}{4\pi rc} [\delta(r - ct) - \delta(r + ct)] \quad (7.33)$$

ifodani qo'lga kiritamiz.

2. Yassi elektromagnit to'lqin.

Elektromagnit to'lqinning faqat x- o'qi bo'yicha $V_f = c / \sqrt{\epsilon\mu}$ tezlik bilan tarqalishini qaraymiz. Bunda elektromagnit maydon faqat $x - V_f t$ ga bog'liq bo'ladi. Bunday elektromagnit to'lqin uchun (7.9)-(7.12) tenglamalar tizimi koordinatalar tashkil etuvchilari uchun quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_z}{\partial x} &= \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} & \frac{\partial E_z}{\partial x} &= \frac{\mu}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t} & \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E_z}{\partial t} & \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t} & \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{\partial H_x}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (7.34)$$

(7.34) tenglamalar tizimining yechimi

$$\begin{aligned} E_y &= E^{(1)}(x - V_f t), \quad H_z = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^{(1)}(x - V_f t), \quad E_x = const \\ E_z &= E^{(2)}(x - V_f t), \quad H_y = -\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^{(2)}(x - V_f t), \quad H_x = const \end{aligned}, \quad (7.35)$$

bo'lib, bu yerda $E^{(1)}$ va $E^{(2)}$ lar $x - V_f t$ argumentga bog'liq ixtiyoriy funktsiyalardir. Fizikaviy nuqtai nazardan qiziq bo'lmagan ikkita doimiy E_x va H_x larni yo'qotib, (7.34) tenglamalar tizimining ikkita o'zaro bog'lanmagan yechimini topamiz:

$$E_y = E^{(1)}(x - V_f t), \quad \sqrt{\varepsilon} E_y = \sqrt{\mu} H_z, \quad E_x = E_z = H_x = H_y = 0, \quad . \quad (7.36)$$

$$E_z = E^{(2)}(x - V_f t), \quad \sqrt{\varepsilon} E_z = \sqrt{\mu} H_y, \quad E_x = E_z = H_x = H_y = 0. \quad (7.37)$$

x - o'qi bo'yicha birlik $\vec{s}$ yo'naltirib $\vec{E}$ va $\vec{H}$ lar

$$\sqrt{\mu} \vec{H} = \sqrt{\varepsilon} [\vec{s} \times \vec{E}], \quad (7.38)$$

yoki

$$\vec{B} = \sqrt{\varepsilon\mu} [\vec{s} \times \vec{E}], \quad \vec{B} = \frac{c}{V_f} [\vec{s} \times \vec{E}] \quad (7.39)$$

munosabatlar orqali o'zaro bog'liq ekanligiga amin bo'lamiz. Topilgan bir-biri bilan o'zaro bog'liq bo'lmagan yechimlar elektromagnit to'lqinining ikki chiziqli qutblanishiga mos keladi. Bu yechimlarning e'tibirga molik tomoni elektromagnit to'lqinlarining ko'ndalang to'lqin ekanligidadir. Elektromagnit to'lqinning ko'ndalangligi

$$(\vec{s} \cdot \vec{B}) = (\vec{s} \cdot \vec{E}) = 0, \quad (7.40)$$

munosabat bilan beriladi. U holda elektrmagnit maydoni energiyasi zichligi w va Poyting vektori $\vec{S}$ ni quyidagicha yozish mumkin:

$$w = \frac{\varepsilon E^2}{4\pi} = \frac{\mu B^2}{4\pi}, \quad (7.41)$$

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}], \quad (7.42)$$

$$\vec{S} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} w \vec{s}, \quad (7.43)$$

Poyting vektori $\vec{S}$ elektromagnit maydoni energiyasi oqimini tavsiflaydi, uning moduli

$$S = \frac{c}{4\pi} |[\vec{E} \times \vec{H}]| = \frac{c}{4\pi} EH = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} w, \quad (7.44)$$

ga teng.

Elektromagnit to'qlinlarning xususiy holi yassi monoxromatik to'qlinlar bo'lib, unda $E^{(1)}$ va $E^{(2)}$ lar

$$A \cos [k(x - V_f t) + \varphi], \quad (7.45)$$

ko'rinishda tanlab olinadi. Bu yerda A va φ lar qandaydir doimiylar, ular mos ravishda to'qlin amplitudasi va to'qlin fazasi deb ataladi.

Ko'pchilik hollarda chiziqli qutblangan monoxromatik to'qlin kompleks shaklda ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 e^{i[\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi]}, & \vec{E}_0^* &= \vec{E}_0, & \vec{B} &= \frac{c}{V_f} [\vec{s} \times \vec{E}], \\ (\vec{s} \cdot \vec{E}) &= 0, & \vec{k} &= \vec{s} \frac{\omega}{V_f}. \end{aligned} \quad (7.46)$$

Bu yerda $\vec{k}$ - to'qlin vektori deb ataladi.

Elliptic qutblangan elektromagnit to'qlin quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= (\vec{E}_0^{(1)} + i\vec{E}_0^{(2)}) e^{i[\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi]}, & \vec{E}_0^{*(1,2)} &= \vec{E}_0^{(1,2)}, \\ \vec{B} &= \frac{c}{V_f} [\vec{s} \times \vec{E}], & (\vec{s} \cdot \vec{E}) &= 0, \\ (\vec{E}_0^{(1)} \cdot \vec{E}_0^{(2)}) &= 0, & \vec{k} &= \vec{s} \frac{\omega}{V_f}. \end{aligned} \quad (7.47)$$

Monoxromatik yassi to'qlin har doim chiziqli qutblangan to'qlinlar superpozitsiyasi kabi ifodalanishi mumkin. Bunda har bir chiziqli qutblangan to'qlin o'zining amplitudasi, birlik qutblanish vektori $\vec{e}_r$ ($r = 1, 2$) va to'qlin vektori $\vec{k}$ ga ega bo'ladi. Birlik qutblanish vektori $\vec{e}_1$, $\vec{e}_2$ va to'qlin vektori $\vec{k}$ o'zaro ortogonal uchlikni hosil qiladi. Har bir to'qlin vektori $\vec{k}$ ga to'qlin chastotasining ikki qiymati mos keladi: $\omega = \pm k V_f$. Ishoralari bilan farq qiladigan chastotalar qarama-qarshi yo'nalishda tarqaluvchi to'qlinlarni tavsiflaydi.

Yuqoridalarni xulosa qilib, zaryad manbalari va toklar bo'lmagan bir jinsli muhitda Maksvel tenglamalarining umumiy yechimi sifatida

$$\left(\vec{E}_1(\vec{k}) e^{-ikV_f t} + \vec{E}_2(\vec{k}) e^{ikV_f t} \right) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}, \quad (7.48)$$

kabi xususiy yechimlarning superpozitsiyasini olish mumkin deya olamiz. Yani

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \int \left(\vec{E}_1(\vec{k}) e^{-ikV_f t} + \vec{E}_2(\vec{k}) e^{ikV_f t} \right) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} d\vec{k}, \quad (7.49)$$

bu yerda $\omega = |\vec{k}| V_f$, $(\vec{k} \cdot \vec{E}_{1,2}) = 0$, $d\vec{k} = d^3k = dk_x dk_y dk_z$. (7.49) formula bilan berilgan yechim

$$\vec{E}_1(\vec{k}) = \vec{E}_2^*(-\vec{k}), \quad (7.50)$$

shart bajarilganda haqiqiy maydonni ifodalaydi.

3. Zaryadlar va toklarning vakuumda hosil qilgan maydoni

Yuqorida ko'rib o'tganimizdek, Maksvel tenglamasi vakuumda c tezlik bilan tarqaluvchi elektromagnit to'lqinlar superpozitsiyasi kabi erkin elektromagnit maydon yechimiga ega. Endi zaryadlar va toklar bo'lganda elektromagnit maydonni qarab chiqamiz. Zaryadlar va toklar mos ravishda ularning hajmiy zichligi ρ va tok zijligi $\vec{j}$ bilan berilgan bo'lsin. Uzluksizlik tenglamasiga muvofiq ular o'zaro

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\vec{r}, t) + \text{div } \vec{j}(\vec{r}, t) = 0, \quad (7.51)$$

munosabat bilan bog'liq. Bu manbalar hosil qilgan elektromagnit maydonining $\vec{E}$ va $\vec{B}$ larni topish uchun

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} & (a) \quad \text{div } \vec{E} &= 4\pi\rho & (b) \\ \text{rot } \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 & (c) \quad \text{div } \vec{B} &= 0 & (d) \end{aligned}, \quad (7.52)$$

ko'rinishdagi Maksvel tenglamalaridan foydalanamiz. O'tgan ma'ruzalarimizda ta'kidlaganimizdek

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (7.53)$$

yo'zib olamiz. U holda (7.52 c) tenglama

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (7.54)$$

ko'rinishda, uning yechimi esa

$$\vec{E} = -\nabla \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (7.55)$$

bo'ladi. (7.53) va (7.55) formulalarni (7.52) tenglamalar tizimiga qo'yib φ va $\vec{A}$ potentsiallar uchun quyidagi tenglamalarni qo'lga kiritamiz:

$$\Delta \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \nabla \left(\operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

$$\Delta \varphi + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \vec{A} = -4\pi \rho$$
(7.56)

(7.53) va (7.55) tenglamalar φ va $\vec{A}$ potentsiallarni bir qiymatli aniqlay olmaydilar, chunki bu munosabatlar orqali topiladigan $\vec{E}$ va $\vec{B}$ lar

$$\vec{A} = \vec{A}' + \nabla \psi \quad \text{va} \quad \varphi = \varphi' - \frac{1}{c} \frac{\partial \psi}{\partial t}$$
(7.57)

almashtirishlarda o'zgarmaydilar. (7.57) almashtirishlari **kalibrli almashtirish** deb ataladi. Potentsiallarning bir qiymatli bo'lmay aniqlanishini (7.56) tenglamani soddalashtirish uchun qo'llasak bo'ladi. **Lorents sharti**

$$\operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$$
(7.58)

deb ataladigan shartni qabul qilsak, potentsiallar uchun quyidagi tenglamalar tizimini qo'lga kiritamiz:

$$\square \varphi = -4\pi \rho, \quad \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad \operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0.$$
(7.59)

Bunda agar Lorents shartini qanoatlantirmaydigan potentsiallar φ' va $\vec{A}'$ bo'lsa, (7.57) **kalibrli almashtirish** natijasida potentsiallar yangi Lorents shartini qanoatlantiruvchi φ va $\vec{A}$ potentsiallarga o'tgan bo'lamiz. Bu almashtirishda agnit maydonning skalyar potentsiali ψ

$$\square \psi = - \left(\operatorname{div} \vec{A}' + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi'}{\partial t} \right)$$
(7.60)

tenglamadan topiladi.

Potentsiallarga nisbatan Lorents shartidan boshqa shart ham qo'yish mumkin. Masalan, **Kulon** yoki **ko'ndalang** darajalanishida («кулоновская» или «поперечная» калибровка)

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0$$
(7.61)

kiritiladi. Bu darajalanishga mos keluvchi tenglamalar tizimi

$$\Delta \varphi = -4\pi \rho, \quad \square \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \left(\vec{j} + \frac{1}{4\pi} \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right), \quad \operatorname{div} \vec{A} = 0.$$
(7.62)

ko'rinishga ega. (7.62) tenglamalar tizimidan ko'rinishga ega Kulon darajalanishida φ uchun tenglama statik tavsifga ega bo'ladi. Bu bilan bir tomondan Kulon statik maydoni nazarda tutilsa, ikkinchi tomondan

yassi to'lqinlar uchun $\vec{A} \sim \exp[i\vec{k} \cdot \vec{r}]$ va (7.61) shart "ko'ndalanglik" sharti $(\vec{k} \cdot \vec{A}) = 0$ ga ekvivalent ekanligi nazarda tutiladi.

4. Harakatlanayotgan zaryad maydoni.

Maksvel-Lorents tenglamalari

Auditoriya ishlari:

Reja:

1. Lorentsning elektron nazariyasining asosiy tamoyillari.
2. Maksvel-Lorents tenglamalari va Maksvelning makroskopik tenglamalari.

Mustaqil ta'lim topshiriqlari:

1. O'zgarmas elektr maydonida dielektriklar

Oldingi ma'ruzalarimizda aytib o'tilganidek Maksvelning makroskopik elektrodinamikasi negizida muhitlarda kechadigan elektromagnit jarayonlarni fenomenologik tarzda

$$\vec{P} = \vec{P}(\vec{E}, \vec{B}), \quad \vec{M} = \vec{M}(\vec{E}, \vec{B}), \quad \vec{j} = \vec{j}(\vec{E}, \vec{B}) \quad (1)$$

munosabatlar bilan tavsiflash yotadi. Bu munosabatlar umumlashtirilgan tajribalar natijasi hisoblanadi. XIX asr oxiriga kelib elektronning kashf etildi va uning modda atomlarining tarkibiriga kirishi aniqlandi. Atomlar tarkibiga elektron zaryadiga karrali zaryadli zarralar kirishi aniqlandi. Shu sababli moddalarning makroskopik parametrlari ϵ (dielektrik singdiruvchanlik), μ (magnit singdiruvchanlik), σ (elektr o'tkazuvchanligi) va boshqalarini moddalarning atom strukturasi va elektronlarning mavjudligini inobatga oluvchi model negizida tushuntirish ehtiyoji tug'ildi. Bu muammo asosan golland fizigi G.Lorents (1853-1928) tomonidan qo'yilib yechilgan edi.

Lorentsning elektron nazariyasining asosiy tamoyillari.

Lorents o'zining asosiy asari "Elektronlar nazariyasi" da moddalarning elektr, magnit, optik va b. xossalarini faqat ϵ , μ , σ parametrlar orqali tushuntirish yetarli emasligini takidlaydi. Lorents fikricha modda ichidagi elektromagnit jarayonlarni tushuntirishda fundamental rol elektronlarga berilishi lozim. Elektron deganda Lorents atom tarkibiga kiruvchi barcha zaryadlangan zarralarni yani manfiy elektronlarni va musbat zaryadlangan atom yadrolarini ham tushungan. Lorents

o'zi tuzgan rejaga amal qilgan holda o'zining "elektron nazariyasi" ni ishlab chiqish uchun 1888 yili quyidagi farazlarni tallaffuz etadi:

1. Barcha moddalar manfiy va musbat zaryadlangan elektronlardan tashkil topgan. Elektronlardan boshqa hech qanday material ob'ekt yo'q.
2. Elektronlar elektromagnit efirda bo'lishadi. Elektromagnit efir holati Maksvel tenglamalariga bo'ysinadigan vakuumdagi elektromagnit maydon bilan tavsiflanadi.
3. Elektronnni juda kichik hajm ichida ρ zichlik bilan taqsimlangan zaryadli sharcha sifatida qarash mumkin.
4. Elektronning harakatini unga ta'sir etuvchi kuchning hajmiy zichligi

$$\vec{f} = \rho(\vec{E} + c^{-1}[\vec{V} \times \vec{B}]) \quad (2)$$

- bilan aniqlanadi.
5. Makroskopik maydon mikroskopik maydonlarning fazo va vaqt bo'yicha olingan o'rtacha qiymatlaridir.
 6. Efir biror inertsial sanoq sistemasiga nisbatan tinch bo'ladi.

Fizikaning keyingi rivoji yuqoridagi farazlarning hammasi ham to'g'ri emasligini ko'rsatdi. Avvalambor atom ichidagi jarayonlarni o'rganishda klassik fizika qonunlarini qo'llab bo'lmasligi ma'lum bo'ldi. Atom jarayonlarga nisbatan klassik qonunlar o'rniga kvant fizikasi qonunlari ishlatiladi. Elektonga ta'sir etuvchi kuchlar faqat elektromagnit kuchlar bo'lib qolmay, balki spin-spin ta'sirlashuvi, almashish ta'sirlashuvi, spin-orbital ta'sirlashuvi va b. ta'sirlashuvlar borligi ma'lum bo'ldi. Qolaversa efirning ham yo'qligi aniqlandi. Hozirgi zamonaviy nuqtai nazardan Lorentsning farazlarini quyidagicha qabul qilish mumkin:

1. Modda atom strukturasi ega. Moddaning elektromagnit xossalari yengil, manfiy $e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$ zaryad bilan zaryadlangan elektron va og'ir, elektron zaryadiga karra musbat zaryadlangan zarralar bilan bevosita bog'liq.

2. Bu elementar zaryadlar mikroskopik elektromagnit maydon manbalari bo'lib, zarralardan tashqarida Maksvel-Lorents tenglamalariga bo'ysinadi yani Maksvelning vakuumdagi tenglamalariga.
3. Atom, molekula va elektron modelini elektromagnit tabiatga ega bo'lmagan kuchlarni kiritmasdan tuzib bo'lmaydi va shu sabab ularning strukturalari postulatlariga tayanishi kerak.
4. Makroskopik $\vec{E}$ va $\vec{B}$ maydonlar mikroskopik $\vec{e}$ va $\vec{b}$ maydonlarning fazo va vaqt bo'yicha hisoblangan o'rtacha qiymatlaridir.
5. $\vec{e}$ va $\vec{b}$ maydonlar uchun Maksvel-Lorents tenglamalari va zaryadlarning harakat tenglamalari Lorents almashtirishlariga nisbatan kovariant (invariant) bo'lishi shart. Shu sabab efir tushunchasining kiritilishi lozim emas.

Maksvel-Lorents tenglamalari va Maksvelning makroskopik tenglamalari.

Yuqorida bayon etilgan farazlarga binoan $\vec{e}$ va $\vec{b}$ mikroskopik maydonlar uchun Maksvel-Lorents tenglamalari quyidagicha yoziladi:

$$\text{rot } \vec{b} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}^{\text{micro}}, \quad \text{div } \vec{e} = 4\pi \rho^{\text{micro}}, \quad \text{rot } \vec{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{b}}{\partial t}, \quad \text{div } \vec{b} = 0. \quad (3)$$

Makroskopik tok va zaryadlarning zichligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\rho^{\text{micro}}(\vec{r}, t) = \sum_i \rho_i(\vec{r}, t), \quad \vec{j}^{\text{micro}}(\vec{r}, t) = \sum_i \vec{j}_i(\vec{r}, t), \quad (4)$$

bu yerda ρ_i va $\vec{j}_i$ lar mos ravishda i – zarradagi zaryad zichligi va shu zarraga mos tok zichligi. Agar zarralarni nuqtaviy deb hisoblasak

$$\rho_i = \rho_i^{\text{nuq}}(\vec{r}, t) = e_i \delta[\vec{r} - \vec{r}_i(t)], \quad \vec{j}_i = \vec{j}_i^{\text{nuq}}(\vec{r}, t) = e_i \vec{v}_i \delta[\vec{r} - \vec{r}_i(t)] \quad (5)$$

bo'ladi, bunda $\vec{r}_i(t)$ - zarra vaziyatining radius vektori, $\vec{v}(t)$ - zarraning tezligi, e_i - zarraning zaryadi. Ammo zaryad va tok zichliklarining bunday aniqlanishida zaryadlangan zarralarning xususiy elektr va magnit momentlarga ega bo'lishi

inobatga olinmay qoladi. Zarralarning bunday strukturaviy effektlarini ρ^{micro} va $\vec{j}^{\text{micro}}$ larga

$$\rho'_i = -\text{div } \vec{\pi}_i \text{ va } \vec{j}'_i = \frac{\partial \vec{\pi}_i}{\partial t} + c \text{ rot } \vec{\mu}_i \quad (6)$$

munosabatlar bilan aniqlanadigan manba funktsiyalarni qo'shish orqali inobatga olinadi. (6) formuladagi $\vec{\pi}_i$ - va $\vec{\mu}_i$ - yordamchi vektorlar bo'lib, i - zarradan tashqarida nolga teng va shu sabab barcha hisob-kitoblarda δ - simon funktsiya deb hisoblanadi. Natijada quyidagiga kelimiz:

$$\rho^{\text{micro}}(\vec{r}, t) = \sum_i e_i \delta[\vec{r} - \vec{r}_i(t)] - \text{div } \vec{\pi}_i, \quad (7)$$

$$\vec{j}^{\text{micro}}(\vec{r}, t) = \sum_i \left\{ e_i \vec{v}_i \delta[\vec{r} - \vec{r}_i(t)] + \frac{\partial \vec{\pi}_i}{\partial t} + c \text{ rot } \vec{\mu}_i \right\}. \quad (8)$$

Zaryadlangan zarralarning juda murakkab va ayqash uyqash traektoriyalar bo'yicha harakatlanganligi sabab, ular tamonnidan hosil etiladigan $\vec{e}$ va $\vec{b}$ mikromaydonlar tasodifiy va nomuntazam (uzlukli) bo'ladi. Shu bilan birga Maksvel tenglamalariga bo'ysinuvchi $\vec{E}$ va $\vec{B}$ makroskopik maydanolar muntazan (uzluksiz) funktsiyalar orqali ifodalanadi, chunki ular (7) va (8) formulalar bilan aniqlanadigan mikroskopik miqdorlarning o'rtacha qiymatlari mos keluvchi makroskopik zarya va tok manba $\rho^{\text{to'liq}}$ va $\vec{j}^{\text{to'liq}}$ lar tomonidan hosil qilinadi. Shu sabab Maksvelning makroskopik tenglamalari Maksvel-Lorentsning mikroskopik tenglamalarini o'rtacha miqdorga keltirishda kelib chiqishi kerak.

Biz bu yerda biror $f(\vec{r}, t)$ funktsiyaning o'rtacha qiymati deganda shu funktsiyaning cheksiz kichik fizikaviy hajm ΔV va cheksiz kichik fizikaviy vaqt intervali Δt bo'yicha

$$\langle f(\vec{r}, t) \rangle \equiv \frac{1}{\Delta V \Delta t} \iint_{\Delta t, \Delta V} f(\vec{r} + \vec{r}', t + t') dt' dV' \quad (9)$$

formula bilan aniqlanadigan qiymatini tushunamiz. Shu yerda biz yuqorida aytilgan ikki tushunchani to'g'ri tushunib olishimiz kerak. Bular cheksiz kichik fizikaviy hajm va vaqt intervallaridir.

Cheksiz kichik fizikaviy hajm deganda jismning hajmidan etarlicha kichik, lekin shu bilan birga o'zida etarlicha ko'p zarralarni sig'diradigan hajm tushuniladi. Agar zarralar orasidagi masofa l , jismning chiziqli o'lchami

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

bo'lsa cheksiz kichik fizikaviy hajm ΔV quyidagi shartni qanoatlantirishi lozim:

$$l^3 \ll \Delta V \ll L^3.$$

Fizikaviy miqdorlardan fazo (hajm) bo'yicha o'rtacha qiymat olish makroskopik nazariyada ko'p sonli zarralardan tashkil topgan ob'ektlar o'rganiladi.

Shu nuqtai nazardan miqdorlardan vaqt bo'yicha o'rtacha qiymat olish fazo bo'yicha hisoblangan o'rtacha qiymatlarning o'zlari ham zarralarning tartibsiz harakati tufayli vaqt bo'yicha xaotik (tartibsiz) o'zgaradigan bo'lishi bilan asoslanadi. Agar $\vec{v}_0$ - zarralarning o'rtacha issiqlik tezligi bo'lsa, mikroskopik miqdorlarning o'zgarish vaqtini $t_0 = l/v_0$ bilan tavsiflash mumkin. Boshqa tomondan biz doimo makroskopik sistemani tavsiflaydigan biror T vaqt miqdorni kiritishimiz mumkin. Odatda bu miqdor sifatida makroskopik sistemaning relaktatsiya vaqti yoki davriy jarayonlarda tebranishlar davri kiritiladi. U holda cheksiz kichik fizikaviy vaqt intervali Δt deganda

$$t_0 \ll \Delta t \ll T$$

shartni qanoatlantiruvchi vaqt intervali tushuniladi.

O'rtacha qiymatni hisoblash formulasi ta'rifiga binoan o'rtacha qiymat olish amali chiziqli va quyidagi xossalarga ega

$$\nabla \langle f \rangle = \langle \nabla f \rangle, \quad \frac{\partial}{\partial t} \langle f \rangle = \left\langle \frac{\partial f}{\partial t} \right\rangle. \quad (10)$$

(9) formulani Maksvel-Lorents formulalariga qo'llab va (10) xossalardan foydalanib quyidagilarni topamiz:

$$\text{rot} \langle \vec{b} \rangle = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \langle \vec{e} \rangle + \frac{4\pi}{c} \langle \vec{j}^{\text{micro}} \rangle, \quad \text{div} \langle \vec{e} \rangle = 4\pi \langle \rho^{\text{micro}} \rangle, \quad \text{rot} \langle \vec{e} \rangle = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \langle \vec{b} \rangle, \quad \text{div} \langle \vec{b} \rangle = 0. \quad (11)$$

(11)- tenglamalarni Maksvelning makroskopik tenglamalari

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad \text{div} \vec{D} = 4\pi \rho, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad (12)$$

bilan taqqoslab, ularning bir biriga mosligini ta'minlash uchun

$$\langle \vec{e} \rangle = \vec{E}, \quad \langle \rho^{\text{micro}} \rangle = \rho^{\text{toliq}} = \rho - \text{div } \vec{P}, \quad \langle \vec{b} \rangle = \vec{B}, \quad \langle \vec{j}^{\text{micro}} \rangle = \vec{j}^{\text{toliq}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + c \text{div } \vec{M} \quad (13)$$

hisoblashimiz kerak ekanligini aniqlaymiz.

Bu yerda

$$\vec{P} = \sum_i \langle \pi_i \rangle + \frac{1}{\Delta V} \sum_{\alpha \in \Delta V} e_{\alpha} \vec{r}_{\alpha}, \quad \vec{M} = \sum_i \langle \mu_i \rangle + \frac{1}{2c\Delta V} \sum_{\alpha \in \Delta V} e_{\alpha} [\vec{r}_{\alpha} \times \vec{v}_{\alpha}] \quad (14)$$

bo'lib, yig'indining ustidagi to'lqin belgisi Δt vaqt intervali bo'yicha o'rtacha qiymat olinishini anglatadi. (14) formuladagi mikroskopik hisoblashlar (elektron nazariya) bilan topilgan $\vec{P}$ va $\vec{M}$ vektorlari oldingi ma'ruzalarimizda fenomenologik yo'l bilan aniqlangan qutblanish vektori va magnitlanish vektorlaridan faqat qo'shimcha vaqt bo'yicha o'rtacha qiymatning olinishi bilan farq qilar ekan. Shu sabab biz ularni ($\vec{P}$ va $\vec{M}$) muhitning elektr dipol momenti va magnit dipol momentlarining o'rtacha zichliklari deb talqin qilishimiz mumkin. Zaryadlar zichligi va tok zichligini erkin zaryadlar zichligining nuqtaviy qismlaridan o'rtacha qiymat olish bilan topiladi. Erkin zaryadlarni β indeks bilan belgilab, yozamiz:

$$\rho = \sum_{\beta} e_{\beta} \langle \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\beta}) \rangle, \quad \vec{j} = \sum_{\beta} e_{\beta} \langle \vec{v}_{\beta} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\beta}) \rangle \quad (15)$$

Shunday qilib Lorents yaratgan mikroskopik elektron nazariyada Maksvelning makroskopik tenglamalari Maksvel-Lorentsning mos tenglamalarini fazoviy va vaqtiy o'rtacha hisoblash natijasida topilar ekan. Elektron nazariyaning keyingi vazifasi moddaning elektromagnit holarini tavsiflovchi

$$\vec{P} = \vec{P}(\vec{E}, \vec{B}), \quad \vec{M} = \vec{M}(\vec{E}, \vec{B}) \quad (16)$$

holat tenglamalarini har bir konkret masalalarda aniqlashdir.

Mavzu: Elektromagnit maydon energiyasi

Fizikaning elektrodinamika bo'limida ham, boshqa bo'limlardagidek, energiyaning saqlanish qonuni katta ahamiyat kasb etadi. Elektromagnit maydonda sodir bo'ladigan jarayonlarni o'rganish, ularni tahlil qilish va bashorat qilish energiyaning saqlanish qonunlari tenglamalari asosida bajarish mumkin. Jumladan elektromagnit maydonning o'ziga ham, xuddi materiyaning barcha turlari singari energiyaga egaligi, biror energiya miqdori qiyoslanishi mumkin. Elektromagnit maydon energiyaga ega bo'lishi, bu energiyaning fazoda vaqt bo'yicha ko'chishi yani uzatilishi, va umumiy energetik almashuv jarayonlarida ishtirok etishi mumkin.

Keling bu holni ko'rib chiqamiz.

Qo'zg'almas o'tkazgichlar, dielektriklar va magnetiklardan tashkil topgan barqaror tizimni qaraylik. Tizimni tavsiflovchi asosiy parametrlar bu: uning o'tkazuvchanligi $\sigma(\vec{r})$, dielektrik singdiruvchanligi $\varepsilon(\vec{r})$, magnit singdiruvchanligi $\mu(\vec{r})$. Umuman olganda tizim anizotrop deb qaralishi mumkin. Elektromagnit maydonda tizim tarkibiga kiruvchi elektr zaryadlariga

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v} \times \vec{B}] \right) \quad (\text{eme-1})$$

kuchi ta'sir qiladi. tezligi $\vec{v}_i$ teng zaryadga $\vec{F}_i$ kuch ta'sir qiladi va uning ustidan vaqt birligi ichida $(\vec{F}_i \cdot \vec{v}_i)$ ish bajaradi. Butun tizim tarkibida bu ish

$$\sum_{i \in \Delta V} (\vec{F}_i \cdot \vec{v}_i) \quad (\text{eme-2})$$

ga, to'liq ishni bajarishga sarflanuvchi energiya quvvati esa

$$\frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} (\vec{F}_i \cdot \vec{v}_i) = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} q_i (\vec{v}_i \times \vec{E}_i) \quad (\text{eme-3})$$

bilan beriladi. Yani ishni faqat elektr kuchlari bajaradi.

Barqaror tizimda energiyaning saqlanish qonuniga binoan maydon tomonidan bajarilgan ish issiqlik shaklida atrofga chiqishi lozim. Unda (eme-3) ifoda ajralayotgan issiqlik quvvatining hajmiy zichligini tavsiflaydi.

Erkin zaryadlar qaralayotganda mikroskopik $\vec{E}_i$ maydon makroskopik $\vec{E}$ maydon bilan almashtirilishi mumkin. Elektr toki zichligi ta'rifi formulasi

$$\vec{j} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} q_i \vec{v}_i \quad (\text{eme-4})$$

dan foydalanib (eme-3) ifodani

$$q = (\vec{j} \cdot \vec{E}) \quad (\text{eme-5})$$

deb yozamiz. Agar qaralayotgan o'tkazgich Ohm qonuniga bo'ysinsa yani

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{eme-6})$$

bo'lsa

$$q = (\vec{j} \cdot \vec{E}) = \sigma E^2 = \frac{j^2}{\sigma} = \rho j^2 \text{ yani } q = \rho j^2. \quad (\text{eme-7})$$

(eme-7) munosabat **Joul-Lens qonunining differentsial shakli** bo'lib unga ko'ra o'tkazgichda vaqt birligi ichida ajralib chiquvchi issiqlik miqdori quvvati o'tkazgichning solishtirma qarshiligiga va tok zichligining kvadratiga to'g'ri proporsional.

Vaqt birligi ichida o'tkazgichning butun hajmida ajraladigan issiqlik miqdori esa

$$P = \int_V q dV = \int_V (\vec{j} \cdot \vec{E}) dV \quad (\text{eme-8})$$

bo'ladi. Maksvel tenglamalaridan tok zichligini aniqlaymiz

$$\vec{j} = \frac{c}{4\pi} \left(\text{rot } \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (\text{eme-9})$$

va uni (eme-8) formulaga qoyamiz

$$(\vec{j} \cdot \vec{E}) = (\vec{E} \cdot \vec{j}) = \frac{c}{4\pi} \left(\vec{E} \cdot \text{rot } \vec{H} - \frac{1}{c} \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right). \quad (\text{eme-10})$$

Vektorlar taglili kursidan

$$\vec{E} \cdot \text{rot } \vec{H} = \vec{H} \cdot \text{rot } \vec{E} - \text{div} [\vec{E} \times \vec{H}]$$

munosabatni va Maksvelning

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

tenglamasini ishlatib (eme-10) ifodani

$$(\vec{j} \cdot \vec{E}) = (\vec{E} \cdot \vec{j}) = -\frac{1}{4\pi} \left(\vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \text{div} \left(\frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}] \right) \quad (\text{eme-11})$$

shaklida yozishimiz mumkin. Bir jinsli izotrop harakatsiz muhitda, ε va μ vaqtga bog'liq bo'lmaydi va

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

chiziqli bog'lanish o'rinlidir. U holda (eme-11) formulani

$$w = \frac{1}{8\pi} [\vec{E}\vec{D} + \vec{B}\vec{H}] \quad (\text{eme-12})$$

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}] \quad (\text{eme-13})$$

kabi belgilashlar kiritib

$$q = (\vec{j} \cdot \vec{E}) = -\frac{\partial w}{\partial t} - \text{div } \vec{S}. \quad (\text{eme-14})$$

shaklda yozishimiz mumkin. (eme-14) formulani (eme-8) formulaga qo'yib, S sirtning shakli va o'lchamlari vaqtga bog'liq emasligini inobatga olib

$$P = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V w dV - \oint_S \vec{S} d\vec{s} \quad (\text{eme-15})$$

formulani qo'lga kiritamiz. Oxirgi munosabat w va $\vec{S}$ larning fizikaviy ma'nosini ochib beradi. (eme-15) formulaning chap tomoni P – elektromagnit maydonning V hajmda joylashgan erkin zaryadlar ustidan 1 sekundda bajargan ishini ifodalaydi. Energiyaning saqlanish qonuniga binoan tenglamaning o'ng tomoni V hajmga elektromagnit maydon energiyasining kirishi va chiqishlari bilan bog'liq bo'lishi kerak.

Agar barqaror tizimni qaraydigan bo'lsak

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (\text{eme-16})$$

bo'lishi va V hajmdagi elektromagnit maydon energiyasi o'zgarmasligi lozim. V hajmda elektromagnit maydonning erkin zaryadlar ustidan bajargan ishi va buning oqibatida energiyaning Joule-Lens qonuniga muvofiq sochilishi, energiyaning saqlanishi uchun, tashqaridan energiyaning hajmga kirib kelishi (oqishi) hisobidan to'ldirilishi yoki muvozanatlanishi lozim. Bundan $\vec{S}$ - **elektromagnit maydoni energiyasi oqimining zichligi** deb ataladi. $\vec{S}$ ning maxsus nomi bor bo'lib, **Poyting vektori** yoki ba'zida **nurlanish vektori** deb ham ataladi. Poyting vektorining yo'nalishi elektromagnit to'lqinning tarqalish yo'nalishi bilan birdek, va un elektromagnit to'lqini energiyasining qay tomonga oqishini ko'rsatadi. Son jihatdan elektromagnit to'lqin tarqalishi yo'nalishiga tik (perpendikulyar) qo'yilgan birlik yuzadan birlik vaqtda o'tadigan energiya miqdoriga teng.

w - kattalikning ma'nosini bilish uchun nurlanish orqali energiya chiqmay turgan xususiy holni qaraymiz. Bunda

$$\oint_S \vec{S} d\vec{s} = 0 \quad (\text{eme-17})$$

bo'ladi. V hajmda elektromagnit maydonining erkin zaryadlar ustidan bajargan ishi faqat shu hajmdagi elektromagnit maydoni energiyasi hisobidan bo'ladi, aniqrog'i uning kamayishiga tengdir. U holda, w -kattalikni **elektromagnit maydon energiyasining hajmiy zichligi** sifatida talqin qilsak bo'ladi.

(eme-14) munosabatni birinchi marta ingliz fizigi J.Poyting 1884 yili yozgib isbotlab bergan. Shu bois (eme-14) munosbat **Poyting teoremasi** nomi bilan mashhur.

Poyting teoremasi rus olimi N.A.Umov (H.A.Умов) tomonidan, J.Poytingdan ancha oldin, aniqrog'i, 1874 yili isbotlangan boshqa, yanada umumiyroq, teoremaning xususiy holi hisoblanadi. N.A.Umov w zichlik bilan fazoda taqsimlangan ixtiyoriy shakldagi energiyaning tarqalishini o'rgangan. U fanga energiya oqimining zichligi $\vec{S}$ - tushunchasini kiritdi. Xususan, issiqlik hodisalari uchun, issiqlik ajralmaganda

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{S} = 0 \quad (\text{eme-18})$$

formulani topgan, va bunda issiqlik energiyasi biror hajmga uning sirti orqali oqib kirishi, oqib chiqishi, umuman olganda o'zini fazoda yoyilgan substansiyadek tutishini ko'rsatgan. Fizikaning termo- va gidroaerodinamika bo'limlarida, odatda, $\vec{S}$ - **Umov vektori** deb ataladi. Ba'zida elektrodinamika bo'limida ham $\vec{S}$ - ni nomlashda "Umov" nomi qo'shilib **Umov-Poyting vekt vektori** deb ataladi.

12 - Ma'ruza
Mavzu: Relativistik kinematika elementlari
(2- qism)

Lorents almashtirishlari

Oldingi ma'ruzalarda 4-fazodagi hodisa orasidagi interval Δs invariant ekanligini yani interval evklid fazosidagi vektorning moduli kabi bo'lishini ko'rgan edik. Shu bois intervalni 4-fazodagi biror dunyoviy nuqtadan boshqa bir dunyoviy nuqtaga yo'naltirilgan vektorning moduli ("uzunligi") deb qarash mumkin. Agar

$$x^0 = ct, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z, \quad (L.1)$$

deb belgilash kiritsak intervalning kvadratini quyidagi ko'rinishda yozsak bo'ladi:

$$\Delta s^2 = (\Delta x^0)^2 - (\Delta x^1)^2 - (\Delta x^2)^2 - (\Delta x^3)^2.$$

Ikki nuqta orasidagi masofaning kvadrati evklid fazosida

$$\Delta l^2 = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2$$

formula bilan beriladi yani Δl ikki nuqtalarning radius vektorlarining ayirmasining moduli orqali ifodalanadi. 4-fazoda ham interval Δs ni ikki 4-radius vektorlarning ayirmasining moduli shaklida ifodalash mumkin. Buning uchun x^0, x^1, x^2, x^3 larni dunyoviy nuqtaning vaziyatini tavsiflovchi 4-vektorning mos koordinatalari deb qaraymiz. Bu 4-vektorning modulining kvadrati

$$(x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 \quad (L.2)$$

ga tengdir. Vaziyati (L.1) formula bilan ifodalanadigan va 4-vektorning moduli (L.2) formula bilan aniqlanadigan 4-fazo **psevdoevklid fazo** deyiladi. Psevdoevklid fazoning metrikasi

$$g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (L.3)$$

tenzor bilan aniqlanadi. Psevdoevklid fazoda 4-vektorning kvadratini

$$\sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 = (x^0)^2 - \sum_{i=1}^3 (x^i)^2 = c^2 t^2 - \vec{r}^2 \quad (L.4)$$

yoki

$$\sum_{\mu, \nu=0}^3 x_\nu x^\nu = x_0 x^0 + x_1 x^1 + x_2 x^2 + x_3 x^3 \quad (L.5)$$

shaklida yozamiz. Biror koordinatalar sistemasidan boshqa koordinatalar sistemasiga o'tishda 4-vektorlarning koordinatalari

$$x'^\mu = \sum_{\nu=0}^3 \alpha_\nu^\mu x^\nu \quad (L.6)$$

formulaga binoan almashtiriladi. Agar K va K' koordinatalar sistemasi qilib 1-rasmda ko'rsatilgandek ikki ISS sini olsak, (L.6) formuladagi almashtirish matritsasi

$$\alpha_\nu^\mu = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (L.7)$$

bilan aniqlanadi. Bu yerda

$$\alpha_0^2 - \alpha_1^2 = 1 \quad (L.8)$$

shart bajarilishi kerak. Almashtirish matritsa koeffitsientlari faqat koordinatalar sistemalarining nisbiy tezliklari V_0 ga bog'liq bo'lishi mumkin. Koeffitsientlarni topish maqsadida x^{11} ning aniq almashtirish formulasini yozamiz

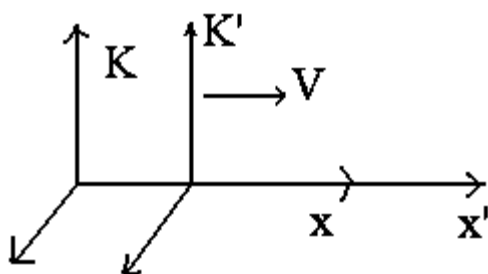
$$x^{11} = \alpha_1 x^0 + \alpha_0 x^1 \text{ yoki } x' = \alpha_1 ct + \alpha_0 x.$$

Agar bu formulani K' sanoq sistemasining sanoq boshi O' nuqta uchun yozsak, $x' = 0$ va $x = Vt$ bo'ladi. U holda $0 = \alpha_1 ct + \alpha_0 Vt$ bo'ladi va undan $\alpha_1 = -(V/c)\alpha_0$ ni topamiz. (L.8)

munosabatdan

$$\alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \text{ va } \alpha_1 = -\frac{V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (\text{L.9})$$

larni topamiz. Endi almashtirish matritsasining aniq ko'rinishini yozamiz:



1-rasm. K va K' sanoq sistemalarining o'zaro joylashishi.

$$\alpha_v^\mu = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} & \frac{-\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} & 0 & 0 \\ \frac{-\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{L.10})$$

Bu yerda biz $\beta = V/c$ belgilash kiritdik.

Teskari lmashtirish matritsasining elementlari (L.10) dagidan

faqat element suratida β ning ishorasining o'zgarishi bilan farq qiladi.

Topilgan elementlarini α_v^μ ning (L.6) dagi o'rniga qo'yib 4-radius vektor komponentlarining almshtirish formulasini yozamiz

$$x^{0'} = \frac{x^0 - \beta x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^{1'} = \frac{-\beta x^0 + x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^{2'} = x^2, \quad x^{3'} = x^3. \quad (\text{L.11})$$

Tesakari almashtirish formulalari quyidagicha yoziladi:

$$x^0 = \frac{x^{0'} + \beta x^{1'}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^1 = \frac{\beta x^{0'} + x^{1'}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^2 = x^{2'}, \quad x^3 = x^{3'}. \quad (\text{L.12})$$

Agar odatdagi dekart koordinatalariga o'tsak yuqoridagi formulalar

$$t' = \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (\text{L.13})$$

$$t = \frac{t' + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z'. \quad (\text{L.14})$$

(L.13) va (L.14) formulalari **Lorents almashtirishlari** deb ataladi. Bu almashtirishlar 4-fazoda intervalni invariant qoldiradi. Kichik tezliklarda Lorents almashtirishlari Galiley almashtirishlariga o'tadi. Lorents almashtirishlaridan uzunlik elementining va vaqt intervalining biror ISS dan boshqa ISS ga o'tganda qanday almashtirish formulasini topish mumkin:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{L.15})$$

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{L.16})$$

bu yerda l va l_0 mos ravishda jismning K va K' sanoq sistemalarida uzunligi, Δt va $\Delta t'$ lar mos ravishda K va K' sanoq sistemalari soatlari bilan o'lchanadigan vaqt intervallari. Shu

takidlab o'tamizki, harakat davomida jismning ko'ndalang o'lchamlari o'zgarmaydi, hajmi esa (L.15) ga muvofiq

$$\Omega = \Omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (L.17)$$

o'zgaradi, bu yerda Ω va Ω_0 mos ravishda jismning K va K' sanoq sistemalarida hajmlari.

Endi tezlik komponentlarining almashtirish formulalarini topamiz. (L.13) formulalarni differentsiallaymiz

$$dt' = \frac{dt - (V/c^2)dx}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad dx' = \frac{dx - Vdt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad dy' = dy, \quad dz' = dz.$$

U holda

$$V'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - Vdt}{dt - (V/c^2)dx} = \frac{dx/dt - V}{1 - (V/c^2)dx/dt} = \frac{V_x - V}{1 - V_x V / c^2}.$$

Yani

$$V'_x = \frac{V_x - V}{1 - V_x V / c^2}. \quad (L.18)$$

Tezlikning qolgan ikki komponentlarining ham almashtirish formulalarini aniqlash mumkin. Ular quyidagi ko'rinishga egalar:

$$V'_y = \frac{V_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - V_x V / c^2}, \quad V'_z = \frac{V_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - V_x V / c^2}. \quad (L.19)$$

Teskari almashtirish formulalari quyidagicha yoziladi:

$$V_x = \frac{V'_x + V}{1 + V'_x V / c^2}, \quad V_y = \frac{V'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + V'_x V / c^2}, \quad V_z = \frac{V'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + V'_x V / c^2}. \quad (L.20)$$

Harakatlanuvchi jismning tezligi $\vec{V}$ vektori X o'qi bilan θ burchak, $\vec{V}'$ tezlik vektori X' o'qi bilan θ' burchak hosil qilib harakatlansin. Bu burchaklar orasidagi munosabatni topamiz.

Koordinata o'qlarini shunday qilib tanlaymizki, bunda jism tezligi $\vec{V}$, $\vec{V}'$ koordinata o'qlari X va Y bir tekislikda yotsin. U holda

$$V_x = V \cos \theta, \quad V_y = V \sin \theta \\ V'_x = V' \cos \theta', \quad V'_y = V' \sin \theta'.$$

(L.18) va (L.19) formulalaridan

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{V'_y}{V'_x} = \frac{V_y \sqrt{1 - \beta^2}}{V_x - V} = \frac{V \sin \theta \sqrt{1 - \beta^2}}{V \cos \theta - V} \quad (L.21)$$

ni topamiz. Bu formula ma'lum $\vec{V}$ va θ lardan, noma'lum θ' ni topishga imkon beradi. Yani $\vec{V}'$ tezlik vektorining X' o'qi bilan hosil qiluvchi θ' burchagini topishga imkon beradi. Xuddi shunga o'xshash formula yordamida berilgan $\vec{V}'$ va θ' dan θ ni topish mumkin:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_y}{V_x} = \frac{V'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{V'_x + V} = \frac{V' \sin \theta' \sqrt{1 - \beta^2}}{V' \cos \theta' + V}. \quad (L.22)$$

4-TEZLIK VA 4-TEZLANISH

Norelyativistik mexanikada fazo intervali dl va vaqt intervali dt lar invariant hisoblanadi. Shu bois 3-radius vektori $d\vec{r}$ komponentlarining dt invariantga bo'linishi natijasida topilgan miqdorlar to'plami 3-tezlikni hosil qiladi. Xuddi shunga o'xshash 3-tezlanish $\vec{w}$ ham 3-tezlik vektroi $\vec{v}$ ning komponentlarining dt ga bo'linishi natijasida topiladi. Lekin oldin ko'rganimizdek

4-fazoda dl va dt miqdorlar alohida invariant bo'lmaydilar, balki ularning kombinatsiyasi bo'lmish va interval deb atalmish

$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2$ miqdor invariant bo'ladi. Intervalning invariant bo'lishi oldin bizga 3-fazodagi radius vektor analogi 4-vektorlarni kiritishga imkon bergan edi. Endi, hozir biz odatdagi tezlik va tezlanish vektorlarining 4-fazodagi analoglari 4-tezlik va 4-tezlanishlarni aniqlashga urinib ko'ramiz. Agar biz

$$\frac{dx^\mu}{dt}$$

nisbatni qarasak, bu miqdor 4-tezlik xossasiga ega emas, chunki dt invariant emas, va

$$\sum \frac{dx^\mu}{dt} \frac{dx_\mu}{dt}$$

Lorents almashtirishlarida o'z qiymatini saqlamaydi. Ammo biz invariant bo'lgan xususiy vaqtni bilamiz: $d\tau = ds/c$. Shu sabab 4-tezlik deb

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = c \frac{dx^\mu}{ds} \quad (U.1)$$

munosabat bilan aniqlanadigan miqdorga aytamiz. Xuddi shunga o'xshash tarzda 4-tezlanish aniqlanadi

$$w^\mu = \frac{du^\mu}{d\tau} = \frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} = c^2 \frac{d^2 x^\mu}{ds^2}. \quad (U.2)$$

dx^μ ning qiymatini va xususiy vaqtning

$$d\tau = dt \sqrt{1 - \beta^2} \quad (U.3)$$

ekanligini inobatga olib 4-tezlikning komponentlarini topamiz:

$$u^0 = \frac{c}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad u^k = \frac{v_k}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (k=1,2,3). \quad (U.4)$$

Oxirgi formulani qisqa qilib

$$u^\mu = \left(\frac{c}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \quad (U.5)$$

yozish mumkin. (U.3) formuladan

$$\sum_{\mu=0}^3 u^\mu u_\mu = c^2 \quad (U.6)$$

ayniyatni aniqlaymiz. (U.5) formulani xususiy vaqt $d\tau$ bo'yicha differentsiallaymiz

$$\sum_{\mu} \frac{du^\mu}{d\tau} u_\mu + \sum_{\mu} u^\mu \frac{du_\mu}{d\tau} = \sum_{\mu} w^\mu u_\mu + \sum_{\mu} u^\mu w_\mu = 0$$

Oxirgi ikki had o'zaro tengligidan

$$\sum_{\mu} w^\mu u_\mu = 0 \quad (U.7)$$

ni topamiz. Yani 4-tezlik va 4-tezlanish vektorlari o'zaro perpendikulyardir.

13 - Ma'ruza

Mavzu: Relativistik dinamika elementlari

RELYATIVISTIK DINAMIKA

Newton tenglamalari Galiley almashtirishlariga nisbatan invariantdir. Ammo Lorents almashtirishlariga nisbatan invariant emas. Shu sabab, yani Einshteinning nisbiylik printsiptini qanoatlantirish uchun Newtonning ikkinchi qonuni yanada umumiyroq qonun bilan to'ldirishimiz darkor. Kichik tezliklarda Lorents almashtirishlari Galiley almashtirishlariga o'tishini inobatga olib relyativistik invariant tenglamalarni shunday shart bilan tuzishimiz kerakki, bunda kichik tezliklarda barcha formulalar Newton tenglamalariga o'tsin. Newtonning harakat tenglamasi

$$\frac{d}{dt}(mv_i) = F_i, (i=1,2,3) \quad (K.1)$$

ko'rinishda yoziladi. (K.1) tenglamaning tabiiy umumiylashtirilganini

$$\frac{d}{d\tau}(mu^\mu) = K^\mu, (\mu=0,1,2,3) \quad (K.2)$$

shaklda yozamiz. Bunda m – jismning inert xossalarini tavsiflovchi invariant miqdor (jism massasi), u^μ - jismning 4-tezligi vektorining komponentlari, K^μ - Minkovskiy kuchi deb ataluvchi qandaydir 4-vektor. (U.3) va (U.4) formulalarni inobatga olib Minkovskiy kuchi 4-vektorining koordinatalarini aniqlaymiz

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K^0, \quad (K.3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K_i, (i=1,2,3). \quad (K.4)$$

Oxirgi ikki tenglamaning ikkala tomonlarini ham $\sqrt{1-\beta^2}$ ga ko'paytirib

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K^0 \sqrt{1-\beta^2}, \quad (K.5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K_i \sqrt{1-\beta^2}, (i=1,2,3) \quad (K.6)$$

formulalarni qo'lga kiritamiz. Agar Minkovskiy kuchini ifodalovchi 4-vektor K^μ ning fazoviy koordinatalari K_i odatdagi 3-kuch koordinatalari F_i bilan

$$F_i = K_i \sqrt{1-\beta^2} \quad (K.7)$$

munosabat yordamida ifodalanadigan bo'lsa, (K.6) tenglama quyidagi ko'rinishga keltiriladi

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = F_i, (i=1,2,3). \quad (K.8)$$

Oxirgi formula kichik tezliklarda Newton tenglamasiga o'tadi. Minkovskiy kuchining vaqt koordinatasi K^0 ni aniqlash uchun (K.2) tenglamaning ikkala tomonini ham 4-tezlik u^μ ga ko'paytiramiz. Natijada quyidagini qo'lga kiritamiz

$$K^\mu u_\mu = m \frac{du^\mu}{d\tau} u_\mu = m u^\mu u_\mu \quad (K.9)$$

(bu yerda biz m ning invariantligi inobatga oldik va shu sabab differentsial ishorasidan chiqardik). Olinga natijadan μ bo'yicha yig'indi olamiz va (U.7) formulani inobatga olib topamiz

$$\sum_{\mu=0}^3 K^{\mu} u_{\mu} = m \sum_{\mu=0}^3 w^{\mu} u_{\mu} = 0. \quad (K.10)$$

(K.10) formulaga (U.4) dan u^{μ} ning qiymatlarini va (K.7) dan K_i ning qiymatlarini qo'yamiz. U holda

$$K^0 \frac{c}{\sqrt{1-\beta^2}} - \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{v_i}{\sqrt{1-\beta^2}} = 0. \quad (K.11)$$

Oxirgi tenglamadan topamiz

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \sum_{i=1}^3 F_i v_i \quad (K.12)$$

yoki vektor ko'rinishda

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \vec{F} \vec{v}. \quad (K.13)$$

Endi biz Minkovskiy kuchining barcha koordinatalarini bilgan holda yozamiz:

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \vec{F} \vec{v}, \quad K_i = \frac{F_i}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (i=1,2,3), \quad (K.14)$$

yani

$$K^{\mu} = \left(\frac{\vec{F} \vec{v}}{c\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{\vec{F}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right). \quad (K.15)$$

3-kuch $\vec{F}$ va $\vec{v}$ vektorlarining skalyar ko'paytmasi zarra ustidan birlik vaqt ichida bajarilgan ishni anglatadi. Bu ish zarraning energiyasining birlik vaqt ichida o'zgarishiga ham tengdir yani dE/dt . Shu bois Minkovskiy kuchining vaqt koordinatasini

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \frac{dE}{dt}. \quad (K.16)$$

ko'rinishda yozish mumkin yani u zarra energiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishi bilan aniqlanadi.

Demak biz relyativistik zarraning lorent-invariant harakat tenglamasi (K.2) ko'rinishda yozsa bo'lishligini ko'rsatdik. Bu harakat tenglama kichik tezliklarda Newtonning harakat tenglamasiga o'tadi. (K.2) relyativistik harakat tenglamasining vaqt komponentasiga (K.16) ni qo'yamiz

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = \frac{1}{c} \frac{dE}{dt} \quad (K.17)$$

Oxirgi formuladan zarraning relyativistik energiyasi ifodasini topamiz

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + const. \quad (K.18)$$

RELYATIVISTIK IMPULS VA ENERGIYA

Newton mexanikasida zarraning impulsi (harakat miqdori) deb

$$p_i = mv_i, \quad (i=1,2,3) \quad (R.1)$$

koordinatalarga ega 3-vektorga aytiladi. Zarraning 4-impulsi ham yuqoridagi kabi

$$p^\mu = mu^\mu, (\mu=0,1,2,3) \quad (R.2)$$

formula bilab aniqlanadi. (U.4) formuladan 4-tezlik uchun o'z ifodalarini (R.2) ga qo'yamiz va topamiz

$$p^0 = \frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p^k = \frac{mv_k}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (k=1,2,3). \quad (R.4)$$

Yoki 4-impulsni quyidagicha yozish mumkin

$$p^\mu = \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right). \quad (R.5)$$

4-impulsning fazoviy komponentasi uchun

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (R.6)$$

formula ishlariladi. Endi e'tiborimizni 4-impulsning vaqt komponentasiga qaratamiz. Oldingi ma'ruzalarimizda relyativistik zarraning energiyasi formulasi (K.18) ni topgan edik. Ammo integrallash doimiysini aniqlamagan edik. (R.4) dagi p^0 ifodasini va (K.18) ni taqqoslab

$$p^0 = \frac{E}{c} \quad (R.7)$$

ni topamiz. Natijada zarraning 4-impulsini

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right) \quad (R.8)$$

deb yozamiz. Yani relyativistik mexanikada zarraning energiyasi va 3-impulsi zarraning 4-impuls vektorining komponentlari bo'lar ekan. Bu holat zarraning energiyasini va impulsini biror ISS dan boshqa ISS sig o'tishda almashtirish formulalari yordamida topishga imkon beradi.

Zarraning 4-impulsi p^μ ning komponentlari ham biror ISS dan boshqa ISS ga o'tishda (L.11) formulalar kabi almashadi. U holda

$$E = \frac{E' + Vp'_x}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p_x = \frac{p'_x + V(E'/c^2)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p_y = p'_y, \quad p_z = p'_z. \quad (R.9)$$

Teskari almashtirish formulasi (L.14) dan faqat tezlikning ishorasining teskari ekanligi bilan farq qiladi.

Zarraning 4-impulsining kvadratini topamiz

$$\sum_{\mu=0}^3 p^\mu p_\mu = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2. \quad (R.10)$$

Ammo boshqa tomondan

$$\sum_{\mu=0}^3 p^\mu p_\mu = \sum_{\mu=0}^3 mu^\mu mu_\mu = m^2 \sum_{\mu=0}^3 u^\mu u_\mu = m^2 c^2. \quad (R.11)$$

U holda

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2. \quad (R.12)$$

Demak 4-impulsning kvadrati, boshqa 4-vektorlarning kvadrati kabi, invariantdir. (K.18) formulada $const=0$ deb olsak zarraning energiyasi uchun

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (R.13)$$

ni qo'lga kiritamiz. (R.13) formula bilan aniqlanadigan energiya zarraning to'liq energiyasi deyiladi. bu energiya albatta zarraning tashqi maydondagi potentsial energiyasi inobatga olmaydi.

Tinch holda turgan zarraning energiyasi

$$E_0 = mc^2 \quad (R.14)$$

formuladan topiladi. E_0 energiya zarraning **tinchlikdagi energiyasi** deyiladi. Zarralardan tashkil topgan murakkab mexanik sistemaning energiyasi quyidagi qismlardan iboratdir:

- Zarralarning tinchlikdagi energiyalari yig'indisidan;
- Zarralarning kinetik energiyalari yig'indisidan;
- Zarralarning o'zaro ta'sirlashish energiyasidan.

Shu sabab murakkab sistemaning tinchlikdagi energiyasi sistemani tashkil etuvchi zarralarning tinchlikdagi energiyalarining yig'indisidan katta bo'ladi:

$$Mc^2 > \sum_a m_a c^2. \quad (R.15)$$

Bu erda M – sistemaning to'liq massasi va m_a – sistema tarkibiga kiruvchi zarralarning massasi. Oxirgi formuladan jismning massasi uni tashkil etuvchi qismlar massalarining yig'indisiga teng emasligi kelib chiqadi.

Zarraning to'liq energiyasi (R.13) va tinchlik energiyasi (R.14) larning ayirmasi zarraning kinetik energiyasi beradi

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 \quad (R.16)$$

Kichik tezliklarda oxirgi formula Newton mexanikasidagi kinetik energiya ifodasiga aylanadi

$$T = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) - mc^2 = \frac{1}{2} mv^2. \quad (R.17)$$

(R.12) formulani

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (R.18)$$

shaklda yozsa bo'ladi. Mexanika ma'ruzalarimizda aytib o'tganimizdek ipmuls va koordinatalar orqali ifodalangan energiya **Gamilton funktsiyasi** deb ataladi. Relyativistik mexanikada erkin zarraning Gamilton funktsiyasi quyidagicha yoziladi

$$H = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \quad (R.19)$$

agar zarra biror kuch maydonida harakatlanayotgan bo'lsa $H = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2} + U$. Bu yerda U zarraning biror kuch maydonidagi potentsial energiyasi.

14 - Ma'ruza
Mavzu: Relativistik elektrodinamika
(3- qism)

RELYATIVISTIK ZARRA UCHUN TA'SIR VA LAGRANJ FUNKTSIYA

Erkin zarra uchun ta'sirni topamiz. Klassik mexanikada ta'rifga ko'ra zarraning birinchi nuqtadan ikkinchi nuqtaga o'tishi uchun ta'siri uning Lagranj funktsiyasidan vaqt bo'yicha olingan integrali bilan ifodalanadi

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(x, \dot{x}, t) dt \quad (T.1)$$

va bu ta'sir Galiley almashtirishlariga nisbatan invariantdir. Bu yerda $L(x, \dot{x}, t)$ zarraning Lagranj funktsiyasi, t_1 va t_2 lar mos ravishda zarraning birinchi va ikkinchi holatlarda bo'lgan vaqt momentlari.

Relyativistik mexanikada ta'sir endi Lorents almashtirishlariga nisbatan invariant bo'lishi lozim. Buning uchun esa ta'sir formulasida integral ostida turgan miqdor skalyar bo'lishi va integral ostida birinchi darajali differentsial ostida turishi kerak. Erkin zarra uchun ma'lum bo'lgan birdan bir bunday skalyar faqat interval ds ga proporsional bo'lishi mumkin. Shu bois relyativistik erkin zarra uchun birinchi dunyoviy nuqtadan ikkinchi dunyoviy nuqtaga o'tishdagi ta'sirni

$$S = \int_1^2 \alpha ds \quad (T.2)$$

formula bilan ifodalaymiz, yoki

$$S = \alpha \int_1^2 ds = \alpha c \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - v^2 / c^2} dt. \quad (T.3)$$

Bu yerdan ko'rinib turibdiki relyativistik erkin zarraning Lagranj funktsiyasi

$$L = \alpha c \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad (T.4)$$

ko'rinishda yoziladi. (T.4) formula bilan ifodalangan relyativistik Lagranj funktsiya kichik tezliklarda klassik mexanikada topilgan erkin zarraning Lagranj funktsiyasiga o'tishi lozim. (T.4) formulada ildiz ostidagi ifodani v/c bo'yicha Teylot qatoriga yoyamiz va birinchi darajali hadlar bilan cheklanamiz. U holda

$$L = \alpha c \sqrt{1 - v^2 / c^2} \approx \alpha c - \frac{\alpha v^2}{2c}. \quad (T.5)$$

(T.5) dagi birinchi haq doimiy bo'lib u harakat tenglamasiga ta'sir qilmaydi, shu bois uni tashlab yuborssak ham bo'ladi. Klassik mexanikada erkin zarraning Lagrang funktsiyasi zarraning kinetik energiyasiga teng ekanligini inobatga olib $\alpha = -mc$ ekanligini topamiz. Natija qilib relyativistik mexanikada erkin zarraning Lagranj funktsiyasi uchun

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad (T.6)$$

ifodani topamiz. Shun alohida takidlab o'tamizki, relyativistik mexanikada Lagranj funktsiyasini klassik mexanikadagidek kinetik va potentsial energiyalarining ayirmasi shaklida ifodalab

bo'lmaydi. Zarraning Lagranj funktsiyasini bilgan holda, biz osongina uning energiyasi va impulsini topishimiz mumkin

$$\vec{p} = \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (\text{T.7})$$

$$E = \vec{p}\vec{v} - L = \frac{mv^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + mc^2\sqrt{1-\beta^2} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (\text{T.8})$$

Endi yana ta'sirga qaytamiz. Zarraning haqiqiy traektoriyasi "eng kam ta'sir printsipti" dan topiladi. Bu printsiptga ko'ra haqiqiy tarektoriyada ta'sir eng kichik ekstremal qiymat qabul qiladi. Yani ta'sirning variantsiyasi nolga teng bo'lishi shart, $\delta S = 0$. Ta'sirning variantsiyasi uchun yozamiz

$$\delta S = -mc \delta \int_1^2 ds = -mc \int_1^2 \delta(ds). \quad (\text{T.9})$$

Ta'rifga ko'ra interval quyidagicha ifodalanadi

$$ds = \sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^\mu dx_\mu}. \quad (\text{T.10})$$

U holda (T.10) formuladagi ildiz osti ko'paytmaning variantsiyasini yozamiz

$$\delta \left(\sum_{\mu=0}^3 dx^\mu dx_\mu \right) = 2 \sum_{\mu=0}^3 dx_\mu \delta(dx^\mu). \quad (\text{T.11})$$

Demak

$$\delta S = -mc \int_1^2 \delta \sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^\mu dx_\mu} = -mc \int_1^2 \frac{\sum_{\mu=0}^3 dx_\mu \delta(dx^\mu)}{\sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^\mu dx_\mu}} = -mc \int_1^2 \frac{\sum_{\mu=0}^3 dx_\mu \delta(dx^\mu)}{ds}. \quad (\text{T.12})$$

$dx_\mu / ds = u_\mu / c$ va $\delta(dx^\mu) = d(\delta x^\mu)$ ekanligini inobatga olsak (T.12) quyidagi ko'rinishga keladi

$$\delta S = -m \int_1^2 \sum_{\mu} u_\mu d(\delta x^\mu). \quad (\text{T.13})$$

Oxirgi formuladagi integralni bo'laklab integrallaymiz

$$\delta S = -m \sum_{\mu} u_\mu \delta x^\mu \Big|_1^2 + m \int_1^2 \sum_{\mu} \delta x^\mu \frac{du_\mu}{d\tau} d\tau. \quad (\text{T.14})$$

(T.14) dagi ikkinchi hadda biz zarraning 4-tezligining differentsialini zarraning xususiy vaqti bo'yicha hosilasi va shu xususiy vaqt differentsiali ko'paytmasi shaklida yozib oldik. Yani $du^\mu = (du^\mu / d\tau) d\tau$. Traektoriyaning oxirlarida $\delta x^\mu = 0$ bo'ladi. U holda

$$\delta S = m \int_1^2 \sum_{\mu} \delta x^\mu \frac{du_\mu}{d\tau} d\tau = 0. \quad (\text{T.15})$$

Ixtiyoriy δx^μ da (T.15) shart bajarilishi uchun zarraning 4-tezligining xususiy vaqt bo'yicha hosilasi (4-tezlanishi) nolga teng bo'lishi kerak $du^\mu / d\tau = 0$. Yani erkin zarraning tezligi saqlanishi lozim.

BYNDPI

15 - Ma'ruza
Mavzu: Relativistik elektrodinamika
(4- qism)

ENERGIYA-IMPULS TENZORI

Oldingi ma'ruzalarda biz ta'sirni (T.1) formula ko'rinishida yozdik. Agar endi biz harakat tenglamasini 4-fazoda qaramoqchi bo'lsak, ta'sirni ham 4-fazoda mos shaklda yozishimiz kerak bo'ladi. 4-fazoda biz teng huquqli x^0, x^1, x^2, x^3 formal parametrlar bilan ishlashimizga to'g'ri keladi. Bu parametrlar harakat tenglamalarida bir xil turda yoziladi. Shu bois 4-ta'sir uchun biz quyidagi formulani yozamiz

$$S = \frac{1}{c} \int L^* (q_a, \dot{q}_{av}, x^0, x^1, x^2, x^3) dx^0 dx^1 dx^2 dx^3. \quad (E.1)$$

Bu yerda q_a - sistemaning holatini tavsiflovchi parametrlar to'plamidir yani $q_1, q_2, q_3, \dots$, (bunaqa parametrlar sistemaning *erkinlik darajasi* ekanligini esga olamiz), $1/c$ esa qulaylik uchun kiritilgan,

$$\dot{q}_{av} = \frac{\partial q_a}{\partial x^\nu}, \quad \left(\begin{array}{l} a = 1, 2, 3, \dots \\ \nu = 0, 1, 2, 3 \end{array} \right). \quad (E.2)$$

q_a va $\dot{q}_{av}$ miqdorlar x^0, x^1, x^2, x^3 koordinatalar funktsiyasi deb qaraladi. Hatto q_a parametr faqat x^0 ga bog'liq bo'lib qolishi mumkin, u holda biz klassik mexanikadagi $q_a = q_a(t)$ tanish holni kuzatamiz. Aralash hosilalar o'zaro tengligi

$$\frac{\partial^2 \dot{q}_a}{\partial x^\nu \partial x^\mu} = \frac{\partial^2 \dot{q}_a}{\partial x^\mu \partial x^\nu} \quad (E.3)$$

dan

$$\frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} = \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^\nu} \quad (E.4)$$

munosabat bajarilishi lozimligi kelib chiqadi. (T.1) va (E.1) formulalarning o'zaro mutanosibligini topish uchun 4-fazoda 4-hajm $d\Omega^*$ 3-fazodagi 3-hajm $d\Omega$ bilan quyidagi ifoda yordamida bog'lanishini eslaymiz

$$d\Omega^* = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = c dt d\Omega. \quad (E.5)$$

$d\Omega^*$ ning o'rniga (E.5) formulani qo'yamiz va (E.1) ni quyidagicha yozamiz

$$S = \int L^* dt dV = \int_1^2 dt \int L^* dV. \quad (E.6)$$

Bu yerda vaqt bo'yicha integrallash vaqt harakat davom etadigan vaqt intervalida bajariladi, hajm bo'yicha integrallash esa koordinatalar o'zgarishini ifodalovchi intervallarda bajariladi. (T.1) va (E.6) formulalarni taqqoslab

$$L = \int L^* dV \quad (E.7)$$

ni topamoz. Yani L^* bu qaralayotgan sistemaning Lagranj funksiyasining hajmiy zichligidir. Yopiq mexanik sistemasining Lagranj funksiyasi L vaqt t ga bevosita bog'liq bo'lmasligi darkor. 4-fazoda vaqt va fazoviy koordinatalar teng huquqli bo'lganligi bois sistemaning Lagranj funksiyasining zichligi L^* ham x^0, x^1, x^2, x^3 parametrlarga bog'liq bo'lmasligi lozim. Yani

$$S = \frac{1}{c} \int L^*(q_a, \dot{q}_{av}) d\Omega^*. \quad (E.8)$$

Endi relyativistik mexanikada yopiq sistemaning harakat tenglamasini topamiz. Buning uchun (E.8) formula bilan ifodlangan ta'sirning variatsiyasini hisoblaymiz va keyinchalik uni nolga tenglashtiramiz. (E.8) ni variatsiyasi olamiz:

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta \dot{q}_{av} \right) d\Omega^*. \quad (E.9)$$

$\delta y' = (\delta y)'$ ga o'xshash ravishda

$$\delta \dot{q}_{av} = \delta \frac{\partial q_a}{\partial x^v} = \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a \quad (E.10)$$

ni yozsak bo'ladi. (E.9) da (E.10) kabi almashtirish bajarib

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a \right) d\Omega^*. \quad (E.11)$$

Ko'paytmani differentsiallash qoidasiga binoan

$$\sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) = \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a. \quad (E.12)$$

Bu yerdan topamiz

$$\sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a \quad (E.13)$$

va oxirgi formulani (E.11) dagi integral ostidagi ikkinchi hadning o'rniga qo'yamiz

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a \right) d\Omega^*. \quad (E.14)$$

(E.14) dagi ikkinchi haq

$$\sum_{a,\nu} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{a\nu}} \delta q_a \right) = \sum_\nu \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{a\nu}} \delta q_a \right) \quad (\text{E.15})$$

ν - komponentasi

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{a\nu}} \delta q_a$$

ga teng bo'lgan vektorning 4-divergentsiyasiga teng!

Matematik eslatma.

(Evklid 3-fazoda Ostrogradskiy-Gauss teoremasi ko'ra: biror $\vec{A}$ vektorning divergensiyasining berilgan hajm bo'yicha integrali shu vektorning hajmni o'rab turgan sirt bo'yicha olingan integraliga teng. Yani

$$\int_{\Omega} \text{div} \vec{a} d\Omega = \oint_f \vec{a} d\vec{f}. \quad (\text{E.M.1})$$

Bu teoremaning quyidagicha ham yozish mumkin

$$\int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial a_i}{\partial x_i} d\Omega = \oint_f \sum_{i=1}^3 a_i df_i. \quad (\text{E.M.2})$$

Bu yerda df_i lar sirt elementi vektori $d\vec{f} = \vec{n} df$ ning komponentlari: $df_x = dydz$, $df_y = dx dz$, $df_z = dx dy$ lardir.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasini 4-fazoda ham ishlatish mumkin va uning formulasi quyidagicha bo'ladi:

$$\int_{\Omega^*} \sum_{\mu=0}^3 \frac{\partial a^\mu}{\partial x^\mu} d\Omega^* = \oint_{f^*} \sum_{\mu=0}^3 a^\mu df_\mu. \quad (\text{E.M.3})$$

Bu yerda a^μ 4-vektor, $d\Omega^* = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = c dt dx^1 dx^2 dx^3$ 4-fazodagi hajm elementi, df^μ - 4-fazodagi $d\Omega^*$ 4-hajmni o'rab oluvchi gipersirtning 4-vektorining komponentlari. Bu komponentlar quyidagilarga teng:

$$df^0 = dx^1 dx^2 dx^3 = d\Omega, \quad df^1 = dx^0 dx^2 dx^3 = c dt dx^2 dx^3, \quad df^2 = dx^0 dx^1 dx^3 = c dt dx^1 dx^3, \\ df^3 = dx^0 dx^1 dx^2 = c dt dx^1 dx^2.)$$

Endi Ostrogradskiy-Gauss teoremasining 4-fazoda formasidan foydalanamiz. U holda (E.14) formuladagi ikkinchi integralni quyidagicha yozishimiz mumkin

$$\int \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) = \oint \sum_v \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) df_v. \quad (\text{E.16})$$

Ammo qaralayotgan 4-hajm chegarasida $\delta q_a = 0$ bois (E.16) dagi integral nolga teng bo'ladi.

Shu sabab (E.15) da faqat ikki had qoladi:

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \sum_a \left(\frac{\partial L^*}{\partial q_a} - \sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \right) \delta q_a d\Omega^*. \quad (\text{E.17})$$

Variatsiyaning va qaralayotgan hajmning ixtiyoriy bo'lganligi bois ta'sirning variatsiyasi nolga teng bo'lishi uchun (E.17) formuladagi qavs ichidagi ifoda nolga teng bo'lishi shart. Yani

$$\frac{\partial L^*}{\partial q_a} - \sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} = 0. \quad a = 1, 2, 3, \dots, \quad v = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.18})$$

Oxirgi tenglama **relyativistik mexanikada harakat tenglamasi** bo'lib hisoblanadi (klassik mexanikadagi Eyler-Lagrang tenglamasining 4-fazoga umumiyashtirilganligi).

Endi (E.18) tenglamaning ikkala tomonini ham $\dot{q}_{a\mu}$ ga ko'paytiramiz va a bo'yicha yig'indi olamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \dot{q}_{a\mu} = \sum_{a,v} \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial}{\partial x^v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \quad (\text{E.19})$$

(E.19) formulaning o'ng tomonini

$$f \frac{\partial g}{\partial x^v} = \frac{\partial (fg)}{\partial x^v} - g \frac{\partial f}{\partial x^v} \quad (\text{E.20})$$

formula yordamida shakl almashtiramiz va quyidagi munosabatni qo'lga kiritamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \dot{q}_{a\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^v}. \quad (\text{E.21})$$

(E.21) ifodaning chap tomonida va o'ng tomonidagi ikkinchi hadda, mos ravishda,

$$\dot{q}_{av} = \frac{\partial q_a}{\partial x^v} \quad \text{va} \quad \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^v} = \frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} \quad (\text{E.22})$$

kabi almashtirishlarni amalga oshiramiz. Natijada quyidagi formulani topamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \frac{\partial q_a}{\partial x^\mu} + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right). \quad (E.23)$$

Topilgan munosabatning chap tomoni

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu}$$

ga teng. Shu sabab (E.23) formulani

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \quad (E.24)$$

ko'rinishda yozsak bo'ladi. Oxirgi formulaning chap tomonini

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu} = \sum_v \delta_\mu^\nu \frac{\partial L^*}{\partial x^\nu} = \sum_v \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\delta_\mu^\nu L^*) \quad (E.25)$$

deb yozib (E.24) formulani

$$\sum_v \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\delta_\mu^\nu L^*) = \sum_v \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \quad (E.26)$$

shaklga keltiramiz. Yoki

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left[\sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} - \delta_\mu^\nu L^* \right] = 0, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3. \quad (E.27)$$

(E.27) ifoda to'rtta formuladan iborat bo'lib tenglamalar sistemasini tashkil etadi. Kvadrat qavs ichida turgan ifoda rangi ikkiga teng bo'lgan 4-tenzorning aralash komponentlari xossalriga ega. Shu bois uni $\tilde{T}_\mu^\nu$ deb belgilaymiz:

$$\tilde{T}_\mu^\nu = \sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} - \delta_\mu^\nu L^*. \quad (E.28)$$

Bu belgilashdan keyin (E.27) tenglamamiz

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial \tilde{T}_\mu^\nu}{\partial x^\nu} = 0, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3. \quad (E.29)$$

(E.29) ta'sirning variatsiyasi nolga tenglashtirilishi natijasida keltirilib chiqarildi va shu sabab u relyativistik mexanikada **harakat tenglamasi** bo'lib topiladi. Tenglamaning ma'nosi quyidagicha: $\tilde{T}_\mu^\nu$ tenzorning 4-divergentsiyasi nolga teng! Endi bu tenzor qanday fizik ma'noga ega ekanligi o'rganamiz. Shuni takidlab o'tishimiz kerakki, (E.29) tenglamani qanoatlantiruvchi

rangi ikkiga teng bo'lgan 4-tenzor etarli darajada aniqlammagan. Rostdan ham (E.28) dan farq qiluvchi ixtiyoriy

$$T_{\mu}^{\nu} = \tilde{T}_{\mu}^{\nu} + \sum_{\rho} \frac{\partial Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\rho}} \quad (\text{E.30})$$

4-tenzorni qaraylik. Bu yerda $Q_{\mu}^{\nu\rho}$ - ν va ρ indekslariga nisbatan antisimmetrik bo'lgan ixtiyoriy 4-tenzor: $Q_{\mu}^{\nu\rho} = -Q_{\mu}^{\rho\nu}$. T_{μ}^{ν} tenzor ham (E.29) tenglamani qanoatlantiradi. Buni osongina tekshirish mumkin. Buning uchun (E.30) ni (E.29) ga qo'yamiz. Birinchi had (E.29) ning o'zi bo'ladi. Ikkinchi hadni qaraymiz

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} \sum_{\rho} \frac{\partial Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\rho}} = \sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\nu} \partial x^{\rho}} = 0.$$

Bu had nolga teng, chunki $\sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\nu} \partial x^{\rho}} = -\sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\rho\nu}}{\partial x^{\rho} \partial x^{\nu}}$ (tenzorning antisimmetrik xossaga ega ekanligi inobatga olinadi). Shu sabab T_{μ}^{ν} tenzorning (E.30) ko'rinishda tanlanishi harakat tenglamasiga ta'sir qilmaydi. Yani

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T_{\mu}^{\nu}}{\partial x^{\nu}} = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.31})$$

Biz $Q_{\mu}^{\nu\rho}$ tenzorni ixtiyoriy ravishda tanlab olishimiz mumkin (bunda u faqat kerakli indekslarga nisbatan antisimmetrik bo'lsa bas). Endi biz shunday talab qo'yamiz, bunda T_{μ}^{ν} tenzor simmetrik bo'lsin. Bundan buyog'iga bu talab bajarilgan deb hisoblaymiz: $T^{\nu\mu} = T^{\mu\nu}$. Shu bilan birga $T_{\mu}^{\mu} = \tilde{T}_{\mu}^{\mu}$ munosabat ham o'rinli bo'ladi, chunki $Q_{\mu}^{\nu\nu} = 0$. Agar $\mu = 0$ bo'lsa, (E.31) formuladagi T_{μ}^{ν} 4-tenzorda μ indeksining yuqoriga ko'tarilishi tenglamani o'zgarishsiz qoldiradi, va aksincha $\mu = 1, 2, 3$ bo'lsa, tenglama ishorasini o'zgartiradi. Buning natijasida

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^{\nu}} = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (\text{E.32})$$

ni qo'lga kiritamiz. Relyativistik mexanikada $T^{\mu\nu}$ 4-tenzor sistemaning **energiya-impuls tenzori** deb ataladi.

Teorema. Agar simmetrik 4-tenzor $T^{\mu\nu}$ (E.32) munosabatni qanoatlantirsa va bu tenzorning barcha elementlari cheksizlikda nolga intilsa

$$p^{\mu} = \alpha \int \sum_{\nu} T^{\mu\nu} df_{\nu} \quad (\text{E.33})$$

formula bilan aniqlanadigan 4-vektor saqlanadi yani vaqt o'tishi bilan o'z qiymatini o'zgartirmaydi (harakat integrali bo'ladi).

Bu yerda α ixtiyoriy doimiy, df_ν gipersirt elementi 4-vektorining komponentlari. (E.33) da integrallash ixtiyoriy gipersirt (uch o'lchamli fazoni ham qamrab oluvchi) bo'yicha olinadi. Agar integrallash bajarilishi darkor gipersirt deb $x^0 = \text{const}$ gipertekislik tanlansa, u holda $df_0 = d\Omega$ dan tashqari barcha df_ν lar nol bo'ladi va (E.33) quyidagicha yoziladi:

$$p^\mu = \alpha \int T^{\mu 0} df_0 = \alpha \int T^{\mu 0} d\Omega. \quad (\text{E.34})$$

Yopiq sistenaning to'liq energiyasi va to'liq impuls saqlanadi. Relyativistik mexanikada energiya va impuls bitta energiya-impuls 4-vektorining komponentlari sifatida harakat tenglamalarida ishtirok etadi. Demak to'liq energiya-impuls 4-vektori ham saqlanishi darkor. Shu bois (E.33) va (E.34) formulalar bilan aniqlanadigan 4-vektorni sistemaning 4-impulsi deb qarashimiz mumkin. Proportsionallik doimiysi α ni (E.33) va (E.34) formulalar bilan aniqlangan 4-impuls (R.8) formulada ifodalangan 4-impuls bilan o'zaro teng bo'lishi shartidan topamiz. (R.8) formulaga binoan $p^0 = E/c$. (E.34) da $\mu = 0$ hadni qaraymiz

$$p^0 = \alpha \int T^{00} d\Omega = E/c. \quad (\text{E.35})$$

(E.28) formuladan va energiya-impuls tenzorining simmetrikligi $T^{\nu\mu} = T^{\mu\nu}$ dan foydalanib quyidagilarni yozsa bo'ladi

$$T^{00} = T_0^0 = \tilde{T}_0^0 = \sum_a \dot{q}_{a0} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{a0}} - \delta_0^0 L^* = \sum_a \dot{q}_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_a} - L^*, \quad (\text{E.36})$$

bu yerda $\dot{q}_a = \partial q_a / \partial t$ va (E.36) ni yozishda $\dot{q}_{a0} = \partial q_a / \partial x^0 = \partial q_a / \partial (ct) = (1/c) \partial q_a / \partial t = (1/c) \dot{q}_a$ ekanligi hisobga olingan. U holda (E.7) ni inobatga olib

$$\int T^{00} d\Omega = \sum_a \dot{q}_a \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} - L \quad (\text{E.37})$$

ni topamiz. (E.37) formulaning o'ng tomonida turgan ifoda bu sistemaning energiyasidir. Shu sabab

$$\int T^{00} d\Omega = E \quad (\text{E.38})$$

va T^{00} ni biz energiyaning hajmiy zichligi deb qabul qilamiz

$$T^{00} = w. \quad (\text{E.39})$$

(E.38) ifodani (E.35) formulaga qo'yib $\alpha = 1/c$ ekanligi topamiz. Demak

$$p^\mu = \frac{1}{c} \int \sum_\nu T^{\mu\nu} df_\nu. \quad (\text{E.40})$$

(E.40) formulada integrallash gipersirt bo'yicha olinadi (bu gipersirtga 3-fazo ham kiradi).

$$p^\mu = \frac{1}{c} \int T^{\mu 0} df_0 = \frac{1}{c} \int T^{\mu 0} d\Omega. \quad (\text{E.41})$$

(E.41) formulada integrallash faqat 3-fazoda bajariladi ($x^0 = \text{const}$).

Energiya-impuls 4-tenzorining $T^{0\nu}$ elementlarining fizik ma'nosini aniqlash maqsadida (E.32) tenglamani $\mu = 0$ uchun yozamiz

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{0\nu}}{\partial x^\nu} = \frac{\partial T^{00}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k} = 0 \quad (\text{E.42})$$

yoki

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial T^{00}}{\partial t} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k}. \quad (\text{E.43})$$

Oxirgi tenglamaning ikkala tomonini c ga ko'paytirib biror Ω hajm bo'yicha integral olamiz

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_\Omega T^{00} d\Omega = \int_\Omega \sum_{k=1}^3 c \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k} d\Omega. \quad (\text{E.44})$$

(E.44) formulaning chap tomonidagi integral Ω hajmda mujassamlashgan energiyaga teng. O'ng tomonidagi integral belgisi ostida esa biror $\vec{S}$ vektorning odatdagi 3-divergentsiya turibdi. Bu $\vec{S}$ vektor quyidagi komponentlarga ega

$$S_x = cT^{01}, S_y = cT^{02}, S_z = cT^{03}. \quad (\text{E.45})$$

Shu sababli (E.44) ni quyidagicha yozish mumkin

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \int_\Omega \nabla \vec{S} d\Omega. \quad (\text{E.46})$$

Biror Ω hajm ichidagi energiyaning vaqt o'tishi bilan o'zgarishi (hosilasi) shu hajm sirtidan energiyaning oqimiga teng bo'lishi lozim. U holda $\vec{S}$ vektor - energiya oqimining hajmiy zichligi vektori ekan va (E.45) ga binoan energiya-impuls tenzorining elementlari energiya oqimining hajmiy zichligi vektori komponentlari bilan

$$T^{01} = \frac{1}{c} S_x, T^{02} = \frac{1}{c} S_y, T^{03} = \frac{1}{c} S_z. \quad (\text{E.47})$$

formulalar yoedamida ifodalanar ekan. $T^{\mu\nu}$ tenzori simmetrik $T^{0k} = T^{k0}$ bo'lganligi bois

$$T^{10} = \frac{1}{c} S_x, \quad T^{20} = \frac{1}{c} S_y, \quad T^{30} = \frac{1}{c} S_z. \quad (E.48)$$

Endi 4-impuls vektorining fazoviy koordinatalariga e'tiborimizni qaratamiz

$$p^k = \frac{1}{c} \int T^{k0} d\Omega. \quad (E.49)$$

Oxirgi formulani

$$p^k = \int \frac{T^{k0}}{c} d\Omega = \int g^k d\Omega \quad (E.50)$$

deb yozamiz. Bu yerdan koordinatalari T^{k0}/c bo'lgan vektor impuls zichligini ifodalay ekan

$$\vec{g} = \frac{T^{10}}{c} \vec{i} + \frac{T^{20}}{c} \vec{j} + \frac{T^{30}}{c} \vec{k} \text{ yoki, } g_x = \frac{1}{c} T^{10}, \quad g_y = \frac{1}{c} T^{20}, \quad g_z = \frac{1}{c} T^{30}. \quad (E.51)$$

$$\vec{p} = \int \vec{g} d\Omega. \quad (E.52)$$

(E.51) va (E.48) formulalarni taqqoslab impuls zichligi vektori va energiya oqimi zichligi vektori komponentlari orasidagi o'zaro bog'lanishni topamiz

$$g_k = \frac{1}{c^2} S_k, \quad k = 1, 2, 3 \quad (E.53)$$

yoki vektor ko'rinishda

$$\vec{g} = \frac{d\vec{p}}{d\Omega} = \frac{1}{c^2} \vec{S}. \quad (E.54)$$

Natija qilib quyidagilarni aytish mumkin: sistemaning energiyasi oqimi va impulsi orasida o'zaro bog'lanish mavjud. Yani impuls zichligi energiya oqimi zichligining yorug'lik tezligi kvadratida bo'linganiga teng.

Endi energiya-impuls tenzorining T^{ik} elementlarini topamiz. Buning uchun (E.32) ni $\mu = i$ qiymat uchun yozamiz

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{i\nu}}{\partial x^\nu} = \frac{\partial T^{i0}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} = 0 \quad (E.55)$$

Oxirgi formulani $x^0 = ct$ va $T^{i0} = cg_i$ ekanligini inobarga olib

$$-\frac{\partial g_i}{\partial t} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} \quad (E.56)$$

deb yozamiz. Hosil bo'lgan ifodaning ikkala tomonidan ham biror hajm Ω bo'yicha integral olamiz va (E.52) dan foydalaniz

$$-\frac{\partial}{\partial t} p_i = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} d\Omega \quad (\text{E.57})$$

ni qo'lga kiritamiz. (E.57) formulaning o'ng tomonidagi integralni Ostrogradskiy-Gauss teoremasi yordamida o'zgaritamiz

$$-\frac{\partial}{\partial t} p_i = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} d\Omega = \oint_{\vec{f}} \sum_{k=1}^3 T^{ik} df_k = - \oint_{\vec{f}} \vec{\sigma}_i d\vec{f}. \quad (\text{E.58})$$

Bu yerda $\vec{\sigma}_i$ ($i=1,2,3$) – vektor quyidagi koordinatalari bilan aniqlanadi

$$\sigma_{ik} = T^{ik} \quad (\text{E.59})$$

yoki

$$\vec{\sigma}_i = T^{i1} \vec{i} + T^{i2} \vec{j} + T^{i3} \vec{k}. \quad (\text{E.60})$$

(E.58) formulaning chap tomonida Ω hajmda joylashgan sistemaning impulsining i - komponentasining kamayish tezligi turibdi. U holda formulaning o'ng tomoni Ω hajmni o'rab olgan f sirt orqali impulsning i - komponentasining oqimini ifodalaydi, $\vec{\sigma}_i$ esa p_i impuls oqimi ma'nosini kasb etadi. (E.59) formuladagi σ_{ik} - p_i impuls komponentining oqim zichligi vektorining k - komponentasidir. Demak, σ_{ik} 3-tenzor bo'lib, impuls oqimi zichligini tavsiflaydi. Bu yerda skalyar miqdorlarning (xususan energiya, zaryad,... b.) oqimi zichligi vektor bo'lishini va vektor miqdorlarning (xususan impuls, ... b.) oqimi zichligi tenzor bo'lishini eslatib o'tqish joiz. Birluk vaqt davomida biror sirtning birlik yuzasi orqali o'tuvchi impuls bu shu yuzaga ta'sir etuvchi kuchdir. Yani qarayotgan sirt atrofidagi kuchlanishni tavsiflaydi. Shu sabab σ_{ik} tenzor **kuchlanish tenzori** deb ataladi. Nihoyat biz energiya-impuls tenzorining barcha elementlarini aniqlab bo'ldik. (E.39), (E.47), (E.48) va (E.59) larni inobatga olib energiya-impuls tenzorining umumiy ko'rinishini yozamiz

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} w & S_x/c & S_y/c & S_z/c \\ S_x/c & \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ S_y/c & \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ S_z/c & \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (\text{E.61})$$

Energiya-impuls 4-tenzorining elementlari energiya va impulslarning hajmiy zichliklari, bu zichliklarning oqimi zichliklari bilan bog'liq ekan. Shu sabab ham uning nomi energiya-impuls tenzori deb qo'yilgan.

UMUMIY NISBIYLIK NAZARIYASI HAQIDA

Umumiy nisbiylik nazariyasi (UNN) 1916 yili Albert Eynshtein (1879-1955) tomonidan yaratildi. UNN gravitatsiyaning klassik (kvant emas) relyativistik nazariyasidir. Eynshtein UNN yaratilishida ***ekvivalentlik printsipini*** asos qilib qolgan.

Eynshtein nisbiylik printsipini quyidagicha ta'riflagan: "Torshishish maydonidagi (kichik fazoviy o'lchamlarda) inertsial sanoq tizim o'rniga unga nisbatan tezlanishli tizim kiritsak, barcha hodisalar tortishish maydoni bo'lmagan fazodagi kabi yuz beraveradi". Boshqacha qilibaytganda, tezlanuvchan harakat va tortishish (gravitatsiya) kuchi bir xil effektlarga olib keladi. Ekvivalentlik printsipining ham ma'nosi shunda: bir jinsli tortishish maydonidagi inertsial tizimda va tekis-tezlanuvchan harakatdagi inertsial tizimlarda hamma fizikaviy jarayonlar bir xil kechadi.

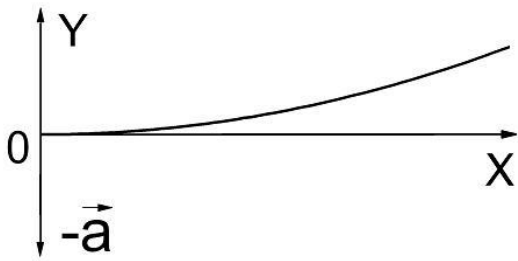
Demak, noinertsial sanoq tizim qandaydir gravitatsion maydonga ekvivalentdir!

Noinertsial sanoq tizimidagi biror hodisa gravitatsiya maydonida joylashgan inertsial sanoq tizimida ham xuddi noinertsial sanoq tizimidagidek kuzatilishi mumkin.

Misol tariqasida vakuumda harakatlanayotgan yorug'lik kvanti – fotonni qaraymiz. Yonma-yon harakatlanayotgan fotonlar yorug'lik dastasini hosil qiladi. Tashqi maydon bo'lmaganda fotonlar vakuumda to'g'ri chiziq bo'yicha harakatlanadi.

Demak, inertsial sanoq tizimda tashqi maydon bo'lmaganda foton to'g'ri chiziq bo'ylab c tezlik bilan harakatlanadi. Foton harakati yo'nalishini x -o'qi deb hisoblaylik (1-rasm). y -o'qiga

parallel $-\vec{a}$ - tezlanish bilan harakatlanuvchi noinertsial sanoq tizimida foton x-o`qiga tik (perpendikulyar) bo`lgan



1-rasm. $-\vec{a}$ - tezlanish bilan harakatlanuvchi noinertsial sanoq tizimida foton (yorug`lik kvanti) trayektoriyasining to`g`ri chiziqli x-o`qi yo`nalishidan chetlashishi.

yo`nalishdagi  $\vec{a}$  tezlanishga ega bo`ladi. Shu sabab, noinertsial sanoq tizimda foton x-o`qi bo`yicha tekis harakati bilan bir vaqtning o`zida y-o`qi bo`yicha ham tekis tezlanish bilan harakatda ishtirok etadi.  $t$  vaqt davomida foton x-o`qi bo`yicha  $x=ct$  masofani, y-o`qi bo`yicha esa  $y=at^2/2$  masofani bosib o`tadi. Oqibatda inertsial sanoq tizimda to`g`ri chiziq bo`yicha harakatlanaytgan foton noinertsial sanoq tizimida ergi

chiziqli trayektoriya, parabola, bo`yicha harakatlanadi:

$$y = \frac{a}{2c^2} x^2.$$

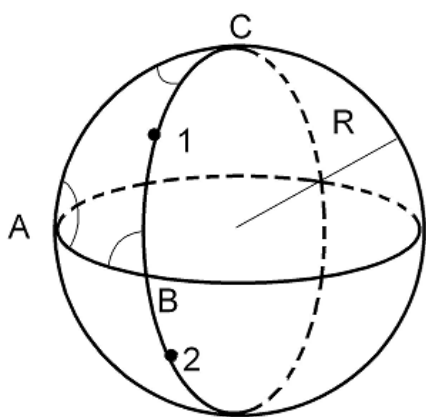
Ekvivalentlik printsipiga ko`ra, yorug`lik nuriga tik (perpendikulyar) yo`nalgan gravitatsion maydon ta`siridagi inertsial sanoq tizimida ham yorug`lik nurining trayektoriyasi egri chiziq (parabola) bo`ladi.

Yuqoridagi mulohazalardan yorug`lik kvanti – fotonga gravitatsiya maydoni ta`sir qilishi kelib chiqadi.

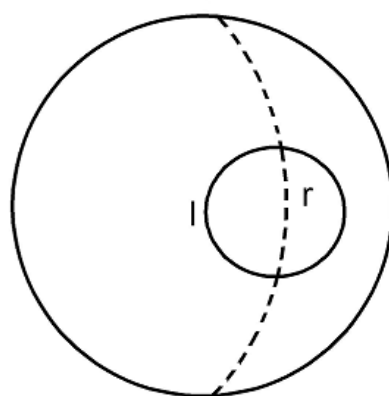
Oldingi ma`ruzalarda fazodagi ikki nuqta orasidagi interval differentsialining kvadrati

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

formula bilan aniqlansa, fazo *evklid fazo* deb atalishi aytilgan edi. Evklid fazosida Evklid geometriyasi o`rinli bo`lib, ikki nuqta orasidagi eng qisqa masofa to`g`ri chiziqli deya qabul qilinadi (postulat). Shu bilan birga teskari ta`rif to`g`ri chiziqli – ikki nuqta orasidagi eng qisqa masofa deb ham qabul qilinadi. Evklid geometriyasida uchburchakning ichki burchaklari yig`indisi 180^0 (π) ga, aylana uzunligining diametriga nisbati esa 2π ga teng. Bunday xossalarga ega fazo **yassi fazo** deb ataladi. Oldingi ma`ruzalarda biz o`rgangan makon-zamon 4-fazo ham gravitatsion maydon bo`lmaganda yoyliq fazodir. Ammo, noinertsial sanoq tizimlarga o`tganimizda makon-zamon 4-fazo ham ergilanadi. Fazoning egriligi tushunchasini yanshi anglab olish uchun 2-fazoni misol sifatida qaraaymiz. 2-fazoda barcha nuqtalar to`plami tekislik hosil qiladi va bunda fazoning egriligi nolga teng. Sfera sirtida joylashgan 2-fazo uchun egrilik nolga teng emas (2-rasm).



2-rasm. 2-o`lchamli sferik fazo. ABC uchburchagining ichki burchagining har biri  $\pi/2$  ga teng. Shu sabab ichki burchaklar yig`indisi $3\pi/2$



3-rasm. 2-o`lchamli sferik fazoda chizilgan aylana. Katta aylana yoyining bir qismiga teng radius tekislikda chizilgan aylana

ga teng.

radiusidan katta.

Sfera sirtida joylashgan bunday 2-fazoning egriligi sfera radiusi R kamayishi bilan ortadi, va $1/R^2$ deb qabul qilinadi. Bu 2-fazoda ikki nuqta orasidagi eng qisqa masofa (masalan, 1- va 2- nuqtalar orasi) to'g'ri chiziq bo'lmay (chunki uning nuqtalari sferaga tegishli emas), balki ikki nuqtani tutashtiruvchi katta aylananing yoyi hisoblanadi (2-rasm). Bu katta aylana sferani teng ikki qismga bo'ladi.

Ta'rif. Ikki nuqta orasidagi masofa eng minimal qiymat qabul qiladigan chiziqlar geodezik chiziqlar deb ataladi.

Sferik 2-fazoda geodezik chiziqlar bu katta aylanalardir. Sferik 2-fazo geometriyasi noevkliddir. Chunki uning sirtida joylashgan ABC uchburchakning ichki burchaklari yig'indisi $3\pi/2$ ga teng yani π dan katta (2-rasm). Uning sirtidagi aylananing uzunligi l ham $2\pi r$ emas, balki undan kichik : $l < 2\pi r$ (3-rasm).

Yuqorida biz Sferik 2-fazoning noevklid ekanligini 3-fazo tomonidan kuzatdik. Ammo, o'sha Sferik 2-fazoda “yashovchilar” o'zlarining fazosining noevklidligini 2-fazodan chiqmagan holda uchburchakning ichki burchaklari yig'indisi π dan farq qilishini va aylana uzunligining diametrga nisbati 2π ga teng emasligini aniqlab bilib olishlari mumkin.

Biz yashayotgan 3-fazoda ham ahvol yuqoridagidek. Bizning 3-fazoning metrikasini aniqlash uchun uni 4-fazo tomonidan qarashning imkoniyati mavjud emas. Buning uchun uchburchakning ichki burchaklarining yig'indisini va aylana uzunligining uning diametriga bo'lgan nisbatini aniqlash

kifoya. Bizning 3-fazoning noevklidligi Yer sayyorasi atrofida juda ham kam va uni to`g`ridan-to`g`ri kuzatib bo`lmaydi.

Hozirgi vaqtgacha bo`lgan barcha tajribalar natijalari gravitatsiya maydoni zaif bo`lgan saholarda biz yashayotgan 3-fazo yassi yani evklid ekanligini ko`rsatmoqda. Ammo, gravitatsiya maydoni kuchli saholarda, yani katta massali ob`yektlar atrofida, 3-fazo egrilanishi va noevklid bo`ladi.

4-fazo ham gravitatsion maydonda egrilangan bo`ladi. Ikki dunyoviy nuqta orasidagi eng qisqa masofa bu geodezik chiziqlardir.

Eynshtein fikricha hech qanaqa maxsus gravitatsion kuchlar mavjud emas. Jismlar makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazosida geodezik chiziqlar bo`ylab doim “erkin” harakatlanadilar.

Bunda odatdagi 3-fazoda jism, umuman olganda, egri chiziqli trayektoriya bo`yicha o`zgaruvchan tezlik bilan harakatlanadi. Yani jism unga biror kuch ta'sir qilganidek harakatlanadi.

Misol ucun Yer sayyoramiz Quyosh atrofida orbita (egri chiziq) bo`ylab harakatlanishi, unga biror kuch ta'sir qilib uni to`g`ri yo`nalishdan chetlashtirayotgani uchun bo`lmay, balki uning Quyosh atrofida egrilangan makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazosida geodezik chiziqlar bo`ylab erkin (hech qanaqa qarshiliksiz) siljisji natijasidir.

Shunday qilib tortishish (gravitatsiya) makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazoda mavjud alohida ta'sir bo`lmay, balki makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazoning tub, asl, o`ziga xos xossasidir.

Egrilangan makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazo noevkliddir. Noevklid geometriyasini birinchi marta 1826 yili rus

matematigi Qozon universiteti professori N.I.Lobachevskiy (1792-1856) yaratdi. Keyin mo'jor matematigi Ya.Bol'yay (1802-1860), K.Gauss va olmon matematigi Bernxard Riman (1826-1866) noevklid geometriyalari yaratilgan. Bu geometriyalar bir-biridan aksiomalari bilan farq qiladi. UNN yaratilishida Eynshtein Riman geometriyasini asos qilib olgan.

Eynshteyn gravitatsion maydon tenglamasini keltirib chiqardi. Bu tenglama makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazoning egriligini tavsiflovchi miqdor (Egrilik tenzori) ni tortishish manbalarining taqsimotini tavsiflovchi miqdor (Energiya-impuls tenzori) bilan bog'laydi.

Eynshteyn tenglamasi biror sohada energiya va impulsning (jumladan tinchlikdagi energiya ham) berilgan taqsimoti qanday qilib o'sha soha makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazosining egrilanishini tavsiflaydi. Eynshteyn tenglamalari o'ta murakkab bo'lib tenzor belgilanishlarda quyidagi ko'rinishga ega:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad \text{EYNSHTEYN TENGLAMASI}$$

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \quad \text{EYNSHTEYN TENZORI}$$

$G_{\mu\nu}$ - makon-zamon (fazo-vaqt) 4-fazoning egriligini tavsiflaydi.

G - GRAVITATSION DOIMIY $G = G^{\lambda}_{\lambda}$

$$R_{\mu\nu}$$

RICHCHI TENZORI

R - Richchi skalyari,

$$R = R^{\lambda}_{\lambda} = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$$

$$T_{\mu\nu}$$

ENERGIYA-IMPULS TENZORI -gravitatsiya

manbalari bo'lmish moddiy maydon energiya va impulsini tavsiflaydi (uning fazo-vaqtda taqsimotini)

Eynshteyn tenglamalarining yechimi umumiy holda haligacha topilmagan, faqat xususiy holler uchun yechimlar topilgan xolos.

1916 yili olmon astronomi va fizigi Karl Shvartshild (1873-1916) sferik jism atrofidagi fazo uchun Eynshteyn tenglamasi yechimini topdi. Sayyoralar gravitatsion maydonlarini inobatga olmaganda, Shvartshild masalasi Quyosh tizimi modeliga mos keladi.

UNN tajribada kuzatiladigan ba'zi hodisalarni tushuntirib berdi.

Bular quyidagilardir:

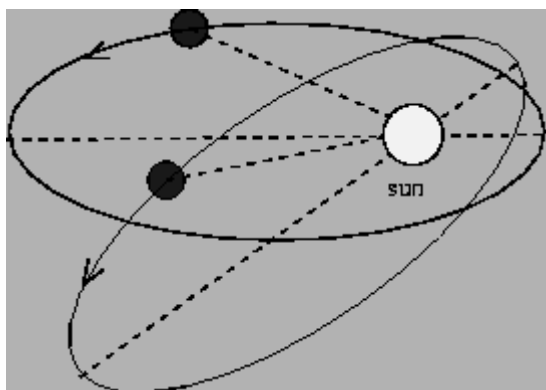
- 1) Sayyoralar perigeliysining aylanishi
- 2) Yorug'lik nurlarining egrilanishi
- 3) Gravitatsion qizil siljish

Keling bu hodisalarni ko'rib chiqamiz.

Sayyoralar perigeliysining aylanishi (presessiyasi)

Shvartshild masalasi yechimiga binoan sayyoralar o'z tekisligida sekin aylanadigan (presissiya) elliptik orbita bo'ylab

harakatlanadi. Natijada, orbitaning Quyoshga eng yaqin joylashgan **perigeliy** deb nom olgan nuqtasining aylanishi kuzatiladi. Perigeliy aylanishining miqdori juda kichik. Faqat Quyoshga eng yaqin sayyora Merkuriy uchungina bu miqdor sezilarli va uni tajribada aniqlash mumkin.

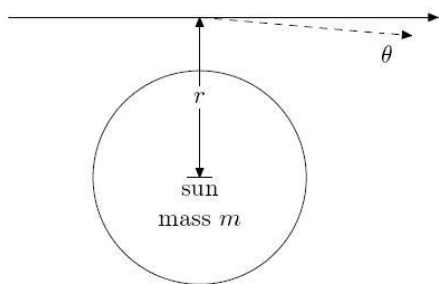


4-rasm. Merkuriy sayyorasi perigeliy nuqtasining aylanish

Merkuriy uchun perigeliyning aylanish burchagi yuz yilda 43 yoy sekundni tashkil etadi. Perigeliy nuqtasi 3 million yilda Quyosh atrofini to'liq aylanib chiqadi. Yer sayyorasi uchun perigeliy nuqtasining aylanish burchagi yuz yilda 4 yoy sekundini tashkil etadi. Sayyoralarning perigeliy nuqtasining presessiyasi astronomlar tomonidan kuzatilgan va UNN negizida tushuntiriladi.

Yorug'lik nurlarining egrilanishi

UNN si xulosalarini tasdiqlovchi yana bir hodisalardan bir bu yorug'lik nurining gravitatsion maydon ta'sirida o'z yo'nalishidan og'ishidir (5-rasm).



5-rasm. Quyosh atrofida yorug`lik nurining to`g`ri yo`nalishdan og`ishi

Quyosh sirtiga nihoyatda yaqin o`tuvchi yorug`lik nurlari uchun UNN 1.75 yoy sekundi qiymatini bashorat qiladi. Bu natija UNN formulasi

$$\Theta = 4 \frac{GM}{Rc^2}$$

asosida hisoblangan.

Optik sohadagi yorug`lik nurlarining o`z yo`nalishidan og`ishini faqat Quyosh to`liq tutilganda, Quyosh diski atrofidagi yulduzlar ko`rinadigan bo`lganda, kuzatish mumkin. Olis koinot ob`yektlari kvazarlardan keladigan radioto`lqinlarning Quyosh atrofidan o`tishida o`z yo`nalishidan og`ishi astronomik kuzatish tajribalarida aniqlangan. Topilgan natija UNN formulasi bo`yicha hisoblangan natijadan 1% farq qilgan xolos.

Gravitatsion qizil siljish

UNN ga ko`ra gravitatsiyalanuvchi (tortishuvchi) jismlar atrofida vaqt o`tishi sekinlashadi. Tortishish qanchalik kuchli bo`lsa, vaqt o`tishining sekinlashishi shunchalik katta bo`ladi (albatta torshish maydonidan tashqarida bo`lgan kuzatuvchi vaqtiga nisbatan). Quyoshda vaqt Yerdagiga qaraganda sekin kechadi. Vaqt tog` tepasida vodiydagi vaqtga nisbatan tez kechadi.

Italiya, AQSh va Yaponiya mamlakatlarida tog` tepasida joylashgan va tog`dan pastda joylashgan atom-soatlarining yurishi solishtirilganda UNN bashorati to`liq o`z tasdig`ini topgan.

Quyoshdan Yer tomon ν_Q chastotali yorug`lik to`lqini kelayotgan bo`lsin. Quyoshdan 1 sekunda Yer tomon  $\nu_Q$  ta maximum va minimumga ega to`lqin fronti yetib boradi. Yerda vaqt Quyoshga nisbatan tezroq yurishi sababli, Quyoshning 1 sekundiga Yerning $(1+\delta)$ sekundi mos keladi. Demak, Yerdagi $(1+\delta)$ sekund davomida ν_Q ta maximum va minimumga ega to`lqin fronti yetib keladi. U holda yorug`likning to`lqinining Yerdagi chastotasi

$$\nu_{Yer} = \frac{\nu_Q}{1 + \delta}$$

ga teng bo`ladi. Yani

$$\nu_{Yer} < \nu_Q !$$

Yerda qabul qilinga chastota, manbadan chiqqan chastotadan kichik. Chastotaning kamayishi, yulduzlardn kelayotgan yorug`lik spektrida, spektr chiziqlarining qizil to`lqin uzunliklari sohasiga siljishiga sabab bo`ladi. Shu sabab, bu hodisa **gravitatsion qizil siljish** deb nomlanadi.

UNN ga ko`ra yorug`lik gravitatsion maydonda potentsiali φ_1 bo`lgan nuqtadan potentsiali  $\varphi_2$  bo`lgan nuqtaga tarqalganda uning chastotasi ν_1 dan ν_2 ga o`zgaradi:

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}$$

Bu yerda $\nu = \nu_1$ yoki $\nu = \nu_2$ deb olsa bo`ladi, chunki $|\nu_1 - \nu_2| \ll \nu_1$ va $|\nu_1 - \nu_2| \ll \nu_2$.

Yer sharoitida $\varphi_1 - \varphi_2 = gl$ sababli

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gl}{c^2}$$

1960 yili amerikalik fiziklar R.V.Paund va J.Rebka laboratoriya sharoitlarida gamma fotonning Yer gravitatsiya maydonida chastotasining o`zgarishini aniqladilar. Ularning tajribasida masofa $l=21$ metrni tashkil qildi. Ular topgan

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{gl}{c^2} = \frac{9,8 \cdot 21}{(3 \cdot 10^8)^2} \approx 2 \cdot 10^{-15}!$$

natija UNN natijasi bilan mos tushadi.

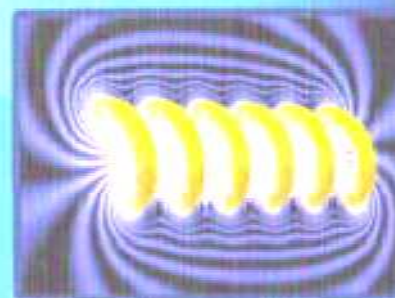
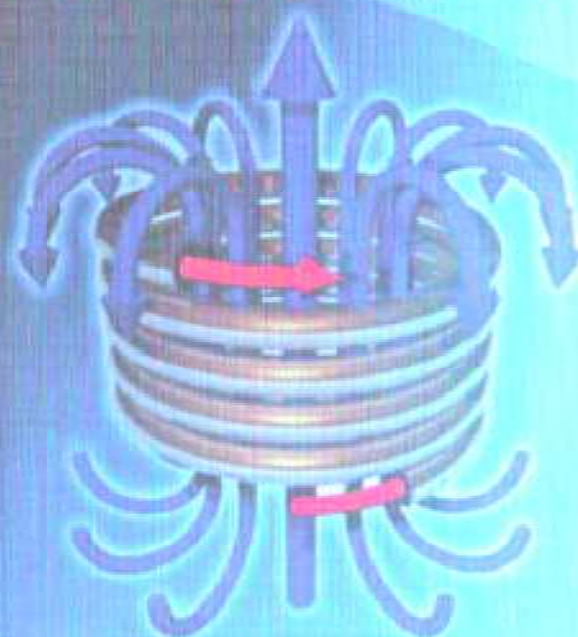
$$\Delta \varepsilon = \frac{\varepsilon}{c^2} gl.$$

M.T.Yerejepov, A.S.Muratov,
G.R.Qa'dirimbetova

ELEKTRODINAMIKA



MA'SELELER TOPLAMI
I-BO'LIM



No'rus-2016

QMU, yari'mo'tkizgishler fizikasi' kafedrası' basli'g'i', f-m.i.d., professor Q. Ismaylov

NMPI, uli'wma fizika kafedrası' basli'g'i' f-m-i.d., docent A. Kamalov

M. T. Yerejepov, A. S. Muratov, G. R. Qa'dirimbetova

Elektrodinamika. Woqi'w qollanba. No'kis. Qaraqalpaq ma'mleketlik universitetinin' baspaxanasi'. 2016- ji'l. 67– bet.

Bul qollanba «Elektrodinamika» kursi' boyi'nsha a'meliy sabaqlardi' o'tiw ushi'n arnalg'an (5140200-fizika). Qollanba materiallari' kursti'n' birinshi bo'limine tiyisli, wonda vakuumdag'i' elektromagnitlik qubi'li'slar u'yreniledi. Ha'rbir bap teoriyalı'q bo'limdi, ma'seleler sheshiwge mi'sallar ha'm o'zbetinshe islew ushi'n ma'selelerdi o'z ishine aladi'. Teoriyani'n' tiykari', ani'q formulalar tu'rinde berilgen ha'm wolar sa'ykes temalar boyi'nsha ma'seleler sheshiw menen tikkeley baylani'sqan. Ma'selelerdi tan'lap ali'wda teoriyalı'q materialdi' toli'q qanti'w ha'm wolardi' sheshiwdin' tiykarg'i' usi'llari'n ko'rsetiw alg'a su'rilgen. Qollanbada sheshilgen ma'seleler bazali'q xarakterge iye ha'm u'yrenilip ati'ri'lg'an tema boyi'nsha toli'q tu'sinik beriwi ha'm studentlerge usi' ma'selelerdi ha'mde a'debiyatlar dizimindegi ma'seleler toplamlari'n sheshiwge ja'rdem ko'rsetiwi na'zerde tuti'lg'an.

QQMU Ilimiy ken'esinin' qarari' menen baspag'a usi'ni'lg'an. 2016 –ji'l, _____fevral. Protokol № .

© M. T. Yerejepov, A. S. Muratov, G. R. Qa'dirimbetova. 2016- ji'l.

© Qaraqalpaq ma'mleketlik universiteti (QQMU). 2016- ji'l.

	Mazmuni'	3
1.	Elektrodinamikani'n' matematikali'q metodlari'	4
1.1	Vektorli'q algebra.....	4
1.2.	Vektorli'q analiz.....	7
1.3.	Iymek si'zi'qli' koordinatalar.....	17
2.	Turaqli' elektrlik maydan	27
3.	Turaqli' magnitlik maydan	47
	Qosi'msha	64
1.	Sferali'q ha'm cilindrlik koordinatalardag'i' tiykarg'i' differencialli'q operaciyalar.....	64
2.	Sferali'q funkciyalar.....	65
	A'debiyatldar dizimi	67

1. Elektrodinamikani'n matematikali'q metodlari'

Elektromagnitlik maydan, waqi't ha'm ken'islik noqati'nan g'a'rezli bolg'an eki vektorli'q $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t), \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ — tu'rinde berilgen elektrlik ha'm magnitlik maydanlar menen ta'riyipleniwi mu'mkin. Sonli'qtan elektrodinamikani'n matematikali'q ta'repi vektorli'q maydanlardi' esaplaw menen baylani'sqan. Bul jerde biz vektorli'q analiz, vektorlardi' integralli'q esaplaw ha'm vektorli'q algebrani'n tiykarg'i' na'tiyjelerin eske ali'wi'mi'z kerek boladi'.

1.1 Vektorli'q algebra

Vektorli'q shamalar, absolyut ma'nisi ha'm bag'i'ti' menen si'patlanadi'. Vektor qa'legen koordinatalar sistemasi'nda, u'sh san menen ani'qlanadi' (wolar koordinata sistemasi'n tan'lap ali'wdan g'a'rezli). Meyli, mi'salg'a noqatti'n hali'n ani'qlawshi' $\mathbf{r}$ - radius vektor qandayda bir dekartli'q esaplaw sistemasi'nda (d.e.s.) x, y, z komponentlerine iye: sonda $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ ($\mathbf{r} = x, y, z$ tu'rindeg belgilewde qollani'ladi'). Usi' esaplaw sistemasi' menen bir baslamag'a iye, biraqta wog'an sali'sti'rg'anda buri'lg'an basqa (ekinshi) dekartli'q esaplaw sistemasi'nda $\mathbf{r}$ vektori' basqa x', y', z' komponentlerine iye boladi': $\mathbf{r} = x'\mathbf{i}' + y'\mathbf{j}' + z'\mathbf{k}'$. Shtrixlang'an komponentler shtrixlanbag'an komponentler arqali' to'mendegi usi'l boyi'nsha an'lati'ladi'.

$$x'_i = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} x_j$$

bul jerde α_{ij} - tu'rlendiriw koefficienti, da'slepki j shi ko'sher menen buri'lg'an sistemani'n i shi ko'sheri arasi'ndag'i' mu'yeshtin' kosinusi'n o'z ishine aladi'. Bul transformaciyali'q qa'siyetti, vektorli'q shama tu'sinigin ani'qlawdi'n tiykari' dep atawg'a boladi': u'sh a_i ($i = 1, 2, 3$) shamasini'n ji'yi'ndi'si'n $\mathbf{a}$ vektori' dep ataymi'z, wol koordinatali'q sistemani' buri'wda x_1, x_2, x_3 koordinatalari' tu'rinde

tu'rlenedi.

$$a'_i = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} a_j \quad (1.1)$$

Eki $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ ha'm $\mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z)$ vektorlari'na sa'ykes tu'rde skalyar shamani' qoyi'p, skalyar ko'beymeni payda etiwge boladi' (basqa koordinata sistemasi'na o'tiwde o'zgermeydi)

$$\mathbf{ab} = ab \cos \alpha ,$$

α - $\mathbf{a}$ ha'm $\mathbf{b}$ arasi'ndag'i' mu'yesh. Dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda skalyarli'q ko'beyme vektorlardi'n' proekciyasi' arqali' to'mendegi formula boyi'nsha esaplanadi'.

$$\mathbf{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z .$$

Egerde $\mathbf{a} \perp \mathbf{b}$ bolsa, wonda $\mathbf{ab} = 0$ boladi'.

Eki $\mathbf{a}$ ha'm $\mathbf{b}$ vektorlari'na to'mendegi sha'rtlerdi qanaatlandi'ri'wshi' sa'ykes $\mathbf{c}$ vektori'n qoyi'wg'a boladi': 1) $|\mathbf{c}| = |\mathbf{a}||\mathbf{b}| \sin \theta$; 2) $\mathbf{c}$ vektori' $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ vektorlari'na ortogonal; 3) $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ vektorlari' on' u'shlikti payda etedi. Usi'nday taqlette quri'lg'an $\mathbf{c}$ vektori' $\mathbf{a}$ ha'm $\mathbf{b}$ vektorlari'ni'n' vektorli'q ko'beymesi dep ataladi' ha'm $[\mathbf{ab}]$ tu'rinde belgilenedi. Dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda $[\mathbf{ab}]$ to'mendegi usi'lda esaplanadi'.

$$[\mathbf{ab}] = (a_y b_z - a_z b_y) \mathbf{i} + (a_z b_x - a_x b_z) \mathbf{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \mathbf{k} ,$$

yamasa qi'sqa simvolikali'q jazi'li'wda

$$[\mathbf{ab}] = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

Ko'beytiwshilerdin' worni'n almasti'ri'wda vektorli'q ko'beyme belgisin o'zgartedi. Solay etip, $[\mathbf{ab}] \perp \mathbf{a}, \mathbf{b}$; $[\mathbf{ba}] = -[\mathbf{ab}]$. Dara jag'dayda, yag'ni'y egerde vektorli'q ko'beymenin' ko'beytiwshileri kollinear (yag'ni'y, parallel yamasa antiparallel) bolsa, wonda vektorli'q ko'beyme no'lge ten' boladi'.

$[ab] = 0$, egerde $a \uparrow\uparrow b$ yamasa $a \uparrow\downarrow b$.

U'sh vektordan, aralas ko'beymeni ($a[bc]$) yamasa ekilengen vektorli'q ko'beymeni $[a[bc]]$ du'ziwge boladi'. Aralas ko'beymenin' ko'beytiwshilerin cikli tu'rinde (yamasa cikllik emes, biraq belgisin o'zgertiwi) worni'n almasti'ri'p, birdeylik an'latpani' ali'wg'a boladi':

$$(a[bc]) = (c[ab]) = (b[ca]) = -(b[ac]) = -(c[ba]) = -(a[cb]).$$

Aralas ko'beymenin' moduli, ko'beytiwshilerden du'zilgen parallelepipedtin' ko'lemine ten'. Bunnan to'mendegi ani'q boladi', yag'ni'y ko'beytiwshiler bir tegislikte jatqanda (tek usi' jag'dayda) aralas ko'beyme no'lge ten' boladi'.

Ekilengen vektorli'q ko'beymeni to'mendegi tu'rde jayi'wg'a boladi':

$$[a[bc]] = b(ac) - c(ab).$$

(1.1) sha'rti boyi'nsha tu'rleniwshi vektorlar buri'li'wda, koordinata sistemasi'ni'n' inversiyasi'nda o'zin ekilemshi tu'rde tuti'wi' mu'mkin, yag'ni'y to'mendegi tu'rdegi tu'rleniwde

$$x'_i = -x_i \quad (1.2)$$

bul jerde $\alpha_{ij} = -\delta_{ij}$ tu'rleniw matricasi'. Komponentleri x_i tu'rindagi vektorlar, inversiyada belgisin o'zgertiredi, wolar haqi'yqi'y yamasa polyarli'q dep ataladi'. Koordinatani'n' inversiyasi'nda komponentleri belgilerin o'zgertirmeytug'i'n vektorlar psevdovektorlar yamasa aksialli'q dep ataladi' (aylani'wdi'n' mu'yeshlik tezligi, eki polyar vektorlardi'n' vektorli'q ko'beymesi $[ab]$ ha'm t.b.).

O'zbetinshe sheshiw ushi'n ma'seleler

1.1. To'mendegilerdi esaplan'i'z: a) $[ab]$ vektorli'q ko'beymeni; b) $(a[ba])$ aralas ko'beymeni; v) egerde $a = i - k$, $b = i + k$ bolsa, wonda a ha'm b arasi'ndagi' mu'yeshiti.

1.2. $a_1 + a_2$ vektori' boylap bag'i'tlang'an birlik vektordi' tabi'n'i'z, bul jerde $a_1 = 2i + 3j - 4k$, $a_2 = i + 3j + 2k$.

1.3. $\mathbf{a} = \mathbf{i} - 2\mathbf{j} + \mathbf{k}$ vektori'ni'n' $\mathbf{b} = 4\mathbf{i} - 4\mathbf{j} + 7\mathbf{k}$ vektori'na proekciyasi'n tabi'n'i'z.

1.4. $(\mathbf{ab})^2 + [\mathbf{ab}]^2 = a^2b^2$ ten'ligin da'lillen'iz.

1.5. $\mathbf{a} - \mathbf{b}$ ha'm $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ vektorlari': a) ortogonalli'q; b) kollinearli'q boli'wi' ushi'n, $\mathbf{a}$ ha'm $\mathbf{b}$ vektorlari' qanday sha'rtti qanaatlandi'ri'wi' kerek?

1.6. $\mathbf{a} = 3\mathbf{i} + 2\mathbf{j} - \mathbf{k}$, $\mathbf{b} = -6\mathbf{i} - 4\mathbf{j} + 2\mathbf{k}$, $\mathbf{c} = \mathbf{i} - 2\mathbf{j} - \mathbf{k}$ vektorlari' berilgen. Wolar'di'n' qaysi' biri bir-birine perpendikulyar, qaysi'lari' parallel yamasa antiparallel ekenligin ani'qlan'i'z.

1.7. $\mathbf{A} = 2\mathbf{i} + \mathbf{j} - \mathbf{k}$ ha'm $\mathbf{B} = \mathbf{i} - \mathbf{j} + \mathbf{k}$ vektorlari'na perpendikulyar, birlik vektordi' tabi'n'i'z.

1.8. $\mathbf{A}$ ha'm $\mathbf{B}$ vektorlari' belgili. $\mathbf{A}$ vektori'n eki vektordi'n' qosi'ndi'si' tu'rinde ko'rsetin'iz: $\mathbf{B}$ vektori'na $\mathbf{A}_{\parallel}$ -parallellik ha'm $\mathbf{A}_{\perp}$ -perpendikulyarli'q vektorlar.

1.2. Vektorli'q analiz

Tiykarg'i' differencialli'q operaciyalar. Egerde ken'isliktin' qa'legen noqati'na (yamasa ken'isliktin' bir bo'limine) sa'ykes tu'rde qandayda shama qoyi'lsa, wonda usi' shamani'n' maydani' ken'islikte berilgen dep ayti'ladi'. Egerde ken'isliktin' qa'legen noqati'na sa'ykes tu'rde san qoyi'lsa, wonda maydan skalyarli'q; egerde ken'isliktin' qa'legen noqati'na sa'ykes tu'rde vektor qoyi'lsa, wonda maydan vektorli'q dep ataladi'.

Formalli'q ko'z qarasta maydan noqatti'n' funkciyasi' boladi'. Meyli skalyar maydan berilgen bolsi'n: $f = f(\mathbf{r})$. Egerde ken'islikte qandayda bir dekartli'q koordinatalar sistemasi' tan'lap ali'ng'an bolsi'n, sonda mi'nani' jaza alami'z: $f = f(x, y, z)$. Ken'islikte qandayda bir M noqati'n alami'z. Barli'q mu'mkin bolg'an bag'i't boyi'nsha wonnan shi'g'i'wi' mu'mkin. Qandayda bir l bag'i'ti'n tan'lap alami'z (1-su'wret). l din' bag'i'ti' boyi'nsha f tin' tuwi'ndi'si', berilgen bag'i'ttag'i' maydanni'n' o'zgeriw tezligi dep ataladi':

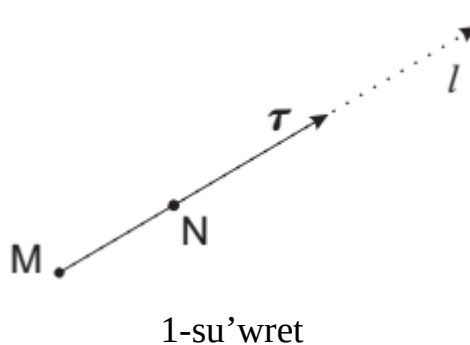
$$\frac{df}{dl} = \lim_{N \rightarrow M} \frac{f(N) - f(M)}{MN}.$$

l din' berilgen bag'i'ti'nda x, y, z koordinatalari' l arali'qti'n' funkciyasi' boli'p tabi'ladi' $f = f(x(l), y(l), z(l))$, sonli'qtan f ti quramali' funkciya tu'rinde differenciallaw mu'mkin boladi':

$$\frac{df}{dl} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dl} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dl} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{dz}{dl}.$$

Keyingi an'latpani' eki vektordi'n' skalyarli'q ko'beymesi tu'rinde ko'rsetemiz:

$$\frac{df}{dl} = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \right) \left(\frac{dx}{dl} \mathbf{i} + \frac{dy}{dl} \mathbf{j} + \frac{dz}{dl} \mathbf{k} \right).$$



Bul jerde birinshi vektor, f maydani'ni'n' **gradienti** dep ataladi'

$$\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \quad (1.3)$$

Ekinshi vektor

$$\frac{dx}{dl} \mathbf{i} + \frac{dy}{dl} \mathbf{j} + \frac{dz}{dl} \mathbf{k} = \frac{d(x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k})}{dl} = \frac{d\mathbf{r}}{dl} = \boldsymbol{\tau}$$

- bul l din' bag'i'ti'ndag'i' birlik vektor. Solay etip,

$$\frac{df}{dl} = (\text{grad } f \cdot \boldsymbol{\tau}). \quad (1.4)$$

Keyingi an'latpadan to'mendegi kelip shi'g'adi', yag'ni'y M noqati'ndag'i' $\text{grad } f$ vektori', f maydani'ni'n' en' joqari' tezlikli o'siw ta'repin ko'rsetedi, soni'n' menen birge bul en' joqari' tezlik $|\text{grad } f|$ ke ten'. Bul tasti'yi'qlawdan (wol gradienttin' geometriyali'q ma'nisin beredi) gradienttin' qarali'p ati'ri'lg'an maydan menen invariantli' baylani'sqanli'g'i'n ko'rsetedi, yag'ni'y dekartli'q ko'sherlerdi almasti'ri'wda o'zgerissiz qaladi' (qandayda bir koordinata sistemasi'na «baylang'an» invriant emes tu'rde berilgen (1.3) degi ani'qlamada bul ko'rinbeydi). Solay etip, skalyar maydanni'n' gradienti vektorli'q maydandi' payda etedi.

Egerde vektorli'q differencialli'q **operator** ∇ («**nabla**») ni' kiritsek

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}, \quad \text{yamasa } \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

wonda (1.3) to'mendegi tu'rde jazi'wg'a boladi'

$$\text{grad } f = \nabla f,$$

al (1.4) in bolsa mi'na tu'rde jazi'wg'a boladi'

$$\frac{df}{dl} = (\boldsymbol{\tau} \cdot \nabla f) = (\boldsymbol{\tau} \cdot \nabla) f.$$

Sferali'q simmetriyali' f funkciyasi'ni'n' dara jag'dayi'n qarap o'temiz (yag'ni'y, koordinata basi'na shekemgi $r = |\mathbf{r}|$ arali'qtan g'a'rezli funkciyani').

1- ma'sele. $\text{grad } f(r) = \frac{df}{dr} \frac{\mathbf{r}}{r}$ ekenligin ko'rsetin'iz.

Dekartli'q koordinata sistemasi'nda gradient ushi'n (1.3) shi an'latpasi'nan paydalanami'z. $r = |\mathbf{r}|$ di x, y, z ($r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$) arqali' an'latami'z ha'm esaplaymi'z

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{df}{dr} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{df}{dr} \frac{x}{r}.$$

Sa'ykes tu'rde $\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{df}{dr} \frac{y}{r}, \quad \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{df}{dr} \frac{z}{r}$, bunnan

$$\text{grad } f(r) = \frac{df}{dr} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad \blacksquare \quad (1.6)$$

Endi, $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ vektorli'q maydandi' qarap o'temiz ha'm divergenciya operatsiyasi'n kiritemiz. Tuyi'q S beti arqali' $\mathbf{a}$ maydani'ni'n', usi' bet penen shegaralang'an bo'lim ko'lemine qatnasi'n du'zemiz

$$\frac{\oint \mathbf{a} dS}{V}.$$

Usi' bo'limdi M noqati'na ji'ynawda bul qatnasti'n' shegi, M noqati'ndag'i' $\mathbf{a}$ maydani'ni'n' **divergenciya** dep ataladi':

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = \lim_{(V) \rightarrow M} \frac{\oint \mathbf{a} d\mathbf{S}}{V}. \quad (1.7)$$

Vektorli'q maydanni'n' divergenciyasi' skalyarli'q maydandi' payda etetug'i'nli'g'i'n atap o'temiz.

2- ma'sele. (1.7) shi ani'qlamadan kelip shi'qqan halda, dekartli'q koordinata sistemasi'nda divergenciya ushi'n an'latpani' ali'n'i'z.

(1.7) shi formulasi'ndag'i' ko'lem si'pati'nda qabi'rg'alari' koordinata ko'sherlerine parallel bolg'an sheksiz kishkene tuwri'mu'yeshli parallelepipedti alami'z. Sonda parallelepipedtin' beti arqali' $\mathbf{a}$ vektori'ni'n' ag'i'mi'n, parallelepipedtin' alti' qi'ri'na juwap beriwshi alti' qosi'li'wshi' tu'rinde ko'rsetiwge boladi':

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{a} d\mathbf{S} &= [a_x(x+dx, \bar{y}, \bar{z}) - a_x(x, \bar{y}, \bar{z})] dydz \\ &\quad + [a_y(\bar{x}, y+dy, \bar{z}) - a_y(\bar{x}, y, \bar{z})] dx dz \\ &\quad + [a_z(\bar{x}, \bar{y}, z+dz) - a_z(\bar{x}, \bar{y}, z)] dx dy \\ &\approx \left(\frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \right) dV. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Qaptallari' boyi'nsha betlik integrallardi' esaplawda ortasha haqqi'ndag'i' teorema qollani'lg'an, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ shamalari' sa'ykes keliwshi qaptallardag'i' qandayda noqattag'i' koordinatani'n' ma'nisi. Qarama-qarsi' qaptallardag'i' normal qarama-qarsi' bag'i'tqa iye ekenligi esapqa ali'ng'an, al ko'lemnin' M noqati'na ji'ynali'wi'nda barli'q koordinatalar usi' noqatqa tiyisli ma'nisti qabi'l etedi. Na'tiyjede (1.7) si dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda divergenciya ushi'n to'mendegi an'latpag'a ali'p keledi:

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}. \quad \blacksquare \quad (1.9)$$

(1.5), (1.9) di'qqatqa ali'p, vektorli'q maydanni'n' divergenciyasi'n, ∇

operatori'ni'n' $\mathbf{a}$ vektori'na skalyarli'q ko'beymesi tu'rinde jazi'wg'a boladi':

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = (\nabla \mathbf{a}). \quad (1.10)$$

3-ma'sele. (1.7) degi divergenciyani'n' ani'qlamasi'na tiykarlani'p, qandayda bir ko'lemdi shegaralawshi' bet arqali' $\mathbf{a}$ vektori'ni'n' ag'i'mi' menen usi' ko'lem boyi'nsha $\operatorname{div} \mathbf{a}$ dan ali'ng'an integraldi' baylani'sti'ri'wshi' qatnasti' keltirip shi'g'ari'n'i'z.

S beti menen shegaralang'an qa'legen V ko'lemin alami'z. Oni' kishkene ΔV_i quti'shalarg'a bo'lemiz, wolardi'n' ha'rbiri S_i beti menen shegaralang'an. Si'rtqi' S betine tiyip turg'an quti'shalarda, woni' shegaralawshi' betinin' bo'limi, S penen sa'ykes keledi. S_i betinin' barli'q qalg'an bo'limi, qon'si'las eki quti'sha ushi'n uli'wmali'q boli'p qaladi'. Ha'r bir quti'shani'n' kishiliginen paydalani'p, (1.7) in shama menen to'mendegi tu'rde jazami'z:

$$(\operatorname{div} \mathbf{a})_i \Delta V_i \approx \oint_{S_i} \mathbf{a} dS_i.$$

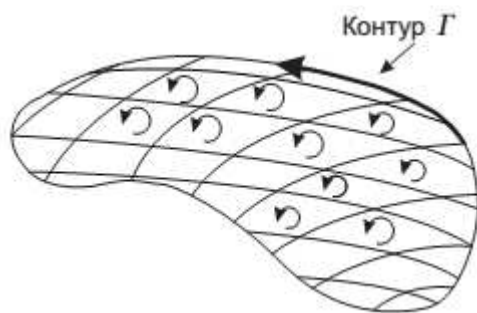
Endi, i boyi'nsha shama menen ali'ng'an aqi'rg'i' ten'liginin' on' ha'm shep ta'replerin qosami'z ha'm ha'rbir quti'shani'n' ko'lemin no'lge umti'ldi'ri'p shekke o'temiz. Bul jag'dayda ten'liktin' shep ta'repi, toli'q ko'lem boyi'nsha divergenciyadan ali'ng'an integralg'a o'tedi. Ten'liktin' on' ta'repindegi, S_i betinin' ishki bo'limlari boyi'nsha ali'ng'an integral biri- birin joq etedi, sebebi eki qon'si'las quti'shalar ushi'n si'rtqi' normal qarama-qarsi' bag'i'tqa iye. Tek S tin' si'rtqi' beti boyi'nsha integral qaladi'. Na'tiyjede to'mendegi qatnasti' alami'z

$$\int_V \operatorname{div} \mathbf{a} dV = \oint_S \mathbf{a} dS, \quad (1.11)$$

bul Ostrograd-Gauss teoremasi' dep ataladi'. ■

Endi vektorli'q maydanni'n' rotori' tu'sinigin kiritemiz. Qandayda bir $\mathbf{n}$ bag'i'ti'na perpendikulyar bolg'an tegis maydانشani' qarap o'temiz. Usi' maydانشani' shegaralawshi' kontur boyi'nsha $\mathbf{a}$ vektori'ni'n' cirkulyaciyasi'n ha'm woni'n' maydانشa shamasina qatnashi'n tabami'z:

$$\frac{\oint \mathbf{a} d\mathbf{l}}{S}.$$



Maydanshani' (tegisi boli'p qali'wshi') M noqati'na ji'ynawdag'i' bul qatnasti'n' shegi, $\mathbf{n}$ (konturdi' aylani'wshi' bag'i't penen on' vintlik sistemani' payda etiwshi) bag'i'ti'na $\mathbf{a}$ vektorli'q maydan rotorini'n' proekciyasi' dep ataladi'

2-su'wret

$$(\text{rot } \mathbf{a})_n = \lim_{(S) \rightarrow M} \frac{\oint \mathbf{a} d\mathbf{l}}{S}. \quad (1.12)$$

To'mendegige di'qqat awdari'wi'mi'z kerek, yag'ni'y rot operaciyasi' vektorli'q maydang'a qollani'ladi' ha'm rotordini'n' o'zi vektorli'q maydan boli'p tabi'ladi'.

Egerde qaptallari' koordinata ko'sherlerine parallel bolg'an sheksiz kishkene tuwri'mu'yeshlik boyi'nsha cirkulyaciyani' qaraytug'i'n bolsaq, wonda dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda $\text{rot } \mathbf{a}$ ushi'n an'latpani' tabi'wg'a boladi'.

$$\text{rot } \mathbf{a} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ a_x & a_y & a_z \end{vmatrix}.$$

Operator ∇ arqali' rotor to'mendegi tu'rde an'lati'ladi':

$$\text{rot } \mathbf{a} = [\nabla \mathbf{a}],$$

yag'ni'y, $\mathbf{a}$ vektorli'q maydanni'n' rotorini', ∇ vektori'ni'n' $\mathbf{a}$ vektori'na vektorli'q ko'beymesini boli'p tabi'ladi'.

Qa'legen G konturi' boyi'nsha cirkulyaciya, sol G konturini'n' bo'lingan eki kishi konturlari' boylap cirkulyaciyasini'n' qosi'ndisi' boli'p tabi'ladi':

$\oint_G = \oint_{G_1} + \oint_{G_2}$. Sonda, qa'legen konturdi' sheksiz kishi bo'limlarga bo'lip (2-su'wretke qaran'), ha'rbir bo'lim ushi'n (1.12) in qollani'p ha'm to'mendegi ten'lemenini barli'q bo'lim boyi'nsha qosi'p

$$\oint_{G_i} \mathbf{a} d\mathbf{l} = (\text{rot} \mathbf{a})_i \Delta S_i$$

mi'nani' alami'z

$$\oint_G \mathbf{a} d\mathbf{l} = \int_S \text{rot} \mathbf{a} d\mathbf{S}. \quad (1.13)$$

Stoks teoremasi' usi'nnan turadi': Tuyi'q kontur boyi'nsha maydanni'n' cirkulyaciya'si, ko'rsetilgan kontur menen shegaralang'an bet orqali' usi' maydanni'n' rotori'ni'n' ag'i'mi'na ten'.

Simvolikali'q esaplap shi'g'ari'wlar. Skalyarli'q ha'm vektorli'q maydanlardin' ko'beymelerinen differencialli'q operaciylar ju'rgiziwde, ∇ operatori'n qollani'p esaplawlar ju'rgiziw qolayli' boladi'. ∇ operatori'n qollani'wdag'i' maqset, woni'n' ja'rdeminde vektorli'q analizdin' ha'rqi'yli' formulalari'n jazi'w ha'm ali'w qolayli' boladi'. ∇ - differencialli'q vektorli'q operator, wol ko'beymenin' ha'm vektordin' qa'siyetin beredi ha'm wolar menen islengen operaciylarda vektorli'q algebra formulalari'n ha'm differenciallaw usi'llari'n qollani'w kerek boladi'.

4-ma'sele. Eki skalyarli'q funkciyani'n' ko'beymesinin' gradientin esaplan'i'z.

Vektorli'q algebrani'n' usi'llari'nan ha'm ∇ qa'siyetlerinen to'mendegi kelip shi'g'adi'

$$\text{grad}(fg) = \nabla(fg) = \nabla(\tilde{f}g) + \nabla(f\tilde{g}) = g\nabla f + f\nabla g. \quad \blacksquare$$

Solay etip, ko'beymege differencialli'q operaciyani' qollani'w ushin' oni' ∇ operatori' orqali' qayta jazi'w kerek, eki qosi'li'wshini' jazi'w (bunda ∇ operatori' da'slep birinshi ko'beytiwshige, keyin ekinshisine ta'sir jasadidi') ha'm vektorli'q algebrani'n' usi'llari'nan paydalani'p ko'beytiwshilerdi sonday etip qoyi'wi'miz kerek, yag'ni'y ∇ ta'sir jasaditug'i'n ko'beytiwshilerdi ∇ operatori'ni'n' asti'nan «shi'g'ari'w» kerek (mi'salg'a, ko'beytiwshilerdi sonday

etip qoyi'wi'mi'z kerek, yag'ni'y ∇ ta'sir jasamaytug'i'n ko'beytiwshiler woni'n' on' ta'repinde qali'wi' kerek, bizde $\tilde{f}$ -penen ta'sir jasaytug'i'n ko'beytiwshi belgilengen).

Ko'beymedegi differencialli'q operaciylardi' esaplaw ushi'n ja'ne eki mi'sal qarap o'temiz.

5-ma'sele. $div[ab] = b \text{ rota} - a \text{ rot} b$ ekenligin da'lillen'iz.

Simvolikali'q esaplap shi'g'ari'wdi' qollani'p esaplaymi'z:

$$\begin{aligned} div[ab] &= (\nabla[ab]) = (\nabla[\tilde{a}b]) + (\nabla[a\tilde{b}]) = (b[\nabla a]) - (a[\nabla b]) \\ &= b \text{ rota} - a \text{ rot} b. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

6-ma'sele. $grad(ab) = [b \text{ rota}] + (b\nabla)a + [a \text{ rot} b] + (a\nabla)b$ ekenligin da'lillen'iz.

Skalyarli'q ko'beymege ∇ operatori' menen ta'sir etemiz

$$\nabla(ab) = \nabla(\tilde{a}b) + \nabla(a\tilde{b}) = \nabla(b\tilde{a}) + \nabla(a\tilde{b}).$$

On' bo'limdegi ag'zalardi' tu'rlendirip:

$$\nabla(b\tilde{a}) = \nabla(b\tilde{a}) - \tilde{a}(b\nabla) + \tilde{a}(b\nabla) = [b[\nabla a]] + (b\nabla)a$$

ha'm sa'ykes tu'rde ekinshi qosi'li'wshi'ni' tu'rlendirip birdeyliktin' duri'sli'g'i'n da'lilleymiz. $\blacksquare$

Eki funkciyani'n ko'beymesine ∇ operatori'ni'n ta'sirinin' qalg'an jag'daylari'n o'zbetinshe u'yreniw usi'ni's etiledi (usi' bo'limnin' keynindegi 1.12-1.14 shi ma'selelarga qaran').

Ekinshi ta'rtpi differencialli'q operaciylar. Vektorli'q analizdin' qosi'mshalari'nda, tek $grad, div, rot$ operaciylari'ni'n ori'nlani'wi' menen emes, al wolardi'n ha'rqi'yli' kombinaciylari' menen is ali'p bari'wg'a tuwra keledi. Ko'pshilik jag'daylarda ekinshi ta'rtpi operaciylar jiyi ushi'rasadi', yag'ni'y tiykarg'i' u'sh operaciyani'n jupli'q kombinaciylari'. $grad, div, rot$ simvollari'n jupli'qta kombinaciylap, tog'i'z jupli'qti' du'ziwge boladi', biraqta

to'mendegi besewi ma'niske iye boladi':

$$1) \operatorname{rot} \operatorname{grad} f = [\nabla, \nabla f] = [\nabla, \nabla]f = 0;$$

$$2) \operatorname{div} \operatorname{grad} f = (\nabla, \nabla f) = (\nabla, \nabla)f = \nabla^2 f = \Delta f;$$

$$3) \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{a} = (\nabla[\nabla \mathbf{a}]) = 0;$$

$$4) \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{a} = [\nabla[\nabla \mathbf{a}]] = \nabla(\nabla \mathbf{a}) - (\nabla, \nabla)\mathbf{a} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{a} - \Delta \mathbf{a}$$

(«rotordi'n' rotori' divergenciyan'i'n' gradientinen laplasiandi' alg'ang'a ten'»);

$$5) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{a} - \Delta \mathbf{a} \text{ inshi punktke qaran'i'z.}$$

Skalyarli'q differencialli'q operator $\Delta = \nabla^2$ (2-punktke qaran'i'z) Laplas operatori' dep ataladi' ha'm dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda to'mendegishe jazi'ladi'

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1.14)$$

Integralli'q qatnasi'qlar. Ostrogradi'n' (1.11) ha'm Stoksti'n' (1.13) teoremlari' basqa integralli'q qatnasi'qlardi' ali'wg'a mu'mkinshilik beredi. Mi'salg'a, Ostrogradi'n' (1.11) shi formulasi'na $\mathbf{a} = \mathbf{c}f$ ti qoysaq, bul jerde $\mathbf{c}$ -qa'legen turaqli' vektor, wonda divergenciyan'i' esaplay oti'ri'p to'mendegini tabami'z

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = \operatorname{div}(\mathbf{c}f) = \mathbf{c} \operatorname{grad} f.$$

(1.11) ne qoyi'p, mi'na ten'likke kelemiz

$$\left(\mathbf{c}, \int_V \operatorname{grad} f dV \right) = \left(\mathbf{c}, \oint_S f d\mathbf{S} \right).$$

yamasa, $\mathbf{c}$ vektori'ni'n' erkinligin esapqa ali'p, to'mendegini alami'z

$$\int_V \operatorname{grad} f dV = \oint_S f d\mathbf{S}.$$

Endi, $\mathbf{a} = \mathbf{c}f$ Stoksti'n' formulasi'na qoyami'z. Rotordi' esaplap, to'mendegini tabami'z

$$\operatorname{rot} \mathbf{a} = \operatorname{rot}(\mathbf{c}f) = -[\mathbf{c} \operatorname{grad} f],$$

wonda

$$-\left(\mathbf{c}, \int_S [\operatorname{grad} f d\mathbf{S}]\right) = \left(\mathbf{c}, \oint_L f d\mathbf{l}\right).$$

Bunnan integralli'q qatnasi'qti' alami'z

$$-\int_S [\operatorname{grad} f d\mathbf{S}] = \oint_L f d\mathbf{l}.$$

O'zbetinshe sheshiw ushi'n ma'seleler

1.9. Esaplan'i'z: a) $\operatorname{grad} r$; b) $\operatorname{grad} r^2$; v) $\operatorname{grad} \frac{1}{r}$, bul jerde $r = |\mathbf{r}|$,

$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$.

1.10. $\operatorname{grad}(\mathbf{c}\mathbf{r})$ tabi'n'i'z, bul jerde $\mathbf{c}$ — turaqli' vektor, $\mathbf{r}$ —koordinata basi'nan ju'rgizilgen radius- vektor.

1.11. Esaplan'i'z: a) $\operatorname{div} \mathbf{r}$; b) $\operatorname{rot} \mathbf{r}$.

1.12. Esaplan'i'z: $\operatorname{div} (f\mathbf{a})$.

1.13. Esaplan'i'z: $\operatorname{rot} (f\mathbf{a})$.

1.14. $\operatorname{rot}[\mathbf{a}\mathbf{b}] = (\mathbf{b}\nabla)\mathbf{a} - (\mathbf{a}\nabla)\mathbf{b} + \mathbf{a} \operatorname{div}\mathbf{b} - \mathbf{b} \operatorname{div}\mathbf{a}$ - ekenligin da'lillen'iz.

1.15. Esaplan'i'z: a) $\operatorname{div} \frac{\mathbf{r}}{r}$; b) $\operatorname{div}[\mathbf{c}\mathbf{r}]$, bul jerde $\mathbf{c}$ —turaqli' vektor.

1.16. Esaplan'i'z: a) $\operatorname{rot}(f(r)\mathbf{r})$; b) $\operatorname{rot}[\mathbf{c}\mathbf{r}]$, bul jerde $\mathbf{c}$ —turaqli' vektor.

1.17. $[(\mathbf{M}\nabla)\mathbf{r}] = -2\mathbf{M}$ ten'ligin da'lillen'iz.

1.18. Esaplan'i'z: $\operatorname{grad} \frac{(\mathbf{d}\mathbf{r})}{r^3}$, bul jerde $\mathbf{d}$ —turaqli' vektor.

1.19. Esaplan'i'z: $\operatorname{rot} \frac{[\mathbf{M}\mathbf{r}]}{r^3}$, bul jerde $\mathbf{M}$ —turaqli' vektor.

1.20. Esaplan'i'z: a) $(\mathbf{a}\nabla)\mathbf{r}$; b) $(\mathbf{a}\nabla)f(r)$; v) $(\mathbf{a}\nabla)(\mathbf{c}\mathbf{r})$.

1.21. Esaplan'i'z: $\operatorname{div}(\mathbf{b}(\mathbf{r}\mathbf{a}))$, bul jerde $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ —turaqli' vektor.

1.22. Qa'legen tuyi'q kontur boylap $\mathbf{a} = f(r)\mathbf{r}$ vektori'ni'n' cirkulyaciyasi'ni'n'

no'lge ten' ekenligin da'lillen'iz.

1.23. $\int \text{rot } \mathbf{a} dV = \oint [d\mathbf{S}\mathbf{a}]$ - integralli'q ten'ligin da'lillen'iz.

1.3. Iymek si'zi'qli' koordinatalar

Elektrodinamika ma'selelerin sheshiwde, dekartli'q penen bir qatarda, basqa koordinatalar sistemasi'n jiyi qollani'wg'a tuwra keledi. Egerde u_i , $i = 1, 2, 3$ sani'ni'n' u'shligi ken'isliktegi qa'legen noqatti'n' jaylasi'wi'n ani'qlaytug'i'n bolsa, wonda u_i shamasi'n ken'isliktegi noqatti'n' koordinatalari' dep qarawg'a boladi'. A'dette u_i koordinatalari', x, y, z dekart koordinatalari' arqali' an'lati'li'wi' mu'mkin: $u_i = u_i(x, y, z)$.

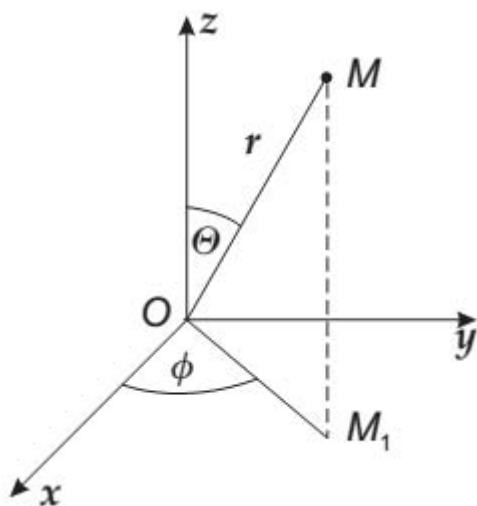
Ken'islikte $u_i(x, y, z) = C_i$ ten'lemesi **koordinatali'q betti** beredi. (dekart koordinatalar sistemasi'nda qanday betler koordinatali'q dep ataladi'?). C_i ge ha'rqi'yli' ma'nislerdi berip, koordinatali'q bettin' uyi'mi'n (semeystvo) alami'z. Solay etip, u'sh koordinatali'q bettin' ($i = 1, 2, 3$ ushi'n) uyi'mi' bar boladi', bunda ken'isliktin' qa'legen noqati' arqali' u'sh uyi'mni'n' ha'rbirinin' bir dana beti o'tedi. Ha'rbir uyi'mni'n' koordinatali'q betleri kesilisetug'i'n si'zi'q **koordinatali'q si'zi'qlar** dep ataladi'. Dekartli'q koordinatalar sistemasi'nda bul si'zi'qlar koordinatali'q ko'sherlerge parallel boladi'. Erkin koordinatalar sistemasi'nda u_i koordinatali'q si'zi'qlari', uli'wma aytqanda iymeklik, sonli'qtan koordinatalar iymek si'zi'qli' dep ataladi'. Egerde ken'isliktin' qa'legen noqati'nda koordinatali'q si'zi'qlar bir-birine ortogonal bolsa, wonda koordinatalar sistemasi' **ortogonalli'q** dep ataladi'. Dara jag'daylarda sferali'q ha'm cilindrlik koordinatalar sistemasi' ortogonalli'q dep ataladi'.

Egerde ken'isliktin' qa'legen noqati'nda koordinatali'q si'zi'qlarg'a uri'nba ju'rgizip ha'm usi' uri'nba boyi'nsha sa'ykes koordinatalardi'n' o'siw ta'repinde birlik $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ vektorlari'n bag'i'tlasaq, wonda ortogonalli'q mo'lsherlengen bazisti alami'z. Turaqli' u'sh birlik vektorlar $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ menen ani'qlani'wshi' dekart koordinatalar sistemasi'nan o'zgesheligi, bul bazis noqattan noqatqa o'zgerip

turadi'. Bul zi'yan keltirmeydi, biraqta erkin jaylasi'wshi' M noqati'nda berilgen qa'legen vektordi' (yag'ni'y qa'legen vektorli'q maydan), si'ziqli' e_1, e_2, e_3 kombinatsiyasi' tu'rinde jazi'wg'a boladi'.

Sferali'q ha'm cilindrlik koordinatalar. *Sferali'q koordinatalar sistemasi'n* (s.k.s.) qarap o'temiz, bunda M noqati'ni'n' ken'islikte jaylasi'w hali' to'mendegi u'sh shama menen ani'qlanadi' (3-su'wretke qaran'i'z):

- 1) koordinata basi'nan M noqati'na shekemgi r arali'g'i';
- 2) z ko'sherinin' on' bag'i'ti' ha'm OM kesindisi arasi'ndag'i' θ mu'yeshi;
- 3) OM kesindisinin' xy tegisligine proektsiyasi' OM_1 ha'm x ko'sherinin' on' bag'i'ti' arasi'ndag'i' φ mu'yeshi.



3-su'wret

M noqati'ni'n' dekart koordinatalari' woni'n' sferali'q koordinatalari' menen to'mendegi qatnaslar menen baylani'sqanli'g'i' su'wrette ko'rinip tur:

$$\begin{aligned} x &= r \sin\theta \cos\varphi, & y &= r \sin\theta \sin\varphi, \\ z &= r \cos\theta. \end{aligned} \quad (1.15)$$

M noqati' barli'q ken'islik boyi'nsha o'tkende, sferali'q koordinatalar to'mendegi sheklerde o'zgeredi

$$\begin{aligned} 0 \leq r < \infty, & \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \\ 0 \leq \varphi < 2\pi. \end{aligned} \quad (1.16)$$

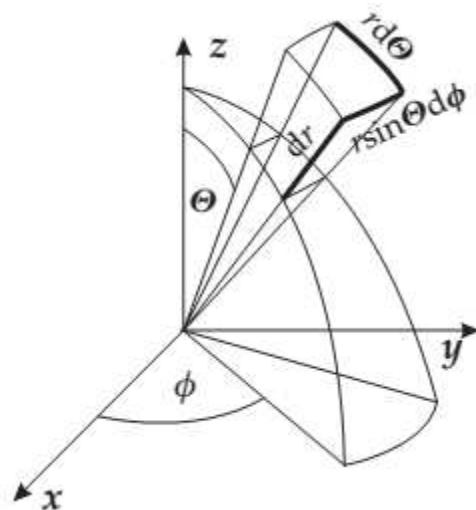
Koordinatali'q betke sheksiz jaqi'n u'sh jupli'q arasi'ndag'i' ko'lem elementin qarap o'temiz: radiuslari' r ha'm $r + dr$ bolg'an eki sferali'qti', θ ha'm $\theta + d\theta$ mu'yeshleri menen ani'qlani'wshi' eki yari'mkonuslardi' ha'm xz tegisligi menen φ ha'm $\varphi + d\varphi$ mu'yeshli payda etiwshi eki yari'mtegisliliklerdi (4-su'wretke qaran'i'z). Bul ko'lem elementi joqari' ta'rtiptin' en' kishisine shekemgi da'llikte, qabi'rg'alari' $r d\theta$, dr ha'm $r \sin\theta d\varphi$ bolg'an tuwri'mu'yeshli parallelepipedti

o'z ishini aladi'. Sonli'qtan, bul parallelepipedtin' ko'lemi mi'nag'an ten'

$$dV = r^2 \sin \theta \, dr d\theta d\varphi. \quad (1.17)$$

Sa'ykes tu'rde, eki jaqi'n meridianlar ha'm eki jaqi'n paralleller menen shegaralang'an r radiusli' sferani'n' betinin' bir bo'limin, qaptallari' $rd\theta$ ha'm $r \sin\theta d\varphi$ bolg'an sheksiz kishi tuwri'mu'yeshlik tu'rinde qarawg'a boladi', woni'n' maydani' mi'nag'an ten'

$$dS = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (1.18)$$



4-su'wret

Sfera bo'liminin' dS maydani'ni'n' sferani'n' radiusi'ni'n' kvadrati'na qatnasi', sferada dS betin kesiwshi denelik mu'yeshlin' shamasini' ani'qlaydi'

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2},$$

sonli'qtan sferali'q koordinatalarda

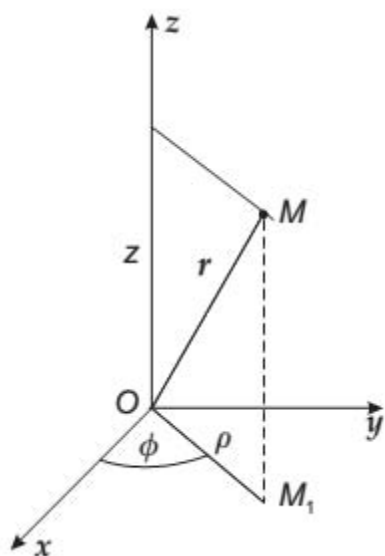
$$d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (1.19)$$

θ ha'm φ din' barli'q mu'mkin bolg'an ma'nisleri boyi'nsha integrallap, toli'q denelik mu'yeshli alami'z:

$$\Omega = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = 4\pi, \quad (1.20)$$

sferani'n' maydani'ni'n' $S = 4\pi r^2$ radiusti'n' kvadrati'na qatnasi'na ten'.

Cilindrlik koordinatalar sistemasi'nda (c.k.s.) ken'isliktegi M noqati'ni'n' joylasi'w orni', woni'n' dekartli'q koordinatasi' z ha'm woni'n' xy tegisligine proekciyasi'ni'n' polyarli'q (ρ, φ) koordinatalari' (2 ha'm 3 bo'limlerde cilindrlik koordinatalar ρ, φ dara jag'daylarda r, α menende belgilenedi) menen beriledi. 5-su'wretke muwapi'q M noqati'ni'n' dekartli'q koordinatalari' cilindrlik arqali' to'mendegi formula boyi'nsha an'lati'ladi'



$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad z = z. \quad (1.21)$$

Egerde M noqati' ken'islikte qa'legen ori'ndi' iyelew mu'mkinshiligine iye bolsa, wonda cilindrlik koordinatalar to'mendegi sheklerde o'zgeredi

$$0 \leq \rho < \infty, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad -\infty < z < \infty. \quad (1.22)$$

5-su'wret

ρ ha'm $\rho + d\rho$ radiusli' eki cilindrlik bet penen, z ha'm $z + dz$ qa'ddinde jati'wshi' eki gorizontallik tegislik penen ha'm x ko'sheri menen φ ha'm $\varphi + d\varphi$ mu'yeshlerin qurawshi' ha'm z ko'sheri arqali' o'tiwshi eki tegislik penen shegaralang'an bo'limdi qarap o'temiz. Bul bo'limdi $d\rho, dz$ ha'm $\rho d\varphi$ qabi'rg'alari'na iye tuwri'mu'yeshli parallelepiped dep esaplawg'a boladi', woni'n' ko'lemi mi'nag'an ten'

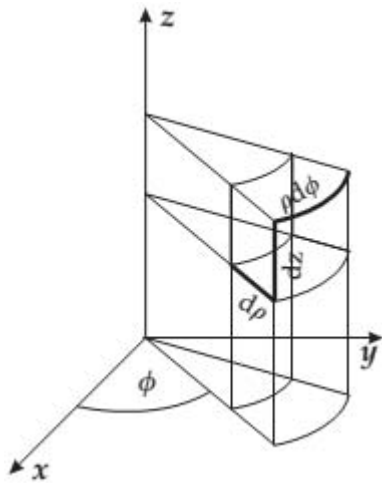
$$dV = \rho d\rho d\varphi dz \quad (1.23)$$

Egerde ρ radiusli' cilindrdin' qaptal betinen koordinata si'zi'qlari'ni'n' eki jupli'g'i' arasi'nan kishkene tuwri'mu'yeshlikti aji'rati'p alsaq, wonda woni'n' maydani' mi'nag'i'n ten' boladi'

$$dS = \rho d\varphi dz \quad (1.24)$$

Ko'lem elementleri ushi'n (1.17), (1.23) formulalar ha'm sferali'q ha'm cilindrlilik koordinatalarda (1.18), (1.24) maydanlar, usi' koordinatalar sistemasi'nda ko'lemlik ha'm betlik integrallardi' esaplawda kerek boladi'.

7-ma'sele. R radiusli' shardi'n' ko'lemi boyi'nsha $\rho = \rho_0(r/R)^2 \sin\theta \cos^2\varphi$ ti'g'i'zli'g'i' menen zaryad bo'listirilgen, bul jerde r, θ, φ — shardi'n' worayi'nan baslani'wshi' sferali'q koordinatalar sistemasi'ndag'i' koordinatalar. Shardi'n' toli'q zaryadi'n tabi'n'i'z.



6-su'wret

Shardi'n' toli'q Q zaryadi' arqali' an'lati'li'wshi' ko'lemlik $\int \rho(\mathbf{r}) dV$ integrali'n sferali'q koordinatalar sistemasi'nda esaplap, to'mendegini alami'z

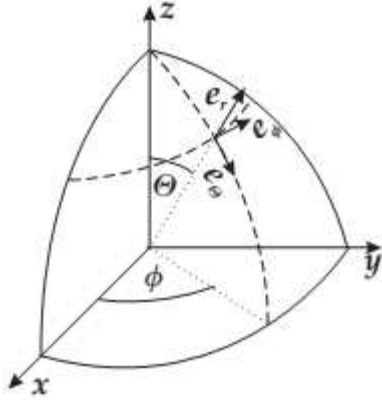
$$\begin{aligned} Q &= \frac{\rho_0}{R^2} \int_0^R r^4 dr \int_0^\pi \sin^2\theta d\theta \int_0^{2\pi} \cos^2\varphi d\varphi \\ &= \frac{\pi^2}{10} \rho_0 R^3. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

8-ma'sele. Radiusi' R ha'm biyikligi $2h$ bolg'an cilindrdin' qaptal beti boyi'nsha zaryad $\sigma = \sigma_0 \cos^2\varphi |z|/h$ ti'g'i'zli'g'i' menen bo'listirilgen, bul jerde φ, z cilindrdin' worayi'nan baslani'wshi' cilindrlilik koordinata sistemasi'ni'n' koordinatalari'. Cilindrdin' toli'q zaryadi'n tabi'n'i'z.

$$Q = \int \sigma dS = \frac{\sigma_0 R}{h} \int_0^{2\pi} \cos^2\varphi d\varphi \int_{-h}^h |z| dz = \frac{\pi}{2} \sigma_0 R h. \quad \blacksquare$$

Iymek si'zi'qli' koordinatalarda differencialli'q operaciylar. Gradient,

divergenciya, rotor si'yaqli' shamalardi' ko'pshilik jag'daylarda qanday da bir iymek si'zi'qli' koordinatalar sistemasi'nda jazg'an maqul boladi'. A'piwayi' geometriyalig' ko'z qarastan wolar ushi'n s.k.s ha'm c.k.s. dag'i' an'latpalardi' tabami'z.



7-su'wret

Sferali'q koordinatalar sistemasi'nda f funkciyasi'ni'n' gradienti bazislik $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$ vektorlari' boyi'nsha tarqati'li'wi' mu'mkin (7-su'wret). Qandayda bir bag'i'tqa $\text{grad } f$ tin' proekciyasi', usi' bag'i't boyi'nsha f tin' tuwi'ndi'si' menen sa'ykes keledi ((1.4) qaran'i'z), sonli'qtan, $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$ bazisinde $\text{grad } f$ vektori'ni'n' komponentlerin esaplaw ushi'n, usi' vektorlar menen ani'qlani'wshi' bag'i't boyi'nsha f tin' tuwi'ndi'si'n esaplaw kerek:

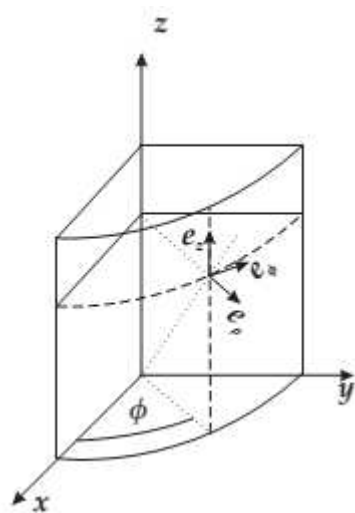
$$(\text{grad } f \cdot \mathbf{e}_i) = \frac{\partial f}{\partial l_i}.$$

Bazislik vektorlar boylap kishi awi'si'wlarda sferali'q koordinatalar sistemasi' to'mendegishe bolsa

$$dl_r = dr, \quad dl_\theta = r d\theta, \quad dl_\varphi = r \sin\theta d\varphi$$

(4-su'wretke qaran'i'z), wonda

$$\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi. \quad (1.25)$$



8-su'wret

Cilindrlilik koordinatalar sistemasi'nda bazislik $\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$ vektorlari' boylap sheksiz kishi awi'si'w (8-su'wret) to'mendegige ten' (6-su'wretke qaran'i'z)

$$dl_\rho = d\rho, \quad dl_\varphi = \rho d\varphi, \quad dl_z = dz,$$

Solay etip, cilindrlilik koordinatalar sistemasi'nda gradient to'mendegishe jazi'ladi'

$$\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial \rho} \mathbf{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z. \quad (1.26)$$

Iymek si'zi'qli' koordinatalarda divergenciyani' ha'm rotordi' esaplaw wolardi'n' invariantli'q ani'qlamalari'na (1.7), (1.12) tiykarlang'an. Sferali'q koordinatalar sistemasi'nda ko'lem elementin qarap o'temiz (4-su'wret), ha'm woni'n' beti arqali' ag'i'mdi' esaplaymi'z. Vektorli'q maydandi' to'mendegi tu'rde jazami'z

$$\mathbf{a} = a_r \mathbf{e}_r + a_\theta \mathbf{e}_\theta + a_\varphi \mathbf{e}_\varphi$$

ha'm, $r + dr$ ha'm r radiusli' sfera elementi arqali' $\mathbf{a}$ vektori'ni'n' ag'i'mi'n da'slep esaplaymi'z:

$$\begin{aligned} & a_r(r + dr, \bar{\theta}, \bar{\varphi}) \cdot (r + dr)^2 \sin\theta d\theta d\varphi - a_r(r, \bar{\theta}, \bar{\varphi}) \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \\ & \approx \frac{\partial(r^2 a_r)}{\partial r} \frac{1}{r^2} dV. \end{aligned}$$

ha'm

$$a_\varphi(\bar{r}, \bar{\theta}, \varphi + d\varphi) \cdot [dr \cdot r d\theta] - a_\varphi(\bar{r}, \bar{\theta}, \varphi) \cdot [dr \cdot r d\theta] \approx \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi} \frac{1}{r \sin\theta} dV.$$

Shamalardi'n' u'shewinin' barli'g'i'n qosi'p ha'm dV g'a bo'lip, sferali'q koordinatalar sistemasi'nada divergenciya ushi'n an'latpani' tabami'z:

$$\text{div} \mathbf{a} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial(\sin\theta a_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi}. \quad (1.27)$$

Rotordi'n' invariantli'q ani'qlamasi'nan (1.12) to'mendegi kelip shi'g'adi', yag'ni'y qandayda bir koordinatalar sistemasi'ni'n' M noqati'ndag'i' $rot \mathbf{a}$ komponentin ani'qlaw ushi'n, M noqati'n o'z ishine ali'wshi' ha'm usi' noqat arqali' ju'rgizilgen bazislik vektorg'a perpendikulyar sheksiz kishkene tegis maydansha menen shegaralang'an u'sh kontur boyi'nsha $\mathbf{a}$ ni'n' cirkulyაციyasi'n esaplaw kerek boladi'. Cilindrluk koordinatalar sistemasi'nda elementar ko'lem elementinin' to'mengi qaptali' menen shegaralang'an tuwri' mu'yeshli kontur boylap $\mathbf{a}$ ni'n' cirkulyაციyasi'n esaplaymi'z (6-su'wret). Tuwri'mu'yeshliktin' qaptallari' koordinatali'q si'zi'qlar boyi'nsha bag'i'tlang'an, al shamalari' boyi'nsha $(\rho + d\rho)d\varphi, d\rho, \rho d\varphi, d\rho$ larg'a ten' bolsa, wonda $\mathbf{a}$ ni'n' cirkulyაციyasi' to'rt qosi'li'wshi' arqali' an'lati'ladi':

$$a_\varphi(\rho + d\rho, \bar{\varphi}, z)(\rho + d\rho)d\varphi - a_\rho(\bar{\rho}, \varphi + d\varphi, z)d\rho - a_\varphi(\rho, \bar{\varphi}, z)\rho d\varphi + a_\rho(\bar{\rho}, \varphi, z)d\rho \approx \left[\frac{\partial(\rho a_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{\partial a_\rho}{\partial \varphi} \right] d\rho d\varphi.$$

Ali'ng'an an'latpani', qaptaldi'n' $dS = \rho d\rho d\varphi$ maydani'na bo'lip, bazislik $\mathbf{e}_z$ vektori'ni'n' bag'i'ti'nda $rot \mathbf{a}$ ni'n' komponentin tabami'z:

$$(rot \mathbf{a})_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho a_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial a_\rho}{\partial \varphi}. \quad (1.28)$$

Sa'ykes tu'rde qalg'an eki komponentleride esaplanadi':

$$(rot \mathbf{a})_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial a_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial a_\varphi}{\partial z}. \quad (1.29)$$

$$(rot \mathbf{a})_\varphi = \frac{\partial a_r}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial r}. \quad (1.30)$$

Usi'nday jollar menen cilindrluk koordinatalarda divergenciyaning ha'm sferali'q koordinatalarda rotordi' tabi'wg'a boladi', bul o'zbetinshe islewge tapsi'rma boladi'.

$grad f$ ha'm $div \mathbf{a}$ ushi'n an'latpalardan kelip shi'qqan halda, $\Delta f = div grad f$ ti esaplap, iymek si'zi'qli' koordinatalarda Laplas operatori'n tabi'wg'a boladi'.

Sferali'q koordinatalar sistemasi'nda Δ operatori' to'mendegi tu'rge iye:

$$\Delta = \Delta_r + \frac{1}{r^2} \Delta_{\theta\varphi}, \quad (1.31)$$

bul jerde Δ_r – Laplas operatori'ni'n' radialli'q, al $\frac{1}{r^2} \Delta_{\theta\varphi}$ – mu'yeshlik bo'limleri. θ, φ mu'yeshi boyi'nsha $\Delta_{\theta\varphi}$ tuwi'ndi'g'a iye bolsa, wonda Δ_r ushi'n ani'q an'latpani' mu'yeshlik o'zgeriwshilerden g'a'rezli bolmag'an funkciyag'a Laplas operatori'ni'n' ta'siri na'tiyjesin esaplaw arqali' tabi'wg'a boladi'.

9-ma'sele. $\Delta f(r)$ di esaplan'i'z, bul jerde $r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

$$\Delta f(r) = \operatorname{div} \operatorname{grad} f(r) = \operatorname{div} \frac{\partial f}{\partial r} \mathbf{r} = \mathbf{r} \operatorname{grad}(r^{-1} \partial f / \partial r) + r^{-1} \frac{\partial f}{\partial r} \operatorname{div},$$

ekenligin esapqa ali'p, mi'nani' tabami'z

$$\Delta f(r) = \Delta_r f(r) = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) f. \quad \blacksquare$$

Solay etip,

$$\Delta_r = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right). \quad (1.32)$$

$\Delta f(r)$ ti to'mendegishe jazi'wg'a bolatug'i'nli'g'i'n atap o'tken maqul boladi'

$$\Delta f(r) = \frac{1}{r} \frac{d^2}{dr^2} (rf(r)). \quad (1.33)$$

10-ma'sele. $f(\rho)$ funkciyasi'na Laplas operatori'ni'n' ta'sirinin' na'tiyjesin tabi'n'i'z, bul jerde $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Dekart koordinatalari'nda

$$\Delta f(\rho) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) f(\rho).$$

x boyi'nsha f tin' ekinshi tuwi'ndi'si'n esaplap,

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f = \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) = \frac{x^2}{\rho^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} - \frac{x^2}{\rho^3} \frac{\partial f}{\partial \rho},$$

ha'm sa'ykes tu'rde y boyi'nsha ekinshi tuwi'ndi'ni' ali'p, to'mendegini tabami'z

$$\Delta f(\rho) = \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho}, \quad (1.34)$$

yamasa

$$\Delta f(\rho) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \right). \quad \blacksquare \quad (1.35)$$

Cferali'q ha'm cilindrlk koordinatalarda gradient, divergenciya, rotor ha'm Laplas operatori' ushi'n formulalardi'n' twoli'q mag'li'wmati' qollanba aqi'ri'ndag'i' qosi'mshada keltirilgen.

O'zbetinshe sheshiw ushi'n ma'seleler

1.25. Cilindrlk koordinatalarda $\operatorname{div} \mathbf{a}$ ushi'n an'latpani' tabi'n'i'z.

1.26. Sferali'q koordinatalarda $\operatorname{rot} \mathbf{a}$ ushi'n an'latpani' tabi'n'i'z.

1.27. Sferali'q ha'm cilindrlk koordinatalar sistemasi'nda $\operatorname{rot} \mathbf{r}, \operatorname{div} \mathbf{r}$ ha'm $\operatorname{grad}(\mathbf{ar})$ di esaplan'i'z ($\mathbf{a}$ — turaqli' vektor).

1.28. Sferali'q koordinatalarda $\Delta f(r)$ ushi'n, to'mnedegi u'sh tu'rinin' ekvivalentligin tekserin'iz:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{df}{dr} \right), \quad \frac{1}{r} \frac{d^2}{dr^2} (rf), \quad \frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{df}{dr}.$$

1.29. Cilindrlk koordinatalarda divergenciya ha'm gradient ushi'n an'latpani' qollani'p, Laplas operatori'ni'n' $f(\rho)$ funkciyasi'na ($\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$) ta'sirinin' na'tiyjesin tabi'n'i'z ((P.5), (P.6) qaran'i'z).

1.30. $\Delta \varphi = 0$, Laplas ten'lemesinin' sferali'q simmetriyali' sheshimin tabi'n'i'z.

1.31. $\Delta \varphi = 0$, Laplas ten'lemesinin' cilindrlk simmetriyali' sheshimin tabi'n'i'z.

Usi'ni's etiliwshi a'debiyatlar: [1], qosi'msha; [2], I bap; [3], I bap; [4], I bap; [5], qosi'msha.

2. Turaqli' elektrlik maydan

Turaqli' elektrlik maydanni'n' kernewliligi $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, Maksvell ten'lemelerin qanaatlandi'radi'

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad (2.2)$$

bul jerde $\rho(\mathbf{r})$ – elektrlik maydandi' payda etiwshi zaryadlardi'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'. (2.1) ten'lemenin' integralli'q formasi' to'mendegishe jazi'ladi'

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = 4\pi Q_{\text{oxv}} \quad (2.3)$$

(bul jerde $Q_{\text{oxv}} = \int_V \rho dV$ –tuyi'q S betinin' ishinde jaylasi'wshi' zaryad, wol boyi'nsha shep ta'repinde integrallaw a'melge asi'ri'ladi'), bul Gaussti'n' elektrostatikali'q teoremasi'n an'latadi'. Birqatar joqari' da'rejeli simmetriyali' ma'selelerde, Gauss teoremasi' maydanni'n' kernewliligin koordinata funkciyasi' retinde tabi'wg'a mu'mkinshilik beredi.

(2.2) ten'leme, elektrostatikali'q potencialdi' to'mendegi qatnasta kiritiwge mu'mkinshilik beredi.

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi. \quad (2.4)$$

Turaqli' elektrlik maydandi', $\mathbf{E}$ kernewliligi menen ten'dey da'rejede si'patlawshi' $\varphi(\mathbf{r})$ potenciali' Puasson ten'lemesin qanaatlandi'radi'

$$\nabla\varphi = -4\pi\rho. \quad (2.5)$$

Radius-vektori' $\mathbf{r}'$ bolg'an noqatli'q e zaryadi' $\mathbf{r}$ noqati'nda maydandi' payda etedi, woni'n' potenciali' ha'm kernewliligi to'mendegi an'latpa menen beriledi

$$\varphi = \frac{e}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad \mathbf{E} = \frac{e(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (2.6)$$

(Kulon ni'zami').

Egerde zaryadlar ko'lemlik $\rho(\mathbf{r}')$ ti'g'i'zli'g'i' menen bo'listirilgen bolsa,

wonda noqatli'q $\rho(\mathbf{r}')dV'$ zaryadi' ushi'n Kulon ni'zami'na ha'm superpoziciya principine muwapi'q, $\mathbf{r}$ radius vektori'na iye baqlaw noqati'ndag'i' φ potentsiali'n ha'm $\mathbf{E}$ kernewliligini to'mendegi tu'rde ko'rsetiwge boladi':

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int \frac{\rho(\mathbf{r}')dV'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \int \frac{\rho(\mathbf{r}')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV'. \quad (2.8)$$

(2.7) shi potentsial, (2.5) shi Puasson ten'lemesini qanaatlandi'radi' ha'm egerde ko'lemlik integral ji'ynalsa, wonda woni'n' sheksiz ken'isliktegi sheshimi boli'p tabi'ladi'.

Egerde zaryadlar ken'islikte σ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen betti boylap bo'listirilgen bolsa, wonda potentsial to'mendegi formula boyi'nsha esaplanadi'

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int \frac{\sigma(\mathbf{r}')dS'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2.9)$$

τ si'ziqli' ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an si'ziqli' kontur, to'mendegi potentsialg'a iye elektrlik maydandi' payda etedi

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int \frac{\tau(\mathbf{r}')dl'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2.10)$$

Zaryadlar sistemasi'nan uzaq arali'qlarda (2.7), (2.8) an'latpalar a'piwayi'lasadi'. Egerde koordinata basi'nan baqlaw noqati'na ju'rgizilgen $\mathbf{r}$ radius vektori' ha'm zaryadqa ju'rgizilgen radius vektor zaryadlang'an sistemani'n' ishinde ali'nsa, wonda $r \gg a$ (a — sistemani'n' si'ziqli' o'lshemleri) bolg'anda

$$\varphi(\mathbf{r}) \approx \frac{q}{r} + \frac{\mathbf{dr}}{r^3} + \frac{Q_{\alpha\beta}x_{\alpha}x_{\beta}}{2r^5}, \quad (2.11)$$

bul jerde to'mendegi belgilewler kiritilgen

$$q = \int \rho(\mathbf{r}) dV, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{d} = \int \rho(\mathbf{r}) \mathbf{r} dV, \quad (2.13)$$

$$Q_{\alpha\beta} = \int \rho(\mathbf{r}) (3x_\alpha x_\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}) dV. \quad (2.14)$$

(2.12), (2.13) ha'm (2.14) shamalari' zaryadlar sistemasi'ni'n' sa'ykes tu'rde toli'q zaryadi', dipolli'q momenti ha'm kvadрупwolli'q momenttin' tenzori' dep ataladi'.

$\mathbf{r}_i$ ($i = 1, \dots, N$) radius vektorlari'na iye noqatlarda joylasqan e_i zaryadlari' jag'dayi'nda, zaryadlardi'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' δ – funkciyasi' arqali' an'lati'ladi':

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N e_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), \quad (2.15)$$

al (2.13), (2.14) shamalar to'mendegi tu'rge iye boladi'

$$\mathbf{d} = \sum_{i=1}^N e_i \mathbf{r}_i, \quad (2.16)$$

$$Q_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N e_i (3x_\alpha x_\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}). \quad (2.17)$$

Egerde ken'islikte zaryadlar σ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen bet boylap bo'listirilgen bolsa, wonda twoli'q zaryad, dipolli'q moment ha'm kvadрупolli'q momenttin' tenzori' (2.12), (2.13), (2.14) integrallari' arqali' an'lati'ladi', bunda to'mendegishe almasi'w a'melge asi'ri'lg'an

$$\rho(\mathbf{r}) dV \rightarrow \sigma(\mathbf{r}) dS, \quad (2.18)$$

al integrallaw zaryadlang'an bet boyi'nsha o'tkeriledi.

Sa'ykes tu'rde τ si'zi'qli' ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an si'zi'qli' kontur ushi'n (2.12), (2.13), (2.14) integrallari'nda almasi'w a'melge asi'ri'ladi'

$$\rho(\mathbf{r})dV \rightarrow \tau(\mathbf{r})dl, \quad (2.19)$$

al integrallaw zaryadlang'an kontur boyi'nsha o'tkeriledi.

Elektrostatikali'q maydanni'n' energiyasi'

$$U = \frac{1}{8\pi} \int \mathbf{E}^2 dV \quad (2.20)$$

to'mendegi formula menende esaplani'wi' mu'mkin

$$U = \frac{1}{2} \int \rho \varphi dV. \quad (2.21)$$

Ko'lemlik $\rho_1(\mathbf{r})$ ha'm $\rho_2(\mathbf{r})$ ti'g'i'zli'qlari' menen zaryadlang'an eki sistemani'n' elektrostatikali'q ta'sir etisiw energiyasi' to'mendegi formula menen esaplanadi'

$$U = \int \frac{\rho_1(\mathbf{r})\rho_2(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV dV'. \quad (2.22)$$

$\varphi(\mathbf{r})$ potentsiali'na iye si'rtqi' elektrlik maydani'nda $\rho(\mathbf{r})$ ti'g'i'zli'g'i' menen bo'listirilgen zaryadlardi'n' potentsialli'q energiyasi' to'mendegi an'latpa menen ani'qlanadi'

$$U = \int \rho(\mathbf{r})\varphi(\mathbf{r}) dV. \quad (2.23)$$

Egerde si'rtqi' elektrlik maydanni'n' $\varphi(\mathbf{r})$ potentsiali', zaryadlang'an sistema boylap kishkene o'zgeriske iye bolsa, wonda (2.23) an'latpa ji'ynali'wshi' qatar menen almasti'ri'ladi'

$$U = q\varphi(\mathbf{r}) - \mathbf{dE} + \frac{1}{6} Q_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} + \dots \quad (2.24)$$

Bul jerde si'rtqi' elektrlik maydanni'n' potenciali' ha'm kernewliligi, ha'mde potencialdan tuwi'ndi', qarali'p ati'ri'lg'an sistemani'n' ishinde jati'wshi' $\mathbf{r}$ radius vektori'na iye noqatta ali'nadi'. Bul ishki noqat dekart koordinatalar sistemasi'ni'n' baslamasi' boli'p xi'zmet etedi, wonda $\mathbf{d}$ ha'm $Q_{\alpha\beta}$ shamalari' ani'qlang'an.

Si'rtqi' elektrlik maydanda kernewliligi $\mathbf{E}$ bolg'an zaryadlang'an sistemag'a tu'sirilgen $\mathbf{F}$ ku'shi ha'm $\mathbf{K}$ ku'sh momenti to'mendegilerge ten'

$$\mathbf{F} = \int \rho \mathbf{E} dV, \quad (2.25)$$

$$\mathbf{K} = \int [\mathbf{r}\mathbf{E}] \rho dV. \quad (2.26)$$

Dara jag'daylarda, si'rtqi' kvazibirqi'yli' maydani'nda $\mathbf{d}$ dipolli'q momentine iye elektroneytral sistemada (2.25), (2.26) qatnaslari' to'mendegi tu'rdi qabi'l etedi

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{d}\mathbf{E}) = (\mathbf{d}\nabla)\mathbf{E}, \quad (2.27)$$

$$\mathbf{K} = [\mathbf{d}\mathbf{E}]. \quad (2.28)$$

Maksvellik kernew tenzori' ja'rdeminde

$$T_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left(E_{\alpha} E_{\beta} - \frac{1}{2} E^2 \delta_{\alpha\beta} \right) \quad (2.29)$$

Ishinde ρ ko'lemlik ti'g'i'zli'q penen zaryad bo'listirilgen V ko'lemge ta'sir etiwshi elektrostatikali'q ku'shtin' qosi'ndi'si'n (2.25), usi' ko'lem betine tu'sirilgen ku'sh arqali' esaplaw mu'mkin:

$$F_{\alpha} = \int_V \rho E_{\alpha} dV = \oint_S T_{\alpha\beta} n_{\beta} dS, \quad (2.30)$$

bul jerde $\mathbf{n}$ — V ko'lemdi qorshawshi' tuyi'q S betine ju'rgizilgen si'rtqi' normaldi'n' orti'.

Ma'seleler sheshiwge mi'sallar

1-ma'sele. R radiusli' shar turaqli' ρ ti'g'i'zli'g'i'na iye Q zaryadi' menen ko'lem

boylap zaryadlang'an. Shardi'n' ishinde ha'm si'rti'ndag'i' E maydan kernewliliginin' bo'listiriliwin tabi'n'i'z.

Zaryadlardi'n' bo'listiriliwindegisi sferali'q simmetriyag'a muwapi'q maydanni'n' kernewliligi E radius boyi'nsha bag'i'tlang'an, al E vektori'ni'n' moduli tek shardi'n' orayi'na shekemgi arali'qtan g'a'rezli: $E(\mathbf{r}) = E(r)\frac{\mathbf{r}}{r}$. Gausti'n' (2.3) teoremasi'n, koncentrik zaryadlang'an shardi'n' $r \leq R$ radiusli' sferali'q betine qwollani'p, to'mendegini alami'z

$$E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3; \quad E = \frac{4}{3}\pi\rho r; \quad E = \frac{4}{3}\pi\rho r = \frac{Q}{R^3}\mathbf{r}.$$

Sa'ykes, $r > R$ radiusli' sferali'q bet ushi'n mi'nag'an iye bolami'z:

$$E \cdot 4\pi r^2 = 4\pi\rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3; \quad E = \frac{4}{3}\pi\rho \frac{R^3}{r^2}; \quad E = \frac{4}{3}\pi\rho \frac{R^3}{r^3}\mathbf{r} = \frac{Q}{r^3}\mathbf{r}.$$

Solay etip,

$$E(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi\rho r = \frac{Q}{R^3}\mathbf{r}, & r \leq R \text{ ushi'n} \\ \frac{4}{3}\pi\rho \frac{R^3}{r^3}\mathbf{r} = \frac{Q}{r^3}\mathbf{r}, & r > R \text{ ushi'n} \end{cases} \quad \blacksquare \quad (2.31)$$

Shardi'n' si'rti'ndag'i' maydan mi'naday, yag'ni'y egerde barli'q zaryadlar woni'n' orayi'nda ja'mlengen dep esaplansa, al shardi'n' ishindegisi maydan shardi'n' orayi'nan ju'rgizilgen arali'qqa tuwri' proporcional boladi'.

2-ma'sele. σ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an sheksiz tegisliktin' payda etken elektrlik maydanni'n' kernewliligin tabi'n'i'z.

Maydan kernewliliginin' tegislikke perpendikulyar ekenligisi simmetriyadan kelip shi'g'adi'. Ja'rdemshisi bet si'pati'nda tegislikke parallel bolg'an ha'm wonnan ten'dey arali'qta jaylasqan cilindrdin' tiykarlari'n ali'p, Gauss teoremasi'n qollanami'z. Qaptal betleri boyi'nsha E vektori'ni'n' ag'i'mi' no'lge ten', sebebi $E \perp \mathbf{n}_{qapt.}$, sonli'qtan $\oint E d\mathbf{S} = 2ES$, S — cilindrdin' tiykarlari'ni'n' maydani'.

Cilindrdin' beti menen qorshalg'an zaryad σS ke ten'. Sonli'qtan (2.3) muwapi'q to'mendegini alami'z

$$E = 2\pi\sigma.$$

Kernewlilik tegisliktin' ha'rbir ta'repinde qarama-qarsi' bag'i'tqa iye boladi', bunnan normal qurawshi'lari' tegislik arqali' o'tkende $4\pi\sigma$ sekirmege ushi'raydi'.

■

3-ma'sele. Ko'lemi boyi'nsha toli'q Q zaryadi' menen birtekli zaryadlang'an, R radiusli' shardi'n' payda etken elektrlik maydanni'n' potentsiali'ni'n' bo'listiriliwin tabi'n'i'z.

Usi' ha'm basqada ma'selelerde simmetriyani'n' bar boli'wi', dara tuwi'ndi'da o'zgeriwshilerdi aji'rati'w ha'm oni' a'piwayi' differentsialli'q ten'lemelerge keltiriw joli' menen (2.5) Puasson ten'lemesin tikkeley sheship, potentsialdi' tabi'wg'a mu'mkinshilik beredi. Qarali'p ati'ri'lg'an maydanni'n' potentsiali', tek shardi'n' orayi'na shekemgi arali'qtan g'a'rezli ekenligi tu'sinikli $\varphi = \varphi(r)$, sonli'qtan (1.32) sine muwapi'q Puasson ten'lemesi mi'na tu'rdi iyeleydi:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = -4\pi\rho, \quad (2.32)$$

bul jerde

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 \equiv \frac{Q}{4\pi R^3/3} & r \leq R, \quad \text{bolg'anda} \\ 0 & r > R, \quad \text{bolg'anda} \end{cases}$$

Integrallaw arqali' mi'nalardi' tabami'z:

1) shardi'n' ishinde ($r \leq R$)

$$r^2 \frac{d\varphi_1}{dr} = -\frac{4\pi\rho_0 r^3}{3} + C_1, \quad \varphi_1 = -\frac{4\pi\rho_0}{3} \frac{r^2}{2} - \frac{C_1}{r} + C_2;$$

$r = 0$ bolg'anda potentsialdi'n' sheklengenlik sha'rtinen $C_1 = 0$ ekenligi kelip shi'g'adi'.

2) shardi'n' si'rti'nda ($r > R$)

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi_2}{dr} \right) = 0, \quad \varphi_2 = -\frac{C_3}{r} + C_4;$$

$\varphi|_{r=\infty} = 0$ sha'rtinen $C_4 = 0$ ekenligi kelip shi'g'adi'.

C_2 ha'm C_3 integrallaw turaqli'lari', $r = R$ bolg'andag'i' shegarali'q $\varphi_1 = \varphi_2$ ha'm $\frac{d\varphi_1}{dr} = \frac{d\varphi_2}{dr}$ sha'rtleri menen ani'qlanadi' (sebebi (2.32) nin' on' ta'repi bul noqatta u'ziliske iye boladi'), wol to'mendegi ten'lemelerga ali'p keledi:

$$\begin{cases} -2\pi\rho_0 R^2/3 + C_2 = -C_3/R, \\ -4\pi\rho_0 R/3 = C_3/R^2. \end{cases}$$

Usi'lardi' sheship, turaqli'lardi'n' ma'nislerin ani'qlaymi'z $C_3 = -Q$, $C_2 = 3Q/(2R)$ ha'm potencialdi' tabami'z

$$\varphi(r) = \begin{cases} \frac{3Q}{2R} - \frac{Q}{2R^3} r^2 & 0 \leq r \leq R, \quad \text{bolg'anda} \\ \frac{Q}{r} & r > R, \quad \text{bolg'anda} \end{cases} \quad \blacksquare$$

4-ma'sele. $\varphi(r) = (q/r)\exp(-\alpha r)$ tu'rine iye sferali'q koordinatalarda, bul jerde α, q – turaqli'lar, zaryadlardi'n' qanday bo'listiriliwinde potencial payda etiledi?

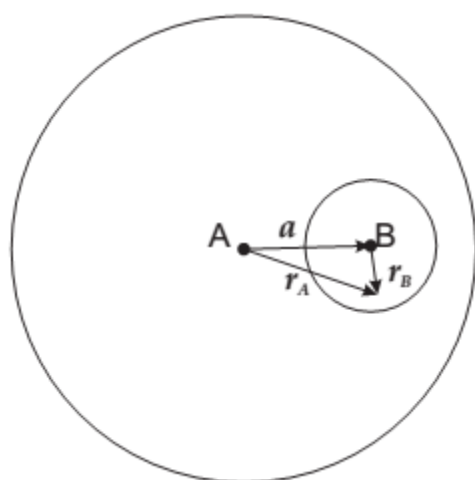
Potencialg'a Laplas operatori' menen ta'sir etip to'mendegini alami'z

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= q\Delta\frac{e^{-\alpha r}}{r} = q\Delta\frac{1}{r} + q\Delta\frac{e^{-\alpha r} - 1}{r} = -4\pi q\delta(\mathbf{r}) + \frac{q}{r}\frac{d^2}{dr^2}\left(r\frac{e^{-\alpha r} - 1}{r}\right) \\ &= -4\pi q\delta(\mathbf{r}) + \frac{q\alpha^2 e^{-\alpha r}}{r} \end{aligned}$$

(Δ operatori'ni'n' $1/r$ ge ta'sirinin' na'tiyjesin (2.5), (2.6), (2.15) formulalari'nan ali'wg'a boladi'). Solay etip, koordinata basi'nda q noqatli'q zaryadi' ha'm $\rho = -\frac{q\alpha^2 e^{-\alpha r}}{4\pi r}$, $\int \rho dV = -q$ ti'g'i'zli'g'i'na iye sferali'q simmetriyali' bo'listirilgen ko'lemlik zaryadi' bar boladi'. ■

5-ma'sele. Ko'lemi boyi'nsha turi'qli' ρ ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an sharda, orayi' shardi'n' orayi'nan a arali'qta joylasqan sferali'q

jolaqsha bar. Jolaqsha toli'g'i' menen shardi'n' ishinde jaylasqan. Jolaqsha ishindegi maydanni'n' kernewliligin tabi'n'i'z.



9-su'wret

Superpoziciya principin qwollani'p, orayi' A noqati'nda jaylasqan tutas shardi'n' maydani'ni'n' E_A kernewliligin (9-su'wretke qaran'i'z), worayi' V noqati'nda jaylasqan kishi shardi'n' maydani'ni'n' E_V kernewliligi ha'm jolaqshag'a iye denenin' E kernewliliginin' qosi'ndi'si' tu'rinde ko'rsetiwge boladi'. Bunnan

$$E = E_A - E_V. \quad (2.33)$$

(2.31) ne muwapi'q jolaqsha ishindegi noqatlar ushi'n $E_A = \frac{4}{3}\pi\rho r_A$, $E_B = \frac{4}{3}\pi\rho r_B$. Sebebi $r_A - r_B = a$, bolsa, wonda

$$E = \frac{4}{3}\pi\rho a$$

Solay etip, jolaqsha ishindegi maydan birqi'yli'. Egerde R_A ha'm R_B radiuslari' belgili bolsa, wonda ken'isliktin' qa'legen noqati'nda jolaqshag'a iye shardi'n' maydani'n tabi'wg'a (2.33) formula mu'mkinshilik beretug'i'nli'g'i'na kewil audari'wi'mi'z kerek. ■

6-ma'sele. Betlik ti'g'i'zli'g'i' σ menen birtekli zaryadlang'an a radiusli' do'n'gelek jin'ishke diskani'n' ko'sherindegi elektrlik maydanni'n' kernewliligi E ni ha'm potenciali' φ di tabi'n'i'z.

Oz ko'sherin diskani'n' ko'sheri boylap bag'i'tlaymi'z. Woraydan ρ arali'qta

jaylasi'wshi' dS maydani'na iye diska elementi, diska ko'sherinde z koordinatasi'na iye noqatta $d\varphi = \sigma dS / \sqrt{x^2 + \rho^2}$ potentsiali'n payda etedi. Usi' noqatta diskani'n' barli'g'i' to'mendegi potentsialdi' payda etedi

$$\varphi = \int \frac{\sigma dS}{\sqrt{\rho^2 + z^2}}.$$

Polyarli'q (ρ, α) koordinatalar sistemasi'nda integraldi' esaplap, mi'nani' alami'z

$$\varphi = \sigma \int_0^a \frac{\rho d\rho}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \int_0^{2\pi} d\alpha = 2\pi\sigma \left(\sqrt{z^2 + a^2} - |z| \right). \quad (2.34)$$

Ko'sherdegi elektrlik maydanni'n' kernewliligi $\mathbf{E}$, a'dette ko'sher boylap bag'i'tlang'an, sonli'qtan (2.4) shi formula mi'nani' beredi

$$E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = -2\pi\sigma \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} - \text{sign}z \right). \quad (2.35)$$

Kernewlilik (2.8) shi formula menen esaplaw ((2.18) menen almasti'ri'wda) usi' na'tiyjege ali'p keledi (tekserip ko'rin'iz!). Fizikali'q pikirlewde, $|z|$ u'lken ma'nislerinde diskani'n' maydani' noqatli'q zaryadti'n' maydani'na, al kishi ma'nislerde sheksiz tegisliktin' maydani'na uqsas ekenligi tu'sinikli. Buni'n' haqi'yqatli'g'i'n, $|z| \gg a, |z| \ll a$ bolg'an jag'daylarda (2.34), (2.35) an'latpalari'n analizlep biliwge boladi'. ■

7-ma'sele. *2l uzi'nli'qqa iye sabaq kesindisi, si'ziqli' τ ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an. Ken'isliktin' qa'legen noqati'ndi'g'i' potentsialdi' tabi'n'i'z.*

Koordinata sistemasi'ni'n' basi'n kesindi worayi'nda ha'm z ko'sheri boylap bag'i'tlang'an dep qabi'l etemiz. Sonda (2.10) na muwapi'q

$$\varphi(\mathbf{r}) = \int_{-l}^{+l} \frac{\tau dz'}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z' - z)^2}},$$

Integrallaw mi'nani' beredi

$$\varphi = \tau \ln \frac{\sqrt{\rho^2 + (l - z)^2} + l - z}{\sqrt{\rho^2 + (l + z)^2} - l - z}, \quad (2.36)$$

bul jerde $\rho^2 = x^2 + y^2$. Kesindi orayi'na jaqi'n jerdegi maydandi' qarap o'temiz: $|x|, |y|, |z| \ll l$. Bo'lshektin' ali'mi'ndag'i' logarifm asti'ndag'i' x, y, z tu'sirip ha'm bo'limindegi korendi tarqati'p

$$\sqrt{\rho^2 + (l + z)^2} = (l + z) \sqrt{1 + \frac{\rho^2}{(l + z)^2}} \approx (l + z) \left(1 + \frac{\rho^2}{2(l + z)^2} \right),$$

mi'nani' tabami'z

$$\varphi \approx -2\tau \ln \frac{\rho}{2l}. \quad (2.37)$$

Kesindi do'gereginde potencial tek ρ dan g'a'rezli bwolg'anli'g'i' sebepli, maydan cilindrlilik koordinatalar sistemasi'nda tek bir komponentag'a iye boladi' ((1.26) na qaran'i'z).

$$E_\rho \approx \frac{2\tau}{\rho}. \quad (2.38)$$

Gauss teoremasi' boyi'nsha zaryadlang'an sheksiz tuwri' jin'ishke o'tkizgishtin' maydani'ni'n' kernewliligini tabi'w arqali' son'g'i' na'tiyjeni an'sat ali'wg'a boladi'.

$l \ll r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ bolg'anda, jin'ishke o'tkizgish kesindisinen ali'sta mi'ni'g'an iye bolami'z

$$\sqrt{x^2 + y^2 + (z \pm l)^2} \approx r(1 \pm zl/r^2).$$

(2.36) an'latpasi'n a'piwayi'lasti'ri'p, $2\tau l$ noqatli'q zaryadi'ni'n' potenciali'n alami'z:

$$\varphi \approx \tau \ln \frac{r - zl/r + l - z}{r + zl/r - l - z} = \tau \ln \frac{r + l}{r - l} \approx \frac{2\tau l}{r}. \quad \blacksquare \quad (2.39)$$

8-ma'sele. *Superpoziciya principin qollani'p, σ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an a radiusli' sferani'n' payda etken elektrstatikali'q potenciali'n tabi'n'i'z.*

Kulon ni'zami'n ha'm superpoziciya principin qollani'w (2.9) shi' an'laipag'a ali'p keledi. Sebebi potencialdi'n' ma'nisi tek sferani'n' worayi'na shekemgi arali'qtan g'a'rezli (wonda koordinata basi' jaylasqan), sonda uli'wmali'q penen

shegaralanbay baqlaw noqati'n z ko'sherinde alami'z. $|r'| = a$, $|r - r'| = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar\cos\theta'}$, al sferadag'i' ko'lem elementi $dS' = a^2 \sin\theta' d\theta' d\alpha'$ r', θ', α' –sferali'q koordinata sistemasi'ndag'i' koordinatalar ekenliklerin esapqa ali'p, to'mendegige kelemiz

$$\varphi = 2\pi\sigma a^2 \int_0^\pi \frac{\sin\theta' d\theta'}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar\cos\theta'}} = \frac{2\pi\sigma a}{r} (r + a - |r - a|).$$

Sferani'n' ishindeg i $(r < a)$ ha'm si'rti'ndag'i' $(r > a)$ bo'limlerdi ko'rip shi'g'i'p, mi'nag'an iye bwolami'z

$$\varphi(r) = \begin{cases} 4\pi a \sigma & r \leq a, \text{bolg'anda} \\ \frac{4\pi a^2 \sigma}{r} & r > a, \text{bolg'anda} \end{cases} \quad \blacksquare$$

9-ma'sele. R radiusli' sfera $\sigma = \sigma_0 \cos\theta$ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an. Ken'isliktin' qa'legen noqati'ndi'g'i' skalyarli'q potencialdi' tabi'n'i'z.

Uli'wma jag'dayda (2.7), (2.9), (2.10) shi' formulalar zaryadlardi'n' ti'g'i'zli'g'i' boyi'nsha maydanni'n' potenciali'n ani'qlaydi' (egerde wolardag'i' integrallar ji'ynalsa). Integrallardi' esaplap shi'g'ari'w ushi'n sferali'q funkciyalar (multipolli'q tarqati'w) boyi'nsha, $|r - r'|^{-1}$ funkciyasi'ni'n' tarqati'li'wi'n qollang'an maqul boladi':

$$\frac{1}{|r - r'|} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \frac{4\pi}{2l+1} \frac{r_{<}^l}{r_{>}^{l+1}} Y_{lm}(\theta, \alpha) Y_{lm}^*(\theta', \alpha'). \quad (2.40)$$

Bul jerde $r_{<} = \min(r, r')$; $r_{>} = \max(r, r')$; Y_{lm} –sferali'q funkciya (bul haqqi'nda birqansha mag'li'wmatlar 2-qosi'mshada keltirilgen); θ, α – r vektori'ni'n' mu'yeshi; θ', α' – qandayda bir sferali'q koordinatalar sistemasi'ndag'i' r' vektori'ni'n' mu'yeshi. (2.40) shi' qatardi'n' ag'zalari'ni'n' r', θ', α' –g'a'rezliligi faktorizaciyalang'an tu'rde aji'rati'lg'anli'g'i' sebepli, wol (2.7), (2.9), (2.10) formulalari'ndag'i' integrallawdi' a'piwayi'lasti'radi' ha'm potencial ushi'n uli'wma an'latpani' tu'rlendiriwge mu'mkinshilik beredi.

Multipolli'q tarqati'wdi' sferani'n' potenciali'n esaplawg'a qollanami'z. (2.40)

i'n (2.9) na qoyi'p, sferada $dS' = R^2 \sin\theta' d\theta' d\alpha'$ ekenligin esapqa ali'p ha'm (P.11) formulasi' ja'rdemi menen betlik ti'g'i'zli'qti' to'mendegi tu'rde ko'rsetip

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10}(\theta', \alpha'),$$

mi'nani' alami'z

$$\varphi(\mathbf{r}) = R^2 \sum_{lm} \frac{4\pi\sigma_0}{2l+1} \frac{r_{<}^l}{r_{>}^{l+1}} Y_{lm}(\theta, \alpha) \int \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10}(\theta', \alpha') Y_{lm}^*(\theta', \alpha') \sin\theta' d\theta' d\alpha'.$$

Bul jerde integral ortogonalli'q (P.12) sha'rtine muyapi'q, Kroneker simvoli'ni'n' ko'beymesine $\delta_{l1}\delta_{m0}$ proporcional, sonli'qtan qosi'ndi'dan jeke bir ag'za qaladi', ha'm

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{4\pi\sigma_0}{3} R^2 \frac{r_{<}}{r_{>}^2} \cos\theta.$$

Bunnan to'mendegini tabami'z

$$\varphi(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{4\pi\sigma}{3} r \cos\theta & r \leq R \text{ bolg'anda} \\ \frac{4\pi\sigma}{3} \frac{R^3}{r^2} \cos\theta & r > R \text{ bolg'anda} \end{cases} \quad \blacksquare$$

10-ma'sele. Birtekli zaryadlang'an jin'ishke sterjennin' yari'mi' q zaryadi'na, al ekinshi yari'mi' $-q$ zaryadi'na iye. Sterjennin' uzi'nli'g'i' $2l$. Sterjennin' dipolli'q momentin tabi'n'i'z.

Dipolli'q moment $\mathbf{d}$ sterjen boylap on' zaryad ta'repine bag'i'tlang'an. x ko'sherin sterjennin' ortasi'nan baslanatug'i't etip $\mathbf{d}$ boylap bag'i'tlaymi'z ha'm to'mendegini esaplaymi'z

$$d_x = \int_{-l}^{+l} \tau(x) x dx = \int_{-l}^0 (-q/l) x dx + \int_0^{+l} (q/l) x dx = ql. \quad (2.41)$$

To'mendegige di'qqat awdarami'z, yag'ni'y sterjennin' dipolli'q momentin

qa'legen elektroneytral sistema si'yaqli' to'mendegi tu'rde ko'rsetiwge boladi'

$$\mathbf{d} = q(\mathbf{R}^+ - \mathbf{R}^-), \quad (2.42)$$

bul jerde $\mathbf{R}^\pm$ —on' ha'm teris zaryadlar orayi'ni'n' radius vektori', q — on' zaryadlardi'n' qosi'ndi'si'. ■

11-ma'sele. Shardi'n' joqarg'i' yari'mi' q zaryadi', al to'mengi yari'mi' $-q$ zaryadi' menen birtekli tolti'ri'lg'an. Shardi'n' radiusi' R — ten'. Shardi'n' dipolli'q momenti $\mathbf{d}$ ni' tabi'n'i'z.

Shardi'n' worayi'nda koordinata basi'n tan'lap alami'z ha'm z ko'sherin vertikal on' zaryadlar ta'repine bag'i'tlaymi'z. Sonda, $\mathbf{d} = (0, 0, d_z)$ bolatug'i'nli'g'i' belgili. Sferali'q koordinatalarda $d_z = \int z\rho(\mathbf{r}) dV$ esaplap

$$d_z = \frac{3q}{2\pi R^3} \int_0^R r^3 dr \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi - \frac{3q}{2\pi R^3} \int_0^R r^3 dr \int_{\pi/2}^{\pi} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi$$

to'mendegini tabami'z

$$d = \frac{3}{4} qR. \quad \blacksquare$$

12-ma'sele. Ta'repleri $2a$ bolg'an kvadratti'n' to'belerinde qon'si'las zaryadlar qarama-qarsi' belgilerga iye bolatug'i'nday etip noqatli'q $\pm e$ zaryadi' jaylasqan. Kvadratti'n' diagonali' boyi'nsha bag'i'tlang'an x ha'm y ko'sherlerine iye koordinatalar sistemasi'nda kvadrupolli'q momenttin' $Q_{\alpha\beta}$ tenzori'n tabi'n'i'z.

Tan'lap ali'ng'an koordinatalar ko'sheri kvadrupwolli'q momenttin' tenzori' ushi'n en' basli'si' dep ataladi', yag'ni'y usi' ko'sherlerde $Q_{\alpha\beta}$ diagonal boladi'. Meyli x ko'sherinde e zaryadi' jaylasqan bolsi'n, sonda y ko'sherinde $-e$ zaryadi' jaylasadi'. (2.17) ne muwapi'q to'mendegini esaplaymi'z:

$$Q_{xx} = 2[e(3 \cdot 2a^2 - 2a^2)] + 2(-e)(-2a^2) = 12ea^2.$$

Sa'ykes tu'rde qalg'anlardi'da esaplaymi'z

$$Q_{yy} = -12ea^2, \quad Q_{zz} = 0 \quad \blacksquare$$

13-ma'sele. q zaryadi' ten'o'lshemli bo'listirilgen shar, elementar d dipoldan uzaq arali'qta jaylasqan. Dipolg'a ta'sir etiwshi ku'shti tabi'n'i'z.

(2.24) ne muwapi'q shardi'n' maydani'nda dipoldi'n' energiyasi' to'mendegi an'latpa menen beriledi

$$U = -dE,$$

bul jerde E – shardi'n' payda etken maydani'ni'n' kernewliligi, yag'ni'y $E = \frac{qr}{r^3}$, r – shardan dipolg'a o'tkizilgen radius vektor. Dipolg'a ta'sir etiwshi ku'shti $F = -\nabla U$ tu'rinde esaplap, mi'nani' tabami'z

$$F = -\frac{3q(dr)r}{r^5} + \frac{qd}{r^3}. \quad \blacksquare$$

14-ma'sele. Q zaryadi', R radiusli' sferani'n' beti boylap birtekli bo'listirilgen. Sferani' ten'dey eki bo'limge bo'liwshi ku'shtin' absolyut shamasini' tabi'n'i'z.

Sfera betinin' qa'legen dS elementine, usi' betke n normal boyi'nsha bag'i'tlang'an dF ku'shi ta'sir etedi. Usi' ku'shtin' shamasini' tabi'w ushi'n, zaryadlang'an shardi'n' qalg'an barli'q bo'limi menen birgelikte aji'rati'lg'an dS elementinin' payda etken elektrlik maydani'ni'n' kernewliligi E' ti' esaplaw talap etiledi. Superpoziciya principi boyi'nsha zaryadlang'an sferani'n' E maydani'n, dS elementi payda etken E' ha'm E'' maydani'ni'n' vektorli'q qosi'ndi'si' retinde ko'rsetiwge boladi'. Sferag'a ju'da' jaqi'n ori'nlarda sfera si'rti'ndagi' kernewlilik $E = Q/R^2$, al ishinde $E = 0$ ten' boladi'. Sferani'n' tuwri'dan tuwri' betindegi maydandi' esaplawda dS elementin tegis dep esaplawg'a boladi', sonli'qtan E'' maydani' sfera ishinde ha'm si'rti'nda qarama qarsi' bag'i'tqa ha'm birdey shamag'a iye boladi'. Solay etip, eki ten'leme alami'z: $E' + E'' = Q/R^2$, $E' - E'' = 0$. Bunnan mi'nani' tabami'z $E' = \frac{Q}{2R^2} n$ ha'm

$$d\mathbf{F} = \sigma \mathbf{E}' dS = \frac{Q^2}{8\pi R^4} \mathbf{n} dS.$$

Yari'nsferani'n ko'sheri boyi'nsha z ko'sherin bag'i'tlaymi'z, sonda qosi'ndi' ku'sh $\mathbf{F} = \int d\mathbf{F} = F\mathbf{k}$. Yari'nsferani'n beti boyi'nsha integrallawda $\int \mathbf{n} dS = k \cos \alpha dS = \pi R^2 k$ (bul jerde $\alpha - \mathbf{n}$ ha'm k arasi'ndag'i' mu'yesh) ekenligi esaplawlarsi'zda tu'sinikli, sonli'qtan $\int \cos \alpha dS$ –yari'nsfera betinin' woni'n' tiykari'na proekciyasi' boli'p tabi'ladi'. Juwmaqlap aytqanda, sferani'n' yari'mi'na to'mendegi ku'sh ta'sir etedi

$$F = \frac{Q^2}{8R^2}. \quad (2.43)$$

Bul ma'sele, (2.29) shi' Maksvellik kernew tenzori'n qollani'w menende sheshiliwi mu'mkin. (2.30) na muwapi'q

$$F_\alpha = \int T_{\alpha\beta} n_\beta dS.$$

Bettegi $\mathbf{E} = \frac{Q}{R^2} \mathbf{n}$ maydan kernewliligin (2.29) na qoyi'p ha'm esaplawlar ju'rgizip, (2.43) ne kelemiz. ■

O'zbetinshe sheshiw ushi'n ma'seleler

2.1. φ potentsiallari' mi'na variantlarg'a a) $-\mathbf{ar}$; b) $\mathbf{a}[\mathbf{br}]$; v) $d\mathbf{r}/r^3$; g) $F(f(\mathbf{ar}))$ ten' bolg'an elektrostatikali'q maydanni'n' kernewliligi E ni tabi'n'i'z. Bul jerde $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}$ vektorlari' koordinatadan ha'm waqi'ttan g'a'rezli emes, al f ha'm F – o'z argumentinin' qa'legen differentsialli'q funktsiyasi'.

Juwabi': a) $\mathbf{a}$; b) $[\mathbf{ba}]$; v) $3(d\mathbf{r})\mathbf{r}/r^5 - \mathbf{d}/r^3$; g) $-\frac{dF}{df} \frac{df}{d(\mathbf{ar})} \mathbf{a}$.

2.2. Ken'islikte, to'mendegi variantlardag'i' kernewlilikke iye elektrostatikali'q maydandi' payda etiwge bolama? a) $\mathbf{E} = [\mathbf{ar}]$; b) $\mathbf{E} = a(y\mathbf{e}_x - x\mathbf{e}_y)$.

2.3. Ken'islikte elektr maydani'ni'n' kernewliligi E to'mendegi variantlarg'a ten': a) $(\mathbf{br})\mathbf{r}$; b) grr ;

v)

$$\frac{er}{r^3} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{2r}{a} \left(1 + \frac{r}{a} \right) \right] \exp \left(-\frac{2r}{a} \right) \right\}.$$

bul jerde **a, b** vektorlari' ha'm a, g ha'm e shamalari' koordinatadan g'a' rezli emes, al f – o'z argumentinin' qa'legen differencialli'q funkciyasi'. Usi' maydan payda etken zaryadti'n' ko'lemlik ρ ti'g'i'zli'g'i'ni'n' bo'listiriliwin tabi'n'i'z (elektrostatikani'n' kerri ma'selesi).

Juwabi': a) $\frac{b^2}{4\pi}$; b) $\frac{gr}{\pi}$; v) $\frac{e}{\pi a^3} e^{-2r/a}$.

2.4. Elektrostatikali'q maydanni'n' kernewlilikleri to'mendegi an'latpalar menen ani'qlanadi': a) $\mathbf{E} = E_1 \mathbf{e}_x + E_2 \mathbf{e}_y + E_3 \mathbf{e}_z$ (E_1, E_2, E_3 – turaqli'lar); b) $\mathbf{E} = \frac{a}{r^3} \frac{\mathbf{r}}{r}$ (a – turaqli'). Maydanni'n' potentsiali'n tabi'n'i'z.

2.5. Radiusi' R_2 bolg'an shardi'n' si'rti'nda, ko'lemlik ρ ti'g'i'zli'g'i' menen shar tu'rindagi qatlam zaryadlang'an. Qatlamni'n' ishki radiusi' R_1 . Ken'isliktin' barli'q noqatlari'ndag'i' maydanni'n' $\mathbf{E}$ kernewliligini'n' bo'listiriliwin tabi'n'i'z.

$$\text{Juwabi': } \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0, & r \leq R_1 \text{ ushi'n;} \\ \frac{4}{3} \pi \rho \frac{r^3 - R_1^3}{r^3} \mathbf{r}, & R_1 < r \leq R_2 \text{ ushi'n;} \\ \frac{4}{3} \pi \rho \frac{R_2^3 - R_1^3}{r^3} \mathbf{r}, & r > R_2 \text{ ushi'n.} \end{cases}$$

2.6. Si'ziqli' τ ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an sheksiz jin'ishke o'tkizgishtin' elektrlik maydani'ni'n' φ potentsiali'n ha'm E kernewliligini tabi'n'i'z.

Juwabi': $E(\rho) = \frac{2\tau}{\rho}, \quad \varphi(\rho) = -2\tau \ln \frac{\rho}{\rho_0},$

Bul jerde ρ – jin'ishke o'tkizgishke shekemgi arali'q, ρ_0 – potentsialdi' no'lge ten' dep ali'wg'a bolatug'i'n ρ ni'n' ma'nisi.

2.7. Kesiminin' radiusi' R bolg'an sheksiz uzi'n do'n'gelek tuwri' cilindr ρ ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an. To'mendegi sha'rtlerde ken'isliktin' barli'q noqatlari'ndag'i' elektrlik maydanni'n' kernewliligini'n' $\mathbf{E}$ shamasini tabi'n'i'z: a) Gauss teoremasi' boyi'nsha; b) Puasson ten'lemesini tuwri'dan tuwri'

sheshiw arqali'.

Juwabi': $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 2\pi r, & r \leq R \text{ ushi'n} \\ 2\pi\rho R^2/r, & r > R \text{ ushi'n} \end{cases}$, r – cilindrdin' ko'sherine shekemgi arali'q.

2.8. Zaryad, ken'islikte $\rho(x, y, z) = \rho_0 \cos\alpha x \cos\beta y \cos\gamma z$ ni'zamli'g'i' boyi'nsha bo'listirilgen. Elektrlik maydanni'n' φ potentsiali'n esaslan'i'z.

2.9. Zaryadti'n' payda etken potentsiali' sferali'q koordinatalar sistemasi'nda to'mendegi tu'rge iye boli'wi' ushi'n, wolardi'n' bo'listiriliwi qanday boli'wi' kerek?

$$\varphi(r) = \frac{e_0}{a} \left(\frac{a}{r} + 1 \right) \exp\left(-\frac{2r}{a}\right), \quad \text{bul jerde } e_0, a - \text{turaqli'lar}$$

Juwabi': Koordinata basi'ndag'i' e_0 noqatli'q zaryadi' $\rho(r) = -\frac{e_0}{\pi a^3} e^{-\frac{2r}{a}}$ ti'g'i'zli'g'i'na iye ko'lemlik zaryadi' menen qorshalg'an.

2.10. Zaryad sferali'q simmetriyalig'i' tu'rde bo'listirilgen: $\rho = \rho(r)$. Zaryadlardi'n' bo'listiriliwin sferali'q qatlamlarg'a bo'lip, r' boyi'nsha bir eseli integrallar tu'rinde φ ha'm $\mathbf{E}$ ni jazi'n'i'z.

Juwabi':

$$\varphi(r) = \frac{4\pi}{r} \int_0^r \rho(r') r'^2 dr' + 4\pi \int_r^\infty \rho(r') r' dr';$$

$$\mathbf{E}(r) = \frac{4\pi r}{r^3} \int_0^r \rho(r') r'^2 dr'.$$

2.11. Aldi'n'g'i' ma'selenin' na'tiyjelerine tiykarlani'p, birtekli zaryadlang'an shardi'n' maydani'ni'n' kernewliligini ha'm potentsiali'n tabi'n'i'z.

2.12. R radiusli' ha'm q zaryadi'na iye ten' o'lsheqli zaryadlang'an jin'ishke

kolconi'n' potentsiali' φ di bireseli integral arqali' an'lati'n'i'z. *Ko'rsetpe: xz tegisligin baqlaw noqati' arqali' o'tkizin'.*

Juwabi':

$$\varphi(r, \theta) = \frac{q}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\alpha'}{\sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \sin\theta \cos\alpha'}}.$$

2.13. Bir bo'limi duga dep atali'wshi', τ si'zi'qli' ti'g'i'zli'g'i' menen ten'o'lshemli zaryadlang'an a radiusli' do'n'gelektin' orayi'ndag'i' elektrlik maydanni'n' kernewliligini ha'm potentsiali'n' tabi'n'i'z. Dugani'n' orayli'q mu'yeshi γ ten'.

Juwabi':

$$\varphi = \tau\gamma; \quad E = \frac{2\tau}{a} \sin \frac{\gamma}{2}.$$

2.14. R radiusli' shar ko'lemlik $\rho = \rho_0 \cos\theta$ ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an. Ken'isliktin' qa'legen noqati'ndag'i' skalyarli'q potentsialdi' tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\varphi(\mathbf{r}) = \begin{cases} \pi\rho_0 r \left(\frac{4}{3}R - r \right) \cos\theta, & r \leq R \text{ bolg'anda} \\ \frac{\pi\rho_0 R^4 \cos\theta}{3r^2}, & r > R \text{ bolg'anda} \end{cases}$$

2.15. Uzi'nli'g'i' $2l$ bolg'an jin'ishke sterjende zaryadti'n' si'zi'qli' ti'g'i'zli'g'i' $\tau = kx$ ni'zamli'g'i' boyi'nsha o'zgerse (k —turaqli', koordinata basi' sterjennin' orayi'nda ornalasqan), wonda woni'n' dipolli'q momentin tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\mathbf{d} = \frac{2}{3}kl^3\mathbf{i}$$

2.16. Orayi' koordinata basi'nda joylasqan R radiusli' sfera, $\sigma = \kappa z$ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an, bul jerde κ —turaqli', z —sferani'n' sa'ykes noqati'ni'n' koordinatasi'. Sferani'n' dipolli'q momenti $\mathbf{d}$ ni' tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\mathbf{d} = \frac{4\pi}{3} \kappa R^4 \mathbf{k}$$

2.17. Betlik σ ti'g'i'zli'g'i' menen zaryadlang'an sheksiz tegislikte, maydani' S bolg'an tesikshe tesilgen. $\sim \frac{1}{r^2}$ ag'zasi'n esapqa alg'an halda tesiksheden uzaq arali'qtag'i' maydanni'n' kernewliligini tabi'n'i'z.

2.18. Do'n'gelek, zaryadlari' qarama-qarsi' belgige ha'm birdey shamag'a iye ten'o'lshemli zaryadlang'an eki yari'm do'n'gelekten turadi'. Kvadrupolli'q moment tenzori'n ha'm dipolli'q moment vektori'ni'n' komponentin ani'qlan'i'z.

2.19. $q, -2q, q$ zaryadlari', z ko'sherinde sa'ykes tu'rde $-a, 0, a$ koordinatalari'na iye noqatta jaylasqan (si'ziqli' kvadrupol). Sistemadan uzi'q arali'qtag'i' potencial φ ni tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\varphi \approx \frac{2qa^2}{r^3} P_2(\cos\theta); \quad P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1).$$

2.20. Egerde Q zaryadi' R radiusli' shardi'n' ko'lemi boyi'nsha birtekli bo'listirilgen bolsa, wonda zaryadlang'an shardi'n' menshikli elektrlik energiyasi' U ni esaplan'i'z.

Juwabi':

$$U = \frac{3Q^2}{5R}.$$

2.21. $\mathbf{d}_1$ momentine iye dipol koordinata basi'nda jaylasqan, al basqa $\mathbf{d}_2$ momentine iye dipol radius vektori' $\mathbf{r}$ bolg'an noqatta turi'pti'. Dipollardi'n' ta'sir etisiw energiyasi'n tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$U = \frac{\mathbf{d}_1 \mathbf{d}_2}{r^3} - \frac{3(\mathbf{d}_1 \mathbf{r})(\mathbf{d}_2 \mathbf{r})}{r^5}.$$

2.22. R radiusli' shar ρ ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' menen birqi'yli' zaryadlang'an. Maksvellik kernew tenzori'n qollani'p, shardi' ten'dey eki yari'mg'a bo'liwshi ku'sh $\mathbf{F}$ ti tabi'n'i'z. Ali'ng'an na'tiyjeni $\mathbf{F} = \int \rho \mathbf{E} dV$ formulasi'n qollani'p g'a'rezsiz esaplawlar menen tasti'yi'qlan'i'z, bul jerde $\mathbf{E}$ — shardi'n' elektrlik maydani'ni'n' kernewliligi.

Juwabi':

$$F = \frac{3Q^2}{16R^2}.$$

Usi'ni's etiliwshi a'debiyatlar: [1], I bap; [2], II bap; [3], II bap; [4], III, IV bap.

3. Turaqli' magnitlik maydan

Vakuumba turaqli' magnitlik maydan, turaqli' tok arqali' payda etiledi. Ken'islikte tokti'n' bo'listiriliwi ko'lemlik ti'g'i'zli'q $\mathbf{j}(\mathbf{r})$, al betinde betlik ti'g'i'zli'q $\mathbf{i}(\mathbf{r})$ menen si'patlanadi'. Bunnan basqa ken'islikte ju'da' jin'ishke uzi'n o'tkizgish arqali' o'tiwshi si'zi'qli' tok $\mathcal{I}$ beriliwi mu'mkin.

Maksvell ten'lemelerin turaqli' magnitlik maydanni'n' indukciyasi' $\mathbf{B}$ qanaatlandi'radi'

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \quad (3.2)$$

Bulardi'n' ekinshisinin' integralli'q formasi' to'mendegishe boli'p,

$$\oint_{\mathcal{L}} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \int_S \mathbf{j} dS \quad (3.3)$$

magnitlik indukciyani'n' cirkulyაციyasi' haqqi'ndag'i' teorema yamasa Amper ni'zami' dep ataladi'. On' ta'reptegi betlik integral

$$J = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} \quad (3.4)$$

$\mathcal{L}$ konturi'na tirelgen S beti arqali' J toli'q tokti' beredi. Tokti'n' bo'listiriliwi aksial simmetriyag'a yamasa tegislikke sali'sti'rg'anda simmetriyali' bolg'an waqi'tta, cirkulyaciya haqqi'ndag'i' teorema magnitlik indukciyani' jeterli da'rejede an'sat tabi'wg'a mu'mkinshilik beredi.

Birinshi ta'rtpili eki (3.1), (3.2) ten'lemelerinen ekinshi ta'rtpili bir ten'leme vektorli'q $\mathbf{A}$ potencialg'a o'tiw qolayli', wol to'mendegi qatnas penen ani'qlanadi'

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3.5)$$

$\mathbf{B}$ indukciyasi'ni'n' o'zgermeytug'i'nli'g'i' sebepli vektorli'q potencial bir ma'nili emes ani'qlang'an, egerde to'mendegi tu'rlendiriw ja'rdeminde basqa vektorli'q potencialg'a o'tsek

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \quad (3.6)$$

bul jerde $\chi = \chi(\mathbf{r})$ –qa'legen funkciya. Vektorli'q potencialdi' tan'lap ali'wdag'i' birma'nili emeslikti qwollansaq, og'an qosi'msha sha'rtler qosi'ladi'.

$$\text{div } \mathbf{A} = 0. \quad (3.7)$$

Bul jag'dayda magnitlik maydanni'n' vektorli'q potenciali' Puasson ten'lemesin qanaatlandi'radi'

$$\Delta \mathbf{A} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}. \quad (3.8)$$

(3.8), (3.5) muwapi'q ko'lemlik toklardi'n' vektorli'q potenciali' ha'm magnitlik maydanni'n' indukciyasi' ko'lemlik integrallar menen ta'riyiplenedi

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}') dV'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j}(\mathbf{r}'), \mathbf{r} - \mathbf{r}']}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV', \quad (3.10)$$

Bio-Savar ni'zami'nan ha'm superpoziciya principinende (3.10) formulasi'n ali'wg'a boladi'.

Si'zi'qli' tok jag'dayi'nda $\mathbf{A}$ ha'm $\mathbf{B}$ shamalari' to'mendegi almasti'ri'wlardi' kiritken halda (3.9), (3.10) an'latpalari'nan ali'nadi'

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}') dV' \rightarrow J d\mathbf{l}' \quad (3.11)$$

bul ko'lemlik integrallardi' (3.9), (3.10) iymek si'zi'qli'g'a aylandi'radi'. (3.9), (3.10) integrallarg'ada betlik toklar ushi'n sa'ykes almasti'ri'wlar ju'rgiziw kerek

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}') dV' \rightarrow \mathbf{i}(\mathbf{r}') dS' \quad (3.12)$$

Tok o'tiwshi shegaralang'an oblasttan u'lken r arali'qta magnitlik maydanni'n' indukciyasi' ha'm vektorli'q potencial to'mendegi tu'rge iye boladi'

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{[\mathbf{M}\mathbf{r}]}{r^3}, \quad (3.13)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{3(\mathbf{M}\mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{M}}{r^3}, \quad (3.14)$$

bul jerde $\mathbf{M}$ —sistemani'n' magnitlik momenti. Ko'lemlik toklar jag'dayi'nda to'mendegishe boladi'

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int [\mathbf{r}\mathbf{j}(\mathbf{r})] V. \quad (3.15)$$

Tegis kontur jag'dayi'nda magnitlik moment tok J din' konturdi'n' maydani' S ke ko'beymesi menen ani'qlanadi' (yag'ni'y konturdi'n' formasi'nan g'a'rezli emes) ha'm kontur tegisligne normal $\mathbf{n}$ boyi'nsha bag'i'tlang'an:

$$\mathbf{M} = \frac{J}{c} S \mathbf{n} \quad (3.16)$$

Magnitlik maydanni'n' energiyasi'

$$U = \frac{1}{8\pi} \int \mathbf{B}^2 dV \quad (3.17)$$

ja'nede mi'na formula menende esaplawg'a boladi'

$$U = \frac{1}{2c} \int \mathbf{j} \mathbf{A} dV \quad (3.18)$$

Indukciyasi' $\mathbf{B}$ bwolg'an si'rtqi' magnitlik maydanda ko'lemlik tokqa tu'sirilgen $\mathbf{F}$ ku'shi mi'na tu'rqi qabi'l etedi

$$\mathbf{F} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{j} \mathbf{B}] dV, \quad (3.19)$$

Ko'rsetilgen tokti'n' si'rtqi' magnitlik maydan menen ta'sir etisiwinin' magnitlik energiyasi', usi' maydanni'n' vektorli'q potentsiali' $\mathbf{A}$ arqali' an'lati'ladi'

$$U = \frac{1}{c} \int \mathbf{j} \mathbf{A} dV \quad (3.20)$$

Egerde tok o'tip ati'rg'i'n ken'isliktin' bo'limi boylap si'rtqi' magnitlik maydanni'n' $\mathbf{B}$ indukciyasi' az o'zgerse, wonda (3.20) dag'i' ta'sir etisiw energiyasi' toklardi'n' magnitlik momenti $\mathbf{M}$ arqali' an'lati'ladi'

$$U = \mathbf{M} \mathbf{B} \quad (3.21)$$

Magnitostatikada fizikali'q $\mathbf{M} \mathbf{B}$ shamasi' potentsialli'q energiya boli'p tabi'lmaydi'. Usi'g'an baylani'sli' ko'rip shi'g'i'w ushi'n potentsialli'q funkciya V kiritiledi, wol $\mathbf{M} \mathbf{B}$ –ten' boli'p shi'g'adi'. Potentsialli'q funkciya si'rtqi' magnitlik maydanda magnitlik momentke tu'sirilgen ku'shti a'piwayi' $\mathbf{F} = -grad V$ tu'rde ko'rsetiwge mu'mkinshilik beredi. Solay etip, kvazi birqi'yli' si'rtqi' $\mathbf{B}$ maydanda, magnitlik momentke to'mendegi ku'sh ta'sir etedi

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{M} \mathbf{B}) \quad (3.22)$$

ha'm ku'sh momenti

$$\mathbf{K} = [\mathbf{M} \mathbf{B}] \quad (3.23)$$

(3.19) dag'i' qosi'ndi' ko'lemlik ku'shti, ishinen ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' $\mathbf{j}$ bolg'an tok o'tetug'i'n V ko'lem betine tu'sirilgen betlik ku'sh sistemasi' menen almasti'ri'wg'a boladi',

$$F_{\alpha} = \frac{1}{c} \int_V [\mathbf{jB}]_{\alpha} dV = \oint_S T_{\alpha\beta} n_{\beta} dS, \quad (3.24)$$

bul jerde $\mathbf{n}$ –ko'lem V ni' qorshawshi' tuyi'q S betine ju'rgizilgen si'rtqi' normaldi'n' orti', al $T_{\alpha\beta}$ –maksvellik kernew tenzori':

$$T_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left(B_{\alpha} B_{\beta} - \frac{1}{2} B^2 \delta_{\alpha\beta} \right). \quad (3.25)$$

Ma'seleler sheshiwge mi'sallar

1-ma'sele. *Ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i' $\mathbf{j}$ bolg'an birqi'yli' tok, R radiusli' sheksiz cilindr boyi'nsha, woni'n' ko'sherine parallel tu'rde o'tedi. Cilindrdin' ishindeg'i ha'm si'rti'ndag'i' magnitlik maydanni'n' indukciyasi'n tabi'n'i'z.*

En' a'piwayi' tu'rde, bul ma'sele cirkulyaciya haqqi'ndag'i' teorema ja'rdeminde sheshiledi. Sistemani'n' simmetriyalig'i'nan to'mendegi kelip shi'g'adi', yag'ni'y qa'legen noqatta indukciya vektori' $\mathbf{B}$, ko'sherge ortogonal tegislik ha'm orayi' cilindrdin' ko'sherinde bolg'an shen'berge uri'nba boyi'nsha bag'i'tlang'an. $\mathbf{B}$ vektori'ni'n' shamas'i' cilindrdin' orayi'na shekemgi r arali'qtan g'a'rezli. Cirkulyaciya haqqi'ndag'i' (3.3) teorema ushi'n, $r > R$ bolg'an jag'dayda kontur si'pati'nda r radiusli' shen'berdi tan'lap ali'p, $B \cdot 2\pi r = \frac{4\pi}{c} j\pi R^2$ ti' alami'z. Sa'ykes tu'rde $r < R$ bolg'anda, $B \cdot 2\pi r = \frac{4\pi}{c} j\pi r^2$.

Usi' ten'liklerden magnitlik indukciyani' tabami'z:

$$B = \begin{cases} \frac{2\pi jr}{c} & r \leq R \text{ bolg'anda,} \\ \frac{2\pi jR^2}{cr} & r > R \text{ bolg'anda,} \end{cases} \quad \blacksquare$$

2.ma'sele. Turaqli' i ti'g'i'zli'g'i'na iye birqi'yli' tok, xy tegisligi boyi'nsha y ko'sherine parallel tu'rde o'tedi. Magnitlik maydanni'n' indukciyasi'n tabi'n'i'z.

Magnitlik indukciya $z > 0$ bolg'anda tegislik u'stinde x ko'sheri boylap, al $z < 0$ bolg'anda x ko'sherine qarama-qarsi' bag'i'tlanadi' (bul jag'daydi', berilgen noqatqa sali'sti'rg'anda simmetriyali' joylasqan tokti'n' eki liniyasi'ni'n' u'lesin qarap erisiwge boladi'). Tuwri'mu'yeshli konturdi' to'mendegishe tan'lap alami'z, yag'ni'y woni'n' bir ta'repi x ko'sheri bag'i'ti'nda tegislik u'stinen, al ekinshisi og'an simmetriyali' tegislik asti'nan o'tedi. Cirkulyaciya haqqi'ndag'i' teoremadan to'mendegini alami'z: $2Bl = \frac{4\pi}{c}il$, yag'ni'y

$$B = \frac{2\pi i}{c}. \quad \blacksquare$$

3-ma'sele. R radiusli' shardi'n' ko'lemin birqi'yli' Q zaryadi' tolti'radi'. Egerde shar o'zinin' diametri do'gereginde turaqli' ω mu'yeshlik tezligi menen aylansa, wonda shardi'n' orayi'ndag'i' magnitlik maydan indukciyasi' B ni' tabi'n'i'z.

Koordinatalar basi'n shardi'n' worayi'na jaylasti'rami'z ha'm z ko'sherin ω vektori' boylap bag'i'tlaymi'z. (3.10) na muwapi'q shardi'n' orayi'ndag'i' magnitlik indukciya to'mendegi an'latpa arqali' beriledi

$$\mathbf{B}(0) = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{r}\mathbf{j}(\mathbf{r})]}{r^3} dV,$$

bul jerde integrallaw o'zgeriwshilerinin' shtrixi ali'p taslang'an. Aylandi'ri'w na'tiyjesinde shardi'n' ishinde $\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \rho\mathbf{V} = \rho[\mathbf{r}\boldsymbol{\omega}]$ ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'na iye tok bar boladi', bul jerde $\rho = \frac{3Q}{4\pi R^3}$. Eki ma'rteli vektorli'q ko'beymeni ashi'p, to'mendegini alami'z

$$\mathbf{B}(0) = \frac{1}{c} \int \rho \frac{r^2 \boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega}\mathbf{r})\mathbf{r}}{r^3} dV.$$

$\mathbf{B}(0)$ vektori, x ha'm y ko'sherlerine proekciyasi'na iye emes (tekserip ko'rin'iz!) ha'm to'mendegishe an'lati'li'wi' mu'mkin

$$\mathbf{B}(0) = \frac{\omega}{c} \int \frac{\rho(1 - \cos^2 \theta)}{r} dV.$$

Ali'ng'an formula ishindegı zaryad ko'lemlik $\rho = \rho(r, \theta)$ ti'g'i'zli'g'i' menen bo'listirilgen qa'legen aylani'wshi' dene ushi'n ori'nli' boladi'. Sferali'q koordinatalarda ten'o'lshemli zaryadlang'an shar ushi'n ko'lemlik integraldi' esaplap

$$\mathbf{B}(0) = \rho \frac{\omega}{c} \int_0^R r dr \int_0^\pi (1 - \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi,$$

to'mendegini tabami'z

$$\mathbf{B}(0) = \frac{Q\omega}{cR}. \quad \blacksquare$$

4-ma'sele. Qozdi'ri'lg'an vodorod atomi'nan o'tiwshi orbital tokti'n' ortasha ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'ni'n' sferali'q koordinatalardag'i' $\mathbf{j}$ vektori'ni'n' komponenti to'mendegige ten'

$$j_r = j_\theta = 0, \quad j_\varphi = \frac{1}{2 \cdot 3^8} \frac{e\hbar}{\pi m a^7} r^3 e^{-\frac{2r}{3a}} \sin^3 \theta,$$

bul jerde a – borli'q radius, $\hbar$ – Plank turaqli'si', m ha'm e elektronni'n' massasi' ha'm zaryadi', al r – protong'a shekemgi arali'q. Ken'islikte orbital tok magnitlik maydandi' payda etedi. Usi' maydanni'n' koordinatalar basi'ndi'g'i' indukciyasi'n tabi'n'i'z.

Bio-Savar ni'zami'na muwapi'q koordinatalar basi'ndag'i' magnitlik indukciya to'mendegi an'latpa menen beriledi

$$\mathbf{B}(0) = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{r}\mathbf{j}(\mathbf{r})]}{r^3} dV.$$

Simmetriya ko'z qarasi'nan bizge belgili, yag'ni'y koordinatalar basi'nda $\mathbf{B}$ vektori' tek z –komponentine iye boladi'. Aldi'n'g'i' formuladag'i' ko'lemlik integraldi' sferali'q koordinatalarda esaplag'an maqul boladi'. To'mendegi qatnaslardi' esapqa alg'an halda, wolar arqali' $[\mathbf{r}\mathbf{j}]_z = xj_y - yj_x$, dep an'lati'p

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \varphi, & y &= r \sin \theta \sin \varphi, \\ j_x &= -j_\varphi \sin \varphi, & j_y &= j_\varphi \cos \varphi, \end{aligned}$$

mi'nani' alami'

$$B_z(0) = \frac{1}{c} \frac{1}{2 \cdot 3^8} \frac{e\hbar}{\pi m a^7} \int_0^\infty r^3 e^{-\frac{2r}{3a}} dr \int_0^\pi \sin^5 \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi$$

Sebebi

$$\int_0^\infty r^3 e^{-\alpha r} dr = (-1)^3 \frac{\partial^3}{\partial \alpha^3} \int_0^\infty e^{-\alpha r} dr = \frac{3!}{\alpha^4}$$

ha'm

$$\int_0^\pi \sin^5 \theta d\theta = - \int_0^\pi (1 - \cos^2 \theta)^2 d(\cos \theta) = \frac{16}{15},$$

bunnan en' aqi'ri'nda to'mendegini tabami'z

$$B_z(0) = \frac{2e\hbar}{405mca^3}.$$

Esaplawlar arqali' $B_x(0) = B_y(0) = 0$ ekenligin tekserin'iz. ■

5-ma'sele. Qaptallari' $2a$ bwolg'an kvadratti' payda etiwshi jin'ishke o'tkizgish boyi'nsha J togi' o'tedi. Kvadratti'n' tegisligine perpendikulyar halda woni'n' orayi' arqali' o'tiwshi ko'sherdegi magnitlik indukciya $\mathbf{B}$ ni' tabi'n'i'z. Uzaq arali'qlardag'i' $\mathbf{B}$ ni' ani'qlap, magnitlik moment $\mathbf{M}$ di tabi'n'i'z.

Kvadratti' xy tegisligine, woni'n' ta'replerin ko'sherlerge parallel etip, al z ko'sherin kvadratti'n' orayi'nan o'tetug'i'n ha'm tokti'n' bag'i'ti' menen on' vintlik sistemani' payda etetug'i'n etip jaylasti'rami'z. Kvadratti'n' ko'sherinde indukciya vektori' tek B_z komponentine iye bwoladi', bunda ha'rbir qaptaldag'i' tok og'an birdey u'les qosadi'. Sonli'qtan to'mendegini esaplaw talap etiledi

$$B_z(z) = \frac{J}{c} \oint \frac{[d\mathbf{l}, \mathbf{r} - \mathbf{r}']_z}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} = \frac{4J}{c} \int_{-a}^a \frac{ady'}{(y'^2 + a^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{8J}{c} \int_0^a \frac{ady'}{(y'^2 + a^2 + z^2)^{3/2}}$$

(y ko'sherine parallel bwolg'an ta'repi boyi'nsha integrallaymi'z). Payda bolg'an integraldi'

$$\int \frac{dx}{(x^2 + b^2)^{3/2}} = \frac{1}{b^2} \frac{x}{(x^2 + b^2)^{1/2}} + C$$

$x = b/t$ orni'na qoyi'w arqali' ali'wg'a boladi' (esaplawlar ju'rgizin!). Na'tiyjede mi'nani' alami'z:

$$\mathbf{B} = \frac{8a^2J}{c(z^2 + a^2)\sqrt{z^2 + 2a^2}} \mathbf{k}.$$

Konturdan uzaq arali'qlarda $|z| \gg a$, indukciya ushi'n an'latpa a'piwayi'lasadi'

$$\mathbf{B} = \frac{8a^2J}{c|z|^3} \mathbf{k}.$$

Bul formulani' toklar sistemasi'nan uzaq arali'qlardag'i' indukciya ushi'n (3.14) uli'wma an'latpasi' menen sali'sti'rsa, bizin' jag'dayda (baqlaw noqati'na ju'rgizilgan $\mathbf{r}$ radius-vektor ha'm $\mathbf{M}$ magnitlik moment bir tuwri'da jaylasqanda, al $r = |z|$ bolg'anda) to'mendegi tu'rge iye boladi'

$$\mathbf{B} = \frac{2\mathbf{M}}{|\mathbf{z}|^3}$$

(3.16) na muwapi'q $M = \frac{4a^2J}{c}$ ekenligi ko'rinip tur ■

6-ma'sele. Betlik σ ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an konusli'q bet ($x^2 + y^2 = z^2$, $0 \leq z \leq h$) o'zinin' ko'sheri do'gereginde ω mu'yeshlik tezligi menen aylanadi'. Konusli'q bettin' to'besindegi magnitlik maydanni'n' indukciyasi'n tabi'n'i'z.

(3.10), (3.12) formulalari'nan konus to'besindegi magnitlik indukciya ushi'n da'slepki an'latpani' alami'z:

$$\mathbf{B}(0) = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{r}\mathbf{i}]}{r^3} dS,$$

bul jerde integrallaw konusti'n' beti boyi'nsha o'tkeriledi. Betlik tokti'n' ti'g'i'zli'g'i'n zaryadti'n' ti'g'i'zli'g'i' ha'm mu'yeshlik tezlik $\mathbf{i} = \sigma[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}]$ arqali' an'lati'p ha'm ekilemshi vektorli'q ko'beymeni ashi'p, to'mendegini alami'z

$$\mathbf{B}(0) = \frac{\sigma}{c} \int \frac{\boldsymbol{\omega}r^2 - \mathbf{r}(\boldsymbol{\omega}\mathbf{r})}{r^3} dS.$$

Integrallawdi' cilindrlik koordinatalar sistemasi'nda ρ, φ, z o'tkeremiz. Konusti'n' ko'sheri ha'm du'ziwshisi arasi'ndag'i' α mu'yeshine iye konus betindegi maydansha elementi $dS = \rho d\rho d\varphi / \sin\alpha$ (bug'an dS tin' xy tegisligine proekciyasi'n jasap erisiwge boladi') tu'rinde jazi'ladi'. Bizin' jag'dayda $\alpha = \pi/4$ ten', sonli'qtan $z = \rho = r/\sqrt{2}$. Esaplawlar ju'rgizip to'mendegini tabami'z

$$\mathbf{B}(0) = \frac{\pi}{c} h \sigma \boldsymbol{\omega}. \quad \blacksquare$$

7-ma'sele. Qozdi'ri'lg'an vodorod atomi'nan o'tiwshi orbital tokti'n' ortasha ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'ni'n' sferali'q koordinatalardag'i' $\mathbf{j}$ vektori'ni'n' komponenti to'mendegige ten'

$$j_r = j_\theta = 0, \quad j_\varphi = \frac{1}{3^8} \frac{e\hbar}{\pi m a^7} r^3 e^{-\frac{2r}{3a}} \sin\theta \cos^2\theta,$$

bul jerde a – borli’q radius, $\hbar$ – Plank turaqli’si’, m ha’m e elektronni’n’ massasi’ ha’m zaryadi’, al r – protong’a shekemgi arali’q. Orbital tokti’n’ magnitlik momenti $\mathbf{M}$ di esaplan’i’z.

Magnitlik momenttin’ (3.15) ani’qlamasi’nan kelip shi’g’i’p ha’m usi’ bo’limdegi 4-ma’selege sa’ykes komponentleri boyi’nsha berilgen koordinatalar sistemasi’nda vektorli’q funkciyadan ko’lemlik integraldi’ esaplaymi’z. Haqi’yqati’nda $M_x = M_y = 0$, al M_z ushi’n arali’q an’latpani’ alami’z

$$M_z = \frac{1}{2s} \frac{1}{3^8} \frac{e\hbar}{\pi m a^7} \int_0^\infty r^6 e^{-\frac{2r}{3a}} dr \int_0^\pi \sin^3 \theta \cos^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi$$

Esaplawlar ju’rgizip

$$\int_0^\infty r^6 e^{-\frac{2r}{3a}} dr = \frac{6!}{(2/3a)^7}, \quad \int_0^\pi \sin^3 \theta \cos^2 \theta d\theta = \frac{4}{15},$$

Orbitalli’q tokti’n’ magnitlik momentin tabami’z

$$M_x = M_y = 0, \quad M_z = \frac{e\hbar}{2mc}. \quad \blacksquare$$

8-ma’sele. Elektronni’n’ ishki magnitlik momenti absolyut shamasi’ boyi’nsha Bor magnetoni’na $\mu_0 = \frac{|e|\hbar}{2mc}$ ten’. Klassikali’q modelge muwapi’q, elektron $r_0 = \frac{e^2}{mc}$ radiusli’ birqi’yli’ zaryadlang’an shardi’ elesletedi. Ishki magnitlik momentti, o’zinin’ simmetriya ko’sheri do’gereginde elektronni’n’ aylani’wi’ni’n’ na’tiyjesi dep qarap, usi’ aylani’wdi’n’ mu’yeshlik tezligi ω ni’ ani’qlan’i’z.

O’zinin’ ko’sheri do’gereginde ω mu’yeshlik tezligi menen aylani’wshi’ ten’ o’lshemli zaryadlang’an shardi’n’ magnitlik momentin esaplaymi’z:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int [\mathbf{r}\mathbf{j}] dV = \{\mathbf{j} = \rho[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}]\} = \frac{\rho\boldsymbol{\omega}}{2c} \int r^2 (1 - \cos^2 \theta) dV = \frac{er_0^2}{5c} \boldsymbol{\omega}.$$

Magnitlik momenttin’ absolyut shamasi’ni’n’ esaplang’an ha’m eksperimentten ali’ng’an ma’nislerin ten’lestirip

$$\frac{|e|r_0^2}{5c}\omega = \frac{|e|\hbar}{2mc},$$

Elektronni'n' aylanishi'ni' kerek bolgan mu'yeshlik tezlikni tabamiz:

$$\omega = \frac{5\hbar}{2mr_0^2}.$$

Fundamental turaqli'lardi'n' san ma'nislerin qoyi'p, $\omega \approx 10^{25} s^{-1}$ ekenligi tabamiz. Elektronni'n' klassikali'q radiusi' $r_0 = e^2/mc^2 \approx 10^{-13} sm$, bolganli'g'i' sebepli, ekvatorida jaylasi'wshi' «elektron noqatlari'» ni'n' si'zi'qli' tezliginin' shamasini' $v = \omega r_0 \approx 10^{12} sm/s$ ten', yag'ni'y jaqti'li'q tezliginen eki ta'rtipke joqari'. Sonli'qtan, qarali'p atiri'lg'an spinlik magnitlik momentin' modeli arnavli' sali'sti'rmali'li'q teoriyasi'ni'n' ekinshi postulati'na qarama-qarsi' keledi. ■

9-ma'sele. *R radiusli' sheksiz cilindrdin' kesim boyi'nsha J togi' birqi'yli' bo'listirilgan. Maksvellik kernew tenzori'n qollani'p, cilindrdin' birdey eki yari'mi'ni'n' bir-birine qi'si'li'wshi' F ku'shin tabi'n'i'z. Bul jerde F –cilindrdin' yari'm birinin' birlik uzi'nli'g'i'na tu'sirilgan ku'sh. Ko'lemlik ku'shti qollani'p g'a'rezsiz esaplawlar orqali' ali'ng'an na'tiyjeni tasti'yi'qlan'i'z.*

z ko'sherin cilindrdin' ko'sheri boylap, al y ko'sherin cilindrdin' yari'm bo'limi tegisligine perpendikulyar tu'rde bag'i'tlaymi'z. Cilindrdin' yari'mi'na tu'sirilgan ku'sh, kernew tenzori' $T_{\alpha\beta}$ orqali' to'mendegi tu'rde ani'qlanadi' ((3.24) qaran'i'z).

$$F_y = \oint (T_{yx}n_x + T_{yy}n_y + T_{yz}n_z)dS, \quad (3.26)$$

bul jerde integrallaw birlik biyikliktegi yari'mcilindrdin' beti boyi'nsha ali'nadi', $n = (n_x, n_y, n_z)$ –og'an si'rtqi' normaldi'n' vektori'. Ku'shtin' basqa komponentleri no'lge ten': $F_x = F_z = 0$. Indukciya vektori'ni'n' komponentlerin jazami'z

$$B_x = -B\sin\varphi, \quad B_y = B\cos\varphi, \quad B_z = 0$$

wolar arqali' (3.25) ne muwapi'q, $T_{\alpha\beta}$ kernew tenzori'ni'n' komponentleri an'lati'ladi'. Da'slep integraldi' cilindrindin' qaptal beti boyi'nsha esaplaymi'z. Sebebi og'an $n_x = \cos\varphi$, $n_y = \sin\varphi$, maydan elementi $dS = R d\varphi dz$, al indukciya shamasi' turaqli' ma'niske iye boladi' $B = 2J/cR$, wonda to'mendegige iye bolami'z (cilindrindin' birlik uzi'nli'g'i'na sa'ykes keliwshi ku'sh esaplanatug'i'nli'g'i'n eske salami'z).

$$\begin{aligned} F_y^{(1)} &= \frac{1}{4\pi} R \int_{-1/2}^{1/2} dz \int_0^\pi \left[-B^2 \sin\varphi \cos^2\varphi + \left(B^2 \cos^2\varphi - \frac{1}{2} B^2 \right) \sin\varphi \right] d\varphi \\ &= -\frac{J^2}{\pi c^2 R} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Yari'mcilindrlerdin' bo'limleri betinde (xz tegisliginde jati'wshi')

$$n_x = n_z = 0, \quad n_y = -1, \quad B = \frac{2J}{cR^2} |x|,$$

Sonli'qtan

$$F_y^{(2)} = - \int T_{yy} dS = -\frac{1}{8\pi} \int_{-1/2}^{1/2} dz \int_{-R}^R B^2 dx = -\frac{J^2}{3\pi c^2 R}$$

$F_y^{(1)}$ ha'm $F_y^{(2)}$ lerdi qosi'p, juwmaqlawshi' ku'shtin' absolyut shamasi' boyi'nsha to'mendegige ten' ekenligin tabami'z

$$F = \frac{4J^2}{3\pi c^2 R}.$$

Bul ma'seleni sheshiwadin' basqa usi'li' (3.19) shi' formula boyi'nsha qosi'lg'an ko'lemlik ku'shti esaplawg'a tiykarlang'an:

$$\begin{aligned}
F_y &= \frac{1}{c} \int [\mathbf{jB}]_y dV = \frac{1}{c} \int j B_x dV \\
&= \left\{ j = \frac{J}{\pi R^2}, \quad dV = \rho d\rho d\varphi dz, \quad B_x = -\frac{2J}{cR^2} \rho \sin\varphi \right\} \\
&= -\frac{2J^2}{\pi c^2 R^4} \int_0^R \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sin\varphi d\varphi \int_{-1/2}^{1/2} dz = -\frac{4J^2}{3\pi c^2 R}. \quad \blacksquare
\end{aligned}$$

O'zbetinshe sheshiw ushi'n ma'seleler

3.1. Ken'islikte, $\mathbf{j} = \mathbf{j}_0 e^{-\alpha r}$ ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'na iye turaqli' tokti' payda etiw mu'mkinbe, bul jerde α – turaqli' shama, $\mathbf{j}_0$ – turaqli' vektor?

3.2. Egerde magnitlik indukciya mi'na sha'rtlerdi qabi'l etse: a) $\mathbf{B} = f(r)[\mathbf{ar}]$, b) $\mathbf{B} = (\mathbf{ar})[\mathbf{ar}]$, bul jerde $f(r)$ – qa'legen differencialrani'wshi' funkciya, $\mathbf{a}$ – turaqli' vektor, wonda ken'islikte tokti'n' ko'lemlik ti'g'i'zli'g'i'ni'n' bo'listiriliwin tabi'n'i'z.

Juwabi': a) $\mathbf{j} = \frac{c}{2\pi} \left[f(r)\mathbf{a} + \frac{df(r)}{dr} \frac{r[\mathbf{ar}]}{2r} \right]$, b) $\mathbf{j} = \frac{c}{2\pi} [3(\mathbf{ar})\mathbf{a} - a^2 \mathbf{r}]$.

3.3. Birtekli ha'm turaqli' $\mathbf{B}$ magnitlik maydang'a, $\mathbf{A} = \frac{1}{2}[\mathbf{Br}]$ vektorli'q potentsialdi' ten'lestiriwge bolatug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz. Wwol $\text{div}\mathbf{A} = 0$ sha'rtin qanaatlandi'rama?

3.4. Sheksiz uzi'n o'tkizgishten r arali'qta B indukciyasi'n payda etiwshi tokti'n' ku'shin J di tabi'n'i'z.

3.5. R radiusli' sheksiz cilindrlilik bet boyi'nsha, woni'n' ko'sherine parallel tu'rde i_0 betlik ti'g'i'zli'g'i'na iye birqi'yli' tok o'tedi. Ken'isliktin' qa'legen noqati'ndag'i' magnitlik maydanni'n' indukciyasi'n tabi'n'i'z.

3.6. a ta'repli kvadratli'q ramka tuwri'si'zi'qli' J togi' menen bir tegislikte jaylasqan. Egerde ramkani'n' beti arqali' magnitlik maydanni'n' ag'i'mi' F_0 g'a ten' bolsa, wonda ramkani'n' ta'repi toktan qanday en' jaqi'n arali'qta jaylasqan?

Juwabi':

$$l = \frac{a}{\exp\left(\frac{cF_0}{2aj}\right) - 1}$$

3.7. Ti'g'i'z oralg'an (birlik uzi'nli'qtag'i' n o'ram, tok J) sheksiz uzi'n cilindrlk solenoidti'n' magnitlik maydani' to'mendegi formulalar arqali' beriletug'i'nli'g'i'n ko'rsetin'iz:

$$B = \frac{4\pi}{c} nJk \text{ solenoid ishinde, } B = 0 \text{ si'rti'nda}$$

bul jerde z ko'sheri solenoid boylap bag'i'tlang'an.

3.8. Kese kesimi do'n'gelek bolg'an birqi'yli' uzi'n tuwri' o'tkizgish ishinde do'n'gelek cilindrlk jolaqsha bar, woni'n' ko'sheri o'tkizgish ko'sherine parallel ha'm keyingige sali'sti'rg'anda a arali'qqa awi'sqan. O'tkizgish boyi'nsha j ti'g'i'zli'g'i'na iye turaqli' tok o'tedi. Jolaqsha ishindegi magnitlik indukciyani' tabi'n'i'z.

Juwabi': $B = \frac{2\pi}{c} [ja]$, a — si'rtqi' cilindr din' ko'sherinen ishki ko'sherge o'tkizilgen vektor.

3.9. R radiusli' yari'mcilindrlik bet formasi'na iye uzi'n tuwri' o'tkizgish boylap J togi' o'tedi. Berilgen bettin' ko'sherindegi magnitlik indukciyani' tabi'n'i'z.

Juwabi': $B = \frac{4J}{\pi c R}$, B vektori' yari'mcilindr din' simmetriya tegisligine perpendikulyar.

3.10. σ betlik ti'g'i'zli'g'i' menen birtekli zaryadlang'an R radiusli' juqa diska, o'zinin' ko'sheri do'gereginde ω mu'yeshlik tezligi menen aylanadi'. Diskani'n' ko'sherindegi magnitlik maydanni'n' indukciyasi'n tabi'n'i'z.

$$Juwabi': B = 2\pi\sigma|z| \left[\left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right)^{1/2} + \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right)^{-1/2} - 2 \right] \frac{\omega}{c}.$$

3.11. Jin'ishke sheksiz tuwri' tokli' trubka boyi'nsha J togi' o'tedi, wol R radiusli' yari'mshen'ber tu'rindagi lokalli'q iymeklikke iye. Ko'rsetilgen yari'mshen'berdin' iymeklik orayi'ndag'i' magnitlik indukciyani' tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\mathbf{B} = \frac{\pi J}{cR} \mathbf{n}$$

bul jerde ort $\mathbf{n}$ yari'mshen'ber tegisligine ju'rgizilgen normal, duga boyi'nsha o'tiwshi tokti'n' bag'i'ti' menen on' vint sistemasi'n payda etedi.

3.12. R radiusli' jin'ishke do'n'gelek boyi'nsha J togi' o'tedi. Do'n'gelektin' ko'sherindegi magnitlik indukciyani' tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\mathbf{B} = \frac{2\pi R^2 J \mathbf{n}}{c(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

bul jerde $\mathbf{n}$ –do'n'gelektin' tegisligine ju'rgizilgen normal, wol J togi'ni'n' bag'i'ti' menen on' vint sistemasi'n payda etedi.

3.13. Ta'repleri a bolg'an ten'qaptalli' u'shmu'yeshlik formasi'ndag'i' juqa tokli' trubka boyi'nsha J togi' o'tedi. Toktan uzaq r arali'qtag'i' magnitlik indukciyani' ha'm vektorli'q potentsialdi' tabi'n'i'z.

3.14. R radiusli' ha'm qa'legen biyikliktegi birqi'yli' zaryadlang'an cilindr o'zinin' simmetriya ko'sheri do'gereginde ω mu'yeshli tezligi menen aylanadi'. Cilindrdin' toli'q zaryadi' Q g'a ten', al woni'n' aylani'w ko'sheri si'rtqi' birqi'yli' magnitlik maydanni'n' $\mathbf{B}$ indukciyasi' menen qandayda bir α mu'yeshin payda etedi. Cilindrdin' magnitlik maydan menen ta'sir etisiw U energiyasi'n ani'qlan'i'z.

Juwabi':

$$U = \frac{QR^2}{4c} (\omega \mathbf{B})$$

3.15. O'zinin' ko'sheri do'gereginde ω mu'yeshlik tezligi menen aylani'wshi' konus beti ($x^2 + y^2 = z^2, 0 \leq z \leq h$) boyi'nsha Q zaryadi' birtekli bo'listirilgen. Betten uzaq arali'qtag'i' magnitlik maydanni'n' $\mathbf{B}$ indukciyasi'n ha'm $\mathbf{A}$ vektorli'q potentsiali'n tabi'n'i'z.

Juwabi':

$$\mathbf{A} = \frac{Qh^2}{4cr^3} [\omega \mathbf{r}], \quad \mathbf{B} = \frac{Qh^2}{4cr^3} (3(\omega \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2 \omega)$$

3.16. R radiusli' eki birdey birtekli zaryadlang'i'n sferali'q bet bir birinen uzaq

arali'qta joylasqan. Har bir sferali'q bettin' toli'q zaryadi' Q g'a teng, al wolardi'n' menshikli k5sherleri do'gereginde mu'yeshli aylani'w tezligi sa'ykes ω_1 ha'm ω_2 ge teng. Sferali'q betlerdin' ta'sir etisiwinin' magnitlik energiyasi' U di' ani'qlan'i'z.

Juwabi':

$$U = \left(\frac{QR^2}{3c} \right)^2 \left(\frac{3(\omega_1 \mathbf{r})(\omega_2 \mathbf{r})}{r^5} - \frac{\omega_1 \omega_2}{r^3} \right)$$

Usi'ni's etiletug'i'n a'debiyatlar: [1], II bap; [2], V bap; [3], III bap; [4], V, VI bap.

Qosi'msha

1. Sferali'q ha'm cilindrlik koordinatalardag'i' tiykarg'i' differencialli'q operaciyalar

Sferali'q koordinatalarda:

$$\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi, \quad (P.1)$$

$$\text{div } \mathbf{a} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(\sin \theta a_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi}, \quad (P.2)$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{a} = & \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial(\sin \theta a_\varphi)}{\partial \theta} - \frac{\partial a_\theta}{\partial \varphi} \right) \mathbf{e}_r + \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial a_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial(r a_\varphi)}{\partial r} \right) \mathbf{e}_\theta \\ & + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r a_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial a_r}{\partial \theta} \right) \mathbf{e}_\varphi, \end{aligned} \quad (P.3)$$

$$\Delta f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}. \quad (P.4)$$

Cilindrlik koordinatalarda:

$$\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial \rho} \mathbf{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z, \quad (P.5)$$

$$\text{div } \mathbf{a} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho a_\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial a_z}{\partial z}, \quad (P.6)$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{a} = & \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial a_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial a_\varphi}{\partial z} \right) \mathbf{e}_\rho + \left(\frac{\partial a_r}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial r} \right) \mathbf{e}_\varphi \\ & + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho a_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial a_\rho}{\partial \varphi} \right) \mathbf{e}_z, \end{aligned} \quad (P.7)$$

$$\Delta f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}. \quad (P.8)$$

2. Sferali'q funkciyalar

Sferali'q $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ funkciyasi' to'mendegi formula menen ani'qlanadi'

$$Y_{lm}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} P_l^{|m|}(\cos\theta) e^{im\varphi}, \quad (P.9)$$

bul jerde $-l \leq m \leq l$ ha'm $l = 0, 1, \dots$, al $P_l^m(\cos\theta)$ –Lejandrani'n' baylani'sqan polinomi':

$$P_l^m(\cos\theta) = \sin^m\theta \frac{d^m P_l(\cos\theta)}{(d\cos\theta)^m}. \quad P.10$$

Qosi'mshalarda ushi'rasi'wshi' $l = 0, 1$, indekslerine iye $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ funkciyasi' to'mendegi formulalar menen beriledi

$$Y_{00}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}, \quad Y_{10}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos\theta,$$

$$Y_{1\pm 1}(\theta, \varphi) = \mp \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin\theta e^{\pm i\varphi}. \quad (P.11)$$

Sferali'q funkciyalar toli'q ortonormag'a keltirlgen sistemani' payda etedi, wolar boyi'nsha jayi'wg'a bir mi'sal multipol qatardi' (2.40) beredi. Y_{lm} funkciyasi'ni'n' ortogonalli'q ha'm normag'a keltiriw sha'rti to'mendegi tu'rge iye:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi d\theta \sin\theta Y_{lm}^*(\theta, \varphi) Y_{l'm'}(\theta, \varphi) = \delta_{ll'} \delta_{mm'}. \quad P.12$$

$Y_{lm}(\theta, \varphi)$ funkciyasi'na Laplas operatori'ni'n' ta'sirinde keyingi qayta islenedi

$$\Delta Y_{lm}(\theta, \varphi) = -\frac{l(l+1)}{r^2} Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad P.13$$

yag'ni'y, $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ menshikli $-l(l+1)$ ma'nisine iye $\Delta_{\theta\varphi}$ operatori'ni'n' menshikli funkciyasi' dep ataladi' ((1.31), (P.4) qaran'i'z).

A'debiyatlar dizimi

1. Alekseev A. I. Sbornik zadach po klassicheskoy elektrodinamike / A. I. Alekseev. - M. : Nauka, 1977. -319 s.
2. Bati'gin V. V. Sbornik zadach po elektrodinamike / V. V. Bati'gin, I. N. Topti'gin. – M. : Nauka, 2002. – 639 s.
3. Bati'gin V. V. Sovremennaya elektrodinamika, chast 1. Mikroskopicheskaya teoriya / V. V. Bati'gin, I. N. Topti'gin. – Moskva-Ijevsk : Institut kompyuterni'x issledovaniy, 2003. – 736 s.
4. Zapryagaev S. A. Elektrodinamika / S. A. Zapryagaev. – Voronej : Izd-vo Voronej. gos. un-ta, 2005. – 536 s.
5. Tamm I. E. Osnovi' teorii elektrichestva / I. E. Tamm. – M. : Nauka, 1976. – 620 s.

Fizika-metamatika fakulteti

“Fizika o`qitish metodikasi” kafedrası

"NAZARIY FIZIKA" (ELEKTRODINAMIKA)

fanidan

SEMINAR MATERIALLARI

Nukus 2020

LORENTS ALMASHTIRISHLARI

Oldingi ma’ruzalarda 4-fazodagi hodisa orasidagi interval Δs invariant ekanligini yani interval evklid fazosidagi vektorning moduli kabi bo’lishini ko’rgan edik. Shu bois intervalni 4-fazodagi biror dunyoviy nuqtadan boshqa bir dunyoviy nuqtaga yo’naltirilgan vektorning moduli (“uzunligi”) deb qarash mumkin. Agar

$$x^0 = ct, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z, \quad (L.1)$$

deb belgilash kiritsak intervalning kvadratini quyidagi ko’rinishda yozsak bo’ladi:

$$\Delta s^2 = (\Delta x^0)^2 - (\Delta x^1)^2 - (\Delta x^2)^2 - (\Delta x^3)^2.$$

Ikki nuqta orasidagi masofaning kvadrati evklid fazosida

$$\Delta l^2 = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2$$

formula bilan beriladi yani Δl ikki nuqtalarning radius vektorlarining ayirmasining moduli orqali ifodalanadi. 4-fazoda ham interval Δs ni ikki 4-radius vektorlarning ayirmasining moduli shaklida ifodalash mumkin. Buning uchun x^0, x^1, x^2, x^3 larni dunyoviy nuqtaning vaziyatini tavsiflovchi 4-vektorning mos koordinatalari deb qaraymiz. Bu 4-vektorning modulining kvadrati

$$(x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 \quad (L.2)$$

ga tengdir. Vaziyati (L.1) formula bilan ifodalanadigan va 4-vektorning moduli (L.2) formula bilan aniqlanadigan 4-fazo **pseudoevklid fazo** deyiladi. Pseudoevklid fazoning metrikasi

$$g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (L.3)$$

tenzor bilan aniqlanadi. Pseudoevklid fazoda 4-vektorning kvadratini

$$\sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 = (x^0)^2 - \sum_{i=1}^3 (x^i)^2 = c^2 t^2 - \vec{r}^2 \quad (L.4)$$

yoki

$$\sum_{\mu, \nu=0}^3 x_\nu x^\nu = x_0 x^0 + x_1 x^1 + x_2 x^2 + x_3 x^3 \quad (L.5)$$

shaklida yozamiz. Biror koordinatalar sistemasidan boshqa koordinatalar sistemasiga o’tishda 4-vektorlarning koordinatalari

$$x'^\mu = \sum_{\nu=0}^3 \alpha_\nu^\mu x^\nu \quad (L.6)$$

formulaga binoan almashtiriladi. Agar K va K' koordinatalar sistemasi qilib 1-rasmda ko’rsatilgandek ikki ISS sini olsak, (L.6) formuladagi almashtirish matritsasi

$$\alpha_v^\mu = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{L.7})$$

bilan aniqlanadi. Bu yerda

$$\alpha_0^2 - \alpha_1^2 = 1 \quad (\text{L.8})$$

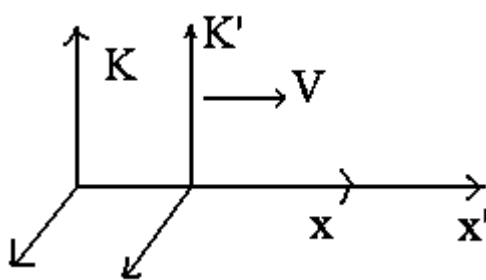
shart bajarilishi kerak. Almashtirish matritsa koeffitsientlari faqat koordinatalar sistemalarining nisbiy tezliklari V_0 ga bog'liq bo'lishi mumkin. Koeffitsientlarni topish maqsadida x^{i1} ning aniq almashtirish formulasini yozamiz

$$x^{i1} = \alpha_1 x^0 + \alpha_0 x^1 \quad \text{yoki} \quad x' = \alpha_1 ct + \alpha_0 x.$$

Agar bu formulani K' sanoq sistemasining sanoq boshi O' nuqta uchun yozsak, $x' = 0$ va $x = Vt$ bo'ladi. U holda $0 = \alpha_1 ct + \alpha_0 Vt$ bo'ladi va undan $\alpha_1 = -(V/c)\alpha_0$ ni topamiz. (L.8) munosabatdan

$$\alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad \text{va} \quad \alpha_1 = -\frac{V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (\text{L.9})$$

larni topamiz. Endi almashtirish matritsasining aniq ko'rinishini yozamiz:



1-rasm. K va K' sanoq sistemalarining o'zaro joylashishi.

$$\alpha_v^\mu = \begin{pmatrix} 1 & -\beta & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{L.10})$$

Bu yerda biz $\beta = V/c$ belgilash kiritdik. Teskari lmashtirish matritsasining elementlari (L.10) dagidan

faqat element suratida β ning ishorasining o'zgarishi bilan farq qiladi.

Topilgan elementlarini α_v^μ ning (L.6) dagi o'rniga qo'yib 4-radius vektor komponentlarining almshtirish formulalarini yozamiz

$$x^{i0} = \frac{x^0 - \beta x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^{i1} = \frac{-\beta x^0 + x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^{i2} = x^2, \quad x^{i3} = x^3. \quad (\text{L.11})$$

Tesakari almashtirish formulalari quyidagicha yoziladi:

$$x^0 = \frac{x^{i0} + \beta x^{i1}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^1 = \frac{\beta x^{i0} + x^{i1}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^2 = x^{i2}, \quad x^3 = x^{i3}. \quad (\text{L.12})$$

Agar odatdagi dekart koordinatalariga o'tsak yuqoridagi formulalar

$$t' = \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (\text{L.13})$$

$$t = \frac{t' + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z'. \quad (\text{L.14})$$

(L.13) va (L.14) formulalari **Lorents almashtirishlari** deb ataladi. Bu almashtirishlar 4-fazoda intervalni invariant qoldiradi. Kichik tezliklarda Lorents almashtirishlari Galiley almashtirishlariga o'tadi. Lorents almashtirishlaridan uzunlik elementining va vaqt intervalining biror ISS dan boshqa ISS ga o'tganda qanday almashtirish formulalarini topish mumkin:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{L.15})$$

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{L.16})$$

bu yerda l va l_0 mos ravishda jismning K va K' sanoq sistemalarida uzunligi, Δt va $\Delta t'$ lar mos ravishda K va K' sanoq sistemalari soatlari bilan o'lchanadigan vaqt intervallari. Shu takidlab o'tamizki, harakat davomida jismning ko'ndalang o'lchamlari o'zgarmaydi, hajmi esa (L.15) ga muvofiq

$$\Omega = \Omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{L.17})$$

o'zgaradi, bu yerda Ω va Ω_0 mos ravishda jismning K va K' sanoq sistemalarida hajmlari.

Endi tezlik komponentlarining almashtirish formulalarini topamiz. (L.13) formulalarni differentsiallaymiz

$$dt' = \frac{dt - (V/c^2)dx}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad dx' = \frac{dx - Vdt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad dy' = dy, \quad dz' = dz.$$

U holda

$$V'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - Vdt}{dt - (V/c^2)dx} = \frac{dx/dt - V}{1 - (V/c^2)dx/dt} = \frac{V_x - V}{1 - V_x V/c^2}.$$

Yani

$$V'_x = \frac{V_x - V}{1 - V_x V/c^2}. \quad (\text{L.18})$$

Tezlikning qolgan ikki komponentlarining ham almashtirish formulalarini aniqlash mumkin. Ular quyidagi ko'rinishga egalar:

$$V'_y = \frac{V_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - V_x V/c^2}, \quad V'_z = \frac{V_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - V_x V/c^2}. \quad (\text{L.19})$$

Teskari almashtirish formulalari quyidagicha yoziladi:

$$V_x = \frac{V'_x + V}{1 + V'_x V/c^2}, \quad V_y = \frac{V'_y \sqrt{1-\beta^2}}{1 + V'_x V/c^2}, \quad V_z = \frac{V'_z \sqrt{1-\beta^2}}{1 + V'_x V/c^2}. \quad (\text{L.20})$$

Harakatlanuvchi jismning tezligi $\vec{V}$ vektori X o'qi bilan θ burchak, $\vec{V}'$ tezlik vektori X' o'qi bilan θ' burchak hosil qilib harakatlansin. Bu burchaklar orasidagi munosabatni topamiz. Koordinata o'qlarini shunday qilib tanlaymizki, bunda jism tezligi $\vec{V}$, $\vec{V}'$ koordinata o'qlari X va Y bir tekislikda yotsin. U holda

$$V_x = V \cos \theta, \quad V_y = V \sin \theta$$

$$V'_x = V' \cos \theta', \quad V'_y = V' \sin \theta'.$$

(L.18) va (L.19) formulalaridan

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{V'_y}{V'_x} = \frac{V_y \sqrt{1-\beta^2}}{V_x - V} = \frac{V \sin \theta \sqrt{1-\beta^2}}{V \cos \theta - V} \quad (\text{L.21})$$

ni topamiz. Bu formula ma'lum $\vec{V}$ va θ lardan, noma'lum θ' ni topishga imkon beradi. Yani $\vec{V}'$ tezlik vektorining X' o'qi bilan hosil qiluvchi θ' burchagini topishga imkon beradi. Xuddi shunga o'xshash formula yordamida berilgan $\vec{V}'$ va θ' dan θ ni topish mumkin:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_y}{V_x} = \frac{V'_y \sqrt{1-\beta^2}}{V'_x + V} = \frac{V' \sin \theta' \sqrt{1-\beta^2}}{V' \cos \theta' + V}. \quad (\text{L.22})$$

4-TEZLIK VA 4-TEZLANISH

Norelyativistik mexanikada fazo intervali dl va vaqt intervali dt lar invariant hisoblanadi. Shu bois 3-radius vektori $d\vec{r}$ komponentlarining dt invariantga bo'linishi natijasida topilgan miqdorlar to'plami 3-tezlikni hosil qiladi. Xuddi shunga o'xshash 3-tezlanish $\vec{w}$ ham 3-tezlik vektroi $\vec{v}$ ning komponentlarining dt ga bo'linishi natijasida topiladi. Lekin oldin ko'rganimizdek 4-fazoda dl va dt miqdorlar alohida invariant bo'lmaydilar, balki ularning kombinatsiyasi bo'lmish va interval deb atalmish

$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2$ miqdor invariant bo'ladi. Intervalning invariant bo'lishi oldin bizga 3-fazodagi radius vektor analogi 4-vektorlarni kiritishga imkon bergan edi. Endi, hozir biz odatdagi tezlik va tezlanish vektorlarining 4-fazodagi analoglari 4-tezlik va 4-tezlanishlarni aniqlashga urinib ko'ramiz. Agar biz

$$\frac{dx''}{dt}$$

nisbatni qarasak, bu miqdor 4-tezlik xossasiga ega emas, chunki dt invariant emas, va

$$\sum \frac{dx^\mu}{dt} \frac{dx_\mu}{dt}$$

Lorents almashtirishlarida o'z qiymatini saqlamaydi. Ammo biz invariant bo'lgan xususiy vaqtni bilamiz: $d\tau = ds/c$. Shu sabab 4-tezlik deb

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = c \frac{dx^\mu}{ds} \quad (\text{U.1})$$

munosabat bilan aniqlanadigan miqdorga aytamiz. Xuddi shunga o'xshash tarzda 4-tezlanish aniqlanadi

$$w^\mu = \frac{du^\mu}{d\tau} = \frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} = c^2 \frac{d^2 x^\mu}{ds^2}. \quad (\text{U.2})$$

dx^μ ning qiymatini va xususiy vaqtning

$$d\tau = dt\sqrt{1-\beta^2} \quad (\text{U.3})$$

ekanligini inobatga olib 4-tezlikning komponentlarini topamiz:

$$u^0 = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad u^k = \frac{v_k}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (k=1,2,3). \quad (\text{U.4})$$

Oxirgi formulani qisqa qilib

$$u^\mu = \left(\frac{c}{\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \quad (\text{U.5})$$

yozish mumkin. (U.3) formuladan

$$\sum_{\mu=0}^3 u^\mu u_\mu = c^2 \quad (\text{U.6})$$

ayniyatni aniqlaymiz. (U.5) formulani xususiy vaqt $d\tau$ bo'yicha differentsiallaymiz

$$\sum_{\mu} \frac{du^\mu}{d\tau} u_\mu + \sum_{\mu} u^\mu \frac{du_\mu}{d\tau} = \sum_{\mu} w^\mu u_\mu + \sum_{\mu} u^\mu w_\mu = 0$$

Oxirgi ikki had o'zaro tengligidan

$$\sum_{\mu} w^\mu u_\mu = 0 \quad (\text{U.7})$$

ni topamiz. Yani 4-tezlik va 4-tezlanish vektorlari o'zaro perpendikulyardir.

RELYATIVISTIK DINAMIKA

Newton tenglamalari Galiley almashtirishlariga nisbatan invariantdir. Ammo Lorents almashtirishlariga nisbatan invariant emas. Shu sabab, yani Einshteinning nisbiylik printsipini qanoatlantirish uchun Newtonning ikkinchi qonuni yanada umumiyroq qonun bilan to'ldirishimiz darkor. Kichik tezliklarda Lorents almashtirishlari Galiley almashtirishlariga o'tishini inobatga olib relyativistik invariant tenglamalarni shunday shart bilan tuzishimiz kerakki, bunda kichik tezliklarda barcha formulalar Newton tenglamalariga o'tsin. Newtonning harakat tenglamasi

$$\frac{d}{dt}(mv_i) = F_i, (i=1,2,3) \quad (\text{K.1})$$

ko'rinishda yoziladi. (K.1) tenglamaning tabiiy umumiyashtirilganini

$$\frac{d}{d\tau}(mu^\mu) = K^\mu, (\mu=0,1,2,3) \quad (\text{K.2})$$

shaklda yozamiz. Bunda m – jismning inert xossalarini tavsiflovchi invariant miqdor (jism massasi), u^μ - jismning 4-tezligi vektorining komponentlari, K^μ - Minkovskiy kuchi deb ataluvchi qandaydir 4-vektor. (U.3) va (U.4) formulalarni inobatga olib Minkovskiy kuchi 4-vektorining koordinatalarini aniqlaymiz

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K^0, \quad (\text{K.3})$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K_i, (i=1,2,3). \quad (\text{K.4})$$

Oxirgi ikki tenglamaning ikkala tomonlarini ham $\sqrt{1-\beta^2}$ ga ko'paytirib

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K^0 \sqrt{1-\beta^2}, \quad (\text{K.5})$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = K_i \sqrt{1-\beta^2}, (i=1,2,3) \quad (\text{K.6})$$

formulalarni qo'lga kiritamiz. Agar Minkovskiy kuchini ifodalovchi 4-vektor K^μ ning fazoviy koordinatalari K_i odatdagi 3-kuch koordinatalari F_i bilan

$$F_i = K_i \sqrt{1-\beta^2} \quad (\text{K.7})$$

munosabat yordamida ifodalanadigan bo'lsa, (K.6) tenglama quyidagi ko'rinishga keltiriladi

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mv_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = F_i, (i=1,2,3). \quad (\text{K.8})$$

Oxirgi formula kichik tezliklarda Newton tenglamasiga o'tadi. Minkovskiy kuchining vaqt koordinatasi K^0 ni aniqlash uchun (K.2) tenglamaning ikkala tomonini ham 4-tezlik u^μ ga ko'paytiramiz. Natijada quyidagini qo'lga kiritamiz

$$K^\mu u_\mu = m \frac{du^\mu}{d\tau} u_\mu = m w^\mu u_\mu \quad (K.9)$$

(bu yerda biz m ning invariantligi inobatga oldik va shu sabab differentsial ishorasidan chiqardik). Olinga natijadan μ bo'yicha yig'indi olamiz va (U.7) formulani inobatga olib topamiz

$$\sum_{\mu=0}^3 K^\mu u_\mu = m \sum_{\mu=0}^3 w^\mu u_\mu = 0. \quad (K.10)$$

(K.10) formulaga (U.4) dan u^μ ning qiymatlarini va (K.7) dan K_i ning qiymatlarini qo'yamiz. U holda

$$K^0 \frac{c}{\sqrt{1-\beta^2}} - \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{v_i}{\sqrt{1-\beta^2}} = 0. \quad (K.11)$$

Oxirgi tenglamadan topamiz

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \sum_{i=1}^3 F_i v_i \quad (K.12)$$

yoki vektor ko'rinishda

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \vec{F} \vec{v}. \quad (K.13)$$

Endi biz Minkovskiy kuchining barcha koordinatalarini bilgan holda yozamiz:

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \vec{F} \vec{v}, \quad K_i = \frac{F_i}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (i=1,2,3), \quad (K.14)$$

yani

$$K^\mu = \left(\frac{\vec{F} \vec{v}}{c\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{\vec{F}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right). \quad (K.15)$$

3-kuch $\vec{F}$ va $\vec{v}$ vektorlarining skalyar ko'paytmasi zarra ustidan birlik vaqt ichida bajarilgan ishni anglatadi. Bu ish zarraning energiyasining birlik vaqt ichida o'zgarishiga ham tengdir yani dE/dt . Shu bois Minkovskiy kuchining vaqt koordinatasini

$$K^0 = \frac{1}{c\sqrt{1-\beta^2}} \frac{dE}{dt}. \quad (K.16)$$

ko'rinishda yozish mumkin yani u zarra energiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishi bilan aniqlanadi.

Demak biz relyativistik zarraning lorent-invariant harakat tenglamasi (K.2) ko'rinishda yozsa bo'lishligini ko'rsatdik. Bu harakat tenglama kichik tezliklarda Newtonning harakat tenglamasiga o'tadi. (K.2) relyativistik harakat tenglamasining vaqt komponentasiga (K.16) ni qo'yamiz

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = \frac{1}{c} \frac{dE}{dt} \quad (\text{K.17})$$

Oxirgi formuladan zarraning relyativistik energiyasi ifodasini topamiz

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + \text{const.} \quad (\text{K.18})$$

RELYATIVISTIK IMPULS VA ENERGIYA

Newton mexanikasida zarraning impulsi (harakat miqdori) deb

$$p_i = mv_i, \quad (i=1,2,3) \quad (\text{R.1})$$

koordinatalarga ega 3-vektorga aytiladi. Zarraning 4-impulsi ham yuqoridagi kabi

$$p^\mu = mu^\mu, \quad (\mu=0,1,2,3) \quad (\text{R.2})$$

formula bilab aniqlanadi. (U.4) formuladan 4-tezlik uchun o'z ifodalarini (R.2) ga qo'yamiz va topamiz

$$p^0 = \frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p^k = \frac{mv_k}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (k=1,2,3). \quad (\text{R.4})$$

Yoki 4-impulsni quyidagicha yozish mumkin

$$p^\mu = \left(\frac{mc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right). \quad (\text{R.5})$$

4-impulsning fazoviy komponentasi uchun

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (\text{R.6})$$

formula ishlariladi. Endi e'tiborimizni 4-impulsning vaqt komponentasiga qaratamiz. Oldingi ma'ruzalarimizda relyativistik zarraning energiyasi formulasi (K.18) ni topgan edik. Ammo integrallash doimiysini aniqlamagan edik. (R.4) dagi p^0 ifodasini va (K.18) ni taqqoslab

$$p^0 = \frac{E}{c} \quad (\text{R.7})$$

ni topamiz. Natijada zarraning 4-impulsini

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right) \quad (\text{R.8})$$

deb yozamiz. Yani relyativistik mexanikada zarraning energiyasi va 3-impulsi zarraning 4-impuls vektorining komponentlari bo'lar ekan. Bu holat zarraning energiyasini va impulsini biror ISS dan boshqa ISS ga o'tishda almashtirish formulalari yordamida topishga imkon beradi. Zarraning 4-impulsi p^μ ning komponentlari ham biror ISS dan boshqa ISS ga o'tishda (L.11) formulalar kabi almashadi. U holda

$$E = \frac{E' + Vp'_x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad p_x = \frac{p'_x + V(E'/c^2)}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad p_y = p'_y, \quad p_z = p'_z. \quad (\text{R.9})$$

Teskari almashtirish formulasi (L.14) dan faqat tezlikning ishorasining teskari ekanligi bilan farq qiladi.

Zarraning 4-impulsining kvadratini topamiz

$$\sum_{\mu=0}^3 p^\mu p_\mu = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2. \quad (\text{R.10})$$

Ammo boshqa tomondan

$$\sum_{\mu=0}^3 p^\mu p_\mu = \sum_{\mu=0}^3 m u^\mu m u_\mu = m^2 \sum_{\mu=0}^3 u^\mu u_\mu = m^2 c^2. \quad (\text{R.11})$$

U holda

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2. \quad (\text{R.12})$$

Demak 4-impulsning kvadrati, boshqa 4-vektorlarning kvadrati kabi, invariantdir. (K.18) formulada $const=0$ deb olsak zarraning energiyasi uchun

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (\text{R.13})$$

ni qo'lga kiritamiz. (R.13) formula bilan aniqlanadigan energiya zarraning to'liq energiyasi deyiladi. bu energiya albatta zarraning tashqi maydondagi potentsial energiyasi inobatga olmaydi. Tinch holda turgan zarraning energiyasi

$$E_0 = mc^2 \quad (\text{R.14})$$

formuladan topiladi. E_0 energiya zarraning **tinchlikdagi energiyasi** deyiladi. Zarralardan tashkil topgan murakkab mexanik sistemaning energiyasi quyidagi qismlardan iboratdir:

- Zarralarning tinchlikdagi energiyalari yig'indisidan;
- Zarralarning kinetik energiyalari yig'indisidan;
- Zarralarning o'zaro ta'sirlashish energiyasidan.

Shu sabab murakkab sistemaning tinchlikdagi energiyasi sistemani tashkil etuvchi zarralarning tinchlikdagi energiyalarining yig'indisidan katta bo'ladi:

$$Mc^2 > \sum_a m_a c^2. \quad (\text{R.15})$$

Bu erda M – sistemaning to'liq massasi va m_a – sistema tarkibiga kiruvchi zarralarning massasi. Oxirgi formuladan jismning massasi uni tashkil etuvchi qismlar massalarining yig'indisiga teng emasligi kelib chiqadi.

Zarraning to'liq energiyasi (R.13) va tinchlik energiyaasi (R.14) larning ayirmasi zarraning kinetik energiyasi beradi

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 \quad (\text{R.16})$$

Kichik tezliklarda oxirgi formula Newton mexanikasidagi kinetik energiya ifodasiga aylanadi

$$T = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) - mc^2 = \frac{1}{2} mv^2. \quad (\text{R.17})$$

(R.12) formulani

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (\text{R.18})$$

shaklda yozsa bo'ladi. Mexanika ma'ruzalarimizda aytib o'tganimizdek impuls va koordinatalar orqali ifodalangan energiya **Gamilton funktsiyasi** deb ataladi. Relyativistik mexanikada erkin zarraning Gamilton funktsiyasi quyidagicha yoziladi

$$H = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \quad (\text{R.19})$$

agar zarra biror kuch maydonida harakatlanayotgan bo'lsa $H = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2} + U$. Bu yerda U zarraning biror kuch maydonidagi potentsial energiyasi.

RELYATIVISTIK ZARRA UCHUN TA'SIR VA LAGRANJ FUNKTSIYA

Erkin zarra uchun ta'sirni topamiz. Klassik mexanikada ta'rifga ko'ra zarraning birinchi nuqtadan ikkinchi nuqtaga o'tishi uchun ta'siri uning Lagranj funktsiyasidan vaqt bo'yicha olingan integrali bilan ifodalanadi

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(x, \dot{x}, t) dt \quad (\text{T.1})$$

va bu ta'sir Galiley almashtirishlariga nisbatan invariantdir. Bu yerda $L(x, \dot{x}, t)$ zarraning Lagranj funktsiyasi, t_1 va t_2 lar mos ravishda zarraning birinchi va ikkinchi holatlarda bo'lgan vaqt momentlari.

Relyativistik mexanikada ta'sir endi Lorents almashtirishlariga nisbatan invariant bo'lishi lozim. Buning uchun esa ta'sir formulasida integral ostida turgan miqdor skalyar bo'lishi va integral ostida birinchi darajali differentsial ostida turishi kerak. Erkin zarra uchun ma'lum bo'lgan birdan bir bunday skalyar faqat interval ds ga proporsional bo'lishi mumkin. Shu bois relyativistik erkin zarra uchun birinchi dunyoviy nuqtadan ikkinchi dunyoviy nuqtaga o'tishdagi ta'sirni

$$S = \int_1^2 \alpha ds \quad (T.2)$$

formula bilan ifodalaymiz, yoki

$$S = \alpha \int_1^2 ds = \alpha c \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - v^2/c^2} dt. \quad (T.3)$$

Bu yerdan ko'rinib turibdiki relyativistik erkin zarraning Lagranj funktsiyasi

$$L = \alpha c \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (T.4)$$

ko'rinishda yoziladi. (T.4) formula bilan ifodalangan relyativistik Lagranj funktsiya kichik tezliklarda klassik mexanikada topilgan erkin zarraning Lagranj funktsiyasiga o'tishi lozim. (T.4) formulada ildiz ostidagi ifodani v/c bo'yicha Teylot qatoriga yoyamiz va birinchi darajali hadlar bilan cheklanamiz. U holda

$$L = \alpha c \sqrt{1 - v^2/c^2} \approx \alpha c - \frac{\alpha v^2}{2c}. \quad (T.5)$$

(T.5) dagi birinchi haq doimiy bo'lib u harakat tenglamasiga ta'sir qilmaydi, shu bois uni tashlab yuborssak ham bo'ladi. Klassik mexanikada erkin zarraning Lagrang funktsiyasi zarraning kinetik energiyasiga teng ekanligini inobatga olib $\alpha = -mc$ ekanligini topamiz. Natija qilib relyativistik mexanikada erkin zarraning Lagranj funktsiyasi uchun

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (T.6)$$

ifodani topamiz. Shun alohida takidlab o'tamizki, relyativistik mexanikada Lagranj funktsiyasini klassik mexanikadagidek kinetik va potentsial energiyalarining ayirmasi shaklida ifodalab bo'lmaydi. Zarraning Lagranj funktsiyasini bilgan holda, biz osongina uning energiyasi va impulsini topishimiz mumkin

$$\vec{p} = \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (T.7)$$

$$E = \vec{p}\vec{v} - L = \frac{mv^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} + mc^2 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (T.8)$$

Endi yana ta'sirga qaytamiz. Zarraning haqiqiy traektoriyasi "eng kam ta'sir printsipi" dan topiladi. Bu printsipga ko'ra haqiqiy tarektoriyada ta'sir eng kichik ekstremal qiymat qabul qiladi. Yani ta'sirning variantsiyasi nolga teng bo'lishi shart, $\delta S = 0$. Ta'sirning variatsiyasi uchun yozamiz

$$\delta S = -mc \delta \int_1^2 ds = -mc \int_1^2 \delta(ds). \quad (T.9)$$

Ta'rifga ko'ra interval quyidagicha ifodalanadi

$$ds = \sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^\mu dx_\mu}. \quad (T.10)$$

U holda (T.10) formuladagi ildiz osti ko'paytmaning variatsiyasini yozamiz

$$\delta\left(\sum_{\mu=0}^3 dx^{\mu} dx_{\mu}\right) = 2\sum_{\mu=0}^3 dx_{\mu} \delta(dx^{\mu}). \quad (\text{T.11})$$

Demak

$$\delta S = -mc \int_1^2 \delta \sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^{\mu} dx_{\mu}} = -mc \int_1^2 \frac{\sum_{\mu=0}^3 dx_{\mu} \delta(dx^{\mu})}{\sqrt{\sum_{\mu=0}^3 dx^{\mu} dx_{\mu}}} = -mc \int_1^2 \frac{\sum_{\mu=0}^3 dx_{\mu} \delta(dx^{\mu})}{ds}. \quad (\text{T.12})$$

$dx_{\mu}/ds = u_{\mu}/c$ va $\delta(dx^{\mu}) = d(\delta x^{\mu})$ ekanligini inobatga olsak (T.12) quyidagi ko'rinishga keladi

$$\delta S = -m \int_1^2 \sum_{\mu} u_{\mu} d(\delta x^{\mu}). \quad (\text{T.13})$$

Oxirgi formuladagi integralni bo'laklab integrallaymiz

$$\delta S = -m \sum_{\mu} u_{\mu} \delta x^{\mu} \Big|_1^2 + m \int_1^2 \sum_{\mu} \delta x^{\mu} \frac{du_{\mu}}{d\tau} d\tau. \quad (\text{T.14})$$

(T.14) dagi ikkinchi hadda biz zarraning 4-tezligining differentsialini zarraning xususiy vaqti bo'yicha hosilasi va shu xususiy vaqt differentsiali ko'paytmasi shaklida yozib oldik. Yani $du^{\mu} = (du^{\mu}/d\tau)d\tau$. Traektoriyaning oxirlarida $\delta x^{\mu} = 0$ bo'ladi. U holda

$$\delta S = m \int_1^2 \sum_{\mu} \delta x^{\mu} \frac{du_{\mu}}{d\tau} d\tau = 0. \quad (\text{T.15})$$

Ixtiyoriy δx^{μ} da (T.15) shart bajarilishi uchun zarraning 4-tezligining xususiy vaqt bo'yicha hosilasi (4-tezlanishi) nolga teng bo'lishi kerak $du^{\mu}/d\tau = 0$. Yani erkin zarraning tezligi saqlanishi lozim.

ENERGIYA-IMPULS TENZORI

Oldingi ma'ruzalarda biz ta'sirni (T.1) formula ko'rinishida yozdik. Agar endi biz harakat tenglamasini 4-fazoda qaramoqchi bo'lsak, ta'sirni ham 4-fazoda mos shaklda yozishimiz kerak bo'ladi. 4-fazoda biz teng huquqli x^0, x^1, x^2, x^3 formal parametrlar bilan ishlashimizga to'g'ri keladi. Bu parametrlar harakat tenglamalarida bir xil turda yoziladi. Shu bois 4-ta'sir uchun biz quyidagi formulani yozamiz

$$S = \frac{1}{c} \int L^*(q_a, \dot{q}_{av}, x^0, x^1, x^2, x^3) dx^0 dx^1 dx^2 dx^3. \quad (\text{E.1})$$

Bu yerda q_a - sistemaning holatini tavsiflovchi parametrlar to'plamidir yani $q_1, q_2, q_3, \dots$, (bunaqa parametrlar sistemaning *erkinlik darajasi* ekanligini esga olamiz), $1/c$ esa qulaylik uchun kiritilgan,

$$\dot{q}_{av} = \frac{\partial q_a}{\partial x^v}, \quad \begin{pmatrix} a = 1, 2, 3, \dots, \\ v = 0, 1, 2, 3 \end{pmatrix}. \quad (\text{E.2})$$

q_a va $\dot{q}_{av}$ miqdorlar x^0, x^1, x^2, x^3 koordinatalar funktsiyasi deb qaraladi. Hatto q_a parametr faqat x^0 ga bog'liq bo'lib qolishi mumkin, u holda biz klassik mexanikadagi $q_a = q_a(t)$ tanish holni kuzatamiz. Aralash hosilalar o'zaro tengligi

$$\frac{\partial^2 \dot{q}_a}{\partial x^v \partial x^\mu} = \frac{\partial^2 \dot{q}_a}{\partial x^\mu \partial x^v} \quad (\text{E.3})$$

dan

$$\frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} = \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^v} \quad (\text{E.4})$$

munosabat bajarilishi lozimligi kelib chiqadi. (T.1) va (E.1) formulalarning o'zaro mutanosibligini topish uchun 4-fazoda 4-hajm $d\Omega^*$ 3-fazodagi 3-hajm $d\Omega$ bilan quyidagi ifoda yordamida bog'lanishini eslaymiz

$$d\Omega^* = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = c dt d\Omega. \quad (\text{E.5})$$

$d\Omega^*$ ning o'rniga (E.5) formulani qo'yamiz va (E.1) ni quyidagicha yozamiz

$$S = \int L^* dt dV = \int_1^2 dt \int L^* dV. \quad (\text{E.6})$$

Bu yerda vaqt bo'yicha integrallash vaqt harakat davom etadigan vaqt intervalida bajariladi, hajm bo'yicha integrallash esa koordinatalar o'zgarishini ifodalovchi intervallarda bajariladi. (T.1) va (E.6) formulalarni taqqoslab

$$L = \int L^* dV \quad (\text{E.7})$$

ni topamiz. Yani L^* bu qaralayotgan sistemaning Lagranj funktsiyasining hajmiy zichligidir. Yopiq mexanik sistemasining Lagranj funktsiyasi L vaqt t ga bevosita bog'liq bo'lmasligi darkor. 4-fazoda vaqt va fazoviy koordinatalar teng huquqli bo'lganligi bois sistemaning Lagranj funktsiyasining zichligi L^* ham x^0, x^1, x^2, x^3 parametrlarga bog'liq bo'lmasligi lozim. Yani

$$S = \frac{1}{c} \int L^*(q_a, \dot{q}_{av}) d\Omega^*. \quad (\text{E.8})$$

Endi relyativistik mexanikada yopiq sistemaning harakat tenglamasini topamiz. Buning uchun (E.8) formula bilan ifodalangan ta'sirning variatsiyasini hisoblaymiz va keyinchalik uni nolga tenglashtiramiz. (E.8) ni variatsiyasi olamiz:

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta \dot{q}_{av} \right) d\Omega^*. \quad (\text{E.9})$$

$\delta y' = (\delta y)'$ ga o'xshash ravishda

$$\delta \dot{q}_{av} = \delta \frac{\partial q_a}{\partial x^v} = \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a \quad (\text{E.10})$$

ni yozsak bo'ladi. (E.9) da (E.10) kabi almashtirish bajarib

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a \right) d\Omega^*. \quad (\text{E.11})$$

Ko'paytmani differentsiallash qoidasiga binoan

$$\sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) = \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a. \quad (\text{E.12})$$

Bu yerdan topamiz

$$\sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial}{\partial x^v} \delta q_a = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a \quad (\text{E.13})$$

va oxirgi formulani (E.11) dagi integral ostidagi ikkinchi hadning o'rniga qo'yamiz

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \delta q_a + \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \delta q_a \right) d\Omega^*. \quad (\text{E.14})$$

(E.14) dagi ikkinchi haq

$$\sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) = \sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) \quad (\text{E.15})$$

v - komponentasi

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a$$

ga teng bo'lgan vektorning 4-divergentsiyasiga teng!

Matematik eslatma.

(Evklid 3-fazoda Ostrogradskiy-Gauss teoremasi ko'ra: biror $\vec{A}$ vektorning divergensiyasining berilgan hajm bo'yicha integrali shu vektorning hajmni o'rab turgan sirt bo'yicha olingan integraliga teng. Yani

$$\int_{\Omega} \text{div} \vec{a} d\Omega = \oint_f \vec{a} d\vec{f}. \quad (\text{E.M.1})$$

Bu teoremaning quyidagicha ham yozish mumkin

$$\int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial a_i}{\partial x_i} d\Omega = \oint_f \sum_{i=1}^3 a_i df_i. \quad (\text{E.M.2})$$

Bu yerda df_i lar sirt elementi vektori $d\vec{f} = \vec{n} df$ ning komponentlari: $df_x = dydz$, $df_y = dxdz$, $df_z = dxdy$ lardir.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasini 4-fazoda ham ishlatish mumkin va uning formulasi quyidagicha bo'ladi:

$$\int \sum_{\Omega^*, \mu=0}^3 \frac{\partial a^\mu}{\partial x^\mu} d\Omega^* = \oint \sum_{f^*, \mu=0}^3 a^\mu df_\mu. \quad (\text{E.M.3})$$

Bu yerda a^μ 4-vektor, $d\Omega^* = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = c dt dx^1 dx^2 dx^3$ 4-fazodagi hajm elementi, df^μ - 4-fazodagi $d\Omega^*$ 4-hajmni o'rab oluvchi gipersirtning 4-vektorining komponentlari. Bu komponentlar quyidagilarga teng:

$$df^0 = dx^1 dx^2 dx^3 = d\Omega, \quad df^1 = dx^0 dx^2 dx^3 = c dt dx^2 dx^3, \quad df^2 = dx^0 dx^1 dx^3 = c dt dx^1 dx^3, \\ df^3 = dx^0 dx^1 dx^2 = c dt dx^1 dx^2.)$$

Endi Ostrogradskiy-Gauss teoremasining 4-fazoda formasidan foydalanamiz. U holda (E.14) formuladagi ikkinchi integralni quyidagicha yozishimiz mumkin

$$\int \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) = \oint \sum_v \left(\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \delta q_a \right) df_\nu. \quad (\text{E.16})$$

Ammo qarayotgan 4-hajm chegarasida $\delta q_a = 0$ bois (E.16) dagi integral nolga teng bo'ladi. Shu sabab (E.15) da faqat ikki had qoladi:

$$\delta S = \frac{1}{c} \int \sum_a \left(\frac{\partial L^*}{\partial q_a} - \sum_v \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \right) \delta q_a d\Omega^*. \quad (\text{E.17})$$

Variatsiyaning va qarayotgan hajmning ixtiyoriy bo'lganligi bois ta'sirning variatsiyasi nolga teng bo'lishi uchun (E.17) formuladagi qavs ichidagi ifoda nolga teng bo'lishi shart. Yani

$$\frac{\partial L^*}{\partial q_a} - \sum_v \frac{\partial}{\partial x^\nu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} = 0. \quad a = 1, 2, 3, \dots, \quad \nu = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.18})$$

Oxirgi tenglama **relyativistik mexanikada harakat tenglamasi** bo'lib hisoblanadi (klassik mexanikadagi Eyler-Lagrang tenglamasining 4-fazoga umumiyashtirilganligi).

Endi (E.18) tenglamaning ikkala tomonini ham $\dot{q}_{a\mu}$ ga ko'paytiramiz va a bo'yicha yig'indi olamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \dot{q}_{a\mu} = \sum_{a,v} \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \quad (\text{E.19})$$

(E.19) formulaning o'ng tomonini

$$f \frac{\partial g}{\partial x^\nu} = \frac{\partial(fg)}{\partial x^\nu} - g \frac{\partial f}{\partial x^\nu} \quad (\text{E.20})$$

formula yordamida shakl almashtiramiz va quyidagi munosabatni qo'lga kiritamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \dot{q}_{a\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) - \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^\nu}. \quad (\text{E.21})$$

(E.21) ifodaning chap tomonida va o'ng tomonidagi ikkinchi hadda, mos ravishda,

$$\dot{q}_{av} = \frac{\partial q_a}{\partial x^v} \text{ va } \frac{\partial \dot{q}_{a\mu}}{\partial x^v} = \frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} \quad (\text{E.22})$$

kabi almashtirishlarni amalga oshiramiz. Natijada quyidagi formulani topamiz

$$\sum_a \frac{\partial L^*}{\partial q_a} \frac{\partial q_a}{\partial x^\mu} + \sum_{a,v} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \frac{\partial \dot{q}_{av}}{\partial x^\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right). \quad (\text{E.23})$$

Topilgan munosabatning chap tomoni

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu}$$

ga teng. Shu sabab (E.23) formulani

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu} = \sum_{a,v} \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \quad (\text{E.24})$$

ko'rinishda yozsak bo'ladi. Oxirgi formulaning chap tomonini

$$\frac{\partial L^*}{\partial x^\mu} = \sum_v \delta_\mu^v \frac{\partial L^*}{\partial x^v} = \sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} (\delta_\mu^v L^*) \quad (\text{E.25})$$

deb yozib (E.24) formulani

$$\sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} (\delta_\mu^v L^*) = \sum_v \frac{\partial}{\partial x^v} \left(\sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} \right) \quad (\text{E.26})$$

shaklga keltiramiz. Yoki

$$\sum_{v=0}^3 \frac{\partial}{\partial x^v} \left[\sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} - \delta_\mu^v L^* \right] = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.27})$$

(E.27) ifoda to'rtta formuladan iborat bo'lib tenglamalar sistemasini tashkil etadi. Kvadrat qavs ichida turgan ifoda rangi ikkiga teng bo'lgan 4-tenzorning aralash komponentlari xossalriga ega. Shu bois uni $\tilde{T}_\mu^v$ deb belgilaymiz:

$$\tilde{T}_\mu^v = \sum_a \dot{q}_{a\mu} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{av}} - \delta_\mu^v L^*. \quad (\text{E.28})$$

Bu belgilashdan keyin (E.27) tenglamamiz

$$\sum_{v=0}^3 \frac{\partial \tilde{T}_\mu^v}{\partial x^v} = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.29})$$

(E.29) ta'sirning variatsiyasi nolga tenglashtirilishi natijasida keltirilib chiqarildi va shu sabab u relyativistik mexanikada **harakat tenglamasi** bo'lib topiladi. Tenglamaning ma'nosi quyidagicha: $\tilde{T}_\mu^v$ tenzorning 4-divergentsiyasi nolga teng! Endi bu tenzor qanday fizik ma'noga ega ekanligi o'rganamiz. Shuni takidlab o'tishimiz kerakki, (E.29) tenglamani qanoatlantiruvchi rangi ikkiga teng bo'lgan 4-tenzor etarli darajada aniqlanmagan. Rostdan ham (E.28) dan farq qiluvchi ixtiyoriy

$$T_{\mu}^{\nu} = \tilde{T}_{\mu}^{\nu} + \sum_{\rho} \frac{\partial Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\rho}} \quad (\text{E.30})$$

4-tenzorni qaraylik. Bu yerda $Q_{\mu}^{\nu\rho}$ - ν va ρ indekslariga nisbatan antisimmetrik bo'lgan ixtiyoriy 4-tenzor: $Q_{\mu}^{\nu\rho} = -Q_{\mu}^{\rho\nu}$. T_{μ}^{ν} tenzor ham (E.29) tenglamani qanoatlantiradi. Buni osongina tekshirish mumkin. Buning uchun (E.30) ni (E.29) ga qo'yamiz. Birinchi had (E.29) ning o'zi bo'ladi. Ikkinchi hadni qaraymiz

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} \sum_{\rho} \frac{\partial Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\rho}} = \sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\nu} \partial x^{\rho}} = 0.$$

Bu had nolga teng, chunki $\sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\nu\rho}}{\partial x^{\nu} \partial x^{\rho}} = -\sum_{\nu, \rho} \frac{\partial^2 Q_{\mu}^{\rho\nu}}{\partial x^{\rho} \partial x^{\nu}}$ (tenzorning antisimmetrik xossaga ega ekanligi inobatga olinadi). Shu sabab T_{μ}^{ν} tenzorning (E.30) ko'rinishda tanlanishi harakat tenglamasiga ta'sir qilmaydi. Yani

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T_{\mu}^{\nu}}{\partial x^{\nu}} = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (\text{E.31})$$

Biz $Q_{\mu}^{\nu\rho}$ tenzorni ixtiyoriy ravishda tanlab olishimiz mumkin (bunda u faqat kerakli indekslarga nisbatan antisimmetrik bo'lsa bas). Endi biz shunday talab qo'yamiz, bunda T_{μ}^{ν} tenzor simmetrik bo'lsin. Bundan buyog'iga bu talab bajarilgan deb hisoblaymiz: $T^{\nu\mu} = T^{\mu\nu}$. Shu bilan birga $T_{\mu}^{\mu} = \tilde{T}_{\mu}^{\mu}$ munosabat ham o'rinli bo'ladi, chunki $Q_{\mu}^{\nu\nu} = 0$. Agar $\mu = 0$ bo'lsa, (E.31) formuladagi T_{μ}^{ν} 4-tenzorda μ indeksining yuqoriga ko'tarilishi tenglamani o'zgarishsiz qoldiradi, va aksincha $\mu = 1, 2, 3$ bo'lsa, tenglama ishorasini o'zgartiradi. Buning natijasida

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^{\nu}} = 0, \quad \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (\text{E.32})$$

ni qo'lga kiritamiz. Relyativistik mexanikada $T^{\mu\nu}$ 4-tenzor sistemaning **energiya-impuls tenzori** deb ataladi.

Teorema. *Agar simmetrik 4-tenzor $T^{\mu\nu}$ (E.32) munosabatni qanoatlantirsa va bu tenzorning barcha elementlari cheksizlikda nolga intilsa*

$$p^{\mu} = \alpha \int \sum_{\nu} T^{\mu\nu} df_{\nu} \quad (\text{E.33})$$

formula bilan aniqlanadigan 4-vektor saqlanadi yani vaqt o'tishi bilan o'z qiymatini o'zgartirmaydi (harakat integrali bo'ladi).

Bu yerda α ixtiyoriy doimiy, df_{ν} gipersirt elementi 4-vektorining komponentlari. (E.33) da integrallash ixtiyoriy gipersirt (uch o'lchamli fazoni ham qamrab oluvchi) bo'yicha olinadi. Agar integrallash bajarilishi darkor gipersirt deb $x^0 = \text{const}$ gipertekislik tanlansa, u holda $df_0 = d\Omega$ dan tashqari barcha df_{ν} lar nol bo'ladi va (E.33) quyidagicha yoziladi:

$$p^{\mu} = \alpha \int T^{\mu 0} df_0 = \alpha \int T^{\mu 0} d\Omega. \quad (\text{E.34})$$

Yopiq sistenaning to'liq energiyasi va to'liq impuls saqlanadi. Relyativistik mexanikada energiya va impuls bitta energiya-impuls 4-vektorining komponentlari sifatida harakat tenglamalarida ishtirok etadi. Demak to'liq energiya-impuls 4-vektori ham saqlanishi darkor. Shu bois (E.33) va (E.34) formulalar bilan aniqlanadigan 4-vektorni sistemaning 4-impulsi deb qarashimiz mumkin. Proportsionallik doimiysi α ni (E.33) va (E.34) formulalar bilan aniqlangan 4-impuls (R.8) formulada ifodalangan 4-impuls bilan o'zaro teng bo'lishi shartidan topamiz. (R.8) formulaga binoan $p^0 = E/c$. (E.34) da $\mu = 0$ hadni qaraymiz

$$p^0 = \alpha \int T^{00} d\Omega = E/c. \quad (E.35)$$

(E.28) formuladan va energiya-impuls tenzorining simmetrikligi $T^{\nu\mu} = T^{\mu\nu}$ dan foydalanib quyidagilarni yozsa bo'ladi

$$T^{00} = T_0^0 = \tilde{T}_0^0 = \sum_a \dot{q}_{a0} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_{a0}} - \delta_0^0 L^* = \sum_a \dot{q}_a \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_a} - L^*, \quad (E.36)$$

bu yerda $\dot{q}_a = \partial q_a / \partial t$ va (E.36) ni yozishda $\dot{q}_{a0} = \partial q_a / \partial x^0 = \partial q_a / \partial (ct) = (1/c) \partial q_a / \partial t = (1/c) \dot{q}_a$ ekanligi hisobga olingan. U holda (E.7) ni inobatga olib

$$\int T^{00} d\Omega = \sum_a \dot{q}_a \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} - L \quad (E.37)$$

ni topamiz. (E.37) formulaning o'ng tomonida turgan ifoda bu sistemaning energiyasidir. Shu sabab

$$\int T^{00} d\Omega = E \quad (E.38)$$

va T^{00} ni biz energiyaning hajmiy zichligi deb qabul qilamiz

$$T^{00} = w. \quad (E.39)$$

(E.38) ifodani (E.35) formulaga qo'yib $\alpha = 1/c$ ekanligi topamiz. Demak

$$p^\mu = \frac{1}{c} \int \sum_\nu T^{\mu\nu} df_\nu. \quad (E.40)$$

(E.40) formulada integrallash gipersirt bo'yicha olinadi (bu gipersirtga 3-fazo ham kiradi).

$$p^\mu = \frac{1}{c} \int T^{\mu 0} df_0 = \frac{1}{c} \int T^{\mu 0} d\Omega. \quad (E.41)$$

(E.41) formulada integrallash faqat 3-fazoda bajariladi ($x^0 = \text{const}$).

Energiya-impuls 4-tenzorining $T^{0\nu}$ elementlarining fizik ma'nosini aniqlash maqsadida (E.32) tenglamani $\mu = 0$ uchun yozamiz

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{0\nu}}{\partial x^\nu} = \frac{\partial T^{00}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k} = 0 \quad (E.42)$$

yoki

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial T^{00}}{\partial t} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k}. \quad (\text{E.43})$$

Oxirgi tenglamaning ikkala tomonini c ga ko'paytirib biror Ω hajm bo'yicha integral olamiz

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} T^{00} d\Omega = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^3 c \frac{\partial T^{0k}}{\partial x^k} d\Omega. \quad (\text{E.44})$$

(E.44) formulaning chap tomonidagi integral Ω hajmda mujassamlashgan energiyaga teng. O'ng tomonidagi integral belgisi ostida esa biror $\vec{S}$ vektorning odatdagi 3-divergentsiya turibdi. Bu $\vec{S}$ vektor quyidagi komponentlarga ega

$$S_x = cT^{01}, S_y = cT^{02}, S_z = cT^{03}. \quad (\text{E.45})$$

Shu sababli (E.44) ni quyidagicha yozish mumkin

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \int_{\Omega} \nabla \vec{S} d\Omega. \quad (\text{E.46})$$

Biror Ω hajm ichidagi energiyaning vaqt o'tishi bilan o'zgarishi (hosilasi) shu hajm sirtidan energiyaning oqimiga teng bo'lishi lozim. U holda $\vec{S}$ vektor - energiya oqimining hajmiy zichligi vektori ekan va (E.45) ga binoan energiya-impuls tenzorining elementlari energiya oqimining hajmiy zichligi vektori komponentlari bilan

$$T^{01} = \frac{1}{c} S_x, T^{02} = \frac{1}{c} S_y, T^{03} = \frac{1}{c} S_z. \quad (\text{E.47})$$

formular yoedamida ifodalanar ekan. $T^{\mu\nu}$ tenzori simmetrik $T^{0k} = T^{k0}$ bo'lganligi bois

$$T^{10} = \frac{1}{c} S_x, T^{20} = \frac{1}{c} S_y, T^{30} = \frac{1}{c} S_z. \quad (\text{E.48})$$

Endi 4-impuls vektorining fazoviy koordinatalariga e'tiborimizni qaratamiz

$$p^k = \frac{1}{c} \int T^{k0} d\Omega. \quad (\text{E.49})$$

Oxirgi formulani

$$p^k = \int \frac{T^{k0}}{c} d\Omega = \int g^k d\Omega \quad (\text{E.50})$$

deb yozamiz. Bu yerdan koordinatalari T^{k0}/c bo'lgan vektor impuls zichligini ifodalar ekan

$$\vec{g} = \frac{T^{10}}{c} \vec{i} + \frac{T^{20}}{c} \vec{j} + \frac{T^{30}}{c} \vec{k} \text{ yoki, } g_x = \frac{1}{c} T^{10}, g_y = \frac{1}{c} T^{20}, g_z = \frac{1}{c} T^{30}. \quad (\text{E.51})$$

$$\vec{p} = \int \vec{g} d\Omega. \quad (\text{E.52})$$

(E.51) va (E.48) formulalarni taqqoslab impuls zichligi vektori va energiya oqimi zichligi vektori komponentlari orasidagi o'zaro bog'lanishni topamiz

$$g_k = \frac{1}{c^2} S_k, \quad k=1,2,3 \quad (\text{E.53})$$

yoki vektor ko'rinishda

$$\vec{g} = \frac{d\vec{p}}{d\Omega} = \frac{1}{c^2} \vec{S}. \quad (\text{E.54})$$

Natija qilib quyidagilarni aytish mumkin: sistemaning energiyasi oqimi va impulsi orasida o'zaro bog'lanish mavjud. Yani impuls zichligi energiya oqimi zichligining yorug'lik tezligi kvadratida bo'linganiga teng.

Endi energiya-impuls tenzorining T^{ik} elementlarini topamiz. Buning uchun (E.32) ni $\mu = i$ qiymat uchun yozamiz

$$\sum_{\nu=0}^3 \frac{\partial T^{i\nu}}{\partial x^\nu} = \frac{\partial T^{i0}}{\partial x^0} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} = 0 \quad (\text{E.55})$$

Oxirgi formulani $x^0 = ct$ va $T^{i0} = cg_i$ ekanligini inobarga olib

$$-\frac{\partial g_i}{\partial t} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} \quad (\text{E.56})$$

deb yozamiz. Hosil bo'lgan ifodaning ikkala tomonidan ham biror hajm Ω bo'yicha integral olamiz va (E.52) dan foydalaniz

$$-\frac{\partial}{\partial t} p_i = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} d\Omega \quad (\text{E.57})$$

ni qo'lga kiritamiz. (E.57) formulaning o'ng tomonidagi integralni Ostrogradskiy-Gauss teoremasi yordamida o'zgaritamiz

$$-\frac{\partial}{\partial t} p_i = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T^{ik}}{\partial x^k} d\Omega = \oint_{\vec{f}} \sum_{k=1}^3 T^{ik} df_k = -\oint_{\vec{f}} \vec{\sigma}_i d\vec{f}. \quad (\text{E.58})$$

Bu yerda $\vec{\sigma}_i$ ($i=1,2,3$) – vektor quyidagi koordinatalari bilan aniqlanadi

$$\sigma_{ik} = T^{ik} \quad (\text{E.59})$$

yoki

$$\vec{\sigma}_i = T^{i1}\vec{i} + T^{i2}\vec{j} + T^{i3}\vec{k}. \quad (\text{E.60})$$

(E.58) formulaning chap tomonida Ω hajmda joylashgan sistemaning impulsining i - komponentasining kamayish tezligi turibdi. U holda formulaning o'ng tomoni Ω hajmni o'rab olgan f sirt orqali impulsning i - komponentasining oqimini ifodalaydi, $\vec{\sigma}_i$ esa p_i impuls oqimi ma'nosini kasb etadi. (E.59) formuladagi σ_{ik} - p_i impuls komponentining oqim zichligi vektorining k - komponentasidir. Demak, σ_{ik} 3-tenzor bo'lib, impuls oqimi zichligini tavsiflaydi. Bu yerda skalyar miqdorlarning (xususan energiya, zaryad,... b.) oqimi zichligi vektor bo'lishini va vektor miqdorlarning (xususan impuls, ... b.) oqimi zichligi tenzor bo'lishini eslatib o'qtish joiz. Birlik vaqt davomida biror sirtning birlik yuzasi orqali o'tuvchi impuls bu shu yuzaga ta'sir etuvchi kuchdir.

Yani qaralayotgan sirt atrofida kuchlanishni tavsiflaydi. Shu sabab σ_{ik} tenzor **kuchlanish tenzori** deb ataladi. Nihoyat biz energiya-impuls tenzorining barcha elementlarini aniqlab bo'ldik. (E.39), (E.47), (E.48) va (E.59) larni inobatga olib energiya-impuls tenzorining umumiy ko'rinishini yozamiz

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} w & S_x/c & S_y/c & S_z/c \\ S_x/c & \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ S_y/c & \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ S_z/c & \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (\text{E.61})$$

Energiya-impuls 4-tenzorining elementlari energiya va impulslarning hajmiy zichliklari, bu zichliklarning oqimi zichliklari bilan bog'liq ekan. Shu sabab ham uning nomi energiya-impuls tenzori deb qo'yilgan.

MAXSUS NISBIYLIK NAZARIYASI ELEMENTLARI

I. GALILEY NISBIYLIK PRINTSIPI

Zarra harakatini bir biriga nisbatan $\vec{V}$ tezlik bilan harakatlanuvchi ikki K va K' sanoq sistemalarida ko'rib chiqamiz (Fig.1). Koordinatalar sistema o'qlarini suratda tasvirlangandek qilib olamiz. Harakat va vaqt hisobi boshlanishidan oldin sanoq sistemalar boshi O va O' ustma ust tushgan bo'lsin. Newton mexanikasida vaqt barcha inertsional sanoq sistema (ISS) larda bir xil kechadi va teng : $t = t'$. Shu sabab Galiley nisbiylik printsiptini ifodalovchi formulalar

$$\begin{aligned} x &= x' + Vt \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \quad (1)$$

shaklida yoziladi. Bu formulalar birinchi koordinatalar sistemasidan ikkinchisiga o'tishga imkon beradi. (1) formulalar Galiley almashtirishlari deb ham ataladi. (1) formuladagi birinchi tenglamadan vaqt bo'yicha hosila olib

$$v_x = v'_x + V \quad (2)$$

formulani topamiz. Umumiy holda (2) formulani

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad (3)$$

deb yozish va uni biror sanoq sistema (SS) sidan boshqa SS ga otishda tezliklarning almashtirilishi formulasi deb qarash mumkin. Uni quyidagicha talaffuz etish kerak: zarraning K SS dagi tezligi $\vec{v}$ zarraning K' SS dagi tezligi $\vec{v}'$ va SS larning nisbiy harakati tezligi $\vec{V}$ lar yig'indisidan iborat. (3) formuladan ham hosila olib

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (4)$$

ni topamiz. Demak, moddiy nuqtaning tezlanishi ikkala SS sida ham bir xil ekan. Shu sababli ham K va K' SS larida moddiy nuqtaga ta'sir etuvchi kuchlar ham teng bo'ladi: $\vec{F} = \vec{F}'$. Natijada, ikkala SS sida moddiy nuqta massasi teng dega xulosa kelib chiqadi. Agar $m\vec{a} = \vec{F}$ tenglik K SS sida bajarilsa, $m\vec{a}' = \vec{F}'$ tenglik K' SS sida ham bajarilishi kelib chiqadi. Yani K va K' SS lar ekvivalentdir. Xulosa: *Mexanika qonunlari barcha ISS larida bir xilda talaffuz etiladi va bajariladi.* Yuqoridagi xulosa *Galileyning nisbiylik printsipti* (GNP) deb ataladi. Barch SS larda bir xil qiymatga ega bo'lgan kattalik *invariant* deyiladi (lotin tilida "invariantis" "o'zgarmas" ma'noni

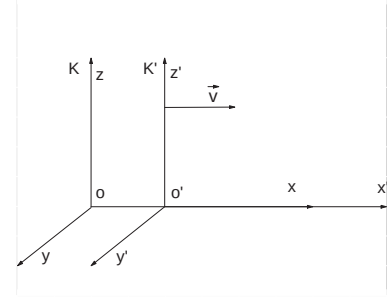


FIG. 1: K' ISS si K ISS siga nisbatan doimiy v_x tezlik bilan harakatlanmoqda. x va x' o'qlar ustma ust tushadi, z va z' , y va y' o'qlar parallel. $t = t' = 0$ s da sanoq boshlari O va O' ustma ust tushishadi.

anglatadi). GNP Newton mexanikasining oqibatidir. Newton mexanikasida fazo va vaqt absolyut deb qaraladi. Newton mexanikasida invariantlarga jism massasini va elektr zaryad miqdorini misol etib keltirish mumkin. Agar moddiy nuqta harakatini ifodalovchi tenglama qaralayotgan SS dan boshqa SS ga biror almashtirish yordamida o'tilishda o'z ko'rinishi o'zgartirmasa, bunday tenglama ushbu almashtirilish amaliga nisbatan invariant deb ataladi. Bunda, harakat tenglamasida qatnashuvchi miqdorlar alohida o'zgarishi mumkin, ammo ularni bog'lovchi munosabat o'zgarmaydi. Misol uchun jism ustidan bajarilgan ish va uning kinetik energiyasining orttirmasi har xil ISS larda har xil qiymat qabul qilishiga qaramay, ular orasidagi munosabat $\Delta E_k = A$ barcha ISS larda bir xil. Invariant tushunchasi yordamida GNP quyidagicha talaffuz etish mumkin: *mexanika tenglamalari Galiley almashtirishiga nisbatan invariantdir.*

II. MAXSUS NISBIYLIK NAZARIYASI POSTULATLARI

1905 yili A.Einshtein "Ann.der Physik" nomli olmon ilmiy jurnalida "Harakatlanuvchi jismlar elektrodinamikasi haqida" nomli maqola chop etti. Bu maqolada gravitatsion ta'sirlashuv juda zaif bo'lgan hollarda fazo va vaqtning xususiyatlari yangi ta'limotlar asosida qaytadan ko'rib chiqilgan edi. Ta'limotning negizini ikki postulat tashkil etdi. Birinchi postulat *Einshteinning nisbiylik printsipti* (ENP) bo'lsa, ikkinchisi bu *yorug'lik tezligining doimiyligi printsiptidir.*

1. *Nisbiylik printsipti.* Tabiat qonunlari barcha ISS lar uchun bir xilda talaffuz etiladi.
2. *Yorug'lik tezligi doimiyligi printsipti.* Yorug'lik tezligi manba tezligiga bo'g'liq emas va barcha ISS

larida bir qiymatga ega.

Birinchi postulat bilan Einstein Galileyning mexnikaga oid nisbiylik printsiplarini hamma fizikaviy hodisalarga kengaytirdi. Shu bilan birga u Galiley almashtirish formulalari (1) faqat kichik tezliklar sohasida qoniqarli ishlashi, u Lorents almashtirish formulalarining xususiy holi ekanligini va katta tezliklarda Lorents almashtirish formulalari ishlatilishi kerakligini ko'rsatib berdi. Natijada ENP ni quyidagicha talaffuz etish mumkin: *tabiat hodisalarini ifodalovchi tenglamalar Lorents almashtirishiga nisbatan invariantdir*. Einsteinning ikkinchi postulatinining to'g'riligi amerikalik fizik A.A.Maykelson (1852-1931) ning 1887 yili Morli bilan birga o'tkazgan tajribasida o'z tasdig'ini topdi. Maykelson tajribasida yorug'likning Yerning orbital harakati yo'nalishi bo'yicha va unga perpendikulyar yo'nalishda teng yo'llar bosib o'tishga ketgan vaqtlarining farqi o'lchandi. Agar yorug'lik tezligi Yerning orbital tezligiga bog'liq bo'lganda o'lchanayotgan vaqtlar har xil bo'lardi. Ammo, tajriba bu vaqtlar teng ekanligini va shu orqali yorug'lik tezligining manba tezligiga bog'liq emasligini isbotladi. Yorug'lik tezligi barcha ISS larda bir xil qiymatga ega yani invariant kattalikdir. Bundan tashqari yorug'lik tezligi tabiatdagi eng katta cheklangan tezlik bo'lib ham topiladi. Jismlar orasidagi hech qanday ta'sirlashuv yorug'lik tezligi c dan katta tezlik bilan tarqalishi mumkin emas! Cheklangan tezlikning mavjudligi Newton mexanikasida absolyut deb hisoblangan "bir vaqtda" tushunchasi aslida nisbiy ekanligiga olib keladi. Buni oson tushunib olish uchun quyidagi misolni ko'rib chiqamiz. Tekis harakatlanayotgan vagon o'rtasida yorug'lik signali tarqalsin (Fig.2).

Barcha ISS larida yorug'lik c tezlik bilan tarqaladi. shu sababli vagon ichidagi kuzatuvchi yorug'lik signalining vagon boshi (2- nuqta) va oxiriga (1- nuqta) teng vaqtlarda etib borganligini qayd qiladi. Ammo platformada turgan kuzatuvchi yorug'lik signalining vagon oxiriga (1- nuqta) bosiga (2- nuqta) nisbatan ertaroq kelganini qayd etadi. Ko'rib turganimizdek har xil SS sistemalarida "bir vaqtda" tushunchasi har xil. Cheklangan tezlikning mavjudligi fazo va vaqtning Newton mexanikasidek absolyutligiga, ularning bir biridan mustaqil bo'lishiga chek qo'yib, ular o'zaro bog'liq va bir butun to'rt o'lchamli fazo-vaqt hosil qilishini ko'rsatadi. Einsteinning postulatlarini negiziga yaratilgan mexanika *katta tezliklar mexanikasi* yoki *relyativistik mexanika* deb ataladi. Relyativistik mexanika kichik tezliklarda Newton mexanikasiga o'tadi. Ixtiyoriy "nuqtaviy" hodisa (elementar zarraning parchalanishi yoki biror zarraning ma'lum vaqtda biror joyda bo'lishi) to'rt miqdor bilan tavsiflanadi: uchta koordinata x, y, z hodisaning qayerda sodir bo'lganligini ko'rsatsa, vaqt t qachon sodir bo'lganligini ko'rsatadi. Bu kattaliklarning qiymatlari biz kuzatayotgan SS ga bog'liq. Fazo-vaqtda o'qlari x, y, z va ct bo'lgan dekart koordinatalar sistemasini kiritamiz. Bu yerda qulaylik uchun vaqt t o'rniga o'lcham birligi uzunlik birligiga to'g'ri keluvchi ct kattalikni o'q etib oldik. U holda ixtiyoriy hodisani bu fazo-vaqtda *dunyoviy nuqta*

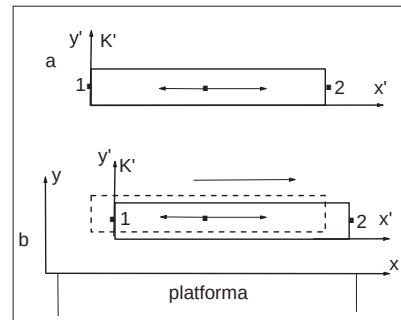


FIG. 2: a - vagonidagi kuzatuvchi (K' SS sida) ga nisbatan 1- va 2- nuqtalar tinch turibdi, shu sababli yorug'lik signali bu nuqtalarga teng vaqtda etib boradi. b - platformadagi kuzatuvchi (K SS sida) 1- nuqta yorug'lik signaliga qarshi tomon harakatlanmoqda, 2- nuqta esa yorug'lik signaliga tomon harakatlanmoqda. Natijada signal 1- nuqtaga ertaroq, 2- nuqtaga kechroq keladi.

deb ataluvchi nuqta bilan tasvirlashimiz mumkin. Vaqt o'tishi bilan dunyoviy nuqta fazo-vaqtda o'z vaziyatini o'zgartiradi va *dunyoviy chiziqli* deb ataluvchi traektoriya chizadi. Hatto oddiy fazoda moddiy nuqta harakatlanmagan taqdirda ham uning dunyoviy nuqtasi ct o'qiga parallel to'g'ri chiziqli bo'yicha ko'chadi. Biror ISS sidan boshqa ISS siga o'tganda x, y, z, ct o'qlar mos ravishda x', y', z', ct' larga o'tadi. Bunday o'tishda koordinatalar va vaqt qanday o'zgarishini ko'rib chiqamiz.

III. LORENTS ALMASHTIRISH FORMULALARI

Fig.3 da ko'rsatilgandek K va K' SS lari bo'lsin. Biror hodisa sodir bo'lsin va u K SS sida x, y, z, t , K' SS sida x', y', z', t' lar bilan tafsivlansin. Bu ikkala SS laridagi koordinatalar va vaqtlar orasidagi o'zaro bog'lanish formulalarini qidiramiz. Fazo va vaqtning bir jinsligidan qidirilayotgan formulalar chiziqli bo'lishi kelib chiqadi. Fig.3 da ko'rsatilgandek $y' = 0$ tekislik $y = 0$ tekislik bilan, $z' = 0$ tekislik esa $z = 0$ tekislik bilan ustma ust tushadi. Bundan y va y' bir vaqtning o'zida, boshqa koordinatalarga bog'liq bo'lmasdan, nolgacha teng bo'lishi kerak degan xulosa kelib chiqadi. Bu faqat $y = \alpha y'$ shart bajarilganda bo'lishi mumkin. Qaralayotgan SS lar teng huquqli ekanligidan oxirgi formulani $y' = \alpha y$ deb ham yozishimiz mumkin. Bu yerdan $\alpha = \pm 1$ ni topamiz. Bir tomonga yo'nalgan o'qlar uchun $\alpha = +1$ ni olamiz. U holda $y = y'$ yoki $y' = y$. Xuddi shunday tarzda $z = z'$ yoki $z' = z$ ni topsa ham bo'ladi. Ko'rib turganimizdek y va z lar x' va t' larga bog'liq emas. Shu sababli x' va t'

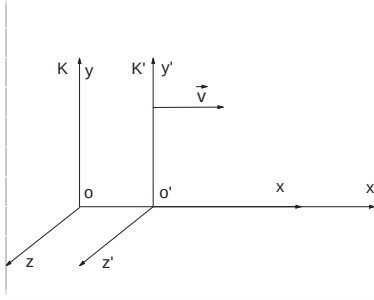


FIG. 3: K' SS si K SS siga nisbatan doimiy $\vec{V}$ tezlik bilan harakatlanmoqda. x va x' o'qlar ustma ust tushadi, z va z' , y va y' o'qlar parallel. $t = t' = 0$ s da sanoq boshlari O va O' ustma ust tushishadi.

lar ham y va z larga bog'liq bo'lmaydi. O'z navbatida x va t lar y' va z' larga bog'liq emas. Qarabsizki, x va t lar faqat x' va t' larning chiziqli funktsiyasi bo'lishi mumkin:

$$x = \gamma(x' + Vt'). \quad (5)$$

SS larning teng huquqligi bois

$$x' = \gamma(x - Vt). \quad (6)$$

deb yozishimiz mumkin.

Endi $c = \text{const}$ printsipidan foydalanamiz. $t_0 = t'_0 = 0$ s yani O va O' nuqtalar ustma ust turganda sanoq boshlaridan bir vaqtda yorug'lik signali tarqatilsin va biror vaqt o'tgandan keyin yorug'lik ekranga tushsin. Yorug'likning ekranga tushish hodisasi K SS sida x, t va K' SS sida x', t' miqdorlar bilan ifodalanadi. Shu bilan birga K va K' SS larida, mos ravishda

$$x = ct \quad (7)$$

$$x' = ct' \quad (8)$$

munosabatlar bajariladi. (7)-(8) formulalarni (5) va (6) formulalarga qo'yib

$$ct = \gamma(ct' + Vt') = \gamma(c + V)t'$$

$$ct' = \gamma(ct - Vt) = \gamma(c - V)t$$

ni topamiz. Bu tenglamarni o'zaro ko'paytirib va tt' ga qisqartirib

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (9)$$

ni qo'lga kiritamiz. Bu yerda $\beta = v/c$. Topilgan natijalarni (5) va (6) formulalarga qo'yib koordinatalar almashtirilishi formulasini topamiz:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (10)$$

Endi vaqt almashtirilishi formulasini aniqlaymiz. Buning uchun 1) (10) tenglamadan x ni yo'qatamiz va hosil bo'lgan tenglamadan t ni topamiz; 2) (10) tenglamadan x' ni yo'qatamiz va hosil bo'lgan tenglamadan t' ni topamiz:

$$t = \frac{t' + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, t' = \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (11)$$

Topilgan barcha natijalar quyidagilar:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, y = y', z = z', t = \frac{t' + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (12)$$

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, y' = y, z' = z, t' = \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (13)$$

Bu formulalar *Lorents almashtirish formulalari* deb ataladi. Lorents almashtirish formulalari yordamida K SS sidan K' SS siga o'tiladi va aksincha. Lorents almashtirish formulalarida fazo va vaqt kattaliklari o'zaro aralashib ketgan. K SS sidagi t vaqt K' SS sidagi faqat vaqt t' bilangina emas, balki x' koordinata bilan ham aniqlanadi. $c \rightarrow \infty$ holda Lorents almashtirish formulalari Galiley almashtirish formulalariga o'tadi. Taqribiy qilib Galiley almashtirish formulalari juda kichik tezliklar $v \ll c$ uchun o'rinli va yaxshi bajariladi desa bo'ladi. $V > c$ bo'lgan holda x, x', t, t' miqdorlar mavhum bo'lib qoladi yani ma'noga ega emas. Bu jismlarning c dan katta tezlik bilan harakatlana olmasligidir. Lorents almashtirish formulalariga simmetrik ko'rinish berish mumkin. Buning uchun uni x va ct yani bir xil o'lcham birlikli miqdorlar uchun yozamiz:

$$x = \frac{x' + \beta(ct')}{\sqrt{1 - \beta^2}}, y = y', z = z'(ct) = \frac{(ct') + \beta x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (14)$$

$$x' = \frac{x - \beta(ct)}{\sqrt{1 - \beta^2}}, y' = y, z' = z(ct') = \frac{(ct) + \beta x}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (15)$$

IV. LORENTS ALMASHTIRISHIDAN KELIB CHIQUVCHI OQIBATLAR

Lorents almashtirishidan kelib chiquvchi ba'zi natijalar kundalik kuzatuvlarimizga qarama qarshidek tuyuladi. Bunga sabab biz kuzatigan hodisalar juda kichik tezliklarda ro'y beradi va oqibatda quyida ko'rib chiqadiga effektlarni sezmaymiz. Ammo, yorug'lik tezligi c ga yaqin tezlik bilan harakatlanuvchi elementar zarralar fizikasida bu effektlar yaqqol seziladi.

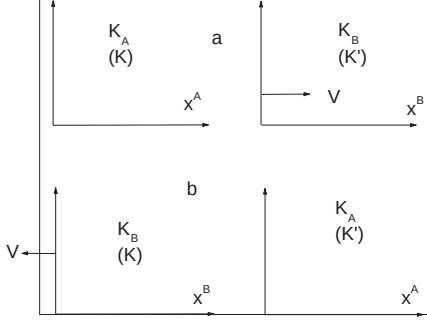


FIG. 4: "Bir vaqtda" tushunchasining nisbiyligiga oid.

A. "Bir vaqtda" tushunchasining nisbiyligi

K_A va K_B ISS larini ko'rib chiqamiz (Fig.4).

K_A SS sining x_1^A va x_2^A ($x_1^A < x_2^A$) nuqtalarida ikki hodisa bir vaqtning o'zi t_A da sodir bo'lsin. K_B SS sida bu ikki hodisa mos ravishda t_1^B va t_2^B vaqtlarda qayd etiladi. Ushbu vaqtlarning farqini topamiz. Agar K_B K_A ga nisbatan o'ng tomonga harakatlanayotgan bo'lsa (Fig.4a), K_A ni K , K_B ni K' deb qabul qilish va t_1^B va t_2^B larni (13) formula bilan topamiz:

$$t_1^B = \frac{t^A - (V/c^2)x_1^A}{\sqrt{1 - \beta^2}}, t_2^B = \frac{t^A - (V/c^2)x_2^A}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (16)$$

Ularning farqi

$$t_2^B - t_1^B = \frac{-(V/c^2)(x_2^A - x_1^A)}{\sqrt{1 - \beta^2}} < 0. \quad (17)$$

Agar K_B K_A ga nisbatan chap tomonga harakatlanayotgan bo'lsa (Fig.4b), K_A ni K' , K_B ni K deb qabul qilish va t_1^B va t_2^B larni (12) formula bilan topamiz:

$$t_1^B = \frac{t^A + (V/c^2)x_1^A}{\sqrt{1 - \beta^2}}, t_2^B = \frac{t^A + (V/c^2)x_2^A}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (18)$$

Ularning farqi

$$t_2^B - t_1^B = \frac{(V/c^2)(x_2^A - x_1^A)}{\sqrt{1 - \beta^2}} > 0. \quad (19)$$

Yuqoridan ko'rinin turibdiki, K da bir vaqtda sodir bo'lgan hodisalar boshqa SS larida bir vaqtda sodir bo'lmas ekan. Ko'rib chiqqanimizdek K_A SS sining x_1^A

nuqtada sodir bo'lgan hodisa x_2^A nuqtadagi hodisaga nisbatan K_B SS sida erta $t_1^B < t_2^B$ yoki kech $t_1^B > t_2^B$ kuza-tilishi mumkin. Shuni taqiqlab o'tish kerakki, hozir biz topgan natija faqat o'zaro sabab-oqibat munosabati bilan bog'lanmagan hodisalarga taalluqli. Ko'rib chiqqan hodilar haqiqatdan ham bir birga ta'sir etolmaydi. Agar hodisalar orasida sabab-oqibat bog'lanish bo'lsa, SS lar qanday bo'lmasin sabab oqibatdan oldin sodir bo'ladi. Elementar zarraning paydo bo'lishi barcha SS larida uning parchalanishidan oldin sodir bo'ladi.

B. Jism uzunligining nisbiyligi

Jism uzunligini bir birga nisbatan v tezlik bilan harakatlanayotgan K va K' SS larida taqqoslaymiz (Fig.5). Sterjenni hisob oson bo'lishi uchun x va x' o'qlari yo'nalishida joylashtiramiz va u K' SS sida tinch turibdi deb faraz etamiz. Unda K' SS sida sterjen uzunligini o'lchash uchun bir vaqtning o'zida uning 1- uchi x'_1 va 2- uchi x'_2 koordinatalari aniqlanib, ularning ayirmasini topishimiz lozim: $l_0 = x'_2 - x'_1$. Bu uzunlik sterjenning tinchlikdagi uzunligi deb aytiladi, chunki u sterjen bilan bog'liq K' SS sida o'lchangan. Sterjen uzunligini K SS sida o'lchash uchun uning uchlari koordinatalari bir vaqtda aniqlanishi lozim: $l = x_2 - x_1$. Shuni esda tutish kerakki, sterjen K ga nisbatan $v = V$ tezlik bilan harakatda bo'ladi. l va l_0 larni taqqoslash uchun Lorents almashtirish formulalaridan x_1, x_2 va t ni x'_1 va x'_2 bilan bog'lovchi (13) formulani olishimiz darkor:

$$x'_1 = \frac{x_1 - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, x'_2 = \frac{x_2 - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (20)$$

Bu yerdan

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (21)$$

(21) formulada SS lar nisbiy tezligi V ni sterjen tezligi v bilan almashtirib

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (22)$$

formulaga kelimiz. Demak, harakatlanuvchi sterjen uzunligi tinch turgan sterjen uzunligidan kichik bo'larkan. Bu xulosa umumiy bo'lib harakatdagi barcha jismlarning uzunligi harakat yo'nalishida qisqaradi. Bu qisqarish jism tezligiga bog'liq. Tezlik qancha katta bo'lsa qisqarish ham shuncha katta bo'ladi. Harakatdagi jism uzunligining qisqarishi hodisasi *lorents* yoki *fitsjerald qisqarishi* deb nomlanadi. Harakatda jismning ko'ndlang o'lchamlari o'zgarmaydi, qisqarish faqat harakatlanish yo'nalishida bo'ladi.

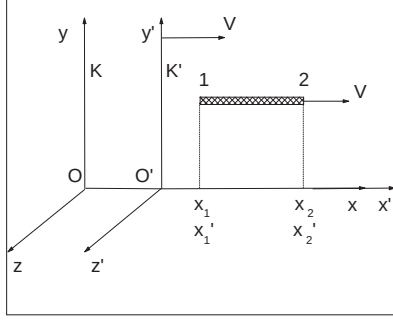


FIG. 5: Sterjen K' SS sida tinch turibdi. U K SS siga nisbatan K va K' SS lari nisbiy tezligi V ga teng bo'lgan v tezlik bilan harakatlanadi.

C. Hodisalar orasidagi vaqt oralig'i

K' SS sining x' nuqtasida ikki hodisa ketma ket t'_1 va t'_2 vaqtlarda ro'y bersin. K' SS sida bu hodisalar orasida $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ vaqt oralig'i mavjud bo'ladi. Ikkala hodisa orasida vaqt oralig'i K SS siga nisbatan qanday bo'lishini topamiz. K' SS K SS ga nisbatan V tezlik bilan harakatlanayapdi deb hisoblaymiz. K SS da bu hodisalar orasidagi vaqt intervali $\Delta t = t_2 - t_1$ bo'lsin. $\Delta t'$ va Δt larni taqqoslash uchun t, t' va x' larni o'zaro bog'lovchi (12) formulaning oxirgisini olish darkor:

$$t_1 = \frac{t'_1 + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, t_2 = \frac{t'_2 + (V/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (23)$$

Bu yerdan

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (24)$$

ni topamiz. Agar hodisalar biror jism bilan bog'liq bo'lsa, K' SS sida qayt etilgan vaqt intervali shu jism bilan bog'liq yani unga nisbatan tinch turgan soat bilan aniqlangan hisoblanadi. Jism bilan bog'liq soat bilan o'lchangan vaqt *jismning xususiy vaqti* deb ataladi va τ harfi orqali belgilanadi. Unda $\Delta t' = \tau$. Bu soat K SS siga nisbatan v tezlik bilan harakatda bo'lyapdi, shu sababli $\Delta t = t_2 - t_1$ jismga nisbatan v tezlik bilan harakatlanayotgan soat bilan o'lchanadigan vaqt intervali hisoblanadi. Natijada

$$\Delta \tau = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (25)$$

ni topamiz. (25) formuladan jismning xususiy vaqti jismga nisbatan harakatda bo'lvchi soat bilan o'lchangan

vaqtdan kichik bo'lishini ko'rsatadi. Umuman, xususiy vaqt doimo jism bilan bog'langan soat bilan o'lchanadi va shu sabab barcha ISS larida o'zgarmas yani invariant bo'lib topiladi. K SS sida yashovchi kuzatuvchi fikricha Δt vaqt intervali unga nisbatan tinch turgan soatda o'lchangan vaqt intervali, $\Delta \tau$ esa unga nisbatan v tezlik bilan harakatlanuvchi soatda o'lchangan vaqt intervali. $\Delta \tau < \Delta t$ bo'lganligi bois, harakatdagi soat tinch turgan soatdan sekin yuradi deb aytsak bo'ladi. (25) monosabatning to'g'riligini quyidagi hodisaning kuzatilishi dalil-laydi. Koinotdan keluvchi zarralar tarkibida 20-30 km balandlikda tug'iluvchi μ -myuon deb ataluvchi nostabil zarralar bor. Bu zarraning yashash vaqyi ~ 2 mks va elektron (pozitron) ga va ikki neytrinoga parchalanadi. Bu zarralar yashash vaqtida $3 \cdot 10^8 \text{ km/s} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 600 \text{ m}$ yo'l bosadi. Qarabsizki bu zarralar yer yuziga etib kela olmasliklari kerak. Lekin, tajribaning ko'rsatishicha ular yer yuziga etib keladi. Buni quyidagicha tushuntirish mumkin: μ -myuonlar yorug'lik tezligiga yaqin tezlik-lar bilan harakatlanadi. Shu sababli yerdagi tinch tugan soat bo'yicha ularning yashash vaqti juda katta bo'ladi va ular yergacha bo'lgan masofani parchalanasdan bosib o'ta oladilar.

V. INTERVAL

Biror hodisa qayerda va qachon sodir bo'lganligi bilan tavsiflanadi. Qayerda sodir bo'lganligi koordinata x, y, z lar orqali, qachon sodir bo'lganligi t orqali ifodalanadi. Hamma miqdorlar biror SS siga nisbatan o'lchanadi. Hodisaning sodir bo'lganligini tavsiflovchi to'rt o'lchamli fazoni (fazo+vaqt) (4- fazo) kiritamiz. Tarixda birinchi marta 4-fazoni uch o'lchamli fazo va vaqtning umumiyli-gi asosida 1764 yili J.A.d'Alamber o'zining "O'lcham birlik-lari" asarida keltirgan. Einstein postulatlariga asoslanib G.Minkovskiy ta'rifiga binoan har bir hodisaga 4-fazoda x, y, z, ct miqdorlar bilan tavsiflanuvchi *dunyoviy nuqta* ni mos qo'yish mumkin. Moddiy nuqta vaqt o'tishi bilan 4-fazoda *dunyoviy chiziqlik* bo'ylab harakatlanadi. 4-fazoda yorug'lik signalining x_1, y_1, z_1 nuqtadan t_1 vaqtda chiqib t_2 vaqtda x_2, y_2, z_2 nuqtaga kelsin. Bu ikki hodisa koor-dinatalari o'zaro

$$c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 = 0 \quad (26)$$

munosabat orqali bog'langan. Boshqa tomondan

$$\Delta l_{12}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (27)$$

3-fazodagi ikki nuqta orasidagi masofa kvadratidir. (27) masofa formulasiga o'xshash tarzda 4-fazoda ham ikki hodisa orasida *interval* tushunchasini kiritishimiz mumkin. Ikki hodisa orasidagi intervalning kvadrati

$$\Delta s_{12}^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 \quad (28)$$

formula orqali aniqlanadi. Yoki

$$\Delta s_{12}^2 = c^2 \Delta t_{12}^2 - \Delta l_{12}^2. \quad (29)$$

Juda kichik intervalni differentsial shaklida yozishimiz mumkin:

$$ds_{12}^2 = c dt_{12}^2 - dl_{12}^2. \quad (30)$$

3-fazoda Evklid geometriyasi qonunlari bajariladi, nuqtalar orasidagi interval (27) formula bilan aniqlanadi va shu sababli u *evklid fazosi* deb ataladi. Biz ko'rib chiqayotgan 4-fazo (3-fazo+vaqt) da interval

$$\Delta s_{12}^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (31)$$

bilan emas, aynan (28) formula bilan aniqlanadi. Nuqtalari orasidagi masofa (interval) (28) formula bilan aniqlanadigan fazo *noevklid fazosi* deyiladi. Yorug'likning biror nuqtadan chiqib boshqa nuqtaga kelishi hodisalari orasidagi interval doimo nolga teng

$$\Delta s_{12}^2 = c \Delta t_{12}^2 - \Delta l_{12}^2 = 0. \quad (32)$$

Yorug'lik tezligi barcha ISS larida doimiy bo'lganligi bois (32) tenglik ham barcha ISS larida o'rinalidir. Shu sababli ixtiyoriy K va K' ISS laridagi intervallar bir biri bilan

$$\Delta s = a \Delta s' \quad (33)$$

munosabat orqali bog'langan bo'lishi lozim. Bunda a biror doimiy son. ISS lar teng huquqli bo'lganligi bois

$$\Delta s' = a \Delta s \quad (34)$$

deb ham yozishimiz mumkin. (33) va (34) formulalardan $a^2 = 1$ yoki $a = \pm 1$ ekanligini topamiz. Barcha SS larida interval teng bo'lishi kerak va shu sabab $a = 1$ qiymatni tanlaymiz. Unda $\Delta s = \Delta s'$ yani ikki hodisa orasidagi interval invariantdir. Uch o'lchamli fazoda ikki nuqta orasidagi masofa barcha SS larida teng bo'lganidek 4-fazoda ham ikki hodisa orasidagi interval invariant bo'ladi. Intervalning doimiyliigi Einstein postulatlarining mantiqiy xulosasidir. Intervalning invariantligini boshqacha yo'l bilan ham ko'rsatish mumkin. $\Delta s = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2}$ formulada Δl odatdagi fazoda ikki nuqta orasidagi masofa. Agar qaralayotgan hodisa bitta zarra bilan sodir bo'lgan bo'lsa $\Delta l / \Delta t$ zarra tezligi v ni anglatadi. U holda

$$\Delta s = c \Delta t \sqrt{1 - \Delta l^2 / c^2 \Delta t^2} = c \Delta t \sqrt{1 - v^2 / c^2}. \quad (35)$$

(25) formulaga yordamida (35) ni $\Delta s = c \Delta \tau$ deb yozamiz. Lekin c va xususiy vaqt τ invariant. Demak, interval ham invariant. Demak, yorug'lik tezligi c , interval Δs va xususiy vaqt oralig'i $\Delta \tau$ invariantlar hisoblanar ekan. 3-fazodagi nuqtalar orasidagi interval kvadratidan farqli ($\Delta l^2 > 0, \Delta l > 0$) (28) formula bilan aniqlanadigan interval kvadrati Δs^2 musbat (agar $c \Delta t > \Delta l$), manfiy (agar $c \Delta t < \Delta l$) va nolga (agar $c \Delta t = \Delta l$) teng bo'lishi mumkin. Yuqorida ko'rsatganimizdek yorug'likning biror dunyoviy nuqtadan chiqib boshqa dunyoviy nuqtaga borisi hodisalari orasidagi interval nolga teng. Δt vaqt mobaynida yorug'lik vakuumda $\Delta l = c \Delta t$ masofani bosib o'tadi. Interval ham mos ravishda haqiqiy (agar $\Delta s^2 > 0$), mavhum (agar $\Delta s^2 < 0$) va nolga teng bo'ladi. Intervalning invariantligi sababli uning ishorasi barcha SS larida bir xil bo'ladi yani boshqa SS siga o'tishda interval ishorasi o'zgarmaydi. Intervalni ishorasiga qarab ikki turga bo'lish qabul etilgan:

1. $\Delta s^2 > 0$. U holda

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2 > 0. \quad (36)$$

Biz shunday K' SS sini topishimiz mumkinki, unda $\Delta l' = 0$ bo'ladi. Yani hodisalar bir nuqtada sodir bo'ladi. Ammo, biz bu hodisalar bir vaqtda sodir bo'lgan SS sini topa olmaymiz, unday SS mavjud bo'lmaydi. K' SS sida bu hodisalar orasidagi vaqt oralig'i

$$\Delta t' = \frac{\Delta s}{c} \quad (37)$$

bilan ifodalanadi. Haqiqiy qiymatga ega bo'lgan interval *vaqtga o'xshash* interval deb ataladi.

2. $\Delta s^2 < 0$. U holda

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2 < 0. \quad (38)$$

Biz shunday K' SS sini topishimiz mumkinki, unda $\Delta t' = 0$ bo'ladi. Yani hodisalar bir vaqtda sodir bo'ladi. Ammo, biz bu hodisalar bir nuqtada sodir bo'lgan SS sini topa olmaymiz, unday SS mavjud bo'lmaydi. K' SS sida bu hodisalar orasidagi masofa

$$\Delta l' = i \Delta s \quad (39)$$

bilan topiladi. Mavhum intervallar *fazoga o'xshash* intervallar deb ataladi.

Bir zarra ustida sodir bo'luvchi hodisalar faqat vaqtga o'xshash interval bilan farqlanadi. Rosstdan ham zarra tezligi doimo c dan kichik, shu sabab $\Delta l \leq c\Delta t$. Bundan $\Delta s^2 \geq 0$ ekanligi kelib chiqadi. Fazoga o'xshash intervalga o'zaro sabab-oqibat bilan bog'liq bo'lmagan hodisalar misol bo'la oladi. Bu holda $\Delta s^2 < 0$ yani $\Delta l > c\Delta t$. Oxirgi ifodani shunday talqin etish lozim: 1- nuqtadan chiqqan signal 2- nuqtaga t vaqt o'tgandan keyin ham etib bora olmaydi va shu sabab bu nuqtalar orasidagi hodisalar sabab-oqibat bilan bog'liq emas.

VI. TEZLIKLAR QO'SHILISHI VA ALMASHTIRILISHI

K SS sida zarra tezligining komponentlari

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt} \quad (40)$$

formulalar bilan ifodalanadi. O'z navbatida K' SS sida ham tezlik komponentlari

$$v'_{x'} = \frac{dx'}{dt'}, v'_{y'} = \frac{dy'}{dt'}, v'_{z'} = \frac{dz'}{dt'} \quad (41)$$

bilan aniqlanadi. Shtrixlangan tezlik komponentlari va shtrixlanmagan tezlik komponentlari orasidagi munosabatni aniqlaymiz. Buning uchun Lorents almashtirishidan foydalanamiz ($\beta = V/c$):

$$dx = \frac{dx' + Vdt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, dy = dy', dz = dz', \quad (42)$$

$$dt = \frac{dt' + (V/c^2)dx'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (43)$$

(42) formuladagi dx ni dt ga bo'lib va (41) ni inobatga olib

$$v_x = \frac{v'_{x'} + V}{1 + Vv'_{x'}/c^2} \quad (44)$$

ni topamiz. dy ni dt ga va dz ni dt ga bo'lib yana ikki formulani topamiz:

$$v_y = \frac{v'_{y'}\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + Vv'_{x'}/c^2}, v_z = \frac{v'_{z'}\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + Vv'_{x'}/c^2}. \quad (45)$$

(44) va (45) formulalar yordamida tezlikning K' SS sidagi komponentlari K SS siga almashtiriladi. Teskari almashtirish formulalari quyidagicha bo'ladi:

$$v'_{x'} = \frac{v_x - V}{1 - Vv_x/c^2}, v'_{y'} = \frac{v_y\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - Vv_x/c^2}, v'_{z'} = \frac{v_z\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - Vv_x/c^2}. \quad (46)$$

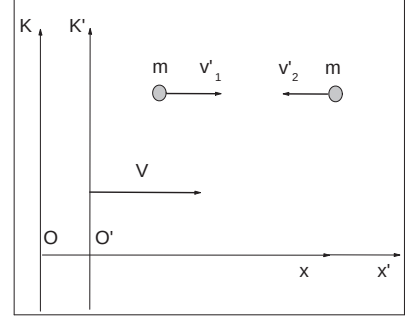


FIG. 6: K' SS sida zarralar x' o'qiga parallel ravishda bir birga qarab $\vec{v}'_1 = \vec{V}$ va $\vec{v}'_2 = -\vec{V}$ tezliklar bilan harakatlanmoqda. Zarralarning tezliklari modullari K va K' SS lari nisbiy tezligi V ga teng $v'_1 = v'_2 = V$. To'qnashuvdan keyin zarralar birikib qoladi va uning tezligi K' SS sida nolga teng bo'ladi.

$V \ll c$ hollarda bu formulalar Newton mexanikasidagi tezliklarni almashtirish formulasiga o'tadi. Agar zarra x va x' o'qlari boyicha harakatda bo'lsa, (44) formula

$$v = \frac{v' + V}{1 + v'V/c^2} \quad (47)$$

shakliga keladi. Hatto, zarra $v' = c$ tezlik bilan harakatlanganda ham $v = c$ natijani qo'lga kiritamiz. Bu natija Lorents almashtirish formulalari, qolaversa yorug'lik tezligining doimiyliigi yoki invariantligi xulosasidir. Agar $v' = c$ va $V = c - \alpha$ (bu yerda α juda kichik miqdor) bo'lsa, (46) formula $v = c$ natijaga olib keladi. Yani agar qo'shiluvchi tezliklarning har biri c dan kichik bo'lsa, natijaviy tezlik ham c dan kichik bo'ladi. Ammo, Lorents formulalari $V = c$ holda ishlamaydi. Buning ma'nosi hech qanday moddiy zarra yorug'lik tezligiga erisha olishi mumkin emasligidadir.

VII. RELYATIVISTIK IMPULS

Saqlanish qonunlari, tabiat qonunlari singari, barcha ISS larida bajarilishi lozim. Yani Lorents almashtirishiga nisbatan invariant bo'lishi kerak. Impuls saqlanish qonuni invariant bo'ladimi? Keling shuni tekshiraylik. Jism impulsi $\vec{p} = m\vec{v}$ bilan beriladi. Masalani osonlashtirish uchun ikki zarraning absolyut noelastik markaziy to'qnashuvini ko'rib chiqaylik (Fig.6).

Suratda ko'rsatilgandek K' SS sida zarralarning impulsi to'qnashuvdan oldin va keyin nolga teng, yani impuls saqlanish qonuni bajariladi. Endi impuls saqlanish qonunini K SS sida ko'rib chiqamiz. Birinchi va ikkinchi zarraning K SS sidagi tezliklari

$$v_{1x} = \frac{v'_{1x'} + V}{1 + Vv'_{1x'}/c^2} = \frac{V + V}{1 + VV/c^2} = \frac{2V}{1 + V^2/c^2} \quad (48)$$

$$v_{2x} = \frac{v'_{2x'} + V}{1 + Vv'_{2x'}/c^2} = \frac{-V + V}{1 + V(-V)/c^2} = 0 \quad (49)$$

ga teng bo'ladi. Demak, zarralarning to'qnashuvdan oldingi to'liq impuls

$$mv_{1x} + mv_{2x} = \frac{2mV}{1 + V^2/c^2}, \quad (50)$$

to'qnashuvdan keyin esa $2mV$ bo'ladi. Ko'rinib turibdiki, zarralarning to'qnashuvdan oldingi to'liq impuls to'qnashubdan keyingi to'liq impulsiga teng bo'lamiy qolyapdi. Yani impuls saqlanish qonunining invariantligi ta'minlanmay qolyapdi. Izlanishlarning ko'rsatishicha bunga sabab impulsning

$$\vec{p} = m\vec{v} = m \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (51)$$

shaklida ta'riflanishi ekan. Impuls saqlanish qonunining invariantligini ta'minlash uchun yuqoridagi (51) formulada dt ni zarraning xususiy vaqti $d\tau$ bilan almashtirish kifoya qilar ekan. U holda impuls ta'rifi shaklida

$$\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{d\tau} \quad (52)$$

ni qabul etamiz. B yerda $d\vec{r}$ zarraning impuls $\vec{p}$ aniqlanayotgan SS sidagi ko'chishi. $d\tau$ ushbu $d\vec{r}$ ko'chishni bosib o'tish uchun sarflangan vaqt, bu vaqt zarra bilan birga harakatlanayotgan soatda o'lchanadi. (25) formuladan foydalanib zarra impulsini

$$\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{dt} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (53)$$

deb yozamiz. Bu yerda dt impuls aniqlanayotgan SS si soatida o'lchanuvchi vaqt intervali va $\vec{v}$ zarraning K SS sidagi tezligi. Demak, relyativistik impuls

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (54)$$

munosabat bilan aniqlanar ekan. $v/c \ll 1$ holda (54) formula Newton mexanikasi qo'llaniladigan odatdagi $\vec{p} = m\vec{v}$ impulsiga o'tadi. Endi oldingi zarralar to'qnashishini ko'rib chiqishni davom ettiramiz. K SS sida zarralarning to'qnashuvdan oldingi to'liq impuls (54) ga muvofiq

$$\frac{mv_{1x}}{\sqrt{1 - v_{1x}^2/c^2}} = \frac{m \cdot 2V}{(1 + V^2/c^2)\sqrt{1 - \left(\frac{2V/c}{1 + V^2/c^2}\right)^2}} = \frac{2mV}{1 - V^2/c^2} \quad (55)$$

ga teng. To'qnashuvdan keyin zarralar birikib yangi $M = 2m/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ massali zarra hosil qilishadi va u K SS siga nisbatan V tezlik bilan harakatda bo'ladi. Shu sabab uning impuls

$$\frac{MV}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2mV}{1 - v^2/c^2} \quad (56)$$

ga teng bo'ladi. (56) ni (55) ga taqqoslab impuls saqlanish qonuni K SS sida ham orinlanganini ko'ramiz.

VIII. RELYATIVISTIK ENERGIYA

Newtonning 2- qonuni $d\vec{p}/dt = \vec{F}$ ga relyativistik impuls (54) ni qo'yamiz:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \vec{F}. \quad (57)$$

Newton mexanikasidan farqli kuch $\vec{F}$ relyativistik mexanikada invariant kattalik emas, chunki u SS sining tanlab olinishiga bog'liq. Har xil SS sida uning moduli va yo'nalishi turlicha bo'ladi. Bundan tashqari kuch $\vec{F}$ va tezlanish $\vec{a}$ bir biriga kollinear bo'lmaydi. Moddiy nuqta kinetik energiyasi ifodasini topishimiz uchun kinetik energiyasi orttirmasi moddiy nuqta ustidan bajarilgan ishga teng ekanligini esga olamiz $dE_k = dA$. (57) tenglikning o'ng tomonini $d\vec{s}$ ko'chishga, chap tomonini esa unga teng miqdor $\vec{v}dt$ ga ko'paytamiz

$$\vec{v} \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) dt = \vec{F} d\vec{s}. \quad (58)$$

(58) ning o'ng tomonidagi ko'paytma elementar ish dA ni anglatadi. Demak, chap tomoni kinetik energiyaning orttirmasini anglatadi

$$dE_k = \vec{v} \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) dt = \vec{v} d \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right). \quad (59)$$

(59) formulada differentsiyalash amalini bajaramiz

$$\begin{aligned} dE_k &= \vec{v} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} d(m\vec{v}) + m\vec{v} d \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) \right] = \\ &= \vec{v} \left[\frac{m d\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + \frac{m\vec{v}(v/c^2) dv}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \right]. \end{aligned} \quad (60)$$

Topilgan natijani umumiy maxarajga keltirib

$$dE_k = \frac{mvdv}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} = d \left(\frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) \quad (61)$$

ni topamiz. Bu yerdan

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + const. \quad (62)$$

Kinetik energiya $v = 0$ da nolga teng bo'lishi kerak. Shu sabab $const = -mc^2$ bo'lishi lozim. U holda

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right). \quad (63)$$

(63) formulada energiyani v/c hadning darajalari bo'yicha Teylor qatoriga yoyamiz

$$\begin{aligned} E_k &= E_k(0) + E'_k(0) \frac{v}{c} + \frac{1}{2} E''_k(0) \left(\frac{v}{c} \right)^2 + \dots = \\ &= 0 + 0 \cdot \frac{v}{c} + \frac{mc^2}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 + \dots \end{aligned} \quad (64)$$

Kichik tezlikda (64) formula Newton mexanikasida kinetik energiya $E_k = mv^2/2$ formulaga aylanadi. Saqlanish qonunlari Lorents almashtirish formulalariga nisbatan invariant bo'lishi kerak. Yillar davomida yig'ilgan tajriba natijalari energiyaning saqlanish qonuni faqat (63) formuladagi kinetik energiyaga yana boshqa had mc^2 energiya qo'shilgandagina invariant bo'lishini ko'rsatadi. Shu sababli relyativistik mexanikada erkin zarraning energiyasi

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (65)$$

formula bilan beriladi va bu energiya zarraning *to'liq energiyasi* deb ataladi. Tinch turgan zarra $E_0 = mc^2$ energiyaga ega bo'ladi. Bu energiya jismning tinchlikdagi energiyasi deb ataladi va u jism ichki energiyasini ifodalaydi. Jismning tinchlikdagi energiyasi deganda uni tashkil etuvchi zarralar tinchlikdagi energiyalari, ularning kinetik energiyalari va ularning o'zaro ta'sirlashish energiyasi. Tinchlikdagi energiyaga jismning tashqi maydondagi potentsial energiyasi kirmaydi. Relyativistik mexanikada "to'liq energiya" termini Newton mexanikasidagi to'liq energiya terminidan boshqa ma'noga ega. Newton mexanikasida to'liq energiya deganda jismning kinetik energiyasi va uning tashqi maydondagi potentsial energiyalari yig'indisini tushuniladi. Relyativistik mexanikada esa faqat jism kinetik energiyasi va tinchlikdagi energiyasi yig'indisi tushuniladi. (54) va (65) formulalardan jismning to'liq energiyasini va impulsini bog'lovchi

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v} \quad (66)$$

munosabatni topamiz. (54) va (65) formulalardan jism energiyasini faqat impuls orqali ifodalovchi

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (67)$$

formulani topish mumkin. Oxirgi tenglikdan

$$E^2/c^2 - p^2 = m^2 c^2 = inv \quad (68)$$

ekanligi kelib chiqadi. Yani $E^2/c^2 - p^2$ ning qiymati barcha ISS larida teng.

IX. ENERGIYA VA MASSA ORASIDAGI MUNOSABAT

(65) formulaga binoan jism massasi va uning tinchlikdagi energiyasi

$$E_0 = mc^2 \quad (69)$$

munosabat bilan bog'langan. Bu yerdan jism massasining Δm ga o'zgarishi uning tinchlikdagi energiyasining ΔE_0 ga o'zgarishiga olib kelishi kelib chiqadi. Massa va energiya o'zgarishi

$$\Delta E_0 = c^2 \Delta m \quad (70)$$

formula bilan bog'liq. Yuqoridagi xulosa massa va tinchlikdagi energiya orasidagi o'zaro bog'lanish munosabati deyiladi. Massaning va energiyaning o'zaro bunday munosabatda bo'lishi ta'sirlashuvchi zarralarning to'liq massasining saqlanmasligiga olib keladi. Buni ko'rsatish uchun bir biriga qarab v tezlik bilan harakatlanuvchi ikki m massali zarralarning noelastik markaziy to'qnashuvini ko'rib chiqamiz. To'qnashuvdan oldin zarralarning to'liq energiyasi $2mc^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$ ga teng. To'qnashish natijasida M massali bitta zarra hosil bo'ladi va u tinch qoladi, uning to'liq energiyasi Mc^2 bo'lsa

$$Mc^2 = \frac{2mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, M = \frac{2m}{\sqrt{1-v^2/c^2}} > 2m \quad (71)$$

ekanligi kelib chiqadi. Yani hosil bo'lgan murakkab zarra massasi uni tashkil etuvchi zarralar massalari yig'indisidan katta bo'lar ekan. Topilgan natija to'qnashuvchi zarralarning kinetik energiyalarining mos ravishda murakkab zarraning tinchlikdagi energiyasiga o'tishi va shu sababli uning massasi $\Delta m = \Delta E/c^2$ ga o'tishi bilan tushuntiriladi. Tinch turgan zarraning parchalanishida teskari holat kuzatiladi. Hosil bo'lgan zarralar to'liq massasi oldingi zarra massasidan zarralarning to'liq kinetik energiyasi yig'indisining c^2 bo'linganiga kichik bo'ladi. Agar jism N ta zarradan tashkil topgan bo'lsa, uni parchalab yuborish uchun kerak bo'lgan energiya shu jismning *bog'lanish energiyasi* deb ataladi va u

$$E_b = c^2 \sum_{i=1}^N m_i - Mc^2 \quad (72)$$

formuladan topiladi. Bu yerda M jism massasi, m_i jism tarkibiga kiruvchi i - zarra massasi.

X. FOTON

Newtom mexanikasida massasi nolga teng zarra ko'rib chiqilmaydi. Bunday zarra cheksiz kichik kuch ta'sirida juda katta tezlanish olgan bo'lardi. Relyativistik mexanikada $m = 0$ zarra bo'lishi uning qonunlarida zid emas. (54) va (65) formulalarga binoan $m = 0$ zarra faqat $v = c$ tezlik bilan harakatlanganda energiya va impuls ega bo'ladi. Shu sababli massasi nolga teng zarra faqat yorug'lik tezligi c bilan harakatdagina mavjud bo'lishi mumkin ekan. Bunaqa zarraning impulsi (66) ga binoan

$$p = \frac{E}{c} \quad (73)$$

bilan beriladi. Massasi nolga teng zarraga yorug'lik *fotonini* misol etib keltirish mumkin. Foton energiyasi va impulsi

$$E = h\nu, p = \frac{h\nu}{c} \quad (74)$$

ga teng. Bu yerda h Plank doimiysi, ν yorug'lik chastotasi. Yorug'lik bu fotonlar oqimi. Yorug'lik biror jism sirtiga tushib yutilsa, unga fotonlari impulsini beradi. Natijada yorug'likning jism sirtiga bosimi kuzatiladi. Agar, jism sirtining birlik maydoniga vaqt birligida N foton tushib yutilsa, unga fotonlar $W = Nh\nu$ energiya va $p = W/c = Nh\nu/c$ impuls beradi. Ko'rsatilayotgan bosim $P = W/c$ ga teng bo'ladi. Bu yerda W ni yorug'lik energiyasi oqimi zichligi, yani vaqt birligida birlik maydonga tushuvchi energiya miqdori deb qarash mumkin. Yorug'lik bosimi juda kichik va odatda sezilmaydi. Masalan, bir million kd li yorug'lik manbasi o'zidan 1 m masofada 10^{-7} Pa bosim hosil etadi.

“Nazariy fizika” (Elektrodinamika) fanidan qisqacha

Glossariy

Aberratsiya – yoritgichga bo’lgan yo’nalishning kuzatuvchi tezligiga bog’liqlikni tavsiflovchi hodisa.

Bio-Savar-Laplas formulasi – tok elementi hosil qilgan magnit maydoni induktsiyasini topishga imkon beradigan va Bio-Savar-Laplas qonuni ifodalovchi formula.

Dipol – o’zaro bog’langan ikkita musbat va manfiy zaryaddan tashkil topgan elektr tizimi.

Dopler effekti – qabul qilgichda qayd etilgan elektromagnit to’lqin chastotasi (to’lqin uzunligi) ning harakatlanuvchi manba tezligiga bo’liqligini ifodalovchi munosabat.

Efir – klassik fizika tamoyillariga ko’ra efir g’ayritabiiy va qarama-qarshi xossalarni o’zida mujassam etgan gipotetik muhit bo’lib, unda elektromagnit to’lqinlar tarqalgan degan fikrda bo’lishgan. Ammo tajribalar efirning yo’qligini ko’rsatdi.

Elektron – yunoncha so’z bo’lib qahrabo degan ma’noga ega.

Elektromagnit induktsiya – magnit maydonining o’zgarishi natijasida o’tkazgichlarda elektr tokining hosil bo’lishi hodisasi.

Om qonuni – elektr zanjirida kuchlanish, tok kuchi va zanjir qarshiligi orasidagi munosabatni ifodalovchi qonun. Om qonuni zanjirning bir qismi yoki to’liq zanjir uchun ham ishlatiladi

Joul-Lents qonuni – o’tkazgichda tok o’tayotganda ajralib chiquvchi issiqlik miqdorini tavsiflovchi qonun.

Kulon qonuni – elektrostatikaning asosiy qonuni bo’lib ikki nuqtaviy elektr zaryadining ta’sirlanishi tavsiflaydi.

Maksvel tenglamalari – elektrodinamikaning eng asosiy qonuni va ularni ifodalovchi tenglamalar tizimi bo’lib, 4 ta tenglamadan iborat. Tenglamalar integral va differentsial shakllarda yozilishi mumkin.

Nuqtaviy elektr zaryad – qaralayotgan sharoitlarda o’lchamlarini inobatga olmasa ham bo’ladigan elektr zaryadi (yani zaryadlangan moddiy muqta).

Ostragradskiy-Gauss teoremasi – elektr maydoni kuchanganligi (induktsiyasi) yoki magnit maydoni induktsiyasi (kuchanganligi) ning berk sirt orqali oqimini shu sirt ichida joylashgan elektr zaryadlari miqdori yoki sirtni kesib o’tuvchi elektr toklari miqdori bilan bog’lovchi munosabat-formula.

Tenglamaning kovariant shakli – umumiy (maxsus) nisbiylik nazariyasida bir sanoq tizimida ikkinchi sanoq tizimiga Lorents almashtirishlari orqali o’tishda o’z shaklini o’zgartirmay qoladigan tenglama shakli.

Skin effekt – o’tkazgichdan o’tayotgan o’zgaruvchan tokning tebranishlar chastotasi ortishi bilan tokning o’tkazgich sirti bo’yicha o’tish hodisasi

Xabbl qonuni – galaktikalarning bir-birlaridan uzoqlashish darajasini, uzoqlanish tezligining ular orasidagi masofaga bog'lovchi munosabat.

BYNDPI

Краткий Глоссарий по предмету «Теоретическая физика» (Электродинамика)

Аберрация - это явление, сущность которого заключается в зависимости направления на светило от скорости наблюдателя.

Формула Био-Савара-Лапласа - это формула, которая позволяет нам находить индукцию магнитного поля, создаваемого элементом тока, и представляет собой закон Био-Савара-Лапласа.

Диполь - это электрическая система, состоящая из двух взаимосвязанных положительных и отрицательных зарядов.

Эффект Доплера - это отношение зависимости частоты (длины волны) электромагнитной волны, зарегистрированной в приемнике, от скорости движущегося источника.

Эфир - согласно принципам классической физики это гипотетическая среда с аномальными и противоречивыми свойствами, в которой, как считается, распространяются электромагнитные волны. Но эксперименты показали, эфира нет.

Электрон - это греческое слово, означающее янтарь.

Электромагнитная индукция - это возникновение электрического тока в проводнике в результате изменения магнитного поля.

Закон Ома - это закон, который описывает взаимосвязь между напряжением, током и сопротивлением цепи в электрической цепи. Закон Ома применяется на часть или всю цепочку.

Закон Джоуля-Ленца - это закон, который описывает количество тепла, выделяемого при прохождении тока через проводник.

Закон Кулона - это основной закон электростатики, который описывает взаимодействие двух точечных электрических зарядов.

Уравнения Максвелла - это основной закон электродинамики и представляющая их система уравнений, состоящая из 4 уравнений. Уравнения могут быть записаны в интегральной и дифференциальной формах.

Точечный электрический заряд - это электрический заряд (то есть заряженное вещество), линейными размерами которой можно игнорировать в рассматриваемых условиях.

Теорема Остроградского-Гаусса - представляет собой формулу для соотношения потока напряженности электрического поля (индукции) или индукции магнитного поля (напряжения) через замкнутую поверхность с количеством электрических зарядов внутри этой поверхности или количеством электрических токов, пересекающих поверхность.

Ковариационная форма уравнения - это форма уравнения, которая в общей (специальной) теории относительности не меняет свою форму при переходе от одной системы отсчета к другой с использованием преобразований Лоренца.

Скин-эффект - явление прохождения тока через поверхность проводника при увеличении частоты колебаний переменного тока, проходящего через проводник.

Закон Хаббла - это соотношение между расстояниями между галактиками с их относительными скоростями.

ВУЗДРИ

A brief Glossary on the subject “Theoretical physics” (Electrodynamics)

Aberration - is a phenomenon which produces an apparent motion of celestial objects about their true positions, dependent on the velocity of the observer.

Bio-Savara-Laplasa's formula - this formula, which allows us to find the induction of the magnetic field, created by the current element, and represents the law of Bio-Savara-Laplace.

Dipol - the electric system, consisting of two interconnected positive and negative charges.

Doppler effect - is the change in frequency of a wave in relation to an observer who is moving relative to the wave source.

Ether, also spelled **aether**, also called **luminiferous ether** - in physics, a theoretical universal substance believed during the 19th century to act as the medium for transmission of electromagnetic waves (e.g., light and X-rays), much as sound waves are transmitted by elastic media such as air. The ether was assumed to be weightless, transparent, frictionless, undetectable chemically or physically, and literally permeating all matter and space. The theory met with increasing difficulties as the nature of light and the structure of matter became better understood. It was seriously weakened (1887) by the Michelson-Morley experiment, which was designed specifically to detect the motion of Earth through the ether and which showed that there was no such effect. According to the principles of classical physics, ether - this hypothetical environment with anomalous and protivorechivymi svoystvami, in kotoroy, as schitaetsya, rasprostranyayutsya electromagnetic waves. But the experiments showed that the translations were not.

Electron - is a Greek word, stands for an amber.

Electromagnetic or magnetic induction - is the production of an electromotive force (i.e., voltage) across an electrical conductor in a changing magnetic field.

Ohm's law - states that the voltage or potential difference between two points is directly proportional to the current or electricity passing through the resistance, and directly proportional to the resistance of the circuit.

Joule Lenz law - when an electric current pass through a conductor, the amount of heat released in the conductor is directly proportional to the square of the current strength, the resistance of the conductor, and the current passage time.

Coulomb's law or Coulomb's inverse-square law - is an experimental law of physics that quantifies the amount of force between two stationary, electrically charged particles. The electric force between charged bodies at rest is conventionally called electrostatic force or Coulomb force.

Maxwell's equations - are a set of coupled partial differential equations that, together with the Lorentz force law, form the foundation of classical electromagnetism, classical optics, and electric circuits. Maxwell first used the equations to propose that light is an electromagnetic phenomenon.

Point electric charge – is a charged particle (body) linear size of which can be neglected under considering conditions.

Ostrogradsy-Gauss's theorem states that the surface integral of a vector field over a closed surface, which is called the flux through the surface, is equal to the volume integral of the divergence over the region inside the surface. Intuitively, it states that *the sum of all sources of the field in a region (with sinks regarded as negative sources) gives the net flux out of the region.*

The covariant form of equation – is a form of equation of classical electromagnetism, in particular, Maxwell's equations and the Lorentz force, which is manifestly invariant under Lorentz transformations.

Skin effect - is the tendency of an alternating electric current to become distributed within a conductor such that the current density is largest near the surface of the conductor, and decreases exponentially with greater depths in the conductor.

Hubble's law, also known as **the Hubble–Lemaître law** - is the observation in physical cosmology that galaxies are moving away from the Earth at velocities proportional to their distance.

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIJ VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI

TOSHKENT DAVLAT PEDAGOGIK UNIVERSITETI



Ro'yxatga olindi: BD-5110200-2.06

2018 - yil 18.08

NAZARIY FIZIKA

FAN DASTURI

Bilim sohasi:	100000 - Gumanitar
Ta'lim sohasi:	110000 - Pedagogika
Ta'lim yo'nalishi:	5110200 - Fizika va astronomiya o'qitish metodikasi

Toshkent - 2018

Fan dasturi Oliy va o'rta maxsus, kasb-hunar ta'limi yo'nalishlari bo'yicha O'quv-uslubiy birlashmalar faoliyatini Muvofiqlashtiruvchi Kengashning 2018-yil "18" 08 dagi 4 -sonli bayonnomasi bilan ma'qullangan.

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligining 2018-yil "25" 08 dagi 744 -sonli buyrug'i bilan ma'qullangan fan dasturlarini tayanch oliy ta'lim muassasasi tomonidan tasdiqlashga rozilik berilgan.

Fan dasturi Nizomiy nomidagi Toshkent davlat pedagogika universitetida ishlab chiqildi.

Tuzuvchilar:

M. Djorayev – TDPU «Fizika va astronomiya o'qitish metodikasi» kafedrası professori, ped.f.d., professor
T. Muratov – TDPU «Fizika va astronomiya o'qitish metodikasi» kafedrası katta o'qituvchisi
E. Xo'janov – TDPU «Fizika va astronomiya o'qitish metodikasi» kafedrası o'qituvchisi

Taqrizchilar:

I.Kokanbaev – Qo'qon DPI «Fizika va astronomiya o'qitish metodikasi» kafedrası dotsenti, f.-m.f.n.

D.T.Kuletov – Toshkent Turizm kasb-hunar kolleji fizika va astronomiya o'qituvchisi

Fan dasturi Nizomiy nomidagi Toshkent davlat pedagogika universiteti o'quv-uslubiy Kengashida ko'rib chiqilgan va tavsiya qilingan (2018 - yil 06 dagi 11 -sonli bayonnomasi).

Ўғриганда. (Ўзбекистон Республикаси қонун ҳужжатлари тўплами, 2017 й. 6-сон, 70-модда)

15. Ўзбекистон Республикаси Конституцияси, Т.: Ўзбекистон. 2014. -46 б.
16. И.В. Мещерский. Сборник задач по теоретической механике. М.: Наука. 1992 г.
17. Umumiy fizika kursidan masalalar to'plami. M.S.Sedrik tahriri ostida Toshkent.: O'qituvchi. 1992 y.
18. Tursunov S., Kamolov J. "Elektr va magnitizm", T.: O'qituvchi, 1996 y.
19. В.В. Мултановский, А.С. Васильевский. Электродинамика. М.: Просвещение, 1998 г.
20. O. Qodirov, A. Boydedaev. Kvant fizika. Toshkent, "O'zbekiston" nashriyoti, 2005y.
21. Е.М. Гершензон и др. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. М.: "Просвещение", 1997 г.
22. E. Rasulov. U Begimqulov Kvant fizikasi. 1-tom., T. "Fan va texnologiya", 2009 y.
23. E. Rasulov. U. Begimqulov Kvant fizikasi. 2- tom T.: "Fan va texnologiya", 2009 y.
24. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука. 1999 г.
25. И.В. Савельев. Основы теоретической физики. Том 1. М.: Наука. 1992 г.
26. В. Шпольский. Атомная физика. В двух томах. Москва.: Наука. 1992 г.
27. К. Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В двух томах. Москва.: 1998 г.
28. А. И. Наумов. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Москва.: 2000 г.
29. Paul Peter Urone, Roger Hinric "College Physics" Californiya 2002

Internet saytlari

30. www.tdpu.uz
31. www.pedagog.uz
32. www.ziyounet.uz
33. www.edu.uz

I. O'quv fanining dolzarbligi va oliy kasbiy ta'limdagi o'rni

Nazariy fizika fani klassik mexanika, elektrodinamika, kvant mexanika, statistik fizika va termodinamika bo'limlarini o'z ichiga oladi. Ushbu fan 5110200 - fizika va astronomiya o'qitish metodikasi bakalavriat ta'lim yo'nalishida tahsil olayotgan talabalarga nazariy fizika kursi sifatida o'qitiladi.

Nazariy fizika fani fizikaning barcha bo'limlari, oliy matematikaning differentsial va integral hisobi, ehtimollar nazariyasi, matematik statistika, astoronomiya va astrofizika, tabiiy-ilmiy va boshqa fanlar bilan uzviy bog'langan.

Nazariy fizikani o'zlashtirgan talaba makro va mikro dunyodagi moddalarning tuzilishi, ularning tashkil etuvchilarning xususiyatlarini, ulardagi turli jarayonlarning o'tish modellari va nazariyalari haqidagi qonuniyatlarini o'rganadi, yangi axborot texnologiyalarini qo'llab, olgan bilimlari pedagogik va ilmiy faoliyatida qo'llaydi.

Nazariy fizika fanini o'qitishda yangi ta'lim texnologiyalari, elektron plakatlar, tarqatma materiallar, elektron darsliklar va qo'llanmalar, virtual laboratoriyalar, internet ma'lumotlari, lokal tarmoqdagi turli o'quv, ilmiy bilimni nazorat qilish bo'yicha ma'lumotlar jamlamasidan foydalaniladi. Mustaqil ta'lim, aqliy hujum, vaziyatli masalalarni yechish, diskussiya, rolli o'yinlar, referatlar yozish kabi pedagogik usullar bilan fanning o'qitilishi amalga oshiriladi.

II. O'quv fanining maqsadi va vazifasi

Nazariy fizika fanini o'qitishdan maqsad – talabalarda, bo'lajak fizika o'qituvchisiga zarur bo'lgan darajada: makro- va mikrodunyoda modda va maydonning harakat qonunlarini nazariy jihatdan asoslash, moddaning va uni tashkil etgan mikrozarralar xossalari o'rganish, mikro va makroskopik sistemalarning turli holatlar nazariyasi, ularning fizik modellari xaqida nazariy bilim, ko'nikma va malaka shakllantirishdir.

Fanning vazifasi - talabalarga nazariy fizika kursining bo'limlari (klassik mexanika, elektrodinamika, kvant mexanika hamda statistik fizika va termodinamika) doir tushunchalar, qonuniyatlarini o'rgatishdan iborat.

Lagranj tenglamalari, mexanikadagi saqlanish qonunlarini, harakat tenglamalarini integrallashni, finit va infinit potentsial maydonlardagi harakat tebranma harakat qonunlari; muhitlar chegarasidagi elektr maydoni, vakuumda va muhitda elektromagnit maydon xususiyatlarini, Maksvell tenglamalarini, elektrodinamikaning eksperimental asoslarini, elektrostatik potentsiallarni; noaniqlik, moslik, qo'shimchalik kvant prinsiplari, operatorlar, Shredenger tenglamasi va uni yechish metodlari va misollarini, g'alayon nazariyasini; makroskopik sistemaning muvozanat va nomuvozantli holatlari, termodinamik potentsiallar, statistik sistemalarning kvant va klassik xususiyatlari, kvant sistemasiining kanonik va mikrokanonik taqsimoti, ideal gaz xususiyatlari bilishdagi *bilimga*;

- nazariy fizika qonunlarini, teoremlarini, gipoteza va aksiomalarini isbot qila bilish, uning mazmun va mohiyatini to'g'ri tushunib, muayyan misollarni yecha olish kabi *ko'nikma*;

-talaba nazariy fizika kursining bo'limlariga doir amaliy mashg'ulotlarda o'zlashtirilgan barcha mavzular bo'yicha masalalar yechish, seminar uchun

referatlarini tayyorlash, masalalarning hisob-kitob ishlarini o'tkazish, mavzular yuzasidan xulosalar chiqara olish, fizikaviy qonuniyatlarni o'zlashtirish, ularni keying pedagogic faoliyatlarida qo'llash *malakasiga ega bo'lishi kerak*;

III. Asosiy nazariy qism (ma'ruza mashg'ulotlari)

1-MODUL. KLASSIK MEKANIKA

1-mavzu. Nazariy fizika va olam manzarasi

Olamning klassik manzarasi. Nazariy fizika fani maqsad va vazifalari. Gravitatsion, elektromagnit, kuchli va kuchsiz maydonlar. Ularning ta'sir doirasi. Olamning zamonaviy ilmiy konsepsiyasi.

2-mavzu. Fizika qonunlarining simmetriyasi

Simmetriya shartlari. Fizik tizimlarning yuqori va past simmetriyasi. Energiya saqlanish qonunini vaqt birjinsiligi bilan bog'liqligi. Impuls saqlanish qonunini fazo birjinsiligi bilan bog'liqligi. Impuls momentini saqlanish qonunini fazo izotropligi bilan bog'liqligi. Ko'chish, siljish va buralishga nisbatan fizik tenglamalarni invariantligi. Xarakat integrallari.

3-mavzu. Klassik mexikaning asosiy tushunchalari

Absolyut qattiq jism, absolyut erkin zarra, moddiy nuqta modeli, uzluksiz muhit modeli. Mazkur tushunchalarni klassik mexanika masalalarida qo'llash. Ularning qu'lanish doirasi.

4-mavzu. Eng kichik ta'sir prinsipi Lagranj funksiyasi, Lagranj tenglamalari

Klassik mexanikada variation prinsiplari. Ferma prinsipi. Eng kichik ta'sir prinsipini mohiyati. Euler tenglamalari. Absolyut erkin bitta zarra uchun Lagranj funksiyasi. Birinchi turdagi Lagranj tenglamalari.

5-mavzu. Potensial va nopotensial kuchlar uchun Lagranj tenglamalari

Ikkinchi turdagi Lagranj tenglamalari. Potensial kuchlar xossalari. Nopotensial kuchlar xossalari. Ikkinchi turdagi Lagranj tenglamatini tuzish.

6-mavzu. Saqlanish qonunlari va Lagranj tenglamalari

Energiyani saqlanish qonunini birinchi tur Lagranj tenglamasidan keltirib chiqarish. Impuls saqlanish qonunini birinchi tur Lagranj tenglamasidan keltirib chiqarish. Impuls momentini saqlanish qonunini birinchi tur Lagranj tenglamasidan keltirib chiqarish.

7-mavzu. Kichik tebranishlar, erkin va majburiy tebranishlar

Chuzilgan (siqilgan) prujinaning elastiklik energiyasi. Prujining kichik (erkin) tebranishlari uchun Lagranj funksiyasini tuzish. Uning asosida Lagranj tenglamasini tuzish va yechish. Mos ravishda majburiy tebranishlar uchun Lagranj tenglamasini tuzish va yechish. Rezonans shartlarini o'rganish.

VI. Asosiy va qo'shimcha o'quv adabiyotlar hamda axborot manbalari

Asosiy adabiyotlar

1. M.S.Yaxyoev. K. Muminov. Nazariy mexanika. T.: O'qituvchi. 1992y.
2. A.Boydedaev. Maxsus nisbiylik nazariyasi. T.: TDPU. 2001y.
3. B.V.Мултановский. Курс теоретической физики. Классическая физика. М. Наука. 2000 г.
4. R.Bojoev, A. M. Xudayberganov, G. A. Kochetkov. Atom fizikasidan masalalar yechish uchun qo'llanma. Toshkent. Universitet. 1993 y.
5. E.N.Rasulov, U.SH.Begimqulov, K.R.Nasriddinov, SH.X.Ahmadjanova. Kvant fizikadan masalalar to'plami. N.: TDPU. 2004 y.
6. A.Boydedaev. Klassik statistik fizika. T.: O'zbekiston. 2003y.
7. A.Boydedaev. Nomuvozanati statistik fizika asoslari. T.: O'qituvchi, 1992 y.
8. R.Mamatqulov va boshqalar. Statistik fizika va termodinamikadan masalalar to'plami, O'qituvchi, 2000 y.
9. G.X.Xoshimov, R.Ya.Rasulov, N.X.Yo'ldoshev. "Kvant mexanika asoslari". T.: "O'qituvchi", 1999 y.

Qo'shimcha adabiyotlar:

10. **Мирзиёев Ш.М.** Эркин ва фаровон, демократик Ўзбекистон давлатини биргаликда барпо этамиз. Ўзбекистон Республикаси Президенти лавозимига киришиш тантанали маросимига бағишланган Олий Мажлис палаталарининг қўшма мажлисидаги нутқ / Ш.М. Мирзиёев. – Тошкент : Ўзбекистон, 2016. - 56 б.
11. **Мирзиёев Ш.М.** Танқидий таҳлил, қатъий тартиб-интизом ва шахсий жавобгарлик – ҳар бир раҳбар фаолиятининг қундалиқ қондаси бўлиши керак. Мамакатагимизни 2016 йилда ижтимоий-иқтисодий ривожлантиришнинг асосий яқунлари ва 2017 йлга мўлжалланган иқтисодий дастурнинг энг муҳим устувор йўналишларига бағишланган Вазирлар Маҳкамасининг кенгайтирилган мажлисидаги маъруза, 2017 йил 14 январ / Ш.М. Мирзиёев. – Тошкент : Ўзбекистон, 2017. – 104 б.
12. **Мирзиёев Ш.М.** Қонун устуворлиги ва инсон манфаатларини таъминлаш – юрт тарақиёти ва халқ фаровонлигининг гарови. Ўзбекистон Республикаси Конституцияси қабул қилинганнинг 24 йиллигига бағишланган тантанали маросимдаги маъруза. 2016 йил 7 декабр / Ш.М.Мирзиёев. – Тошкент: “Ўзбекистон”, 2017. – 48 б.
13. **Мирзиёев Ш.М.** Буюк келажагимизни мард ва олижаноб халқимиз билан бирга қурашимиз. Мазкур китобдан Ўзбекистон Республикаси Президенти Шавкат Мирзиёевнинг 2016 йил 1 ноябрдан 24 ноябрга қадар Қорақалпоғистон Республикаси, вилоятлар ва Тошкент шаҳри сайловчилари вакиллари билан ўтказилган сайловолди учрашувларида сўзлаган нутқлари ўрин олган. /Ш.М.Мирзиёев. – Тошкент: “Ўзбекистон”, 2017. – 488 б.
14. Ўзбекистон республикаси президентининг фармони. Ўзбекистон республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси

25. Vodorod atomi uchun Shryodinger tenglamalari
26. Pauli prinsipi nima?

Statistik fizika va termodinamika

1. Fenomenologik termodinamika va statistik metodlarning mohiyati nimadan iborat
 2. Nima uchun ko'p sonli zarralardan iborat sistemalarning holatini mexanik yo'l bilan ifodalash mumkin emas
 3. Statistik fizika nima uchun fazoviy fazo fazoviy nuqta statistik ansambl tushunchalari ishlatiladi
 4. Sistemaning holatini makroskopik va mikroskopik ifodalash deganda nimani tushunasiz
 5. Statistik fizikaning matematik asosini qaysi nazariya tashkil qiladi
 6. Sistemaning termodinamik ehtimoli deganda nimani tushunish kerak
 7. Gibbsning mikrokanonik taqsimot qanday sistemaga tegishli
 8. Kanonik taqsimot funksiyasi nima va qanday sistemalarda qo'llaniladi
 9. Ochiq sistemalar uchun qaysi taqsimot funksiyasi qo'llaniladi
 10. Issiqlik va ish bir – biridan nima bilan farq qiladi
 11. Termodinamika I – qonunining ma'nosi nima va u qanday topilgan
 12. Termodinamika I – qonunining issiqlik sig'imi qanday qiling
 13. I – qonunining turli izojarayonlarga tadbiiq qiling
 14. Tabiatdagi qaytar va qaytmas jarayonlar nima. Termodinamika II – qonuni nima uchun kiritilgan
 15. Termodinamik funksiyalar yoki potentsiallar metodikasining mohiyati nimadan iborat
 16. Maksvell munosabatlari nima va undan qanday foydalaniladi
 17. Kimyoviy potentsial tushunchasining ma'nosi qanday
 18. Joul – Tomson effekti nimani ko'rsatadi
 19. Musbat va manfiy effektlarning farqi qanday
 20. Nernst teoremasining mohiyati nimadan iborat
 21. Nernst teoremasiga Plank qanday xissa qo'shgan
 22. Fazo va komponentlar tushunchalarini tarifiqlang
 23. Gibbsning fazolar qoidasi nimani ko'rsatadi
 24. I tur fazoviy o'tishlar nima va uni tarifiqlang
 25. Klapeyron – Klauzius tenglamasi nimani ifodalaydi
 26. Erenfest tenglamalarining ma'nosini tushuntiring
 27. Kritik xolat nima. Uni tushuntiring
 28. Uchlik nuqta deganda nimani tushunish kerak
 29. Entropiya tushunchasi nima va u qanday kirib kelgan
 30. Turli ko'rinishdagi Maksvell tengliklar taqsimotini yozing va tushuntiring
 31. Bolsman taqsimotida barometrik formulani toping
 32. Real gaz uchun xolat integralini xisoblash
 33. Statistik fizikada Van – der – Waals tenglamasini toping
- Mustaqil o'zlashtiriladigan mavzular bo'yicha talabalar tomonidan referatlar tayyorlash va uni taqdimot qilish tavsiya etiladi.

8-mavzu. Markaziy simmetrik maydonda zarra xarakati

Markaziy simmetriyaga ega potentsial maydonlarning xususiyatlari. Elektrostatik, gravitatsion maydonlar uchun Gauss teoremasi. Markaziy simmetrik maydonda zarra xarakati traektoriyalari. Markaziy simmetrik maydonda zarra xarakat integrallari: impuls momenti, to'la energiya. Markaziy simmetrik maydonda zarra xarakat tenglamasi. Ikki jism masalasi.

9-mavzu. Markaziy simmetrik maydonda zarra sochilishi

Rezerford formulasi. Effektiv va to'liq sochilish kesm tushunchasi. Differensial va integral sochilish kesimi. Markaziy simmetrik maydonda zarra sochilishi kesimi. Kulon maydonida zaryad sochilishi kesimi xisoblash.

10-mavzu. Qattiq jism mexanikasi, inersiya momenti tenzori

Uzluksiz muxit taqribi. Uzluksiz muxit uchun N'yuton dinamika qonunlari. Qattiq jismining murakkab xarakati. Qutb tushunchasi. To'g'ri geometrik shaklga ega qattiq jismlarning inersiya momentini nazariy yo'l bilan aniqlash. Qattiq jism inersiya momenti tushunchasi. Qattiq jismining massa markazi.

11-mavzu. Kanonik tenglamalar, Puasson qavslari

Klassik mexanikada kanonik, kontakt va urinma almashitirishlar. Gamilton-Yakobi tenglamalari. Qo'sh fizik kattaliklar. Puasson qavslarini xossalari.

12-mavzu. Zarralar to'qnashishining nazariyasi

Zarralarning elastik va noelastik toqnashuvlari. Zarralarning absolyut elastik va noelastik toqnashuvlari. Tiklanish ko'effitsienti. Ikki zarra to'qnashuvi. Markaziy toqnashish. To'qnashuvlarda saqlanish qonunlari. Massa markazi va laborator sistemalar.

13-mavzu. Relyativistik mexanikaga kirish. Lorens almashitirishlari

Mahsus nisbiylik nazariyasi postulatlari. Yorug'lik tezligini sanoq sistemaga bog'liq emasligi. Yaqin ta'sir tamoyili. Lorens almashitirishlarini keltirib chiqarish. To'rt o'lchovli fazo-vaqt.

14-mavzu. Parametrik rezonans

Rezonans sharti. Mexanik sistemalarda rezonans shartini o'rganish. Diskret mexanik tizimlarda parametrik rezonans bo'lish shartlarini o'rganish. Mos ravishda Lagranj tenglamalarini echish.

15-mavzu. Uzluksiz muhit mexanikasi elementlari

Ideal suyuqliq uchun Bernulli tenglamalarini echish. Bernulli va Eyler tenglamalarini integrallash. Gaz dinamikasi tenglamalari. Nav'e-Stoks tenglamasi.

16-mavzu. Diskret mexanika elementlari

Mexanizmlar va mashinalar ishlash prinsiplari. Bo'lanish turlari. Krivoship-shatunli mexanizmlar. Tasmali uzatishlar. Tishli uzatishlar. Diskret mexanik sistemalar.

17-mavzu. Zarba nazariyasi elementlari
Zarba (kuch) impulsi. Zuriqish. Jismlarning o'ta kuchli to'qnashuvi. Elastik va plastik deformatsiya. Zarba nazariyasining asosiy teoremlari.

18-mavzu. Ko'p erkinlik darajasiga ega mexanik sistemalarning tebranishlari

Sistemani erkinlik darajasini aniqlash usullari. Ikki o'zaro bog'langan mayatniklarni tebranishi. Turg'un tebranishlar. Tebranishlar spektri.

19-mavzu. O'zgaruvchan massali mexanika elementlari

Reaktiv xarakat. Reaktiv xarakat uchun Mesherskiy tenglamasi. Ikki, uch, to'rt va n-bosqichli raketa. Siolkovskiy formulasi.

2-MODUL. ELEKTRODINAMIKA

20-mavzu. Elektrodinamikaga kirish.

Elektrodinamikaning predmeti, ob'ekti, asosiy tushunchasi, matematik apparati

21-mavzu. Elektromagnit o'zaro ta'sir
Elektromagnit o'zaro ta'sir va uning xarakteristikalar. Foton

22-mavzu. Elektr zaryadi va elektromagnit maydon
Elektr zaryad, zaryad zichligi. Vakuumdagi elektromagnit maydon

23-mavzu. Elektromagnit maydonning zaryadli zarraga ta'siri
Elektromagnit maydonning zaryadli zarraga ta'siri. Lorens kuchi

24-mavzu. Elektrodinamikaning eksperimental asoslari
Elektrodinamikaning eksperimental asoslari

25-mavzu. Elektromagnit induksiya hodisasi
Elektromagnit induksiya hodisasi. Maksvell siljish toki

26-mavzu. Elektrodinamikada sababiyat prinsipi
Maksvell-Lorens tenglamalari. Elektrodinamikada sababiyat prinsipi

27-mavzu. Elektromagnit maydon energiyasi
Elektromagnit maydon energiyasi, energiyaning saqlanish qonuni

28-mavzu. Elektromagnit maydon impulsi
Elektromagnit maydon impulsi, impulsning saqlanish qonuni

11.Bio-Savar-Laplas qonunini Kulon qonunidan keltirib chiqarish (magnit maydonning relyativistik xarakteri)

12.Foton – relyativistik zarra. Yulduzlar aberratsiyasi. Doppler effekti

13.Gravitatsiya maydoni va vaqt-fazo metrikasi. Energiya-impuls tenzori. Eynshteyn tenglamasi (isbatsiz)

14.Olamning kengayishi. Xabbl qonuni. Singulyarlik

15.Dipol nurlanish

16.Kulon nurlanish

17.Kvadropol nurlanish

18.Oktupol nurlanish

19.Potensialni multipollarga yoyish

20.Maksvell tenglamalari

21.To'liq tenglamasini Dalamber usulida echish

22.To'liq zonasi

23.Maxsus nisbiylik nazariyasi elementlari

24.Plazma fizikasi elementlari

25.Vektor va tenzor analiz elementlari

Kvant mexanika

1. Atomning qanday modellarini bilasiz va ularni qanday tushuntirasiz

2. Shryodinger tenglamasi qanday yoziladi va u nimani ifodalaydi

3. Absolyut qora jismining nurlanishini tushuntirish uchun Reley Jinslar qanday formulani taklif qilishdi

4. Geizenberg noaniqlik munosabatlari nima va ularning ma'nosi qanday

5. Absolyut qora jismining nurlanishi uchun Vin formulasini yozing va ma'nosini tushuntiring

6. To'liq funksiyaning statistik talqinini tushuntiring

7. Plank, absolyut qora jismining nurlanishini qanday tushuntirdi

8. Qanday tajribalar de Broyl g'oyasining to'g'ri ekanligini tasdiqlaydi

9. De Broyl to'liqini nima va u boshqa to'liqlardan farq qiladimi

10.Plank formulasidan Reley-Jins va Vin formulasini toping

11.Fotoeffekt nima va u kvant mexanikaning rivojlanishida qanday o'rin tutadi

12.Nimaga asoslanib, de Broyl o'zining gipotezasini o'rtaga tashladi

13.Fotoeffekt uchun Eynshteyn tenglamasining metodologik ahamiyati nimadan iborat

14.Kompton effekti nima va u nimani ko'rsatadi

15.Jermer-Devissson tajribasi nimani ko'rsatadi

16.Vodorod atomining spektral seriyalarini chizing

17.Atom tuzilishini tushuntirishda Rezerford tajribasi qanday o'rin tutadi

18.Vodorod atomining Bor nazariyasini tushuntiring

19.Frank-Gers tajribasi nima va uning natijasi nimani ko'rsatadi

20.Eynshteyn kvant mexanikaning rivojlanishiga qanday hissa qo'shgan?

21.Kvant mexanikadagi Puasson kavlari nima va ular nimani ko'rsatadi?

22.Kvant mexanikaning matematik apparati

23.Cheksiz chuqur potentsial o'ra va undagi zarrani o'rganish

24.Kvant sonlari

7. Akustik to'liqin xarakteristikalarini, qaytish va sinish qonunlari
8. To'la mexanik energiya
9. Nuqtaning harakat differensial tenglamalari.
10. Erkin va majburiy tebranma harakat.
11. So'nuvchi tebranishlar. Ishqalanish mavjud xoldagi majburiy tebranishlar.
12. Kepler masalasi.
13. Fizik kattaliklar va xalqaro birliklar sistemasi
14. Samolyot qanotiga ta'sir etuvchi kuchlar
15. Yer aylanishining harakatdagi jismga ta'siri
16. Qattiq jismning qo'zg'almas o'q atrofidagi aylanma harakat dinamikasining differensial tenglamasi.
17. Turli shakldagi jismlarning inersiya momenti uni hisoblash usullari.
18. Sanoq sistemalarini tanlash ko'nikmalari
19. Nochiziqli tebranishlar
20. Rezerford formulasi
21. Nochiziqli tebranishlar
22. Mexanik zo'riqlashlar
23. Eyley tenglamalari
24. Tenzorlar ustida amallar
25. Eyley burchaklari
26. Lagranj tenglamasi va variatsion printsip.
27. Puasson qavslari. Liuvill teoremasi.
28. Kanonik tenglamalar. Gamilton-Yakobi tenglamalari.
29. O'zgaruvchilarni almashtirish. Adiyatik invariantlar.
30. Ta'sir-burchak o'zgaruvchilari va ularning xossalari.
31. Kanonik o'zgaruvchilar. Adiyatik invariantning saqlanish aniqligi.
32. Maxsus xarakat integrallari
33. Laplas teoremasi
34. Stoks formulasini keltirib chiqarish

Elektrodinamika

1. Zaryadlar sistemasining dipol va kvadrupol momentlari
2. Magnit moment va uning xossalari
3. Kechikuvchi va o'zuvchi potentsiallar
4. To'liqin kutblanishi. Dipol nurlanish. Elektromagnit to'liqin fazasining relyativistik invariant miqdorligi
5. Nurlanish reaksiyasi. Nurlanish spektr chizig'ining kengligi
6. Magnitlanish, kutblanish va ularning vektori
7. Skin effekt. Chiziqli o'tkazgichlarda kvazistasionar toklar. Kvazistasionar magnit maydon energiyasi
8. Elektromagnit to'liqinning muhitda tarqalishi va muhitdan qaytishi
9. Dalamber tenglamalarining kovariant ifodasi. Lorens shartining kovariant ifodasi
10. Elektromagnit maydon invariantlari. Elektr va magnit maydonlarni almashtirish

29-mavzu. Elektromagnit maydon potentsiallari
Elektromagnit maydon potentsiallari. Skalyar potentsial

30-mavzu. Elektromagnit maydon potentsiallari
Elektromagnit maydon potentsiallari. Vektor potentsial.

31-mavzu. Statsionar elektromagnit maydon
Statsionar elektromagnit maydon.

32-mavzu. Elektromagnit to'liqlar
Elektromagnit to'liqlar.

33-mavzu. Relyativistik elektrodinamika
4-kattaliklar. Ularning mazmuni. 3-kattaliklar bilan bog'lanishi.

34-mavzu. Relyativistik elektrodinamika
Elektrodinamikaning relyativistik ifodasi.

35-mavzu. Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon
Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon.

36-mavzu. Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon xususiyatlari
Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon xususiyatlari.

37-mavzu. Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon energiyasi
Modda (muhit)dagi elektromagnit maydon energiyasi.

38-mavzu. Modda (muhit) dagi elektromagnit maydon impuls
Modda (muhit) dagi elektromagnit maydon impulse.

3-MODUL. KVANT MEXANIKA

39-mavzu. Kvant mexanika eksperimental asoslari
Kvant mexanika eksperimental asoslari. Klassik mexanikaning qo'llanilish chegaralari va kvant mexanikaning paydo bo'lishi.

40-mavzu. Kvant fizikaning vujudga kelishi-issiqlik nurlanishi
Kvant fizikaning vujudga kelishi-issiqlik nurlanishi. Reley-Jins, Vin va Plank formulalari.

41-mavzu. Yorug'likning korpuskulyar nazariyasi
Yorug'likning korpuskulyar nazariyasi. Fotoeffekt va uning qonunlari

42-mavzu. Yorug'lik kvanti-fotonning moddalarda sochilishi

Yorug'lik kvanti-fotonning moddalarda sochilishi. Kompton effekti. Atomning barqarorligi, Spektral seriyalar va energetik sathlar.

43-mavzu. Vodorodsimon atomlar uchun Bor modeli
Vodorodsimon atomlar uchun Bor modeli. Yadro harakatiga tuzatish. Bor nazariyasining eksperimental tasdiqi

44-mavzu. Zararlarning to'liq xossalari
Zararlarning to'liq xossalari. De-Broyl g'oyasi va to'liqini. To'liq funksiya va uning ma'nosi.

45-mavzu. Geyzenberg noaniqlik munosabatlari
Geyzenbergning noaniqlik munosabatlari.

46-mavzu. Kvant mexikaning matematik apparati
Chiziqli va qo'shma operatorlar. Ermit operatorlarning xususiy funksiyalari va qiymatlari. Ularning fizik ma'nosi va o'rtacha qiymati.

47-mavzu. O'rtacha qiymat va xususiy funksiya va xususiy qiymat
O'rtacha qiymat va xususiy funksiya va xususiy qiymat. Operatorlar

48-mavzu. Shryodigerning stasionar va nostaionar tenglamalari
Shryodigerning stasionar va nostaionar tenglamalari, sababiyat prinsipi, to'liq funksiyaning statistik talqini. Ehtimollar zichligining uzluksizlik tenglamasi.

49-mavzu. Klassik mexanika-kvant mexikaning chegaraviy xoli sifatida
Klassik mexanika-kvant mexikaning chegaraviy xoli sifatida. Puasson qavslari. Saqlanish qonunlarining fazo, vaqt simmetriyasi bilan bog'lanishi.

50-mavzu. Bir o'lichamli fazoda-Shryodigerning tenglamalarini yechish
Bir o'lichamli fazoda-Shryodigerning tenglamalarini yechish. Potensial o'ra masalasi. Garmonik ossilyator. Potensial to'siq va tunnel effekt

51-mavzu. Vodorod atomining kvant mexanik nazariyasi
Vodorod atomining kvant mexanik nazariyasi. Vodorod atomi uchun Shryodigerning tenglamasi va uni yechish.

52-mavzu. Shryodigerning radial tenglamasi
Rotator. Shryodigerning radial tenglamasi. Vodorod atomi; to'liq funksiyalar; energetik spektrlar. Kvant sonlari va ular yordamida holatlarni tavsiflash. Atom tuzilishi. Atomdagi "elektron buluti".

53-mavzu. Spin. Shtern-Gerlax tajribasi
Spin. Shtern-Gerlax tajribasi. Paulining ma'n etish prinsipi. Kvant sonlari. Mendeleev elementlar davriy sistemasi

2. Kvant mexikaning matematik apparati.
3. O'rtacha qiymat va xususiy funksiya va xususiy qiymat.
4. Operatorlar
5. Zararlarning to'liq xossalari. De-Broyl formulalari va to'liqini
6. Bir o'lichamli fazoda- Shryodigerning tenglamalarini yechish.
7. Potensial o'ra masalasi
8. Vodorod atomining kvant mexanik nazariyasi.
9. Vodorod atomi uchun Shryodigerning tenglamasi va uni yechish
10. Eynshteynning nurlanish nazariyasi va uning koefitsientlari.
11. Lazerlar
12. Spin. Shtern-Gerlax tajribasi. Paulining ma'n etish prinsipi
13. Zaralar sistemasining kvant mexanikasi. Fermionlar va bozonlar.

Statistik fizika va termodinamika

1. Statistik fizikaning asosiy tushunchalari: o'rtacha kattaliklar, mikroskopik holat va statistik ansambl, taqsimot funksiyasi, termodinamik ehtimollik
2. Gibbsning mikrokanonik, kanonik va katta kanonik taqsimot funksiyalari, holat integrali
3. Statistik termodinamikani asosiy munosabati. Issiqlik va ish. Termodinamikaning I – qonuni va uning tatbiqi. Holat tenglamalari
4. Qaytar va qaytmas jarayonlar. Termodinamikaning II–qonuni. Entropiya. Termik va kalorik holat tenglamalari orasidagi bog'lanish
5. Kanonik taqsimotdan Maksvell-Bolsman taqsimotini topish. Maksvell tezliklar taqsimoti. Barometrik formula
6. Fazalar muvozanati. Gibbsning fazalar qoidasi
7. Birinchi va ikkinchi tur fazaviy o'tishlar. Klapeyron-Klauzius va Erenfest tenglamalari. Kritik holat. Uchlik nuqta
8. Real gazlar statistikasi. Van-der-Vaals tenglamasi
9. Kvant statistik fizika. Fermionlar va bozonlar. Fermi-Dirak va Boze-Eynshteyn taqsimot funksiyalari
10. Fermi-Dirak statistikasining tatbiqi. Zonalar nazariyasi. Past temperaturali ob'ektlar
11. Boze-Eynshteyn statistikasining tatbiqi. Fotonlar. Plank formulalari
12. Qattiq jismlarning issiqlik sig'imi. Eynshteyn va Debay nazariyalari. Fotonlar
13. Fluktuatsiya nazariyasi. Termodinamik parametrlarning fluktuatsiyasi

V. Mustaqil ta'lim va mustaqil ishlar

Mustaqil ta'lim uchun tavsiya etiladigan mavzular:

Klassik mexanika

1. Klassik mexanikada saqlanish qonunlari va kosmik tezliklar
2. Jismlarning suyuqliklarda suzish va cho'kish shartlari
3. Inersial sanoq sistemasi va nisbiylik prinsipi
4. Moddiy nuqtalar sistemasi mexanikasi
5. Tebranma xarakat va uning tenglamasi
6. Muhitda tebranma harakat

3. Statistika termodinamikani asosiy munosabati. Issiqlik va ish. Termodinamikaning I – qonuni. Holat tenglamalari va ular orasidagi bog'lanish
4. Kanonik taqsimotdan Maksvell-Bolsman taqsimotini topish. Maksvell tezliklar taqsimoti. Barometrik formula
5. Real gazlar statistikasi. Van-der-Vaals tenglamasi
6. Boze-Eynshayn statistikasining tabiqi. Fotonlar. Plank formulalari
7. Qattiq jisimlarning issiqlik sig'imi. Eynshayn va Debay nazariyalari. Fotonlar
8. Fluktuatsiya nazariyasi. Termodinamik parametrlarning fluktuatsiyasi
9. Broun xarakati. Eynshayn-Smoluxovskiy tenglamasi
10. Nomuvozanatli holat nazariyasi asoslari. Yahlit muxitdagi saqlanish qonunlari

Seminar mashg'ulotlar bo'yicha ko'satma va tavsiyalar.

Seminar mashg'ulotlar uchun quyidagi mavzular tavsiya etiladi:

Klassik mexanika

1. Fizika qonunlarining simmetriyasi
2. Eng kichik ta'sir prinsipi Lagranj funksiyasi, Lagranj tenglamalari
3. Saqlanish qonunlari va Lagranj tenglamalari
4. Markaziy simmetrik maydonda nuqta harakat
5. Kulon maydonida zaryad harakati
6. Kuchsiz tortish maydoni
7. Kichik tebranishlar
8. Bir o'lchamli erkin tebranishlar. Majburiy tebranishlar.
9. So'nuvchi tebranishlar. Ishqalanish mavjud xoldagi majburiy tebranishlar.
10. Puasson qavslari. Liuvill teoremasi.
11. Gamilton-Yakobi tenglamalari
12. O'zgaruvchilarni almashtirish. Adiyatik invariantlar.
13. Zarraning sochilish kesimi

Elektrodinamika

1. Elektrodinamikaning predmeti, ob'ekti, asosiy tushunchasi, matematik apparati
 2. Vakuumdagi elektromagnit maydon
 3. Elektromagnit maydon energiyasi, zichligi va energiyasi oqimining zichligi
 4. Energiyaning saqlanish qonuni. Elektromagnit maydon impulsi.
 5. Elektromagnit induksiya hodisasi. Maksvell siljish toki
 6. Elektromagnit maydon potentsiallari. Skalyar va vektor potentsiallar
 7. Elektrodinamikaning relyativistik ifodasi
 8. Modda (muhit) dagi elektromagnit maydon
 9. Modda (muhit) dagi elektromagnit maydon energiyasi va impulsi
- Kvant mexanika**
1. To'liq funksiyaning statistik talqini va extimolyat

54-mavzu. Zarralar sistemasining kvant mexanikasi

Zarralar sistemasining kvant mexanikasi. Fermionlar va bozonlar. Vodorod molekulasining hosil bo'lishi. Almashinuv energiyasi. Aynan bir hil zarralar sistemasi. Zarralarning aynanlik prinsipi. Spin va statistika orasidagi bog'lanish. Simmetrik va antisimmetrik holatlar. Pauli prinsipi. Kvant mexanikaning taqribiy metodlari.

55-mavzu. Relyativistik kvant mexanika asoslari.

Relyativistik kvant mexanika haqida tushuncha. Olamning ilmiy manzarasi haqida.

4-MODUL. STATISTIK FIZIKA VA TERMODINAMIKA

52-mavzu. Statistika fizika va termodinamikaning predmeti va metodi

Statistika fizika va termodinamikaning predmeti va metodi: a) sistema holatini termodinamik tavsiflash; b) sistema holatini dinamik tavsiflash; v) muvozanatli va nomuvozanatli holatlar.

53-mavzu. Makroskopik sistema va uning turlari.

Makroskopik sistema va uning turlari. Mikroskopik parametrlar. Muvozanatli va nomuvozanatli holatlar. Sistemaning mikroholatlari. Fazaviy fazo, fazaviy nuqta, fazaviy trayektoriya.

54-mavzu. Statistika fizikaning asosiy tushunchalari

Statistika fizikaning asosiy tushunchalari va prinsiplari. Vaqt va ansambl bo'yicha o'rtachalash. Statistika fizikadagi holat. Fazaviy fazo, fazaviy nuqta, fazaviy traektoriya.

55-mavzu. Fluktatsiya. Muvozanatli holat.

Fluktatsiya. Muvozanatli holat. Termodinamik ehtimollik. Statistika vazn. Taqsimot funksiyalari.

56-mavzu. Gibbsning mikrokanonik, kanonik va katta kanonik taqsimot funksiyalari

Gibbsning mikrokanonik, kanonik va katta kanonik taqsimot funksiyalari, holat integrali.

57-mavzu. Statistika termodinamikani asosiy munosabati

Termodinamik taqsimot. Parametrlar. Issiqlik va ish, ichki energiya. Entropiya.

58-mavzu. Termodinamikaning birinchi qonuni. Holat tenglamalari.

Termodinamikaning birinchi qonuni; Holat tenglamalari. Qaytar va qaytmaz jarayonlar. Sikllar.

59-mavzu. Nomuvazanatli, qaytmas jarayonlar; Jarayonlarning qaytuvchanlik va qaytmaslik shartlari.

Nomuvazanatli, qaytmas jarayonlar; Jarayonlarning qaytmaslik shartlari. Termodinamikaning ikkinchi qonuni. Ikkinchi qonunning miqdoriy munosabati.

60-mavzu. Gibbsning umumiy formulasi.

Gibbsning umumiy formulasi. Termodinamik potentsiallar ichki energiya va uning o'zgarishi. Erkin energiya va uning o'zgarishi.

61-mavzu. Entalpiya. Gibbs va Gelmhols termodinamik potentsiallari.

Entalpiya. Gibbs va Gelmhols termodinamik potentsiallari. Kimyoviy potentsial. Termodinamikaning uchinchi qonuni. Nernst teoremasi. Past temperaturalarini olish metodlari.

62-mavzu. Gomogen va geterogen sistemalar. Fazaviy o'tishlar.

Gomogen va geterogen sistemalar. Fazaviy o'tishlar. Klapeyron-Klauzius tenglamasi. Birinchi va ikkinchi tur fazaviy o'tishlar. Ideal gaz. Eng katta ehtimoliy taqsimot. Maksvell taqsimoti. Termodinamik parametrlar orasida bog'lanish.

63-mavzu. Maksvell-Boltsman taqsimoti. Barometrik formula

Maksvell-Boltsman taqsimoti. Barometrik formula. Real gaz. Xolat tenglamasi; Van-der-Vaals tenglamasi. Energiyaning teng taqsimoti qonuni.

64-mavzu. Kvant statistik fizika. Mikroholat. Fermionlar. Bozonlar.

Kvant statistik fizika. Mikroholat. Fermionlar. Bozonlar. Fermi-Dirak va Boze-Eynshteyn statistiklari. Elektron sistema uchun aynish temperaturasi. Plank formulasi. Reley-Jins qonuni. Vin qonuni. Stefan-Boltsman qonuni. Dyulong-Pji qonuni.

65-mavzu. Eynshteyn nazariyasi. Debay nazariyasi. Fononlar.

Eynshteyn nazariyasi. Debay nazariyasi. Fononlar. Fluktuatsiya nazariyasi. Termodinamik parametrlar fluktuatsiyalari. Broun harakati.

66-mavzu. Fluktuatsion-dissipatsion teorema. Fazaviy korrelyatsiya.

Fluktuatsion-dissipatsion teorema. Fazaviy korrelyatsiya. Boltsmannning kinetik tenglamasi va uni relaksatsiya vaqti yaqinlashish uslubida yechish.

IV. Amaliy mashg'ulotlar bo'yich ko'satma va tavsiyalar

Amaliy mashg'ulotlar uchun quyidagi mavzular tavsiya etiladi:

Klassik mexanika

1. Bir to'g'ri chiziqdagi kuchlar
2. Tekislikdagi kuchlar sistemasi
3. Fazodgi kuchlar sistemasi
4. Harakat turlari

5. Harakat tenglamalarini tuzish
6. Harakat tenglamalarini yechish
7. Lagranj tenglamalarini olishga doir masalalar yechish
8. Lagranj tenglamalarini olishga doir masalalar yechish
9. Bir o'lehamli erkin tebranishlarga doir masalalar yechish.
10. Majburiy tebranishlar doir masalalar yechish.
11. Puasson qavslarining kanonik invariant sifatida ishlatilishiga doir masalalar yechish.

12. Eng kichik ta'sir prinsipiga doir masalalar yechish
13. Kepler masalasini ta'sir-burchak o'zgaruvchilari orqali o'rganishga doir masalalar yechish.

Elektrodinamika

1. Lorens kuchi va siklotron chastotaga doir misollar
2. Kulon va Bio-Savar-Laplas qonunlariga doir misollar
3. Faradey elektroliz qonunlariga doir misollar
4. Stasionar toklar maydoniga doir misollar
5. Zaryadlar sistemasiga doir misollar
6. Nurlanish chizigining kengligiga doir misollar
7. Kirxgoff qoidalariga doir misollar
8. Tezliklarni qo'shishga doir misollar
9. Vaqt va uzunlik mashtablari nisbiyligiga doir misollar
10. Eynshteyn formulasi $E = mc^2$ tadbqiqiga doir misollar

Kvant mexanika

1. Kvant fizikaning vujudga kelishi issiqlik nurlanishi. Reley-Jins, Vin va Plank formulalari
2. Yorug'lik kvanti- foton ning moddalarda sochili shi. Kompton effekti
3. Spektral seriyalar va energetik sathlar
4. Vodorodsimon atomlar uchun Bor modeli.
5. Yadro harakatiga tuzatish. Bor nazariyasining eksperimental tasdig'i.
6. Zararlarning to'liqin xossalari. De-Broyl formulalari va to'liqini
7. To'liqin funksiyaning statistik talqini va extimolyat.
8. Kvant mexikaning matematik apparati. O'rta qiyamat va xususiy funksiya va xususiy qiyamat. Operatorlar.
9. Vodorod atomining kvant mexanik nazariyasi.
10. Vodorod atomi uchun Shryodinger tenglamasi va uni yechish
11. Eynshteynning nurlanish nazariyasi va uning koeffitsientlari. Lazerlar
12. Kvant sonlari. Mendelev elementlar davriy sistemasi.
13. Geliy atomi va vodorod molekulasini

Statistik fizika va termodinamika

1. Statistik fizikaning asosiy tushunchalari: o'rta katta kichiklar, mikroskopik holat va statistik ansambl, taqsimot funksiyasi, termodinamik ehtimollik va uni hisoblash
2. Gibbsning mikrokanonik, kanonik va katta kanonik taqsimot funksiyalari, holat integrali

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O‘RTA MAXSUS TA’LIM VAZIRLIGI

AJINIYOZ NOMIDAGI NUKUS DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI

FIZIKA-MEHNAT FAKULTETI

Ro‘yxatga olindi:

№__BD 5110200 -

2020-. «__» _____

«TASDIQLAYMAN»

O‘quv ishlari bo‘yicha prorektor
_____ doc. M. Jumamuratov

«__» _____2020-yil

NAZARIY FIZIKA (ELEKTRODINAMIKA)

fanining

ISHCHI FAN DASTURI

Bilim sohasi: 100000 - Gumanitar

Ta’lim sohasi: 110000 - Pedagogika

Ta’lim yo‘nalishi: 5110200 - Fizika va astronomiya o‘qitish metodikasi

No.	Mashg‘ulot turi	Ajratilgan soat ko‘lami	Semestr	
			V	VI
1	Ma’ruza	34	34	
2	Amaliyot	22	22	
3	Seminar	24	24	
4	Mustaqil ta’lim	54	54	
	Jami auditoriya soatlar	80	80	
	Jami o‘quv soatlar	134	134	

Nukus – 2020

Fanning ishchi fan dasturi o‘quv, ishchi o‘quv reja va o‘quv dasturiga muvofiq ishlab chiqildi.

Tuzuvchilar:

Yavidov B. “Fizika o‘qitish metodikasi” kafedrasida dotsenti

Taqrizchilar:

Atashov B. “Fizika o‘qitish metodikasi” kafedrasida dotsenti

Turdanov K. “Fizika o‘qitish metodikasi” kafedrasida dotsenti

Fanning ishchi o‘quv dasturi “Fizika o‘qitish metodikasi” kafedrasining 2020- yil «____» - _____ dagi № ____ - sonli yig‘ilishida muhokamadan o‘tgan va fakultet kengashida muhokama qilish uchun tavsiya etilgan.

Kafedra mudiri:

Kamalov A.

Fanning ishchi o‘quv dasturi Fizika-mehnat fakulteti Kengashida muhokama etilgan va foydalanishga tavsiya qilingan (2020-yil «____» _____ № __ - sonli bayonnoma).

Fakultet kengashi raisi:

Ibragimov B.

Fanning ishchi o‘quv dasturi Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti kengashida ko‘rib chiqilgan va tasdiqlangan (2020-yil “____” _____ dagi ____ sonli majlis bayoni).

Kelishildi: O‘quv-uslubiy boshqarma boshlig‘i

_____Abdiev A

Kirish

“Nazariy fizika” fani Klassik mexanika, Elektrodinamika, Kvant mexanikasi, Statistik fizika va termodinamika bo‘limlarini o‘z ichiga oladi. Ushbu fan 5110200 - fizika va astronomiya o‘qitish metodikasi bakalavriat ta‘lim yo‘nalishida tahsil olayotgan talabalarga “Nazariy fizika kursi” sifatida o‘qitiladi.

Fanning maqsad va vazifalari

Nazariy fizika kusining "Elektrodinamika" bo‘limini o‘qitishdan maqsad – talabalarda, bo‘lajak fizika o‘qituvchisiga zarur bo‘lgan darajada: makro va mikro dunyoda modda va maydonning harakat qonunlarini nazariy jihatdan asoslash, moddaning va uni tashkil etgan mikrozararalar xossalari o‘rganish, mikro va makroskopik sistemalarning turli holatlari nazariyasi, ularning fizik modellari haqida nazariy bilim, ko‘nikma va malaka shakllantirishdir.

Fanning vazifasi - studentlarga Nazariy fizika kursining "Elektrodinamika" bo‘limiga doir eng kam ta‘sir prinsipi, elektromagnit maydon uchun Eyler-Lagranj tenglamalari, elektr va magnit hodisalaridagi saqlanish qonunlari, elektromagnit maydoni harakati tenglamalari va ularni integrallash, muhitlar chegarasidagi elektr va magnit maydonlari, vakuumda va muhitda barqaror va o‘zgaruvchan elektromagnit maydon xususiyatlari, Maksvell tenglamalari, elektrodinamikaning eksperimental asoslari, elektromagnit maydonining elektrostatik (skalyar) va magnit (vektor) potentsiallari; o‘zgarmas va o‘zgaruvchan tok qonuniyatlari, kvazibarqaror toklar va maydonlar, muhitlarning elektron nazariyasi, relyativistik kinematika va dinamikasi elementlari, 4- o‘lchamli makon-zamon noevklid fazosi, elektrodinamika qonun va formulalari (zaryadning saqlanish qonuni, Maksvel tenglamalari) ning 4-shaklda yozilishi, elektromagnit maydonining 4-potensial, Minkovskiy tenglamasi, elektromagnit maydonda zaryad harakati tenglamasining Lagranj va Gamilton shakllari, nurlanish kuchi bosimi, elektromagnit maydoni energiyasi va impulsi, energiya-impuls tenzori, umumiy nisbiylik nazariyasi elementlari, gravitatsiya maydoni va 4-makon-zamon fazo metrikasi, ekvivalentlik prinsipi, Eynshteyn tenglamasi, umumiy nisbiylik nazariyasini tasdiqlovchi omillar, olam modellari, Xabbl qonuni va singulyarlik kabi hodisalar haqida to‘laqonli axborot berish, ularning mohiyatini ochib berish va o‘rgatishdan iborat.

Fan bo‘yicha talabaning malakasiga qo‘yiladigan talablar

Kursni o‘zlashtirishi jarayonida amalga oshiriladigan masalalar doirasida student

moddalarning magnit xossalari; dipol va uning xossalari; elektromagnit to‘lqinlarning qutblanishi; umumiy nisbiylik nazariyasi asoslari; ekvivalentlik prinsipi; Eynshteyn tenglamasi *to‘g‘risida tasavvurga ega bo‘lishi*;

Maksvell tenglamalarining eksperimental asoslari; diamagnetiklar, diamagnetizm; paramagnetiklar, paramagnetizm; ferromagnetiklar, ferromagnetizm; elektromagnit maydon energiyasi zichligi; maxsus nisbiylik nazariyasi postupatlari; vakuumdagi elektromagnit maydonning Maksvell tenglamalari; muhitdagi elektromagnit maydonning Maksvell tenglamalari; elektromagnit maydonning skalyar va vektor parametrlarini *bilishi va ulardan foydalana olishi*;

magnit moment; to‘rt o‘lchamli fazo; to‘rt o‘lchamli tezlik; to‘rt o‘lchamli impulsni; Maksvell tenglamalarining fizik ma‘nosi; Doppler effekti; massa bilan energiya orasida bog‘lanishni tushunish *ko‘nikmalariga ega bo‘lishi lozim*;

O‘quv rejasidagi boshqa fanlar bilan bog‘liqligi

Nazariy fizika fani fizikaning barcha bo‘limlari, oliy matematikaning differentsial va integral hisobi, ehtimollar nazariyasi, analitik geometriya, vektorlar va tenzorlar tahlili kursi, matematik statistika, astronomiya va astrofizika, tabiiy-ilmiy va boshqa fanlar bilan uzviy bog‘langan.

Fanni o'qitishda zamonaviy axborot va pedagogik texnologiyalar

“Nazariy fizika” fanini o'qitishda yangi ta'lim texnologiyalari, elektron plakatlar, tarqatma materiallar, elektron darsliklar va qo'llanmalar, virtual laboratoriyalar, internet ma'lumotlari, lokal tarmoqdagi turli o'quv, ilmiy bilimni nazorat qilish bo'yicha ma'lumotlar jamlamasidan foydalaniladi. Mustaqil ta'lim, aqliy hujum, vaziyatli masalalarni yechish, dissкусиya, rolli o'yinlar, referatlar yozish kabi pedagogik usullar bilan fanning o'qitilishi amalga oshiriladi.

Ta'lim texnologiyasi insoniylik tamoyillariga tayanadi. Falsafa, pedagogika va psixologiyada bu yo'nalishning o'ziga xosligi talabning individualligiga alohida e'tibor berish orqali namoyon bo'ladi. Shulardan kelib chiqqan holda «Elektrodinamika» kursining ta'lim texnologiyalarini loyihalashtirishda quyidagi asosiy konseptual yondashuvlarga e'tibor berish kerak.

- *Ta'limning shaxsga yo'naltirilganligi.* O'z mohiyatiga ko'ra, bu yo'nalish ta'lim jarayonidagi barcha ishtirokchilarning to'laqonli rivojlanishini ko'zda tutadi. Bu esa Davlat ta'lim standarti talablariga rioya qilgan holda o'quvchining intellektual rivojlanishi darajasiga yo'naltirilib qolmay, uning ruhiy-kasbiy va shaxsiy xususiyatlarini hisobga olishni ham anglatadi.

- *Tizimli yondashuv.* Ta'lim texnologiyasi tizimning barcha belgilarini o'zida mujassam qilishi zarur: jarayonning mantiqiyliigi, undagi qismlarning o'zaro aloqadorligi, yaxlitligi.

- *Amaliy yondashuv.* Shaxsda ish yuritish xususiyatlarini shakllantirishga ta'lim jarayonini yo'naltirish; o'quvchi faoliyatini faollashtirish va intensivlashtirish, o'quv jarayonida uning barcha layoqati va imkoniyatlarini, sinchkovligi va tashabbuskorligini ishga solishni shart qilib qo'yadi.

- *Dialogik yondashuv.* Ta'lim jarayonidagi ishtirokchi sub'yektlarning psixologik birligi va o'zaro hamkorligini yaratish zaruratini belgilaydi. Natijada esa, shaxsning ijodiy faolligi va taqdimot kuchayadi.

- *Hamkorlikdagi ta'limni tashkil etish.* Demokratiya, tenglik, sub'yektlar munosabatida o'qituvchi va talabning tengligi, maqsadini va faoliyat mazmunini birgalikda aniqlashni ko'zda tutadi.

- *Muammoli yondashuv.* Ta'lim jarayonini muammoli holatlar orqali namoyish qilish asosida o'quvchi bilan birgalikdagi hamkorlikni faollashtirish usullaridan biridir. Bu jarayonda ilmiy bilishning ob'yektiv ziddiyatlarini aniqlash va ularni hal qilishning dialektik tafakkurni rivojlantirish va ularni amaliy faoliyatda ijodiy ravishda qo'llash ta'minlanadi.

- *Axborot berishning eng yangi vosita va usullaridan foydalanish,* ya'ni o'quv jarayoniga kompyuter va axborot texnologiyalarini jalb qilish. Yuqoridagi konseptual yondashuv va «Elektrodinamika» fanining tarkibi, mazmuni, o'quv axborot hajmidan kelib chiqqan holda o'qitishning quyidagi usul va vositalari tanlab olindi.

- *O'qitish usullari va texnikasi:* muloqot, keys stadi, muammoli usul, o'rgatuvchi o'yinlar, “aqliy hujum”, insert, “BBB” (Bilaman, bilmoqchiman, bildim), “Birgalikda o'rganamiz”, pinbord, ma'ruza (kirish ma'ruzasi, vizual ma'ruza, tematik, ma'ruza-konferensiya, aniq holatlarni yechish, avvaldan rejalashtirilgan xatoli, sharhlovchi, Yakuniy).

- *O'qitishni tashkil qilish shakllari:* frontal, kollektiv, guruh, dialog va o'zaro hamkorlikka asoslangan.

- *O'qitish vositalari:* odatdagi o'qitish vositalari (darslik, ma'ruza matni, tayanch konspekti, kodoskop) dan tashqari grafik organayzerlar, kompyuter va axborot texnologiyalari.

- *O'zaro aloqa vositalari:* savol-javob orqali, elektron maktub orqali, nazorat (kontrol ish, test, yozma ish) natijalarining tahlili asosida o'qitishning diagnostikasi (tashxisi).

- *Boshqarishning usuli va vositalari.* O'quv mashg'ulotini texnologik xarita ko'rinishida rejalashtirish o'quv mashg'ulotining bosqichlarini belgilab, qo'yilgan maqsadga erishishda talaba va o'qituvchining hamkorlikdagi faoliyati talabalarning auditoriyadan tashqari mustaqil ishlarini aniqlab beradi.

- *Monitoring va baholash.* O'quv mashg'uloti va butun kurs davomida o'qitish natijalarini kuzatib borish, talaba faoliyatini va uning o'zlashtirishini belgilangan tartibda joriy, oraliq va yakuniy nazoratlar orqali yil davomida reyting asosida baholab borish. Kursning xususiyatlaridan kelib chiqqan holda studentning reyting bali asosan og'zaki savol-javob, masala yechish, o'tilgan mavzularini tushuntirib berish, formulalarni keltirib chiqarish va ularni o'qiy olish hamda qonunlarni talaffuz etish kabi mezonlar asosida aniqlanadi.

Asosiy qism: Fanning uslubiy jihatdan uzviy ketma-ketligi

Asosiy qismda (ma'ruza) fanning mavzulari mantiqiy ketma-ketlikda keltiriladi. Har bir mavzuning mohiyati asosiy tushunchalar va tezislar orqali ochib beriladi. Bunda mavzu bo'yicha talabalarga DTS asosida yetkazilishi zarur bo'lgan bilim va ko'nikmalar to'la qamrab olinishi kerak. Asosiy qism sifatiga qo'yiladigan talab mavzularning dolzarbligi, ularning ish beruvchilar talablari va ishlab chiqarish ehtiyojlariga mosligi, mamlakatimizda bo'layotgan ijtimoiy-siyosiy va demokratik o'zgarishlar, iqtisodiyotni erkinlashtirish, iqtisodiy-huquqiy va boshqa sohalaridagi islohatlarning ustuvor masalalarini qamrab olishi hamda fan va texnologiyalarning so'ngi yutuqlari e'tiborga olinishi tavsiya etiladi.

“Nazariy fizika” (Elektrodinamika) fani bo'yicha ma'ruza mashg'ulotlarning kalendar tematik rejası

No	Ma'ruza mavzulari	Ajratilgan soat
1	Maksvell tenglamalari. Gerts tajribasi.	2
2	Elektromagnit to'liqlarni modulyatsiyalash. Elektromagnit to'liqlar shkalasi. Zamonaviy aloqa vositalari (radio, televidenie, radiotelefoniya, lazer nurlari vositasidagi axborotlarni uzatish, axborotlarni sonli tarzda uzatish). Maksvell siljish toki. Vakuumdagi elektromagnit maydon. Elektromagnit maydon potentsiallari. Kalibrli invariantlik	4
3	Elektromagnit maydon energiyasi, zichligi va energiyasi oqimining zichligi. Energiyaning saqlanish qonuni. Elektromagnit maydon impulsi va potentsiali.	2
4	Puasson tenglamalari, yechimi. Zaryadlar sistemasining hajm bo'yicha taqsimlanishi, ularning katta masofadagi potentsiali. Tinchlikdagi zaryadlar sistemi energiyasi. Elektrostatik maydon energiyasining zichligi.	4
5	Zaryadlar sistemasining dipol va kvadrupol momentlari. Vektor potentsial. Statsionar toklar magnit maydoni.	2
6	Magnit moment va uning xossalari. Kechikuvchi potentsiallar. O'zgaras elektr va magnit maydonlarida zaryadlarning xarakati. To'liq tenglamasi	2
7	Elektromagnit to'liqlar va ularning tarqalishi. To'liq qutblanishi. Dipol nurlanish.	2
8	Elektromagnit to'liq fazasining relyativistik invariant miqdorligi. Nurlanish intensivligi. Oddiy nurlatuvchi sistemalar. Nurlanish reaksiyasi. Nurlanish spektr chizig'ining kengligi. Maksvell-Lorents tenglamalari. Mikroskopik maydon. Magnitlanish, qutblanish va ularning vektori. Muhit uchun Maksvell tenglamasi.	4
9	Chegaraviy shartlar. O'zgaras tok magnit momenti. Skin effekt. Chiziqli o'tkazgichlarda kvazistatsionar toklar. Kvazistatsionar magnit maydon energiyasi. Yuqori chastotali elektromagnit maydon.	2
10	Elektromagnit to'liqning muhitda tarkalishi va muxitdan qaytishi. Dalamber tenglamalarining kovariant ifodasi. Lorents shartining kovariant ifodasi. Elektromagnit maydon antisimmetrik tenzori. Maksvell tenglamalarining kovariant ifodasi	4
11	Elektromagnit maydon invariantlari. Elektr va magnit maydonlarni almashtirish. Foton – relyativistik zarra. Yulduzlar aberratsiyasi	2
12	Doppler effekti. Noinertsial sanoq sistema. Gravitatsiya. Gravitatsion va inert massa. Gravitatsiya maydoni va vaqt-fazo metrikasi. Energiya-impuls tenzori. Enshteyn tenglamasi (isbotsiz). Umumiy nisbiylik nazariyasini tasdiqlovchi omillar. Olamning ochiq va yopiq modellari. Olamning kengayishi. Xabbl qonuni. Singulyarlik..	4
Jami		34

Amaliy mashg'ulotlarni tashkil etish bo'yicha ko'rsatma va tavsiyalar

Amaliy mashg'ulotda talabalar asosiy mavzularga oid masalalar yechishni o'rganadilar. Amaliy mashg'ulotlarni tashkil etish bo'yicha kafedra pedagoglari tomonidan ko'rsatma va tavsiyalar ishlab chiqiladi. Unda talabalar asosiy ma'ruza mavzulari bo'yicha olgan bilim va ko'nikmalarini amaliy

masalalar yechish orqali yanada boyitadilar. Shuningdek, darslik va o'quv qo'llanmalar asosida talabalar bilimlarini mustahkamlashga erishish, tarqatma materiallardan foydalanish, ilmiy maqolalar va tezislarni chop etish orqali talabalar bilimini oshirish, masalalar yechish, mavzular bo'yicha ko'rgazmali qurollar tayyorlash va boshqalar tavsiya etiladi.

“Nazariy fizika” (Elektrodinamika) fani bo'yicha amaliy mashg'ulotlarning kalendar tematik rejasi

No	Amaliy mashg'ulotlar mavzulari	Ajratilgan soat
1	Maksvell tenglamalari.	4
2	Gerts tajribalari Elektromagnit to'lqinlarni modulyatsiyalash	2
3	Zamonviy aloqa vositalari (radio, televidenie, radiotelefoniya, lazer nurlari vositasidagi axborotlarni uzatish, axborotlarni sonli tarzda uzatish). Maksvell siljish toki.	2
4	Vakuumdagi elektromagnit maydon. Elektromagnit maydon potentsiallari.	2
5	Kalibrli invariantliklik. Elektromagnit maydon energiyasi, zichligi va energiyasi oqimining zichligi.	2
6	Energiyaning saqlanish qonuni. Elektromagnit maydon impulsi va potentsiali	2
7	Puasson tenglamalari, yechimi. Zaryadlar sistemasining hajm bo'yicha taqsimlanishi, ularning katta masofadagi potentsiali	2
8	Tinchlikdagi zaryadlar sistemasi energiyasi.	2
9	Elektrostatik maydon energiyasining zichligi.	2
10	Zaryadlar sistemasining dipol va kvadrupol momentlari. Vektor potentsial.	2
Jami		22

Seminar mashg'ulotlarni tashkil etish bo'yicha ko'rsatma va tavsiyalar

Seminar mashg'ulotlarini tashkil etish bo'yicha kafedra pedagoglari tomonidan ko'rsatma va tavsiyalar ishlab chiqiladi. Unda studentlar asosiy ma'ruza mavzulari bo'yicha olgan bilim va ko'nikmalarini amaliy masalalar yechish orqali va ularni diskussiya shaklida bayon etadilar, darslik va o'quv qo'llanmalar asosida studentlar bilimlarini mustahkamlashga erishish, tarqatma materiallardan foydalanish, ilmiy maqolalar va tezislarni chop etish orqali talabalar bilimini oshirish, mavzu bo'yicha referatlar tayyorlash va boshqalar tavsiya etiladi.

Seminar mashg'ulotida student Nazariy fizika kursining Elektrodinamika b'olimiga oid barcha asosiy mavzulari bo'yicha o'z fikrlarini bayon etish, munozara yuritish, o'z fikrlarini himoya qilish yoki hamsuhbat fikriga qo'shilish yoki o'z argumetlarini keltirish, qaralayotgan mavzu bo'yicha ilmiy materiallar bilan tanishish hamda mavzuning biror masalasi bo'yicha muammo qo'yishni o'rganadi. Seminar mashg'ulotlari mavzusi ma'ruza mavzulari bilan hamohang tarzda va uyg'un shaklda o'tkaziladi.

"Nazariy fizika" (Elektrodinamika) fani bo'yicha seminar mashg'ulotlarining kalendar tematik rejasi

No	Seminar mavzulari	Ajratilgan soat
1	Elektrodinamikaning matematik apparati	4
2	Lorents kuchi va tsiklotron chastotasi	2
3	Statsionar toklar maydoni	2
4	Zaryadlar sistemasining nurlanishi	2
5	Nurlanish chizig'ining kengligi	2
6	Chiziqli o'tkazgichlarda kvazistatsionar toklar	2
7	Maksvell tenglamalar sistemasi	4
8	Tezliklarni qo'shish	2
9	Vaqt va uzunlik masshtablari nisbiyligi	2
10	Eynshteyn formulasi	2
Jami		24

Mustaqil ta'lim tashkil etishning shakli va mazmuni

Nazariy fizika (Elektrodinamika) fani bo'yicha talabaning mustaqil ta'limi shu fanni o'rganish jarayonining tarkibiy qismi bo'lib, uslubiy va axborot resurslari bilan to'la ta'minlangan.

Talabalar auditoriya mashg'ulotlarida professor-o'qituvchilarning ma'ruzasini tinglaydilar, misol va masalalar echadilar. Auditoriyadan tashqarida talaba darslarga tayyorlanadi, adabiyotlarni konspekt qiladi, uy vazifa sifatida berilgan misol va masalalarni yechadi. Bundan tashqari ayrim mavzularni kengroq o'rganish maqsadida qo'shimcha adabiyotlarni o'qib referatlar tayyorlaydi hamda mavzu bo'yicha testlar yechadi. Mustaqil ta'lim natijalari reyting tizimi asosida baholanadi.

Uyga vazifalarni bajarish, qo'shimcha darslik va adabiyotlardan yangi bilimlarni mustaqil o'rganish, kerakli ma'lumotlarni izlash va ularni topish yo'llarini aniqlash, internet tarmoqlaridan foydalanib ma'lumotlar to'plash va ilmiy izlanishlar olib borish, ilmiy to'garak doirasida yoki mustaqil ravishda ilmiy manbalardan foydalanib ilmiy maqola va ma'ruzalar tayyorlash kabilar talabalarning darsda olgan bilimlarini chuqurlashtiradi, ularning mustaqil fikrlash va ijodiy qobiliyatini rivojlantiradi. Shuning uchun ham mustaqil ta'limsiz o'quv faoliyati samarali bo'lishi mumkin emas.

Uy vazifalarini tekshirish va baholash amaliy mashg'ulot olib boruvchi o'qituvchi tomonidan, konspektlarni va mavzuni o'zlashtirish darajasini tekshirish esa ma'ruza darslarini olib boruvchi o'qituvchi tomonidan har darsda amalga oshiriladi.

Nazariy fizika (Elektrodinamika) fanidan mustaqil ish majmuasi fanning barcha mavzularini qamrab olgan va quyidagi mavzular ko'rinishida shakllantirilgan.

Studentlar mustaqil ta'limining mazmuni va hajmi

№	Mustaqil ta'lim mavzulari	Ajratilgan soat
1	Maksvellning siljish toki xaqidagi gipotezasi va uni tasdiqlanishi	4
2	Elektromagnit maydon energiyasining oqimi va impulsi	4
3	Elektromagnit to'lqinlarni xossalari: qaytishi, sinishi, qutblanishi, interferentsiyasi	4
4	Gerts tajribalari	2
5	Elektromagnit to'lqinlar shkalasi	2
6	Elektromagnit o'zaro ta'sir va uning xarakteristikalar	2
7	Vakuumdagi elektromagnit maydon	2
8	Lorents kuchi	2
9	Superpozitsiya prinsipi	2
10	Maksvell siljish toki	4
11	Puasson tenglamalari	2
12	Elektrostatik maydon energiyasining zichligi	2
13	Dipol va kvadrupol momentlari	2
14	Vektor potensial	2
15	Dipol nurlanish	2
16	To'lqin kutblanishi	2
17	Muhit uchun Maksvell tenglamasi	2
18	Skin effekt	2
19	Elektromagnit maydon invariantlari	2
20	Doppler effekti	2
21	Umumiy nisbiylik nazariyasi	2
22	Energiya-impuls tenzori	4
Jami		54

Dasturning informatsion uslubiy ta'minoti

Elektrodinamika fanini o'rganish davomida mashg'ulotlar paytida axborot (taqdimot, multimedia texnologiyalari) va ta'limning zamonaviy texnologiyalari (rivojlantiruvchi ta'lim texnologiyalari, fanni to'liq o'zlashtirishga yo'naltirilgan texnologiyalar, shaxsga yo'naltirilgan ta'lim texnologiyalari) hamda interfaol metodlar ("FMSU", "Klaster", "Qanday", "Insert", "Aqliy hujum" va b.) qo'llaniladi. Bundan

tashqari darsliklar, o'quv qo'llanmalar, ma'lumotnomalar, fizik entsiklopediyalar va lug'atlardan foydalaniladi.

**“Nazariy fizika”(Elektrodinamika) fanidan talabalar bilimini reyting tizimi
asosida baholash mezonlari.**

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirining 2018-yil 9-avgustdagi 19-2018-son
buyrug'iga

ILOVA

**Oliy ta'lim muassasalarida talabalar bilimini nazorat qilish va baholash tizimi to'g'risidagi
NIZOM**

Mazkur Nizom O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018-yil 5-iyundagi PQ-3775-son “Oliy ta'lim muassasalarida ta'lim sifatini oshirish va ularning mamlakatda amalga oshirilayotgan keng qamrovli islohotlarda faol ishtirokini ta'minlash bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida”gi qaroriga muvofiq oliy ta'lim muassasalarida talabalar bilimini nazorat qilish va baholash tizimini belgilaydi.

1-bob. Umumiy qoidalar

1. Mazkur Nizom 2018-2019 o'quv yilida, shuningdek keyingi o'quv yillarida oliy ta'lim muassasalariga o'qishga qabul qilingan talabalarning bilimini nazorat qilish hamda baholashda qo'llaniladi.

2. Mazkur Nizom talablari qonun hujjatlariga muvofiq o'quv jarayoni modul tizimiga asoslangan oliy ta'lim muassasalarida talabalar bilimini nazorat qilish va baholashda qo'llanilmaydi.

3. Talabalar oliy ta'lim muassasalari professor-o'qituvchilari tomonidan birinchi mashg'ulotda mazkur Nizom talablari bilan tanishtirilishi shart.

4. Talabalar bilimini baholashda malakaviy amaliyot, kurs ishi, fan (fanlararo) davlat attestatsiyasi, bitiruv malakaviy ishi, shuningdek magistratura bosqichida ilmiy-tadqiqot va ilmiy-pedagogik ishlar hamda magistrlik dissertatsiyasi bo'yicha mazkur Nizomda belgilangan baholash mezonlari qo'llaniladi.

2-bob. Nazorat turlari va baholash mezonlari

1-§. Nazorat turlari

5. Oliy ta'lim muassasalarida talabalar bilimini nazorat qilish oraliq va yakuniy nazorat turlarini o'tkazish orqali amalga oshiriladi.

6. Oraliq nazorat semestr davomida ishchi fan dasturining tegishli bo'limi tugagandan keyin talabaning bilim va amaliy ko'nikmalarini baholash maqsadida o'quv mashg'ulotlari davomida o'tkaziladi.

7. Oraliq nazorat turi har bir fan bo'yicha fanning xususiyatidan kelib chiqqan holda 2-martagacha o'tkazilishi mumkin.

Oraliq nazorat turini o'tkazish shakli va muddati fanning xususiyati va fanga ajratilgan soatlardan kelib chiqib tegishli kafedra tomonidan belgilanadi.

8. Oraliq nazorat turining topshiriqlari tegishli kafedra professor-o'qituvchilari tomonidan ishlab chiqiladi va mazkur kafedra mudiri tomonidan tasdiqlanadi.

9. Semestr davomida haftasiga 2 akademik soatdan (tibbiyot oliy ta'lim muassasalarida 4 akademik soatdan) kam bo'lgan fanlar bo'yicha oraliq nazorat turi o'tkazilmaydi.

10. Talabaning amaliy, seminar, laboratoriya mashg'ulotlari va mustaqil ta'lim topshiriqlarini bajarishi, shuningdek uning ushbu mashg'ulotlardagi faolligi fan o'qituvchisi tomonidan baholab boriladi. Baholash mazkur Nizomning 15-bandida nazarda tutilgan mezonlar asosida amalga oshiriladi.

Talabani oraliq nazorat turi bo'yicha baholashda, uning o'quv mashg'ulotlari davomida olgan baholari inobatga olinadi.

11. Yakuniy nazorat turi semestr yakunida (tibbiyot oliy ta'lim muassasalarida fan yakunida) tegishli fan bo'yicha talabaning nazariy bilim va amaliy ko'nikmalarini o'zlashtirish darajasini aniqlash maqsadida o'tkaziladi.

12. Yakuniy nazorat turini o'tkazish shakli tegishli fan bo'yicha kafedra tomonidan belgilanadi.

13. Yakuniy nazorat turi oliy ta'lim muassasasining tegishli fakultet dekani yoki o'quv-uslubiy bo'lim tomonidan ishlab chiqiladigan hamda o'quv ishlari bo'yicha prorektor tomonidan tasdiqlanadigan Yakuniy nazorat turlarini o'tkazish jadvaliga muvofiq o'tkaziladi.

14. Tibbiyot oliy ta'lim muassasalarida oraliq va yakuniy nazorat turlari obyektiv tizimlashtirilgan klinik sinov yoki obyektiv tizimlashtirilgan imtihon shakllarida o'tkazilishi mumkin.

2-§. Talabalar bilimini baholash mezonlari

15. Talabalarining bilimi quyidagi mezonlar asosida:

talaba mustaqil xulosa va qaror qabul qiladi, ijodiy fikrlay oladi, mustaqil mushohada yuritadi, olgan bilimini amalda qo'llay oladi, fanning (mavzuning) mohiyatini tushunadi, biladi, ifodalay oladi, aytib beradi hamda fan (mavzu) bo'yicha tasavvurga ega deb topilganda — 5 (a'lo) baho;

talaba mustaqil mushohada yuritadi, olgan bilimini amalda qo'llay oladi, fanning (mavzuning) mohiyatni tushunadi, biladi, ifodalay oladi, aytib beradi hamda fan (mavzu) bo'yicha tasavvurga ega deb topilganda — 4 (yaxshi) baho;

talaba olgan bilimini amalda qo'llay oladi, fanning (mavzuning) mohiyatni tushunadi, biladi, ifodalay oladi, aytib beradi hamda fan (mavzu) bo'yicha tasavvurga ega deb topilganda — 3 (qoniqarli) baho;

talaba fan dasturini o'zlashtirmagan, fanning (mavzuning) mohiyatini tushunmaydi hamda fan (mavzu) bo'yicha tasavvurga ega emas deb topilganda — 2 (qoniqarsiz) baho bilan baholanadi.

16. Nazorat turlarini o'tkazish bo'yicha tuzilgan topshiriqlarning mazmuni talabaning o'zlashtirishini xolis (obyektiv) va aniq baholash imkoniyatini berishi shart.

3-bob. Talabalar bilimini baholash

17. Talabalar bilimini baholash 5 baholik tizimda amalga oshiriladi.

18. Oraliq nazorat turini o'tkazish va mazkur nazorat turi bo'yicha talabaning bilimini baholash tegishli fan bo'yicha o'quv mashg'ulotlarini olib borgan professor-o'qituvchi tomonidan amalga oshiriladi.

Yakuniy nazorat turini o'tkazish va mazkur nazorat turi bo'yicha talabaning bilimini baholash o'quv mashg'ulotlarini olib bormagan professor-o'qituvchi tomonidan amalga oshiriladi.

Tegishli fan bo'yicha o'quv mashg'ulotlarini olib borgan professor-o'qituvchi yakuniy nazorat turini o'tkazishda ishtirok etishi taqiqlanadi.

Yakuniy nazorat turini o'tkazishda kelishuv asosida boshqa oliy ta'lim muassasalarining tegishli fan bo'yicha professor-o'qituvchilari jalb qilinishi mumkin.

19. Tibbiyot oliy ta'lim muassasalarida oraliq va yakuniy nazorat turlarini o'tkazish, shuningdek talabalarining bilimini baholash tegishli kafedra mudiri tomonidan tashkil etiladigan komissiya tomonidan amalga oshiriladi.

Komissiya tarkibi tegishli fan professor-o'qituvchilari va soha mutaxassislari orasidan shakllantiriladi.

Komissiya tarkibiga kelishuv asosida boshqa tashkilotlarning soha mutaxassislari ham jalb qilinishi mumkin.

20. Oliy ta'lim muassasasida nazorat turlarini o'tkazilishi tegishli oliy ta'lim muassasasining ta'lim sifatini nazorat qilish bo'limi tomonidan doimiy ravishda o'rganib boriladi. Bunda nazorat turlarini o'tkazilish tartibi buzilganligi aniqlangan hollarda, o'tkazilgan nazorat turlarining natijalari bekor qilinishi hamda tegishli nazorat turi qaytadan o'tkazilishi mumkin.

21. Talaba tegishli fan bo'yicha yakuniy nazorat turi o'tkaziladigan muddatga qadar oraliq nazorat turini topshirgan bo'lishlari shart.

22. Oraliq nazorat turini topshirmagan, shuningdek ushbu nazorat turi bo'yicha "2" (qoniqarsiz) baho bilan baholangan talaba yakuniy nazorat turiga kiritilmaydi.

Yakuniy nazorat turiga kirmagan yoki kiritilmagan, shuningdek ushbu nazorat turi bo'yicha "2" (qoniqarsiz) baho bilan baholangan talaba akademik qarzdor hisoblanadi.

23. Talaba uzrli sabablarga ko'ra oraliq va (yoki) yakuniy nazorat turiga kirmagan taqdirda ushbu talabaga tegishli nazorat turini qayta topshirishga fakultet dekanining farmoyishi asosida ruxsat beriladi.

24. Bir kunda 1 tadan ortiq fan bo'yicha yakuniy nazorat turi o'tkazilishiga yo'l qo'yilmaydi. Yakuniy nazorat turlarini o'tkazish kamida 2 kun oralig'ida belgilanishi lozim.

25. Bitiruvchi kurs bo'lmagan talabalar kuzgi semestr natijalari bo'yicha 3 tagacha fandan (fanlardan) akademik qarzdorligi bo'lgan hollarda talabaga bir oygacha, bahorgi semestr natijalari bo'yicha 3 tagacha fandan (fanlardan) akademik qarzdorligi bo'lgan talabaga tegishli fan (fanlar) bo'yicha oraliq va (yoki) yakuniy nazorat turlarini yangi o'quv yili boshidan qayta topshirish uchun 1 oy muddat beriladi.

Bitiruvchi kurs talabalariga bahorgi semestr natijalari bo'yicha o'zlashtirmagan fandan (fanlardan) qayta topshirish uchun yakuniy davlat attestatsiyasi boshlangunga qadar ruxsat beriladi.

Fanlardan akademik qarzdorligi 4 ta va undan ko'p bo'lgan talabalarga qayta topshirishga ruxsat berilmaydi va ular oliy ta'lim muassasasi rektorining (boshlig'ining, filial direktorining) buyrug'i bilan kursdan qoldiriladi.

26. Talabaga oraliq va (yoki) yakuniy nazorat turini qayta topshirish uchun berilgan muddat davomida talaba tomonidan qayta topshirishlar soni 2-martadan ko'p bo'lmasligi kerak.

Talaba oraliq va (yoki) yakuniy nazorat turini birinchi marta qayta topshirishdan o'ta olmagan taqdirda, fakultet dekani tomonidan komissiya tuziladi. Komissiya tarkibi tegishli fan bo'yicha professor-o'qituvchi va soha mutaxassislari orasidan shakllantiriladi.

Ikkinchi marta oraliq va (yoki) yakuniy nazorat turini o'tkazish va talabani baholash mazkur komissiya tomonidan amalga oshiriladi.

27. Berilgan muddat davomida mavjud bo'lgan qarzdorlikni topshira olmagan talaba bo'yicha fakultet dekani bildirgi bilan oliy ta'lim muassasasi rektorini (boshlig'ini, filial direktorini) xabardor qiladi va ushbu talaba rektor (boshliq, filial direktori) buyrug'i asosida kursdan qoldiriladi.

28. Talaba uzrli sabablarsiz malakaviy amaliyotga qatnashmagan, shuningdek malakaviy amaliyot yakunlari bo'yicha "2" (qoniqarsiz) baho bilan baholangan hollarda, u akademik qarzdor hisoblanadi va kursdan qoldiriladi.

29. Kursda qoldirilgan talaba fanni (fanlarni) o'zlashtirmagan semestr boshidan to'lov-kontrakt asosida mazkur o'quv yilining tegishli semestri uchun tasdiqlangan o'quv rejaga muvofiq o'qishni davom ettiradi.

30. Baholash natijasidan norozi bo'lgan talabalar fakultet dekani tomonidan tashkil etiladigan Apellatsiya komissiyasiga apellatsiya berish huquqiga ega.

31. Apellatsiya komissiyasi tarkibiga talabani baholashda ishtirok etmagan tegishli fan professor-o'qituvchilari orasidan komissiya raisi va kamida to'rt nafar a'zo kiritiladi.

32. Talaba baholash natijasidan norozi bo'lgan taqdirda, baholash natijasi e'lon qilingan vaqtdan boshlab 24 soat davomida apellatsiya berishi mumkin. Talaba tomonidan berilgan apellatsiya Apellatsiya komissiyasi tomonidan 2 kun ichida ko'rib chiqilishi lozim.

33. Talabaning apellatsiyasini ko'rib chiqishda talaba ishtirok etish huquqiga ega.

34. Apellatsiya komissiyasi talabaning apellatsiyasini ko'rib chiqib, uning natijasi bo'yicha tegishli qaror qabul qiladi. Qarorda talabaning tegishli fanni o'zlashtirgani yoki o'zlashtira olmaganini ko'rsatiladi.

Apellatsiya komissiyasi tegishli qarorni fakultet dekani va talabaga yetkazilishini ta'minlaydi.

4-bob. Baholash natijalarini qayd qilish

35. Talabalar bilimini baholash tegishli fan bo'yicha professor-o'qituvchi tomonidan Talabalarining fanlarni o'zlashtirishini hisobga olish jurnalida (bundan buyon matnda Jurnal deb yuritiladi) qayd etib boriladi. Professor-o'qituvchi qo'shimcha ravishda talabalar bilimini baholashni elektron tizimda ham yuritishi mumkin.

Professor-o'qituvchi Jurnalda talabaga qo'yilgan baholarni shu kunning o'zida qayd etib boradi. Agar talabaning bilimini baholash yozma ish shaklida o'tkazilgan bo'lsa, bunda professor-o'qituvchi talabalarining natijalarini 3 kundan ko'p bo'lmagan muddatda Jurnalga qayd etishi lozim.

36. Nazorat turi bo'yicha talabaning bilimi "3" (qoniqarli) yoki "4" (yaxshi) yoxud "5" (a'lo) baho bilan baholanganda, nazorat turini qayta topshirishga yo'l qo'yilmaydi.

37. Talaba nazorat turi o'tkazilgan vaqtda uzrli sabablarsiz qatnashmagan hollarda Jurnalga "0" belgisi yozib qo'yiladi.

38. Jurnal tegishli fan bo'yicha o'quv mashg'ulotlarini olib borgan professor-o'qituvchi, kafedra mudiri va fakultet dekani tomonidan imzolaniadi hamda fakultet dekanatida saqlanadi. Jurnalning saqlanishi uchun fakultet dekani mas'ul hisoblanadi.

39. Talabalarining yakuniy nazorat turi bo'yicha baholari Jurnalga qayd etilganda, shu kunning o'zida talabaning Baholash daftariga ham yozib qo'yilishi kerak.

40. Yakuniy nazorat turi bo'yicha talabaning bilimi "2" (qoniqarsiz) baho bilan baholangan yoki Jurnalga "0" belgisi yozib qo'yilgan hollarda ushbu baho yoki belgi talabaning Baholash daftariga yozilmaydi.

41. Jurnalning o'z vaqtida, to'g'ri va to'liq yuritilishi, shuningdek undagi baho va boshqa ma'lumotlarga asossiz o'zgartirishlar kiritilmasligi uchun fakultet dekani va tegishli fan bo'yicha professor-o'qituvchi mas'ul hisoblanadi.

42. Tegishli o'quv yili yakuni bo'yicha ishchi o'quv rejadagi fanlar bo'yicha "3" (qoniqarli) yoki "4" (yaxshi) yoxud "5" (a'lo) baho bilan baholangan talaba oliy ta'lim muassasasi rektorining (boshlig'ining, filial direktorining) buyrug'iga asosan keyingi kursga o'tkaziladi.

43. Baholash natijalari kafedra yig'ilishlari, fakultet va oliy ta'lim muassasasi Kengashlarida muntazam ravishda muhokama etib boriladi va tegishli qarorlar qabul qilinadi.

44. O'zbekiston Respublikasining oliy ta'lim muassasalarida talabalar o'zlashtirishini baholash tizimini 5 baho yoki 100 ballik tizim va ilg'or xorijiy davlatlar oliy ta'lim tizimida qo'llaniladigan baholash tizimiga qiyosiy taqqoslash hamda ularga o'tkazish mazkur Nizomning ilovasiga muvofiq jadvallar asosida amalga oshiriladi.

5-bob. Yakuniy qoida

45. Mazkur Nizom O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Davlat test markazi, Xalq ta'limi vazirligi, Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Ta'lim sifatini nazorat qilish inspeksiyasi, Sog'liqni saqlash vazirligi, Iqtisodiyot vazirligi, Moliya vazirligi, Tashqi ishlar vazirligi, Axborot texnologiyalari va kommunikatsiyalarini rivojlantirish vazirligi, Madaniyat vazirligi, Jismoniy tarbiya va sport vazirligi, Qurilish vazirligi, "O'zbekiston temir yo'llari" aksiyadorlik jamiyati, Avtomobil yo'llari davlat qo'mitasi, "Navoiy kon-metallurgiya kombinati" davlat korxonasi, O'zbekiston Badiiy akademiyasi hamda Davlat soliq qo'mitasi bilan kelishilgan.

Oliy ta'lim muassasalarida talabalar bilimini nazorat qilish va baholash tizimi to'g'risidagi nizomga

ILOVA

1-jadval

Baholashni 5 baholik shkaladan 100 ballik shkalaga o'tkazish JADVALI

5 baholik shkala	100 ballik shkala	5 baholik shkala	100 ballik shkala	5 baholik shkala	100 ballik shkala
5,00 — 4,96	100	4,30 — 4,26	86	3,60 — 3,56	72
4,95 — 4,91	99	4,25 — 4,21	85	3,55 — 3,51	71
4,90 — 4,86	98	4,20 — 4,16	84	3,50 — 3,46	70
4,85 — 4,81	97	4,15 — 4,11	83	3,45 — 3,41	69
4,80 — 4,76	96	4,10 — 4,06	82	3,40 — 3,36	68
4,75 — 4,71	95	4,05 — 4,01	81	3,35 — 3,31	67
4,70 — 4,66	94	4,00 — 3,96	80	3,30 — 3,26	66
4,65 — 4,61	93	3,95 — 3,91	79	3,25 — 3,21	65
4,60 — 4,56	92	3,90 — 3,86	78	3,20 — 3,16	64
4,55 — 4,51	91	3,85 — 3,81	77	3,15 — 3,11	63
4,50 — 4,46	90	3,80 — 3,76	76	3,10 — 3,06	62
4,45 — 4,41	89	3,75 — 3,71	75	3,05 — 3,01	61
4,40 — 4,36	88	3,70 — 3,66	74	3,00	60
4,35 — 4,31	87	3,65 — 3,61	73	3,0 dan kam	60 dan kam

2-jadval

Oliy ta'limda talabalar o'zlashtirishini baholash tizimlarini qiyosiy taqqoslash JADVALI

Taklif etilayotgan O'zbekiston tizimi	Rossiya tizimi (MDU)*	Yevropa kredit transfer tizimi (ECTS — European Credit Transfer System)	Amerika tizimi (A- F)	Britaniya tizimi (%)	Yaponiya tizimi (%)	Koreya tizimi (%)	O'zbekiston tizimi (%)
"5"	"5"	"A"	"A+"	70 — 100	80 — 100	90 — 100	90 — 100
			"A"				
			"A-"	65 — 69			

“4”	“4”	“B”	“B+”	60 — 64	70 — 79	80 — 89	70 — 89,9
		“C”	“B”	50 — 59			
“B-”							
“3”	“3”	“D”	“C+”	45 — 49	60 — 69	70 — 79	60 — 69,9
		“E”	“C”	40 — 44		60 — 69	
			“C-”				
			“D+”				
			“D”				
“D-”							
“2”	“2”	“FX”	“F”	0 — 39	0 — 59	0 — 59	0 — 59,9
		“F”					

(Qonun hujjatlari ma’lumotlari milliy bazasi, 26.09.2018-y., 10/18/3069/1965-son)

Ishchi fan dasturi mualliflari tomonidan tavsiya etilgan adabiyotlar ro‘yxati Asosiy adabiyotlar

- A1. A.A.Abdumalikov. Nazariy fizika kursi, 2- jild Elektrodinamika. T.: Cho‘lpon nomidagi NMIU, 2011
- A2. Я.П.Терлецкий, Ю.П.Рыбаков. Электродинамика. М.: «Высшая школа», 1990
- A3. И.В.Савельев. Основы теоретической физики. Том 1. М.: «Высшая школа», 1991
- A4. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика. т.2 Теория поля. М.: «Наука», 1988
- A5. Р.Х.Маллин. Майдон назарияси. Т., «Ўқитувчи», 1965
- A6. Р.Х.Маллин. Классик электродинамика. II қисм, Классик макроэлектродинамика. Т., «Ўқитувчи», 1978
- A7. А.Ў.Раҳимов, Б.О.Отакулов. Электродинамика ва нисбийлик назарияси. Феноменологик электродинамика ва классик электрон назария асослари. Т., «Ўқитувчи», 1985
- A8. В. В. Мультиановский, А. С. Васильевский. Курс теоретической физики. Классическая электродинамика. М., «Просвещение». 1990
- A9. А.Н. Матвеев. Электродинамика. М.: «Высшая школа». 1980
- A10. Sh.Kaniyazov. Elektrodinamika ra`ninen lekciyalar teksti. No`kis.: Berdaq ati`ndag`i` QMU , 2008
- A11. Л.Г.Гречко и др. Сборник задач по теоретической физике. М.: «Высшая школа». 1984
- A12. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Сборник задач по электродинамике. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002
- A13. А.Бойдедаев. Умумий нисбийлик назарияси. 4- қисм. ТДПУ нашриёти, 2003 й.

Qo‘shimcha adabiyotlar

- Q1. Е.М.Гершензон, Н.Н.Малов, А.Н.Мансуров. Электродинамика. М., ИЦ «Академия», 2002
- Q2. И.Е. Иродов. Основные законы электромагнетизма. М.: «Высшая школа», 1991
- Q3. И.Е. Тамм. Основы теории электричества. М.: «Наука», 1989
- Q4. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Современная электродинамика. Часть 1 и 2. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002
- Q5. А.Чертов и А.Воробьев. Физикадан масалалар туплами. Т.: 1997
- Q6. Умумий физикадан масалалар туплами. Педагогика олий ўқув юртлари учун. М.С.Цедрик тахрири остида. Т.: «Ўқитувчи», 1991
- Q7. И.Е. Иродов. Задачи по общей физике. М.: «Высшая школа», 1972
- Q8. J.Kamalov, I.Ismoilov, U.Begimqulov, S.Avazboyev. Elektr va magnetizm. T.: Iqtisod-moliya, 2007
- Q9. B.F.Izbasarov, I.R.Kamalov. Elektromagnetizm. Toshkent: Iqtisod-moliya, 2006
- Q10. Ў.Қ.Назаров. Умумий физика курси, Электромагнетизм, 2- жилд. Т.: «Ўзбекистон », 2001

- Q11. С.Г.Калашников. Электр. Т.: «Ўқитувчи», 1979
Q12. О.Ахмаджонов. Физика курси. 2 қисм . Т.: «Ўқитувчи», 1987
Q13. А.Boydadev. Maxsus nisbiylik nazariyasi. Т., TDPU nashriyoti. 2001

Fan dasturi mualliflari tomonidan tavsiya etilgan adabiyotlar ro'yxati
Asosiy adabiyotlar

1. M.S. Yaxyoev. K. Muminov Nazariy mexanika. Т.: O'qituvchi. 1992y.
2. A. Boydadev Maxsus nisbiylik nazariyasi. Т.: TDPU. 2001-y.
3. В.В. Мултановский. Курс теоретической физики. Классическая физика. М. Наука., 2000 г.
4. R. Bobojonov, A. M. Xudayberganov, G. A. Kochetkov. Atom fizikasidan masalalar yechish uchun qo'llanma. Toshkent. Universitet. 1993-y.
5. E.N. Rasulov, U.SH.Begimqulov, K.R. Nasriddinov, SH.X. Axmadjanova Kvant fizikadan masalalar to'plami. N.: TDPU. 2004 -y.
6. A.Boydadev. Klassik statistik fizika. Т.: O'zbekiston. 2003-y .
7. A.Boydadev. Nomuvozanatli statistik fizika asoslari. Т.: O'qituvchi, 1992-y.
8. R.Mamatqulov va boshqalar. Statistik fizika va termodinamikadan masalalar to'plami, O'qituvchi, 2000-y.
9. G.X.Xoshimov, R.Ya.Rasulov, N.X.Yo'ldoshev. "Kvant mexanika asoslari". Т.: "O'qituvchi", 1999-y.
10. Paul Peter Urone, Rogar Hinric "College Physics" Californiya 2002

Qo'shimcha adabiyotlar

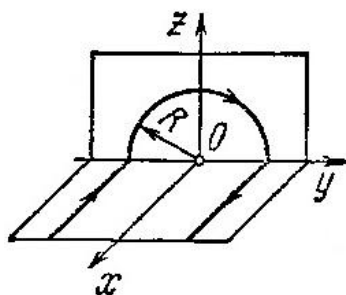
1. Мирзиёев Ш.М. Танқидий таҳлил, қатъий тартиб-интизом ва шахсий жавобгарлик – ҳар бир раҳбар фаолиятининг кундалик қондаси бўлиши керак. Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2016 йил якунлари ва 2017 йил истиқболларига бағишланган мажлисидаги Ўзбекистон Республикаси Президенти нутқи. //Халқ сўзи газетаси. 2017 йил 16 январ №11.
2. Ўзбекистон Республикаси Конституцияси. Т.: Ўзбекистон. 2014. -46 б.
3. И.В. Мещерский. Сборник задач по теоретической механике. М.: Наука. 1992 г.
4. Umumiy fizika kursidan masalalar to'plami. M.S.Sedrik tahriri ostida Toshkent.: O'qituvchi. 1992-y.
5. Tursunov S., Kamolov J. "Elektr va magnitizm", Т.: O'qituvchi, 1996-y.
6. В.В.Мултановский, А.С.Васильевский. Электродинамика. М.: Просвещение.1998 г.
7. О. Qodirov, A. Boydadev. Kvant fizika. Toshkent, "O'zbekiston" nashriyoti,. 2005y.
8. Е.М.Гершензон и др. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. М.: "Просвещение", 1997 г.
9. E.Rasulov. U.Begimqulov Kvant fizikasi.1-tom.,Т. "Fan va texnologiya", 2009-y.
10. E.Rasulov. U. Begimqulov Kvant fizikasi. 2- tom Т.: "Fan va texnologiya", 2009-y.
11. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М.: Наука.. 1999 г.
12. И.В. Савельев Основы теоретической физики. Том 1. М.: Наука. 1992 г.
13. В. Шпольский. Атомная физика. В двух томах. Москва.: Наука. 1992 г.
14. К. Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В двух томах. Москва.: 1998г.
15. А. И. Наумов. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Москва.: 2000 г.

Internet manbalar

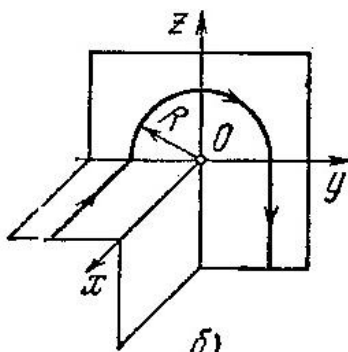
1. www.tdpu.uz
2. www.pedagog.uz
3. www.ziynet.uz
4. www.edu.uz
5. www.uzedu.uz

"Nazariy fizika" (Elektrodinamika) fani mashg'ulotlarida ishlatiladigan tarqatma materiallardan namunalar

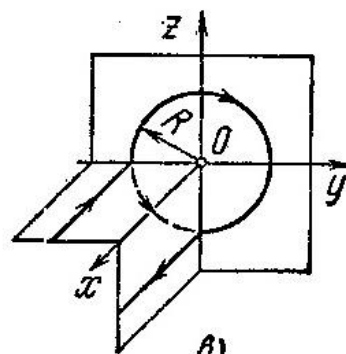
Berilgan tokli konturlarning hosil qilgan magnit maydoni induktsiyasi topilsin.



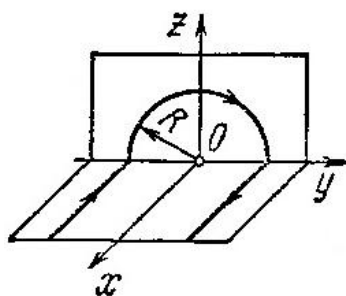
a)



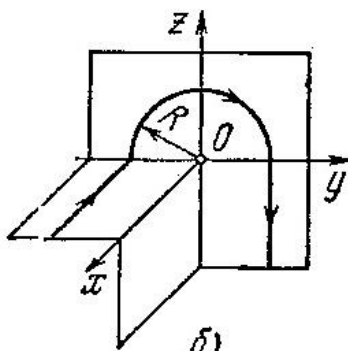
b)



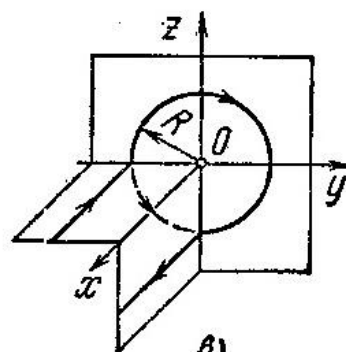
b)



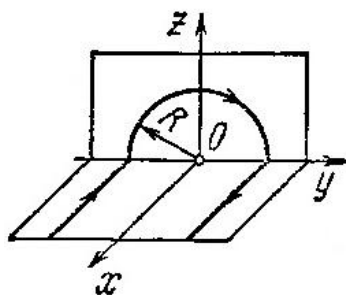
a)



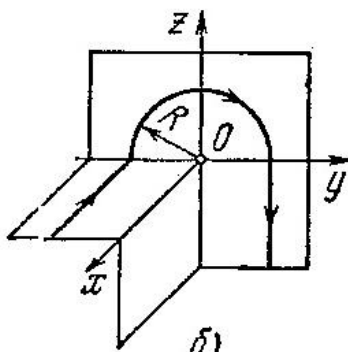
b)



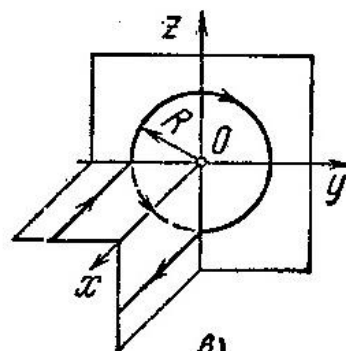
b)



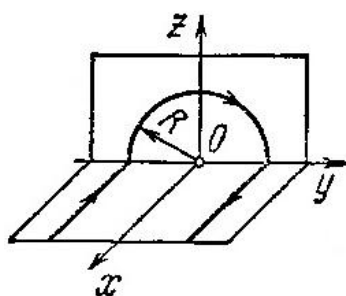
a)



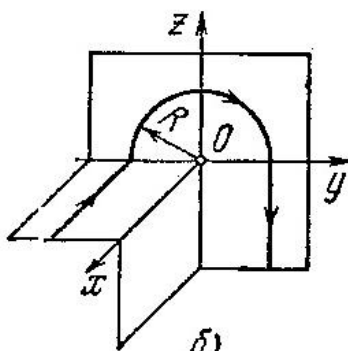
b)



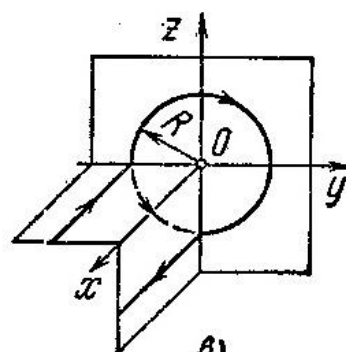
b)



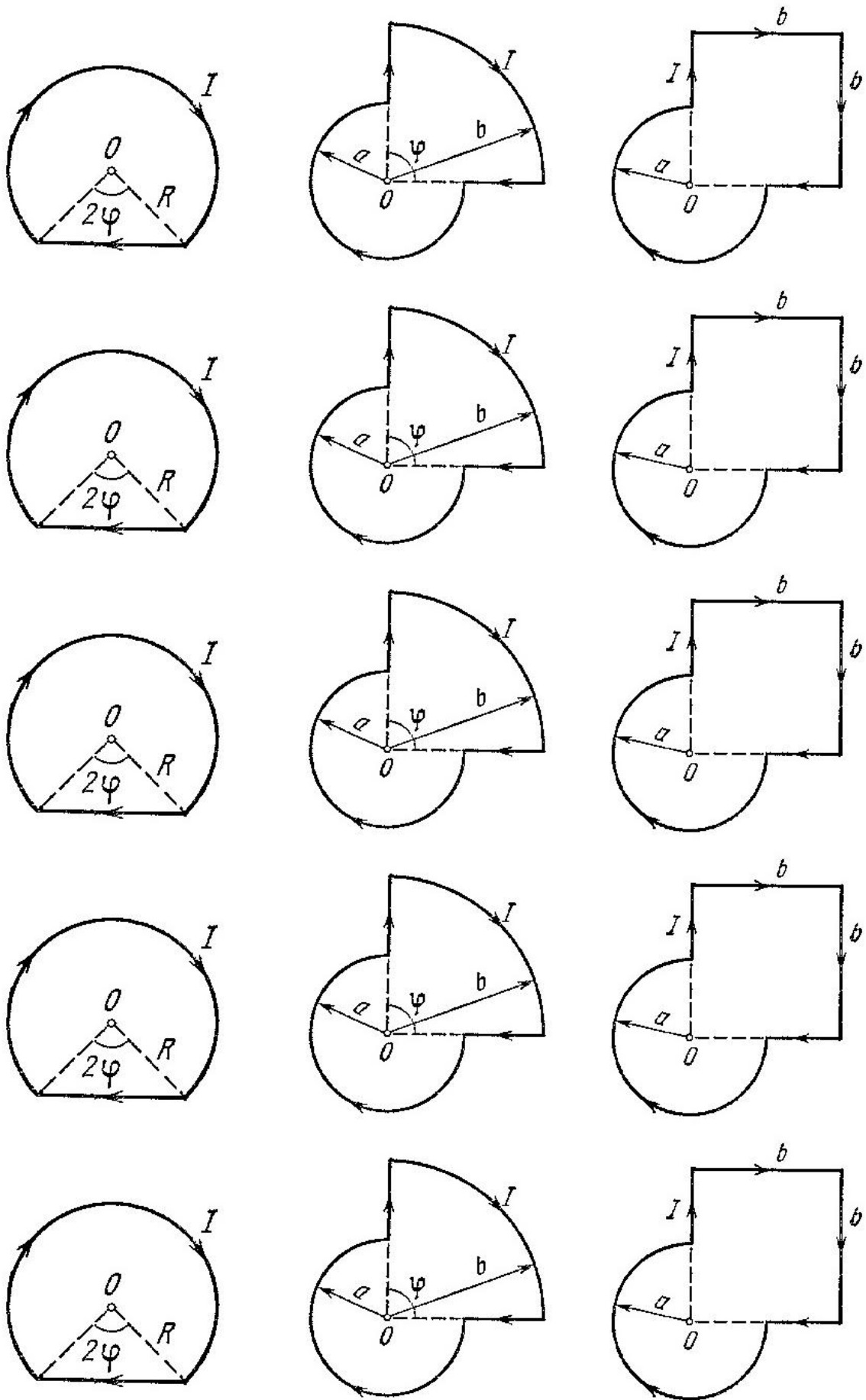
a)

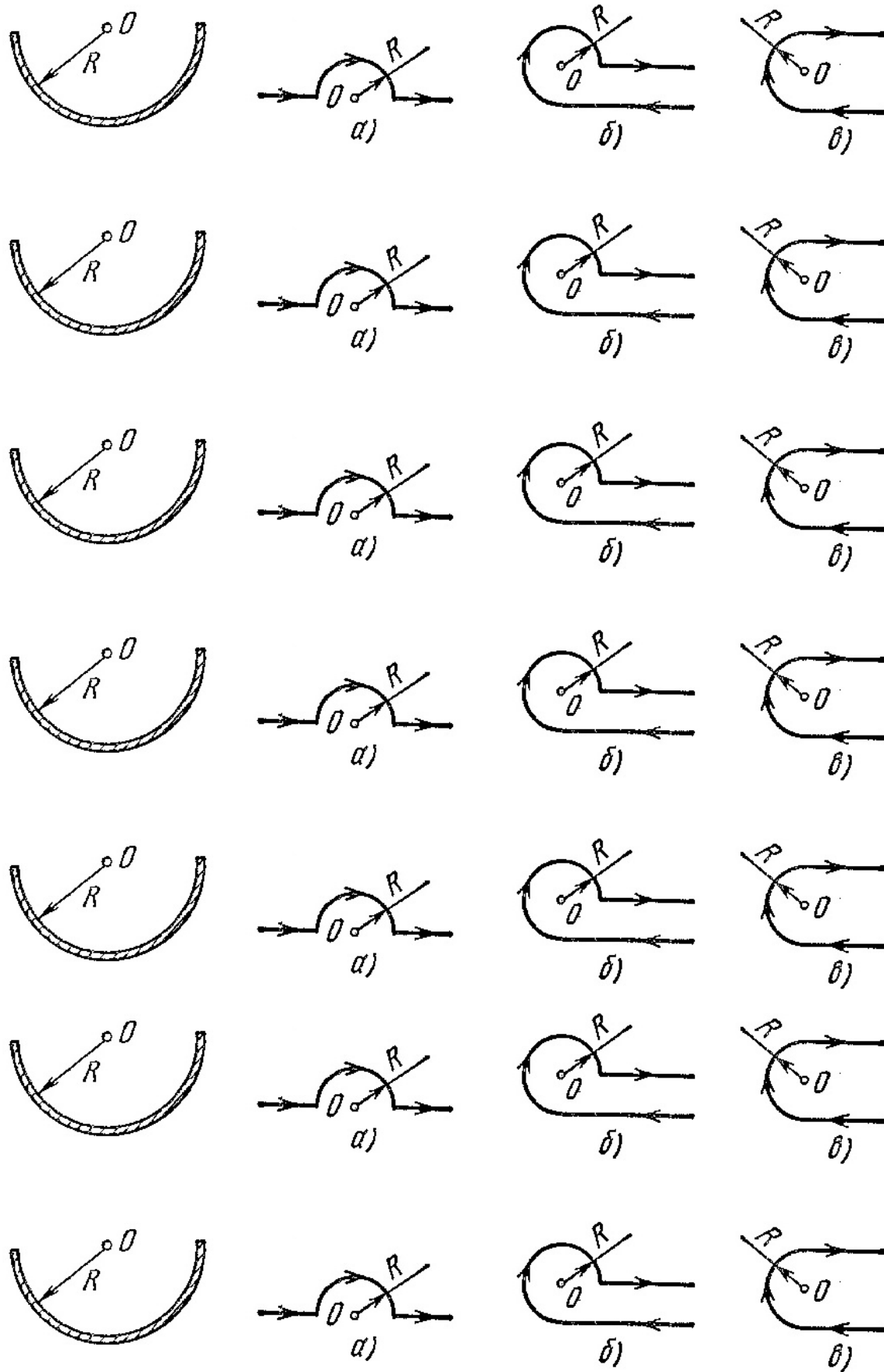


b)



b)





“Elektrodinamika” fanidan testlar
(тузувчи Орифжонов С.Б., 136 тест)

1. Ёпиқ система учун зарядларни сақланиш қонунини ёзинг:

1. $\frac{dQ}{dt} + I = 0$
2. $\frac{dQ}{dt} = 0$
3. $d\rho/dt + \operatorname{div}\vec{j} = 0$
4. $F = kqQ/r^2$

2. Очиқ система учун зарядларни сақланиш қонунини ёзинг:

1. $\frac{dQ}{dt} + I = 0$
2. $\frac{dQ}{dt} = 0$
3. $d\rho/dt + \operatorname{div}\vec{j} = 0$
4. $F = kqQ/r^2$

3. Узлуксизлик тенгламаси нимани ифодалайди:

1. Электр майдонини узлуксизлигини
2. Электр майдонини сақланишини
3. Зарядларни дискретлигини
4. Зарядларни сақланиш қонунини
5. Бирлик ҳажмдаги зарядларни сақланиш қонунини

4. Элементар заряд нимага тенг?

1. $1.9 \cdot 10^{19} \text{ C}$
2. $9 \cdot 10^9 \text{ C}$
3. $3 \cdot 10^8 \text{ C}$
4. $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

5. Нуқтавий зарядни электр майдонини ёзинг.

1. $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$
2. $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi - d\vec{A}/dt$
3. $E = kqQ/r^2$
4. $\vec{E} = kQ\vec{r}/r^3$

6. $\vec{E}$ ва $\vec{D}$ нинг қайси бири тўлиқ электр майдонни ифодалайди?

1. $\vec{E}$
2. $\vec{D}$
3. $\vec{E} - \vec{D}$
4. $\vec{D} - \vec{E}$

7. $\vec{E}$ ва $\vec{D}$ орасидаги боғланишни ёзинг:

1. $\vec{E} = \epsilon \vec{D}$
2. $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$
3. $\vec{D}\vec{E} = 0$
4. $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$

8. Боғланган зарядлар деб нимага айтилади?

1. Ядрога боғланган зарядларга айтилади
2. Ўзаро боғланган зарядларга айтилади
3. Зарядларни сақланиш қонунини қаноатлантирадиган зарядларга
4. Нейтрал атом ва молекулаларга бирлашган зарядларга айтилади

9. Диэлектрикнинг қутбланиши деб нимага айтилади?

1. Шимолий ва жанубий қутблари бор диэлектрикка айтилади
2. + ва – қутблари бор диэлектрикка айтилади
3. Электр майдонининг таъсирида диполь моментиға эға бўлган диэлектрикка айтилади
4. Электр майдонининг таъсирида диполь моменти йўқ бўлган диэлектрикка айтилади

10. Мухитни қутбланиши электр майдонни кучайтирадими?

1. Ҳа
2. Йўқ
3. Ўзгартирмайди
4. Кучсизлантиради

11. Суперпозиция принципи математик тарзда қандай ифодаланади?

1. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$
2. $\varphi = k \sum_i q_i / |\vec{r} - \vec{r}_i|$
3. $\vec{E} = k \sum_i q_i \vec{r} / r^2$
4. $\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$

12. Электр диполь моменти қандай ҳисобланади?

1. $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$
2. $\vec{E} = k \sum_i q_i \vec{r} / r^2$
3. $\vec{P} = \vec{D} / \epsilon \epsilon_0$
4. $\vec{P} = q \vec{l}$

13. $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = 0$ тенглик қандай физик маънони англатади?

1. Сирт ичида заряд йўқлигини
2. Сирт нольға тенглигини
3. $\vec{D} = 0$ лигини
4. Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

14. Остроградский-Гаусс теоремасини математик ифодасини ёзинг.

1. $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = 0$
2. $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = q$
3. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$
4. $d\rho / dt + \text{div } \vec{j} = 0$

15.Электростатик майдон куч чизикларининг боши ва охири қаерда бўлади?

1. Мусбат заряддан бошланиб, чексизгача кетади
2. Манфий заряддан бошланиб, мусбат зарядга боради
3. Электростатик майдон куч чизиклари ёпик, узлуксиз бўлади
4. Мусбат заряддан бошланиб, манфий зарядга боради

16.Электростатик майдон кучланганлиги ва потенциали орасидаги боғланишни ёзинг

1. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$
2. $\vec{E} = -\text{grad}\varphi - d\vec{A}/dt$
3. $\vec{E} = \oint \varphi d\vec{l}$
4. $\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$

17.Электростатик майдонда бажарилган ишни қандай ҳисоблаш мумкин?

1. $\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$
2. $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$
3. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$
4. $A = \vec{F}\vec{l}$

18.Электростатик майдонни потенциал характери қандай математик ифода билан ифодаланиши мумкин?

1. $A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l}$
2. $\vec{E} = -\text{grad}\varphi - d\vec{A}/dt$
3. $\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$
4. $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = q$

19.Эквипотенциал сирт деб нимага айтилади?

1. Потенциал энергиялик сиртга айтилади
2. Магнит майдонга эквивалент сиртга айтилади
3. Потенциаллари бир ҳил бўлган нуқталардан иборат сиртга айтилади
4. Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

20.Текис зарядланган текислик электр майдонининг идукциясини ёзинг.

1. $D = \pm\sigma/2$
2. $D = \pm\sigma$
3. $\vec{E} = kQ\vec{r}/r^3$
4. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$

21. Ясси конденсатор ичидаги электр майдонни ёзинг.

1. $D = \pm \sigma / 2$
2. $D = \pm \sigma$
3. $\vec{E} = kQ\vec{r} / r^3$
4. $\vec{E} = -grad \varphi$

22. Текис зарядланган сферанинг ички майдонини ёзинг.

1. $\vec{E} = -grad \varphi$
2. $\vec{E} = 0$
3. $D = \sigma$
4. $\vec{P} = \vec{D} / \epsilon \epsilon_0$

23. Текис зарядланган сферанинг ташқи майдонини ёзинг.

1. $\vec{E} = -grad \varphi$
2. $\vec{E} = kQ\vec{r} / r^3$
3. $D = \sigma$
4. $\vec{P} = \vec{D} / \epsilon \epsilon_0$

24. Икки муҳит чегарасида электр майдонини синиши қандай қонунлар асосида ўрганилади?

1. Кулон қонуни
2. Кулон қонуни ва Остроградский-Гаусс теоремаси
3. $\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0$ ва $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = q$
4. $\vec{E} = kQ\vec{r} / r^3$ ва $\vec{E} = -grad \varphi$

25. Жисм (конденсатор) сиғими қандай формула билан киритилади?

1. $q = C\varphi$
2. $C = \sum_i C_i$
3. $\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$
4. $C = \oint_s \vec{E} d\vec{S}$

26. Ясси конденсатор сиғимини ёзинг.

1. $C = \sum_i C_i$
2. $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$
3. $C = q / \varphi$
4. $4\pi \epsilon \epsilon_0 r$

27. Яккаланган сфера электр сиғими сфера радиусига қандай боғлиқ?

1. $1/r^2$
2. $1/r$
3. r
4. $4\pi r^2$

28. Каттароқ сиғим ҳосил қилиш учун, конденсаторларни параллель улаш керами, ёки кетма-кет?

1. Паралель
2. Кетма-кет
3. Паралель ва кетма – кет
4. Паралель шунт улаш керак

29. Каттароқ кучланишга чидаши учун конденсаторларни параллель улаш керами, ёки кетма-кет?

1. Паралель
2. Кетма-кет
3. Паралель ва кетма – кет
4. Кетма-кет шунт улаш керак

30. Зарядланган сфера сиртида D нимага тенг?

1. $\sigma/2$
2. $\varepsilon\varepsilon_0\sigma$
3. σ
4. $\varepsilon\varepsilon_0E$

31. Текис зарядланган текислик электр майдони кучланганлиги нимага тенг?

1. $\varepsilon\varepsilon_0\sigma$
2. $\sigma/\varepsilon\varepsilon_0$
3. $\sigma/2\varepsilon\varepsilon_0$
4. $\pm\sigma$

32. Электростатик майдога киритилган ўтказгич ичидаги электр майдон нимага тенг?

1. $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$
2. $\vec{E} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{D}$
3. 0
4. $\vec{E} = kQ\vec{r}/r^3$

33. Электростатик майдога киритилган ўтказгич сиртидаги электр майдон қандай йўналган?

1. Сирт бўйлаб
2. Сиртга тик
3. Сиртга $\arctg \varepsilon_0 E/D$ бурча остида
4. Юқоридагиларни ҳаммаси нотўғри

34. Электростатик майдога киритилган ўтказгичдаги эркин зарядлар қандай жойлашади?

1. Ҳажм бўйича текис
2. Сирт бўйича текис
3. Ҳажмда
4. Сиртда

35.Зарядланган конденсатор энергияси нимага тенг?

1. $C\Delta\varphi$
2. $q\Delta\varphi/2$
3. $Cq^2/2$
4. $C/2\Delta\varphi^2$

36.Электр майдон энергиясини зичлиги нимага тенг?

1. $\vec{E}\vec{D}/2$
2. $D^2/2\varepsilon\varepsilon_0$
3. $\varepsilon\varepsilon_0 E^2/2$
4. Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

37.Ток зичлигини таърифини ёзинг.

1. $I = \oint_S \vec{j} d\vec{S}$
2. $j = I/S$
3. $\vec{j} = \rho\vec{g}$
4. $\vec{E} = -grad\varphi$

38.Ток зичлиги билан ток кучи орасидаги боғланишни ёзинг.

1. $I = \oint_S \vec{j} d\vec{S}$
2. $j = I/S$
3. $\vec{j} = \rho\vec{g}$
4. $\vec{E} = -grad\varphi$

39.Контакт потенциаллар айирмасини қандай тушунасиш?

1. Турли металллар уланиб, улардан ток ўтганда бири кўпроқ, иккинчиси камроқ исийди
2. Турли металллар уланиб, контактдан ток ўтганда, контакт қизийди
3. Эритмага турли металллар туширилса, улар орасида контакт потенциаллар фарқи вужудга келади
4. Турли металллар уланса, улар орасида потенциаллар фарқи вужудга келади

40.Металлардаги электр токи қандай заррачаларнинг ҳаракати билан боғлиқ

1. Мусбат ионларни ҳаракати билан
2. Манфий ионларни ҳаракати билан
3. Электронларни ҳаракати билан
4. Позитронларни ҳаракати билан

41.Ярим ўтказгичларда электр токи қандай заррачаларни ҳаракати билан боғлиқ?

1. Мусбат ионларни ҳаракати билан
2. Манфий ионларни ҳаракати билан
3. Электронларни ва мусбат ионларни ҳаракати билан
4. Электронлар ва тешикларни ҳаракати билан
- 5.

42.Эритмалар қандай қилиб ток ўтказди?

1. Мусбат ионларни ҳаракати билан
2. Электрон ва мусбат ионларни ҳаракати билан
3. Манфий ва мусбат ионларни ҳаракати билан
4. Электронлар ва тешикларни ҳаракати билан

43.Газлардаги ионлар билан эритмалардаги ионлар қандай фарқ қилади?

1. Газлардаги ионлар - мусбат, эритмалардагилари – манфий зарядланган бўлади
2. Газларда фақат мусбат, эритмаларда мусбат ва манфий ионлар мавжуд
3. Эритмаларда фақат манфий, газларда мусбат ва манфий ионлар мавжуд
4. Газлардаги ионлар – зарядланган атом ёки молекулалардан иборат, эритмаларда - эритувчи молекулалари билан боғланган катта структура ташкил этишади

44.Плазма нима?

1. Модданинг тўртинчи агрегат ҳолати бўлиб, унда модданинг бир қисми ионлашган ҳолатда бўлади ва модданинг асосий хоссаларини белгилаб беради
2. Плазмада мусбат ва манфий ионлар бўлади
3. Плазмада эркин электронлар кўп бўлади
4. Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

45.Ом қонунининг дифференциал шаклини ёзинг:

1. $I = U / R$
2. $W = I^2 R$
3. $q = \rho j^2$
4. $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

46.Жоуль – Ленц қонунининг дифференциал шаклини ёзинг:

1. $I = U / R$
2. $W = I^2 R$
3. $q = \rho j^2$
4. $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

47.Электр занжир тугуни учун Кирхгофнинг биринчи қонунини ёзинг:

1. $I = U / R$
2. $\sum_i I_i = 0$
3. $\sum_i E_i = \sum_k U_k$
4. $U = \sum_k I_k R_k$

48. Кирхгофнинг иккинчи қондасини ёзинг:

1. $I = U / R$
2. $\sum_i I_i = 0$
3. $\sum_i E_i = \sum_k U_k$
4. $U = \sum_k I_k R_k$

49. Ўтказгичлар параллел уланганда занжирнинг умумий кучланиши қандай тақсимланади?

1. Барча ўтказгичда ташқи кучланишга тенг
2. Кучланишлар ёғиндиси ташқи кучланишга тенг
3. Ўтказгичлардаги тоқларга тесқари пропорционал
4. Ўтказгичларни қаршилигига тесқари пропорционал

50. Ўтказгичлар параллел уланганда улардаги тоқлар қандай тақсимланади?

1. Қаршилиқларга пропорционал равишда
2. Қаршилиқларга тесқари пропорционал равишда
3. Кучланишларга пропорционал равишда
4. Кучланишларга тесқари пропорционал равишда

51. Кетма-кет уланган манбаълар батареясининг Э.Ю.К нимага тенг

1. $1/E = \sum_i 1/E_i$
2. $E = \sum_k E_k$

3. Потенциал тушишлар ёғиндисига тенг
4. Кучланишлар ёғиндисига тенг

52. Параллел уланган N та бир ҳил манбаълар батареясининг Э.Ю.К нимага тенг?

1. $E * N$
2. E / N
3. E
4. Юқоридагиларни ҳаммаси нотўғри

53. Амперметр занжирга қандай уланади?

1. Параллель
2. Кетма-кет
3. Манбаъни ёнига
4. Манбаъни кетига

54. Амперметрга шунт танлашнинг мақсади нимадан иборат?

1. Каттароқ кучланишни ўлчаш
2. Каттароқ тоқни ўлчаш
3. Амперметрни қуйишдан асраш
4. Параллель ўтказгич улаш

55. Вольтметр занжирга қандай уланади?

1. Параллель
2. Кетма-кет
3. Манбаъни ёнига
4. Манбаъни кетига

56. Вольтметрга қўшимча қаршилик танлашнинг мақсади нимадан иборат?

1. Каттароқ кучланишни ўлчаш
2. Каттароқ токни ўлчаш
3. Вольтметрни куйишдан асраш
4. Кетма - кет ўтказгич улаш

57. Ток манбаъининг қуввати нимага тенг?

1. EI
2. UI^2
3. I^2 / R
4. $U^2 R$

58. Ток манбаъининг ФИК учун формула ёзинг:

1. $1+r/R$
2. $1-U/E$
3. $1-r/R$
4. $1+U/E$

59. Металлларнинг қаршилиги уларнинг температурасига қандай боғлиқ?

1. Абсолют температурага тескари пропорционал
2. Абсолют температурага квадратик боғлиқ
3. Температура ошиши билан чизикли камаювчи
4. Температура ошиши билан чизикли ўсувчи

60. Хусусий яримўтказгичларни қаршилиги температурага қандай боғлиқ?

1. Абсолют температурага тескари пропорционал
2. Абсолют температурага квадратик боғлиқ
3. Температура ошиши билан кескин камаювчи
4. Температура ошиши билан чизикли ўсувчи

61. p – типдаги яримўтказгичлар деб нимага айтилади?

1. Электрон ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичга
2. Тешикли ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичга
3. Донорли яримўтказгичга
4. Донор моддалар киритилган яримўтказгичга

62. n – типдаги яримўтказгичлар деб нимага айтилади?

1. Электрон ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичга
2. Тешикли ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичга
3. Акцепторли яримўтказгичга
4. Акцептор моддалар киритилган яримўтказгичга

63.р-п ўтиш деб нимага айтилади?

1. р-типтаги яримўтказгични п – типга айланишига
2. Электронлар р – яримўтказгичдан п – яримўтказгичга ўтганини
3. Акцепторли яримўтказгичга
4. Икки турдаги яримўтказгичларни контактига

64.Электронни металдан чиқиш ишини ёзинг:

1. $e\Delta U$
2. $e/\Delta U$
3. $\Delta U/e$
4. Юқоридагиларни ҳаммаси нотўғри

65.Термопара ЭЮК нимага тенг:

1. $E * N$
2. $\alpha(T_1 - T_2)$
3. $\alpha/(T_1 - T_2)$
4. Юқоридагиларни ҳаммаси нотўғри

66.Газлардаги номустиқил ўтказувчанлик деб нимага айтилади?

- Ўтказувчанлик ташқи ионловчи нурланиш таъсиридан вужудга келса
- Ўтказувчанлик вужудга келмаса
- Ўтказувчанлик вақтинча вужудга келиб, сўнг сўниб қолса
- Ўтказувчанлик ионлар ҳисобига вужудга келса

66.Газлардаги мустиқил ўтказувчанлик деб нимага айтилади?

- Ўтказувчанлик электр майдонда тезлашган электронларни атом-молекулаларни ионлаштириши натижасида вужудга келса
- Ўтказувчанлик ташқи ионловчи нурланиш таъсиридан вужудга келса
- Ўтказувчанлик вужудга келмаса
- Ўтказувчанлик вақтинча вужудга келиб, сўнг сўниб қолса

67.Ионларни ҳаракатланувчанлиги деб нимага айтилади?

- Ионларни ҳаракатланиш қобилиятига
- Ионларни ҳаракатланишга қаршилик қилиш қобилиятига
- Ионларни магнит майдондаги ҳаракатланиш қобилиятига
- Ионларни бирлик электр майдонидаги ўртача тезлигига

68.Электролиз учун Фарадейнинг биринчи қонунини ёзинг:

- $m = kU$
- $m = k / U$
- $m = kIt$
- $m = k / It$

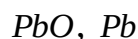
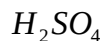
69.Электролиз учун Фарадейнинг иккинчи қонунини ёзинг

- $k = Fn / \mu$
- $k = \mu / Fn$
- $k = \mu F / n$
- $k = \mu m / F$

70.Фарадей сони элементар заряд билан қандай боғланган?

- $F = eN_A$
- $F = e / N_A$
- $F = N_A / e$
- $F = e^2 N_A$

71.Автомобиль аккумуляторида қандай моддалар бор?



Юқоридагиларни ҳаммаси

72.Электр учқуни билан электр ёйи нима билан фарқ қилади?

- Электр учқуни узоқ давом этувчи разряд
- Электр учқуни жуда қисқа давом этувчи разряд
- Электр ёйи жуда қисқа давом этувчи разряд
- Электр учқуни электр ёйидан иссиқроқ бўлади

73.Магнит майдоннинг қандай характеристикаларини биласиз?

- $\vec{H}$
- $w = \vec{H}\vec{B} / 2$
- $\vec{B}$
- Юқоридагиларни ҳаммаси

74. $\vec{B}$ ва $\vec{H}$ бир биридан физик жихатдан қандай фарқ қилади?

- $\vec{H}$ боғланган зарядларни майдони
- $\vec{B}$ – эркин зарядларни майдони
- $\vec{B}$ - тўлиқ, $\vec{H}$ - фақат эркин тоқларнинг майдони
- Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

75. $\vec{B}$ ва $\vec{H}$ бир-бири билан қандай боғлиқ?

- $\vec{B} = \mu\vec{H}$
- $\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$
- $\vec{H} = \mu\vec{B}$
- $\vec{H} = \mu_0\mu\vec{B}$

76.Био-Савара-Лаплас қонунини ёзинг.

- $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(d\vec{l} \times \vec{r})}{r^2}$
- $d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{(d\vec{l} \times \vec{r})}{r^3}$
- $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(d\vec{l} \times \vec{r})}{r^2}$
- $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(d\vec{l} \times \vec{r})}{r}$

77. Тўғри чизиqli токнинг магнит майдонини ёзинг.

- $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}$
- $B = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi b}$
- $B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi b}$
- $B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi b^2}$

78. Токли контур марказидаги магнит майдонини ёзинг.

- $B = \frac{\mu_0 I}{2R^2}$
- $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$
- $B = \frac{\mu_0 I}{2R^3}$
- $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}$

79. Тўлиқ ток қонунини ёзинг:

- $\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$
- $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I$
- $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \mu\mu_0 I$
- $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = I$

80. $\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$ тенглик қандай физик маънони англатади?

- S сирт ичида зарядлар йўқлигини
- S сирт ичида тоқлар йўқлигини
- Электр майдон индукцияси чизиқлари узлусизлигини
- Магнит майдон индукцияси чизиқлари узлусизлигини

81. Тўлиқ ток қонунининг дифференциал кўринишини ёзинг:

- $\text{rot} \vec{E} = \vec{j}$
- $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- $\text{rot} \vec{B} = \vec{j}$
- $\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$

82. Торонд ичидаги магнит майдонини ёзинг.

- $B = nI$
- $B = 2nI$
- $H = 2nI$
- $H = nI$

83. Ёпик сирт бўйича магнит майдон индукция оқими нимага тенг?

- BS
- HS
- 0
- $(B - H)S$

84. Фарадей кашф этган электромагнит индукция қонунининг моҳияти нимада?

- Ўзгарувчи электр майдон магнит майдонни вужудга келтиради
- Ўзгарувчан электр майдон доимий магнит майдонни вужудга келтиради
- Ўзгарувчан магнит майдон электр майдонни вужудга келтиради
- Ўзгарувчан магнит майдон доимий электр майдонни вужудга келтиради

85. Ленц қонидасини ёзинг:

- Индукцион ток ташқи ўзгаришни кучайтиришга интилади
- Индукцион ток ташқи ўзгаришни чеклашга интилади
- Индукцион ток уярмавий характерга эга
- Индукцион ток сўнувчи характерга эга

86. Лоренц кучини ёзинг:

- $\vec{F} = -q\vec{\mathcal{G}} \times \vec{H}$
- $\vec{F} = q\vec{\mathcal{G}} \times \vec{B}$
- $\vec{F} = e|\vec{\mathcal{G}} \times \vec{B}|$
- $\vec{F} = -e\vec{\mathcal{G}}|\vec{B}|$

87. Токли ўтказгич кесмасига таъсир этувчи магнит кучни (Ампер қонуни) ёзинг:

- $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}$
- $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b^2}$
- $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b} S$
- $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1}{b}$

88. Холл эффектини тушунтиринг:

- Магнит майдондаги токли ўтказгичга тик куч таъсир этади
- Магнит майдондаги токли ўтказгичда Фуко токлари вужудга келади
- Магнит майдондаги токли ўтказгичда токка тик электр майдон вужудга келади

- Магнит майдондаги токли ўтказгичдаги электр майдон ток йўналишида бўлади.

89.Токли контур магнит моменти нимага тенг?

- $p_m = I / r$
- $p_m = IS$
- $p_m = Ir^2$
- $\vec{N} = \vec{p}_m \times \vec{H}$

90.Магнит дипольга таъсир этувчи куч моментини ёзинг:

- $\vec{N} = \vec{p}_m \times \vec{H}$
- $\vec{N} = \vec{p}_m + \vec{H}$
- $\vec{N} = 2\vec{p}_m \times \vec{H}$
- $\vec{N} = \vec{p}_m \times \vec{B}$

91.Парамагнетик ташқи магнит майдонни кучайтирадимиз, ёки кучсизлантирадимиз?

- Кучайтиради
- Кучсизлантиради
- Температура Кюри нуқтасидан паст бўлса – кучайтиради
- Температура Кюри нуқтасидан юқори бўлса - кучайтиради

92.Магнит майдон манбаъсизлигини (узлуксизлигини) қандай математик ифода билан кўрсатиш мумкин?

- $\oint_s \vec{H} d\vec{S} = 0$
- $\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$
- $\text{rot}\vec{B} = 0$
- $\text{rot}\vec{H} = 0$
- Юқоридагиларни ҳаммаси билан

93.Трансформатор ёрдамида доимий ток кучланишини ошириш мумкинми?

- Ҳа
- Йўқ
- Доимий ток уч фазали бўлса – мумкин
- Импульсли ток учун мумкин

94.Максвелл тенгламаларини ёзинг.

- $\text{div}\vec{D} = \rho, \text{div}\vec{B} = 0$
- $\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\vec{j} = 0$
- $\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
- $\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\vec{j} = 0$
- А ва С
- В ва D

95. Силжиш токи иштирок этадиган Максвелл тенгламасини ёзинг.

- $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$
- $\operatorname{div} \vec{B} = 0$
- $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

96. Индуктивликни киритувчи тенгликни ёзинг:

- $E = -L \frac{dI}{dt}$
- $\Phi = LI$
- $L = \mu\mu_0 n^2 V$
- $W = LI^2 / 2$

97. Магнит майдон энергиясини зичлигини ёзинг:

- $w = H^2 / 2$
- $w = B^2 / 2$
- $w = H^2 / 2\mu\mu_0$
- $w = \mu\mu_0 B^2 / 2$
- $w = \vec{H}\vec{B} / 2$

98. Токли индуктив ғалтак энергиясини ёзинг:

- $W = \mathcal{L}^2 / 2$
- $W = \mathcal{L} I$
- $W = LI^2 / 2$
- $W = LI^2$

100. Фуко токи деб нимага айтилади?

- Индукция ҳодисаси туфайли вужудга келадиган ток
- Индукция ҳодисаси туфайли хажмли ўтказгичларда вужудга келадиган айланма тоқлар
- Индукция ҳодисаси туфайли ўтказгичларни қиздирадиган тоқлар
- Трансформаторни иккиламчи чўлғамларида вужудга келадиган индукцион тоқлар

101. Ўзгарувчан ток нега бундай аталади?

- Қиймати даврий ўзгаргани учун
- Фазаси ўзгаргани учун
- Кучланиши даврий ўзгаргани учун
- Йўналиши даврий ўзгариб тургани учун

102. Ўзгарувчан ток қуввати қандай ҳисобланади?

- $P = IU$
- $P = IU \cos \varphi$
- $P = IU^2 \cos \varphi$
- $P = I^2 U \cos \varphi$

103.Электромоторларда айланувчи магнит майдон қандай ҳосил қилинади?

- Ўзгарувчан ток ёрдамида
- Уч фазали ўзгарувчан ток ёрдамида
- Икки фазали ўзгарувчан ток ёрдамида
- Бир фазали ўзгарувчан ток ёрдамида

104.Уч фазали ўзгарувчан токни кенг қўлланишини сабабларини айтинг:

- Уч фазали ток энг қулай, айланма ҳаракат ёрдамида ҳосил қилинади.
- Уч фазали ток ёрдамида электромаоторларда айланувчи магнит майдон ҳосил қилинади.
- Учта фазадаги тоқлар еғиндиси нольга яқиндир
- Трансформатор ёрдамида ўзгарувчан токни кучланишини ўзгартириш қулай.
- Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

105.Моддани магнитланиши қандай рўй беради?

- Ташқи, эркин зарядларни магнит майдонида атом-молекулаларнинг магнит моментлари вужудга келиши ва тартиблашуви туфайли.
- Доменларнинг магнит моментлари тартиблашуви туфайли
- Атомларнинг магнит моментлари тартиблашуви туфайли
- Барча атомларда диамагнит кутблашиш вужудга келиши туфайлик

106.Электромагнит тўлқинни қандай ташкил этувчилари бор?

- Электр ташкил этувчиси
- Магнит ташкил этувчиси
- Бўйлама ташкил этувчиси
- Кўндаланг ташкил этувчиси
- Электр ва магнит ташкил этувчиси

107.Электромагнит тўлқин бўйламами, ёки кўндалангми?

- Бўйлама
- Кўндаланг
- Бўйлама ва кўндаланг
- Юқоридагиларни ҳаммаси тўғри

108.Электромагнит тўлқинни бўшлиқдаги тезлиги нимага тенг?

- $300Mm/c$
- $300km/c$
- $30 \cdot 10^6 m/c$
- $3 \cdot 10^9 m/c$

109. $\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ нимага тенг?

- c
- c^2
- $1/c$
- $1/c^2$

110. $\varepsilon \mu$ нимага тенг?

- n
- n^2
- n^4
- Ҳаммаси нотўғри

111. $\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0$ нимага тенг?

- n/c
- $(n/c)^2$
- $(n/c)^3$
- $(n/c)^4$

112. Электромагнит тўлқиннинг муҳитдаги тезлиги нимага тенг?

- $c\varepsilon$
- $c\mu$
- $c\varepsilon\mu$
- c/n

113. Электромагнит тўлқин учун синиш қонунини ёзинг.

- $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}$
- $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}$
- $\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}$
- $\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}$

114. Электромагнит тўқин учун қайтиш қонунини ёзинг.

- $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2$
- $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$
- $\alpha_1 + \alpha_2 = 0$
- $\alpha_1 = \alpha_2$

115. Электромагнит тебранма контур учун Томсон формуласини ёзинг.

- $T = 2\pi\sqrt{LC}$
- $T = 2\pi/\sqrt{LC}$
- $T = 2\pi\sqrt{C/L}$
- $T = 2\pi/LC$
-

116.Эркин электромагнит тебранишлар нима учун сўнувчан бўлади?

- Конденсаторда энергия ютилиши туфайли
- Тебранишда энергия ютилиши туфайли
- Индуктивликда энергияни ютилиши туфайли
- Актив қаршилиқда энергияни ютилиши туфайли

117.Мажбурий электромагнит тебранишлар деб қандай тебранишларга айтилади?

- Физик қонун талабига кўра тебранишларга
- Оғирлик кучи таъсиридаги тебранишларга
- Электр кучи таъсиридаги тебранишларга
- Ташқи даврий таъсир туфайли рўй берувчи электромагнит тебранишларга

118.Бўшлиқдаги электромагнит тўлқин узунлиги λ бўлса, частотаси нимага тенг?

- $c\lambda$
- c/λ
- $c/\lambda n$
- $c\lambda n$

119.Инфроқизил нурлар радио тўлқинлардан нимаси билан фарқ қилади?

- Инфроқизил нурларни частотаси кичикроқ
- Инфроқизил нурларни частотаси каттароқ
- Инфроқизил нурларни тўлқин узунлиги каттароқ
- Инфрақизил нурлар иссиқроқ

120. $\vec{E}$ нинг бирлиги қандай?

- N/kg
- N/C
- V/km
- Vm

121. $\vec{D}$ нинг бирлиги қандай?

- Cm^2
- Cm
- C/m
- C/m^2

122. φ нинг бирлиги қандай?

- Nm/s
- V
- V/m
- Vc

123. Q нинг бирлиги қандай?

- A
- A/c
- C/s
- $A \cdot s$

124. Заряд сирт зичлигининг бирлиги қандай?

- C/m
- Cm
- C/m^2
- As/m

125. Электр диполь моментининг бирлиги қандай?

- Cm
- Cm^2
- Am
- Am^2

126. C нинг бирлиги қандай?

- Фуко
- Ферми
- Фарада
- Фейнман

127. I нинг бирлиги қандай?

- C
- Cs
- C/s
- A

128. j нинг бирлиги қандай?

- A
- A/m
- A/m^2
- Am^2

129. R нинг бирлиги қандай?

- VA
- VA^2
- V/A
- Ω

130. Солиштира қаршиликнинг бирлиги қандай?

- Ω/m^2
- Ω/m
- Ωm
- Ωm^2

131. ЭЮКнинг бирлиги қандай?

- V
- A
- W
- N

132. $\vec{B}$ нинг бирлиги қандай?

- Wb
- T
- H
- F

133. $\vec{H}$ нинг бирлиги қандай ?

- Wb
- T
- A/m
- F

134. Магнит моментнинг бирлиги қандай

- Am^2
- Am^3
- A/m
- A/m^2

135. L нинг бирлиги қандай?

- H
- H/m
- T
- Wb

136. $\varepsilon_0\mu_0$ нинг бирлиги қандай?

- sm
- $(sm)^2$
- s/m
- $(s/m)^2$



**ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРИНИНГ
БУЙРУҒИ**

**Олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш
ва баҳолаш тизими тўғрисидаги низомни тасдиқлаш ҳақида**

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 5 июндаги ПҚ-3775-сон “Олий таълим муассасаларида таълим сифатини ошириш ва уларнинг мамлакатда амалга оширилаётган кенг қамровли ислохотларда фаол иштирокини таъминлаш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорига мувофиқ буюраман:

1. Олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш ва баҳолаш тизими тўғрисидаги низом иловага мувофиқ тасдиқлансин.
2. Мазкур буйруқ расмий эълон қилинган кундан эътиборан кучга киради.

Вазир

Тошкент ш.,
2018 йил “9” август
19-2018-сон



И. Маджидов

Олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш ва баҳолаш тизими тўғрисидаги низом

Мазкур Низом Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 5 июндаги ПКҚ–3775-сон “Олий таълим муассасаларида таълим сифатини ошириш ва уларнинг мамлакатда амалга оширилаётган кенг қамровли ислохотларда фаол иштирокини таъминлаш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорига мувофиқ олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш ва баҳолаш тизимини белгилайди.

1-боб. Умумий қондалар

1. Мазкур Низом 2018-2019 ўқув йилида, шунингдек кейинги ўқув йилларида олий таълим муассасаларига ўқишга қабул қилинган талабаларнинг билимини назорат қилиш ҳамда баҳолашда қўлланилади.

2. Мазкур Низом талаблари қонун ҳужжатларига мувофиқ ўқув жараёни модул тизимига асосланган олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш ва баҳолашда қўлланилмайди.

3. Талабалар олий таълим муассасалари профессор-ўқитувчилари томонидан биринчи машғулотда мазкур Низом талаблари билан таништирилиши шарт.

4. Талабалар билимини баҳолашда малакавий амалиёт, курс иши, фан (фанлараро) давлат аттестацияси, битирув малакавий иши, шунингдек магистратура босқичида илмий-тадқиқот ва илмий-педагогик ишлар ҳамда магистрлик диссертацияси бўйича мазкур Низомда белгиланган баҳолаш мезонлари қўлланилади.

2-боб. Назорат турлари ва баҳолаш мезонлари

1-§. Назорат турлари

5. Олий таълим муассасаларида талабалар билимини назорат қилиш оралиқ ва якуний назорат турларини ўтказиш орқали амалга оширилади.

6. Оралиқ назорат семестр давомида ишчи фан дастурининг тегишли бўлими тугагандан кейин талабанинг билим ва амалий кўникмаларини баҳолаш мақсадида ўқув машғулотлари давомида ўтказилади.

7. Оралиқ назорат тури ҳар бир фан бўйича фаннинг хусусиятидан келиб чиққан ҳолда 2 мартагача ўтказилиши мумкин.

Оралиқ назорат турини ўтказиш шакли ва муддати фаннинг хусусияти ва фанга ажратилган соатлардан келиб чиқиб тегишли кафедра томонидан белгиланади.

8. Оралиқ назорат турининг топшириқлари тегишли кафедра профессор-ўқитувчилари томонидан ишлаб чиқилади ва мазкур кафедра мудири томонидан тасдиқланади.

9. Семестр давомида ҳафтасига 2 академик соатдан (тиббиёт олий таълим муассасаларида 4 академик соатдан) кам бўлган фанлар бўйича оралиқ назорат тури ўтказилмайди.

10. Талабанинг амалий, семинар, лаборатория машғулоти ва мустақил таълим топшириқларини бажариши, шунингдек унинг ушбу машғулотлардаги фаоллиги фан ўқитувчиси томонидан баҳолаб борилади. Баҳолаш мазкур Низомнинг 15-бандида назарда тутилган мезонлар асосида амалга оширилади.

Талабани оралиқ назорат тури бўйича баҳолашда, унинг ўқув машғулоти давомида олган баҳолари инобатга олинади.

11. Якуний назорат тури семестр якунида (тиббиёт олий таълим муассасаларида фан якунида) тегишли фан бўйича талабанинг назарий билим ва амалий кўникмаларини ўзлаштириш даражасини аниқлаш мақсадида ўтказилади.

12. Якуний назорат турини ўтказиш шакли тегишли фан бўйича кафедра томонидан белгиланади.

13. Якуний назорат тури олий таълим муассасасининг тегишли факультет декани ёки ўқув-услубий бўлим томонидан ишлаб чиқиладиган ҳамда ўқув ишлари бўйича проректор томонидан тасдиқланадиган Якуний назорат турларини ўтказиш жадвалига мувофиқ ўтказилади.

14. Тиббиёт олий таълим муассасаларида оралиқ ва якуний назорат турлари объектив тизимлаштирилган клиник синов ёки объектив тизимлаштирилган имтиҳон шаклларида ўтказилиши мумкин.

2-§. Талабалар билимини баҳолаш мезонлари

15. Талабаларнинг билими қуйидаги мезонлар асосида:

талаба мустақил ҳулоса ва қарор қабул қилади, ижодий фикрлай олади, мустақил мушоҳада юритади, олган билимини амалда қўллай олади, фаннинг (мавзунинг) моҳиятини тушунади, билади, ифодалай олади, айтиб беради ҳамда фан (мавзу) бўйича тасаввурга эга деб топилганда – 5 (аъло) баҳо;

талаба мустақил мушоҳада юритади, олган билимини амалда қўллай олади, фаннинг (мавзунинг) моҳиятни тушунади, билади, ифодалай олади, айтиб беради ҳамда фан (мавзу) бўйича тасаввурга эга деб топилганда – 4 (яхши) баҳо;

талаба олган билимини амалда қўллай олади, фаннинг (мавзунинг) моҳиятни тушунади, билади, ифодалай олади, айтиб беради ҳамда фан (мавзу) бўйича тасаввурга эга деб топилганда – 3 (қониқарли) баҳо;

талаба фан дастурини ўзлаштирмаган, фаннинг (мавзунинг) моҳиятини тушунмайди ҳамда фан (мавзу) бўйича тасаввурга эга эмас деб топилганда – 2 (қониқарсиз) баҳо билан баҳоланади.

16. Назорат турларини ўтказиш бўйича тузилган топшириқларнинг мазмуни талабанинг ўзлаштиришини ҳолис (объектив) ва аниқ баҳолаш имкониятини бериши шарт.

3-боб. Талабалар билимини баҳолаш

17. Талабалар билимини баҳолаш 5 баҳолик тизимда амалга оширилади.

18. Оралиқ назорат турини ўтказиш ва мазкур назорат тури бўйича талабанинг билимини баҳолаш тегишли фан бўйича ўқув машғулотларини олиб борган профессор-ўқитувчи томонидан амалга оширилади.

Якуний назорат турини ўтказиш ва мазкур назорат тури бўйича талабанинг билимини баҳолаш ўқув машғулотларини олиб бормаган профессор-ўқитувчи томонидан амалга оширилади.

Тегисли фан бўйича ўқув машғулотларини олиб борган профессор-ўқитувчи якуний назорат турини ўтказишда иштирок этиши тақиқланади.

Якуний назорат турини ўтказишда келишув асосида бошқа олий таълим муассасаларининг тегишли фан бўйича профессор-ўқитувчилари жалб қилиниши мумкин.

19. Тиббиёт олий таълим муассасаларида оралиқ ва якуний назорат турларини ўтказиш, шунингдек талабаларнинг билимини баҳолаш тегишли кафедра мудири томонидан ташкил этиладиган комиссия томонидан амалга оширилади.

Комиссия таркиби тегишли фан профессор-ўқитувчилари ва соҳа мутахассислари орасидан шакллантирилади.

Комиссия таркибига келишув асосида бошқа ташкилотларнинг соҳа мутахассислари ҳам жалб қилиниши мумкин.

20. Олий таълим муассасасида назорат турларини ўтказилиши тегишли олий таълим муассасасининг таълим сифатини назорат қилиш бўлими томонидан доимий равишда ўрганиб борилади. Бунда назорат турларини ўтказилиш тартиби бузилганлиги аниқланган ҳолларда, ўтказилган назорат турларининг натижалари бекор қилиниши ҳамда тегишли назорат тури қайтадан ўтказилиши мумкин.

21. Талаба тегишли фан бўйича якуний назорат тури ўтказиладиган муддатга қадар оралиқ назорат турини топширган бўлишлари шарт.

22. Оралиқ назорат турини топширмаган, шунингдек ушбу назорат тури бўйича “2” (қониқарсиз) баҳо билан баҳоланган талаба якуний назорат турига киритилмайди.

Якуний назорат турига кирмаган ёки киритилмаган, шунингдек ушбу назорат тури бўйича “2” (қониқарсиз) баҳо билан баҳоланган талаба академик қарздор ҳисобланади.

23. Талаба узрли сабабларга кўра оралиқ ва (ёки) якуний назорат турига кирмаган тақдирда ушбу талабага тегишли назорат турини қайта топширишга факультет деканининг фармойиши асосида рухсат берилади.

24. Бир кунда 1 тадан ортиқ фан бўйича якуний назорат тури ўтказилишига йўл қўйилмайди. Якуний назорат турларини ўтказиш камида 2 кун оралиғида белгиланиши лозим.

25. Битирувчи курс бўлмаган талабалар кузги семестр натижалари бўйича 3 тагача фандан (фанлардан) академик қарздорлиги бўлган ҳолларда талабага бир ойгача, баҳорги семестр натижалари бўйича 3 тагача фандан (фанлардан) академик қарздорлиги бўлган талабага тегишли фан (фанлар) бўйича оралиқ ва (ёки) якуний назорат турларини янги ўқув йили бошидан қайта топшириш учун 1 ой муддат берилади.

Битирувчи курс талабаларига баҳорги семестр натижалари бўйича ўзлаштирмаган фандан (фанлардан) қайта топшириш учун якуний давлат аттестацияси бошлангунга қадар рухсат берилади.

Фанлардан академик қарздорлиги 4 та ва ундан кўп бўлган талабаларга қайта топширишга рухсат берилмайди ва улар олий таълим муассасаси ректорининг (бошлигининг, филиал директорининг) буйруғи билан курсдан қолдирилади.

26. Талабага оралиқ ва (ёки) якуний назорат турини қайта топшириш учун берилган муддат давомида талаба томонидан қайта топширишлар сони 2 мартадан кўп бўлмаслиги керак.

Талаба оралиқ ва (ёки) якуний назорат турини биринчи марта қайта топширишдан ўта олмаган тақдирда, факультет декани томонидан комиссия тузилади. Комиссия таркиби тегишли фан бўйича профессор-ўқитувчи ва соҳа мутахассислари орасидан шакллантирилади.

Иккинчи марта оралиқ ва (ёки) якуний назорат турини ўтказиш ва талабани баҳолаш мазкур комиссия томонидан амалга оширилади.

27. Берилган муддат давомида мавжуд бўлган қарздорликни топшира олмаган талаба бўйича факультет декани билдирги билан олий таълим муассасаси ректорини (бошлиғини, филиал директорини) хабардор қилади ва ушбу талаба ректор (бошлиқ, филиал директори) буйруғи асосида курсдан қолдирилади.

28. Талаба узрли сабабларсиз малакавий амалиётга қатнашмаган, шунингдек малакавий амалиёт якунлари бўйича “2” (қониқарсиз) баҳо билан баҳоланган ҳолларда, у академик қарздор ҳисобланади ва курсдан қолдирилади.

29. Курсда қолдирилган талаба фанни (фанларни) ўзлаштирмаган семестр бошидан тўлов-контракт асосида мазкур ўқув йилининг тегишли семестри учун тасдиқланган ўқув режага мувофиқ ўқишни давом эттиради.

30. Баҳолаш натижасидан норози бўлган талабалар факультет декани томонидан ташкил этиладиган Апелляция комиссиясига апелляция бериш ҳуқуқига эга.

31. Апелляция комиссияси таркибига талабани баҳолашда иштирок этмаган тегишли фан профессор-ўқитувчилари орасидан комиссия раиси ва камида тўрт нафар аъзо киритилади.

32. Талаба баҳолаш натижасидан норози бўлган тақдирда, баҳолаш натижаси эълон қилинган вақтдан бошлаб 24 соат давомида апелляция бериши мумкин. Талаба томонидан берилган апелляция Апелляция комиссияси томонидан 2 кун ичида кўриб чиқиши лозим.

33. Талабанинг апелляциясини кўриб чиқишда талаба иштирок этиш ҳуқуқига эга.

34. Апелляция комиссияси талабанинг апелляциясини кўриб чиқиб, унинг натижаси бўйича тегишли қарор қабул қилади. Қарорда талабанинг тегишли фанни ўзлаштиргани ёки ўзлаштира олмагани кўрсатилади.

Апелляция комиссияси тегишли қарорни факультет декани ва талабага етказилишини таъминлайди.

4-боб. Баҳолаш натижаларини қайд қилиш

35. Талабалар билимини баҳолаш тегишли фан бўйича профессор-ўқитувчи томонидан Талабаларнинг фанларни ўзлаштиришини ҳисобга олиш журналида (бундан буён матнда Журнал деб юритилади) қайд этиб борилади. Профессор-ўқитувчи қўшимча равишда талабалар билимини баҳолашни электрон тизимда ҳам юритиши мумкин.

Профессор-ўқитувчи Журналда талабага қўйилган баҳоларни шу куннинг ўзида қайд этиб боради. Агар талабанинг билимини баҳолаш ёзма иш шаклида ўтказилган бўлса, бунда профессор-ўқитувчи талабаларнинг натижаларини 3 кундан кўп бўлмаган муддатда Журналга қайд этиши лозим.

36. Назорат тури бўйича талабанинг билими “3” (қониқарли) ёки “4” (яхши) ёхуд “5” (аъло) баҳо билан баҳоланганда, назорат турини қайта топширишга йўл қўйилмайди.

37. Талаба назорат тури ўтказилган вақтда узрли сабабларсиз қатнашмаган ҳолларда Журналга “0” белгиси ёзиб қўйилади.

38. Журнал тегишли фан бўйича ўқув машғулотларини олиб борган профессор-ўқитувчи, кафедра мудири ва факультет декани томонидан имзоланади ҳамда факультет деканатида сақланади. Журналнинг сақланиши учун факультет декани масъул ҳисобланади.

39. Талабаларнинг якуний назорат тури бўйича баҳолари Журналга қайд этилганда, шу куннинг ўзида талабанинг Баҳолаш дафтарига ҳам ёзиб қўйилиши керак.

40. Якуний назорат тури бўйича талабанинг билими “2” (қониқарсиз) баҳо билан баҳоланган ёки Журналга “0” белгиси ёзиб қўйилган ҳолларда ушбу баҳо ёки белги талабанинг Баҳолаш дафтарига ёзилмайди.

41. Журналнинг ўз вақтида, тўғри ва тўлиқ юритилиши, шунингдек ундаги баҳо ва бошқа маълумотларга асоссиз ўзгартиришлар киритилмаслиги учун факультет декани ва тегишли фан бўйича профессор-ўқитувчи масъул ҳисобланади.

42. Тегишли ўқув йили якуни бўйича ишчи ўқув режадаги фанлар бўйича “3” (қониқарли) ёки “4” (яхши) ёхуд “5” (аъло) баҳо билан баҳоланган талаба олий таълим муассасаси ректорининг (бошлигининг, филиал директорининг) буйруғига асосан кейинги курсга ўтказилади.

43. Баҳолаш натижалари кафедра йиғилишлари, факультет ва олий таълим муассасаси Кенгашларида мунтазам равишда муҳокама этиб борилади ва тегишли қарорлар қабул қилинади.

44. Ўзбекистон Республикасининг олий таълим муассасаларида талабалар ўзлаштиришини баҳолаш тизимини 5 баҳо ёки 100 баллик тизим ва илғор хорижий давлатлар олий таълим тизимида қўлланиладиган баҳолаш тизимига қиёсий таққослаш ҳамда уларга ўтказиш мазкур Низомнинг иловасига мувофиқ жадваллар асосида амалга оширилади.

5-боб. Якуний қонда

45. Мазкур Низом Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Давлат тест маркази, Халқ таълими вазирлиги, Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Таълим сифатини назорат қилиш инспекцияси, Соғлиқни сақлаш вазирлиги, Иқтисодиёт вазирлиги, Молия вазирлиги, Ташқи ишлар вазирлиги, Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлиги, Маданият вазирлиги, Жисмоний тарбия ва спорт вазирлиги, Қурилиш вазирлиги, “Ўзбекистон темир йўллари” акциядорлик жамияти, Автомобиль йўллари давлат қўмитаси, “Навоий кон-металлургия комбинати” давлат корхонаси, Ўзбекистон Бадий академияси ҳамда Давлат солиқ қўмитаси билан келишилган.

Олий таълим муассасаларида талабалар
билимини назорат қилиш ва баҳолаш
tizими тўғрисидаги низомга
ИЛОВА

1-жадвал

**Баҳолашни 5 баҳолик шкаладан 100 баллик шкалага ўтказиш
ЖАДВАЛИ**

5 баҳолик шкала	100 баллик шкала	5 баҳолик шкала	100 баллик шкала	5 баҳолик шкала	100 баллик шкала
5,00-4,96	100	4,30-4,26	86	3,60-3,56	72
4,95-4,91	99	4,25-4,21	85	3,55-3,51	71
4,90-4,86	98	4,20-4,16	84	3,50-3,46	70
4,85-4,81	97	4,15-4,11	83	3,45-3,41	69
4,80-4,76	96	4,10-4,06	82	3,40-3,36	68
4,75-4,71	95	4,05-4,01	81	3,35-3,31	67
4,70-4,66	94	4,00-3,96	80	3,30-3,26	66
4,65-4,61	93	3,95-3,91	79	3,25-3,21	65
4,60-4,56	92	3,90-3,86	78	3,20-3,16	64
4,55-4,51	91	3,85-3,81	77	3,15-3,11	63
4,50-4,46	90	3,80-3,76	76	3,10-3,06	62
4,45-4,41	89	3,75-3,71	75	3,05-3,01	61
4,40-4,36	88	3,70-3,66	74	3,00	60
4,35-4,31	87	3,65-3,61	73	3,0 дан кам	60 дан кам

2-жадвал

**Олий таълимда талабалар ўзлаштиришини баҳолаш тизимларини қиёсий таққослаш
ЖАДВАЛИ**

Таклиф этилаётган Ўзбекистон тизими	Россия тизими (МДУ)*	Европа кредит трансфер тизими (ECTS – European Credit Transfer System)	Америка тизими (A- F)	Британия тизими (%)	Япония тизими (%)	Корея тизими (%)	Ўзбекистон тизими (%)
“5”	“5”	“A”	“A+”	70-100	80-100	90-100	90-100
			“A”				
			“A-“	65-69			
“4”	“4”	“B”	“B+”	60-64	70-79	80-89	70-89,9
		“C”	“B”	50-59			
			“B-“				
“3”	“3”	“D”	“C+”	45-49	60-69	70-79	60-69,9
		“E”	“C”	40-44		60-69	
			“C-“				
			“D+”				
			“D”				
			“D-“				
“2”	“2”	“FX”	“F”	0-39	0-59	0-59	0-59,9
		“F”					

Л. Г. ГРЕЧКО
В. И. СУГАКОВ
О. Ф. ТОМАСЕВИЧ
А. М. ФЕДОРЧЕНКО

Сборник задач по теоретической физике

Издание второе,
переработанное
и дополненное

Допущено
Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов физических специальностей
высших учебных заведений



Москва «Высшая школа» 1984

Раздел II

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Определение основных величин. Основными величинами, характеризующими электромагнитное поле, являются напряженность E электрического поля и магнитная индукция B . Напряженность электрического поля определяется по силе, действующей на некоторый пробный заряд e , из соотношения

$$F = eE; \quad (2.1)$$

магнитная индукция — по силе, действующей на элемент проводника dl , по которому течет ток силой I :

$$dF = I [dl, B]. \quad (2.2)$$

При рассмотрении электромагнитных полей в диэлектриках или магнетиках удобно ввести еще две характеристики электромагнитного поля — электрическую индукцию (смещение)

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.3)$$

и напряженность магнитного поля

$$H = B/\mu_0 - J, \quad (2.4)$$

где P — поляризованность, J — намагниченность, ϵ_0 и μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные. Их числовые значения равны

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (2.5)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (2.6)$$

$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$, где $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ — скорость света.

Связь между векторами P и E , J и B определяется свойствами среды. В линейном по полю приближении в случае полей, медленно меняющихся в пространстве и времени (без учета дисперсии), для анизотропной среды имеют место соотношения

$$P_i = \epsilon_0 \alpha_{ik} E_k, \quad (2.7)$$

$$J_i = \chi_{ik} H_k. \quad (2.8)$$

Индексы i и k принимают значения 1, 2, 3 и обозначают проекции вектора на оси x , y и z . Если некоторый индекс встречается дважды, то имеет место суммирование по этому

индексу. Здесь α_{ik} называется *тензором поляризуемости вещества*, χ_{ik} — *тензором магнитной восприимчивости*.

Из соотношений (2.3), (2.4), (2.7), (2.8) можно получить выражения, связывающие векторы $\mathbf{D}$ и $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{H}$:

$$D_i = \varepsilon_{ik} \varepsilon_0 E_k, \quad (2.9)$$

$$B_i = \mu_{ik} \mu_0 H_k, \quad (2.10)$$

где $\varepsilon_{ik} = \delta_{ik} + \alpha_{ik}$ — *тензор диэлектрической проницаемости*, $\mu_{ik} = \delta_{ik} + \chi_{ik}$ — *тензор магнитной проницаемости*.

В изотропной среде соотношения (2.7) — (2.10) упрощаются:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \alpha \mathbf{E}, \quad (2.11) \quad \mathbf{J} = \chi \mathbf{H}, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (2.13) \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (2.14)$$

где $\varepsilon = 1 + \alpha$ — диэлектрическая проницаемость среды, $\mu = 1 + \chi$ — магнитная проницаемость среды.

Уравнения Максвелла. Исходной системой уравнений электродинамики являются уравнения Максвелла (в интегральной форме):

$$\oint H_l dl = \int j_n dS + \int \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right)_n dS, \quad (2.15)$$

$$\oint E_l dl = - \int \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_n dS, \quad (2.16)$$

$$\oint D_n dS = \int \rho dV, \quad (2.17)$$

$$\oint B_n dS = 0. \quad (2.18)$$

Здесь j_n — проекция на нормаль плотности тока проводимости $\mathbf{j}$, ρ — объемная плотность зарядов.

В дифференциальной форме уравнения Максвелла имеют вид

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.19) \quad \text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.20)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (2.21) \quad \text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (2.22)$$

На границе раздела двух сред выполняются граничные условия:

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma, \quad (2.23) \quad E_{1t} = E_{2t}, \quad (2.24)$$

$$B_{2n} = B_{1n}, \quad (2.25) \quad [\mathbf{n}, \mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1] = \mathbf{i}, \quad (2.26)$$

где $\mathbf{n}$ — нормаль к поверхности, проведенная из среды 1 в среду 2, σ — плотность поверхностных зарядов, $\mathbf{i}$ — плотность поверхностного тока, E_t — тангенциальная составляющая электрического поля на границе раздела, D_n и B_n — нормаль-

ные составляющие электрической и магнитной индукции на границе раздела.

Электростатика. В электростатике изучается область электрических явлений, в которых все величины не зависят от времени и, кроме того, отсутствует движение зарядов. Система уравнений электростатики имеет вид

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad (2.27) \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (2.28)$$

Потенциал электростатического поля определяется соотношением

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (2.29)$$

В однородной среде потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\Delta \varphi = -\rho / (\varepsilon \varepsilon_0), \quad (2.30)$$

в случае отсутствия зарядов — уравнению Лапласа $\Delta \varphi = 0$.

На границе раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 справедливы граничные условия

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad (2.31)$$

$$\varepsilon_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_1 - \varepsilon_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \quad (2.32)$$

Связь между плотностью поверхностных зарядов на поверхности проводника и потенциалом у проводника имеет вид

$$\sigma = -\varepsilon \varepsilon_0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_S. \quad (2.33)$$

Полный заряд проводника равен

$$e = - \oint \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS, \quad (2.34)$$

где интегрирование проходит по поверхности S проводника.

Для системы проводников наиболее распространены следующие постановки задач.

Найти потенциал в любой точке системы, если:

1) заданы потенциалы проводников φ_i

$$\varphi(\mathbf{r})|_{S_i} = \varphi_i; \quad (2.35)$$

2) заданы заряды проводников e_i , тогда

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{r})|_{S_i} &= \text{const}, \\ - \oint_{S_i} \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS_i &= \frac{e_i}{\varepsilon_0}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Большое количество задач электростатики, обладающих цилиндрической симметрией, решается с помощью функций комплексного переменного. Действительная и мнимая части аналитической функции $W(z) = \varphi + i\Psi$ комплексной переменной $z = x + iy$ являются решениями уравнения Лапласа: $\Delta\varphi = 0$ и $\Delta\Psi = 0$. Кроме того, выполняется соотношение

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x} \frac{\partial\Psi}{\partial x} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \frac{\partial\Psi}{\partial y} = 0,$$

т. е. линии $\varphi = \text{const}$ и $\Psi = \text{const}$ ортогональны друг к другу. Таким образом, φ и Ψ могут быть решениями электростатической задачи. Если $\varphi(x, y)$ — потенциал, то линии $\Psi = \text{const}$ — силовые линии, ортогональные к эквипотенциальным поверхностям. Положим, $\varphi = 0$ на плавном контуре L . Для того чтобы найти эквипотенциальные поверхности $\varphi = \text{const}$, нужно представить уравнение контура L в параметрическом виде:

$$x = f(P), \quad y = F(P), \quad (2.37)$$

где f и F — однозначные функции и вся область изменения действительного параметра P отвечает движению точки вдоль заземленного проводника. Потенциал φ следует искать в виде

$$\varphi = \text{Im } W, \quad (2.38)$$

и W находится из уравнения $z = f(W) + iF(W)$.

Если задано распределение объемных и поверхностных зарядов, то потенциал в точке $\mathbf{r}$ равен

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}') dV'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} + \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int \frac{\sigma(\mathbf{r}') dS'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2.39)$$

На расстояниях, намного превышающих размеры системы, потенциал зарядов можно представить так:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \varphi^{(0)}(\mathbf{r}) + \varphi^{(1)}(\mathbf{r}) + \varphi^{(2)}(\mathbf{r}) + \dots, \quad (2.40)$$

где $\varphi^{(0)}(\mathbf{r})$ — потенциал точечного заряда, равного заряду системы:

$$\varphi^{(0)}(\mathbf{r}) = \frac{e}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (2.41)$$

$\varphi^{(1)}$ — потенциал диполя с электрическим моментом (дипольным моментом) $\mathbf{p} = \int \rho(\mathbf{r}) \mathbf{r} dV$, равный

$$\varphi^{(1)} = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}, \quad (2.42)$$

$$\varphi^{(2)} = \frac{1}{24\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i,k} Q_{ik} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_k} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (2.43)$$

— потенциал квадрупольного момента.

Компоненты тензора квадрупольного момента определяются так:

$$Q_{ik} = \int \rho(\mathbf{r}) (3x_i x_k - r^2 \delta_{ik}) dV. \quad (2.44)$$

Энергия электростатического поля равна

$$W = \frac{1}{2} \int \rho \varphi dV = \frac{1}{2} \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} dV. \quad (2.45)$$

Энергия взаимодействия двух систем зарядов с плотностями зарядов ρ_1 и ρ_2 определяется соотношением

$$W = \int \rho_1 \varphi_2 dV = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int \frac{\rho_1(\mathbf{r}_1) \rho_2(\mathbf{r}_2) dV_1 dV_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}. \quad (2.46)$$

Магнитостатика. Явления магнитостатики описываются системой уравнений

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad (2.47) \quad \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2.48)$$

с граничными условиями (2.25), (2.26). Уравнению (2.48) можно удовлетворить, если ввести векторный потенциал

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (2.49)$$

В однородной изотропной среде векторный потенциал $\mathbf{A}$ удовлетворяет уравнению

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu\mu_0 \mathbf{j}. \quad (2.50)$$

При заданной плотности тока $\mathbf{j}$ решение этого уравнения имеет вид

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'. \quad (2.51)$$

На расстояниях, намного превышающих размеры системы,

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^3} [\mathbf{p}_m \times \mathbf{r}], \quad (2.52)$$

где $\mathbf{p}_m$ — магнитный момент системы,

$$\mathbf{p}_m = \frac{1}{2} \int [\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r})] dV. \quad (2.53)$$

Энергия магнитного поля равна

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \mathbf{H} dV = \frac{1}{2} \int \mathbf{A} \mathbf{j} dV = \frac{\mu_0}{8\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}') dV dV'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}; \quad (2.54)$$

для системы проводников энергия магнитного поля определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i, k} L_{ik} I_i I_k, \quad (2.55)$$

где

$$L_{ik} = \frac{\mu_0}{4\pi I_k I_i} \int \frac{\mathbf{j}_k(\mathbf{r}_k) \cdot \mathbf{j}_i(\mathbf{r}_i) dV_k dV_i}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i|}. \quad (2.56)$$

Коэффициенты L_{ik} при $i \neq k$ называются *коэффициентами взаимной индукции*, при $i = k$ — *коэффициентами самоиндукции*.

В случае медленно меняющихся во времени полей, когда выполняются условия

$$\omega \ll \sigma^*/\varepsilon, \quad l \ll \lambda, \quad (2.57)$$

где σ^* — проводимость среды, ω и λ — соответственно частота и длина волны электромагнитных колебаний, l — линейные размеры системы, система уравнений Максвелла принимает вид

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho. \quad (2.58)$$

Переменное электромагнитное поле. Частным решением уравнений Максвелла (2.19) — (2.22) для свободного поля являются плоские монохроматические волны, у которых

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\omega t}, \quad (2.59)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\omega t}, \quad (2.60)$$

здесь ω — частота электромагнитных колебаний, $\mathbf{k}$ — волновой вектор. В изотропной среде его направление совпадает с направлением распространения энергии, а по модулю он равен $k = \omega/v$, где $v = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ — фазовая скорость распространения электромагнитных волн.

Поток энергии электромагнитного поля определяется вектором Умова — Пойнтинга:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]. \quad (2.61)$$

В случае переменных электромагнитных полей связь между потенциалами и напряженностью электрического и индукцией магнитного полей имеет вид

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (2.62)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (2.63)$$

В случае калибровки Лоренца

$$\text{div } \mathbf{A} + \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (2.64)$$

потенциалы φ и $\mathbf{A}$ удовлетворяют уравнениям

$$\Delta\varphi - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (2.65)$$

$$\Delta\mathbf{A} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu\mu_0 \mathbf{j}. \quad (2.66)$$

Решения уравнений (2.65), (2.66) в виде запаздывающих потенциалов:

$$\varphi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{v})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV', \quad (2.67)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{v})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'. \quad (2.68)$$

На больших расстояниях от системы зарядов, значительно превышающих длину излучающей электромагнитной волны ($r \gg \lambda$), в вакууме имеют место соотношения

$$\mathbf{B} = (1/c) [\dot{\mathbf{A}} \times \mathbf{n}], \quad (2.69)$$

$$\mathbf{E} = c [\mathbf{B}, \mathbf{n}] = [[\dot{\mathbf{A}} \times \mathbf{n}] \times \mathbf{n}], \quad (2.70)$$

где

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \int \mathbf{j}(\mathbf{r}', t - \frac{r - \mathbf{r}' \cdot \mathbf{n}}{c}) dV', \quad (2.71)$$

$\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$ — единичный вектор в направлении излучения.

Если, кроме того, длина волны намного больше размеров излучающей системы зарядов, то электромагнитное поле на больших расстояниях можно представить как сумму по-

лей, излучаемых диполем, квадруполем и прочими мульти-полями. Для дипольного излучения

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 [\ddot{\mathbf{p}} \times \mathbf{n}]}{4\pi cr}, \quad \mathbf{E} = \frac{\mu_0}{4\pi r} [[\ddot{\mathbf{p}} \times \mathbf{n}] \times \mathbf{n}], \quad (2.72)$$

где $\mathbf{p}$ — дипольный момент системы в момент времени $t - r/c$. Интенсивность излучения диполя определяется формулой

$$\mathbf{J} = \frac{\dot{\mathbf{p}}^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}. \quad (2.73)$$

Специальная теория относительности. Основные положения этой теории: 1) скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах координат и равна $c = 2,99793 \cdot 10^8$ м/с; 2) физические законы одинаковы во всех инерциальных системах.

Применение этих постулатов приводит к следующим следствиям.

Пусть событие в системе K имеет координаты $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, $x_4 = ict$, в системе K' — координаты $x'_1 = x'$, $x'_2 = y'$, $x'_3 = z'$, $x'_4 = ict'$. Если система K' движется относительно системы K в направлении оси x со скоростью v , то связь между координатами события в разных системах дается преобразованиями Лоренца:

$$x'_1 = \frac{x_1 + i\beta x_4}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x'_2 = x_2, \quad x'_3 = x_3, \quad x'_4 = \frac{x_4 - i\beta x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (2.74)$$

где $\beta = v/c$.

Если тело движется относительно системы K со скоростью $\mathbf{u}$, то компоненты скорости относительно системы K' равны

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - vu_x/c^2}, \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - vu_x/c^2}, \quad u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - vu_x/c^2}. \quad (2.75)$$

Дифференциальный закон движения частицы под действием силы $\mathbf{F}$ имеет вид

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (2.76)$$

где

$$\mathbf{p} = m_0 \mathbf{v} / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (2.77)$$

— импульс релятивистской частицы, m_0 — масса покоящейся частицы.

Совокупность четырех величин, которые преобразуются как координаты, называется *четырёхмерным вектором*. При-

мерами четырёхмерного вектора могут служить 4-мерный вектор импульса с компонентами $(\mathbf{p}, iE/c)$, где $\mathbf{p}$ — импульс, E — энергия частицы; волновой вектор и частота в плоской электромагнитной волне, распространяющейся в вакууме $(\mathbf{k}, i\omega/c)$; четырёхмерный вектор плотности тока $(\mathbf{j}, ic\rho)$; четырёхмерный вектор потенциала $(\mathbf{A}, i\phi/c)$.

Четырёхмерным тензором второго ранга называется совокупность 16 величин, которые преобразуются к другой инерциальной системе отсчета путем двукратного применения преобразования координат (2.74). Примерами четырёхмерного тензора является тензор электромагнитного поля, который можно представить в виде

$$F_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & cB_z & -cB_y & -iE_x \\ -cB_z & 0 & cB_x & -iE_y \\ cB_y & -cB_x & 0 & -iE_z \\ iE_x & iE_y & iE_z & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.78)$$

и тензор энергии-импульса

$$T_{\alpha\beta} = \epsilon_0 \left(F_{\alpha\mu} F_{\beta\mu} - \frac{1}{4} \delta_{\alpha\beta} F_{\mu\nu}^2 \right), \quad \text{где } \alpha, \beta, \mu, \nu = 1, 2, 3, 4 \quad (2.79)$$

§ 2. ЗАДАЧИ

Векторный анализ

1. Вычислить градиент функции $f(r)$, зависящей только от модуля радиуса-вектора $\mathbf{r}$.
2. Вычислить $\operatorname{div} \mathbf{r}$, $\operatorname{rot} \mathbf{r}$, $\operatorname{rot} \varphi(r) \mathbf{r}$.
3. Вычислить $\operatorname{grad}(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})$, $\operatorname{grad} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^3}$, $(\mathbf{pV}) \mathbf{r}$, $\operatorname{div} [\mathbf{p}, \mathbf{r}]$, $\operatorname{rot} [\mathbf{r}, \mathbf{p}]$, где $\mathbf{p}$ — постоянный вектор.
4. Вычислить $\operatorname{grad} \mathbf{A}(r) \cdot \mathbf{B}(r)$, $\operatorname{div} \varphi(r) \mathbf{A}(r)$, $\operatorname{rot} \varphi(r) \mathbf{A}(r)$. Функция $\varphi(r)$ и векторы $\mathbf{A}(r)$ и $\mathbf{B}(r)$ зависят только от модуля радиуса-вектора r .
5. Пользуясь теоремой Остроградского — Гаусса, вычислить интегралы

$$I = \oint \mathbf{r} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) dS, \quad I = \oint (\mathbf{A} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{n} dS,$$

если объем, который охватывает замкнутая поверхность, равен V ; $\mathbf{A}$ — постоянный вектор.

6. Показать, что $\int_V \mathbf{A} dV = 0$, если $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$ внутри объема V , а $A_n = 0$ на границе объема.

7. Показать, что дивергенция вектора $\mathbf{A} + \frac{1}{4\pi} \text{grad} \int \frac{\text{div } \mathbf{A}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'$ равна нулю.

8. Найти решение уравнения Лапласа в сферической системе координат, зависящее лишь от одной координаты r .

9. Записать уравнения Максвелла (2.19) — (2.22) а) в цилиндрической системе координат; б) в сферической системе координат.

Электростатика

(В задачах 18—24 речь идет о двумерном распределении потенциала)

10. Определить напряженность электрического поля внутри и снаружи равномерно заряженного шара. Объемная плотность заряда равна ρ , радиус шара R .

11. В равномерно заряженном шаре с объемной плотностью заряда ρ имеется шарообразная полость, центр которой расположен на расстоянии a от центра шара. Найти напряженность электрического поля внутри полости, внутри шара и снаружи шара. Радиусы шара и полости равны соответственно R и R' .

12. Определить напряженность электрического поля внутри и снаружи шара, объемная плотность заряда которого меняется по закону $\rho = ar^n$, где $n > -2$. Радиус шара R .

13. Найти напряженность электрического поля внутри и снаружи равномерно заряженного цилиндра радиуса R . Заряд единицы длины цилиндра равен κ .

14. Слой непроводящего вещества, ограниченный двумя параллельными плоскостями, заряжен до объемной плотности ρ . Толщина слоя равна d . Найти напряженности электрического поля внутри и снаружи слоя.

15. Определить емкость конденсатора: а) сферического, б) плоского, в) цилиндрического. Между обкладками конденсаторов находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ .

16. Два длинных цилиндрических проводника с радиусами R_1 и R_2 расположены параллельно друг другу на расстоянии d . Рассчитать емкость единицы длины такой системы при условии, что $d \gg R_1$ и $d \gg R_2$.

17. Найти уравнение силовых линий двух точечных зарядов e и $-e$, расположенных на расстоянии d друг от друга.

18. Записать комплексный потенциал W однородного электрического поля с напряженностью E . Рассмотреть частный случай поля плоскости с поверхностной плотностью заряда σ .

19. Определить потенциал вблизи заземленного угла, образованного плоскостями $x=0$, $y=0$.

20. Определить вид эквипотенциальной поверхности и силовых линий, если $\varphi = \text{Re}(\sqrt{z})$. Потенциал какого заземленного контура дается этой формулой?

21. Определить потенциал и вид эквипотенциальных поверхностей, если комплексный потенциал определен формулой $W = \ln z$.

22. Найти потенциал вблизи заземленной параболы, уравнение которой $y^2 = 4a(x+a)$.

23. Найти потенциал вблизи заземленного эллипса, уравнение которого $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$. Рассмотреть предельный случай поля вблизи окружности (в пространственной задаче цилиндра) при $b=a$.

24. Найти эквипотенциальные поверхности и силовые линии вблизи заземленной гиперболы, заданной уравнением $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$.

25. Найти потенциал и напряженность электрического поля на оси плоского кольца, равномерно заряженного с поверхностной плотностью σ (внутренний радиус кольца R_1 , внешний R_2). Рассмотреть предельные случаи: а) поле плоского диска ($R_1 \rightarrow 0$) и б) поле заряженной плоскости ($R_1 \rightarrow 0$, $R_2 \rightarrow \infty$).

26. Определить потенциал, создаваемый электроном атома водорода, считая, что заряд электрона в основном состоянии распределен с объемной плотностью $\rho = \frac{e}{\pi a^3} e^{-2r/a}$, где a — постоянная.

27. Определить коэффициенты разложения потенциала точечного заряда в интеграл Фурье.

28. Найти потенциал, создаваемый зарядом, распределенным в бесконечной среде по закону $\rho = \rho_0 \sin ax \sin by \sin cz$.

29. Точечный заряд e расположен на расстоянии d от проводящей заземленной плоскости. Определить потенциал и напряженность поля такой системы. Найти плотность поверхностных зарядов, индуцированных на плоскости. Показать, что полный индуцированный заряд равен $-e$.

30. Методом изображений найти потенциал электрического поля заряда q , находящегося внутри прямого угла, образованного двумя проводящими плоскостями.

31. Точечный заряд e находится на расстоянии d от центра заземленной проводящей сферы радиуса R . Определить потенциал системы методом изображений.

32. Найти потенциал точечного заряда e , находящегося вблизи изолированного проводящего шара радиуса R .

33. Точечный заряд e находится на расстоянии d от центра сферического выступа радиуса R проводящей плоскости напротив той точки, где выступ наибольший. Центр сферического выступа лежит на проводящей плоскости. Определить потенциал этой системы.

34. На расстоянии d от центра проводящей заземленной сферы радиуса R находится диполь p , направленный положительным зарядом к центру сферы. Найти потенциал системы.

35. Заряд e расположен на расстоянии d от плоской поверхности бесконечного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 . Среда, в которой находится заряд, имеет диэлектрическую проницаемость ϵ_1 . Определить потенциал ϕ и вектор электрической индукции в обеих средах.

36. Центр проводящей сферы радиуса R находится на плоской границе раздела двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 каждая. Заряд сферы e . Найти потенциал системы, вектор электрической индукции и распределение поверхностного заряда на сфере.

37. Решить задачу 31 с помощью разложения потенциала по решениям уравнения Лапласа в сферических координатах. Определить плотность поверхностного заряда и полный заряд, наведенный на сфере.

38. Точечный заряд e находится на расстоянии d от проводящей сферы, имеющей потенциал V . Найти потенциал вне сферы и поверхностную плотность заряда на сфере.

39. Определить потенциал заряженной сферы радиуса R . Поверхностная плотность заряда меняется по закону $\sigma = \sigma_0 \cos \vartheta$.

40. Определить потенциал и напряженность электрического поля равномерно поляризованного шара радиуса R . Удельный дипольный момент шара равен P .

41. В заданном неоднородном электростатическом поле помещена проводящая сфера радиуса R . Определить потенциал в окрестности сферы.

42. Проводящая заземленная сфера помещена в однородное электрическое поле напряженностью E_0 . Найти потенциал системы и плотность поверхностных зарядов на сфере.

43. Диэлектрическая сфера радиуса R находится в одно-

родном электрическом поле напряженностью E_0 . Определить потенциал электрического поля внутри и снаружи сферы.

44. Сфера равномерно заряжена с поверхностной плотностью σ , за исключением сегмента у полюса, ограниченного окружностью $\vartheta = \alpha$. Найти потенциал внутри и снаружи сферической поверхности.

45. Одна грань прямоугольного параллелепипеда находится под потенциалом V , все прочие грани имеют нулевой потенциал. Найти распределение потенциала внутри параллелепипеда.

46. У прямоугольного параллелепипеда со сторонами a , b и c две противоположные грани $z=0$ и $z=c$ имеют потенциалы V_1 и V_2 . Остальные грани заземлены. Определить потенциал внутри заданного параллелепипеда.

47. В полом цилиндре радиуса r_0 с проводящими стенками находится диск радиуса R , заряженный с поверхностной плотностью σ . Ось диска совпадает с осью цилиндра. Определить потенциал внутри цилиндра. Рассмотреть предельный случай точечного заряда внутри цилиндра, когда $R \rightarrow 0$, но величина $\pi R^2 \sigma = e$ (заряд диска) остается конечной.

48. Определить потенциал поля, созданного точечным зарядом e , и расположенной на расстоянии d от него однородной плоскопараллельной пластинкой толщиной a с диэлектрической проницаемостью ϵ . Рассмотреть случай, когда точечный заряд расположен на поверхности полубесконечного кристалла, и сравнить его с решением задачи 35.

49. Найти квадрупольный момент эллипсоида, равномерно заряженного по объему с объемной плотностью заряда ρ .

50. Определить потенциал точечного заряда e , находящегося в однородной анизотропной среде с задачным тензором диэлектрической проницаемости.

51. Найти напряженность электрического поля внутри анизотропной диэлектрической пластинки, помещенной в однородное поле E_0 .

52. Вычислить энергию взаимодействия электронного облака атома водорода с протоном. Плотность заряда электронного облака равна $\rho = \frac{e}{\pi a^3} e^{-2r/a}$.

53. Вычислить энергию взаимодействия двух шаров, заряды которых e_1 и e_2 распределены сферически симметричным образом. Расстояние между центрами шаров равно a .

**Постоянный электрический ток. Магнитостатика.
Квазистационарные явления**

54. Обкладки шарового конденсатора, между которыми расположена проводящая среда с удельной электропроводностью σ^* , находятся под потенциалами φ_1 и φ_2 . Вычислить ток, проходящий через конденсатор. Найти сопротивление R шарового слоя между пластинами, радиусы которых r_1 и r_2 .

55. Найти закон преломления линий тока на плоской границе раздела двух проводящих сред с проводимостями σ_1^* и σ_2^* .

56. Разность потенциалов между плоскими электродами равна V . Расстояние между электродами d . Из одного электрода вырываются электроны до тех пор, пока образовавшийся объемный заряд не скомпенсирует действие внешнего поля. Найти зависимость плотности тока от приложенной к электродам разности потенциалов.

57. Найти напряженность магнитного поля внутри и снаружи цилиндрического проводника, по которому течет ток, равномерно распределенный по его сечению с плотностью j . Радиус проводника R .

58. Найти напряженность магнитного поля внутри цилиндрической полости цилиндрического проводника, по которому течет ток, равномерно распределенный по его сечению с плотностью j . Оси цилиндра, образующего полость, и цилиндрического проводника параллельны и находятся друг от друга на расстоянии a .

59. В бесконечном прямом проводнике радиуса R течет ток плотностью a/ρ при $\rho \leq R$; где ρ — расстояние от оси проводника. Найти векторный потенциал и напряженность магнитного поля внутри и снаружи проводника.

60. Найти напряженность магнитного поля плоскости, по которой течет ток с поверхностной плотностью i , одинаковой в любой точке плоскости.

61. По двум параллельным плоскостям текут поверхностные токи с плотностью i . Найти напряженность магнитного поля в двух случаях: а) направления токов совпадают; б) токи текут в противоположных направлениях.

62. Вдоль бесконечной прямолинейной полосы, имеющей ширину a , течет ток, равномерно распределенный по ее ширине, с плотностью поверхностного тока i . Найти напряженность магнитного поля. Рассмотреть предельный случай, когда ширина полосы стремится к бесконечности. Сравнить с решением задачи 61.

63. По двум бесконечным линейным проводникам, расстояние между которыми d , текут в противоположных направлениях токи силой I . Вычислить векторный потенциал системы.

64. Найти векторный потенциал и напряженность магнитного поля, создаваемого током I , текущим по кольцу радиуса R . Исследовать случай, когда точка наблюдения находится на оси кольца.

65. Найти векторы напряженности и магнитной индукции магнитного поля, создаваемого однородно намагниченным шаром с магнитным моментом единицы объема J . Радиус шара R .

66. Определить напряженность магнитного поля на оси магнита, имеющего форму цилиндра радиуса R , длины d . Намагниченность образца J_0 .

67. Найти магнитный момент шара, равномерно вращающегося с угловой скоростью Ω . Заряд e равномерно распределен по объему шара. Показать, что гиромангнитное отношение равно $e/(2m)$, где m — масса шара.

68. Сфера радиуса R вращается с угловой скоростью Ω вокруг оси Oz . Поверхностная плотность заряда σ постоянна. Найти векторный потенциал и напряженность магнитного поля внутри и снаружи сферы.

69. Вычислить силу, с которой взаимодействуют два бесконечных параллельных провода, находящихся на расстоянии d друг от друга, по которым текут токи I_1 и I_2 . Магнитная проницаемость среды μ .

70. Вычислить силу взаимодействия двух коаксиальных кольцевых проводников с радиусами R_1 и R_2 , центры которых находятся на расстоянии d друг от друга и по которым текут токи I_1 и I_2 в одинаковых направлениях. Проводники находятся в среде с магнитной проницаемостью μ .

71. Найти индуктивность L единицы длины линии, состоящей из двух коаксиальных цилиндров с радиусами R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$), пространство между которыми заполнено веществом с магнитной проницаемостью μ .

72. Внутри цилиндра радиуса R_2 находится провод радиуса R_1 , магнитная проницаемость которого равна μ_1 . Между проводом и цилиндром — среда с магнитной проницаемостью μ_2 . Определить индуктивность L единицы длины контура.

73. Диамагнитная восприимчивость единицы объема определяется формулой $\chi = -\frac{Ze^2 N}{6m} \mu_0 \overline{r^2}$, где Ze — заряд ядра

атома, e и m — заряд и масса электрона, N — число атомов в единице объема, $\bar{r}^2$ — средний квадрат радиуса, определяемый по формуле $\bar{r}^2 = \frac{1}{Ze} \int r^2 (\rho)(r) d\tau$, $\rho(r)$ — плотность заряда в атоме. Определить χ для атома водорода, в котором $\rho(r) = \frac{e}{\pi a^3} e^{-2r/a}$, где $a = 0,528 \cdot 10^{-10}$ м.

74. Показать, что постоянное однородное магнитное поле, индукция которого $\mathbf{B}$, можно описывать векторным потенциалом $\mathbf{A} = (1/2) [\mathbf{B} \times \mathbf{r}]$.

75. Найти распределение электрического и магнитного полей внутри цилиндрического проводника, по которому течет периодический ток с частотой ω . Проводимость проводника σ^* .

76. Под действием постоянного магнитного поля напряженностью $\mathbf{H}_0$ в магнетике устанавливается магнитный момент единицы объема $\mathbf{J}_0$, параллельный $\mathbf{H}_0$. К системе кроме постоянного поля приложено переменное магнитное поле, перпендикулярное $\mathbf{H}_0$ и вращающееся с частотой ω . Амплитуда h вектора напряженности переменного поля удовлетворяет условию $h \ll H_0$. Определить магнитный момент, созданный переменным полем в единице объема магнетика.

77. Шар из магнетика находится в постоянном магнитном поле, напряженность которого внутри шара равна $\mathbf{H}_0$. Предполагая, что размеры шара намного меньше длины волны собственных колебаний магнитного момента, найти частоту этих колебаний.

78. Бесконечный непроводящий магнетик находится в постоянном магнитном поле с напряженностью $\mathbf{H}_0$. Найти частоты собственных колебаний, длина волны которых намного меньше длины электромагнитных волн (в магнитостатическом приближении).

79. Определить в магнитостатическом приближении собственные частоты колебаний пластинки из магнетика с металлическим покрытием, намагниченной нормально. Толщина пластинки d , напряженность постоянного магнитного поля $\mathbf{H}_0$.

80. Определить собственные частоты колебаний в магнитостатическом приближении пластинки из магнетика, намагниченной нормально, расположенной в вакууме. Толщина пластинки d , напряженность магнитного поля $\mathbf{H}_0$.

81. Найти собственные частоты двух индуктивно связанных контуров с коэффициентами самоиндукции L_1 и L_2 , коэффициентом взаимной индукции L_{12} , емкостями C_1 и C_2 и с равными нулю активными сопротивлениями.

Распространение электромагнитных волн. Волноводы. Резонаторы

82. Две плоские монохроматические, линейно поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях волны, имеющие одинаковую частоту и разность фаз φ , распространяются в одном направлении. Амплитуды первой и второй волн равны E_{01} и E_{02} соответственно. Определить поляризацию результирующей волны.

83. Определить коэффициент затухания электромагнитных волн в среде при полном внутреннем отражении.

84. Плоскополяризованная волна падает нормально на поверхность немагнитной среды, имеющей диэлектрическую проницаемость ϵ и проводимость σ^* . Найти коэффициент отражения R . Рассмотреть предельный случай хорошего проводника.

85. Определить амплитуды волн, отраженной от плоскопараллельной пластины и прошедшей через нее. Толщина пластины d , диэлектрическая проницаемость ϵ . Найти условия, при которых отражение электромагнитных волн от пластины минимально.

86. Вдоль плоской границы раздела двух диэлектриков, имеющих противоположные по знаку диэлектрические проницаемости ϵ_1 и ϵ_2 , распространяется поверхностная волна, у которой напряженность магнитного поля перпендикулярна направлению распространения (ТМ-волна). Определить закон дисперсии такой волны.

87. Электромагнитная волна падает под углом ϑ_1 на плоскую поверхность полубесконечного кристалла, оптическая ось которого перпендикулярна поверхности кристалла. Определить направление распространения обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле.

88. Среда состоит из упруго связанных некоторыми центрами заряженных частиц, коэффициенты упругости которых различны в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Концентрация частиц N . Найти тензор диэлектрической проницаемости среды.

89. Диэлектрическая проницаемость среды, состоящей из совокупности упруго связанных электронов, равна

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \sum_k \frac{f_k}{\omega_k^2 - \omega^2 - i\gamma_k\omega},$$

где N — число электронов в единице объема, e и m — заряд и масса электрона, f_k и ω_k — постоянные. Показать, что эта

формула удовлетворяет дисперсионным соотношениям

$$\operatorname{Re} \varepsilon(\omega) = 1 + \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Im} \varepsilon(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega',$$

$$\operatorname{Im} \varepsilon(\omega) = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Re} \varepsilon(\omega') - 1}{\omega' - \omega} d\omega',$$

где P — главное значение интеграла.

90. Вещество состоит из квазиупруго связанных электронов (концентрация N), находящихся в однородном магнитном поле с магнитной индукцией B_0 . На вещество падает линейно поляризованная монохроматическая световая волна, волновой вектор которой направлен вдоль магнитного поля. Найти поворот плоскости поляризации электромагнитной волны, если волна прошла в веществе расстояние l .

91. Система заряженных ангармонических осцилляторов находится в переменном электромагнитном поле с частотой ω . Потенциальная энергия осцилляторов как функция

смещения частицы имеет вид $U = \frac{1}{2}kr^2 + \frac{1}{3} \sum_{i,j,l=1}^3 \beta_{ijl} x_i x_j x_l$.

Найти дипольный момент единицы объема (коэффициенты β_{ijl} считать малыми) с точностью до членов, линейных по β_{ijl} и квадратичных по напряженности электрического поля. Показать, что в дипольном моменте имеются колебания с частотой, удвоенной по отношению к частоте падающей волны. Масса осциллятора m , заряд e , собственная частота ω_0 , концентрация осцилляторов N .

92. Найти нелинейную поляризацию системы, рассмотренной в предыдущей задаче, если электромагнитное излучение состоит из двух монохроматических волн с частотами ω_1 и ω_2 .

93. Среда представляет собой систему параллельных цепочек, состоящих из периодически расположенных осцилляторов с собственной частотой ω_0 . Ближайшие соседи в цепочке связаны законом Гука. Рассмотреть распространение электромагнитных волн вдоль цепочек, если длина электромагнитных волн намного больше расстояния между осцилляторами. Найти показатели преломления электромагнитных волн.

94. Исследовать распространение электромагнитных волн в пространстве между проводящими плоскостями, разделен-

ными диэлектриком. Расстояние между плоскостями d , диэлектрическая постоянная среды ε .

95. Найти напряженность, закон дисперсии и граничную частоту для TE - и TN -волн в прямоугольном волноводе с идеально проводящими стенками, имеющими размеры a и b .

96. Определить связь между тангенциальными компонентами электрического и магнитного поля вблизи проводника.

97. Определить затухание TN -волн в прямоугольном волноводе с размерами стенок a и b . Проводимость стенок волновода σ^* , магнитная проницаемость μ .

98. Найти закон дисперсии электромагнитных волн для волновода круглого сечения с идеально проводящими стенками. Радиус сечения R .

99. Рассмотреть распространение электромагнитных волн вдоль круглого цилиндрического диэлектрического волновода с диэлектрической проницаемостью ε . Радиус волновода R .

100. Рассмотреть распространение электромагнитных волн в диэлектрике, заполняющем пространство между двумя проводящими коаксиальными цилиндрами с радиусами R_1 и R_2 .

101. Определить напряженность электрического поля и собственные частоты TN -волн в прямоугольном резонаторе. Считать, что стенки резонатора идеально проводящие. Размеры стенок a , b и c .

102. Показать, что число колебаний в интервале $\Delta\omega$ в прямоугольном резонаторе с идеально проводящими стенками равно $L_1 L_2 L_3 \omega^2 \Delta\omega \pi^{-2} c^{-3}$.

103. Определить напряженность электрического поля и собственные частоты электромагнитных волн в круглом цилиндрическом резонаторе. Радиус цилиндра R , расстояние между торцами d .

Излучение и рассеяние электромагнитных волн

104. Получить уравнение для потенциалов, создаваемых зарядами и токами в вакууме при условии $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$ (кулоновская калибровка).

105. В тонкой линейной антенне длины d возбуждается ток, плотность которого равна

$$j(r, t) = I \sin(kd/2 - k|z|) \delta(x) \delta(y) e_3 e^{-i\omega t}.$$

Вектор e_3 направлен вдоль антенны. Определить среднюю за период интенсивность электромагнитного излучения $a\Omega$

тенны в единицу телесного угла. Исследовать частный случай, когда в антенне укладывается несколько полуволн.

106. Найти полную интенсивность излучения линейной антенны, вдоль которой бежит волна тока $I_0 \cos(\omega t - kz)$ от точки $z = -l/2$ до точки $z = l/2$, где она полностью (без отражения) поглощается.

107. Рассмотреть распространение плоских волн в однородном изотропном диэлектрике, предполагая, что каждый элемент объема излучает сферическую волну, которая распространяется со скоростью c . Определить скорость распространения волн в среде.

108. Плоская электромагнитная волна падает на проводящий цилиндр радиуса R . Ось цилиндра перпендикулярна волновому вектору электромагнитной волны и параллельна вектору напряженности магнитного поля. Найти напряженности электрического и магнитного полей рассеянной волны. Вычислить поток энергии, рассеянной единицей длины цилиндра.

109. Показать, что дипольное излучение при столкновении двух одинаковых частиц отсутствует.

110. Найти интенсивность излучения частицы массы m , движущейся по круговой орбите радиуса a под действием кулоновских сил. Ответ выразить через энергию частицы.

111. Определить время, в течение которого частица, движущаяся по круговой орбите, упадет на заряженный центр вследствие потери энергии на электромагнитное излучение.

112. Электрон пролетает на расстоянии d от неподвижного ядра, имеющего заряд $Z|e|$. Расстояние d настолько большое, что скорость движения электрона v меняется незначительно. Определить энергию, теряемую электроном на дипольное излучение.

113. Атом излучает электромагнитные волны и находится в возбужденном состоянии в течение времени τ . Зависимость напряженности электрического поля атома от времени дается формулой $E(t) = E_0 e^{-t/\tau - i\omega_0 t}$. Определить ширину линии, излучаемой атомом.

114. Найти эффективное сечение рассеяния эллиптически поляризованной волны с частотой ω осциллятором, масса которого m , заряд e , собственная частота ω_0 , коэффициент затухания γ .

115. Исследовать электромагнитное поле, создаваемое плоскостью $z=0$, по которой проходит ток с поверхностной плотностью $\mathbf{i} = \mathbf{i}_0 e^{iq_x x + iq_y y - i\omega t}$.

116. Диполь с моментом $\mathbf{p}$, расположенный в начале

координат, колеблется с частотой ω . В точке с радиусом-вектором $\mathbf{d}$ ($\mathbf{d} \perp \mathbf{p}$) находится частица с поляризуемостью β . Найти интенсивность излучения электромагнитных волн такой системой, предполагая, что $d \ll \lambda$, где λ — длина волны излучения.

117. Диполь $\mathbf{p}$, расположенный на расстоянии d от бесконечной проводящей плоскости, колеблется с частотой ω . Определить напряженности электрического и магнитного полей, излучаемых диполем, если $d \gg \lambda$ ($\lambda = 2\pi c/\omega$). Найти энергию, поглощаемую плоскостью в единицу времени, если считать, что проводимость плоскости является большой, но конечной.

118. Частица с зарядом e , движущаяся со скоростью v , упруго отражается от некоторой плоскости. Определить длинноволновую часть спектра излучения в момент удара.

119. Заряженная частица тормозится в среде силой, пропорциональной скорости движения частицы. Найти энергию, излучаемую частицей в единицу времени в единицу телесного угла. Начальная скорость движения v_0 .

Специальная теория относительности. Релятивистская электродинамика

120. Показать, что два последовательных преобразования Лоренца в одном и том же направлении перестановочны и эквивалентны одному преобразованию Лоренца.

121. В среде, движущейся со скоростью v относительно некоторой системы K , распространяется плоская электромагнитная волна. Найти скорость распространения волны в системе K , если показатель преломления среды равен n . Рассмотреть случай $v \ll c$.

122. Считая, что при малых скоростях частицы выполняется условие $p^2 \ll m^2 c^2$, где p — импульс частицы, найти приближенную зависимость энергии частицы от импульса с точностью до члена порядка $\left(\frac{p^2}{m^2 c^2}\right)^2$.

123. Найти траекторию движения заряженной частицы в однородном электрическом поле с напряженностью E_0 . Рассмотреть предельный случай малых скоростей.

124. Рассмотреть траекторию движения заряженной частицы в однородном магнитном поле с магнитной индукцией B .

125. Найти траекторию движения релятивистской частицы с зарядом e_1 и массой m в поле неподвижного точечного заряда e_2 .

126. Частица массы M распадается на две с массами m_1 и m_2 . Найти энергию распавшихся частиц в системе центра инерции.

127. Воспользовавшись результатами предыдущей задачи, найти кинетическую энергию μ -мезона с энергией покоя 105,7 МэВ и кинетическую энергию нейтрино, образовавшихся после распада покоящегося π -мезона с массой покоя 139,6 МэВ.

128. Найти закон преобразования энергии и компонентов импульса частицы при переходе к системе, движущейся со скоростью v относительно первоначальной.

129. Частица, движущаяся со скоростью v , распадается на две частицы, энергии которых в системе центра инерции равны E_1 и E_2 . Найти связь между углом вылета и энергиями частиц в лабораторной системе.

130. Найти связь между направлениями скорости частицы в системах, движущихся с относительной скоростью v .

131. Две частицы с массами покоя m_1 и m_2 и энергиями E_{01} и E_{02} упруго рассеиваются друг на друге. Считая, что вторая частица покоится, найти связь между углами рассеяния частиц в лабораторной системе и их энергиями после столкновения E_1 и E_2 .

132. Определить зависимость частоты фотона, рассеянного на покоящемся электроны, от угла рассеяния (эффект Комптона).

133. Найти частоту фотона, излучаемого покоящимся возбужденным ядром с массой m , если энергия возбуждения ядра равна ΔE .

134. Показать, что аннигиляция электронно-позитронной пары с излучением одного фотона запрещена законом сохранения энергии-импульса.

135. Зеркало движется со скоростью v в направлении, противоположном собственной нормали. На зеркало падает луч света под углом ϑ . Определить направление отраженной волны и изменение частоты света при отражении.

136. Доказать, что если напряженности электрического и магнитного полей перпендикулярны в одной системе отсчета, то они перпендикулярны и во всех других инерциальных системах отсчета.

137. Найти закон преобразования компонент электрического и магнитного полей в вакууме при переходе к системе, движущейся со скоростью v .

138. Найти систему отсчета, в которой векторы напряженностей электрического и магнитного полей параллельны.

139. Получить выражение для потенциалов равномерно движущегося заряда посредством релятивистского преобразования статического кулоновского поля (потенциалы Лиенара—Вихерта).

140. Используя потенциалы Лиенара—Вихерта (задача 139), определить напряженности электрического и магнитного полей движущегося заряда.

141. Найти формулы преобразования для компонентов тензора энергии-импульса.

142. Показать, что волновое уравнение не является инвариантным относительно преобразований Галилея и инвариантно относительно преобразований Лоренца.

143. Показать, что величина $E^2 - H^2$ инвариантна относительно преобразований Лоренца.

144. Показать, что если магнитный момент μ движется со скоростью v ($v \ll c$), то появляется электрический дипольный момент

$$\mathbf{p} = (1/c^2) [\mathbf{v} \times \mu].$$

Раздел III

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Уравнение Шредингера и свойства Ψ -функции. Состояние микрочастицы, находящейся в потенциальном поле $V(\mathbf{r}, t)$, описывается комплексной волновой функцией $\Psi(\mathbf{r}, t)$, которая определяется из временного уравнения Шредингера

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

(m — масса частицы). Получаемое из (3.1) уравнение непрерывности

$$\frac{\partial}{\partial t} |\Psi|^2 + \operatorname{div} \left[\frac{i\hbar}{2m} (\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) \right] = 0 \quad (3.2)$$

является дифференциальной формой закона сохранения выражения $\int |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\tau$. Величине $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2$ приписывается в квантовой механике смысл плотности вероятности найти частицу в точке $\mathbf{r}$ в момент времени t . Тогда вектор

$$\mathbf{j} = \frac{i\hbar}{2m} (\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) \quad (3.3)$$

представляет плотность тока вероятности.

"Nazariy fizika kursi" (Elektrodinamika) fani bo'yicha nazorat savollari

Fan boyicha 4 Joriy nazorat, 2 Oraliq nazorat va 1 Yakuniy nazorat olinadi.

1-Joriy nazorat savollari

1. Zaryalarni o'zaro qanday ta'sirlashadi?
2. Kavendish tajribasining mohiyati nimadan iborat?
3. Kulon tajribasi ning mohiyati nimadan iborat?
4. Vakuunmda elektr maydoni o'zini qanday namoyon etadi?
5. Dielektrlarda elektr maydon o'zini qanday namoyon etadi?
6. Elektr maydon kuchlanganligi vektorining oqimi qanday ta'riflanadi?
7. Elektr sig'imi deganda nimani tushunasiz?
8. Kondensator nima?
9. Kondensatorlarning elektr sig'imini qanday hisoblanadi?
10. Ostragadskiy-Gauss teoremasini qanday talaffuz qilinadi?
11. Ostragadskiy-Gauss teoremasining formulasi qanday yoziladi? .
12. Bog'langan zaryadlar deganda nimani tushunasiz?
13. Elektr maydoni induktsiyasi vektorini deganda nimani tushunasiz?
14. Muhitlar chegarasida elektr maydon kuch chiziqlarining shakli qanday?
15. Elektrostatik maydon bu qanday maydon?
16. Elektr maydoni kuchlanganlik kuch chiziqlari qanday chiziladi?
17. Elektr maydoni uchun superpozitsiya printsipli qanday talaffuz etiladi?
18. Nuqtaviy elektr zaryadlarning hosil qilgan elektr maydoni kuchlanganligi qanday hisoblanadi?
19. Ikki muhit chegarasida elektr maydoni kuchlanganligi vektorini va induktsiya vektorini uchun chegaraviy shartlar qanday yoziladi?
20. O'zgaruvchi tok uchun qanday qonunlar mavjud?
21. Om qonunini qanday talaffuz etiladi?
22. Elektr zanjiridagi tashqi kuchlar deganda nima tushuniladi?
23. Elektr yurituvchi kuchning vazifasi nimadan iborat?
24. Joule-Lentz qonunining formulasi qanday yoziladi?
25. Kirxgoff qoidalari nimaga va qay hollarda ishlatiladi?
26. Kirxgoffning 1-qoidasi qanday talaffuz etiladi?
27. Kirxgoffning 2-qoidasi qanday talaffuz etiladi?
28. Metallarning o'tkazuvchanligi qanday tushuntiriladi?
29. Metallarning elektron nazariyasi qachon rivojlantirilgan va bunda qaysi fizik-olimlar hissalari bor?
30. Bideman-Frants qonuni qanday talaffuz etiladi?
31. O'tkazuvchanlik hodisasining mohiyati nimadan iborat?
32. Kamerling Onnes ixtirosi qanday hodisani kashf qilgan?
33. Meysner effekti hodisasining mohiyati nimadan iborat?
34. Kontaktlarda qanday elektr hodisalar kuzatiladi?
35. Tomson effekti ning mohiyati nimadan iborat?
36. Pelt'e effekti ning mohiyati nimadan iborat?
37. Termojuftlik nima va un qayerlarda qo'llaniladi?
38. Elektron emissiya hodisasining mohiyati nimadan iborat?
39. Vakuumli diod nima va u qanday ishlaydi?
40. Yarimo'tkazgichlar moddalar deganda nimani tushunasiz?

1-Joriy nazorat: Masala yechish bo'yicha nazorat ishi variantlari

Variant-1

1. Uzunligi 10 sm bo'lgan ingichka sterjen bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi $1/m$. Sterjen o'qida, uning bir uchidan 20 sm masofada 100 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va sterjen orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.14)
2. 20 sm radiusli sfera ichida zaryadi 10 nKl ga teng nuqtaviy zaryad joylashgan. Elektr maydoni kuchlanganligining sferaning 20 sm² ga teng sirti orqali oqimini toping. (Чепров-14.48)
3. Ingichka simli halqadan tok o'tmoqda. Tok kuchini o'zgartirmasdan tokli konturga kvadrat shaklini berishdi. Bunda konturlar markazida magnit maydon induktsiyasi qanday o'zgaradi? (Чепров-21.30)

Variant-2

1. Bir tomonidan cheklanmagan ingichka sterjen bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi 10 /m . Sterjen o'qida, uning bir uchidan 20 sm masofada 10 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va uzun sterjen orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.15)
2. Cheksiz tekislik bir tekis zaryadlangan bo'lib, undagi zaryadlarning sirt zichligi 1 /m^2 . Tekislikdan biror masofada doira tekislikka parallel tarzda joylashgan. Shu doira orqali elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimini toping. (Чепров-14.46)
3. Tomonining uzunligi 10 sm bo'lgan muntazam oltiburchak shaklidagi tokli konturdan 25 A tok o'tmoqda. Kontur markazida magnit maydoni induksiyasini toping. (Чепров-21.28)

Variant-3

1. Bir tomonidan cheklanmagan ingichka sterjen bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi 10 /m . Sterjen o'qiga o'tkazilgan perpendikulyarda, uning bir uchidan 20 sm masofada 10 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va uzun sterjen orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.16)
2. Zaryadlangan yarim sfera berilgan bo'lib, undagi elektr zaryadlarining sirt zichligi 1 nKl/m^2 . Yarim sferaning geometric markazida elektr maydoni kuchlanganligini aniqlang. (Чепров-14.8)
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgich yarmidan to'g'ri burchak hosil qiladigan qilib bukilgan. O'tkazgichdagi tok kuchi 100 A bo'lsa, burchak bissektrisasi va burchak uchidan 10 sm masofada yotgan nuqtada magnit maydoni induksiyasini toping. (Чепров-21.23)

Variant-4

1. Uzunligi 20 sm bo'lgan ingichka ip bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi 10 /m . Sterjenning o'rtasidan unga perpendikulyar o'tkazilib, ipdan 10 sm masofada 1 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va ip orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.17)
2. 10 sm radiusga ega halqa chiziqli zichligi 10 nKl/m bo'lgan zaryadlar bilan bir tekis zaryadlangan. Halqa o'qida va uning markazidan 5 sm masofada joylashgan nuqtada elektr maydoni potentsialini toping. (Чепров-15.13)
3. Teng tomonli uchburchak shaklidagi tokli konturdan tok kuchi 4 A ga teng tok o'tmoqda. Agar uchburchakning tomoni 30 sm bo'lsa, uning balandliklari kesishgan nuqtada magnit maydoni induksiyasini toping. (Чепров-21.25)

Variant-5

1. Cheksiz uzun ip bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi 10 /m . Ipdan 20 sm masofada 10 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va ip orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.18)
2. O'zaro parallek ikki zaryadlangan cheksiz tekisliklar bir-biridan 0.5 sm masofada joylashgan. Ulardagi zaryadlarning sirt zichliklari $0.2 \text{ } \mu\text{Kl/m}^2$ va $-0.3 \text{ } \mu\text{Kl/m}^2$ ga teng. Tekisliklar orasidagi potentsiallar farqini toping. (Чепров-15.24)
3. Tomonlari 30 sm va 40 sm bo'lgan to'g'ri to'rtburchak shaklidagi konturdan tok kuchi 60 A ga tok o'tmoqda. Konturning diagonallari kesishgan nuqtada magnit maydoni induksiyasini toping. (Чепров-21.27)

2-Joriy nazorat savollari

1. Yarimo'tkazgich moddalarning qanday xususiyatlarini bilasiz?
2. Gazlardagi elektr toki qanday vujudga keladi?
3. Ionlanish va rekombinatsiya hodisalari nimadan iborat?
4. Mustaqil va nomustaqil elektr o'tkazuvchanlik nazariyasi.
5. Plazma nima?
6. Elektrolitlarda elektr toki qanday vujudga keladi?
7. Faradeyning 1- va 2- qonunlari qanday talaffuz etiladi?
8. Toklarning magnit maydoni borligini qanday tekshirish mumkin?
9. Bio-Savar-Laplas qonuni qanday talaffuz etiladi?
10. Magnit maydonning nimalarga ta'sir qiladi?
11. Amper kuchi nimaga ta'sir etadi va uning yo'nalishi qanday?
12. Lorents kuchi nimaga ta'sir etadi va uning yo'nalishi qanday?
13. Moddalar qanday magnit xossalarga ega?

14. Diamagnetizmning mohiyati nimadan iborat?
15. Paramagnetizmning mohiyati nimadan iborat?
16. Ferromagnetizm ning mohiyati nimadan iborat?
17. Elektromagnit induksiya hodisasi ning mohiyati nimadan iborat?
18. Lents qoidasi qanday talaffuz etiladi?
19. O'zgaruvchan tok uchun Om qonuni qanday yoziladi?
20. Reaktiv qarshiliklar deganda nimani tushunasiz?
21. Vektorlar diagrammasi usulining mohiyati nimadan iborat?
22. Uch fazali tok deganda nimani tushunasiz?
23. Elektr energiyasini uzatish qay tarzda amalga oshiriladi?
24. Transformatorning vazifasi nimadan iborat?
25. Generator ning vazifasi nimadan iborat?
26. Elektr motorning vazifasi nimadan iborat?
27. Uch fazali tok qanday ulanadi?
28. Elektromagnit tebranishlar deb nimaga aytiladi?
29. Kondensator va g'altakdan iborat konturdagi erkin elektromagnit tebranishni qanday miqdorlar orqali ifodalash mumkin?
30. Tomson formulasi nimani tavsiflaydi va u qanday yoziladi?
31. Maksvel tenglamalari necha tenglamadan iborat?
32. Maksvelning siljish toki nimaga kerak?
33. Maksvel tenglamalarini qanday talaffuz etiladi?
34. Elektromagnit to'lqinlarning qanday xossalari mavjud?
35. Interferentsiya deb nimaga aytiladi?
36. Difraksiya deb nimaga aytiladi?
37. Qutblanish deb nimaga aytiladi?
38. Elektromagnit o'zaro ta'siri nima bilan tavsiflaymiz?
39. Foton bu nima?
40. Elektr zaryadi zichligining necha turini bilasiz?

2-Joriy nazorat savollari: Masala yechish bo'yicha nazorat ishi variantlari

Variant-1

1. Bir tekis zaryadlangan cheksiz ip 90° burchak ostida egilgan. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zichligi $1/m$. Ipnining bukilgan tomonlarining birida, bukilish nuqtasidan 50 sm masofada $0.10 \mu Kl$ zaryadga ega nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va ip orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.19)
2. Agar havoda yashin (uchqun) chaqnashi mumkin bo'lgan kuchlanganlik $3 MV/m$ bo'lsa, 10 sm radiusli yakkalangan metal sharchani qanday potensialgacha zaryadlash mumkin? Chaqnash oldidan zaryadlarning hajmiy zichligi qanday bo'ladi? (Чепров-15.23)
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgich yarmidan 90° ga bukilgan. Bukilish joyida o'tkazgichning egrilik radiusi 10 sm bo'lgan yoy hosil qiladi. O'tkazgichdan 100 A tok o'tayotgan bo'lsa, yoyning egrilik markazida magnit maydoni induktsiyasini toping. (Чепров-21.22)

Variant-2

1. Bir tekis zaryadlangan 10 sm radiusga ega ingichka halqa $0.1 \mu Kl$ zaryadga ega. Halqaning markazidan uning tekisligiga perpendikulyar o'tkazilgan. Shu perpendikulyarda yotuvchi va halqa markazidan 1) 20 sm va 2) 2 m masofalarda $10 \mu Kl$ zaryadga ega nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va halqa orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.20)
2. O'zaro parallel ikki zaryadlangan cheksiz tekisliklar bir-biridan 1 sm masofada joylashgan. Ulardagi zaryadlarning sirt zichliklari $0.2 \mu Kl/m^2$ va $0.5 \mu Kl/m^2$ ga teng. Tekisliklar orasidagi potensiallar farqini toping. (Чепров-15.25)
3. To'g'ri burchak ostida o'zaro ayqashadigan ikki cheksiz to'g'ri o'tkazgichlardan 30 A va 40 A toklar o'tmoqda. O'tkazgichlar orasidagi masofa 20 sm ga teng. O'tkazgichlarning har biridan teng masofa 20 sm da yotuvchi nuqtada magnit maydon induktsiyasini toping. (Чепров-25.20)

Variant-3

1. Radiusi 10 sm ga teng yarim halqa bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi $1 \mu\text{Kl}/m$ ga teng. Halqaning egrilik markazida 20 nKl nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va yarim halqa orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.21)
2. Har biri 20 V potensialga ega kichik simob tomchilari birlashib bitta katta tomchi hosil qildi. Hosil bo'lgan katta tomchining potensialini toping. (Чепров-15.27)
3. To'g'ri buxak ostida o'zaro ayqashadigan ikki cheksiz to'g'ri o'tkazgichlardan 80 A va 60 A toklar o'tmoqda. O'tkazgichlar orasidagi masofa 10 sm ga teng. O'tkazgichlarning teng o'rtasida yotuvchi nuqtada magnit maydon induksiyasini toping. (Чепров-25.19)

Variant-4

1. Radiusi 10 sm ga teng halqa bir tekis zaryadlangan. Zaryadlarning chiziqli zichligi $1 \text{ nKl}/m$ ga teng. Halqaning markazida $0.4 \mu\text{Kl}$ nuqtaviy zaryadga joylashgan. Nuqtaviy zaryad va halqa orasidagi ta'sirlashish kuchini toping. (Чепров-13.22)
2. Tomonlarining uzunligi a bo'lgan kvadrat $1.33 \text{ nKl}/m$ chiziqli zichlikli zaryadlar bilan bir tekis zaryadlangan. Kvadrat markazida elektr maydoni potentsialini toping. (Чепров-15.16)
3. Juda uzun g'altak (solenoid) diametri 0.5 mm bo'lgan simdan tashkil topgan (o'ralgan). O'ramda simlar tig'iz joylashtirilgan. Agar solenoiddagi tok kuchi 4 A ga teng bo'lsa, uning ichidagi magnit maydoni induksiyasini toping. (Чепров-21.10)

Variant-5

1. Elektr zaryadi $1 \mu\text{Kl}$ ga teng nuqtaviy zaryad bir tekis zaryadlangan juda katta metal plastinkasi oldida, juda yaqin masofada turibdi. Agar nuqtaviy zaryadga plastinka tomonidan 60 mN gat eng kuch ta'sir etayotgan bo'lsa, plastinkadagi elektr zaryadlarining sirtiy zichligini toping. (Чепров-14.38)
2. Elektr zaryadi $1 \mu\text{Kl}$ ga teng nuqtaviy zaryaddan 1 m masofada tomonlari 2 sm va 3 sm bo'lgan to'g'ri to'rtburchak shaklidagi sirt joylashgan. Elektr maydon kuchlanganligi vektori va sirt normal vektori orasidagi burchak 30° . Elektr maydon kuchlanganligi vektorining shu sirt orqali oqimini toping. (Чепров-14.50)
3. 10 sm radiusli doiraviy konturdan 80 A gat eng tok o'tmoqda. Konturning barcha nuqtalaridan 20 sm masofada yotuvchi nuqtada magnit maydon induksiyasini toping. (Чепров-21.7)

3-Joriy nazorat savollari

1. Elektr zaryadi chiziqli, sirt va hajm zichliklari qanday talaffuz etiladi?
2. Uzluksizlik tenglamasining kovariant ko'rinishi qanday yoziladi?
3. Elektromagnit maydonning zaryadli zarraga ta'siri qanday ifodalanadi?
4. Lorents kuchining umumiy formulasi qanday yoziladi?
5. Superpozitsiya printsipining mohiyati nimadan iborat?
6. Elektrodinamikaning eksperimental asoslari deganda nimani tushunasiz?
7. Kulon qonuni qanday talaffuz etiladi?
8. Elektrostatika tenglamalari qanday shaklda yoziladi?
9. Bio-Savar-Laplas formulasining yozilishi qanday?
10. Elektromagnit induksiya hodisasi matematik tarzda qanday ifodalanadi?
11. To'lqin tenglama qanday yoziladi va nimani tavsiflaydi?
12. Elektromagnit to'lqinlarning qanday turlarini bilasiz?
13. Elektromagnit to'lqinlar qanday tarzda va qanday tezlikda tarqaladi?
14. To'lqin qutblanishi deganda nimani tushunasiz?
15. Dipol nurlanish deb nimaga aytiladi?
16. Nurlanishning intensivligi deb nimaga aytiladi?
17. Qanday oddiy nurlatuvchi tizimlarni bilasiz?
18. Nurlanish reaksiyasi deganda nimani tushunasiz?
19. Nurlanish spektr chizig'ining kengligi . deganda nimani tushunasiz?
20. Maksvel-Lorents tenglamalari nimani tavsiflaydi?
21. Mikroskopik maydon deganda nimani tushunasiz?
22. Magnitlanish deb nimaga aytiladi?
23. Qutblanish deb nimaga aytiladi va u qanday kattalik orqali ifodalanadi?
24. Qutblanish vektori deb nimaga aytiladi?

25. Muhit uchun Maksvel tenglamalari qanday yoziladi?
26. Elektromagnit maydon uchun chegaraviy shartlar qanday yoziladi?
27. Kvazistatsionar toklar va maydonlar deb nimalarga aytiladi?
28. Kvazistatsionarlik shartlar qanday yoziladi?
29. Skin effekt hodisasining mohiyati nimadan iborat?

3-Joriy nazorat nazorat ishi variantlari: Masala yechish (frontal)

1. Tinchlikdagi massasi m_0 bo'lgan zarraning tezligini $0.6c$ dan $0.8c$ gacha oshirish uchun bajariladigan ishni hisoblang. Natijani klassik fizika bo'yicha hisoblangan natija bilan taqqoslang. (И.Е.Иродов-1.372)
2. Kinetik energiyasi T bo'lgan relyativistik zarralar oqimi (dastasi) yutuvchan nishonga tushmoqda. Oqimning toki kuchi I , zarraning zaryadi e , tinchlikdagi massasi m_0 ga teng. Oqimning nishonga ko'rsatadigan bosimini va unda ajraladigan quvvatni toping. (И.Е.Иродов-1.376)
3. Tinchlikdagi massasi m_0 bo'lgan zarra K- ISS da $x = \sqrt{a^2 + c^2 t^2}$ qonuniga ko'ra harakatlanmoqda. Bunda a-biror doimiy, c- yorug'lik tezligi. K-ISS da zarraga ta'sir etuvchi kuchni toping. (И.Е.Иродов-1.379)

4-Joriy nazorat savollari

1. Elektr zaryadi saqlanish qonunining kovariant shaklda qanday yoziladi?
2. 4-potensial deganda nimani tushunasiz?
3. Dalamber tenglamasining kovariant shakli qanday yoziladi?
4. Lorents shartining kovariant shakli qanday yoziladi?
5. Elektromagnit maydon tenzori deganda nimani tushunasiz?
6. Maydonlarni almashtirish formulalari nimani tavsiflaydi?
7. Elektromagnit maydonining qanday invariantlarini bilasiz?
8. Maksvel tenglamalari kovariant shaklda qanday yoziladi?
9. Foton – relyativistik zarrami?
10. Noinertsial sanoq tizim deganda nimani tushunasiz?
11. Gravitatsiya bu fizaning qanday sahosi?
12. Gravitatsion va inert massalar qanday aniqlanadi va ularning bir-biridan farqi nimada?
13. Gravitatsion maydon deganda nimani tushunasiz?
14. Fazo-vaqt metrikasi deganda nimani tushunasiz?
15. Gravitatsion maydonning energiya-impuls tenzori deganda nimani tushunasiz?
16. Eynshtein tenglamasi nimani tavsiflaydi va u qanday yoziladi?
17. Umumiy nisbiylik nazariyasini tasdiqlovchi qanday omillarni bilasiz?
18. Olamning ochiq va yopiq modellari deganda nimani tushunasiz?
19. Olamning kengayishini ko'rsatuvchi qanday hodisani bilasiz?
20. Xabbl qonunining mohiyati nimadan iborat?
21. Singulyarlik deganda nimani tushunasiz?

4-Joriy nazorat nazorat ishi variantlari: Masala yechish (frontal)

1. R radiusli sfera zaryadlangan bo'lib, undagi zaryadlarning sirt zichligi σ ga teng. Sfera o'z diametri atrofida ω burchak tezlik bilan aylanmoqda. Sfera markazida magnit maydon induktsiyasi topilsin. (М.С.Цедрик-21.16)
2. Qahbarodan yasalgan $R=20$ sm li disk (doira) zaryadlangan bo'lib, undagi zaryadlarning sirt zichligi $\sigma=1$ Kl/m^2 . Disk o'zining markazidan va uning tekisligiga tik ravishda o'tadigan o'q atrofida $\omega=10$ rad/s burchak tezligi bilan aylanmoqda. Disk markazida magnit maydon induktsiyasini toping. (М.С.Цедрик-21.25)
3. K-ISS da hodisalar quyidagicha tavsiflanadi: A(5,7,0,0) va B(4,10,0,0). L-ISS si K-ISS siga nisbatan $v=0.5c$ tezlik bilan harakatlanmoqda. M-ISS si esa K-ISS siga nisbatan $v=-0.5c$ tezlik bilan harakatlanmoqda. ISS lar harakati faqat x-o'qiga parallel ravishda bo'lmoqda. A va B hodisalarning L- va M- ISS laridagi koordinatalarini va ularning qaysi birlari oldin yoki keyin sodir bo'lganliklarini aniqlang. (Б.Я.Явидов-х.ххх)

"Nazariy fizika kursi" (Elektrodinamika) fani bo'yicha oraliq nazorat uchun variantli savollar

“Elektrodinamika” fanidan 1- Oraliq nazorat uchun variantli savollar

1- variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining integral ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya

2. Poyting teoremasi. Tt.: elektromagnit maydon va uning energiyasi, maydon energiyasi va energiya oqimi, energiya zichligi, Poyting vektori
3. To'g'ri solenoid ichida magnit maydon induktsiyasini hisoblang. Tt.: g'altak (solenoid), magnit maydon, magnit maydoni induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasining sirkulyatsiyasi

2- variant

1. Elektr maydon energiyasi. Tt: elektr maydoni ishi, elektr maydoni kuchlanganligi va potentsiali, kuchlanganlik va potentsial orasida bog'lanish, berk kontur bo'yicha kuchlanganlik sirkulyatsiyasi va uning ma'nosi, elektr kondensatori, yassi kondensator elektr energiyasi, energiya zichligi
2. Maksvel tenglamalari. Tt: elektr maydoni kuchlanganligi va induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasi va kuchlanganligi, E , D , B va H larning Gauss teoremasi va berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi, siljish toki va uning zichligi
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

3- variant

1. Elektromagnit induksiya. Tt: Lents qoidasi, induktsion EYK, magnit maydon oqimi, induktsion EYK ning sirkulyatsiyasi, o'z- va o'zaro induksiya
2. Gradient, divergentsiya va rotor ta'riflari. Tt.: skalyar va vektor maydonlar, skalyar va vektor ko'paytmalar, Gamilton operatori, "grad", "div" va "rot" larning Dekart koordinatalar tizimida yozilishi
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

4-variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining differentsial ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya.
2. Elektromagnit to'lqinlar. Tt. Maksvel tenglamalari, to'lqin, to'lqin tenglama, fazaviy tezlik, elektromagnit to'lqinning tarqalish tezligi, elektromagnit to'lqinlar shkalasi (turlari)
3. Doiraviy tokli konturning, kontur tekisligiga uning markazidan o'tkazilgan o'qda yotuvchi nuqtada magnit maydoni induktsiyasi formulasini keltirib chiqaring. Tt.: doiraviy tokli kontur, Bio-Savar-Laplas formulasi.

5- variant

1. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushuncha: tok, tok elementi, magnit maydon, induktsiya, superpozitsiya printsiplari
2. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining integral formulasi. Tt: elektr induktsiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
3. Silindrik kondensatorning sig'imini toping. Tt.: silindrik kondensator, Gauss teoremasi, potentsiallar farqi, sig'im

6- variant

1. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining differentsial formulasi. Tt: elektr induktsiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
2. Skin effekti. Tt.: yuqori chastotali elektromagnit maydon, kvazibarqaror yaqinlashuv, skin qatlam va uning qalinligi.
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zichligi τ .

7- variant

1. Kondensatorlarning elektr sig'implari. Tt: kondensator, elektr sig'im, yassi, sferik va silindrik kondensator
2. Lents qoidasi. Tt: elektromagnit induktsiya, induktsion EYuK
3. Zaryadlangan yarim sferaning geometrik markazida elektr maydon kuchlanganligini aniqlang. Sferada zaryadlarning sirtiy zichligi σ , sfera radiusi R .

8- variant

1. Puasson va Laplas tenglamalari. Tt: elektr maydon kuchlanganligi va potentsiali, gradient va divergentsiya
2. Kirxgof qoidalari. Tt: tok zanjiri, tugun, berk kontur, Kirxgofning 1- va 2- qoidalari
3. Doiraviy tokli konturning, kontur tekisligiga uning markazidan o'tkazilgan o'qda yotuvchi nuqtada magnit maydoni induktsiyasi formulasini keltirib chiqaring. Tt.: doiraviy tokli kontur, Bio-Savar-Laplas formulasi.

9- variant

1. Parallel toklarning o'zaro ta'sirlashuvi. Tt: tok elementi, magnit maydon, induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, ta'sirlashish kuchi
2. Majburiy elektromagnit tebranish. Tt: tashqi kuch, davriy kuch, majburiy tebranish tenglamasi, rezonans
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

10- variant

1. Magnit maydon energiyasi. Tt: solenoidli zanjir, energiyaning saqlanish qonuni, magnit maydon energiyasi
2. Tomson formulasi. Tt: erkin elektromagnit tebranishlar, LC kontur, tebranish davri
3. Zaryadlangan yarim sferaning geometrik markazida elektr maydon kuchlanganligini aniqlang. Sferada zaryadlarning sirtiy zichligi σ , sfera radiusi R .

11-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiyanlash koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydoni induktsiyasi. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induktsiyasi, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induktsiyasining sirkulyatsiyasi haqida teorema
3. Sferik kondensator sig'imini toping. Tt: kondensator, sig'im, elektr maydon (kuchlanganligi va potentsiali), Gauss teoremasi

12-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar ichidagi elektr maydon. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. Doiraviy tokli konturning, kontur tekisligiga uning markazidan o'tkazilgan o'qda yotuvchi nuqtada magnit maydoni induktsiyasi formulasini keltirib chiqaring. Tt.: doiraviy tokli kontur, Bio-Savar-Laplas formulasi.

13-variant

1. Joule-Lentz qonuni va uning formulasi (integral va differensial shakllari) . Tt: o'zgarma tok, tok ishi va quvvati, o'tkazgichda ajraladigan issiqlik
2. Lorents kuchi. Tt: zaryadlangan zarra, magnit maydon, Amper kuchi, Lorents kuchi
3. Zaryadlangan yarim sferaning geometrik markazida elektr maydon kuchlanganligini aniqlang. Sferada zaryadlarning sirtiy zichligi σ , sfera radiusi R .

14-variant

1. Elektromagnit to'lqin. Tt: to'lqin, to'lqin fronti, sirti, fazasi, tezligi, chastotasi va uzunligi. Erkin elektromagnit to'lqin va uning tenglamasi. To'lqin impulsi va energiyasi
2. Dielektrlarda elektr maydon. Tt: erkin va bog'langan zaryadlar, dielektrik, qutblanish, dielektrik singdiruvchanlik, dielektrik muhitda Kulon qonuni
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

15-variant

1. Magnit maydoni induktsiyasi uchun Gauss teoremasi. Tt: magnit maydon, induksiya, induksiya oqimi, Gauss teoremasi
2. O'zgarma tok qonunlari. Tt: o'tkazgich, elektr zanjiri, tok kuchi, tok zichligi, uzluksizlik tenglamasi, zanjirning bir qismi uchun Om qonuni, EYK, berk zanjir uchun Om qonuni, elektr toki ishi, tok quvvati, Joule-Lentz qonuni
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

16-variant

1. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushuncha: tok, tok elementi, magnit maydon, induksiya, superpozitsiya printsiplari
2. Elektr maydon kuchlanganligining sirkulyatsiyasi haqida teorema. Tt: elektr maydon, kuchlanganlik, statsionar elektr maydon, elektr maydon ishi, berk kontur bo'yicha bajarilgan ish, sirkulyatsiya

3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

17-variant

1. Elektromagnit tebranishlar. Tt: elektromagnit tebranish LC kontur, RLC kontur, tebranish davri, boshlang'ich fazasi, amplitudasi, chastotasi. Erkin, majburiy, so'nuvchi tebranishlar. Tebranishning so'nish dekrementi, logarifmik decrement.
2. Elektrostatik maydonda o'tkazgich. Tt: o'tkazgich, elektr induksiya, sirt zaryadlar, o'tkazgich potentsiali, Puasson tenglamasi, Laplas tenglamasi, o'tkazgich sirtiga ta'sit etuvchi kuch
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

18-variant

1. O'zgaruvchan tok uchun OM qonuni. Tt: Berk zanjir, o'zgaruvchan tok. Vector diagramma, Om qonuni, kuchlanish va tok kuchi amplitudalari orasidagi fazalar farqi, kuchlanish va tok kuchining effektiv qiymatlari
2. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induksiya, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

19-variant

1. Poyting vektori. Tt: elektromagnit maydon oqimi va uning energiyasi oqimi, oqim zichligi
2. Dielektrlarda elektr maydon. Tt: erkin va bog'langan zaryadlar, dielektrik, qutblanish, dielektrik singdiruvchanlik, dielektrik muhitda Kulon qonuni
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

20-variant

1. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induksiya, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
2. Zanjirning bir qismi uchun Om qonuni. Tt: qarshilik, kuchlanish, tok kuchi, tok kuchi birligi
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

21-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiylanish koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydon induksiya. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induksiya sining sirkulyatsiyasi haqida teorema
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

22-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar elektr maydoni. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

23-variant

1. Joule-Lents qonuni. Tt: o'zgarma tok, tok ishi va quvvati, o'tkazgichda ajraladigan issiqlik
2. Lorents kuchi. Tt: zaryadlangan zarra, magnit maydon, Amper kuchi, Lorents kuchi
3. Cheksiz to'g'ri o'tkazgichning magnit maydoni topilsin. Tt.: magnit maydoni, tok elementi, Bio-Savar-Laplas formulasi

24- variant

1. Parallel toklarning o'zaro ta'sirlashuvi. Tt: tok elementi, magnit maydon, induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, ta'sirlashish kuchi
2. Maksvel tenglamalari. Tt: elektr maydoni kuchlanhanligi va induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasi va kuchlanganligi, E , D , B va H larning Gauss teoremasi va bekr kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi, siljish toki va uning zichligi
3. To'g'ri solenoid ichida magnit maydon induktsiyasini hisoblang. Tt.: g'altak (solenoid), magnit maydon, magnit maydoni induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasining silkulyatsiyasi

25-variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining differentsial ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya.
2. Elektr maydon energiyasi. Tt: zaryadlar sistemasi potentsiali va energiyasi, yassi kondensator elektr maydon energiyasi va energiya zichligi
3. Doiraviy tokli konturning, kontur tekisligiga uning markazidan o'tkazilgan o'qda yotuvchi nuqtada magnit maydoni induktsiyasi formulasini keltirib chiqaring. Tt.: doiraviy tokli kontur, Bio-Savar-Laplas formulasi.

26- variant

1. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushuncha: tok, tok elementi, magnit maydon, induksiya,superpozitsiya printsiipi
2. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining integral formulasi
Tt: elektr induksiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

27- variant

1. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining differentsial formulasi. Tt: elektr induksiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
2. Maksvel tenglamalari. Tt: elektr maydoni kuchlanhanligi va induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasi va kuchlanganligi, E , D , B va H larning Gauss teoremasi va bekr kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi, siljish toki va uning zichligi
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

28- variant

1. Puasson va Laplas tenglamalari. Tt: elektr maydon kuchlanganligi va potentsiali, gradient va divergentsiya
2. Magnetik moddalar. Tt: magnetik moddalar, ularning kristal panjarasida magnit momentlar, dia -, para - va ferromagnetiklar, giromagnit munosobat, spin
3. Cheksiz zaryadlangan ipning elektr maydoni topilsin. Tt.: zaryad va uning chiziqli zichligi, elektr maydoni kuchlanganligi uchun Gauss teoremasi

29- variant

1. Parallel toklarning o'zaro ta'sirlashuvi. Tt: tok elementi, magnit maydon, induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, ta'sirlashish kuchi
2. Majburiy elektromagnit tebranish. Tt: tashqi kuch, davriy kuch, majburiy tebranish tenglamasi, rezonans
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zzichligi τ .

30- variant

1. Magnit maydon energiyasi. Tt: solenoidli zanjir, energiyaning saqlanish qonuni, magnit mayqon energiyasi
2. Kirxgof qoidalari. Tt: tok zanjiri, tugun, berk kontur, Kirxgofning 1- va 2- qoidalari
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zzichligi τ .

31-variant

1. Elektromagnit tebranishlar. Tt: elektromagnit tebranish LC kontur, RLC kontur, tebranish davri, boshlang'ich fazasi, amplitudasi, chastotasi. Erkin, majburiy, so'nuvchi tebranishlar. Tebranishning so'nish dekrementi, logarifmik decrement.

2. Elektrostatik maydonda o'tkazgich. Tt: o'tkazgich, elektr induksiya, sirt zaryadlar, o'tkazgich potentsiali, Puasson tenglamasi, Laplas tenglamasi, o'tkazgich sirtiga ta'sit etuvchi kuch
3. To'g'ri solenoid ichida magnit maydon induktsiyasini hisoblang. Tt.: g'altak (solenoid), magnit maydon, magnit maydoni induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasining silulyatsiyasi

32-variant

1. O'zgaruvchan tok uchun Om qonuni. Tt: Berk zanjir, o'zgaruvchan tok. Vector diagramma, Om qonuni, kuchlanish va tok kuchi amplitudalari orasidagi fazalar farqi, kuchlanish va tok kuchining effektiv qiymatlari
2. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning silulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zichligi τ .

33-variant

1. Poyting vektori. Tt: elektromagnit maydon oqimi va uning energiyasi oqimi, oqim zichligi
2. Elektr maydon energiyasi. Tt: zaryadlar sistemasi potentsiali va energiyasi, yassi kondensator elektr maydon energiyasi va energiya zichligi Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, Einshtein postulatlar, Lorents almashtirishlari
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zichligi τ .

34-variant

1. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning silulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
2. Zanjirning bir qismi uchun Om qonuni. Tt: qarshilik, kuchlanish, tok kuchi, tok kuchi birligi
3. To'g'ri solenoid ichida magnit maydon induktsiyasini hisoblang. Tt.: g'altak (solenoid), magnit maydon, magnit maydoni induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasining silulyatsiyasi

35-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiylanish koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydoni induktsiyasi. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induktsiyasi, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induktsiyasining silulyatsiyasi haqida teorema
3. Cheksiz zaryadlangan ip bilan, ipdan biror a masofada joylashgan, q nuqtaviy zaryad orasidagi ta'sirlashish kuchi ifodasi aniqlansin. Ipdagi zaryadlarning chiziqli zichligi τ .

36-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar elektr maydoni. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. To'g'ri solenoid ichida magnit maydon induktsiyasini hisoblang. Tt.: g'altak (solenoid), magnit maydon, magnit maydoni induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasining silulyatsiyasi

Nazariy fizika (Elektrodinamika) fanidan 2- Oraliq nazorat variantlari

1- variant

1. Galiley nisbiylik printsiipi. Einshtein nisbiylik printsiipi. Tt: vaqt va fazo, vaqtning absolyutligi va nisbiyligi, nisbiylik, yorug'lik tezligi, fizika qonunlari, inertsial sanoq sistemalar
2. Relyativistik mexanikada energiya va impuls. Tt: energiya, massa, impuls, tinchlikdagi massa, Einshtein formulasi

2- variant

1. Bir vaqtlilikning nisbiyligi. Tt: Einshtein postulatlar, Lorents almashtirishlari

2. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

3- variant

1. Interval. Tt: 4-vektor, 4-fazo.
2. Relyativistik dinamika. Tt: Nyutonning 2- qonunining 4-o`lchamli fazoda yozilishi, Mikkovski kuch, relyativistik energiya

4-variant

1. Galiley nisbiylik printsipli. Tt: fazo va vaqt, nisbiy harakat, fazo va vaqtning nisbiyligi va absolyutligi. Galiley almashtirish formulalari
2. 4-tezlik va 4-tezlanish Tt.: 4-vektorlar, xususiy vaqy

5- variant

1. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi
2. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

6- variant

1. Lorents almashtirishlaridan kelib chiquvchi oqibatlar. Tt: fazo va vaqt, koordinata va vaqtning almashtirilishi, Lorents formulalari, uzunlik va vaqt oralig'ining nisbiyligi
2. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

7- variant

1. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi
2. 4-tezlik va 4-tezlanish Tt.: 4-vektorlar, xususiy vaqy

8- variant

1. Bir vaqtlilikning nisbiyligi. Tt: Einsteini postulatlar, Lorents almashtirishlari
2. 4-tezlik va 4-tezlanish Tt.: 4-vektorlar, xususiy vaqy

9- variant

1. Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Lorents formulalari
2. Relyativistik dinamika. Tt: Nyutonning 2- qonunining 4-o`lchamli fazoda yozilishi, Mikkovski kuch, relyativistik energiya

10- variant

1. 4-tezlik va 4-tezlanish Tt.: 4-vektorlar, xususiy vaqy
2. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

Nazariy fizika (Elektrodinamika) fanidan Yakuniy nazorat variantlari

1- variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining integral ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya
2. Maykelson tajribasi. Tt: yorug'lik tabiati, efir tushunchasi va uni topishga urinish, interferentsiya
3. Relyativistik mexanikada energiya va impuls. Tt: energiya, massa, impuls, tinchlikdagi massa, Einsteini formulasi

2- variant

1. Elektr maydon energiyasi. Tt: elektr maydoni ishi, elektr maydoni kuchlanganligi va potentsiali, kuchlanganlik va potentsial orasida bog'lanish, berk kontur bo'yicha kuchlanganlik sirkulyatsiyasi va uning ma'nosi, elektr kondensatori, yassi kondensator elektr energiyasi, energiya zichligi
2. Maxwell tenglamalari. Tt: elektr maydoni kuchlanishligi va induktsiyasi, magnit maydoni induktsiyasi va kuchlanganligi, E, D, B va H larning Gauss teoremasi va berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi, siljish toki
3. Galiley nisbiylik printsiplari. Einsteini nisbiylik printsiplari. Tt: vaqt va fazo, vaqtning absolyutligi va nisbiyligi, nisbiylik, yorug'lik tezligi, fizika qonunlari, inertsiyal sanoq sistemalar

3- variant

1. Elektromagnit induksiya. Tt: Lents qoidasi, induksiya EYK, magnit maydon oqimi, induksiya EYK ning sirkulyatsiyasi, o'z- va o'zaro induksiya
2. Bir vaqtliklikning nisbiyligi. Tt: Einsteini postulatlar, Lorents almashtirishlari
3. Fizi tajribasi. Tt: nisbiylik printsiplari, efi tushunchasi

4-variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining differentsial ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya.
2. Elektr maydon energiyasi. Tt: zaryadlar sistemasi potentsiali va energiyasi, yassi kondensator elektr maydon energiyasi va energiya zichligi
3. Galiley nisbiylik printsiplari. Tt: fazo va vaqt, nisbiy harakat, fazo va vaqtning nisbiyligi va absolyutligi. Galiley almashtirish formulalari

5- variant

1. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushuncha: tok, tok elementi, magnit maydon, induksiya, superpozitsiya printsiplari
2. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining integral formulasi. Tt: elektr induksiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
3. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

6- variant

1. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining differentsial formulasi. Tt: elektr induksiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
2. Relyativistik elektrodinamikada energiya-impuls. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, Einsteini formulasi
3. Einsteini formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

7- variant

1. Kondensatorlarning elektr sig'implari. Tt: kondensator, elektr sig'im, yassi, sferik va silindrik kondensator
2. Lents qoidasi. Tt: elektromagnit induksiya, induksiya EYuK
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

8- variant

1. Puasson va Laplas tenglamalari. Tt: elektr maydon kuchlanganligi va potentsiali, gradient va divergentsiya
2. Magnetik moddalar. Tt: magnetik moddalar, ularning kristal panjarasida magnit momentlar, dia -, para - va ferromagnetiklar, giromagnit munosabat, spin
3. Einsteini formulasi. Tt: massa va energiya, ular orasidagi bog'lanish formulasi

9- variant

1. Parallel toklarning o'zaro ta'sirlashuvi. Tt: tok elementi, magnit maydon, induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, ta'sirlashish kuchi
2. Majburiy elektromagnit tebranish. Tt: tashqi kuch, davriy kuch, majburiy tebranish tenglamasi, rezonans
3. Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Lorents formulalari

10- variant

1. Magnit maydon energiyasi. Tt: solenoidli zanjir, energiyaning saqlanish qonuni, magnit maydon energiyasi
2. Tomson formulasi. Tt: erkin elektromagnit tebranishlar, LC kontur, tebranish davri
3. Kirxgof qoidalari. Tt: tok zanjiri, tugun, berk kontur, Kirxgofning 1- va 2- qoidalari

11-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiyanlash koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydoni induktsiyasi. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induktsiyasi, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induktsiyasining sirkulyatsiyasi haqida teorema
3. Einsteini postulatlar. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Einsteini postulatlar

12-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar ichidagi elektr maydon. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorentsi almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

13-variant

1. Joule-Lentis qonuni. Tt: o'zgaras tok, tok ishi va quvvati, o'tkazgichda ajraladigan issiqlik
2. Lorentsi kuchi. Tt: zaryadlangan zarra, magnit maydon, Amper kuchi, Lorentsi kuchi
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorentsi almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

14-variant

1. Galilei nisbiylik printsiplari. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Galilei nisbiylik printsiplari
2. Dielektrlarda elektr maydon. Tt: erkin va bog'langan zaryadlar, dielektrik, qutblanish, dielektrik singdiruvchanlik, dielektrik muhitda Kulon qonuni
3. Elektromagnit to'lqin. Tt: to'lqin, to'lqin fronti, sirti, fazasi, tezligi, chastotasi va uzunligi. Erkin elektromagnit to'lqin va uning tenglamasi. To'lqin impulsi va energiyasi

15-variant

1. Magnit maydoni induktsiyasi uchun Gauss teoremasi. Tt: magnit maydon, induktsiya, induktsiya oqimi, Gauss teoremasi
2. O'zgaras tok qonunlari. Tt: o'tkazgich, elektr zanjiri, tok kuchi, tok zichligi, uzluksizlik tenglamasi, zanjirning bir qismi uchun Om qonuni, EYK, berk zanjir uchun Om qonuni, elektr toki ishi, tok quvvati, Joule-Lentis qonuni
3. Relyativistik elektrodinamikada energiya-impuls. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, Einsteini formulasi

16-variant

1. Lorentsi almashtirishlaridan kelib chiquvchi oqibatlar. Tt: fazo va vaqt, koordinata va vaqtning almashtirilishi, Lorentsi formulalari, uzunlik va vaqt oralig'ining nisbiyligi
2. Elektr maydon kuchlanganligining sirkulyatsiyasi haqida teorema. Tt: elektr maydon, kuchlanaganlik, statsionar elektr maydon, elektr maydon ishi, berk kontur bo'yicha bajarilgan ish, sirkulyatsiya
3. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushuncha: tok, tok elementi, magnit maydon, induktsiya, superpozitsiya printsiplari

17-variant

1. Elektromagnit tebranishlar. Tt: elektromagnit tebranish LC kontur, RLC kontur, tebranish davri, boshlang'ich fazasi, amplitudasi, chastotasi. Erkin, majburiy, so'nuvchi tebranishlar. Tebranishning so'nish dekrementi, logarifmik decrement.
2. Elektrostatik maydonda o'tkazgich. Tt: o'tkazgich, elektr induktsiya, sirt zaryadlar, o'tkazgich potentsiali, Puasson tenglamasi, Laplas tenglamasi, o'tkazgich sirtiga ta'sit etuvchi kuch
3. Einsteini postulatlar. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Einsteini postulatlar

18-variant

1. O'zgaruvchan tok uchun OM qonuni. Tt: Berk zanjir, o'zgaruvchan tok. Vector diagramma, Om qonuni, kuchlanish va tok kuchi amplitudalari orasidagi fazalar farqi, kuchlanish va tok kuchining effektiv qiymatlari
2. Lorentsi almashtirishlari. Tt: vaqt va koordinata, nisbiylik, yorug'lik tezligi, vaqt va koordinatalarning almashishi
3. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchalar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis

19-variant

1. Poyting vektori. Tt: elektromagnit maydon oqimi va uning energiyasi oqimi, oqim zichligi
2. Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, Eingshtein postulatlar, Lorents almashtirishlari
3. Dielektrlarda elektr maydon. Tt: erkin va bog'langan zaryadlar, dielektrik, qutblanish, dielektrik singdiruvchanlik, dielektrik muhitda Kulon qonuni

20-variant

1. Lorents almashtirishlari. Tt: vaqt va koordinata, nisbiylik, yorug'lik tezligi, vaqt va koordinatalarning almashishi
2. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchalar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
3. Zanjirning bir qismi uchun Om qonuni. Tt: qarshilik, kuchlanish, tok kuchi, tok kuchi birligi

21-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiyanlanish koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydoni induktsiyasi. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induktsiyasi, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induktsiyasining sirkulyatsiyasi haqida teorema
3. Einshtein postulatlar. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Einstein postulatlar

22-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar elektr maydoni. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

23-variant

1. Joule-Lentis qonuni. Tt: o'zgarmas tok, tok ishi va quvvati, o'tkazgichda ajraladigan issiqlik
2. Lorents kuchi. Tt: zaryadlangan zarra, magnit maydon, Amper kuchi, Lorents kuchi
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

24-variant

1. Elektromagnit induktsiya. Tt: Lentis qoidasi, induktsion EYK, magnit maydon oqimi, induktsion EYK ning sirkulyatsiyasi, o'z- va o'zaro induktsiya
2. Bir vaqtliklikning nisbiyligi. Tt: Eingshtein postulatlar, Lorents almashtirishlari
3. Fizo tajribasi. Tt: nisbiylik prinsipi, efir tushunchasi

25-variant

1. Elektr maydon kuchlanganligi uchun Gauss teoremasining differentsial ko'rinishda yozilishi. Tt: elektr maydon, Kulon qonuni, kuchlanganlik va uning kuch chiziqlari, kuchlanganlik oqimi, sferik burchak, (x,y,z) koordinatalar sistemasi, differentsial, integral, divergentsiya.
2. Elektr maydon energiyasi. Tt: zaryadlar sistemasi potentsiali va energiyasi, yassi kondensator elektr maydon energiyasi va energiya zichligi
3. Galiley nisbiylik prinsipi. Tt: fazo va vaqt, nisbiy harakat, fazo va vaqtning nisbiyligi va absolyutligi. Galiley almashtirish formulalari

26-variant

1. Bio Savar Laplas qonuni. Tayanch tushunchalar: tok, tok elementi, magnit maydon, induktsiya, superpozitsiya prinsipi
2. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining integral formulasi. Tt: elektr induktsiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
3. Eingshtein formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

27-variant

1. Elektr qutblanish vektori uchun Gauss teoremasining differentsial formulasi. Tt: elektr induktsiya, qutblanish, erkin va bog'langan zaryadlar, Gauss teoremasi
2. Relyativistik elektrodinamikada energiya-impuls. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, Eingshtein formulasi
3. Eingshtein formulasi. Tt: massa, energiya, ular orasida bog'lanish, tinchlikdagi massa va energiya, invariant

28- variant

1. Puasson va Laplas tenglamalari. Tt: elektr maydon kuchlanganligi va potentsiali, gradient va divergentsiya
2. Magnetik moddalar. Tt: magnetik moddalar, ularning kristal panjarasida magnit momentlar, dia -, para - va ferromagnetiklar, giromagnit munosabat, spin
3. Einshtein formulasi. Tt: massa va energiya, ular orasidagi bog'lanish formulasi

29- variant

1. Parallel toklarning o'zaro ta'sirlashuvi. Tt: tok elementi, magnit maydon, induksiya, Bio-Savar-Laplas qonuni, ta'sirlashish kuchi
2. Majburiy elektromagnit tebranish. Tt: tashqi kuch, davriy kuch, majburiy tebranish tenglamasi, rezonans
3. Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Lorents formulalari

30- variant

1. Magnit maydon energiyasi. Tt: solenoidli zanjir, energiyaning saqlanish qonuni, magnit mayqon energiyasi
2. Tomson formulasi. Tt: erkin elektromagnit tebranishlar, LC kontur, tebranish davri
3. Kirxgof qoidalari. Tt: tok zanjiri, tugun, berk kontur, Kirxgofning 1- va 2- qoidalari

31-variant

1. Elektromagnit tebranishlar. Tt: elektromagnit tebranish LC kontur, RLC kontur, tebranish davri, boshlang'ich fazasi, amplitudasi, chastotasi. Erkin, majburiy, so'nuvchi tebranishlar. Tebranishning so'nish dekrementi, logarifmik decrement.
2. Elektrostatik maydonda o'tkazgich. Tt: o'tkazgich, elektr induksiya, sirt zaryadlar, o'tkazgich potentsiali, Puasson tenglamasi, Laplas tenglamasi, o'tkazgich sirtiga ta'sit etuvchi kuch
3. Einshtein postulatlar. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Einstein postulatlar

32-variant

1. O'zgaruvchan tok uchun OM qonuni. Tt: Berk zanjir, o'zgaruvchan tok. Vector diagramma, Om qonuni, kuchlanish va tok kuchi amplitudalari orasidagi fazalar farqi, kuchlanish va tok kuchining effektiv qiymatlari
2. Lorents almashtirishlari. Tt: vaqt va koordinata, nisbiylik, yorug'lik tezligi, vaqt va koordinatalarning almashishi
3. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis

33-variant

1. Poyting vektori. Tt: elektromagnit maydon oqimi va uning energiyasi oqimi, oqim zichligi
2. Lorents almashtirishlari. Tt: fazo va vaqt, Eingshtein postulatlar, Lorents almashtirishlari
3. Dielektrlarda elektr maydon. Tt: erkin va bog'langan zaryadlar, dielektrik, qutblanish, dielektrik singdiruvchanlik, dielektrik muhitda Kulon qonuni

34-variant

1. Lorents almashtirishlari. Tt: vaqt va koordinata, nisbiylik, yorug'lik tezligi, vaqt va koordinatalarning almashishi
2. Magnetiklarda magnit maydon. Tayanch tushunchlar: magnetic, mikro- va makrotok, ichki- va tashqi magnit maydon induktsiyasi, magnitlanish vektori, magnetikda magnit maydoni kuchlanganligi va uning sirkulyatsiyasi, dia-, para- va ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferritlar, gisterezis
3. Zanjirning bir qismi uchun Om qonuni. Tt: qarshilik, kuchlanish, tok kuchi, tok kuchi birligi

35-variant

1. Elektrolitlarda elektr toki. Tt: eritma, elektrolit, dissotsiyanlash koeffitsienti, Faradeyning 1- qonuni, elektrokimyoviy ekvivalent, nisbiy atom og'irlik, ion valentligi, kimyoviy ekvivalent, Faradeyning 2- qonuni, Faradey doimiysi, elektrolitlarda elektr o'tkazuvchanlik
2. To'g'ri tok, doiraviy tok, solenoid va toroid magnit maydoni induktsiyasi. Tt: tok elementi, magnit maydon, magnit maydon induktsiyasi, Bio-Savar-Laplas qonuni, magnit maydon induktsiyasining sirkulyatsiyasi haqida teorema
3. Einshtein postulatlar. Tt: fazo va vaqt, nisbiylik, Einstein postulatlar

36-variant

1. Amper kuchi. Tt: magnit maydon, tok elementi, chap qo'l qoidasi
2. Yassi, sferik va silindrik kondensatorlar elektr maydoni. Tt: kondensator, elektr maydon, Gauss teoremasi
3. Relyativistik mexanikada tezlikning almashtirilishi. Tt: fazo va vaqt, Lorents almashtirishlari, tezlikning nisbiyligi

"Nazariy fizika" (Elektrodinamika) fanidan "Umumiy savollar"

1. Zaryalarni o'zaro qanday ta'sirlashadi?
2. Kavendish tajribasining mohiyati nimadan iborat?
3. Kulon tajribasi ning mohiyati nimadan iborat?
4. Vakuunmda elektr maydoni o'zini qanday namoyon etadi?
5. Dielektrlarda elektr maydon o'zini qanday namoyon etadi?
6. Elektr maydon kuchlanganligi vektorining oqimi qanday ta'riflanadi?
7. Elektr sig'imi deganda nimani tushunasiz?
8. Kondensator nima?
9. Kondensatorlarning elektr sig'imini qanday hisoblanadi?
10. Ostragadskiy-Gauss teoremasini qanday talaffuz qilinadi?
11. Ostragadskiy-Gauss teoremasining formulasi qanday yoziladi?
12. Bog'langan zaryadlar deganda nimani tushunasiz?
13. Elektr maydoni induktsiyasi vektori deganda nimani tushunasiz?
14. Muhitlar chegarasida elektr maydon kuch chiziqlarining shakli qanday?
15. Elektrostatik maydon bu qanday maydon?
16. Elektr maydoni kuchlanganlik kuch chiziqlari qanday chiziladi?
17. Elektr maydoni uchun superpozitsiya printsipli qanday talaffuz etiladi?
18. Nuqtaviy elektr zaryadlarning hosil qilgan elektr maydoni kuchlanganligi qanday hisoblanadi?
19. Ikki muhit chegarasida elektr maydoni kuchlanganligi vektori va induktsiya vektori uchun chegaraviy shartlar qanday yoziladi?
20. O'zgarmas tok uchun qanday qonunlar mavjud?
21. Om qonunini qanday talaffuz etiladi?
22. Elektr zanjiridagi tashqi kuchlar deganda nima tushuniladi?
23. Elektr yurituvchi kuchning vazifasi nimadan iborat?
24. Joul-Lents qonunining formulasi qanday yoziladi?
25. Kirxgoff qoidalari nimaga va qay hollarda ishlatiladi?
26. Kirxgoffning 1-qoidasi qanday talaffuz etiladi?
27. Kirxgoffning 2-qoidasi qanday talaffuz etiladi?
28. Metallarning o'tkazuvchanligi qanday tushuntiriladi?
29. Metallarning elektron nazariyasi qachon rivojlantirilgan va bunda qaysi fizik-olimlar hissalari bor?
30. Bideman-Frants qonuni qanday talaffuz etiladi?
31. O'tkazuvchanlik hodisasining mohiyati nimadan iborat?
32. Kamerling Onnes ixtirosi qanday hodisani kashf qilgan?
33. Meysner effekti hodisasining mohiyati nimadan iborat?
34. Kontaktlarda qanday elektr hodisalar kuzatiladi?
35. Tomson effekti ning mohiyati nimadan iborat?
36. Pelt'e effekti ning mohiyati nimadan iborat?
37. Termojuftlik nima va un qayerlarda qo'llaniladi?
38. Elektron emissiya hodisasining mohiyati nimadan iborat?
39. Vakuumli diod nima va u qanday ishlaydi?
40. Yarimo'tkazgichlar moddalar deganda nimani tushunasiz?
41. Yarimo'tkazgich moddalarning qanday xususiyatlarini bilasiz?
42. Gazlardagi elektr toki qanday vujudga keladi?
43. Ionlanish va rekombinatsiya hodisalari nimadan iborat?
44. Mustaqil va nomustaqil elektr o'tkazuvchanlik nazariyasi.
45. Plazma nima?

46. Elektrolitlarda elektr toki qanday vujudga keladi?
47. Faradeyning 1- va 2- qonunlari qanday talaffuz etiladi?
48. Toklarning magnit maydoni borligini qanday tekshirish mumkin?
49. Bio-Savar-Laplas qonuni qanday talaffuz etiladi?
50. Magnit maydonning nimalarga ta'sir qiladi?
51. Amper kuchi nimaga ta'sir etadi va uning yo'nalishi qanday?
52. Lorents kuchi nimaga ta'sir etadi va uning yo'nalishi qanday?
53. Moddalar qanday magnit xossalarga ega?
54. Diamagnetizmning mohiyati nimadan iborat?
55. Paramagnetizmning mohiyati nimadan iborat?
56. Ferromagnetizm ning mohiyati nimadan iborat?
57. Elektromagnit induksiya hodisasi ning mohiyati nimadan iborat?
58. Lents qoidasi qanday talaffuz etiladi?
59. O'zgaruvchan tok uchun Om qonuni qanday yoziladi?
60. Reaktiv qarshiliklar deganda nimani tushunasiz?
61. Vektorlar diagrammasi usulining mohiyati nimadan iborat?
62. Uch fazali tok deganda nimani tushunasiz?
63. Elektr energiyasini uzatish qay tarzda amalga oshiriladi?
64. Transformatorning vazifasi nimadan iborat?
65. Generator ning vazifasi nimadan iborat?
66. Elektr motorning vazifasi nimadan iborat?
67. Uch fazali tok qanday ulanadi?
68. Elektromagnit tebranishlar deb nimaga aytiladi?
69. Kondensator va g'altakdan iborat konturdagi erkin elektromagnit tebranishni qanday miqdorlar orqali ifodalash mumkin?
70. Tomson formulasi nimani tavsiflaydi va u qanday yoziladi?
71. Maksvel tenglamalari necha tenglamadan iborat?
72. Maksvelning siljish toki nimaga kerak?
73. Maksvel tenglamalarini qanday talaffuz etiladi?
74. Elektromagnit to'lqinlarning qanday xossalari mavjud?
75. Interferentsiya deb nimaga aytiladi?
76. Difraksiya deb nimaga aytiladi?
77. Qutblanish deb nimaga aytiladi?
78. Elektromagnit o'zaro ta'sirni nima bilan tavsiflaymiz?
79. Foton bu nima?
80. Elektr zaryadi zichligining necha turini bilasiz?
81. Elektr zaryadi chiziqli, sirt va hajm zichliklari qanday talaffuz etiladi?
82. Uzluksizlik tenglamasining kovariant ko'rinishi qanday yoziladi?
83. Elektromagnit maydonning zaryadli zarraga ta'siri qanday ifodalanadi?
84. Lorents kuchining umumiy formulasi qanday yoziladi?
85. Superpozitsiya printsiplining mohiyati nimadan iborat?
86. Elektrodinamikaning eksperimental asoslari deganda nimani tushunasiz?
87. Kulon qonuni qanday talaffuz etiladi?
88. Elektrostatika tenglamalari qanday shaklda yoziladi?
89. Bio-Savar-Laplas formulasining yozilishi qanday?
90. Elektromagnit induksiya hodisasi matematik tarzda qanday ifodalanadi?
91. To'lqin tenglama qanday yoziladi va nimani tavsiflaydi?
92. Elektromagnit to'lqinlarning qanday turlarini bilasiz?
93. Elektromagnit to'lqinlar qanday tarzda va qanday tezlikda tarqaladi?
94. To'lqin qutblanishi deganda nimani tushunasiz?

95. Dipol nurlanish deb nimaga aytiladi?
96. Nurlanishning intensivligi deb nimaga aytiladi?
97. Qanday oddiy nurlatuvchi tizimlarni bilasiz?
98. Nurlanish reaksiyasi deganda nimani tushunasiz?
99. Nurlanish spektr chizig'ining kengligi . deganda nimani tushunasiz?
100. Maksvel-Lorents tenglamalari nimani tavsiflaydi?
101. Mikroskopik maydon deganda nimani tushunasiz?
102. Magnitlanish deb nimaga aytiladi?
103. Qutblanish deb nimaga aytiladi va u qanday kattalik orqali ifodalanadi?
104. Qutblanish vektori deb nimaga aytiladi?
105. Muhit uchun Maksvel tenglamalari qanday yoziladi?
106. Elektromagnit maydon uchun chegaraviy shartlar qanday yoziladi?
107. Kvazistatsionar toklar va maydonlar deb nimalarga aytiladi?
108. Kvazistatsionarlik shartlar qanday yoziladi?
109. Skin effekt hodisasining mohiyati nimadan iborat?
110. Elektr zaryadi saqlanish qonunining kovariant shaklda qanday yoziladi?
111. 4-potensial deganda nimani tushunasiz?
112. Dalamber tenglamasining kovariant shakli qanday yoziladi?
113. Lorents shartining kovariant shakli qanday yoziladi?
114. Elektromagnit maydon tenzori deganda nimani tushunasiz?
115. Maydonlarni almashtirish formulalari nimani tavsiflaydi?
116. Elektromagnit maydonining qanday invariantlarini bilasiz?
117. Maksvel tenglamalari kovariant shaklda qanday yoziladi?
118. Foton – relyativistik zarrami?
119. Noinertsial sanoq tizim deganda nimani tushunasiz?
120. Gravitatsiya bu fizaning qanday sahosi?
121. Gravitatsion va inert massalar qanday aniqlanadi va ularning bir-biridan farqi nimada?
122. Gravitatsion maydon deganda nimani tushunasiz?
123. Fazo-vaqt metrikasi deganda nimani tushunasiz?
124. Gravitatsion maydonning energiya-impuls tenzori deganda nimani tushunasiz?
125. Eynshtein tenglamasi nimani tavsiflaydi va u qanday yoziladi?
126. Umumiy nisbiylik nazariyasini tasdiqlovchi qanday omillarni bilasiz?
127. Olamning ochiq va yopiq modellari deganda nimani tushunasiz?
128. Olamning kengayishini ko'rsatuvchi qanday hodisani bilasiz?
129. Xabbl qonunining mohiyati nimadan iborat?
130. Singulyarlik deganda nimani tushunasiz?

Tavsiya etilgan adabiyotlar ro`yxati

Asosiy adabiyotlar

- A1. A.A.Abdumalikov. Nazariy fizika kursi, 2- jild Elektrodinamika. T.: Cho`lpon nomidagi NMIU, 2011
- A2. Я.П.Терлецкий, Ю.П.Рыбаков. Электродинамика. М.: «Высшая школа», 1990
- A3. И.В.Савельев. Основы теоретической физики. Том 1. М.: «Высшая школа», 1991
- A4. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика. т.2 Теория поля. М.: «Наука», 1988
- A5. Р.Х.Маллин. Майдон назарияси. Т., «Ўқитувчи», 1965
- A6. Р.Х.Маллин. Классик электродинамика. II қисм, Классик макроэлектродинамика. Т., «Ўқитувчи», 1978
- A7. А.Ў.Раҳимов, Б.О.Отакулов. Электродинамика ва нисбийлик назарияси. Феноменологик электродинамика ва классик электрон назария асослари. Т., «Ўқитувчи», 1985
- A8. В. В. Мультановский, А. С. Васильевский. Курс теоретической физики. Классическая электродинамика. М., «Просвещение». 1990
- A9. А.Н. Матвеев. Электродинамика. М.: «Высшая школа». 1980
- A10. Л.Г.Гречко и др. Сборник задач по теоретической физике. М.: «Высшая школа». 1984
- A11. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Сборник задач по электродинамике. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002
- A12. А.Бойдедаев. Умумий нисбийлик назарияси. 4- қисм. ТДПУ нашриёти, 2003 й.

Qo`shimcha adabiyotlar

- Q1. Е.М.Гершензон, Н.Н.Малов, А.Н.Мансуров. Электродинамика. М., ИЦ «Академия», 2002
- Q2. И.Е. Иродов. Основные законы электромагнетизма. М.: «Высшая школа», 1991
- Q3. И.Е. Тамм. Основы теории электричества. М.: «Наука», 1989
- Q4. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Современная электродинамика. Часть 1 и 2. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002
- Q5. А.Чертов и А.Воробьев. Физикадан масалалар туплами. Т.: 1997
- Q6. Умумий физикадан масалалар туплами. Педагогика олий ўқув юртлари учун. М.С.Цедрик тахрири остида. Т.: «Ўқитувчи», 1991
- Q7. И.Е. Иродов. Задачи по общей физике. М.: «Высшая школа», 1972
- Q8. J.Kamalov, I.Ismoilov, U.Begimqulov, S.Avazboyev. Elektr va magnetizm. T.: Iqtisod-moliya, 2007
- Q9. B.F.Izbasarov, I.R.Kamalov. Elektromagnetizm. Toshkent: Iqtisod-moliya, 2006
- Q10. Ў.Қ.Назаров. Умумий физика курси, Электромагнетизм, 2- жилд. Т.: «Ўзбекистон», 2001
- Q11. С.Г.Калашников. Электр. Т.: «Ўқитувчи», 1979
- Q12. О.Ахмаджонов. Физика курси. 2 қисм . Т.: «Ўқитувчи», 1987
- Q13. A.Boydedayev. Maxsus nisbiylik nazariyasi. T., TDPU nashriyoti. 2001

Internet manbalar

- 1. www.tdpu.uz
- 2. www.pedagog.uz
- 3. www.ziynet.uz
- 4. www.edu.uz
- 5. www.uzedu.uz

"Nazariy fizika" (Elektrodinamika) fanini o`zlashtirishda foydalanishi mumkin bo`lgan xorijiy manbalar
(jumladan internet manbalari)

Xorijda chop etilgan kitoblar

- A1. Я.П.Терлецкий, Ю.П.Рыбаков. Электродинамика. М.: «Высшая школа», 1990
- A2. И.В.Савельев. Основы теоретической физики. Том 1. М.: «Высшая школа», 1991
- A3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика. т.2 Теория поля. М.: «Наука», 2006
- A4. В. В. Мультиановский, А. С. Васильевский. Курс теоретической физики. Классическая электродинамика. М., «Просвещение». 1990
- A5. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Сборник задач по электродинамике. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002

Qo`shimcha adabiyotlar

- Q1. Е.М.Гершензон, Н.Н.Малов, А.Н.Мансуров. Электродинамика. М., ИЦ «Академия», 2002
- Q2. И.Е. Иродов. Основные законы электромагнетизма. М.: «Высшая школа», 1991
- Q3. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Современная электродинамика. Часть 1 и 2. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002
- Q4. И.Е. Иродов. Задачи по общей физике. М.: «Высшая школа», 1972

Elektron kutubxonalar:

Электронная энциклопедия и библиотека Руниверс	http://www.runivers.ru/
Президентская библиотека имени Бориса Николаевича Ельцина	http://www.prilib.ru/Pages/Default.aspx
НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА	http://elibrary.ru/defaultx.asp
Поиск книг в российских Интернет-магазинах	http://www.findbook.ru/
Free books Download	http://www.freebookcentre.net/
Сайт для преподавателей физики, учащихся и их родителей	www.fizika.ru
Физика твердого тела - EqWorld	http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/solidstate.htm
Электронные книги по физике, астрономии, математике, радиоэлектронике.	http://www.booksfiz.nm.ru/
Электронная библиотека.	http://bookfi.org/

"Nazariy fizika" (Elektrodinamika) fanini o'zlashtirishga doir foydali maslahatlar

Fanni yetarli darajada yaxshi va puxta o'zlashtirish uchun, albatta, mashg'ulotlarning barcha turlariga muntazam qatnash va berilayotga ma'lumotlarni tizimli ravishda qabul qilib ma'ruza shaklida yozib borish maqsadga muvofiq.

Birinchi navbatda o'quv quorllarini (o'quv darsliklar hamda qo'llanmalarni) fakultet yoki institut kutubxonasidan olish darkor. Ba'zi o'quv darsliklar hamda qo'llanmalarning elektron fayllarini fan o'qituvchisidan olishingiz mumkin.

Internet resurslaridan umumli foydalanish lozim. Bunda ammobop qidiruv tizimlari (www.google.com, www.uz va boshqalari) orqali fanga doir axborotlarni qidirib topish va ularni o'qib, tahlil qilib mashg'ulotlarga tayyorlanib borish lozim.

O'zbekiston Respublikasining ichki internet resurslari www.ziynet.net portalidagi ma'lumotlar bazasidan fanga oid ma'ruza matnlari, amaliy mashg'ulotlarga doir misol va masalalar, uslubiy qo'llanmalarni, seminar mashg'ulotlariga kerakli bo'lgan mavzularni olish mumkin.

Amaliy mashg'ulotlarni o'zlashtirishda ma'ruzani yaxshilab o'qish, uning tub ma'nosini chaqish, qonuniyatlari va ular asosida sodir bo'layotgan hodisalarni to'g'ri tushinish, ana undan keyin masalalarni osonidan qiyiniga qarab boshqichma boshqich yechish yaxshi samara beradi.

Seminar mashg'ulotlarini o'zlashtirishda mavzuga doir axborotni turli xil manbalardan jamlash, ularni o'qib taqqoslab, tahlil etish, ular asosida o'z fikringizni shakllantirish va uni aytib bilishga o'rganish, aytgan fikringizni asoslay bilish, va kerak bo'lsa uni himoyalash va bahs-munozara qilishni o'rganish lozim.

Xorijiy tillarda nashr etilgan darsliklar va o'quv qo'llanmalardan ham foydalanish maqsadga muvofiq.

Fanni o'zlashtirishda student va domla (fan o'qituvchisi) orasida maslahat (konsultatsiya) ham juda katta ahamiyat kasb etadi. Student maslahat mashg'ulotlariga tizimli ravishda borishi va tushinishi qiyin, bahsga sabab boluvchi savollarni domla bilan fikrlashishi lozim. Amaliy masalalarni yechishda formulalarni yozish, yechishning bir nechta bo'lishi, uni uslubiy jihatdan takomillashtirish kabi nozik jihatlar oydinlashdi.

Mustaqil ta'lim o'zlashtirishning asosiy bo'g'ini bo'lmoqda, shu bois studentlar ko'proq kitob mutaola qilishi, axborotni mustaqil topishi orqali fanni mustaqil yoki domlaning maslahatlariga quloq slogan holda oson o'zlashtirish mumkin.

Quyidagi mahalliy veb sahifalar fizika fani va uni o'qitishga bag'ishlangan:

Masofaviy ta'lim tizimi <http://estudy.uz/>

Fiziklar veb sahifasi <http://neutrino.ucoz.ru/>

FIZIKA.UZ veb sahifasi <http://fizika.uz/>

Olamning zamonaviy ilmiy manzarasini quyidagi havoladan ko'rish mumkin:

<http://www.nkt.it/files/universo.swf>