

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
XALQ TA'LIMI VAZIRLIGI**

**JIZZAX DAVLAT
PEDAGOGIKA INSTITUTI**

FIZIKA – MATEMATIKA FAKULTETI

UMUMIY FIZIKA KAFEDRASI

R.N. Bekmirzaev, M.H. Samadov.

TERMOYADRO REAKSIYALARI



JIZZAX-2015

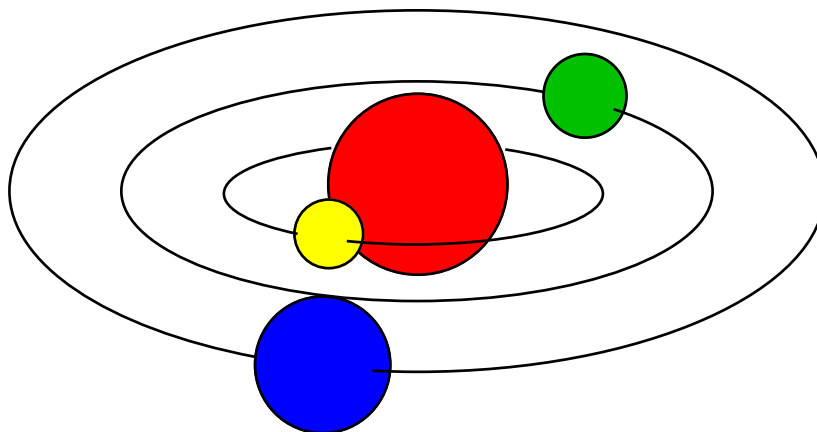
**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
XALQ TA'LIMI VAZIRLIGI**

**JIZZAX DAVLAT
PEDAGOGIKA INSTITUTI**

**FIZIKA – MATEMATIKA FAKULTETI
UMUMIY FIZIKA KAFEDRASI**

R.N. Bekmirzaev, M. Samadov

TERMOYADRO REAKSIYALRI



JIZZAX-2015

Uslubiy tavsiyanoma institut o'quv-uslubiy kengashi tomonidan
"29" yanvar 2015 y. tasdiqlangan. Bayonnoma № 5

Uslubiy tavsiyanoma "Umumiy fizika" kafedrasining
"19" dekabr 2014 yildagi majlisida ko'rib chiqildi. Bayonnoma № 5

Taqrizchi:	Dots : A. Mustafaqulov
Mualliflar:	R.N. Bekmirzaev,
	M.H. Samadov.

SO'Z BOSHI

“Kadrlar tayyorlash milliy dasturi”ning II-bosqichi amalga oshirilayotgan bugungi kunda ta'lim muassasalarini zamonaviy, davlat ta'lim standartlari talablariga javob beradigan o'quv adabiyotlar bilan ta'minlash dolzarb muammolardandir. Ma'lumki, hozirgi kunda oliy ta'lim tizimi to'liq yangi o'quv reja va yangi o'quv dasturi asosida ishlashga o'tdi. Pedagogika institutlarida o'qitish ta'minlanayotgan “fizika-astronomiya” yo'nalishi bakalavr va magistr lari uchun oliy ta'lim davlat tizimi standartlari ishlab chiqilgan holda, ularga mos o'quv adabiyotlari yetarli emas. Ayniqsa, yadro fizikasi bo'yicha o'zbek tilida yozilgan o'quv qo'llanma yoki darsliklar deyarli yo'q. “Termoyadro reaksiyalari” nomli ushbu taqdim qilinayotgan uslubiy tavsiyanoma fizika-astronomiya yo'nalishi bo'yicha bakalavrlar uchun 1999 yilda chiqarilgan O'zbekiston Respublikasi uzluksiz ta'lim tizimi standarti asosida tayyorlandi.

Ushbu uslubiy tavsiyanoma kamchiliklardan xoli emas. Shu sababli uning kamchiliklari to'g'risida o'z fikr-mulohazalarini bildirgan o'rtoqlarga mualliflar oldindan o'z minnatdorchiligini bildiradilar.

MUNDARIJA

Kirish	5
1.Yadroning asosiy xususiyatlari.....	8
2. Yadrolarning o'lchami va zichligi	10
3.Bog'lanish energiyasi.....	11
4. Termoyadro reaksiyalari	11
5. Termoyadroviy reaksiya hosil bo'lish shartlari	15
6. Quyosh va yulduzlarda yuz beradigan termoyadroviy reaksiyalar	20
7. Tezlatgichlar.....	22
8. Detektorlar.....	29
Xulosa	32
Adabiyot.....	33

KIRISH

Yadro fizikasi - atom yadrosining tuzilishi, xususiyatlari va yadro ichida yuz beradigan jarayonlarni o'rganuvchi fandir.

XIX asr oxirlariga qadar atom tuzilishi haqida hych narsa ma'lum emas edi.

1896 yil **A.Bekkerel** (1852-1908) radioaktivlikni kashf etdi. Radioaktiv nurlanishlarning fotoplastinkaga ta'sir etishligini va ionlash xususiyatlarini aniqladi. Ikki yildan so'ng Pyer Kyuri (1859-1906) va Mariya Skladovskaya Kyuri (1867-1934) uran tuzlarining ham radioaktivlik xususiyatiga ega ekanligini aniqlashdilar. Radioaktivlik vaqtida uch xil (α , β , γ) nurlanish vujudga kelib, nurlanish intensivligi tashqi ta'sirlarga (temperatura, elektromagnit maydon ta'siri, deformatsiya) bog'liq emas ekanligi aniqlandi.

1900 yili Kyuri, E.Rezerford, F.Soddilar radioaktiv namunalardan chiquvchi α -ikki marta ionlashgan geliy atomi, β -tez elektron, γ -esa qisqa elektromagnit to'liq ekanligini aniqladilar. Shuning uchun, radioaktivlikni atom, molekulalarda bo'ladigan jarayonlar deb tushuntirib bo'lmaydi, balki yangi bir soha - yadroda deyishlikni taqozo etadi.

J.J.Tomson 29 aprel 1897 yilda elektronni kashf etdi. 1904 yili esa o'zining atom modelini tavsiya etdi, bunga ko'ra atom razmeri **$R=10^{-8}$ sm** bo'lgan musbat va manfiy zaryadlarga aralash neytral shar deb, atom nurlanishini kvazielastik kuchlarga ko'ra tebranishi tufayli deb qaradi. Atomdagi musbat va manfiy zaryadlarning taksimlanishi xarakterini o'rganish maqsadida E.Rezerford va uning xodimlari α -zarrachalarning moddalarda sochilishini o'rganishdilar. Tajriba natijasida α -zarralar o'zlarining dastlabki yo'nalishini turli burchak ostida o'zgartirgan. Ba'zilar juda katta (deyarli 180° gacha) burchakka sochilgan. Olingan natijalarga asosanib Rezerford atom ichida juda kichik hajmga to'plangan va katta massaga tegishli kuchli musbat elektr maydon (yadro) mavjud bo'lgandagina α -zarralar shunday katta burchakka sochilishi mumkin, degan xulosaga keladi va 1911 yili o'zining planetar modelini yaratdi. Bu modelga ko'ra elektronlar yadro atrofida joylashadi. Elektronlar soni esa shundayki, ularning yigindi manfiy zaryadi yadroning musbat zaryadini neytrallab turadi. Atomning bunday yadroviy modeliga ko'ra uning deyarli butun massasi kattaligi taxminan 10^{-13} sm ga teng bo'lgan atomning markazi yadrosida to'plangan.

Rezerford taklif etgan atomning planetar modeli atomning barqarorligini, spektrning diskretligini tushuntira olmaydi. Chunki atom qobigida elektron yadro atrofida aylanib turar ekan zaryadli zarra elektrodinamika qonunlariga ko'ra o'z energiyalarini nurlab borishligi lozim va nihoyat elektron yadroga kelib tushishligi kerak.

Bu qarama-qarshilikni 1913 yili daniyalik olim N.Bor o'z postulatlarini bilan bartaraf etdi. N.Bor postulatalariga ko'ra atomda elektronlar aniq barqaror orbitalarda (K, L, M,...) harakatlanadilar. Har bir orbita bir-birlaridan muayyan masofada joylashgan aniq energiyaga egadirlar bunda energiya yutmaydi yoki chiqarmaydilar. Energiya yutish va chiqarish faqatgina elektronning bir orbitadan ikkinchisiga o'tishida ro'y beradi.

N.Bor o'z postulatlarini bilan atom yadrosidagi jarayonlarni klassik tasavvurlashdan kvant tasavvurlashga asos soldi. Shunday qilib, klassik fizika qonunlaridan kvant fizikasiga o'tish davri boshlandi. 1926 yili Geyzenberg, Shredingerlar mikroduyo jarayonlarini kvant mexanikasi qonunlariga ko'ra tushuntira boshladilar. Kvant mexanikasiga ko'ra zarralar harakatini o'rganishda ularning harakat trayektoriyasini, bir vaqtda turgan joyi va tezliklarini aniq bilish mumkin emas.

Geyzenberg noaniqlik prinsipini, Shredinger kvant fizikasiga ko'ra to'liq funksiyalarini ishlab chiqdi. 1919 yil Aston mass-spektrograf yaratdi va atomning massalarini aniq o'lchash imkoniyatini berdi. Element massalari har xil bo'lgan izotoplar aniqlandi. Rezerford birinchi marotaba alfa-zarralar bilan azot $^{14}_7N$ yadrosini bombardimon qilib, $^4_2\alpha + ^{14}_7N \rightarrow ^{17}_8O + ^1_1H$ yadro reaksiyasini amalga oshirdi. Bu hodisa insoniyatning tabiat kuchlari ustidan erishilgan dastlabki g'alabasi edi.

Reaksiyada vujudga kelgan vodorod atomining yadrosi barcha yadrolar tarkibiga kiruvchi elementar zarra ekanligi aniqlandi va proton (p) deb nom berildi. Proton birinchi degan (yadro tarkibiga kiruvchi birinchi zarra) ma'nosini anglatadi. Proton massasi $m_p=1836,1m_e$, zaryadi $q_p=1,6\cdot 10^{-19}$ Kl elektron zaryadiga teng, ishorasi qarama-qarshi. Proton kashf etilgandan so'ng yadroning proton-elektron modeli yaratildi, lekin bu model yadro momentlarini tushuntiraolmadi. Yadro ichki sirlarini o'rganish uchun yuqori energiyali tezlatkichlar ko'ri boshlandi. Shu maqsadda elektrostatik generator Van-de-Graf: E.Lourens tomonidan siklotron yaratildi. 1932 yili D.Chedvik (1891-1974) zaryadsiz massasi proton massasiga yaqin $m_n=1838,6 m_e$ neytral zarra neytronni kashf etdi.

Neytron kashf etilgach, D.D.Ivanenko, Geyzenberglar atom yadrosining proton-neutron modelini tavsiya etishdilar. Bu modelga ko'ra atom yadrolari proton va neytronlardan tashkil topgan deb qaraladi. Hozirgi kungacha ham shunday tasavvur saqlanib kelmokda. D.Kokroft, E.Uoltonlar sun'iy tezlashtirilgan protonlar bilan birinchi yadro reaksiyasini amalga oshirdi. K.Anderson kosmik nurlar tarkibida pozitron (e^+) ni kashf etdi. Kosmik nurlar va yadro nurlanishlarni o'rganish uchun Vilson kamerasi va fotoemulsiya usullari yaratildi. Yadro tarkibini o'rganish bilan bir vaqtda yadro kuchlar xususiyatlari aniqlashga jiddiy e'tibor qaratildi. I.E.Tamm 1895-1971, D.D.Ivanenko va 1907-1981, keyinchalik 1935 yillarda yapon olimlaridan X.Yukavalar yadro kuchlar oraliq π -mezon zarralar yordamida amalga oshadi deb qarab o'zlarining mezon nazariyasini ishlab chiqishdilar.

1934 yili I.Kyuri va P.Jolio-Kyurilar su'niy radioaktivlik hodisasini, E.Fermi β -yemirilish nazariyasini yaratdi.

1937 yil K.Anderson, S.Nedermeyerlar kosmik nurlar tarkibida **μ -mezon** zarralarni ochdi. Bu vaqtga kelib ko'plab elementar zarralar va bu zarralarning bir-birlariga o'tishliklari o'rganila boshlandi. 1939-1945 yillar og'ir yadrolarning neytronlar ta'sirida bo'linishini bu bilan katta energiya ajralishini, ya'ni yadro zanjir reaksiyalari amalga oshirildi. Yadro bo'linish nazariyasini 1939 yil Y.I.Frenkel, N.Bor va J.Uylerlar tomchi modeliga asosan ishlab chiqishdi. E.Fermi boshchiligida AQShda 2 dekabr 1942 yil atom reaktori ishga tushdi. 1944-1945 yillarda V.I.Veksler, E.Mak-Millan zaryadli zarra tezlatgichlariga avtofazirovka prinsipini ishlab chiqdilar bu esa o'z navbatida tezlatgichlar energiyasini bir necha tartib oshirish imkoniyatini berdi. 1946 yildan boshlab ko'plab (betatron, sinxrotron, sinxrofazotron, chiziqli rezonans) tezlatgichlar qurila boshlandi. Tezlatgichlar yaratilishi ko'plab elementar zarralar (mezonlar, adronlar, giperonlar, rezonans zarralari) ochilishiga va ularning xususiyatlarini o'rganish, bundan tashqari, turli yadro reaksiyalarini o'tkazish imkoniyatini berishdi. Bu davrga kelib ko'plab yadro modellari yaratildi. 1954 yil 27 iyunida sobiq SSSRda birinchi atom elektrostansiyasi (**AES**) ishga tushirildi. Bu bilan yadro energiyasidan tinchlik maqsadida foydalanish davrini boshlab berdi, hozirgi vaqtda yuzlab AES lar ishlab turibdi. Yadro ichki energiyalardan foydalanishning yana bir turi yengil yadrolar qo'shilishi (sintez)

reaksiyalari, ya'ni termoyadro reaksiyasi hisoblanadi. Hozirgi vaqtda termoyadro reaksiyasini boshqarish eng aktual muammo, bu muammo hal etilsa, insoniyatning energiyaga bo'lgan ehtiyoji to'la qondirilgan bo'lur edi.

Yadro fizikasi tez rivojlanib borayotgan sohadir. Ayniqsa keyingi yillarda texnika taraqqiyoti ko'p yo'nalishlar bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borish bu bilan barcha soha yadrolari kvant xususiyatlarini aniqlash imkoniyatini beradi.

Hozirgi vaqtda yadro fizikasi fani oldida: yadro kuchlar tabiatini, elementar zarralar xususiyatlarini hamda termoyadro reaksiyasini boshqarish kabi eng muhim muammolar turibdi.

Bu xil muammolarni hal etishda, yagona nazariyani yaratishga asosiy qiyinchilik shundan iboratki, yadrodagi nuklonlar orasidagi o'zaro ta'sirlashuv kuchlari tabiatini tiliq bilmaymiz (yadro kuchlari tabiatda eng katta kuch, bu kuchdan katta kuchga ega emasmiz, qisqa masofada $R=10^{-13}$ sm, ta'sirlashuv vaqti $t=10^{-23}$ s bo'lganligi uchun). Ikkinchi tomondan nuklonlar orasidagi ta'sirlashuvni bilganimizda ham ta'sirlashuv qiymatini hisoblash uchun matematik hisoblash imkoniyatiga ega emasmiz, chunki yadro ko'p nuklonli sistema. Hozirgi zamon EHM ham hisoblash uchun ojizlik qiladi.

Shuning uchun hozirgi yaratilayotgan nazariyalar tajriba natijalarini umumiyashtirishga asoslangan fenomenologik xususiyatga egadir.

Yadro fizikasi fani hozirgi zamon tezlatkichlari, qayd qiluvchi detektorlar, kameralar, EHMLar, elektron avtomatik qurilmalar yordamida rivojlanib bormoqda.

Yadro fizikasi taraqqiyoti energetika, geologiya, tibbiyot, avtomatika, ekologiya kabi ko'plab sohalarda keng ko'llanilmoqda.

§ 1. Yadroning asosiy xususiyatlari

Atom yadrosi ikki xil zarra – proton va neytronlardan iboratdir.

Proton massasi taxminan (m_p), neytron massasi (m_n) ga teng, elektron massasi (m_e) dan ~2000 marta katta:

$$m_p = 1836,15 m_e = 1,67265 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

$$m_n = 1838,68 m_e = 1,67495 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

Proton musbat zaryadli, zaryad miqdori elektron zaryadiga teng, ammo ishorasi qarama-qarshi. Neytron zaryadsiz neytral zarra. Proton va neytronlar xususiy momentga, spinga ega $S=1/2$. Fermi-Dirak statistikasiga bo'ysunuvchi fermionlardir. Atom fizikasidan ma'lumki, zaryadli, massali elektron mexanik momentga ega bo'lish bilan bir vaqtda magnit momentga ham ega bo'lish kerak.

$$\mu_p = \frac{eh}{2m_p c} = 9,27 \cdot 10^{-21} \text{ erg / gs} \quad (\text{Bor magnetoni})$$

Protonning ham spini elektron zaryadi va spiniga teng, massasi esa katta bo'lgani uchun magnit momenti

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_p c} = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ erg / gs}$$

(yadro magnetoni)ga teng bo'lishi kerak edi.

$$\mu_B = 1836,1 \mu_{yam}$$

Lekin proton magnit momenti kutilgan qiymatdan ($1\mu_{yam}$) dan katta $2,79 \mu_{yam}$ ekanligini ko'rsatadi. Neytron ham neytral zarra bo'lishiga qaramasdan, magnit momentga ega ekan. Neytron magnit momenti $\mu_n = -1,91 \mu_{yam}$. Magnit momentining ishorasi manfiyligi spin yo'nalishiga qarama-qarshi yo'nalishda ekanligini bildiradi.

Yadro massasi. Massa moddiy ob'ektning eng muhim xususiyatlaridan biri bo'lib, jismning inertsia, gravitatsiya va energiya o'lchamlari bo'lib xizmat qiladi. Yadro massasi atom massasi birligida o'lchanadi. Ma'lumki, atom neytral holatda bo'ladi. Bir massa atom birligi- ^{12}C massasining $1/12$ qismi olingan.

$$1m.a.b = \frac{1}{12} ^{12}\text{C} = \frac{1}{12} \frac{12}{N_A} = \frac{1}{6,025 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} g.$$

Eynshteyn qarashiga ko'ra massa bilan energiya orasidagi bog'lanish qonuniga asosan har qanday M massali ob'ektga shu massaga mos $E=mc^2$ energiya va aksincha, E energiyaga $m=E/c^2$ tenglik bilan ifodalanuvchi massa to'g'ri keladi. 1m.a.b.ga mos keluvchi energiya

$$E = mc^2 = 1,66 \cdot 10^{-24} g \cdot 9 \cdot 10^{20} \frac{\text{sm}^2}{\text{s}^2} = 14,94 \cdot 10^{-4} \text{ erg} = 931,5 \text{ MeV}$$

Yadro fizikasida massa va energiya eV (elektronvolt)larda o'lchaniladi.

$$1\text{eV} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} \frac{1}{300} \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

yoki

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

1eV-dan katta birliklari keV, MeV, GeV va TeV.

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

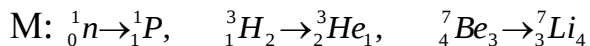
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV mavjud.}$$

Hozirgi zamon mass-spektrometrlari vodoroddan tortib hamma elementlarning massalarini millionning 0,02 ulushi qadar aniqlikda o'lchash imkonini beradi. Atom yadrolari massasini boshqa usullarda ham yuqori aniqlikda o'lchash mumkin. Masalan, yadroviy reaksiyalar, radioaktiv yemirilishlarda energiya balansini tahlil qilishlik va radiospektroskopik, mikroto'lqin va boshqa usullar bilan. Yadrodagi nuklonlar miqdorlariga qarab **izotop**, **izobar**, **izoton**, **ko'zguli yadrolar** deb ataladilar.

Bir xil zaryadga (Ze) ya'ni bir xil sonli protonga, ammo har xil massa soniga A ega bo'lgan yadrolarga **izotoplar** deb ataladi. Masalan, $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$, protonlar soni bir xil, neytronlar soni turlicha, elementlar davriy sistemasida bir joyda joylashadi. Izotoplar bir xil ximiyaviy va optik xususiyatlarga egadirlar. Lekin fizik xususiyatlari massa soni, toq-

juftliklari va hokazolar turlichadir. Massa soni A bir xil, zaryadlari har xil yadrolarga **izobar** yadrolar deb ataladi. M: $^{10}_4\text{Be}, ^{10}_5\text{B}, ^{10}_6\text{C}$. Izobarlar ximiyaviy xususiyatlari turlicha, fizik xususiyatlari, nuklon soni bir xil bo'ladi. Lekin bir xil A-bo'lganda ham izobar yadrolar massalari birmuncha farq qiladilar.

Birinchi yadroning protonlari ikkinchi yadroning neytronlariga, ikkinchi yadroning protonlari birinchi yadroni neytronlariga teng bo'lsa **ko'zguli** yadrolar deb ataladi.



Ko'zguli yadrolardan biri radioaktiv bo'ladi. Har qanday o'zgarishlardan so'ng bir-biriga o'tishadilar.

Bu yadro xususiyatlari bir-biriga ancha yaqin. Ko'zguli yadrolar, yadro kuchlar tabiatini va yadro kuchlariga elektromagnit maydonining hissasini aniqlashda keng qo'llaniladi. Neytronlari bir xil bo'lgan yadrolarga **izotonlar** deb ataladi.

§ 2. Yadrolarning o'lchami va zichligi

Yadro o'lchami – yadroning mavjudlik sohasi yoki yadro kuchlarining ta'sir sferasidir.

Yadro o'lchami (radiusi) $R \sim 10^{-15}$ m bo'lib, atom radiusidan 10^5 marotabalar kichikdir.

Yadro o'lchamini tajribada aniqlashning ko'pgina usullari bor. Masalan, elektron va neytronlarning atom yadrosidan sochilishiga ko'ra, undan tashqari yadro radiusini «ko'zgu» yadrolarga, protonlarning elektrostatik ta'sir energiyasini o'rganish, μ -mezonlar rentgen nurlanishni o'rganish va alfa radioaktiv yadrolarning yemirilish qonunini o'rganish yo'li bilan ham aniqlash mumkin. Yuqorida sanab o'tilgan usullar yadroviy kuchning o'zaro ta'sir sohasini yoki elektromagnit o'zaro ta'sir sohasini aniqlashga asoslangan. Turli usullar yadro taxminan shar shaklida ekanligi va aniq chegaraga ega ekanligini hamda radiusi massa soniga bog'liq ravishda oshib borishligini ko'rsatadi.

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (1)$$

Bu yerda R_0 – doimiy kattalik bo'lib, uning qiymati yadro radiusini aniqlash usuliga bog'liq ravishda (1,2÷1,4) F. (1 Fermi = 10^{-13} sm). Tez neytronlarning sochilishiga oid tajribalardan $R_0 = 1,4\text{F}$, α - parchalanish natijalarini $R_0 = 1,3\text{ F}$, zaryadli zarralar ta'sirida bo'ladigan yadro reaksiyalari natijalarga ko'ra $R_0 = 1,6\text{ F}$. (1) ifodadan yadroni shar shaklida deb qarab, hajm birligidagi zarralar sonini topamiz.

$$n = \frac{A}{V} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} = \frac{3}{4\pi R_0^3} = \frac{3}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-39} \text{ sm}^3} \approx 10^{38} \frac{\text{nuklon}}{\text{sm}^3}$$

Yadro zichligi hajm birligidagi nuklonlar massasi m_N

$$\rho = nm_N = 10^{38} \frac{\text{nuklon}}{\text{sm}^3} * 1.66 * 10^{-24} g = 10^{14} \frac{g}{\text{sm}^3} = 100 * 10^6 \frac{t}{\text{sm}^3}$$

Nuklonlar orasidagi masofa

$$\delta = \sqrt{\frac{V}{A}} = \sqrt{\frac{4\pi R^3}{3A}} = \sqrt{\frac{4\pi_0^3 A}{3A}} = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \cdot R_0 = 2,3 \cdot 10^{-13} \text{sm}$$

Ko'rinib turibdiki, yadro hajm birligidagi nuklonlar soni, yadro zichligi, nuklonlar orasidagi masofa ham o'zgarmas, yadro turiga bog'liq emas. Demak, yadro nuklonlar orasidagi masofa barcha yadrolar uchun o'zgarmas ekan, yadro siqilmaydi, massa soni ortishi bilan hajmi oshib boradi. Yadro kuchlari qisqa masofada katta kuch bilan ta'sir etadi.

§ 3. Bog'lanish energiyasi

Yadro bog'lanish kuchlari tufayli A nuklondan, ya'ni Z-proton va N=A-Z neytrondan tashkil topgan sistemadan iborat. Agar yadroni uni tashkil qiluvchi nuklonlarga ajratmoqchi bo'lsak, bog'lash kuchining ta'siriga qarshi ish bajarish kerak. Bu ishning kattaligi bog'lanish energiyasi yoki yadro barqarorligining o'lchamidir.

Bog'lanish energiyasi – nuklonlarga kinetik energiya bermasdan nuklonlar orasidagi bog'lanishni (o'zaro aloqani) uzish uchun kerak bo'lgan energiyaga aytiladi.

Bu energiyani yadrodagi nuklonlarning o'zaro ta'sir (yadro kuchlar) qonuniyati hozircha noma'lum bo'lsa ham, energiyaning saqlanish qonuni va nisbiylik nazariyasining massa bilan energiyani bog'laydigan $E=mc^2$ ifodasidan topish mumkin. Agar yadroning massasi $m(N,Z)$ ni uni tashkil qilgan nuklonlar massa soniga to'g'ri keluvchi massalari yig'indisi $[Zm_p + Nm_n]$ ga solishtirsak, birinchi massa ikkinchisidan bir oz kichik, farq Δm ekanligini ko'ramiz. Bu massalarning farqi massa defekti deb ataladi.

$$\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n - M(A,Z)]$$

Bu yerda Zm_p - protonlar massasi, $(A-Z)m_n$ - neytronlar massasi, $M(A,Z)$ - yadroning massasi. Massa defekti nuklonlarning jipslashib, yadro hosil qilish natijasida ajralib chiqqan E bog'lanish energiyasining kattaligini ifodalaydi.

§ 4. Termoyadro reaksiyalari

Solishtirma bog'lanish energiyasining massa soniga bog'liqligidan ma'lumki, yengil yadrolarining qo'shilishi natijasida yuz beradigan sintez reaksiya ekzotermik bo'lib, bu reaksiyalardan bitta nuklonga to'g'ri keluvchi ajralgan energiya og'ir yadrolarning bo'linishida ajralgan energiyadan ancha katta bo'ladi. Yengil yadrolarning q'o'shilib sintez reaksiyasini amalga oshirishi uchun musbat zaryadli ikki atom yadrosini bir-biriga yaqinlashtirish, ular orasidagi kulon itarilish kuchini yengish lozim. Zaryadlari Z_1e va $+Z_2e$ bo'lgan ikki yadro orasidagi kulon to'sig'i balandligi

$$U_{kul} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_{12}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0 A^{1/3}} = 1,2 \frac{Z_1 Z_2}{A^{1/3}} \text{ MeV} \quad (2)$$

ga teng bo'ladi. $R_{12}=R_1+R_2$ - yadrolar orasidagi masofa, R_1, R_2 – birinchi va ikkinchi yadro radiusi.

Kulon potensial to'sig'ini yengishga yetarli energiyaga ega bo'lishi zarur.

Shunday qilib, kinetik energiyasi yetarli darajada katta bo'lgan yadrolargina sintez reaksiyasini hosil qila oladi. Bunday yadrolarni (reagentlarni) juda yuqori temperaturagacha qizdirish hisobiga olish mumkin. Agar kerakli temperatura sintez reaksiyasi jarayonida hosil bo'ladigan bo'lsa, u holda reaksiya o'z-o'zini ta'minlaydigan bo'ladi. Umuman olganda, kuchli qizdirish hozircha ma'lum bo'lgan yagona uslubdir. Shuning uchun bu usul bilan hosil qilinadigan sintez reaksiyalarini termoyadro reaksiyalari deb ataladi.

Zarraning kinetik energiyasi bilan harorat orasida quyidagicha bog'lanish mavjud:

$$T(\text{grad}) = 1,16 \cdot 10^4 E(\text{eV}) \quad (3)$$

Masalan, ikki proton Kulon to'sig'i (3) ga asosan 1 MeV ga to'g'ri kelsa, termoyadro reaksiyasi yuz berishi uchun $T=1,16 \cdot 10^{10} \text{K}$ temperaturagacha qizdirish lozim. U Quyosh markazidagi haroratdan taxminan 100 marta katta.

Termoyadroviy sintezni issiqlik uslubi bilan hosil qilish mumkin emasdek ko'rinadi. Lekin quyidagi ikkita muhim omilni hisobga olsak: birinchidan zarralarning

energiya bo'yicha taqsimoti Maksvell qonuniga bo'ysinadi, ya'ni berilgan temperaturada yadrolarning ma'lum qismi o'rtacha energiyadan kattaroq energiyaga ega bo'ladi, ikkinchidan, Kulon potensial to'sig'idan energiyasi kichik $E < U_{kul}$ bo'lgan yadrolar ham tunnel effekti hisobiga kulon bareridan o'tib reaksiyaga kirishishi mumkin. Shuning uchun tabiatda termoyadro reaksiyalari intensiv yuz beradi va Quyosh hamda boshqa yulduzlarning energiya manbai bo'ladi.

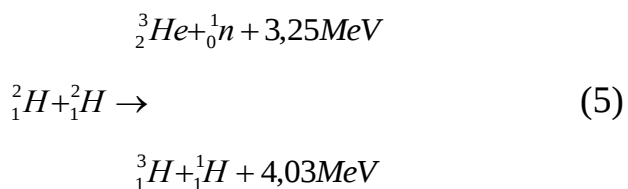
Sintez reaksiyasini reaksiyada qatnashadigan yadrolarni tezlatgichlar o'ramida tezlashtirib keyin o'zaro to'qnashtirish yo'li bilan amalga oshirish kutilgan natijalarni bermadi. Bunda tezlatish uchun sarf bo'lgan energiya sintez natijasida ajralib chiqadigan energiyadan katta, undan tashqari, sintez reaksiyalarining kesimi ionizatsiya kesimidan 8-9 tartibga kichik. Shuning uchun tezlatilgan yengil yadrolarning eng ko'p qismi, sintez reaksiyasiga emas balki, nishon atomlarini uyg'otish va ionizatsiyaga sarflaydi.

Demak, hozircha termoyadro reaksiyasini olish uchun deyteriy-tritii reaksiyasidan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi.



bu reaksiya Kulon to'sig'i kichik, past energiyada katta kesimga ega. Bu reaksiyaning har bir nuklonga to'g'ri keluvchi energiya chiqarishi $q = \frac{Q}{A} = \frac{17,6}{5} \approx 3,5MeV$. Og'ir yadrolarning bo'linishidagi $q \sim 1MeV$.

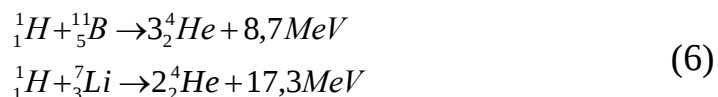
Kelajakda deyteriy-deyteriy reaksiyasi asosida sintez reaksiyasini hosil qilish mo'ljallangan:



(15.3) reaksiyadan bu (15.4) reaksiyaning ko'rsatkichlari bir muncha past, lekin (15.4) reaksiya ustunligi shundaki, ularda faqat deytronlar ishtirok etadi.

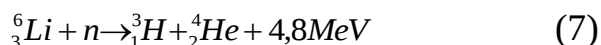
Deyteriyning Yerdagi manbai tuganmas, chunki u okean suvidagi hamma vodorodning 0,015% ni tashkil qiladi. 250 g suvdagi deyteriy 1 kg ko'mir yongandagi issiqlikni beradi. Okeanlardagi suv taxminan $1,45 \cdot 10^{24}$ kg bu esa $6 \cdot 10^{18}$ kg ko'mirga ekvivalent, bu esa Yer massasi ($6 \cdot 10^{21}$ kg) ning 10^{-3} qismiga teng.

Termoyadro bo'linish reaksiyalaridan ham foydalanish mumkin.



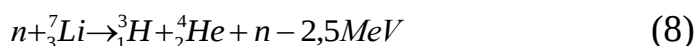
Termoyadroviy reaksiyalardan so'ng radiaktiv chiqindilar va neytronlar oqimidan iborat bo'lgan nurlanish hosil bo'lmaydi.

Yuqorida sintez reaksiyasi (3) tretiy 3_1H va deyteriy 2_1H lar bilan bo'lishligi maqsadga muvofiqligini ta'kidladik. Tretiy 3_1H radioaktiv yarim yemirilish davri $T_{1/2}=12,3$ yil tabiiy holatda uchramaydi. Sun'iy ravishda reaktorda vujudga keluvchi n-lar bilan 6_3Li -ni nurlantirish bilan hosil qilinadi.



Sintez reaksiyasi jarayonida 3_1H ni hosil qilishlik uchun (3) deytron -tretiy reaksiyasida vujudga kelgan n-lardan foydalanishlik lozim. Buning uchun (7) reaksiyaga ko'ra reaktor devorlarini litiy bilan o'rab qo'yishlik lozim.

Bu qoplamaga litiy blanketi deyiladi. Shunday qilib, (d,t) reaksiyasida vujudga kelgan n-reaktor devorlaridagi litiy Li bilan reaksiyaga kirishib, bevosita reaktorda tretiy H hosil qilishadi. Li o'rniga asosiy Li izotopi olinsa (tabiiy holda litiyning Li-7,52 %, Li-92,18% tashkil etadi), endotermik reaksiya



kuzatiladi.

Bu reaksiya energiya jihatidan noqulay bo'lsada, neytronlarni yo'qotmasdan tritiyni hosil qilish mumkin. Tabiatda litiy zahirasi istalgancha yetarli, shuning uchun aytish mumkinki, (d,t) reaksiyalari bo'lishligi faqatgina deyteriy miqdoriga bog'liq.

§ 5. Termoyadroviy reaksiya hosil bo'lish shartlari

Barqaror termoyadro reaksiyalari mavjud bo'lishi uchun plazma temperaturasi T , konsentratsiyalari bir xil $n/2$ bo'lgan deyteriy va tritiy aralashmasidan ishchi hajmda τ –vaqtni ushlab turishi lozim, albatta termoyadro reaksiyalari ro'y berayotganda ajralib chiqadigan energiya miqdori yonilg'i aralashmasini qizdirish va boshqa isrofgarchiliklarga sarf bo'layotgan energiya miqdoridan ortiq bo'lishi, buning uchun plazmaning zichligi ham yuqori bo'lishi lozim.

Hajm birligida sintez jarayonlar soni

$$N = \alpha(T) n_D n_T \tau \quad (9)$$

Bu yerda n_D , n_T –deyteriy va tritiy konsentratsiyasi, τ –plazmani issiq holda ushlab turish vaqti, $\alpha(T)$ –harorat funktsiyasi bo'lib, plazmada issiqlik almashinish va reaksiya kesimining energiyaga bog'liqligini ifodalaydi.

Bir sintez aktida Q energiya ajralsa, τ –vaqt ichida hajm birligidagi QN energiya ajraladi. Bu issiqlik energiyadan olinadigan elektr energiya:

$$W_{el} = \eta QN = \eta Q \alpha(T) n_D n_T \tau \quad (10)$$

bunda η - foydali ish ko'effitsienti bo'lib, bir energiyani (issiqlik) ikkinchi (elektr) xil energiyaga aylantirish ko'effitsienti deb ham ataladi.

Plazmani qizdirganda quyidagi energiya sarflanadi:

$$W_{issiq} = 2 \frac{3}{2} k(T) (n_D + n_T) \quad (11)$$

Bu formuladagi 2 ko'effitsient plazmadagi ionlar va elektronlar mavjudligini hisobga oladi.

Termoyadro reaksiya ekzotermik bo'lishi uchun ajralgan energiya katta bo'lishi, yani $W_{el} > W_{is}$ bo'lishligi lozim, bu esa τ –ga bog'liq. (10) va (11) formulalardan

$$\tau > \frac{3kT(n_D + n_T)}{\alpha(T)\eta Q n_D n_T} \quad (12)$$

Bu yerda $n=n_D+n_T$, plazma to'la konsentratsiyasi $n_D = n/2$ da reaksiya minimal bo'lishini e'tiborga olib (12) ifodadan yoza olamiz.

$$\tau \succ \frac{3kTn}{\alpha(T)\eta Q \frac{n}{2} \left(n - \frac{n}{2} \right)} = \frac{12kT}{\alpha(T)\eta Q n} \quad (13)$$

Bundan

$$\tau \succ \frac{12kT}{\alpha(T)\eta Q} = f(T) \quad (14)$$

Kichik haroratlar sohasida T ning ortishi bilan $f(T)$ funktsiya kamayadi, chunki reaksiya kesimi ortadi. Yuqori haroratlarda $f(T)$ aksincha, T ning ortishi bilan ortadi (9.1-rasm). Shuning uchun haroratning ma'lum $T=T_0$ qiymatida $f(T)$ funktsiya minimumga ega bo'ladi. Bu harorat boshqariluvchi termoyadroviy sintez uchun eng qulay haroratdir.

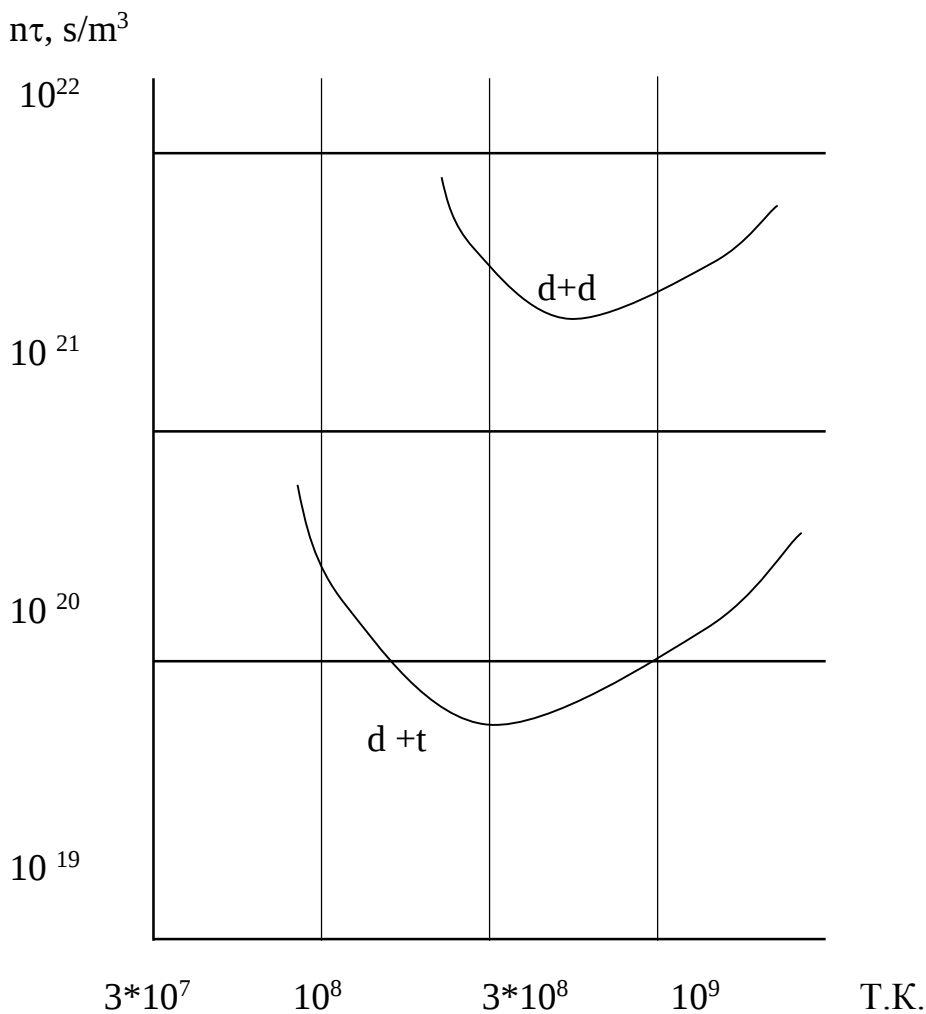
(3) reaksiya uchun $\eta=1/3$, $Q=17,6$ MeV qiymati olinsa, $T_0=2 \cdot 10^8$ K to'g'ri keladi, $f(T)$ uchun 10^{20} s/m³ kelib chiqadi. Shunday qilib, deyteriy–tritii reaksiyasining hosil bo'lish sharti

$$n\tau \geq 10^{20} \text{s/m}^3; \quad T_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ K (17 keV)} \quad (15)$$

(14) va (15) shartlar **Louson kriteriyasi** deb ataladi. Deyteriy-deyteriy reaksiyasi uchun Louson kriteriyasi.

$$n\tau = 10^{22} \text{s/m}^3; \quad T_0 = 10^9 \text{ K } (\approx 100 \text{ KeV}) \quad (16)$$

Ko'rinib turibdiki, boshqariladigan termoyadroviy sintez uchun deyteriy-tritey reaksiyasidan foydalanish ancha qulay.



1-rasm. Deyteriy tritiy, deyteriy-deyteriy reaksiyalari uchun plazmani ushlash parametrining temperaturasi bog'liqligi.

Umuman, boshqariladigan termoyadro jarayonida ko'p miqdorda energiya ajralib chiqishining (100Vt/sm^3) talab qilinishi hamda zichligi $10^{14}=10^{16}$ zarra sm^3 bo'lgan plazmani yuqori temperaturagacha (10^8 - 10^9 grad) qizdirish lozim bo'lishidan tashqari, uni uzoq vaqt davomida termoyadro reaktori kamerasining ichki devorlaridan yetarlicha masofada ushlab turish talab qilinadi.

Plazmani idish devorlaridan uzoq masofada ushlab turish uchun magnit maydonidan foydalanish mumkin. Ma'lumki, gaz orqali elektr toki o'tganda (razryad), bu tok atrofida hosil bo'lgan magnit maydon gazni ingichka shnur ko'rinishini olishga undaydi. Zaryadlangan zarralarning shu zarralar hosil etgan bunday ingichka shnur shakliga tortilishi **pinch-effekti** deyiladi.

Shnur markazidan r -masofadagi magnit maydon kuchlanganligi

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (17)$$

formula bilan ifodalanadi.

Bunda I - r -radiusli shnur ichidagi tok kuchidir. Shnur o'qiga parallel ravishda harakatlanayotgan ionga bu maydon tomonidan, shu maydonga urinma bo'lgan aylana bo'lgan aylana markazi tomonga yo'nalgan kuch ta'sir etadi.

$$F = \frac{\mu H^2}{2\pi r} = \frac{\mu I^2}{8\pi^3 r^2} \quad (18)$$

Plazmani qisilishga undaydigan F kuch $P=(n_{ion}+n_{el})kT$ gaz kinetik bosim kuchiga qarshilik qiladi.

Magnit maydonning ma'lum bir H_0 qiymatida va plazma shnur radiusining r_0 - qiymatlarida $F=P$ bo'ladi. Tok kuchi bir necha amperga teng bo'lganda, magnit maydonining bosimi shunchalik katta bo'ladiki, razryad shu razryad hosil qilingan idish devorlaridan ajraladi va plazma idish devorlaridan izolyatsiyalanadi, magnit maydon ta'sirida plazma adiabatik siqilganda $TV^{2/3}=\text{const}$, $PV^{5/2}=\text{const}$ qonunlarga asosan uning temperaturasi va bosimi yanada ko'tariladi. Yuq'orida aytilganlardan faqat plazmani silindr uchki tomonlari izolyatsiyalanmay qoladi. Bu muammo kamerani halqasimon qilib tayyorlash yo'li bilan bartaraf etilishi mumkin. Lekin plazma tabiatda gaz emas, balki ko'proq suyuqlikka o'xshashligi uchun plazmani uzoq ushlash imkoniyatini bermaydi.

Toroidal kameraning ichki halqa markaziga yaqin tomonidagi magnit maydoni tashqi (markazning uzoq) tomonidagi magnit maydonidan katta bo'lganligidan, bu hol butun plazmani tashqi devor tomon surilishga va tashqi devorga urilib «halok» bo'lishiga olib keladi. Plazmaning bu «surib chiqarilish» effektini bartaraf qilish uchun L.Spittser kamerani sakkiz raqami ko'rinishida tayyorlashni taklif etdi.

Bunday kamerada yarim aylanishdan so'ng biror tomonga surilib qolgan plazma ikkinchi yarim aylanishda boshqa tomonga suriladi va kamera ichidagi devordan yetarlicha uzoqroq masofada bo'ladi. Bunday kamera **stellarator** deb ataladi.

Stellaratorlarda magnit sirt plazma hosil qiluvchi hajmdan tashqarida joylashgan o'tkazgichdan oquvchi tok yordamida hosil qilinadi. Plazma o'zidan tok o'tkazsa plazmadan oqayotgan elektr toki protsessning boshlang'ich davrida plazmani yaratadi, uni

qizdiradi, plazmani idish devorlaridan uzib termoizolyatsiyalaydi va nihoyat, plazma berk doiraviy tok rolini o'tab, uning atrofida berk magnit sirtini hosil qiladi. Bu prinsip asosida ishlovchi termoyadroviy sintez qurilmalari **tokamak** deb ataladi.

Termoyadro reaksiyasini amalga oshirishda tokamak usulidan tashqari plazmaga yetarli darajada tezlashtirilgan neytral atomlarning injeksiya qilish ham istiqbolli usullaridan hisoblanadi. Bunda atomlar plazmani ushlab turgan magnit maydonidan erkin o'tadi va qizdirilgan plazmaga kirib ionlashadi.

Boshqa usullardan intensiv lazer nurlanishi va tez elektronlarni injeksiya qilish va hokazo.

Lazer nurlari bilan nurlantirilganda hosil bo'lgan intensiv nurlanish jism sirtida katta bosim hosil qiladi. Buning hisobiga deyteriy-tritiy aralashmasi ming marta kuchliroq siqiladi va termoyadroviy reaksiyaning bo'lish intensivligi million marta ortib ketadi. Lekin bu jarayonda energiya sochilishi kattadir. Masalan, lazerda elektr energiyani yorug'lik energiyasiga aylantirish foydali ko'effitsienti atigi 1%. Lazer yorug'lik energiyasining 6-10% gina termoyadroviy yoqilg'ini qizdirishga sarf bo'ladi, qolgan qismi bug'langan modda bilan sochiladi.

Kuchli tokli impulsli elektron tezlatgichlarda olingan relyativistik elektronlar oqimidan foydalanilganda, lazer termoyadroviy qurilmalardan afzalligi shundaki, ularning foydali ish ko'effitsienti kattaroqdir. Lekin relyativistik elektronlarni fokuslash va energiyasini juda kichik hajmda konsentratsiyalash muammosi juda murakkabdir. Hozirgi vaqtda bu sohada turli uslublarda butun dunyo olimlari intensiv izlanishlar olib bormoqdalar. Bu muammoning hal bo'lishi energetikada katta o'zgarish yasaydi va Yer yuzida insoniyatning energiyaga bo'lgan ehtiyojini to'la qondiradi.

§ 6. Quyosh va yulduzlarda yuz beradigan termoyadroviy reaksiyalar.

Quyosh nurlanishini spektral tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, Quyosh xromosferasi asosan vodorod va geliydan ekanligini Quyosh moddasining zichligi esa taxminan 100 g/sm^3 ekanligi aniqlandi. Bu Quyoshdagi zarralar orasidagi masofa atom o'lchamlaridan kichik ekanligini ko'rsatadi.

Vodorod sikli uch reaksiya orqali o'tadi.

1-jadval

Reaksiya	Sikldagi reaksiyalar soni	Ajralgan energiya Q, MeV	$E_{\nu}^{\max}$ MeV neytrino energiyasi	Reaksiya o'tish vaqti τ
${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu_e$	2	2	0,4	$1,4 \cdot 10^{10}$ y
${}^1_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$	2	2	-	5,7s
${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2{}^1_1H$	1	12,85	-	10 yil
Jami: $4{}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2e^+ + 2\nu + 2\gamma$	5	24,67	0,4	$1,4 \cdot 10^{10}$ y

Demak, Quyosh va yulduzlarda modda to'la ionlashgan holatda bo'ladi, bunda elektron va yadrolardan tashkil topgan gaz, ya'ni plazma katta gravitatsiya kuchi hisobiga ularning harorati bir necha million gradusga qizigan bo'ladi. Termoyadro sintezining asosiy natijasi to'rtta protonning geliy yadrosiga aylanishidir. Bu ikki usul uglerod-azot va vodorod-vodorod sikllari bilan ro'y beradilar.

Birinchi bosqichda proton-proton bilan qo'shilib deytron hosil bo'ladi, hosil bo'lgan deytron bir vodorod yadrosi bilan tezda qo'shilib geliy-3 izotopini hosil qiladi. Yetarli darajada geliy-3 izotopini ikki geliy-3 qo'shilishi natijasida 4_2He va ikkita proton hosil bo'lishi bilan sikl tugaydi.

Vodorod sikli nisbatan kichik haroratlarda bo'lib o'tadi. Shuning uchun u asosan yulduzlar hosil bo'lishi va rivojlanishining dastlabki bosqichida energiya manbai rolini bajaradi. Yulduzlarda yetarli miqdorda geliy hosil bo'lgan yuqoriroq haroratlarda, yangi nuklonlarning qo'shilishi natijasida, og'irroq elementlar hosil bo'la boshlaydi.

Masalan, $\sim 100 \cdot 10^6$ grad haroratda uch geliy yadrosi qo'shilib uglerod-12 hosil qilishi mumkin. Bundan tashqari, uglerod-12-oraliq 8_4Be ning hosil bo'lishi bilan ham ro'y berishi mumkin. Yulduzlarda uglerod mavjud bo'lsa, $T > 15 \cdot 10^6$ graduslarda oltita reaksiyadan iborat uglerod azot sikli bo'lishi mumkin.

REAKSIYA	Q, MeV	$E_{\mathcal{M}}^{\max}$ MeV	T
${}^1_1\text{H} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$	1,95	-	$1,3 \cdot 10^7$ yil
${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu$	2,22	1,2	7 min
${}^1_1\text{H} + {}^{13}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$	7,54	-	$2,7 \cdot 10^6$ yil
${}^1_1\text{H} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$	7,35	-	$3,2 \cdot 10^8$ yil
${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu$	2,71	1,7	82 s
${}^1_1\text{H} + {}^{15}_7\text{N} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	4,96	-	$1,1 \cdot 10^5$ yil
Jami:	26,73	2,9	$3,2 \cdot 10^8$ yil
$4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu + 3\gamma$			

Sikl natijasida 26,73 MeV energiya ajraladi. Siklning vaqti $\tau = 3,2 \cdot 10^8$ yil, bu siklda ham pirovard natijada to'rt protondan ${}^4_2\text{He}$ hosil bo'ladi. Uglerod esa bu siklda katalizator rolini o'ynaydi.

Quyosh va yulduzlarda termoyadro reaksiyalarida solishtirma energiya ajralish q , Yerdagi o'lchamlar bo'yicha juda kam. Quyosh uchun $q = 10^{-4}$ JG/kg*s ga teng, ya'ni modda almashinish natijasida tirik organizmdagi solishtirma, energiya ajralishdan 400 000 marta kichik. Ammo Quyoshning massasi juda katta bo'lgani uchun u nurlatadigan to'la quvvat ham juda kattadir, u $\sim 4 \cdot 10^{26}$ Vt ga teng. Quyosh nurlanish tufayli har sekundda 4,3 mln tonnaga kamayadi, bu esa Quyosh massasining $2 \cdot 10^{-19}\%$ ni tashkil etadi.

§ 7. Tezlatgichlar

Zarra bilan yadro yoki yadro bilan yadro yadroviy kuch ta'sir radiusi (10^{-13}sm) qadar yaqinlashib o'zaro ta'sirlashishi natijasida yadroda turli o'zgarish yoki yadro zarralarining qayta taqsimlanishi mumkin. Yadroviy reaksiya deb ataladigan bunday jarayonda yadro uyg'onadi yoki yangi zarralar hosil bo'ladi.

Shunday qilib, yadroviy reaksiyani hosil qilish uchun yadrolarni katta energiyali zarralar yoki yadrolar bilan bombardimon qilish kerak. Bunday yuqori energiyali zarralar

radioaktiv yemirilishda hosil bo'ladi. Masalan, alfa-radioaktiv yadrolar yemirilishida 4-9 MeV energiyali alfa-zarralar ham uchraydi. Lekin intensivligi kam bo'lganligi uchun ulardan yadroviy reaktivlarni o'rganishda foydalanib bo'lmaydi.

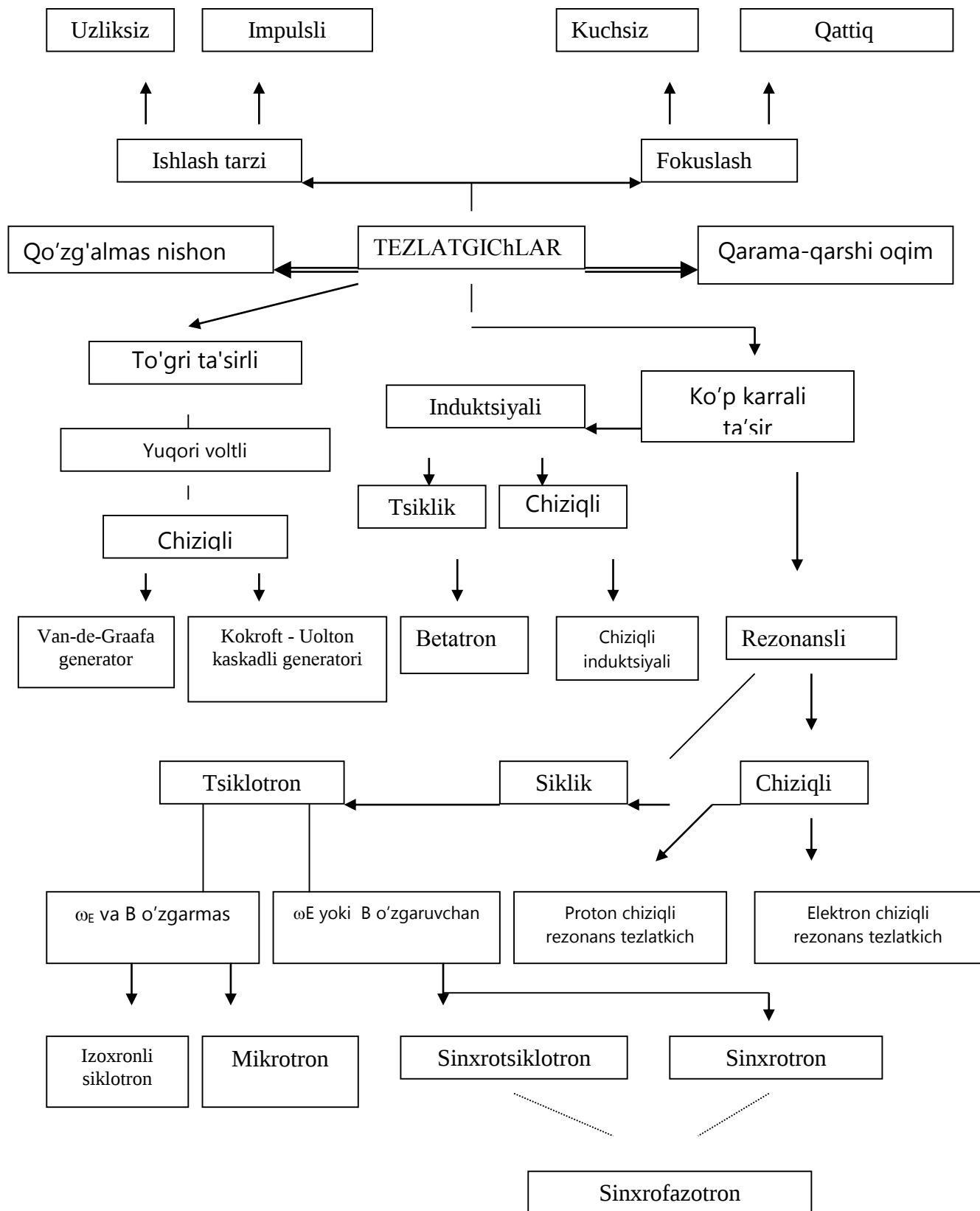
Yadro va elementar zarralar xususiyatlarini keng o'rganishlik uchun yuqori energiyagacha tezlatib beruvchi tezlatgichlar yaratilishi juda muhim hisoblanadi.

Hozirgi vaqtda yaratilgan tezlatgichlar yordamida turli xil reaksiyalar o'tkazilmoqda.

Yadro tuzilishini o'rganish, yadro reaksiyalarini amalga oshirish hamda elementar zarralar xususiyatlarini aniqlash va boshqa ko'plab muammolarni hal qilishlik uchun yuqori energiyagacha tezlashtirilgan katta oqimdagi zarralar dastasi talab etiladi.

Tezlatgichlar 1930 yillardan boshlab qurila boshlandi. Dastlabki tezlatgichlar energiyalari MeV bo'lsa, hozirgi vaqtda bir necha GeV energiyagacha yetkazildi. Zaryadli zarralarni tezlatish odatda elektr maydonda yoki elektr va magnit maydonlar birgalikda amalga oshiriladi.

Tezlatgichlar tezlashtiruvchi maydon turiga qarab zarralar oqimini fokuslashi, tezlashtirilayotgan zarralar xili, erishgan energiyalariga ko'ra turlicha nomlar bilan ataladilar.



To'g'ri ta'sirli tezlatgichlar zarra maydonidan o'tishda bir marotaba energiyasini oshirsa, ko'p karrali ta'sirli tezlatgichlarda esa shu maydondan zarra bir necha marotaba energiya orttirmasi oladilar. Yuqori voltli tezlatgichda energiya orttirmasi potentsiallar ayirmasiga to'g'ri kelsa, induktsiyali tezlatgichda magnit oqimi o'zgarishiga mos keluvchi uyurma elektr maydoni, rezonans tezlatgichlarda esa yuqori chastotali o'zgaruvchi elektr maydoni kattaliklariga mos keladi. Chiziqli tezlatgichlarda zarralar to'g'ri chiziq bo'ylab harakatlansa, siklik tezlatgichlarda aylana yoki spiralsimon harakatlanadilar.

Uzluksiz oqimli tezlatgichlar zarralar oqimi o'zgarmas bo'lishsa, impulslarida esa zarra dastasi ma'lum vaqt oralig'ida tezlashtiriladi.

Odatda tezlashtirilgan zarralar qo'zg'almas nishonga yo'naltiriladi. Qarama-qarshi oqimda tezlashtirilganda o'zaro massalar teng ma'lum impulsiga ega bo'lgan zarralar bir-birlariga qarama-qarshi yo'nalishda ta'sirlashadilar.

Barcha tezlatgichlarda zarralarni tezlatish jarayonida fokuslab turishlik lozim. Ko'ndalang radial va vertikal tekislik bo'yicha fokuslash magnit maydonining radius bo'yicha kamayib borishi bilan amalga oshiriladi. Bunda magnit maydonining pasayishi darajasi $0 < n < 1$ oralig'ida bo'ladi. Bu xil fokuslashga yumshoq (kuchsiz) fokuslash deb ataladi. Bu xil fokuslashda vakuum kamera va magnit o'lchami oshib ketadi, natijada tezlatgich narxining juda yuqori bo'lishiga olib keladi. Juda yuqori energiyali tezlatgichlarda kuchli fokuslash usuli qo'llanilmoqda, bunda zarralar oqimi turli magnit qismlaridan o'tishda har xil ishorali katta gradient maydonga keladilar. Zarralar oqimi gorizonta va vertikal yo'nalishlar bo'yicha ketma-ket fokuslanib, defokuslanadilar.

Rezonans tezlatgichlarda zarralar oqimi bo'ylama yo'nalish bo'yicha ya'ni zarralar aylanish chastotasi bilan tezlashtiruvchi elektr maydoni chastotalarining rezonansini ta'minlash elektr maydon chastotasini yoki magnit maydonni vaqt bo'yicha o'zgarishlik bilan amalga oshiriladi.

Tezlatgichlarda zarralar energiyasi va zarralar oqimi intensivligi muhim xususiyati hisoblanadi. Intensivligini oqim tok kuchi $I = qN$ bilan ifodalanadi.

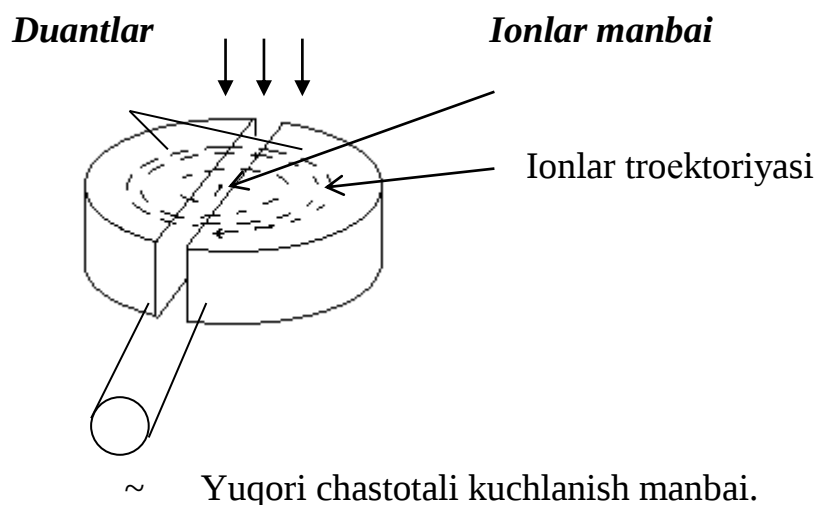
Siklik tezlatgichlarda tezlashtiriladigan zarralar tezlashtiruvchi maydonga takror-takror kiritilib, energiyasini oshirib boradi.

Birinchi tezlatgichlardan siklotron 1930 yili Lorens (1901-1958) tomonidan qurildi. Siklotron (sxemasi 7.5-rasmda keltirilgan) ikkita A, B duant, ionlar manbai, tezlashtiruvchi yuqori chastotali elektr kuchlanish manbai, magnit maydonlaridan iborat. Duant magnit qutblari orasiga joylashtirilgan. Elektr maydoni duantlar uchlariga beriladi. Ion (zaryadli zarralar) ion manбайдan chiqishi bilan duantning manfiy qutbiga tortilib, energiyasini oshiradi, bu ion magnit maydon ta'sirida duant ichkarisida yarim aylana shaklida aylanadi, yarim davr $T/2$ oralig'ida qarama-qarshi duant chegarasiga keladi, bu paytda duant ishorasini o'zgartiradi yana energiyasini oshiradi va h.k. Shunday qilib, siklotronda ion (zarra) rezonans energiyasini orttirib borishligi uchun elektr maydon chastotasi ion (zarra)ning duant ichida aylanish chastotasiga mos kelishligi talab etiladi. Siklotronda elektr maydoni ion(zarra)ga tezlanish beradi

$$F_E = eZE \cdot 10^7 \text{ dina} \quad (17)$$

Bunda eZ -ion zaryadi, E -elektr maydon kuchlanganligi, magnit maydoni esa ion (zarra)larni egadi (buradi).

$$F_H = 0,1eZ \, g H \quad (18)$$



2- rasm

Bunda ϑ -zarra tezligi, H-magnit maydon kuchlanganligi.

Ma'lumki, egri chiziqli harakatda markazdan qochma kuch vujudga keladi

$$F_{mq} = \frac{m\vartheta^2}{R} \quad (19)$$

(12) va (13) kuchlar o'zaro teng bo'lishi kerak.

$$0,1eZH = \frac{m\vartheta^2}{R} \quad \text{bundan} \quad 0,1eZH = \frac{m\vartheta}{R} \quad (20)$$

$$\frac{\vartheta}{R} = w \text{ ekanligini e'tiborga olib } w = \frac{0,1eZH}{m} \quad (21)$$

(15) w -zarraning duantda aylanish chastotasi w_3 ni ifodalaydi. Siklotronda ion $T/2$ davr ichida energiyani oshirib spiralsimon harakat qiladi. Rezonans ravishda energiyani oshirib borishligi uchun zarra aylanish chastotasi w_3 har doim tezlashtiruvchi generator chastotasi w_3 ga teng bo'lishi kerak. Tezlashtiruvchi elektr maydon kuchlanishi 100 kV lar bo'ladi.

Siklotronda zarra maksimum energiyasi tezlatuvchi maydon kattaligiga bog'liq bo'lmasdan, magnit maydon kuchlanganligi N va radius R ga bog'liq.

Haqiqatdan ham $\vartheta = wR$, kinetik energiya

$$E = \frac{1}{2}mw^2R^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(eHR)^2}{mc^2} \quad (21)$$

Agar $H=15$ kGs, $R=0,4$ m bo'lsa, proton tezlashtirilsa ($m_p c^2=938$ MeV), siklotronda proton maksimum kinetik energiyasi

$$E = \frac{(4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 40)^2}{2 \cdot 938 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \text{ eng} = 17 \cdot 10^6 \text{ eV} = 17 \text{ MeV}$$

Siklotronda zarralar energiyasini cheksiz oshirib borish mumkin emas, chunki zarra energiyasi oshishi bilan massasi relyativistik oshib, zarraning aylanish chastotasi w_3 kamayishiga olib keladi, natijada tezlashtiruvchi maydon chastotasi w_g orasidagi moslikni buzilishiga rezonans yo'qolishiga olib keladi.

Bundan (15) ifodadan ko'rinadiki, siklotron yengil zarralarni (elektron) tezlashtirishga yaroqsiz, chunki yengil zarra tezda massasini relyativistik oshiradi. Siklotron proton, alfa-zarra, og'ir ionlarni tezlashtirishga hosdir.

Sinxrotsiklotron – siklotronning modifikatsiya qilingan varianti. Bunda siklotrondan farqli ravishda tezlashtiruvchi elektr maydon chastotasi zarra aylanish chastotasining kamayishiga mos ravishda kamayib boradi.

Tezlatish jarayonida zarralar barqaror oqimini avtomatik ravishda hosil qilish avtofazirovka printsiptini 1944-1945 yillari V.I.Veksler (1907-1966), Mak-Millan (1907 y.t.) lar ishlab chiqishdilar.

Zarra aylanish chastotasi kamayishi avval bayon qilinganidek massasining relyativistik oshishi va magnit maydonining birmuncha kamayishi sababidan sinxrotsiklotron impuls tarzida ishlaydi, zarralar oqimi intensivligi siklotrondagidan birmuncha kichik, bu tezlatgich ham og'ir zaryadli zarralar proton, deytion, alfa, ionlarni 1 GeV energiyagacha tezlashtiradi.

Sinxrotsiklotronda zarra tezlashtiruvchi kamera markazidan chetlarigacha spiralsimon aylanib boraveradi. Energiyasi oshishi bilan kamera o'lchami ham oshib boradi, kameraning to'la hajmi magnit qutblari orasida turishi kerak, bu esa ko'p tonnalab temir elementini bo'lishligini talab etadi, qurilmaning tannarxining keskin oshib ketishiga olib keladi.

Sinxrotsiklotronda zarra maksimum energiyasi $W \sim 1$ GeV dan oshmaydi, chunki tezlashtiruvchi elektr maydoni chastotasining keskin kamayishi imkon bermaydi. Bundan tashqari zarra orbitasi oshib borishi bilan magnit maydoni kamayishi juda katta radiusni tashkil etadi. Masalan: sinxrotsiklotronda zarra energiyasi $W \sim 10$ GeV bo'lsa, magnit maydoni H kamayishi 20%, dastlabki $H_0 = 18\,000$ erst dan $H = 14\,500$ erst gacha kamayadi, radiusi $R = 25$ m bo'lib, magnit massasi $\sim 1,5 \cdot 10^6$ t bo'ladi. Shuning uchun energiyasini oshirishning boshqa bir usuli sinxrofazotronda zarrani o'zgarmas radiusda tezlatishdir.

Sinxrofazotronda zarrani o'zgarmas radiusda tezlatish uchun

$$R = \frac{\sqrt{W(W + 2E_0)}}{300ZH} = \text{const} \quad \text{bo'lishi kerak, ya'ni energiya oshishi bilan magnit maydoni}$$

kuchlanganligi H ham oshib borishi lozim.

Sinxrofazotronda zarra aylana halqada va to'g'ri chiziqli harakatda qatnashadi, tezlashtiruvchi rezonator halqa va to'g'ri chiziqli bo'laklar orasiga joylashgan.

Tezlashtirilayotgan zarralar o'zgarmas orbitada harakatlanishi uchun orbitaga yetarli darajada tezlashtirilib injeksiya (purkash) qilinadi. Sinxrofazotron maksimum energiyasi injeksiya energiyasiga bog'liq.

$$\frac{W_i(W_i + 2E_0)}{H_i^2} = \frac{W(W + 2E_0)}{H^2} \quad (22)$$

Bu yerda W_i –injeksiya energiyasi, W -sinxrofazotron maksimum energiyasi, H -lar mos ravishda magnit maydon kuchlanganligi.

$W_i \ll W$ ekanligini e'tiborga olib (17) ifodadan

$$W_i = \frac{W(W + 2E_0)}{2E_0} \frac{H_i^2}{H^2} \quad (23)$$

kelib chiqadi.

Injektsiya energiyasi qancha oshsa, sinxrofazotron energiyasi kvadratik marotaba oshib boradi.

§ 8. Detektorlar

Zarralarni qayd qilishlik detektorlar yordamida amalga oshiriladi.

Detektorlarni ikkita toifaga – hisoblagichlar va zarralar izlarini hosil qiluvchilarga ajratish mumkin. Zarralar hisoblagichlarda elektr impulsi hosil qilishga, bu bilan zarralar oqimini, massa, zaryad, tezlik va energiyalarni va h.k. aniqlash mumkin.

Izli detektorlarda zarra izini, harakat yo'nalishini boshqa zarra, yadrolar bilan to'qnashuv jarayonlarini, yemirilish va boshqa ko'plab ta'sirlashuv xususiyatlarini aniqlash mumkin. Zaryadsiz zarralar muhit bilan ta'sirlashganda ionizatsiya hosil qilishmaydilar, bu zarralarni ta'sirlashuvida hosil bo'luvchi ikkilamchi zaryadli zarralarga ko'ra qayd qilinadi.

Hisoblagich detektorlarga – ionizatsiyali kamera, proporsional, Geyger-Myuller, stsintillyatsiyali, Cherenkov hamda yarimo'tkazgichli hisoblagichlar, izli detektorlarga –

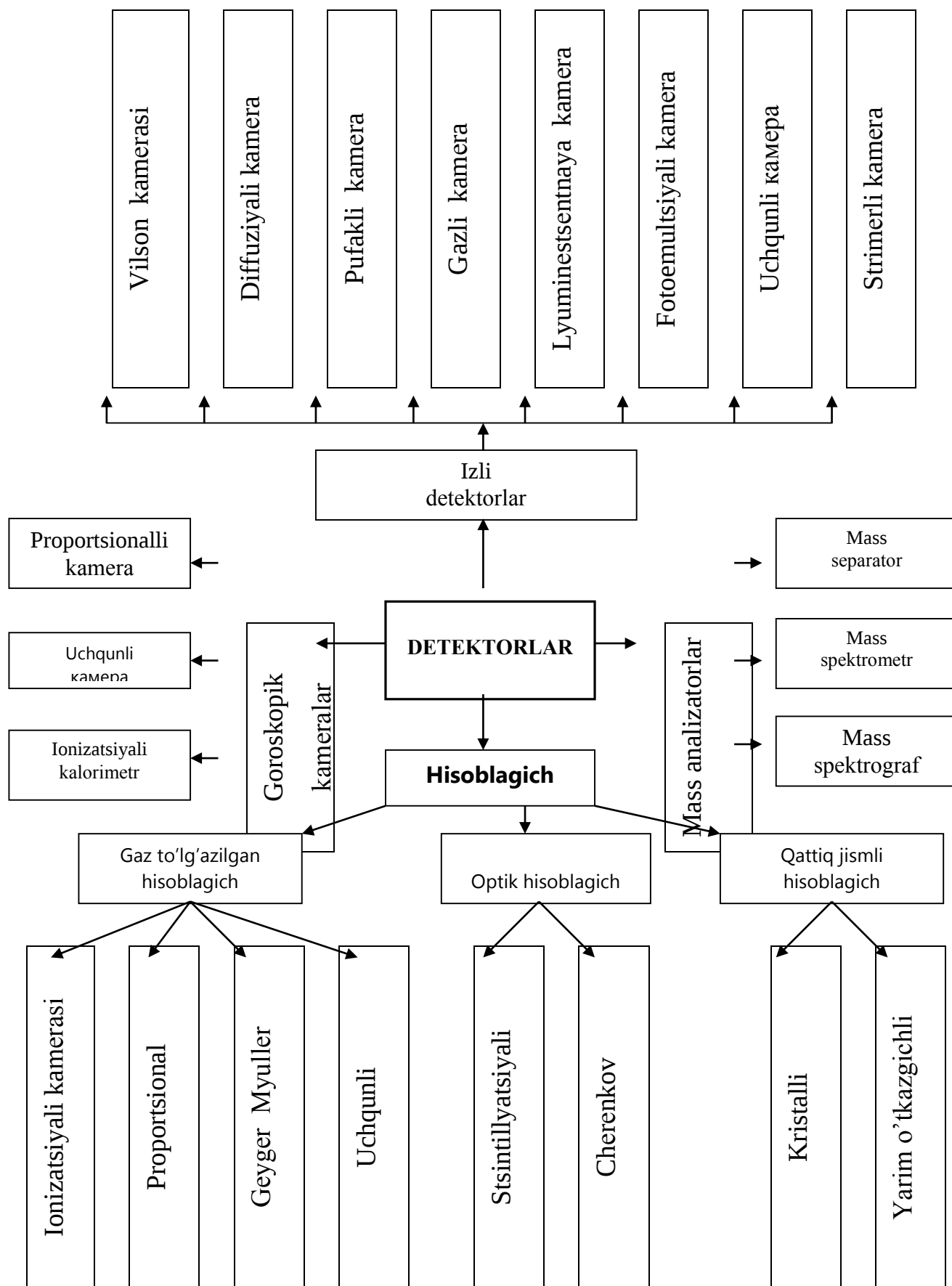
Vilson, pufakli kameralar, qalin qatlamli fotoemulsiya, keng oraliqli uchqunli kamera va strimerli kameralar kiradilar.

Hisoblagich detektorlarning asosiy xususiyatlari:

1. Effektivligi – hisoblagichda qayd qilingan zarralar sonining hisoblagichga kelib tushgan zarralar soniga nisbati foiz hisobida $\varepsilon = \frac{N_k}{N_T} = 100\%$, bu yerda ε -effektivlik, N_k - hisoblagich qayd qilgan zarralar soni, N_T -hisoblagichga kelib tushgan zarralar soni.

2. Vaqt bo'yicha ajrata olish qobiliyati – bu shunday vaqt oralig'iki, bu vaqtda detektorga kelib tushgan zarralarni alohida-alohida ajrata olish uchun kerak bo'lgan minimum vaqtdir.

3. Energiya ajrata olish qobiliyati.



Izli detektorlar xususiyatlari:

1. Effektiv hajm – effektiv hajm oshsa zarra izlari va yemirilish jarayonlari izlari to'la joylashadi. Kameradan chiqib ketishmaydi.
2. Vaqt birligida ishchi sikl soni. Detektor qancha tez ishchi holatiga qaytsa shuncha yaxshi.
3. Sezgirligi. Eng kichik ionlashtirishlarni seza olishi.
4. Boshqarilishi.
5. Tajriba natijalarini yengil va tezda qayta ishlash. Masalan, fotografik usullarda izlarni olish va qayta ishlash uzoq muddatli qiyin ishlardir.
6. Iqtisodiy ko'rsatkichi. Ayrim kameralar narxi juda qimmatligi uchun jahondagi bir nechagina laboratoriyalar mavjud.

Hozirgi vaqtda ko'plab detektorlar mavjud, muhim turlari 7.2-jadvalda keltirilgan.

XULOSA

Ushbu uslubiy tavsiyanoma yadro fizikasining asosiy elementlari to'g'risidagi asosiy tushuncha va qonuniyatlarni yoritib berishga bag'irlangan. Ushbu uslubiy tavsiyanoma oliy o'quv yurti "Fizika" ta'lim yo'nalishi talabalarining "Atom va yadro fizikasi" bo'limi bo'yicha o'z ustida mustaqil ishlash, adabiyotlardan foydalana bilish va shu asosda etarli bilimga ega bo'lish uchun asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR

1. A.A.Detlaf, B.M.Yavorskiy. Kurs fiziki. M.: Visshaya shkola", 2000, gl. 46.
2. A.I.Naumov. Fizika atomnogo yadra i elementarnix chastits. M.: Prosveùeniya 1984, gl. VIII.
3. Fundamentalnaya struktura materii. M.: "Mir", 1984. 173-204.
4. I.V.Savelev. Kurs obshey fiziki, kniga 5. Kvantovaya optika, atomnaya fizika, fizika tverdogo tela, fizika atomnogo yadra i elementarnix chastits. 1998.
5. O.Axmadjonov. Fizika kursi. IIIq. T.1989,
6. R.Bekjonov. Yadro fizikasi. T. "O'qituvchi", 1975. IX bob, 213-260 b.

Terishga berildi 21.03.15 yil.
Bosishga ruhsat etildi 18.03.15 yil.
Qog'oz bichimi 30X42, 4,85 bosma toboq.
Adadi 10 nusxa. Buyurtma №
Bahosi shartnoma asosida.

Ushbu o'quv uslubiy tavsiyanoma bo'yicha tavsiyanoma Jizzax Davlat Pedagogika Instituti ilmiy-uslubiy Kengashi tomonidan ("29" yanvar 2015 yil) pedagogika institutlarining fizika va fizika-matematika fakultetlari talabalari uchun o'quv-uslubiy tavsiyanoma sifatida chop qilishga ruxsat etilgan.

Bosmaxona manzili: Jizzax Davlat pedagogika institut kichik bosmaxonasi.
Jizzax shahar, Sharof Rashidov shoh ko'chasi.