

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM
VAZIRLIGI ALISHER NAVOIY NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI**

**FIZIKA FAKULTETI
“5140200 – FIZIKA” TA'LIM YO'NALISHI
“Umumiy fizika va magnetizm” kafedrası**

ARZIQULOV FARRUX

**“DISPROZIY-(TEMIR, KOBALT)-SISTEMALARIDA AMAL
QILUVCHI ALMASHINUV O'ZARO TA'SIRNI YARIM EMPIRIK USUL
BILAN O'RGANISH”**

**“5140200 – Fizika” ta'lim yo'nalishi bo'yicha bakalavr
darajasini olish uchun**

BITIRUV MALAKAVIY ISHI

Ilmiy rahbar: dots. Shakarov X. O.

Bitiruv malakaviyish “Umumiy fizika va magnetizm” kafedrasida bajarildi.
Ish kafedraning 2016 yil _____ iyundagi majlisida muhokama qilindi va
himoyaga tavsiya etildi (_____-bayonnoma).

Kafedra mudiri: _____ dots. Rajabov R. M.

Bitiruv malakaviy ish YaDAK ning 2016 yil “____” _____dagi
majlisida himoya qilindi va _____ball bilan baholandi (_____-bayonnoma).

YaDAK raisi: _____

A'zolari: _____

Samarqand - 2016

Mundarija

KIRISH.....	3
I.BOB. KAMYOB YeR METALLARI(KYeM), TEMIR GURUHI METALLARI(TGM) VA ULARNING BIRIKMALARINING ELEKTRON TUZILISHI VA MAGNIT XOSSALARIGA OID TADQIQOTLARNING HOLATI.....	7
1.1.KYeMva TGMning elektron tuzilishi.....	7
1.2. KYeMva TGM uchun paramagnetizmning Van-flek nazariyasi.....	13
1.3.KYeM va TGM uchunbilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi.....	19
1.4.Toza Dy,Fe,Co va Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi birikmalarining magnit xossalarni yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari.....	23
I-bobga doir xulosalar.....	28
II.BOB. DISPROZIY-(TEMIR, COBALT)SISTEMALARIDAAMAL QILADIGAN BILVOSITA ALMASHINUV O'ZARO TA'SIRNI YARIM EMPIRIK USULDA O'RGANISH NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI.....	29
2.1. Bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik o'rganish usuli.....	29
2.2.Toza KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganish.....	32
2.3. Dy-(Fe,Co) sistemalarida amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usilda o'rganish.....	35
II-bobga doir xulosalar.....	40
XULOSALAR.....	41
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	42

KIRISH

Mavzuning asoslanishi va dolzarbligi. Bugungi kunda kamyob Yer metallari(KYeM), temir guruhi metallari (TGM) va ular orasida hosil bo'ladigan birikmalarning fizik xossalarini shu jumladan magnit xossalarini o'rganishga bo'lgan qiziqish ularning elektron tuzilishining o'ziga xosligi va amalda keng qo'llanilishi bilan bevosita bog'liqdir. Bu materiallarda kechikib to'ladigan 4f va 3d – elektron qobiqlarning mavjud bo'lishi, ularning kinetik, optik, magnit va boshqa fizikaviy, kimyoviy xossalarining o'ziga xosligini aniqlaydi. Ulardan doimiy magnitlar, transformator va drossellarning o'zaklari tayyorlashda, axborotlarni yozishda va qayta eshittirish texnikasining xotirlash qismlari sifatida hamda boshqa o'ziga xos magnit xossalari yangi magnit metallari yaratishda keng qo'llaniladi. Bu materiallarning fizik xossalarini o'rganish ilmiy jihatdan ham ahamiyatlidir. Chunki, bu materiallardagi almashinuv o'zaro ta'sir tabiati hali to'la aniqlanmagan. Ularning o'ziga xos magnit xossalarini 4f va 3d- elektronlar bilan bog'lab tushuntiradigan yangi nazariy modellar yaratildi [1 - 4] va yaratilishi zarur.

Ilmiy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan bu masalani hal etish uchun ularning elektron, kristall va magnit tuzilishi haqida to'la ma'lumotga ega bo'lish kerak bo'ladi. Hozirgi kunda mavjud bo'lgan bunday ma'lumotlar yetarli emas. Ayniqsa, TGM va KYeM orasidagi birikmalarning magnit xossalari haqidagi ma'lumotlar ularning magnit tartiblangan holati uchun yetarli darajada bo'la turib, magnit tartibsiz-paramagnit holati uchun, ya'ni qattiq va suyuq holatlarini qamraydigan yuqori temperaturalardagi ma'lumotlar adabiyotlarda bugungi kunda kam uchraydi. Bu yuqori temperaturalarda magnit o'lchashlar tajribasini o'tkazishning qiyinchiliklari va olingan natijalarni talqin qiladigan tugal nazariyaning hali yo'qligi bilan bog'liqdir.

Ma'lumki, kechikib to'ladigan elektron qobiqli (3d-, 4f-, va h.z.) materiallarning magnit xossalari (magnit qabul qiluvchanligi) shu qobiqning elektronlar bilan to'lish xususiyatlarini va bu elektronlarning kristall panjara tugunlarida o'troqlashish (lokallashish) darajasini bevosita o'zida aks ettiradi.

Bundan tashqari, magnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'lanishini [χ (T)] o'lchash natijalaridan foydalanib asosiy magnit xarakteristika-paramagnit Kyuriy(θ_p) aniqlash mumkin. θ_p ning qiymatidan foydalanib esa, almashinuv o'zaro ta'sir(magnit tartiblanishni hosil qiluvchi) haqida tegishli ma'lumotlarni olish mumkin.

Tadqiqotning maqsadi –Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi namunalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini ularning paramagnit kyuri temperaturasiining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib hisoblash.

Tadqiqotning vazifalari - qo'yilgan maqsadni amalga oshirish uchun quyidagi vazifalarni bajarish zarur deb hisoblandi.

1. KYeMning elektron tuzilishi, KYeM paramagnetizmi uchun Van-Flek va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalarini o'rganish;
2. Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi namunalarning magnit qabul qiluvchanligini temperaturaga tajribaviy bog'lanishlarini o'rganish va ulardan foydalanib shu namunalar paramagnit Kyuri temperaturasiining tajribaviy qiymatlarini aniqlash;
3. Bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblashning yarim empirik usulini o'rganish;
4. Toza og'ir KYeM va Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi intermetallik birikmalarda amal qiluvchi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlarini yarim empirik usulda hisoblash;
5. Ishda olingan natijalarni chuqur tahlil qilib tegishli xulosalar chiqarish.

Tadqiqotning obyekti- Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi toza metallar va intermetallik birikmalar.

Tadqiqotning predmeti-Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini paramagnit kyuri temperaturasiining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib hisoblash.

Tadqiqot usuli – Bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik o'rganish usuli.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi: Ushbu bitiruv malakaviy ishida Dy-(Fe,Co) binary

sistemalaridagi intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'siri yarim empirik usul bilan birinchi marta o'rganilgan.

Tadqiqotning nazariy va amaliy ahamiyati: Ushbu ishda olingan natijalar KYeMning TGM bilan hosil qiladigan birikmalarida amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasini yuqori temperaturalarda takomillashtirishga va ulardan yangi magnit materiallari yaratishga xizmat qiladi.

Himoya qilinadi: 1. KYeM va uning TGM bilan intermetallik birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganishning yarim empirik usuli;

2. Toza og'ir KYeM va Dy-(Fe,Co) binary sistemalaridagi birikmalarning tajribaviy paramagnit Kyuri temperaturasi qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirning parametrini yarim empirik usul bilan hisoblash bo'yicha olingan natijalar.

Ishning tuzilishi va hajmi. Bitiruv malakaviy ishi kirish, ikkita bob, xulosalar va 38-ta nomdagi foydalanigan adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan bo'lib, 47bet lotin alifbosida, bosma shaklda bayon qilingan. Uning mazmuni 6- ta rasm va 8-ta jadval yordamida ko'rgazmali bayon qilingan.

Ishning qisqacha mazmuni: Kirish qismida bitiruv malakaviy ishi mavzusining dolzarbligi asoslangan; tadqiqot obekti, predmeti va usuli, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ilmiy yangiligi nazariy va amaliy ahamiyati hamda ishning tuzilishi va hajmi bayon qilingan.

Birinchi bobda bitiruv malakaviy ishi mavzusiga oid, bugungi kunda adabiyotlarda mavjud bo'lgan, nazariy va tajribaviy ishlarga (KYeM va TGMning elektron tuzilishi, KYeM va TGM uchun paramagnetizmning Van-Flek va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari, toza og'ir KYeM, TGM va Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi birikmalarning magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari) sharh berilgan. Bob oxirida tegishli xulosalar qilingan.

Ikkinchi bobda bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik o'rganish usuli, toza og'ir KYeMda va Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi birikmalarda amal

qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlarini yarim empirik usulda hisoblash va ularni tushuntirish natijalari bayon qilingan. Hisoblash natijalari tegishli jadvallar va grafiklar ko'rinishida ko'rgazmali tarzda rasmiylashtirilgan. Bob oxirida tegishli xulosalar qilingan.

Bitiruv malakaviy ishining oxiridagi xulosalarda ishda olingan natijalar umumlashtirilgan.

I.BOB. KAMYOB YeR METALLARI(KYeM), TEMIR GURUHI METALLARI(TGM) VA ULARNING BIRIKMALARINING ELEKTRON TUZILISHI VA MAGNIT XOSSALARIGA OID TADQIQOTLARNING HOLATI

1.1. KEM va TGMning elektron tuzilishi.

Kechikib to'ladigan elektron qobig'larga (3d,4d,5d,6d,4f,5f) ega bo'lgan atomlardan tashkil topgan metallar o'tkazuvchan metallar nomi bilan ataladi. Kamyob Yer metallari (KEM) va temir guruhi metallari (TGM) o'tkazuvchan metallardir.

KEMga 4f-elektron qobig'i kechikib to'ladigan lantandan ($z=57$) lyutetsiygacha ($z=71$) bo'lgan elementlar kiradi. KEMning erkin atomlarida elektronlarning qobiqlar bo'yicha joylashishi, 4f,5d va 6s-qobiqlarni hisobga olmaganda, xuddi ksenon($z=46$) atomidagidek bo'ladi. KEM atomlarida 4f-gacha bo'lgan ichki qobiqlar elektronlar bilan to'lgan bo'lib, ularning elektron konfiguratsiyasi $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10}$, tashqi elektron qobiqlar konfiguratsiyasi esa $4f^n 5s^2 5p^6 5d^{0-1} 6s^2$ kabi aniqlanadi [1-4]. Bundagi n -4f qobiqdagi elektronlar soni bo'lib, $n=0$ (La) dan $n=14$ (Lu) gacha o'zgaradi.

Kristall holatda KEM atomlari uch karra ionlashgan holatda, kristall panjara tugunlarida joylashadilar. $5d^1 6s^2$ -qobiqlardagi elektronlar esa kristallda umumlashgan, ya'ni elektr tok hosil qiladigan elektronlarga aylanadi. Bu metallar 4f-qobig'ning effektiv radiusi (r_{4f}) kristall panjara tugunlari orasidagi eng qisqa masofa – a panjara davridan ancha kichikdir, ya'ni, $r_{4f} \gg a/2$. Ulardagi 4f-qobig'lardagi elektronlar kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan bo'lib, tashqi $5s^2 5p^6$ -to'lgan qobiqlar bilan ionlar maydonidan ekranlashgan(himoyalangan). Shuning uchun ham 4f-elektronlar KEM da xuddi erkin atom va ionlardek energetik holatda bo'ladi. KEM ning "Erkin ion" modelining mohiyati shundan iboratdir. KEM uchun "Erkin ion" modelining o'ziga xos tomoni shundaki, birinchidan, 4f-elektronning tugunlararo bevosita ta'siri (f-f-ta'sir) mavjud emas

deb qaraladi; ikkinchidan esa, tugunlardagi 4f-elektronlar orasida, spin-orbital ($\vec{L}^* \vec{S}$) o'zaro ta'sir deb ataladigan, ta'sir kuchli bo'lib, bunda 4f-elektronning S-spin va L-orbital momentlari Russel-Saunders tipida qo'shilib, ionning to'la mexanik momenti - J Xundning uchinchi qoidasiga asosan topiladi: 4f-qobiq yarmigacha to'lganda (yengil KEM uchun) $J=L-S$, yarmidan ortig'iga bo'lganda (og'ir KEM uchun) $J=L+S$ kabi topiladi.

Spin-orbital bog'lanish energiyasi 4f-elektronlarning birinchi uyg'ongan va asosiy holat energiyalarining farqi (ΔE) orqali aniqlanadi. KEM ionlaridagi eng past energiya sathlarining joylashish tartibi bu metallarning magnit xossalarini belgilaydi. Energetik sathlar haqidagi malumotlar esa fluorestent va infraqizil nuqtalarning optik yutilish spektridan tajribada aniqlanadi. Nazariy jihatdan energetik sathlar sxemasi Gaudsmit [5] va Landening intervallar qoidasi [6] yordamida aniqlanadi. Gaudsmit qoidasi quyidagicha:

$$\Delta E = \frac{8\pi^4 m e^2 (2L + 1)}{(c^3 n^5 h^3 l(l + 1)(2L + 1))(z - \sigma)} \quad (1.1)$$

Bunda, ΔE -asosiy va uyg'ongan sathlar energiyalarining farqi, e - elektronning zaryadi, m - elektronning massasi, h - Plank doimiysi, n - va l – mos ravishda, bosh va orbital kvant sonlari, L - 4f - qobiqdagi elektronlarning to'la orbital kvant soni, z - atomning tartib nomeri, σ - ekranlash doimiysi.

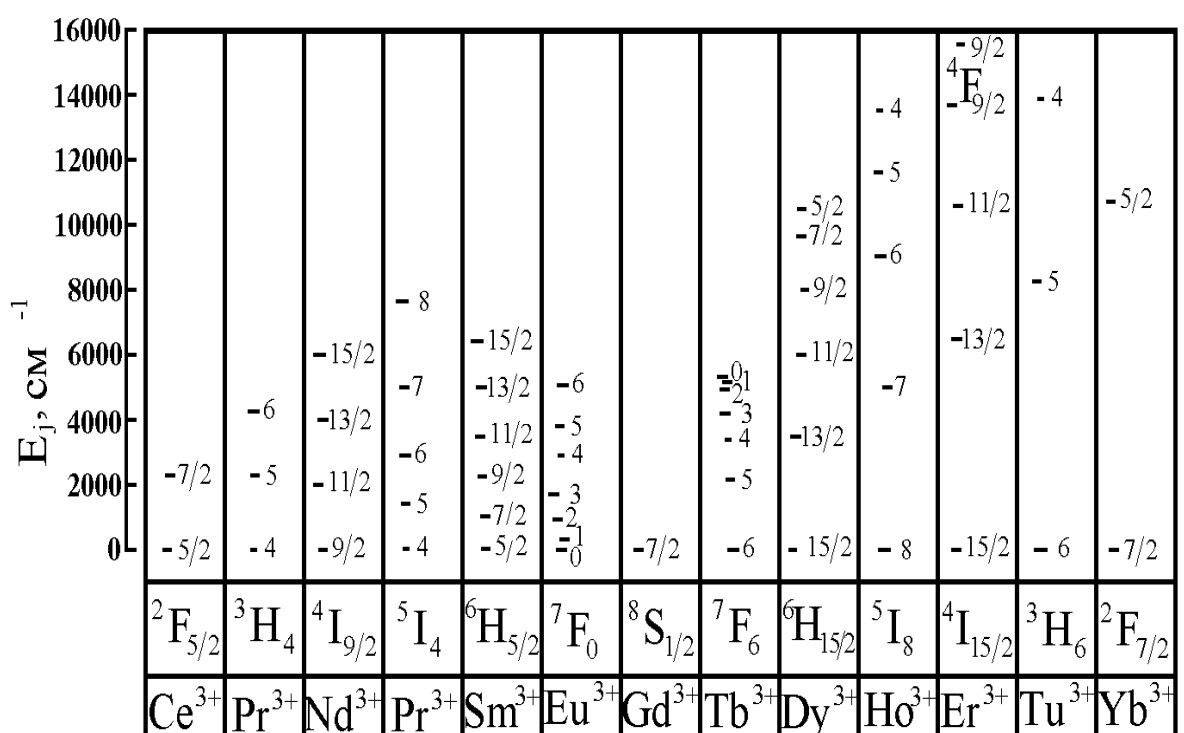
Landening intervallar qoidasining mohiyati quyidagicha:

$$E_J - E_{J-1} = A E_J \quad (1.2)$$

Buda, $E_J - J$ ga mos energetik sath energiyasi, A – spin orbital bog'lanish doimiysi.

(1.1) Ifodada $35 \leq \sigma \leq 36$ deb qabul qilib va (1.2) ifoda bilan hisoblash natijalari (1.1.rasm) va spektroskopik tajribalarning natijalari shuni ko'rsatadiki, og'ir KEM uchun $\Delta E \geq 1000 \text{ sm}^{-1}$. Issiqlik energiyasi (kT) 300K da $208,5 \text{ sm}^{-1}$ ga,

1500K da esa $1042,25 \text{ cm}^{-1}$ ga tengdir. Bu esa og'ir KEM uchun $\Delta E \geq kT$ shart bajariladi deb aytishga imkon beradi. KEM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi haqidagi malumotlar 1.1 – jadvalda keltirilgan.



1.1-rasm. KEM^{3+} erkin ionlaridagi 4f-elektronlarning energetik sathlari.

KEM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi

Z	Element	Atomlar uchun		KEM ³⁺ ionlari uchun					
		Elektron konfiguratsiya	Term	Elektron konfigur-ya	S	L	J	Term	E _{J+1} , sm ⁻¹
57	La	4f ⁰ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	² D _{3/2}	4f ⁰ 5S ² 5P ⁶	0	0	0	¹ S ₀	-
58	Ce	4f ¹ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	³ H ₄	4f ¹ 5S ² 5P ⁶	1/2	3	5/2	² F _{5/2}	2253
59	Pr	4f ³ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁶ I _{9/2}	4f ³ 5S ² 5P ⁶	1	5	4	³ H ₄	2171
60	Nd	4f ⁴ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁵ I ₄	4f ⁴ 5S ² 5P ⁶	3/2	6	9/2	⁴ I _{9/2}	2028
61	Pm	4f ⁵ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁶ H _{5/2}	4f ⁵ 5S ² 5P ⁶	2	6	4	⁵ I ₄	-
62	Sm	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁷ F ₀	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶	5/2	5	5/2	⁶ H _{5/2}	1100
63	Eu	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁸ S _{7/2}	4f ⁶ 5S ² 5P ⁶	3	3	0	⁷ F ₀	350
64	Gd	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	⁹ D ₂	4f ⁷ 5S ² 5P ⁶	7/2	0	7/2	⁸ S _{7/2}	-
65	Tb	4f ⁸ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	⁸ H _{17/2}	4f ⁸ 5S ² 5P ⁶	3	3	6	⁷ F ₆	2101
66	Dy	4f ¹⁰ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁵ I ₈	4f ⁹ 5S ² 5P ⁶	5/2	5	15/2	⁶ H _{15/2}	3200
67	Ho	4f ¹¹ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	⁸ I _{15/2}	4f ¹⁰ 5S ² 5P ⁶	2	5	8	⁵ I ₈	5050
68	Er	4f ¹² 5S ² 5P ⁶ 6S ²	³ H ₆	4f ¹¹ 5S ² 5P ⁶	3/2	6	15/2	⁴ I _{15/2}	8000
69	Tm	4f ¹³ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	² F _{7/2}	4f ¹² 5S ² 5P ⁶	1	5	6	³ H ₆	8250
70	Yb	4f ¹⁴ 5S ² 5P ⁶ 6S ²	¹ S ₀	4f ¹³ 5S ² 5P ⁶	1/2	3	7/2	² F _{7/2}	10300
71	Lu	4f ¹⁴ 5S ² 5P ⁶ 5d ¹ 6S ²	²² D _{3/2}	4f ¹⁴ 5S ² 5P ⁶	0	0	0	¹ S ₀	-

Temir guruhi metallari o'tuvchan metallar sinfiga mansub bo'lib, Mendeleev davriy sistemasidagi skandiydan ($Z=21$) misgacha ($Z=29$) bo'lgan metallar kiradi. Ularning erkin atomlarida 3d – elektron qobiq kechikib to'ladi.

TGM atomlarida 3d qobiqqacha bo'lgan qobiqlar elektronlar bilan to'lgan argon ($Z=18$) atomining elektron konfiguratsiyasiga egadir [1]: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$.

Bu atomlarning tashqi elektron qobiqlari $3d^n 4s^2$ qonuniyat bo'yicha to'ladi, bunda $n=1$ dan (Sc, $Z=21$) $n=10$ gacha (Cu, $Z=29$) o'zgaradi.

Temir guruhi atomlaridan kristall panjara hosil bo'lish jarayonida ularning 4s – qobiqlardagi barcha elektronlar va qisman 3d – qobiq elektronlari kristall panjara tugunlari orasidadagi umumlashgan “erkin” elektronlarga aylanadi va ion holatiga o'tgan atomlar panjara tugunlarida joylashadi. Bu metallarning qattiq holatida tugunlarda o'troqlashgan 3d – qobiqning radiusi (r_{3d}) kristall panjara davrining yarmiga ($a/2$) yaqindir ($r_{3d} \approx \frac{a}{2}$). Shu sababga ko'ra, 3d – elektronlar kristall panjara tugunlarida „yalong'och” holatda, ya'ni tashqi ta'sirlardan xususan, kristall panjara elektr maydonidan ekranlashmagan (himoyalangan) holatda bo'ladilar. Kristall maydoni ta'sirida 3d-qobiqlardagi elektronlarining orbital mexanik xarakati momenti ma'lum bir yo'nalish bo'ylab (orbital magnit momenti ham) qotib (“muzlab”) qoladi. Shu sababli TGMning magnit xossasini faqat 3d- elektronlarning o'z o'qi atrofida aylanma xarakati (spini) xosil qiladi. Demak, 3d-elektronlar uchun to'la orbital mexanik moment kvant soni $L=0$ bo'ladi. Xundning uchinchi qoidasiga asosan $J=S$ tenglik bajariladi. TGM metallaridan Cr, Mn, Fe, Co va Ni kuchli magnit xossaga (magnit tartiblangan holatga) ega bo'lgan metallar bo'lib hisoblanadi.

Temir guruhi metallari atomlari va ionlarining elektron tuzilishi haqida asosiy ma'lumotlar 1.2 – jadvalda keltirilgan.

TGM atomlari va ionlarining electron tuzilishi.

Z	Element	Atomlar uchun		Ionlar uchun					
		Elektron konfiguratsiya	Term	Ion	Elektron konfiguratsiya	S	L	J	Term
21	Sc	$3d^1 4s^2$	$^3D_{3/2}$	Sc^{3+}	$3d^0$	0	0	0	1S_0
22	Ti	$3d^2 4s^2$	3F_2	Ti^{3+}	$3d^1$	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{3}{2}$	$^3S_{3/2}$
23	V	$3d^3 4s^2$	$^3F_{3/2}$	V^{3+}	$3d^2$	1	3	2	3F_2
24	Cr	$3d^5 4s^1$	7F_9	Cr^{3+}	$3d^3$	$\frac{3}{2}$	3	$\frac{3}{2}$	$^3F_{3/2}$
25	Mn	$3d^5 4s^2$	$^6S_{5/2}$	Mn^{3+}	$3d^4$	2	2	0	5D_0
		$3d^5 4s^2$	$^6S_{5/2}$	Mn^{2+}	$3d^5$	$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$	$^6S_{5/2}$
26	Fe	$3d^6 4s^2$	5D_4	Fe^{3+}	$3d^5$	$\frac{5}{2}$	0	$\frac{5}{2}$	$^6S_{5/2}$
		$3d^6 4s^2$	5D_4	Fe^{2+}	$3d^6$	2	2	4	5D_4
27	Co	$3d^7 4s^2$	$^4F_{9/2}$	Co^{2+}	$3d^7$	$\frac{3}{2}$	3	$\frac{9}{2}$	$^4F_{9/2}$
28	Ni	$3d^8 4s^2$	3F_4	Ni^{2+}	$3d^8$	1	3	4	3F_4
29	Cu	$3d^{10} 4s^1$	$^5S_{1/2}$	Cu^{1+}	$3d^9$	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{5}{2}$	$^2D_{5/2}$
		$3d^{10} 4s^1$			$3d^{10}$	0	0	0	1S_0

1.2. KYeM va TGM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.

Ionlardagi kechikib to'ladigan elektron qobiqdagi elektronlarning energetik sathlari energiyasi E -ni bilgan holda Van-Flek tomonidan ishlab chiqilgan paramagnetizmning kvant-mexanik nazariyasi natijalaridan [1,7,8] foydalanib, shunday erkin ionlar sistemasidagi paramagnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'liqligini hisoblash mumkin.

Sistema og'ir KYeM ionlaridan tashkil topgan deb faraz qilaylik. Sistemadagi har bir ionning asosiy va birinchi uyg'ongan holat energiyasi farqi issiqlik energiyasidan juda katta bo'lganda ($\Delta E \gg k_B T$) Van-Flek nazariyasi shu sistemaning solishtirma magnit qabul qiluvchanligi uchun quyidagi ifodani beradi:

$$\chi = \frac{N_A}{M} \frac{g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} + \frac{N_A \alpha_J}{M}. \quad (1.3)$$

Bunda, N_A -Avagadro soni; M -berilgan KYeM ning atom massasi; k_B -Boltsman doimiysi; T -Absolyut temperatura; μ_B -Bor magnetoni; g_J -Lande faktori.

Lande faktori quyidagicha aniqlanadi:

$$g_J = 1 + [S(S+1) + J(J+1) - L(L+1)] / 2J(J+1). \quad (1.4)$$

(1.3) dagi ikkinchi qo'shiluvchi temperaturaga bog'liq bo'lgan Van-Flek paramagnetizmi. Undagi α_J quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha_J = \frac{\mu_B^2}{6(2J+1)} \left[\frac{F_{J+1}}{E_{J+1} - E_J} - \frac{F_J}{E_J - E_{J-1}} \right]. \quad (1.4)$$

Bu ifodadagi F quyidagicha aniqlanadi:

$$F_J = \frac{1}{J} [(S+L+1)^2 - J^2] \cdot [J^2 - (S-L)^2]. \quad (1.5)$$

(1.3) ifodadagi birinchi qo'shiluvchi magnit qabul qiluvchanlikning temperaturaga bog'liq qismini $\chi(T)$ aniqroq qilib aytganda KYeM ning kristall

panjarasi tugunlarida o'rtoqlashgan 4f-qobiq elektronlarining magnit qabul qiluvchanligini, ikkinchi qo'shiluvchi $\frac{N_A}{M} \alpha_J = \chi_0$ temperaturaga bog'liq bo'lmagan qismini ifodalaydi. Demak (1.3) ifodadan ko'rinadiki $\Delta E \gg k_B T$ shart bajarilganda yuqori temperatura va kuchsiz magnit maydonda $\left(\frac{\mu_B H}{k_B T} \ll 1\right)$ KYeM ning erkin ionlari sistemasining magnit qabul qiluvchanligi, ionlar asosiy holatining to'la mexanik moment kvant soni J ga temperaturasi T bilan aniqlanar ekan. $\chi_0 = \frac{N_A \alpha_J}{M} = 0$ bo'lganda (1.3) ifoda quyidagi klassik Xund formulasiga aylanadi:

$$\chi = \frac{N_A}{M} g_J^2 J(J+1) \mu_B^2 / 3k_B T \quad (1.7)$$

Agar

$$C = \frac{N_A}{M} g_J^2 J(J+1) \mu_B^2 / 3k_B = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_{eff}^2}{3k_B} \quad (1.8)$$

belgilash kiritilsa, (1.7) ifoda Kyuri empirik qonuninig analitik ifodasiga aylanadi:

$$\chi = \frac{C}{T}. \quad (1.9)$$

(1.8) ifodada belgilangan μ_{eff} kattalik

$$\mu_{eff} = g_J [J(J+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B \quad (1.10)$$

KYeM erkin ioni effektiv magnit momentining nazariy qiymatini aniqlaydi. Bu kattalikning tajribaviy qiymatini aniqlash uchun (1.8) dan quyidagi ifodani olish mumkin:

$$\mu_{\phi\phi} = \frac{1}{\mu_B} \left(\frac{3k_B}{N_A} \right)^{1/2} (MC)^{1/2} \mu_B = 2,83 (MC)^{1/2} \mu_B. \quad (1.11)$$

KYeM ionlarning magnit o`zaro ta`siri, energiyaga proportsional bo`lgan, Kyurining paramagnit temperaturasi deb ataladigan, θ_p kattalikni (1.3) ifodaning birinchi hadi maxrajida $T \rightarrow (T - \theta_p)$ almashtira olish bilan hisobga olish mumkin [1,5]. Buni hisobga olganda (1.9) ifoda Kyuri-Veyss qonunining analitik ifodasiga aylanadi:

$$\chi = C / (T - \theta_p). \quad (1.12)$$

Yengil kamyob yer metallari uchun χ_0 ning qiymatini hisobga olmasligi mumkin emasligini hisobga olsak (1.3) dan Kyuri-Veyss qonunining umumlashgan ifodasini olamiz:

$$\chi = \frac{C}{(T - \theta_p)} + \chi_0. \quad (1.13)$$

Temir guruhi metallari atomlari(ionlari)ning 3d-qobiq elektronlarining uyg`ongan va asosiy energetik sathlar energiyalarining farqi ( $\Delta E \ll k_B T$ ) ( $T$ -absolyut temperatura) bo`lgani uchun Van – Flek nazariyasidan bu elementlar magnit qabul qiluvchanligining temperaturaga bog`lanishini hisoblash uchun quyidagi ifodani olish mumkin [8]:

$$\chi = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_B^2}{3k_B T} [4S(S+1) + L(L+1)], \quad (1.14)$$

bu ifodada ham quyidagicha belgilash kiritamiz:

$$C = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_B^2}{3k_B T} [4S(S+1) + L(L+1)] = \frac{N_A}{M} \frac{\mu_{ef}^2}{3k_B}. \quad (1.15)$$

$$\text{Bundagi} \quad \mu_{ef} = [4S(S+1) + L(L+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B. \quad (1.16)$$

(1.15) ga asosan (1.14)dan (1.12) ko`rinishdagi quyidagi Kyuri-Veyss qonunining empirik ifodasini olish mumkin.

Shuni alohida qayd etish kerakki, (1.16) ifoda bo`yicha nazariy hisoblangan  $\mu_{ef}$  ning qiymati, TGM bitta atomiga to`g`ri keladigan magnit momentning

tajribaviy qiymatidan ancha katta bo'lib chiqadi. Buning sababi quyidagicha: temir guruhi elementlarining kristall holatida panjara tugunidagi 3d elektronlar, shuningdek ularning orbital magnit momenti, qo'shni tugunlardagi ionlarning kuchli elektr maydoni ta'siridan yaxshi himoya qilinmagan. Shu ta'sir natijada ionlar magnit momentlarining orbital tashkil etuvchisi, kristallda aniq bir yo'nalish olib, qotib („muzlab“) qoladi. Orbital momentning kristall maydoni bilan o'zaro ta'sir energiyasi ion ichidagi spin – orbital bog'lanish energiyasidan ancha katta bo'ladi. Shu tufayli magnit momentning (1.16) ifodadagi orbital tashkil etuvchisini hisobga olmaydigan darajada kichik deb qarash mumkin ($L \approx 0$). U holda (1.16) ifodani quyidagicha yozish mumkin.

$$\mu_{ef} = 2[S(S+1)]^{\frac{1}{2}} \mu_B. \quad (1.17)$$

Agar multipletlik - $2S+1$, yoki 3d qobiqdagi juftlashmagan elektronlar soni - N aniq bo'lsa, μ_{ef} ning qiymatini (1.17) dan kelib chiqadigan quyidagi ifoda yordamida ham topish mumkin ($S = \frac{N}{2}$):

$$\mu_{ef} = \sqrt{N(N+2)} \mu_B. \quad (1.18)$$

TGM bitta atomiga to'g'ri keladigan magnit moment-effektiv magnit momentning tajribaviy qiymatini ham (1.15) dan olinadigan (1.11) ifodada foydalanib topiladi. Shuni alohida qayd etish lozimki, TGM ionlari uchun (1.17) yoki (1.18) ifodalar bo'yicha hisoblash natijalar tajriba natijalari bilan yaxshi mos tushadi. KYeM va TGM ionlarining asosiy magnit xarakteristikalarini mos ravishda 1.3 va 1.4 – jadvallarda keltirilgan.

KYeM³⁺ ionlarining asosiy magnit xarakteristikalari[1-3,5,9]

KYeM ³⁺	J (asosiy sath)	g _J	g _J [J(J+1)] ^{1/2} μ _B nazariy	μ _{eff} , μ _B Van-Flek para. bilan, nazariy	μ _{eff} , μ _B tajr.	E _{J+1} , sm ⁻¹
La	0	0	0	0	diam.	-
Ce	5/2	6/7	2,54	2,56	2,39	2253
Pr	4	4/5	3,58	3,62	3,60	2171
Nd	9/2	8/11	3,62	3,68	3,62	2028
Pm	4	3/5	2,68	2,83	-	-
Sm	5/2	2/7	0,84	1,55	1,54	1100
Eu	0	0	0	3,4	3,61	350
Gd	7/2	2	7,94	7,94	8,2	-
Tb	6	3/2	9,72	9,72	9,60	2101
Dy	15/2	4/3	10,63	10,63	10,5	3200
Ho	8	5/4	10,60	10,60	10,5	5050
Er	15/2	6/5	9,59	9,59	9,5	5000
Tm	6	7/6	7,57	7,57	7,2	8250
Yb	7/2	8/7	4,54	4,54	4,4	10300
Lu	0	0	0	0	diam.	-

TGM (Fe, Co, Ni) ionlarining asosiy magnit xarakteristikalari [1].

Ion	3d elektronlar soni	N	μ_{eff}, μ_B , nazariy		$\mu_{\text{eff}},$ μ_B tajr.	Spin orbital yoyilish parametri, (E_{3d}) sm^{-1}
			$\sqrt{N(N+2)}$	$g_J \sqrt{J(J+1)}$		
Sc^{3+}	0	0	0	0	diam.	-
Ti^{3+}	1	1	1.73	1.55	1.8	154
Y^{3+}	2	2	2.83	1.63	2.8	105
Cr^{3+}	3	3	3.87	0.77	3.8	91
Mn^{3+}	4	4	4.9	0	4.9	88
Mn^{2+}	5	5	5.92	5.92	5.9	0
Fe^{3+}	5	5	5.92	5.92	5.9	0
Fe^{2+}	6	4	4.9	6.7	5.4	-103
Co^{2+}	7	3	3.87	6.63	4.8	-178
Ni^{2+}	8	2	2.83	5.59	3.2	-325
Cu^{2+}	9	1	1.73	3.55	1.9	-829
Cu^{1+}	10	0	0	0	diam.	-

1.3. KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi.

Kechikib to'ladigan qobiqqa(3d,4f) ega bo'lgan va kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan, ionlardan tashkil topgan metallarning kuchli magnit xossasini (magnit tartiblangan holatini) shu qobiq elektronlarning tugunlararo magnit o'zaro ta'siri hosil qiladi. Bunday o'zaro ta'sir **almashinuv o'zaro ta'sir** nomi bilan ataladi.

Kamyob Yer metallarining kristall panjarasi tugunlarida, 4f – kechikib to'ladigan elektron qobiqqa ega bo'lgan, KEM^{3+} ionlari joylashadilar. 4f qobiq elektronlari tashqi $5s^2 5p^6$ qobiqlardagi elektronlar bilan tashqi ta'sirlardan himoyalangan bo'ladi. Shu sababga ko'ra ularning tugunlararo bevosita o'zaro ta'siri (f – f o'zaro ta'sir deb ham ataladigan o'zaro ta'sir) amalga oshmaydi. Demak ularning magnit tartiblangan holatini bunday bevosita o'zaro ta'sir hosil qila olmaydi.

Tajribalar ko'rsatadiki, bunday holat past temperaturalarda (masalan Gd uchun $T < 292$ K da) hosil bo'lar ekan. Bunday tartiblangan holatni 4f – qobiq elektronlarning o'tkazuvchan - $5d^1$ va $6s^2$ -elektronlar (ya'ni tugunlar orasida umumlashgan elektronlar) orqali o'zaro ta'siri hosil qilar ekan. Bunday o'zaro ta'sir f – s – f, qisqacha s-f o'zaro ta'sir yoki **bilvosita almashinuv o'zarota'sir** deyiladi [1]. Bunday o'zaro ta'sir nazariyasi KEM uchun birinchi marta Ruderman, Kittel, Kasuya va Iosidalar tomonidan ishlab chiqilgani uchun bunday bilvosita almashinuv o'zaro ta'siri ularning nomi bilan **RKKI o'zaro ta'siri**, bunga oid nazariya -**RKKI nazariyasi** ham deb yuritiladi. Bu nazariya [1,10-12]da batafsil yoritilgan.

RKKI o'zaro ta'siri quyidagicha yuz beradi[2,4]: Kristal panjaraning, holati $\vec{R}_n$ -radius vektor bilan aniqlanadigan, ixtiyoriy n-tugunida o'troqlashgan 4f-elektronlar tugunlar orasida umumlashgan ("erkin" yoki o'tkazuvchan) elektronlarga ta'sir qiladi va ularni magnit qutblaydi. Bunday qutblangan

umumlashgan elektronlar, o'z navbatida, holati $\vec{R}_m$ -radius vektor bilan aniqlanadigan, panjaraning m-tugunida o'troqlashgan 4f- elektronlarga ta'sir qiladi. Natijada n va m-tugunlarda joylashgan 4f qobiqlardagi elektronlarning magnit momentlari o'zaro tartibga keladi.

“Erkin” elektronlarning magnit qutblanishi quyidagicha yuz beradi: “erkin” elektronlar modelidan ma'lumki, odatdagi sharoitlarda umumlashgan elektronlarni, spini (magnit momenti) “yuqoriga” (+) va “pastga” (-) yo'nalgan elektronlarga bo'lish mumkin. Odatdagi sharoitlarda spini “yuqoriga” va “pastga” yo'nalgan elektronlarning konsentratsiyasi o'zaro teng bo'ladi. Shu sababli erkin elektronlar sistemasi magnitlanmagan bo'ladi. Ixtiyoriy n-tugunda joylashgan 4f-qobiq elektronlarining magnit ta'siri natijasida spini “yuqoriga” yo'nalgan erkin elektronlarning magnit momentlari shu 4f-qobiqning magnit momentiga parallel joylashadi. Spini “yuqoriga” yo'nalgan elektronlar tartiblangan magnit momentlarining yo'nalishi bo'ylab, spini “pastga” yo'nalgan elektronlarning magnit momentlari ham qisman (yoki to'la) tartibga keladi. Natijada erkin elektronlar sistemasining natijaviy magnit momenti no'ldan farqli bo'lib qoladi, ya'ni ular magnit qutblanadilar.

Ma'lumki, $T=\theta_p$ temperaturada KEMning magnit tartibli holati buzilib magnit tartibsiz holat-paramagnit holatga o'tadi. Demak, KEMning paramagnit Kyuri temperaturasi - θ_p RKKI o'zaro ta'sir energiyasining o'lchovi hisoblanadi. KEM uchun θ_p ning tajribaviy qiymatini tushuntirish uchun quyidagi ifoda olingan[1,10-12]:

$$\theta_p = \frac{3\pi^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) (g_I - 1)^2 I(I+1) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)), \quad (1.19)$$

bu yerda n – umumlashgan elektronlar konsentratsiyasi; $A_{sf}(0)$ - bilvosita s-f o'zaro ta'sir doimiysi (integrali); E_F -Fermi sathi energiyasi; k_F – Fermi sirtining to'lqin vektori; $(\vec{R}_n - \vec{R}_m)$ – n- va m-tugunlar orasidagi masofa;

$$F(x) = F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = (x \cos x - \sin x) / x^4 \quad (1.20)$$

– Ruderman – Kittel funksiyasi.(1.14) ifodadagi

$$G = (g_J - 1)^2 J(J + 1) \quad (1.21)$$

kabi aniqlanuvchi G – kattalikka de Jen faktori deyiladi. Bu ifodadagi g_J -Lande faktori deyilib quyidagicha aniqlanadi:

$$g_J = 1 + \frac{J(J + 1) + S(S + 1) - L(L - 1)}{2J(J + 1)}, \quad (1.22)$$

bundagi L , S va J 4f -qobiqdagi elektronlarning to'la orbital, to'la spin va to'la mexanik moment kvant sonlari.

Ikkinchi tomondan, KEM dagi almashinuv o'zaro ta'sirni tafsiflovchi parametr(integral) ni hisoblash uchun RKKI nazariyasi doirasida quyidagi ifoda olingan[1,4,10]:

$$A = \frac{9\pi^2}{\Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)). \quad (1.23)$$

Buni hisobga olgan holda (1.19)dan quyidagi ifodani olamiz:

$$\theta_p = \frac{1}{3k_B} AG. \quad (1.24)$$

1.1. danma'lumki, TGMionlaridagi 3dqobiqelektronlarikristallpanjaratugunlarida „yalang'och" qoladi. Shutufaylibuqobiqelektronlariningbevositamagnito'zarota'siriyuzberishigahalaqitb eradigan, ya'niularniekranlovchielektronqobiqlar (KEMdagi $5s^25p^6$ largao'xshash) yo'q. Demak, TGMdafaqatbilvositaemas, balkibevositata'sirhamamalgaoshadi. Bunga d – d o'zaro ta'sir ham deyiladi. TGMda magnit tartiblangan holatni mana shu bevosita almashinuv o'zaro ta'sir hosil qiladi. Shunday o'zaro ta'sirning energetik o'lchovi, TGMda ham, Kyuri temperaturasi hisoblanadi.

Bevosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi TGMning paramagnit Kyuri temperaturasi uchun quyidagi ifodani beradi [1]:

$$\theta_p = \frac{zA}{k_B} . \quad (1.25)$$

Bunda z-koordinatsiya soni.

1.4. Toza Dy,Fe,Co va Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi birikmalarining magnit xossalari yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari.

1.4.1. Toza og'ir KYeM va TGMning yuqori temperaturalardagi magnit xossalari.

Bugungi kunda, toza KYeMlarning magnit xossalari 300K dan past temperaturalarda, ya'ni ularning magnit tartiblangan holatida, yetarli darajada o'rganilgan. Bu ishlarga [1,3,4] adabiyotlarda sharh berilgan. 300K dan yuqori temperaturalarda, ya'ni bu metallarning paramagnit holatini o'rganishga bag'ishlangan ishlar uncha ko'p emas. Og'ir KYeM(Gd,Ho,Tb,Dy,Er,Tm) kandinsirlangan paramagnit xolatining magnit xossasi [5,13-20] ishlarida o'rganilgan.

[13,14,17,18] ishlarda og'ir KYeMning $\chi(T)$ bog'lanishi 300-1500 K, temperaturalar intervalida, ya'ni ularning qattiq holatida o'lchangan. $\chi(T)$ bog'lanish Van-Flek nazariyasi bo'yicha tushintirilgan.

[15,16,19,20] ishlarda og'ir KYeMning, shu jumladan disprozining, $\chi(T)$ bog'lanishi ularning qattiq va suyuq holatlarida o'lchangan. $\chi(T)$ bog'lanish Van-Flek nazariyasi bo'yicha tushintirilgan.

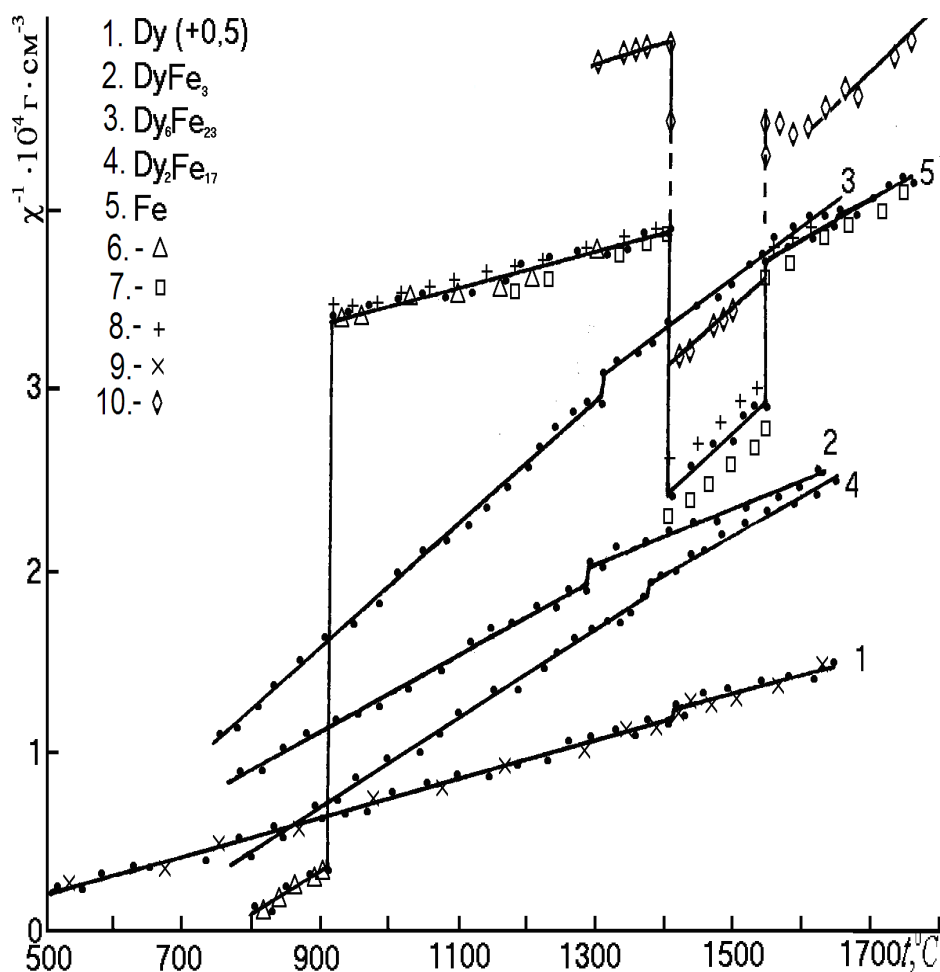
Toza temir, nikel va kobalt metallarning $\chi(T)$ bog'lanishi ularning suyuq holatini ham qaraydigan yuqori temperaturalarda o'lchash natijalari [21-27] ishlarda bayon qilingan. Bu ishlarning natijalari bo'yicha temirning $\chi(T)$ bog'lanishida, unda yuz beradigan polimor fazaviy o'tishlarning (α - γ va γ - δ) va erish temperaturalariga mos temperaturalarda, sakrab o'zgarishi yuz beradi. Har bir fazaning $\chi(T)$ bog'lanishi Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi. Kobaltning $\chi(T)$ bog'lanishida, erishga nos keladigan temperaturada χ kichik sakrab kamayadi. Nikelning magnit qabul qiluvchanligi ham, kobaltniki kabi, temperature ortishi bilan kamayadi. Uning $\chi(T)$ bog'lanishi umumlashgan Kyuri-Vyess qonuniga

bo'ysinadi. Nikilning erishida, uning magnit qabul qiluvchanligi sezilarli darajada o'zgarmaydi.

1.4.2. Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi birikmalarning yuqori temperaturalardagi magnit xossalari.

Dy-Fesistemesi.Dy-

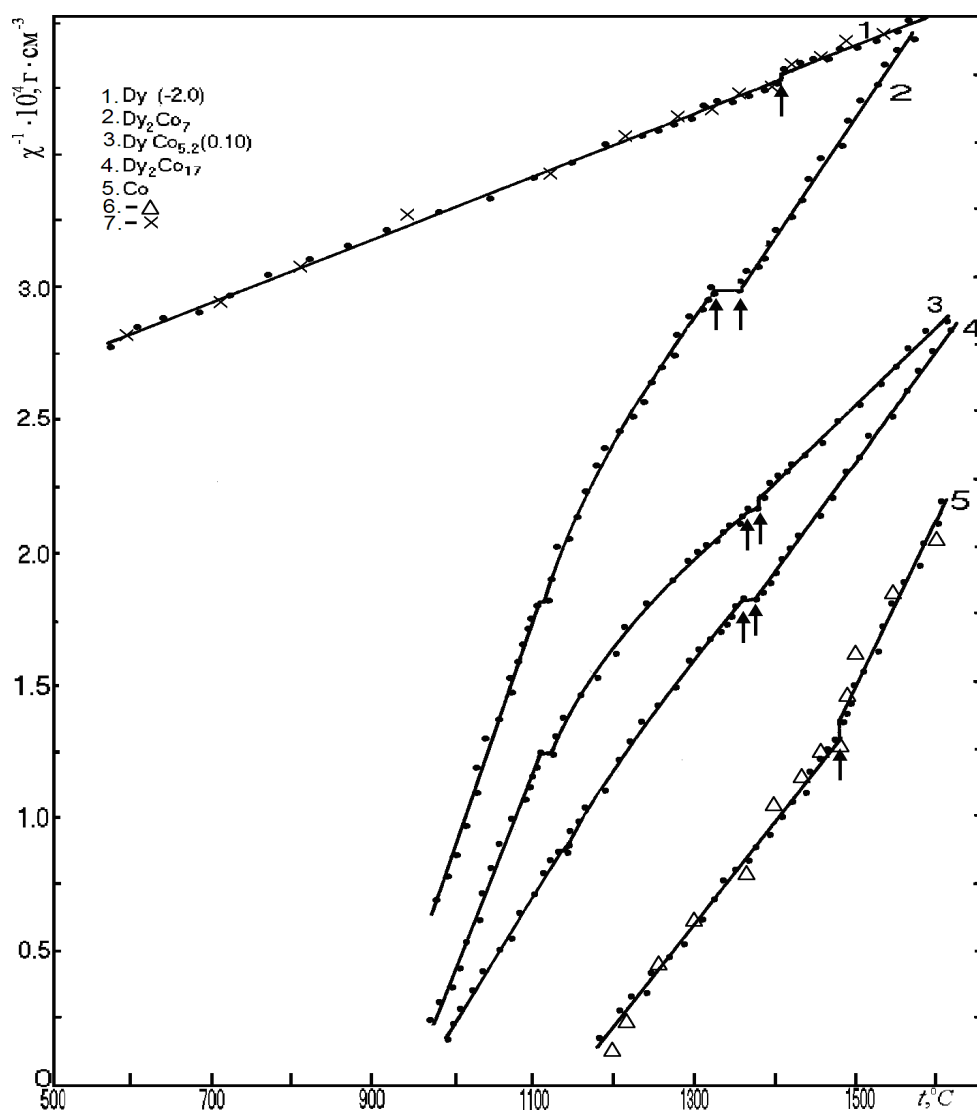
Fesistemasidaginamunalarningmagnitqabulqiluvchanligini, 20-
 ularningqattiqvasuyuqholatlarida, ya'nikandensirlanganholatida [28,29]
 1700⁰Ctemperaturalaroralig'idao'lchashnatijalarivaularningmuhokamasi
 ishlardachopetilgan. Bunatijalar $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarko'rinishida 1.1-
 rasmdakeltirilgan.



1.1-rasm.Dy-Fe sistemasidagi namunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari.

1.1-rasmnitahlilqilishshuniko'rsatadiki, Dy-
 Fesistemasidagibarchanamunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlariqattiqholatdaham,
 suyuqholatdahamchiziqlitabiatgaega. Butajribaviydalilnamunalarning χ^{-1}
 bog'lanishlari (1.12) ko'rinishdagiKyuri-
 Veyssqonunigabo'ysinishidandalolatberadi.

Dy-Cosistemasi. Dy-
 Cosistemasidaginamunalarningmagnitqabulqiluvchanligini,
 ularningqattiqvasuyuqholatlarida, ya'nikondensirlanganholatida 20-
 1700⁰Ctemperaturalaroralig'idao'lchashnatijalarivaularningmuhokamasi [30,31]
 ishlardachopetilgan. Bunatijalar $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarko'rinishida 1.2-
 rasmdakeltirilgan.



1.2-rasm.Dy-Fe sistemasidagi namunalarning $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari.

1.2-rasmda ko'rinib turibdiki Dy_2Co_7 , $\text{DyCo}_{5.2}$ va $\text{Dy}_2\text{Co}_{17}$ birikmalarining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida 1130-1390⁰C temperaturalar oralig'ida anomalo'zgarish kuzatiladi. Buo'zgarish Dy-Co sistemasining holat diagrammasi bo'yicha tushuntirilgan. Toza metallar uchun qattiq va suyuq holatda, birikmalar uchun esa 930-1130⁰C temperaturalar oralig'idagi qattiq holatdavaularning suyuq holatida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlari chiziqli tabiatga ega. Bu tajribaviy dalil namunalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari (1.12) ko'rinishdagi Kyuri-Veyssqonuniga bo'ysinishidan dalolat beradi.

1.4.3. Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi namunalar paramagnet Kyuri temperaturasi tajribaviy qiymatlari.

Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi namunalarning asosiy magnet xarakteristiklari - paramagnet Kyuri temperaturasi - θ_p , Kyuri-Veyss doimiysi - C, birikmaning kimyoviy formulabirligiga to'g'ri keladigan magnet moment - μ_f vah.z.

1.1 va 1.2 rasmlardagi $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlardan foydalanib eng kichik kvadratlar usuli bilan [28-31] ishlarda EHM da hisoblab topilgan. Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi namunalarning tajribaviy paramagnet Kyuri temperaturasi qiymatlari 1.2-jadvalda keltirilgan.

Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi namunalar paramagnit Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlari [13-31].

Birikma	Qattiq holat	Suyuq holat
	θ_p, K	θ_p, K
Dy	160	180
Fe ₁₇ Dy ₂	880	753
Fe ₂₃ Dy ₆	780	533
Fe ₃ Dy	750	323
α -Fe	1053	
γ -Fe	-2027	
δ -Fe	1100	420
Co ₁₇ Dy ₂	1223	1153
Co _{5.2} Dy	1213	863
Co ₇ Dy ₂	1193	803
Co	1408	1548

I-bobga doir xulosalar

Bitiruv malakaviy ishining tadqiqot ob'ektlarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish uchun zarur bo'lgan shu ob'ektlarning quyidagi yo'nalishdagi xossalarini adaboyotlarda o'rganilganlik darajasiga sharh berilgan:

1. KYeM va TGMning elektron tuzilishi;
2. KYeM va TGM uchun paramagnetizmning kvant Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari;
3. Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi toza metallar va birikmalarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganishga bag'ishlangan ishlar.

II.BOB. DISPROZIY-(TEMIR, COBALT)

SISTEMALARIDA AMALQILADIGAN BILVOSITA ALMASHINUVO'ZAR OTA'SIRNI YARIM EMPIRIKUSULDAO'RGANISH NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI.

2.1. Bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik o'rganish usuli.

§1.3 da aytilganidek, KEMning magnit xossasini, kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan, 4f-elektronlar, TGM da esa 3d-elektronlar hosil qiladi. §1.1 da aytilganidek 4f-elektronlar kristall panjara tugunlarida $5s^2 5p^6$ elektronlar bilan kristall panjara maydoni ta'siridan himoyalangan bo'ladi; 3d-elektronlar esa "yalong'och" holda joylashib kristall maydoni ta'siridan himoyalangan bo'ladi. KEMda magnit tartiblangan holatni 4f-elektronlarning panjara tugunlari orasida erkin harakatlanuvchi $5d^1$ va $6s^2$ elektronlar orqali o'zaro ta'siri hosil qiladi. Bunday o'zaro ta'sirga bilvosita (f-s-f yoki qisqacha f-s) almashinuv o'zaro ta'sir yoki RKKI o'zaro ta'siri deyiladi.

TGMda 3d-elektronlarning bevosita o'zaro ta'sirlashuv ehtimoliyati bilvosita o'zaro tasirlashuv ehtimoliyatidan katta. Shuning uchun ham TGMning magnit tartiblangan holatining hosil bo'lishida 3d-elektronlarning bevosita (d-d) almashinuv o'zaro ta'siri asosiy rol ni o'ynaydi.

KEM va TGM orasida hosil bo'ladigan brikmlar magnit tartiblangan holatining hosil bo'lishiga sabab bo'ladigan almashinuv o'zaro ta'sirining tabiati haligacha to'la aniqlanmagan. Bu yerda turli xildagi o'zaro ta'sirlar amal qilishi mumkin: KEM panjarasi tugunlarida o'troqlashgan 4f- qobiq elektronlarning erkin elektronlar orqali o'zaro (bilvosita f-s) ta'siri, KEM va TGM panjaralari tugunlarida o'troqlashgan 4f va 3d-qobiqlaridagi elektronlarning erkin elektronlar orqali o'zaro (bilvosita f-d) ta'siri va TGM panjarasi tugunlarida o'troqlashgan 3d-qobiq elektronlarning erkin elektronlar orqali (bilvosita d-s) o'zaro ta'siri.

Bunday bilvosita f-s, f-d va d-s almashinuv o'zaro ta'sirlarining energitik o'lchovi vazifasini o'rganilgan Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi brikmlarning

paramagnit Kyuri temperaturasi- θ_p (§1.3 da qayd qilinganidek) bajaradi. θ_p va almashinuv o'zaro ta'sir parametri (yoki integrali) A orasida §1.3 da keltirilgan (1.24) bog'lanish, ya'ni quyidagi bog'lanish mavjud:

$$\theta_p = \frac{AG}{3k_B} . \quad (2.1)$$

Bundan quyidagini olamiz:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G} . \quad (2.2)$$

Bu ifodadagi de Jen faktori-G quyidagicha aniqlanadi:

$$G = (g_J - 1)^2 J(J + 1). \quad (2.3)$$

Bundagi Lande faktori g_J quyidagicha aniqlanadi:

$$g_J = 1 + \frac{[J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)]}{2J(j+1)} . \quad (2.4)$$

Bundagi L, S va J-4f (yoki 3d)-elektronlarning, Xund qoidalari bo'yicha aniqlanadigan to'la orbital, to'la spin va to'la mehanik moment kvant sonlari.

Toza KYeMda amal qiladi bilvosita f-s o'zaro ta'sir uchun va toza TGM(Fe, Co) -larda amal qiladigan bilvosita d-s o'zaro ta'sir uchun (2.2), mos ravishda, quyidagi ko'rinishlarda yoziladi:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G_{KYeM}} , \quad (2.5)$$

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G_{TGM}} . \quad (2.6)$$

Og'ir KYeMda, xususan Dyda, 4f-qobiq yarmidan ortig'iga to'lgani uchun Xund qoidalari bo'yicha $J=L+S$ va TGM da (§1.1 da qayd etilganidek) orbital mexanik (va demak orbital magnit) momentning "muzlab qolish" effekti tufayli $L=0$, $J=S$ bo'lishini e'tiborga olsak, (2.5) va (2.6) ifodalardagi de Jen faktorlari [(2.3) va (2.4) ni hisobga olganda] quyidagi ifodalarlar yordamida aniqlanadi:

$$G_{\text{KyeM}} = (g_J - 1)^2 J(J + 1), G_{\text{TGM}} = (g_s - 1)^2 S(S + 1). \quad (2.7)$$

Quyidagi muloxazalarga tayanib, o'rganilgan intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita f-s, f-d va d-s o'zaro ta'sir parametrini ham (2.2) yordamida hisoblash mumkin: 1) Teylor [4] bo'yicha f-d o'zaro ta'sir ham erkin elektronlar orqali amalga oshadi. Bu KYeM va TGM ionlaridagi 4f va 3d qobiqlarning magnit momentlari erkin elektronlarni qutblash orqali amalga oshadi. §1.3 dagi (1.19) va (1.23) ifodalardagi $A_{sf}^2(0)$ had o'rniga $A_{sf}(0) \cdot A_{sd}(0)$ ko'paytma olinadi; 2) Birikmalar uchun de Jen faktorini additivlik qoidasiga asosan hisoblash mumkin:

$$G = (1-x)G_{\text{KyeM}} + xG_{\text{TGM}}, \quad (2.8)$$

bundagi x -TGM ning atom ulushlaridagi konsentratsiyasi.

(2.7) va (2.8) ifodalarni hisobga olganda, o'rganilgan birikmalarda amal qiluvchi f-s, f-d va d-s bilvosita o'zaro ta'sir parametrlarini hisoblash uchun (2.2) dan quyidagi ifodalarni olish mumkin:

f-s o'zaro ta'sir uchun:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{\text{KyeM}}}, \quad (2.9)$$

f-d o'zaro ta'sir uchun:

$$\frac{A}{k_b} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{\text{KyeM}} + xG_{\text{TGM}}}, \quad (2.10)$$

d-s o'zaro ta'sir uchun:

$$\frac{A}{k_b} = \frac{3\theta_p}{xG_{\text{TGM}}}. \quad (2.11)$$

Shunday qilib, (2.5) va (2.6) ifodalar mos ravishda toza KYeM va toza TGMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrlarini (A/k_B) , (2.9), (2.10) va (2.11) ifodalar esa KYeM va TGM orasidagi birikmalarda amal qiladigan, mos ravishda, f-s, f-d, va d-s bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir

parametrlarini (A/k_B) yarim empirik usulda hisoblash imkoniyatini beradi.

Bunday usul [19,32-34] ishlarda ham qo'llanilgan.

2.2.Toza KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganish.

Toza KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini (2.5) ifoda yordamida yarim empirik usulda hisoblash mumkin.

§2.1dagi (2.5) ifodadan toza KYeM uchun, (2.3) xisobga olib, quyidagini olamiz:

$$\theta_p = \frac{A}{k_B} (g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (2.12)$$

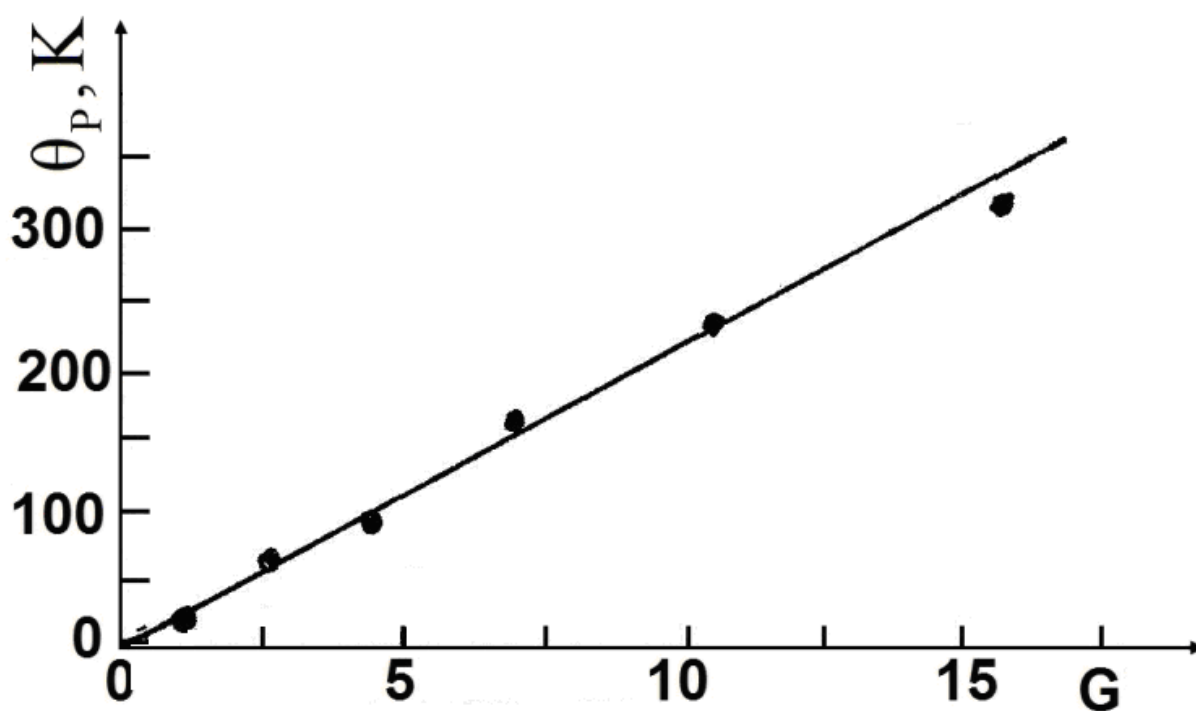
Geksogonal tipdagi kristall panjara tugunlarida joylashgan KYeM^{3+} ionlarining tashqi elektron qobiqlari ($5s^2 5p^6$) amalda bir xil bo'lib, bir metallardan ikkinchi metallga o'tganda deyarlik o'zgarmaydi. Almashinuv o'zaro ta'sir integrali A (1.18)ga asosan $n, A_{sf}(0), \Omega, E_F$ va panjara yig'indisi $\sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F (\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = F(y)$ larga bog'liq. Bu kattaliklarning barchasini deyarlik o'zgarmas deb qarash mumkin[32]. Shuning uchun ham, (2.12) ifodaga asosan toza KYeMning paramagnit Kyuri temperaturasi de Jen faktoriga to'g'ri proporsional bo'ladi deyish mumkin. Bu ifoda RKKI nazariyasiningushbu bashoratini yarim empirik usul bilan toza KYeM uchun tekshirib ko'rish imkoniyatini beradi.

Shunday qilib, almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash (2.5) ifoda bo'yicha, θ_p va G orasidagi proporsionallikni, ya'ni RKKI nazariyasining bashoratini tekshirish esa (2.12) ifoda bo'yicha bajarildi.

RKKI nazariyasining bashoratini tekshirish bo'yicha olingan natijalar 2.1 va ko'rgazmalilik uchun 2.1-rasmda, almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash esa 2.2-jadvalda keltirilgan. Hisoblashlarda θ_p ning tajribaviy qiymatlari 1.2-jadvaldan olindi.

Toza og'ir KYeM uchun θ_p va de Jen faktorining qiymatlari.

OKYeM	θ_p, K	g_J	J	$(g_J-1)^2 J(J+1)$
Gd	313	2	7/2	15.75
Tb	233	3/2	6	10.50
Dy	160	4/3	15/2	7.08
Ho	90	5/4	8	4.5
Er	58	6/5	15/2	2.55
Tm	18	7/6	6	1.16

2.1-rasm. KYeM (KYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) uchun $\theta_p(G)$ bog'lanish.

Toza OKYeM uchun bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri qiymatlari

KYeM	Qattiq holat		Suyuq holat	
	θ_p, K	$A/k_B, K$	θ_p, K	$A/k_B, K$
Gd	313	59.62	323	61.52
Tb	233	66.57	339	96.86
Dy	160	67.77	180	76.24
Ho	90	60	500	333.33
Er	58	68.2	110	129.41
Tm	18	46.27		

2.1- jadvaldan va 2.1-rasmdan (1-chiziq) ko'rinib turibdiki o'g'ir

KYeM (OKYeM) uchun θ_p va $G = (g_J - 1)^2 J(J+1)$ orasidagi proporsionallik haqidagi RKKI nazariyasining bashorati haqiqatdan ham bajariladi. Bu shundan dalolat beradiki OKYeMning magnit tartiblangan holatini RKKI tipidagi o'zaro ta'sir hosil qiladi.

2.2-jadvalni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, A/k_B parametirning qiymati OKYeM qattiq holatdan suyuq holatga o'tganda oshadi. Buni qattiq holat – suyuq holat fazaviy o'tishda θ_p qiymatining oshishi bilan tushuntirish mumkin.

2.3.Dy-(Fe,Co) sistemalarida amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usilda o'rganish.

Dy-(Fe,Co) sistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni §2.1da bayon qilingan yarim empirik usul bilan o'rganildi. Bu sistemalarda amal qilishi mumkin bo'lgan f-s, f-d va d-s almashinuv o'zarota'sirlarning parametrlarini Dy-(Fe,Co) sistemalari uchun (2.9),(2.10) va (2.11) ifodalardan olinadigan quyidagi ifodalar yordamida hisoblandi:

f-s o'zaro ta'sir uchun

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{Dy}} \quad (2.13)$$

f-d o'zaro ta'sir uchun

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{Dy} + xG_{TGM}} \quad (2.14)$$

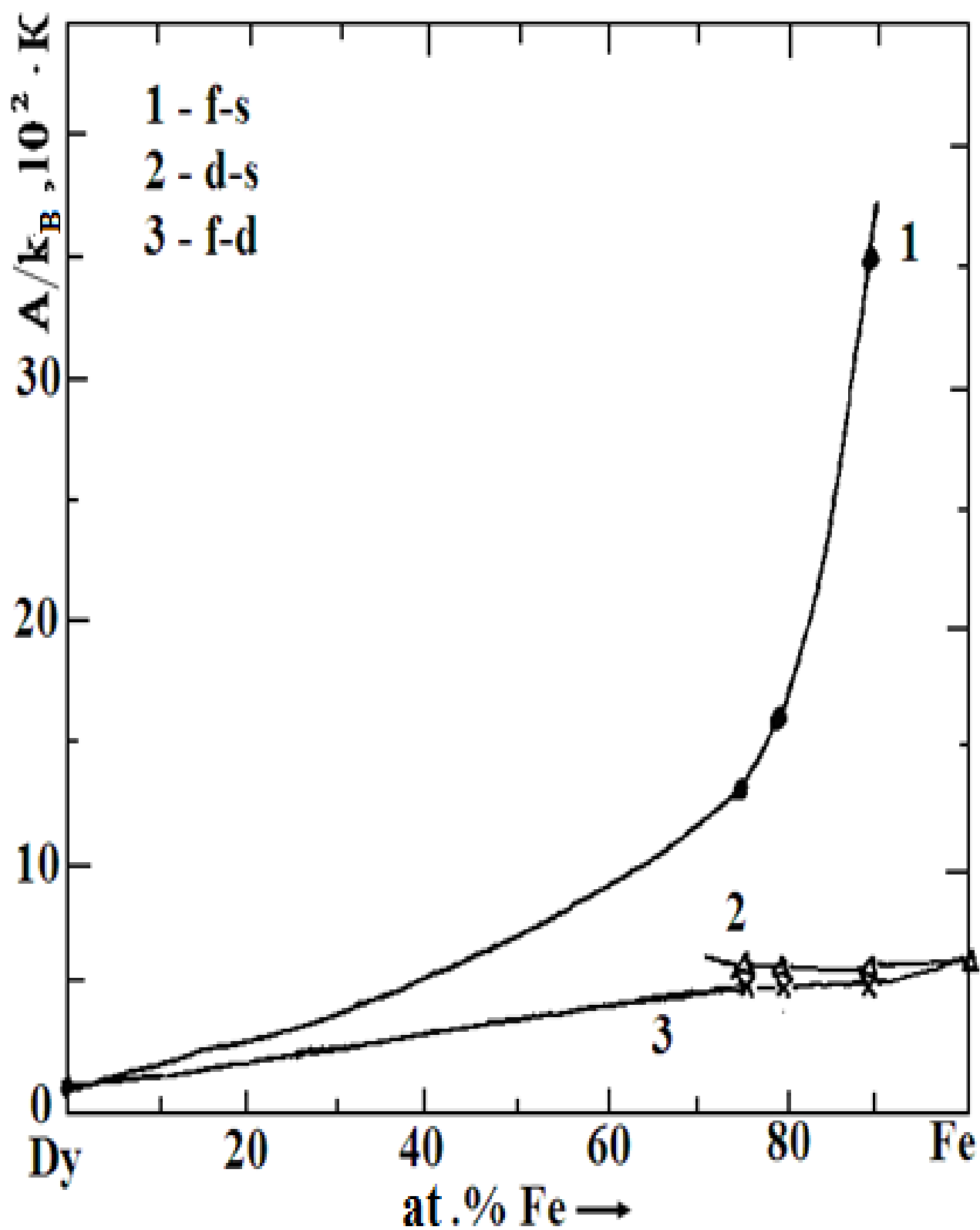
d-s o'zaro ta'sir uchun

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{xG_{TGM}} \quad (2.15)$$

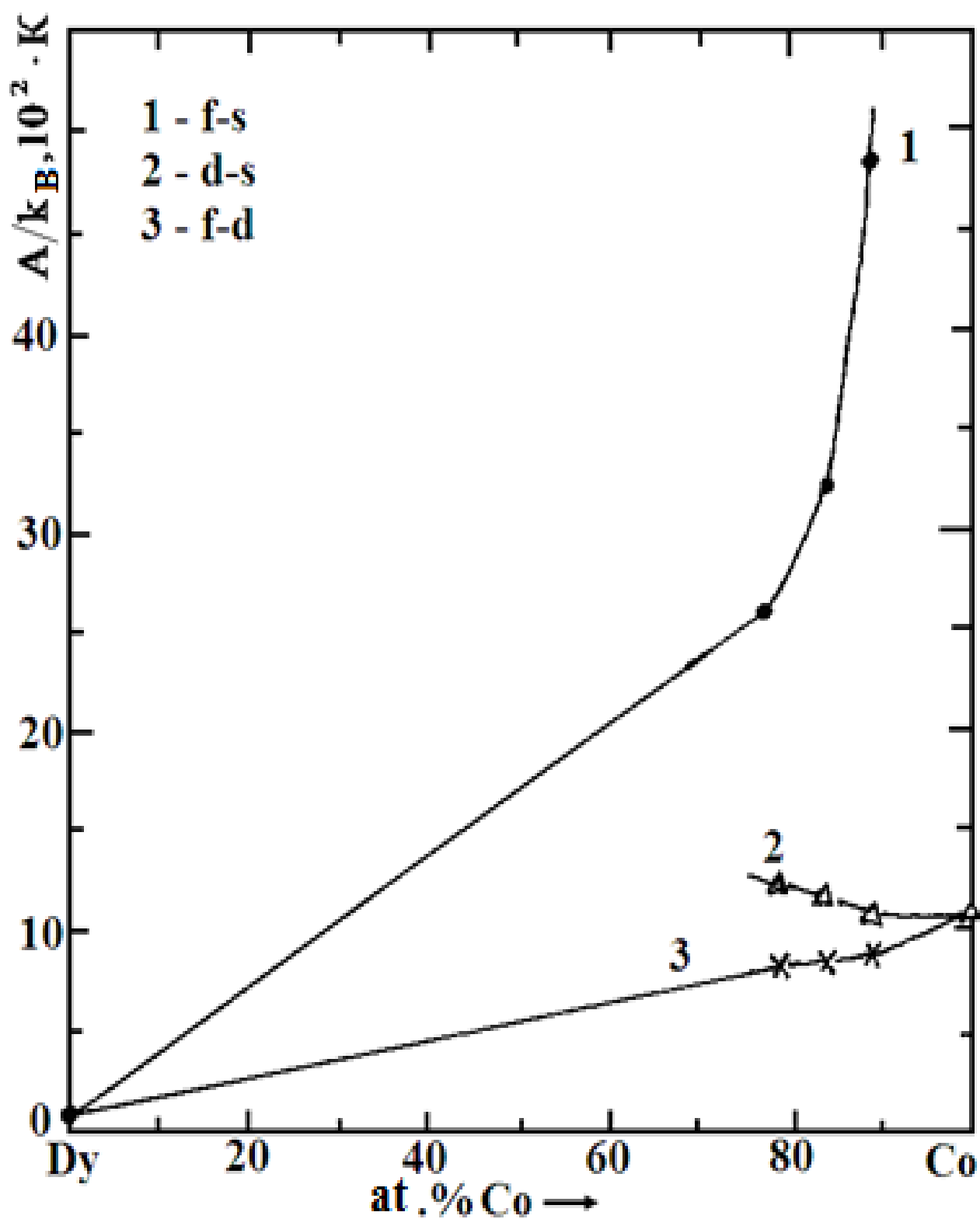
Bulardagi(kasrlarning maxrajlaridagi) de Jen faktorlarini (2.7) ifodalar bo'yicha hisoblashda Dy^{3+} ioning asosiy holati uchun J va g_j ($J=15/2$ va $g_j=4/3$)larning, Fe^{3+} va Co^{2+} ionlarining asosiy holati uchun esa S va g_s ($S=7/2$, $g_s=2$ va $S=3/2$, $g_s=2$)larning (1.1 va 1.2 jadvallarda keltirilgan) qiymatlaridan foydalanildi. Hisoblash natijalari 2.3-jadvalda va ko'rgazmalai ravishda 2.2 va 2.3-rasmlada keltirilgan.

**Dy-TGM(TGM=Fe,Co) sistemalarida amal qiladigan turli xildagi
bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirlar parametrlarining qiymatlari.**

Na'muna	$A/k_B, 10^2 K$					
	f-s-bog'lanish		d-s-bog'lanish		f-d-bog'lanish	
	Qattiq holat	Suyuq holat	Qattiq holat	Suyuq holat	Qattiq holat	Suyuq holat
Dy	0,678	0,762	-	-	-	-
DyFe ₃	12,706	5,472	3,429	1,477	2,700	1,163
Dy ₆ Fe ₂₃	15,959	10,905	3,372	2,304	2,784	1,902
Dy ₂ Co ₁₇	35,496	30,373	3,379	2,885	3,079	2,637
δ -Fe	-	-	3,771	1,440	-	-
α -Fe	-	-	3,610	-	-	-
Dy ₂ Co ₇	22,768	15,459	12,236	8,236	7,983	5,373
DyCo _{5,2}	31,911	22,703	11,566	8,229	8,489	6,040
Dy ₂ Co ₁₇	48,930	46,510	10,842	10,306	8,949	8,437
Co	-	-	11,264	12,384	-	-



2.2-rasm. Dy-Fe sistemasida $\left(\frac{A}{k_B}\right)$ ning Fe konsentratsiyasiga bog'lanishlari.



2.3-rasm. Dy-Co sistemasida $\left(\frac{A}{k_B}\right)$ ning Co konsentratsiyasiga bog'lanishlari.

2.3-jadvalni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, $\left(\frac{A}{k_B}\right)$ parametrlarning qiymatlari qattiq holatda suyuq holatdagiga nisbatan katta. 2.3-jadvalni va 2.2,2.3-rasmlarni $\left(\frac{A}{k_B}\right)$ ni TGM atomlari konsentratsiyasiga bog'liq ravishda tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, Dy-Fe va Dy-Co sistemalaridagi o'rganilgan barcha birikmalarda f-s o'zaro ta'sir boshqa o'zaro ta'sirlarda kuchli bo'lib, uning qiymati Fe yoki Co atomlari konsentratsiyasining oshishi bilan oshadi. d-s o'zaro ta'sir kattalik jihatidan f-d va f-s o'zaro ta'sirlar oralig'ida yotadi. f-d o'zaro ta'sirning qiymati Dy-(Fe,Co) sistemalarida eng kichik hisoblanadi.

Shunday qilib, Dy-(Fe,Co) sistemalaridagi o'rganilgan barcha birikmalarda f-s bilvosita o'zaro ta'sir, ya'ni RKKI tipidagi o'zaro ta'sir eng kuchli bo'lib shu birikmalarning magnit tartiblangan holatining hosil bo'lishida asosiy rol o'ynaydi deb xulosa qilish mumkin.

II-bobga doir xulosalar.

II-bobda bajarilgan ishlarni tahlil qilib va umumlashtirib quyidagi xulosalarni aytish mumkin:

1. KYeM-TGM($TGM=Fe,Co$) binarsistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik o'rganish usulining mohiyati bayon qilindi.
2. Toza og'ir KYeM uchun RKKI nazariyasining paramagnit Kyuri temperaturasining de Jen faktoriga proporsionalligi haqidagi bashoratining to'g'riligi teksgirib ko'rildi va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri hisoblandi.
3. Dy-(Fe,Co) binar sistemalarida amal qilishi mumkin bo'lgan barcha bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir turlari (f-s,f-d va d-s) parametrlari yarim empirik usulda hisoblandi.
4. Dy-(Fe,Co) binar sistemalaridagi birikmalarda amal qiladigan f-s,f-d va d-s bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirlardan, birikmalarning magnit tartibli holatining hosil bo'lishida, f-s bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir hal qiluvchi rol o'ynashi aniqlandi.

Xulosalar

Ushbu bitiruv malakaviy ishida olingan asosiy natijalarning mazmunini o'zida aks ettiruvchi quyidagi xulosalarga kelish mumkin:

1. Bitiruv malakaviy ishining tadqiqot ob'ektlari –Dy-(Fe,Co) binar sistemalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini(integralini) yarim empirik usulida o'rganish uchun zarur bo'lgan, bugungi kunda ilmiy adabiyotlarda mavjud bo'lgan, nazariy va tajribaviy ishlar o'rganilib, ularga qisqacha sharh berildi.
2. Tadqiqot ob'ektlarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini, shu ob'ektlar paramagnit Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlaridan foydalanibo'rganishning yarim empirik usuli bayon qilindi.
3. Toza og'ir KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrihisoblandi. Og'ir KYeM uchun paramagnit Kyuri temperaturasining de Jen faktoriga proporsionalligi haqidagi RKKI nazariyasining bashorati tasdiqlandi.
4. Dy-(Fe,Co) binar sistemalarda amal qilishi mumkin bo'lgan barcha bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir turlari(f-s,f-d,d-s) yarim empirik usulda birinchi marta o'rganildi.Bu sistemalaridagibarchao'rganilgan birikmalardaf-s bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir, ya'ni RKKI tipidagi o'zaro ta'sir eng kuchli bo'lib, shu birikmalar magnit tartiblangan holatining hosil bo'lishida asosiy rol o'ynashi aniqlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Вонсовский С.В. «Магнетизм». – М.: Наука, 1971 – 1032с.
2. Тейлор К. , Дарби М. «Физика редкоземельных соединений».-М.: Мир, 1974 – 374с.
3. Белов К.П. , Велянчикова М. «Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики». –М.: Наука, 1985 – 320с.
4. Тейлор К. Интерметаллических соединений редкоземельных металлов. – М.: Мир, 1974 – 374с.
5. Аражис С. , Колвин Р. Парамагнитная восприимчивость редкоземельных металлов при повышенных температурах. В.Сб.: «Новые исследования редкоземельных металлов». – М.: Мир, 1984. с.100-135.
6. Кондон Е. , Шортли Г. «Теория атомных спектров». – М.: И.Л. 1949, с. 189-191.
7. Van Flack J.H. The theory of electric and magnetic suscrtibilities. – Oxford: Univ. pess, 1932 – 384p.
8. Сельвуд П.И. Магнетохимия. – М.: И.Л. 1958 – 460с.
9. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений.-М.: Изд-во МГУ,1976.-367 с.
10. Ruderman M.A. and Kittel C. Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic moments of conduction Electrons.- Phys. Rev.–1954.–Vol.96.– N1.– pp. 99-102.
11. Kasuya T. A Theory of Metallic Ferro-and Antiferromagnetism on Zener's Model.//Prog. Theor. Phys. (Kyoto).– 1956.– V.16.– №1.– pp. 45-55;
Electrical lesistance of Ferromagnetic Metals//Prog.Theor. Phys. (Kyoto).– 1966.– V.16.– pp. 58-63.
12. Yosida K. Magnetic properties of Cu-Mn Alloy//Phys.Rev.–1957.– V.106.– N5.– pp. 893-898.
13. Kriessman C.J.,MoGuireT.H. The Magnetic susceptibilities of Hafnium,Gadolinium and Manganese//Phya.Rev.–1953.Vol.90.–N2.–p374.

14. Aaraj S. and Colvin R.V. Paramagnetism of Polycrystalline Gadolinium, Terbium and Dysprosium Metals// J. Appl. Phys..– 1961.– Vol.32.– №3.–pp. 336S-337S.
15. Müller M.,Huber E.,Güntherodt H.J. Magnetic susceptibility of liquid heavy Rare Earth Metals//J.de Physique.–1979.–T.40.– Suppl.N5.–pp. c5-260- c5-261.
16. Кувандиков О.К., Шакаров Х.О., Усанов Ш.Х, Хамраев Н.С. Магнитная восприимчивость интерметаллидов в системе Gd-In при высоких температурах//Известия вузов.– физика.– 1988.– №7.– с.115-116.
17. Чечерников В.И. Магнитная восприимчивость редкоземельных металлов Ho, Dy, Tb и Gd.// Физика металлов и металловедение.– 1962.– 13.– N3.– с.458-461.
18. Aaraj S., Miller D.S. Magnetic Behavior of Polyorystalline neodymium, holmium and erbium from 300 to 1500⁰K//J.Appl.Phys..– 1960.–Vol.31.–N5.– pp.325S-326S.
19. Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллических соединений лантаноидов с индием при высоких температурах.// Кандидатская диссертация, Самарканд, 1983.
20. Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллидов в системе Dy-In при высоких температурах//Известия ВУЗов. Россия.– Физика. 2005.– №1.– с.88-89.
21. Андропов В.А. Магнитная восприимчивость и электронная структура бинарных сплавов кобальта, никеля с некоторыми нормальными металлами при высоких температурах: Канд. Диссертация.– Свердловск, 1977.
22. Невзорова Э.Г. Исследование парамагнитных свойств твердых и жидких сплавов железа с кремнием, германием, алюминием и углеродом: Канд. диссертация.– Свердловск, 1973.
23. Terry E.M. The magnetic properties of iron, nickel and cobalt above the Curie point and Reenson's quantum theory of magnetism//Phys.Rev..–9.–1977.– pp.394-413.

24. Довгопол С.Г., Радовский И.З., Гельд Г.В. Влияние плавления на магнитные характеристики железа, кобальта и никеля//ДАН СССР. – 212. – 1973. – с.83-85.
25. Вертман А.А., Самарин А.М. Магнитная восприимчивость никеля, кобальта и железа при высоких температурах в жидком состоянии// ДАН СССР.– 134.– 1960.– с.326-329.
26. Невзорова Э.Г., Гальтеков Б.П., Радовский И.З., Гельд П.В. Магнитная восприимчивость никеля и железа при высоких температурах// Изв.ВУЗов.– Черная металлургия.– № 9.– 1972.– с.108-109.
27. Kuvandikov O.K., Shakarov H.O., Salakhitdinova M.K. Magnetic properties of intermetallics of REM-TM systems of high temperatures//Uzbek journal of physics. – 2001.– v.3.– №1-2.– pp.67-74.
28. КувондииковО. К., ШакаровХ.О.,ШодиевЗ.М.Диспрозийбилантемирбирикмаларинингмагнитхос салариниюкоритемпературалардаурганиш//СамДУилмий тадқиқотлар ахборотномаси.– 2003 й..– №3.– 38-40 б.
29. Кувондииков О. К., Шакаров Х.О.,Шодиев З.М.Изучение магнитных свойств интерметаллидов в системе Dy-Fe в твердом и жидком состояниях//Металлофизика и новейшие технологии. 2005.– т.27.– №3.– с.419-425.
30. Кувандиков О. К.,Шакаров Х.О., Шодиев З. М. Магнитные свойства интерметаллидов в системе Dy-Co при высоких температурах//СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. Физика. 2006 йил.– №5.– с. 38-43.
31. Кувондииков О. К., Шакаров Х.О.,Шодиев З.М.Изучение магнитных свойств интерметаллидов в системе Dy-Co в твердом и жидком состояниях//Металлофизика и новейшие технологии. НАН Украины. –2007. т.29.– №11.– сс.1459-1466.
32. Никитин С. А. Температура магнитного упорядочения и интеграл косвенного обмена в редкоземельных сплавах тербий – иттрий и тербий – гадолиний// ЖЭТФ.– 1979.– т.77.– вып.1.– с.343-351.

33. Х.О. Шакаров. Парамагнитная температура Кюри и косвенное обменное взаимодействие в системе РЗМ-In//Металлофизика и новейшие технологии. Украина(г. Киев), 2013, Т. 35, №8, СС.1013-1020.

34. Х.О. Шакаров. Полуэмпирическое исследование косвенное обменное взаимодействие в системе РЗМ-In//Известия вузов. Физика. Россия (г. Томск), 2014, №1.сс.100-103.

35. www.ziyonet.uz

36. www.edu.uz

37. www.lex.uz

38. www.library.uz