

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIIY VA O'RTA MAXSUS
TA'LIM VAZIRLIGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI**

**FIZIKA FAKULTETI
“5440100 – FIZIKA” TA'LIM YO'NALISHI
“Umumiy fizika” kafedrası**

QODIROVA NILUFAR IKMATILLO QIZI

**KAMYOB YER METALLARINING INDIY BILAN BIRIKMALARI
PARAMAGNIT KYURI TEMPERATURASI VA ALMASHINUV O'ZARO
TA'SIR ORASIDAGI BOG'LANISHNI O'RGANISH**

**“5440100 – Fizika” ta'lim yo'nalishi bo'yicha bakalavr
darajasini olish uchun**

BITIRUV MALAKAVIY ISH

Ilmiy rahbar: dots. Shakarov X. O.

Bitiruv malakaviy ish “Umumiy fizika” kafedrasida bajarildi. Ish kafedraning 2017 yil _____ iyundagi majlisida muhokama qilindi va himoyaga tavsiya etildi (_____-bayonnoma).

Kafedra mudiri:_____ dots. Rajabov R. M.

Bitiruv malakaviy ish YaDAK ning 2017 yil “____” _____dagi majlisida himoya qilindi va _____ball bilan baholandi (_____-bayonnoma).

YaDAK raisi:_____

A'zolari:_____

Samarqand - 2017

MUNDARIJA

KIRISH.....	3
I-BOB. KAMYOB YER METALLARI (KYeM)-In BINAR SISTEMASIDAGI BIRIKMALAR KONDENSIRLANGAN HOLATINING ELEKTRON TUZILISHI VA PARAMAGNIT XOSSALARIGA OID TADQIQOTLARGA SHARH.....	6
1.1.Kamyob Yer metallarining(KYeM) elektron tuzilishi.....	6
1.2.KYeM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.....	10
1.3.KYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyasi....	14
1.4.Og'ir KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining magnit xossalarini yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari.....	17
I-bobga doir xulosalar.....	27
II-BOB. OG'IR KYeM-In SISTEMASIDA AMAL QILADIGAN BILVOSITA ALMASHINUV O'ZARO TA'SIRNI YARIM EMPIRIK USULDA O'RGANISH NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI.....	28
2.1.Toza OKYeMda va ularning indiy bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganishning yarim empirik usuli	28
2.2.Toza og'ir KYeMda (OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash natijalari.....	32
2.3.OKYeM-In(OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalaridagi birikmalarda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir parametrini hisoblash natijalari.....	34
II-bobga doir xulosalar.....	41
XULOSALAR.....	42
FOYDALANGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	43

KIRISH.

Mavzuning dolzarbligi. Bugungi kunda kamyob Yer metallari(KYeM) va ular asosidagi 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 ob'ektlarda kechikib to'ladigan 4f – elektron qobiqning 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 xossali yangi magnit materiallari yaratishda keng qo'llaniladi. Bu ob'ektlarning fizik xossalarini o'rganish ilmiy jihatdan ham ahamiyatlidir. Chunki, bu ob'ektlardagi almashinuv o'zaro ta'sir tabiati hali to'la aniqlanmagan. Ularning o'ziga xos magnit xossalarini 4f - 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, KYeMning nomagnit metallar bilan birikmalarning magnit xossalari haqidagi ma'lumotlar ularning magnit tartiblangan holati uchun yetarli darajada bo'la 4turib, magnit tartibsiz-paramagnit holati uchun, ya'ni qattiq va suyuq holatlarini qamraydigan yuqori temperaturalardagi ma'lumotlar bugungi kundagi adabiyotlarda 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, shu jumladan 4f- qobiqli materiallarning magnit xossalari (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'lanishi[$\chi(T)$] natijalaridan foydalanib shu materiallarda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sir energiyasi haqida ma'lumot olish mumkin.

Tadqiqotning maqsadi: Yuqorida aytilganlaridan kelib chiqqan holda ushbu malakaviy bitiruv ishida og'ir KYeM (KYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm)va ularning indiy bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish.

Tadqiqotning vazifalari quydagilardan iborat:

1. KYeMning elektron tuzilishi, KYeM paramagnetizmi uchun Van-Flek va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalarini o'rganish;
2. Og'ir KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining magnit qabul qiluvchanligini qattiq va suyuq holatlarda o'lchash bilan bog'liq ishlarni o'rganib, ulardan paramagnit Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlarini aniqlash;
3. KYeM va uning indiy bilan birikmalarining tajribaviy paramagnit Kyuri temperaturasi qiymatlaridan foydalanib ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblashni (yarim empirik)o'rganish;
4. Toza og'ir KYeM va ularning indiy bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini yarim empirik usulda o'rganish;
5. Ishda olingan natijalarni chuqur tahlil qilib tegishli xulosalar chiqarish.

Tadqiqod obyekti: KYeM-In(KYeM = Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) binar systemalarida xosil bo'lgan intermetallic birikmalar.

Tadqiqot pretmeti: KYeM-In(KYeM = Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) binar sistemalarida hosil bo'ladigan intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir parametirini ularning paramagnit temperaturasining tajribaviy qiymatlaridan foydalanib hisoblash.

Tadqiqod usuli: KYeM-In(KYeM= Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) sistemasidagi intermetallik birikmalarda amal qiladigan bilvosita o'zaro tasirni o'rganishning yarim empirik usuli.

Tadqiqodning ilmiy yangilidi: Bu bitiruv malakaviy ishida KYeM-In(KYeM=Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) sistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'siri yarim empirik usul bilan birinchi marta o'rganildi.

Tadqiqotning natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati: Ushbu bitiruv malakaviy ishida olingan natijalar KYeMning nomagnit metallar bilan hosil qiladigan birikmalarida amal qiladigan ilvosita o'zaro ta'sir nazariyasini yuqori temperaturalarda takomillashtirishga va ulardan yangi magnit materiallari yaratishga xizmat qiladi.

Himoya qilinadi: 1. KYeM va uning nomagnit metallar bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirini o'rganishning yarim empirik usuli;

2. Toza KYeM va KYeM-In(KYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalaridagi birikmalarning tajribaviy paramagnit Kyuri temperaturasi qiymatlaridan foydalanib, ularda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirning parametrini hisoblash bo'yicha olingan natijalar;

Bitiruv ishning tuzilishi va hajmi. Bitiruv malakaviy ishi kirish, ikkita bob, xulosalar va 26 ta nomdagi ilmiy adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan bo'lib, 45 bet lotin alifbosida, bosma shaklda bayon qilingan. Uning mazmuni 10 ta rasm va 7 ta jadval yordamida ko'rgazmali bayon qilingan.

**I-BOB. KAMYOB YER METALLARI (KYeM)-In BINAR
SISTEMASIDAGI BIRIKMALAR KONDENSIRLANGAN HOLATINING
ELEKTRON TUZILISHI VA PARAMAGNIT XOSSALARIGA OID
TADQIQOTLARGA SHARH.**

1.1. Kamyob Yer metallarining(KYeM) elektron tuzilishi.

Kechikib to'ladigan elektron qobig'larga (3d,4d,5d,6d,4f,5f) egabo'lgan atomlardan tashkil topgan metallar o'tkazuvchan metallar nomi bilan ataladi. KYeM ga, 4f-elektron qobig'i kechikib to'ladigan, lantandan (z=57) boshlab lyutetsiygacha (z=71) bo'lgan, lantanoyidlar ham deb ataladigan elementlar kiradi.

KYeM atomlarida elektronlarning qobiqlar bo'yicha joylashishi, 4f,5d va 6s-qobiqlarni hisobga olmaganda, xuddi ksenon atomidagidek bo'ladi. KYeM atomlarida 4f-gacha bo'lgan ichki qobiqlar elektronlar bilan to'lgan bo'lib, ular quyidagi elektron konfiguratsiyaga egadir: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10}$; tashqi elektron qobiqlar esa, quyidagi elektron konfiguratsiyasi ega: $4f^n 5s^2 5p^6 5d^{0-1} 6s^2$ [1-4]. Bundagi n-4f qobiqdagi elektronlar soni bo'lib, n=0 (La) dan n=14 (Lu) gacha o'zgaradi.

Kristal holatda KYeM atomlari uch karra ionlashgan holatda, kristall panjara tugunlarida joylashadilar. $5d^1 6s^2$ -qobiqlardagi elektronlar, kristall panjara hosil bo'lish jarayonida, panjara ichida umumlashgan, ya'ni elektr tok hosil qilishda ishtirok etadigan elektronlarga aylanadi. Bu metallarda 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-qobiqlardagi elektronlar kristall panjara tugunida o'troqlashgan bo'lib, tashqi $5s^2 5p^6$ -to'lgan qobiqlar bilan atrofdagi ionlar maydonidan ekranlashgandir. Shuning uchun ham 4f-elektronlar KYeM da xuddi erkin atom va ionlardek energetik holatda bo'ladi. KYeM ning "Erkin ion" modelining mohiyati shundan iboratdir. KYeM uchun bu modelning

o`ziga xos tomoni shundaki, birinchidan, 4f-elektronning tugunlararo bevosita ta`siri (f-f) mavjud emas deb qaraladi; ikkinchidan esa, tugunlardagi 4f-elektronlar orasida spin-orbital (yoki $\vec{L} \cdot \vec{S}$) o`zaro ta`sir deb ataladigan ta`sir kuchli bo`lib, bunda 4f-elektronning S-spin va L-orbital momentlari Russel-Saunders bog`lanishi bo`yicha qo`shilib, ionning to`la mexanik momenti – J Xundning uchinchi qoidasiga asosan topiladi: 4f-qobiq yarmigacha to`lganda (yengil KYeM uchun)  $J=L-S$ , yarmidan ortig`iga to`lganda (og`irKYeM uchun) $J=L+S$ kabi topiladi.

Spin-orbital bog`lanish energiyasi 4f-elektronlarning birinchi uyg`ongan va asosiy holat energiyalarining farqi(ΔE) orqali aniqlanadi. KYeM ionlaridagi eng past energiya sathlarining joylashish tartibi bu elementlarning magnit xossalarini belgilaydi. Energetik sathlar haqidagi malumotlar esa fluorestent va infraqizil nurlarning optik yutilish spektridan tajribada aniqlanadi. Nazariy jihatdan energetik sathlar kengligini Gaudsmit formulasi [5] va Landening intervallar qoidasi [6] yordamida hisoblash mumkin. ΔE Gaudsmitning quyidagi formulasi bo`yicha hisoblanadi:

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

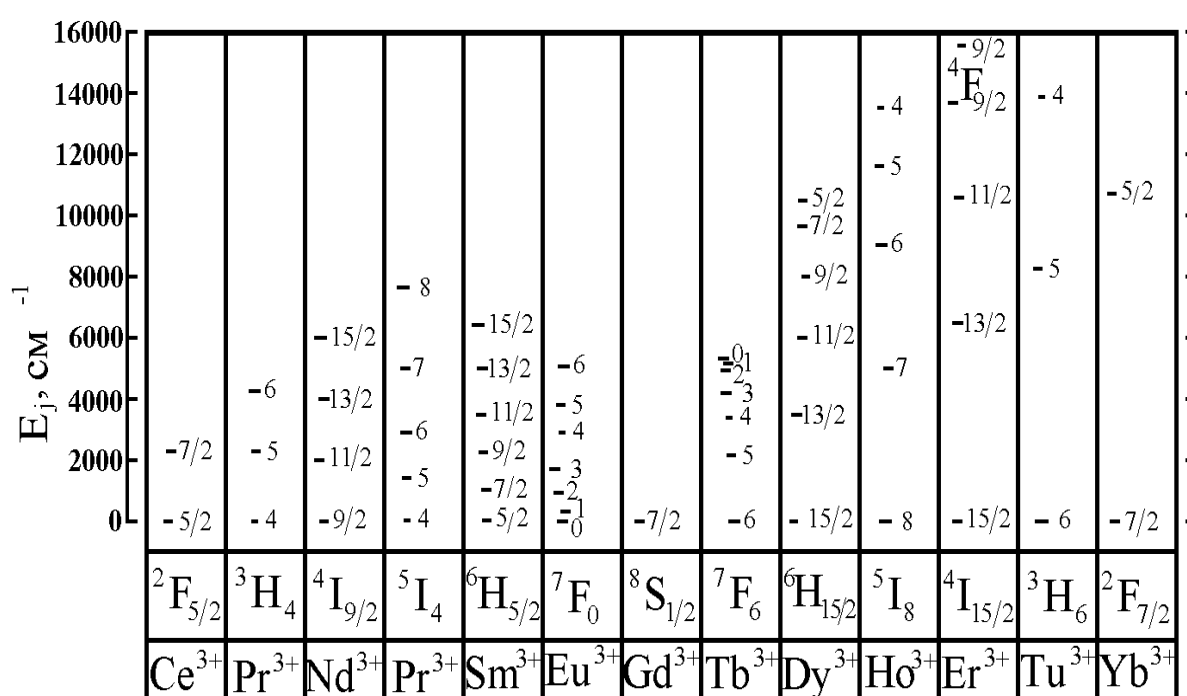
Bunda, ΔE -asosiy va uyg`ongan sathlar energiyalarining farqi, e - elektronning zaryadi, m-elektronning massasi, h-Plank doimiysi, n - va l – mos ravishda, bosh va orbital kvant sonlari, L-4f-qobiqdagi elektronlarning to`la orbital kvant soni, z-atomning tartib nomeri, σ -ekranlash doimiysi.

Landening intervallar qoidasining mohiyati quyidagicha:

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

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

(1.1) ifodada $35 \leq 36$ deb qabul qilib va (1.2) ifoda bilan hisoblash natijalari (1.1.rasm) va spektroskopik tajribalarning natijalari shuni ko'rsatadiki, og'ir KYeM uchun $E \geq 1000 \text{ cm}^{-1}$. Issiqlik energiyasi ($k_B T$) 300K da $208,5 \text{ cm}^{-1}$ ga, 1500K da esa $1042,25 \text{ cm}^{-1}$ ga tengdir. Bu esa og'ir KYeM uchun $\Delta E \gg kT$ shart bajariladi deb aytishga imkon beradi. KYeM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi haqidagi malumotlar 1.1 – jadvalda keltirilgan.



1.1-rasm. KYeM³⁺ erkin ionlaridagi 4f-elektronlarning energetik sathlari.

1.1-jadval

KYeM atomlari va ionlarining elektron tuzilishi

Z	Element	Atomlar uchun		KYeM ³⁺ ionlari uchun					
		Elektron konfiguratsiya	Term	Elektron konfigur-ya	S	L	J	Term	E _{J+1} , sm ⁻¹
57	La	$4f^0 5s^2 5p^6 5d^1 6s^2$	$^2D_{3/2}$	$4f^0 5s^2 5p^6$	0	0	0	1S_0	-
58	Ce	$4f^1 5s^2 5p^6 5d^1 6s^2$	3H_4	$4f^1 5s^2 5p^6$	1/2	3	5/2	$^2F_{5/2}$	2253
59	Pr	$4f^2 5s^2 5p^6 6s^2$	$^6I_{9/2}$	$4f^2 5s^2 5p^6$	1	5	4	3H_4	2171
60	Nd	$4f^4 5s^2 5p^6 6s^2$	5I_4	$4f^4 5s^2 5p^6$	3/2	6	9/2	$^4I_{9/2}$	2028
61	Pm	$4f^5 5s^2 5p^6 6s^2$	$^6H_{5/2}$	$4f^5 5s^2 5p^6$	2	6	4	5I_4	-
62	Sm	$4f^6 5s^2 5p^6 6s^2$	7F_0	$4f^6 5s^2 5p^6$	5/2	5	5/2	$^6H_{5/2}$	1100
63	Eu	$4f^7 5s^2 5p^6 6s^2$	$^8S_{7/2}$	$4f^6 5s^2 5p^6$	3	3	0	7F_0	350
64	Gd	$4f^7 5s^2 5p^6 5d^1 6s^2$	9D_2	$4f^7 5s^2 5p^6$	7/2	0	7/2	$^8S_{7/2}$	-
65	Tb	$4f^8 5s^2 5p^6 5d^1 6s^2$	$^8H_{17/2}$	$4f^8 5s^2 5p^6$	3	3	6	7F_6	2101
66	Dy	$4f^{10} 5s^2 5p^6 6s^2$	5I_8	$4f^9 5s^2 5p^6$	5/2	5	15/2	$^6H_{15/2}$	3200
67	Ho	$4f^{11} 5s^2 5p^6 6s^2$	$^8I_{15/2}$	$4f^{10} 5s^2 5p^6$	2	5	8	5I_8	5050
68	Er	$4f^{12} 5s^2 5p^6 6s^2$	3H_6	$4f^{11} 5s^2 5p^6$	3/2	6	15/2	$^4I_{15/2}$	8000
69	Tm	$4f^{13} 5s^2 5p^6 6s^2$	$^2F_{7/2}$	$4f^{12} 5s^2 5p^6$	1	5	6	3H_6	8250
70	Yb	$4f^{14} 5s^2 5p^6 6s^2$	1S_0	$4f^{13} 5s^2 5p^6$	1/2	3	7/2	$^2F_{7/2}$	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	1S_0	-

1.2. KYEM uchun paramagnetizmning Van-Flek nazariyasi.

Erkin ionlardagi kechikib to'ladigan elektron qobiqdagi elektronlarning energetik sathlari energiyasi E -ni bilgan holda Van-Flek tomonidan ishlab chiqilgan paramagnetizmning kvanto-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 KYeMning 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:

$$\alpha_J = \frac{\mu_B^2}{6(2J+1)} \left[\frac{F_{J+1}}{E_{J+1} - E_J} - \frac{F_J}{E_J - E_{J-1}} \right]. \quad (1.5)$$

Bu ifodadagi F_J quyidagicha aniqlanadi:

$$F_J = \frac{1}{J} [(S+L+1)^2 - J^2] \cdot [J^2 - (S-L)^2]. \quad (1.6)$$

(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 ( $\frac{\mu_B H}{k_B T} \ll 1$ ) 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'sirini, bu o'zaro ta'sir energiyaga proportsional bo'lgan, Kyurining paramagnit temperaturasi deb ataladigan θ_p kattalikni (1.3) ifodaning birinchi hadi maxrajiga $T \rightarrow (T - \theta_p)$ almashtirish olib kiritish 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 olmaslik mumkin emasligini hisobga olsak (1.3) dan Kyuri-Veyss qonunining umumlashgan ifodasini olamiz:

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

KYeM ionlarining asosiy magnit xarakteristikalarini 1.2 – jadvalda keltirilgan.

1.2-jadval

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.	-

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

Kechikib to'ladigan qobiqqa(3d,4f) ega bo'lgan atomlardan (aniqrog'i, kristall panjara tugunlarida joylashgan 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 metallari (KYeM) (yoki lantanoidlar)kristall panjarasi tugunlarida, 4f – kechikib to'ladigan elektron qobiqqa ega bo'lgan, ionlar joylashadilar.4f qobiq elektronlari tashqiy $5s^25p^6$ 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) 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 bu temperatura eng yuqori hisoblanadi – 292 K) hosil bo'lar ekan. Bunday tartiblangan holatni 4f – qobiq elektronlarining o'tkazuvchan - $6s^2$ va $5d^1$ - 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 KYeM uchun birinchi marta Ruderman, Kittel, Kasuya va Iosidalar tomonidan ishlab chiqilgani uchun bilvosita almashinuv o'zaro ta'siri **RKKI o'zaro ta'siri**, bunga oid nazariya **RKKI nazariyasi** ham deb yuritiladi. Bu nazariya [1]da batafsil yoritilgan.

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

panjaraning, $\vec{R}_m$ -radius vektor bilan aniqlanadigan, m-tugunda joylashgan 4f elektronlarga ta'sir qiladi. Natijada n va m-tugunlarda joylashgan 4f qobiqlardagi elektronlarning magnit momentlari tartibga keladi. "Erkin" elektronlarning magnit qutblanishi quyidagicha yuz beradi: "erkin" elektronlar modelidan ma'lumki, umumlashgan elektronlarni odatdagi sharoitlarda 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 elektron qobiqning magnit ta'siri natijasida spini "yuqoriga" yo'nalgan erkin elektronlarning magnit momentlaribu qobiqning magnit momentiga parallel joylashadi. Spini "yuqoriga" yo'nalgan elektronlarning magnit momentlari 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.

KYeMning paramagnit Kyuri temperaturasi - θ_p RKKI o'zarota'sir energiyasining o'lchovi hisoblanadi va u quyidagi ifoda bilan aniqlanadi[1]:

$$\theta_p = \frac{3\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) (g_J - 1)^2 J(J+1) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)), \quad (1.14)$$

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;

$$F(y) = F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = (y \cos y - \sin y) / y^4 \quad (1.15)$$

– Ruderman – Kittel funksiyasi. (1.14) ifodadagi

$$G = (g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (1.16)$$

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

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}, \quad (1.17)$$

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

RKKI nazariyasi bo'yicha KYeM da almshinuv o'zaro ta'sir parametri (integrali)ni hisoblash uchun quyidagi ifoda olingan [1,4]:

$$A = \frac{9\pi^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F (\vec{R}_n - \vec{R}_m)). \quad (1.18)$$

Buni hisobga olgan holda (1.14)dan quyidagi ifodani olamiz:

$$\theta_p = \frac{1}{3k_B} AG. \quad (1.19)$$

1.4. Og'ir KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining magnit xossalari yuqori temperaturalarda o'rganish natijalari.

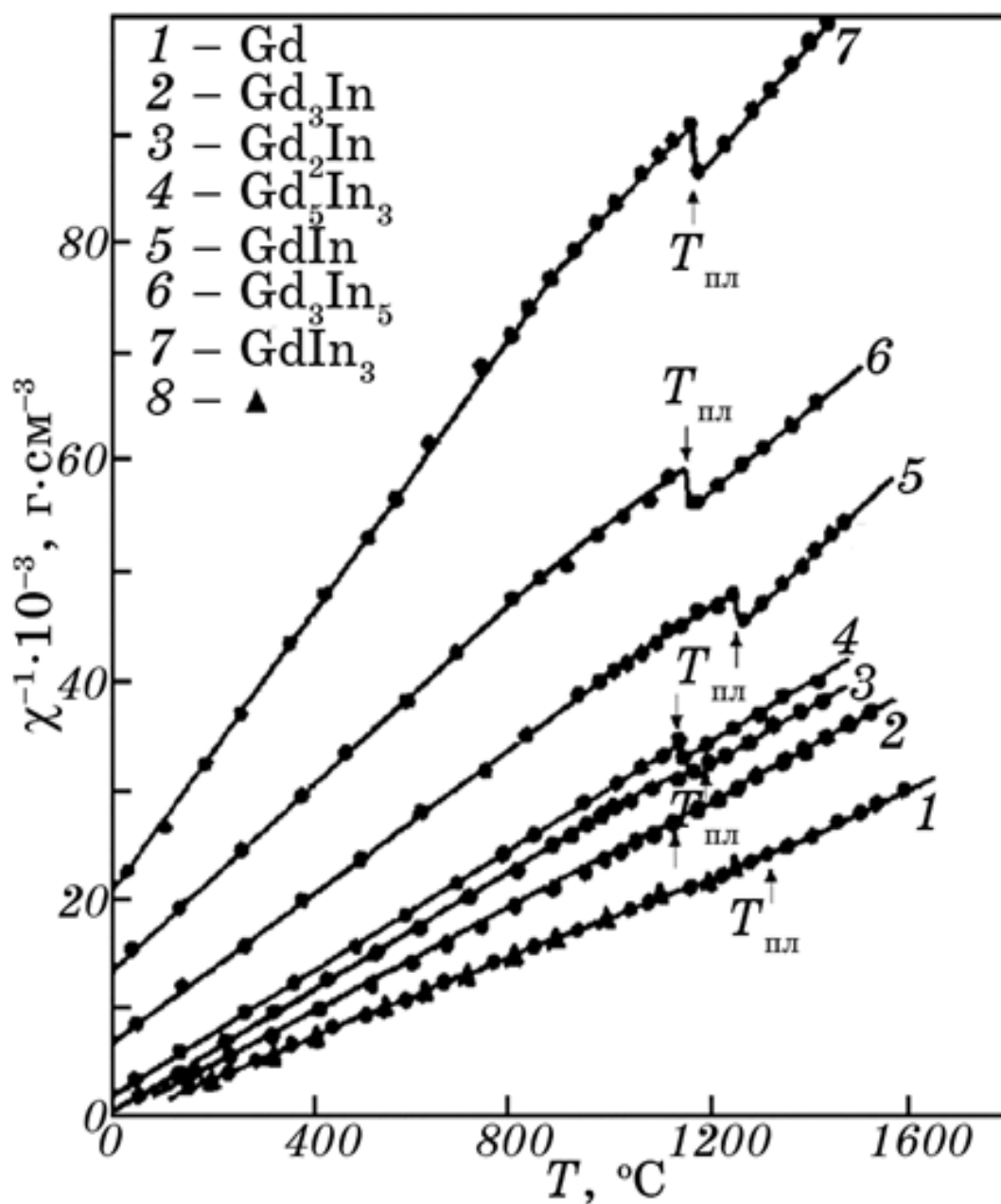
Toza KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining magnit xossalari, ularning magnit tartiblangan holatida, ya'ni 300°Kdan past temperaturalarda bugungi kunda yetarli darajada o'rganilgan. Bu yo'nalishdagi ishlarga[10-13] ishlarda batafsil sharh berilgan.

Toza og'ir KYeM(OKYeM)ning magnit xossalari 300 Kdan -1500 K yuqori temperaturalar oralig'ida, ularning faqat qattiq holatida[14-17] ishlarda o'rganilgan. Bu ishlarning natijalari bo'yicha toza OKYeMning $\chi(T)$ bog'lanishlari chiziqli tabiatga ega bo'lib (1.12) ko'rinishdagi chiziqli Kyuri – Veyss qonuniga bo'sinadi. $\chi^{-1}(T)$ tajribaviy bog'lanishlardan topilgan bitta OKYeM atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentning (μ_{eff}) qiymati, OKYeM $^{3+}$ erkin ionining magnit momentiga juda yaqin bo'lib chiqqan. OKYeM uchun $\chi(T)$ bog'lanishlar §1.2da qaralgan Van-Flek nazariyasi bo'yicha tushuntirilgan.

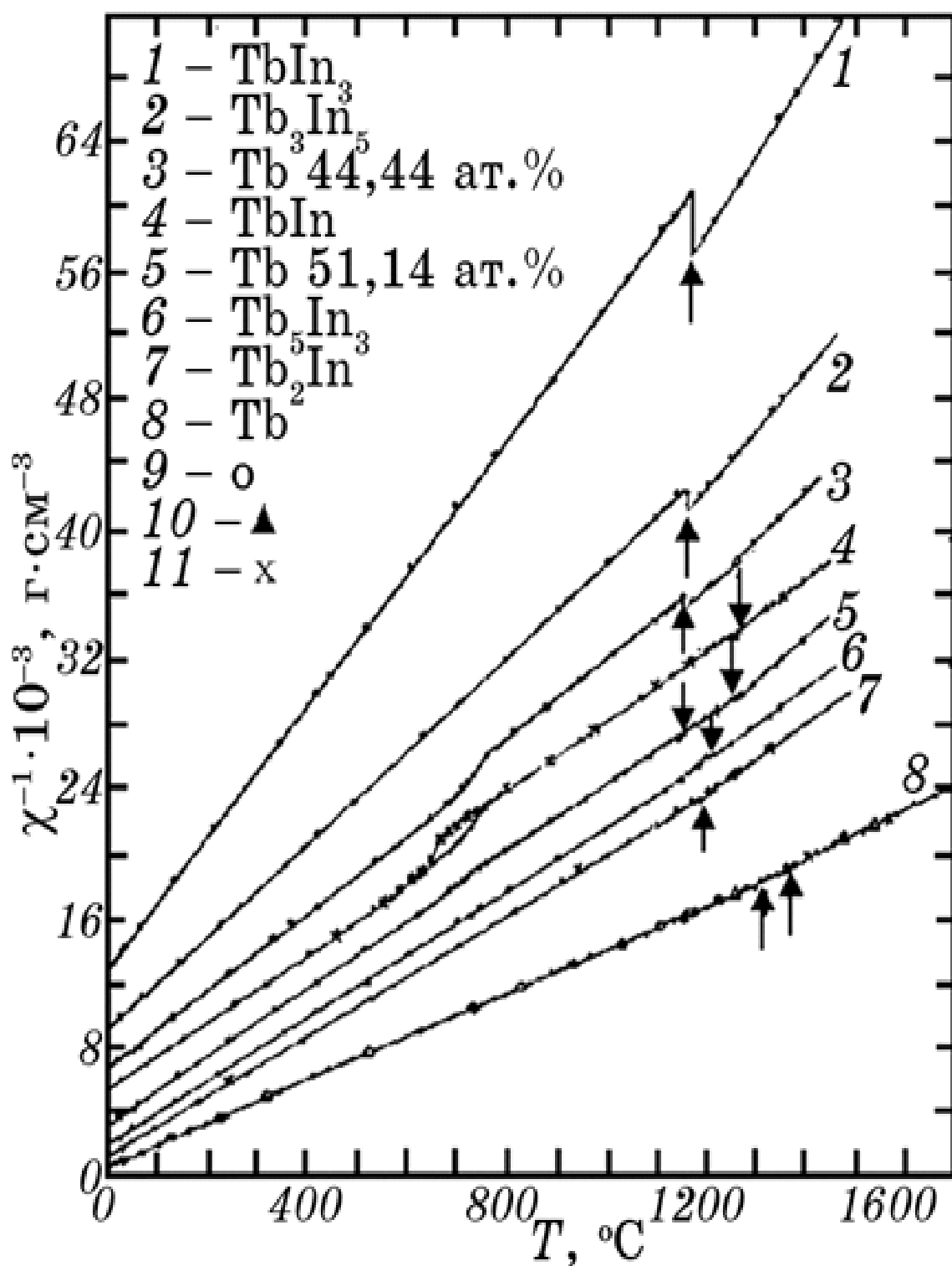
OKYeM va indiy orasidagi birikmalarining magnit xossalari, ularning qattiq holati, erish jarayoni va suyuq holatini qamraydigan yuqori temperaturalar oralig'ida (20-1700°C) birinchi marta [18-22] ishlarda Faradey usuli bilan o'lchangan. Shu ishlarda OKYeM – In (OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalaridagi toza OKYeM va ularning indiy bilan hosil qiladigan birikmalarining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarini o'lchash va ularning muhokamasi bo'yicha [22] ishda olingan natijalar haqida qisqacha to'xtalamiz. Na'munalarning tajribaviy $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar Gd-In,Tb-In,Dy-In,Ho-In,Er-In va Tm-In sistemalari uchun 1.2-1.7 rasmlarda keltirilgan.

Bu rasmlardagi $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, Gd-In sistemasidagi na'munalardan boshqa barcha na'munalar uchun bu bog'lanishlar (1.3-1.7 rasmlar) chiziqli tabiatga ega va ular (1.12) ko'rinishdagi Kyuri-Veyss

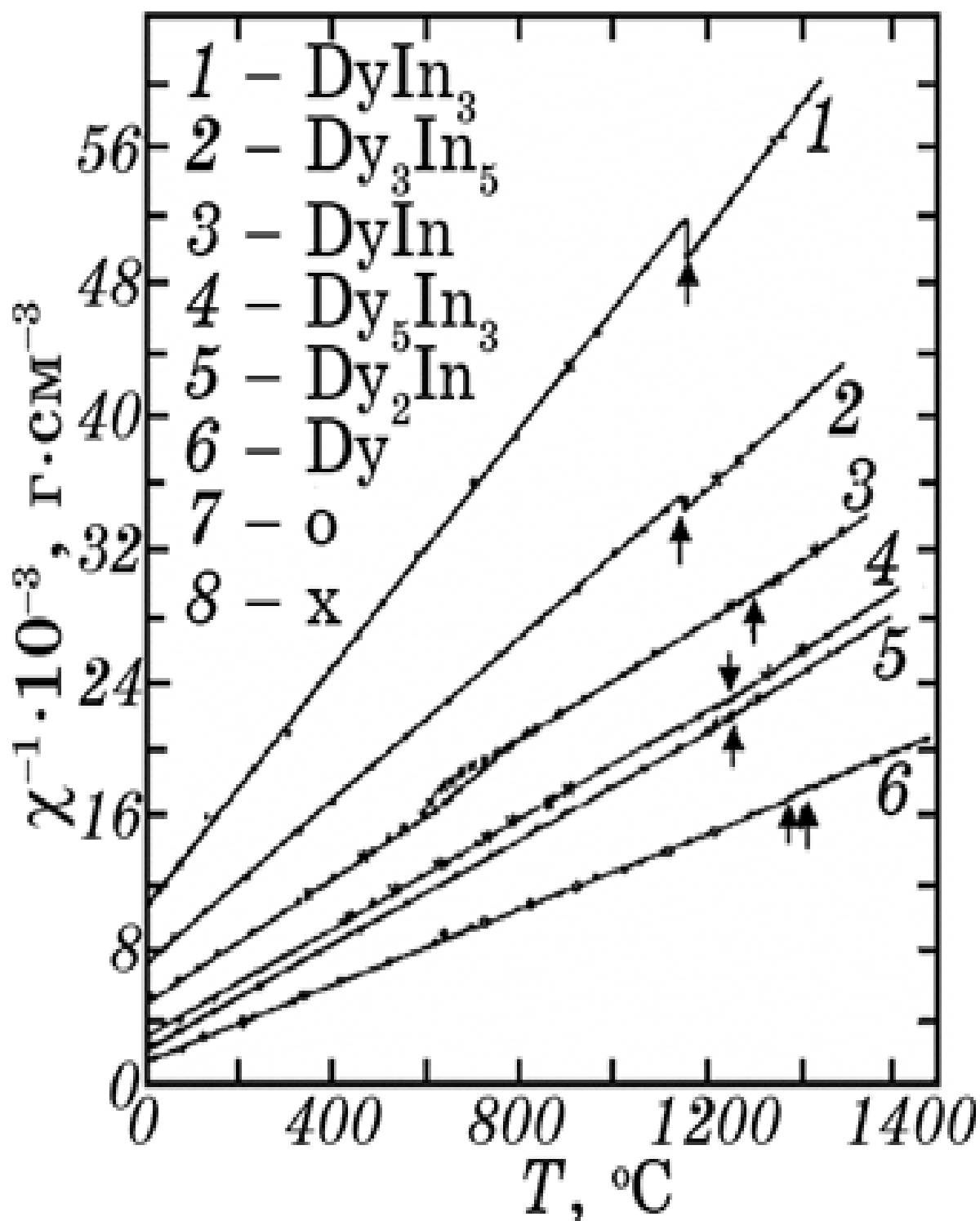
qonuniga bo'ysinadi. Gd-In sistemasidagi na'munalarning $\chi(T)$ bog'lanishlari (1.2-rasm) (1.13) ko'rinishdagi umumlashgan Kyuri-Veyss qonuniga bo'ysinadi.



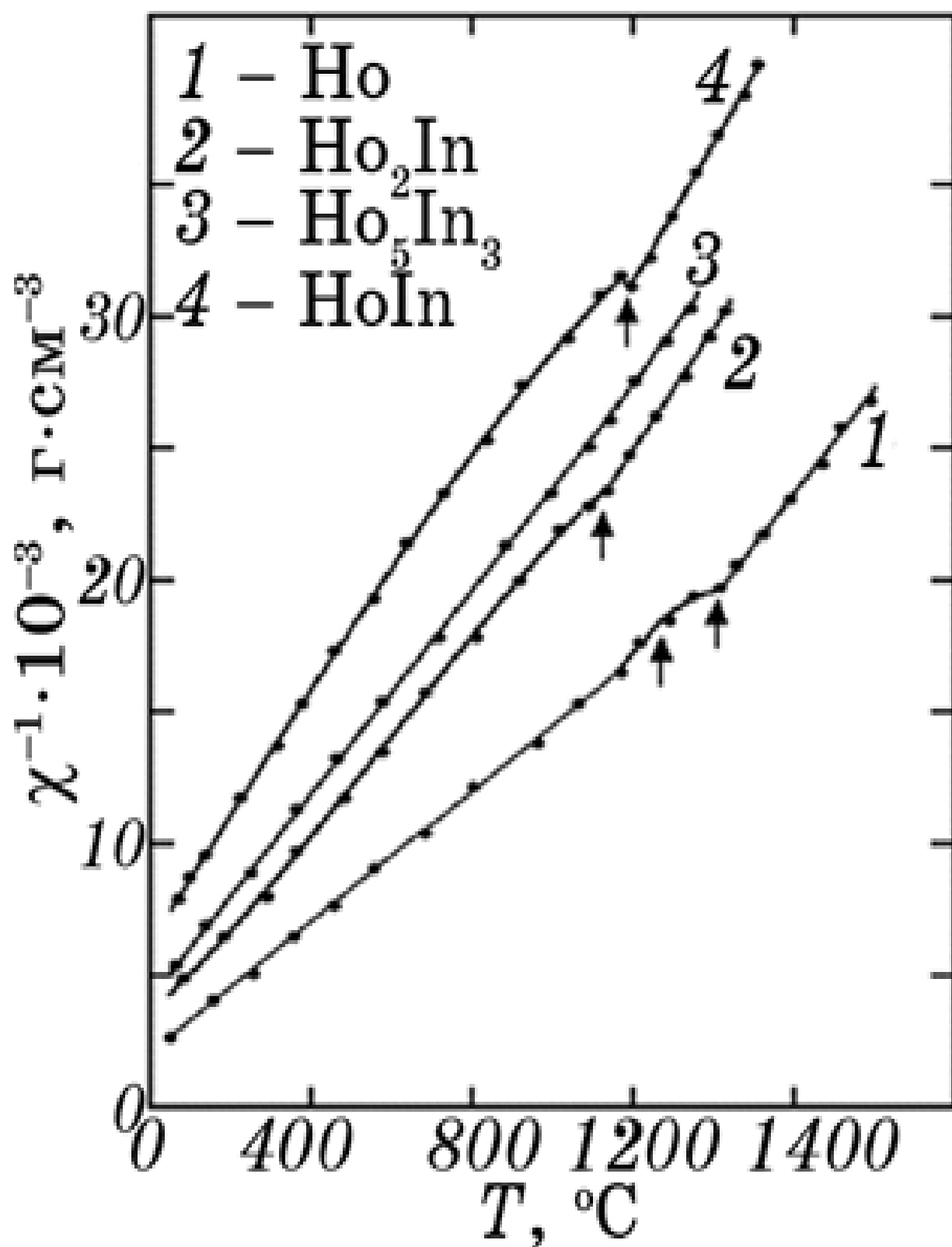
1.2-rasm. Gd-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.



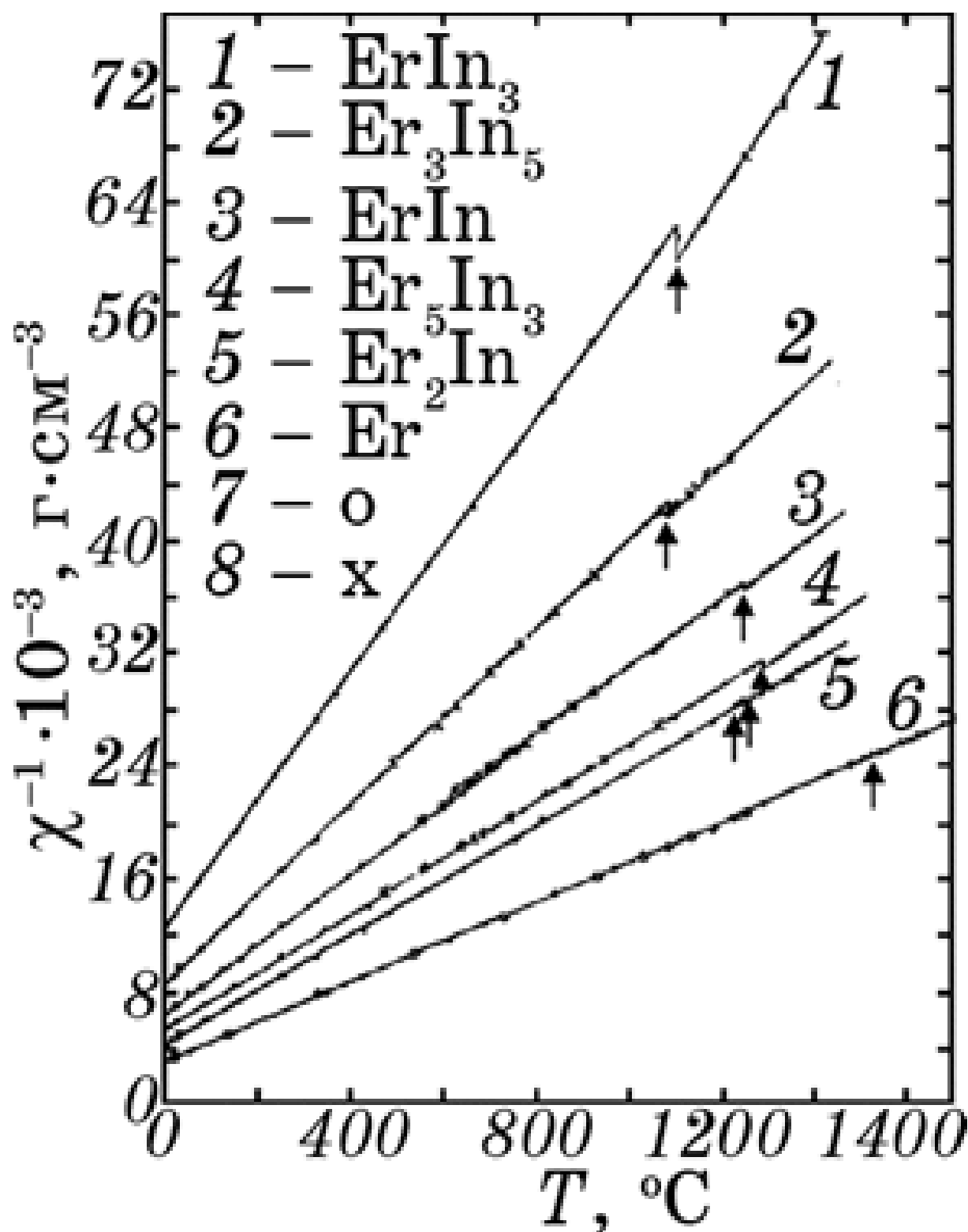
1.3-rasm. Tb-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.



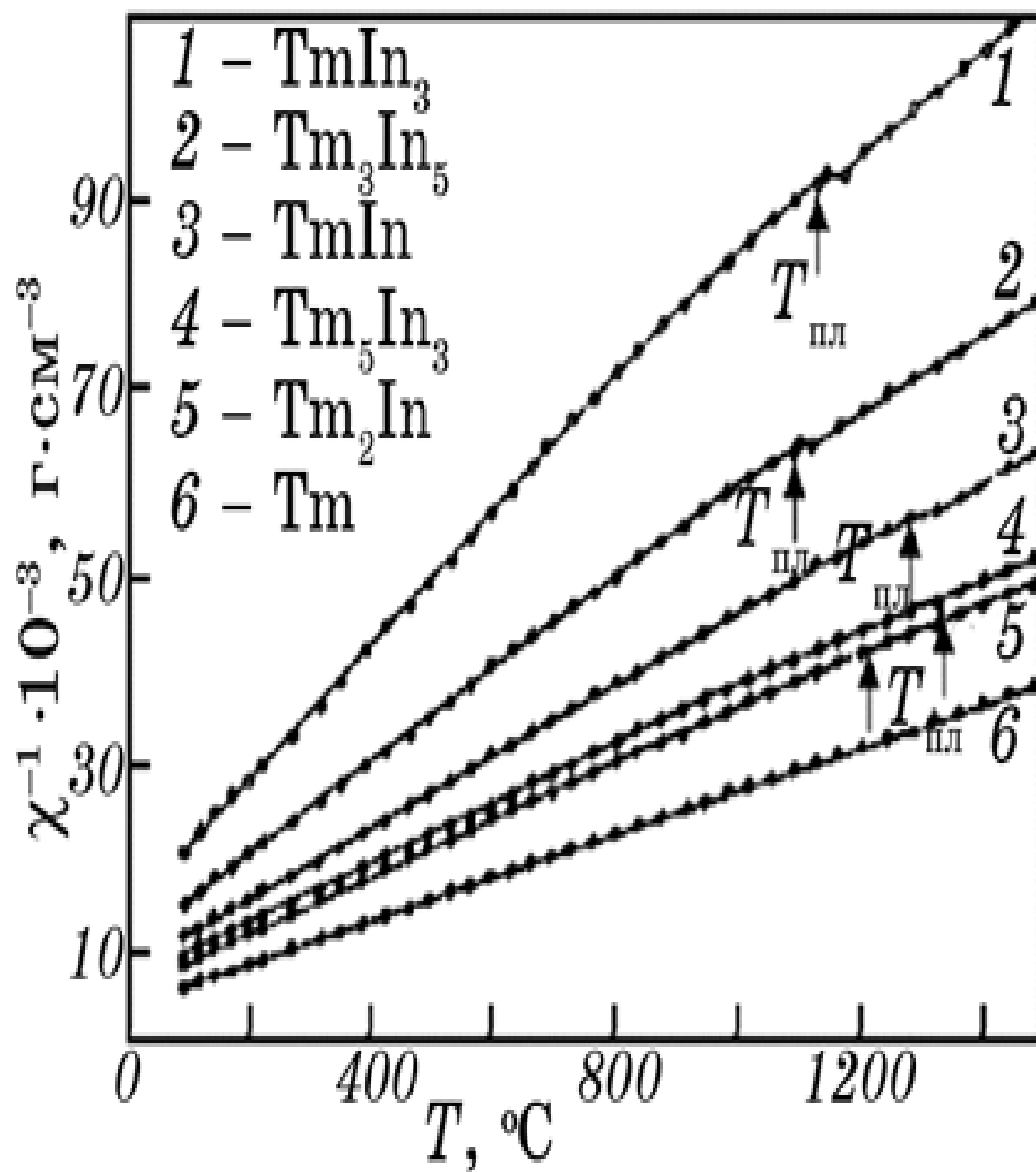
1.4-rasm.Dy-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.



1.5-rasm. Ho-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.



1.6-rasm. Er-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.



1.7-rasm. Tm-In sistemasi uchun $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlar.

TbIn, DyIn va ErIn birikmalarining $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarida (1.3,1.4,1.6-rasmlar) 600-700°C temperaturalar oralig'ida issiqlik gisterezisi kuzatilgan. Bu xodisa birikmalarning kristall panjarasida polimorf fazaviy o'tish bilan tushuntirilgan.

1.2-1.7 – rasmlardagi $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarni tahlil qilish yana shuni ko'rsatadiki, toza KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining erish jarayonida, bu bog'lanishlarda kata o'zgarish yuz bermaydi. KYeMIn, KYeM₃In₅ va KYeMIn₃ birikmalardan boshqa barcha na'munalarning erish jarayonida $\chi^{-1}(T)$ bog'lanishlarda sinish kuzatiladi; KYeMIn, KYeM₃In₅ va KYeMIn₃ birikmalarning erish jarayonida esa, kuchsiz sakrash yuz beradi.

$\chi^{-1}(T)$ tajribaviy bog'lanishlardan, toza KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining asosiy magnit xarakteristikalari – paramagnit Kyuri temperaturasi (θ_p), Kyuri-Veyss doimiysi (C) va bitta KYeM atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment (μ_{eff}) hisoblab topilgan.

Toza KYeM uchun μ_{eff} (1.11) ifoda bo'yicha hisoblangan. O'rganilgan birikmalarda bitta KYeM atomiga to'g'ri keladigan effektiv magnit moment quyidagi ifoda bo'yicha hisoblangan[23]:

$$\mu_{eff} = 2.83 \sqrt{C(M_1 + \frac{xM_2}{100-x})} \mu_B, \quad (1.20)$$

bundagi M_1 va M_2 – mos ravishda KYeM va indiyning atomar massalari; $\tilde{o}$ – indiyning at.% lardagi konsentratsiyasi. Hisoblash natijalari 1.3 – jadvalda keltirilgan. 1.3-jadvalni tahlil qilib, toza KYeM va o'rganilgan na'munalardagi 4f-elektronlarning energetik holatiga, indiy va yuqori temperature deyarlik ta'sir ko'rsatmaydi; bu holat erkin KYeM³⁺ ionlarining asosiy energetik holatiga yaqin bo'ladi degan muhim xulosaga kelingan. Shunga asoslanib o'rganilgan na'munalarning $\chi(T)$ bog'lanishlarini, erkin ionlar modeliga asoslangan, paramagnitizmning Van-Flek nazariyasi bo'yicha tushuntirilgan.

1.3-jadval

(Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm)-In sistemalaridagi na'munalarning asosiy magnit xarakteristikalari.

Birikma	Qattiq holat			Suyuq holat		
	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2},$ $sm^3 \cdot K \cdot g^{-1}$	μ_{eff}, μ_B	θ_p, K	$C \cdot 10^{-2},$ $sm^3 \cdot K \cdot g^{-1}$	μ_{eff}, μ_B
1	2	3	4	5	6	7
Gd	313	4,25	8,10	323	5,33	8,60
Gd ₃ In	278	5,70	9,40	378	3,41	7,30
Gd ₂ In	238	3,70	8,00	223	3,69	7,95
Gd ₅ In ₃	228	3,51	7,95	305	3,48	7,90
GdIn	53	3,04	8,15	173	2,98	8,05
Gd ₃ In ₅	-27	2,35	8,00	58	2,47	8,30
GdIn ₃	-40	1,55	7,90	68	1,62	6,70
Tb	233	7,3	9,60	339	6,64	9,17
Tb ₂ In	210	5,25	9,54	325	4,74	9,06
Tb ₅ In ₃	175	4,98	9,53	273	4,41	8,97
α -TbIn	15	4,50	9,93	-	-	-
β -TbIn	-30	4,46	9,89	277	2,63	8,92
Tb ₃ In ₅	-38	3,43	9,80	258	2,81	8,87
TbIn ₃	-40	2,40	9,83	275	2,01	9,00
Dy	160	8,60	10,58	180	8,44	10,48
Dy ₂ In	150	6,23	10,47	268	5,66	9,98

1	2	3	4	5	6	7
Dy ₅ In ₃	88	6,21	10,73	310	5,23	9,85
α -DyIn	15	5,31	10,86	-	-	-
β -DyIn	-91	5,61	11,16	182	4,73	10,25
Dy ₃ In ₅	-23	4,11	10,79	121	3,77	10,28
DyIn ₃	-25	2,78	10,63	100	2,67	10,40
Ho ₅ In ₃	8	9,20	10,81	225	7,89	10,00
HoIn	-30	9,55	10,70	91	8,49	10,09
Er	58	7,04	9,71	110	6,76	9,51
Er ₂ In	52	5,13	9,61	98	4,98	9,47
Er ₅ In ₃	23	4,89	9,63	160	4,47	9,20
α -ErIn	5	4,04	9,56			
β ErIn	-19	4,15	9,68	95	3,87	9,35
Er ₃ In ₅	-3	3,14	9,50	80	3,04	9,35
ErIn ₃	-6	2,20	9,49	174	1,99	9,02
Tm	18	4,31	7,63			
Tm ₂ In	7	4,78	7,60	-196	5,73	8,32
Tm ₅ In ₃	-7	4,83	7,58	-34	4,64	7,43
TmIn	-11	5,06	7,58	125	4,94	7,49
Tm ₃ In ₅	-10	5,27	7,55	-197	6,33	8,27
TmIn ₃	-5	5,48	7,50	-3,6	7,20	8,60

I-bobga doir xulosalar

Bitiruv malakaviy ishida tadqiq qilinadigan obektlardagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'siriga dahildor bo'lgan, quyidagi xossalarini adaboyotlarda o'rganilganlik darajasiga sharh berilgan:

1. KYeMning elektron tuzilishi;

2. KYeM uchun paramagnetizmning Van-Flek va almashinuv o'zaro ta'sir nazariyalari;

3. Og'ir KYeM va ularning indiy bilan birikmalarining magnit qabul qiluvchanligini yuqori temperaturalarda (qattiq va suyuq holatlarda) o'lchash va o'lchash natijalaridan foydalanib ularning asosiy magnit xarakteristikalarini aniqlash natijalari;

II-BOB. OG'IR KYeM-In SISTEMASIDA AMAL QILADIGAN BILVOSITA ALMASHINUV O'ZARO TA'SIRNI YARIM EMPIRIK USULDA O'RGANISH NATIJALARI VA ULARNING MUHOKAMASI.

2.1.Toza OKYeMda va ularning indiy bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganishning yarim empirik usuli.

§1.3 da aytilganidek, KYeMning magnit xossasini, kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan 4f-elektronlar hosil qiladi. §1.1 da aytilganidek, 4f-elektronlar, kristall panjara tugunlarida o'troqlashgan holatda joylashgan, KYeM³⁺ ionlari ichida $5s^2 5p^6$ elektronlar bilan kristall panjara maydoni ta'siridan himoyalangan bo'ladi. KYeMda 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 almashinuv o'zaro ta'siri deyiladi. Bunday o'zaro ta'sirining energetik o'lchovi vazifasini, magnit tartiblanish-magnit tartibsizlik(paramagnit holat) fazaviy o'tish temperaturasi-paramagnit Kyuri temperaturasi- θ_p bajaradi. θ_p va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri (yoki integrali) A orasida, §1.3da keltirilgan, (1.19) bog'lanish, ya'ni toza KYeM uchun quyidagi bog'lanish mavjud:

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

Bu ifodadan quyidagini olamiz:

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

Bu ifodadagi de Jen faktori G toza KYeM uchun quyidagicha aniqlanadi:

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

Bundagi Lande fanktori 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-elektronlarning, Xund qoidalarini bo'yicha aniqlanadigan, to'la orbital, to'la spin va to'la mexanik moment kvant sonlari.

KYeM-In (KYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalarida amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir uchun (2.1)dagi de Jen faktori additivlik qoidasiga asosan quyidagicha aniqlanadi:

$$G = (1-x)G_{\text{KYeM}} + xG_{\text{In}}, \quad (2.5)$$

bundagi x -indiyning atom ulushlardagi konsentratsiyasi, G_{KYeM} va G_{In} -mos ravishda KYeM va In uchun de Jen faktorlari. Uch valentli In ioni asosiy energetik holatining terimi 1S_0 bo'lgani uchun $G_{\text{In}} = (g_J - 1)^2 J(J+1) = 0$ bo'ladi. Buni va (2.5)ni hisobga olib o'rganiloyotgan birikmalarning peramagnit Kyuri temperaturasi uchun (2.1)dan quyidagini olamiz:

$$\theta_p = \frac{A}{k_B} (1-x)(g_J - 1)^2 J(J+1) \quad (2.6)$$

Geksogonal tipdagi kristall panjara tugunlarida joylashgan KYeM^{3+} ionlarining tashqi elektron qobiqlari ($5s^2 5p^6$) amalda bir xil bo'lib, bir metall dan ikkinchi metallga o'tganda deyarlik o'zgarmaydi. Almashinuv o'zaro ta'sir integrali A (1.18)ga asosan n , $A_{\text{sf}}(0)$, Ω , 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[24]. Shuning uchun ham, (2.1) va (2.6) ifodalarga asosan toza KYeM va ularning In bilan birikmalarining paramagnit Kyuri temperaturasi de Jen faktoriga to'g'ri proporsional bo'ladi deyish mumkin. Bu

ifodalar RRKI nazariyasiningushbu bashoratini yarim empirik usul bilan tekshirib ko'rush imkoniyatini beradi.

[20-22]-ishlarda toza KYeM va ularning In bilan birikmalarida KYM^{3+} ioniga to'g'ri keladigan effektiv magnit momentning qiymati KYM^{3+} erkin ionlari magnit momentining qiymatiga qoniqarli darajada mos keladi(1.3-jadval) degan xulosa olingan. Bu dalil KYeM va o'rganilayotgan birikmalarning magnit xossasiga sababchi bo'lgan 4f-elektronlar ularning kristall panjarasi tugunlarida, xuddi toza KYeMdagidek, o'troqlashgan bo'ladi. Diamagnit metal In va yuqori temperatura 4f-elektronlarning o'rganilgan namunalardagi energetik holatiga deyarlik ta'sir ko'rsatmaydi. Asosiy va birinchi uyg'ongan energetik sathlar energiyalarining farqi issiqlik energiyasi- $k_B T$ dan ancha katta. Shuning uchun KYeM va uning In bilan birikmalari uchun de Jen faktori G_{ni} (2.3) va (2.5) ifodalar bo'yicha hisoblashda KYM^{3+} erkin ionlari uchun J va g_J larning qiymatlaridan [$\text{Gd}^{3+}(J=7/2, g_J=2)$; $\text{Tb}^{3+}(J=6, g_J=3/2)$; $\text{Dy}^{3+}(J=15/2, g_J=4/3)$; $\text{Ho}^{3+}(J=8, g_J=5/4)$; $\text{Er}^{3+}(J=15/2, g_J=6/5)$; $\text{Tm}^{3+}(J=6, g_J=7/6)$] foydalanish mumkin(1.2-jadval).

Toza KYeMda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir uchun (2.2) ifoda quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{G_{\text{KYM}}}. \quad (2.7)$$

Bundagi G_{KYM} —KYM uchun de Jen faktori bo'lib, (2.3) ifoda yordamida hisoblanadi.

KYM-In (KYM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalaridagi birikmalar uchun, (2.5)ni va yuqoridagi fikrlarni hisobga olib (2.6)dan, o'rganilayotgan birikmalardagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash uchun, quyidagini olamiz:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{\text{KYeM}}} \cdot \quad (2.8)$$

Shunday qilib: 1.(2.1) va (2.6) ifodalar toza KYeM va ularning In bilan birikmalari paramagnit Kyuri temperaturasi va de Jen faktori orasida proporsionallik mavjudligi haqidagi RRKI nazariyasining xulosasini tekshirib ko'rish imkoniyatini berdigan ifodalardir; 2.(2.7) va (2.8) ifodalar toza KYeM va ularning In bilan birikmalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini (A/k_B) yarim empirik usulda hisoblash ifodalaridir.

2.2. Toza og'ir KYeMda (OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash natijalari.

§2.1da bayon qilingan toza OKYeMda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirning energetik o'lchovi(xarakteristikasi) hisoblanadigan paramagnet Kyuri temperaturasi θ_p bilan de Jen faktori G orasidagi chiziqli proporsionallik haqidagi RKKI nazariyasining bashoratini va toza OKYeM uchun almashinuv o'zaro ta'sir parametri ushbu paragrfdada o'rganiladi.

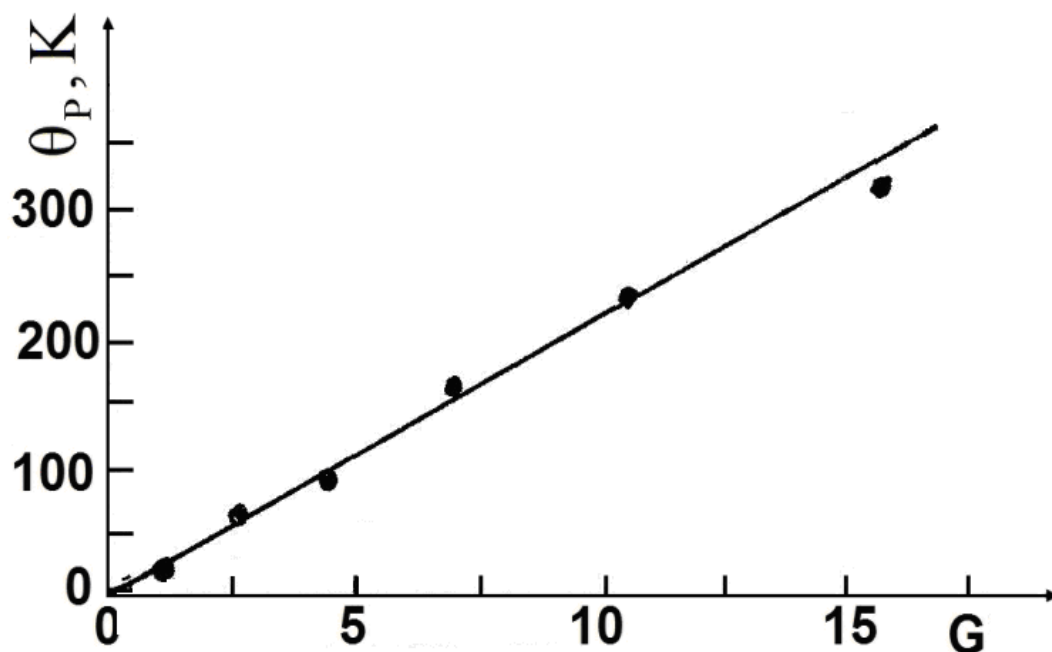
θ_p va G orasidagi proporsionallikni, ya'ni RKKI nazariyasining bashoratini tekshirish (2.1) ifoda bo'yicha, almashinuv o'zaro ta'sir parametrini hisoblash esa (2.7) ifoda bo'yicha bajarildi. RKKI nazariyasining bashoratini tekshirish bo'yicha olingan natijalar 2.1 va 2.2-jadvallarda va ko'rgazmali ravishda 2.1-rasmda tasvirlangan. Hisoblashlarda θ_p ning tajribaviy qiymatlari 1.3-jadvaldan olindi.

2.1-jadval

Toza OKYeM 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	7/5	6	1.16

2.1- jadvaldan va 2.1-rasmdan ko'rinib turibdiki toza 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.



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

2.2-jadval

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		

2.2-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. OKYeM-In(OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalaridagi birikmalarda amal qiladigan bilvosita o'zaro ta'sir parametrini hisoblash natijalari.

Ushbu paragrafda OKYeM-In(OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemasidagi birikmalarda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'sirni yarim empirik usulda o'rganish natijalari keltirilgan[25].

Dastlab, o'rganilayotgan birikmalarda θ_p ning de Jen faktoriga proporsionalligi haqidagi RKKI nazariyasining bashorati va so'ngra birikmalarda amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri o'rganildi. RKKI nazariyasining bashorati (2.6) ifodadan, ya'ni

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

ifodadan foydalanib tekshirildi. Tekshirish natijalari 2.3-jadvalda va ko'rgazmali ravishda 2.2-rasmda keltirilgan.

Bilvosita o'zaro ta'sir parametri - A/k_B ning qiymatlari (2.8) ifodadan, ya'ni

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_p}{(1-x)G_{\text{KYeM}}}$$

ifodadan foydalanib hisoblandi. Hisoblash natijalari 2.4-jadvalda va ko'rgazmali ravishda 2.3-rasmda keltirilgan.

2.3-jadval va 2.2-rasmni (2-5 chiziqlarni) tahlil qilish shuni ko'rsatadiki θ_p ning de Jen faktoriga bog'lanishlari deyarlik chiziqli tabiatga ega va OKYeMning $\theta_p(G)$ chiziqli bog'lanish (1-chiziq) tabiati bilan qoniqarli darajada mos keladi. Demak, o'rganilgan birikmalarda θ_p ning o'zgarishi RKKI nazariyasi bashoratiga juda yaqindir. Bu shundan guvohlik beradiki, o'rganilgan birikmalarda amal qiladigan almashinuv o'zaro ta'siri, toza OKYeMda amal qiladigan RKKI turdagi bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir bilan bir xildir.

2.4-jadval va 2.3-rasmni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, A/k_B pametrning qiymati birikmalarda indiy konsentratsiyasining o'zgarishiga sezilarli darajada

bog'liq. A/k_B ning qiymati, Gd-In, Tb-In, Dy-In va Er-In sistemalaridagi birikmalarining qattiq holati uchun, indiy konsentratsiyasining oshishi bilan dastlab tez oshadi(toza Gd,Tb,Dy,Er magnit matritsalarining A/k_B qiymatlariga nisbatan), so'ngra keskin kamayadi, magnit matritsaning qiymatidan kichik bo'lib qoladi va indiyning konsentratsiyasi 50at.% dan oshganda ishorasini musbatdan manfiyga o'zgartiradi, so'ngra yana kamayadi. Ho-In va Tm-In sistemalari uchun A/k_B parametr indiy konsentratsiyasini oshishi bilan kamayadi va Ho-In sistemasida indiyning konsentratsiyasi 37.5at.% dan oshganda, Tm-In sistemasida esa 37.5at.% da ishorasini musbatdan manfiyga o'zgartiradi. O'rganilgan sistemalarda namunalar qattiq holatdan suyuq holatga o'tganda A/k_B ning qiymati oshadi.

§1.3dan malumki, aniqroq aytganda (1.18) ifodadan, ya'ni

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

Ifodadan ma'lumki, A/k_B parametrning kattaligi va uning ishorasi Ruderman-Kittel funksiyasi $F(y)$ ning ya'ni,

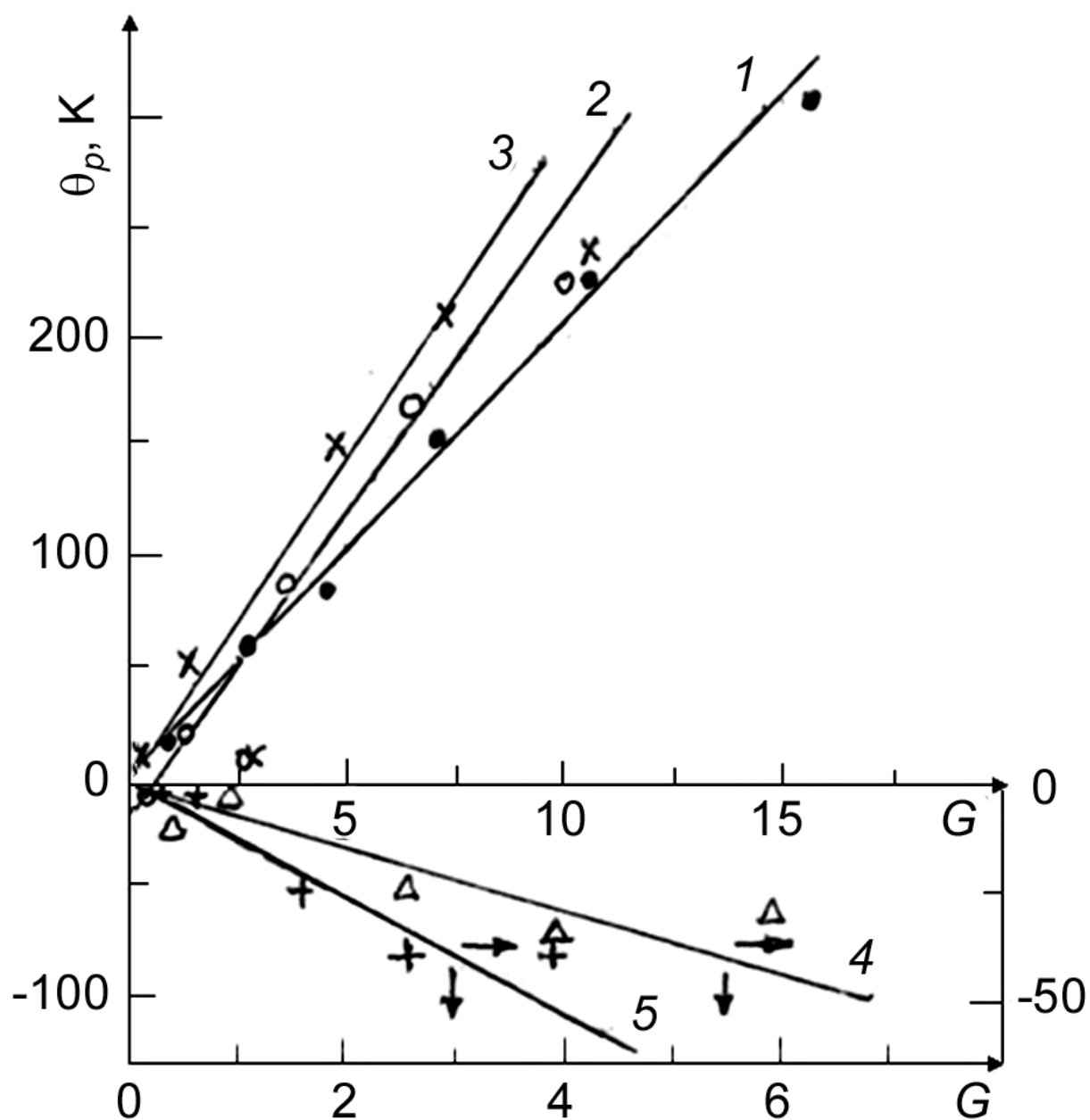
$$F(y) = F(2\vec{k}_F(\vec{R}_n - \vec{R}_m)) = (y \cos y - \sin y) / y^4$$

ning magnit ionlar orasidagi masofaga ($|\vec{R}_n - \vec{R}_m|$) bog'liqligi bilan aniqlanadi. A - parametr ishorasining o'zgarishi $F(y)$ funksiyaning osillatsion xarakteri bilan bog'liq. OKYeM-In sistemasidagi birikmalar kristall panjarasining davrlari toza OKYeMnikidan katta ekanligi [26] - ishda aniqlangan. Demak OKYeM kristall panjarasida diamagnit matritsa - In^{3+} ionlari joylashganda magnit matritsa OKYeM $^{3+}$ ionlari orasidagi masofa oshadi. Bu o'z navbatida In konsentratsiyasi oshishi bilan A/k_B parametrining kamayishiga olib keladi. Shunday qilib, o'rganilgan sistemalarda, toza OKYeMdagidek, RKKI turdagi almanishinuv o'zaro ta'siri amal qiladi deyishimiz mumkin.

2.3-jadval

OKYeMning In bilan birikmalari uchun θ_p de Jen faktorining qiymatlari.

Birikma	θ_p, K	g_J	J	$(1-x)(g_J-1)^2 J(J+1)$
Gd ₂ In	238	2	7/2	10.51
Tb ₂ In	210	3/2	6	7.00
Dy ₂ In	150	4/3	15/2	4.72
Ho ₂ In	8	5/4	8	3.00
Er ₂ In	52	6/5	15/2	1.70
Tm ₂ In	7	7/6	6	0.77
Gd ₅ In ₃	2.28	2	7/2	9.84
Tb ₅ In ₃	175	3/2	6	6.56
Dy ₅ In ₃	88	4/3	15/2	4.43
Ho ₅ In ₃	8	5/4	8	2.81
Er ₅ In ₃	29	6/5	15/2	1.59
Tm ₅ In ₃	-7	7/5	6	0.625
GdIn ₃	-40	2	7/2	3.94
TbIn ₃	-40	3/2	6	2.63
Dy ₃ In ₃	-25	4/3	15/2	1.77
ErIn ₃	-6	6/5	15/2	0.64
TmIn ₃	-5	7/6	6	0.29



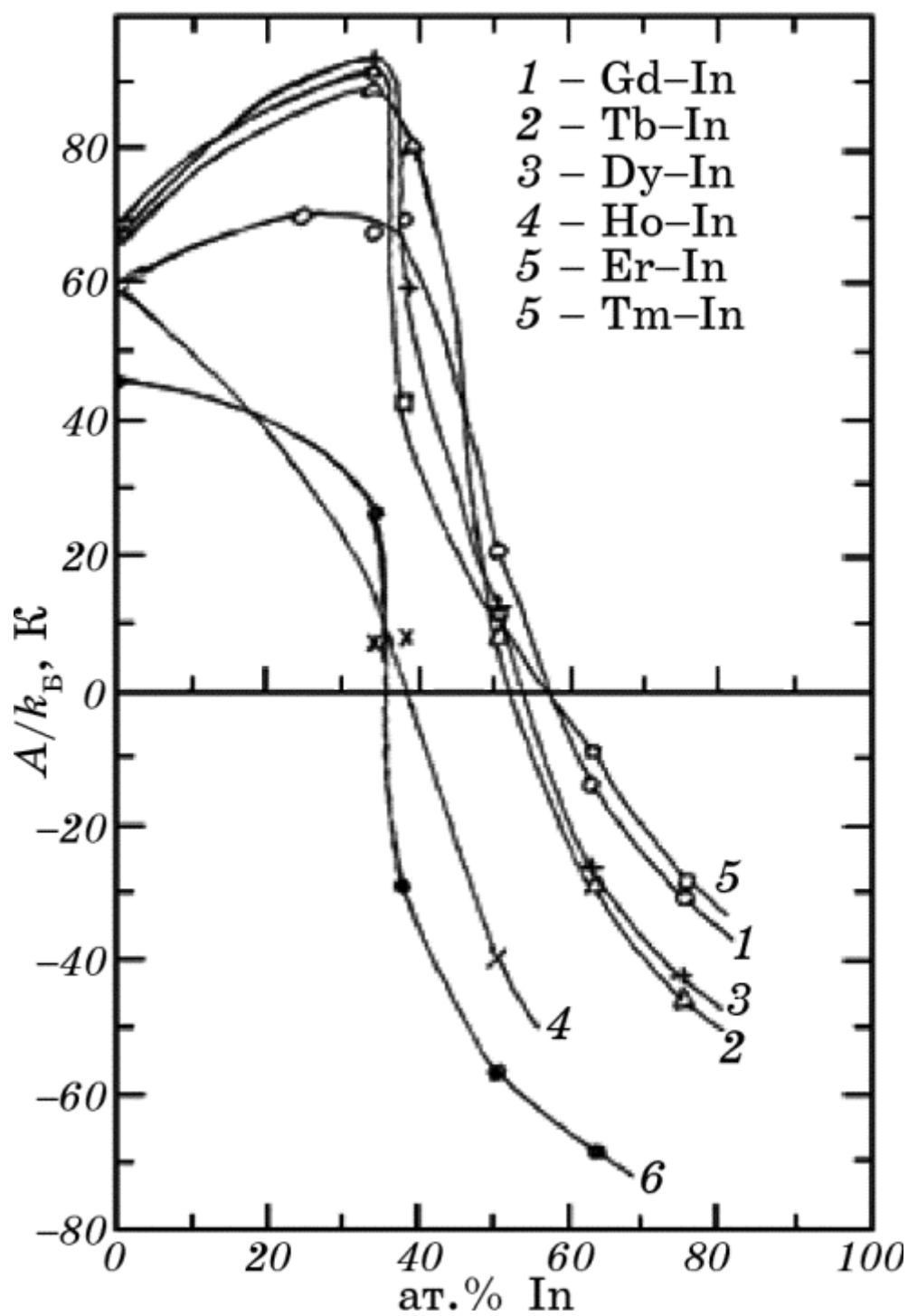
2.2-rasm. (Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm)-In sistemalari uchun $\theta_p(G)$ bog'lanishlar:
 1-OKYeM (OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm); 2-OKYeM₅In₃; 3-KYeM₂In;
 4-OKYeM₃In₅; 5-OKYeMIn₃.

2.4-jadval

**(Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm)-In sistemasidagi na'munalar uchun bilvosita
almashinuv o'zaro ta'sir parametrining qiymatlari.**

Na'muna	Qattiq holat		Suyuq holat	
	θ_p, K	$A/k_B, K$	θ_p, K	$A/k_B, K$
1	2	3	4	5
Gd	313	59.62	323	61.52
Gd ₃ In	278	70.62	378	96.02
Gd ₂ In	238	67.68	223	63.41
Gd ₅ In ₃	228	69.51	305	92.99
GdIn	53	20.12	173	65.86
Gd ₃ In ₅	-27	-13.71	58	-29.44
GdIn ₃	-40	-30.46	68	-51.78
Tb	233	66.57	339	96.86
Tb ₂ In	210	89.45	325	122.79
Tb ₅ In ₃	175	80.03	273	126.68
α -TbIn	15	8.57	277	158.28
Tb ₃ In ₅	-38	-28.93	258	-196.45
TbIn ₃	-40	-45.63	275	-313.69
Dy	160	67.77	180	76.24
Dy ₂ In	150	94.74	268	169.26
Dy ₅ In ₅	88	59.59	310	209.93
α -DyIn	15	12.71	182	154.24
Dy ₃ In ₅	-23	-25.94	121	-136.47
DyIn ₃	-25	-42.37	100	-106.76
Ho	90	60	500	333.33
Ho ₂ In	8	7.95	325	322.85

1	2	3	4	5
Ho ₅ In ₃	8	8.54	225	240.21
HoIn	-30	-40	91	-121.33
Er	58	68.2	110	129.41
Er ₂ In	52	91.22	98	171.93
Er ₅ In ₃	23	43.40	160	301.89
α -ErIn	5	11.72	95	222.66
Er ₃ In ₅	-3	-9.38	80	-250.00
ErIn ₃	-6	-28.10	174	-815.63
Tm	18	46.27		
Tm ₂ In	7	26.92	-196	-3520.96
Tm ₅ In ₃	-7	28.77	-34	-130.77
TmIn	-11	-56.90	125	513.70
Tm ₃ In ₅	-10	-68.18	-197	-1018.96
TmIn ₃	-5	-51.72	-36	-245.45



2.3-rasm.OKYeM-In(OKYEM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalarida

A/k_B parametrining In konsentrasiyasiga bog'lanishlari.

II-bobga doir xulosalar.

2-bobda bajarigan ishlarni umumlashtirib quyidagi xulosalarni aytish mumkin:

1. OKYeM-In sistemasida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sirni o'rganishni yarim empirik usulining mohiyati bayon qilindi.
2. Toza OKYeM uchun RKKI nazariyasining bashorati tekshirildi va bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri o'rganildi (hisoblandi).
3. OKYeM-In (OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalsridagi birikmalar uchun bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametri hisoblandi.
4. Hisoblash natijalariga tayanib OKYeM bilan In orasida hosil bo'ladigan birikmalarda RKKI tipidagi almashinuv o'zaro ta'sir amal qilishi ko'rsatildi.

XULOSALAR.

Ushbu bitiruv malakaviy ishida olingan natijalarga asoslanib quyidagi xulosalarni aytish mumkin:

1. OKYeM-In(OKYeM=Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm) sistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini(integralini), yarim empirik usulida o'rganishga doir, bugungi kunda ilmiy adabiyotlarda mavjud bo'lgan, nazariy va tajribaviy ishlarga sharh berildi.
2. OKYeM-Insistemalarida amal qiladigan bilvosita almashinuv o'zaro ta'sir parametrini, namunalarning paramagnit Kyuri temperaturasi tajribaviy qiymatlaridan foydalanib, yarim empirik usulda birinchi marta o'rganildi.
3. RKKI nazariyasining bashorati tasdiqlandi, ya'ni o'rganilgan sistemalardagi ekvatomli birikmalar paramagnit Kyuri temperaturasining tajribaviy qiymatlari va de Jen faktorlari orasida, toza OKYeMdagidek, to'g'ri proporsional bog'lanish aniqlandi.
4. Hisoblash natijalariga tayanib, OKYeM bilan indiy birikmalarida ham, toza OKYeMda amal qiladigan RKKI tipdagi almashinuv o'zaro ta'sir, ya'ni 4f-elektronlarning panjara tugunlari orasida umumlashgan elektronlar orqali o'zaro ta'siri amal qilishi 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 suscetibilities. – Oxford: Univ. press, 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.К.П. Белов и др. Редкоземельные ферро и антиферромагнитки/.К.П. Белов М.А. Белянчикова, Р.З.Левитин, С.А. Никитин – М.: Наука, 1965 г. – 320 с.
- 11.Тейлор К., Дербби М. Физика редкоземельных соединений. – М.: Мир, 1974 г. – 374 с.
- 12.Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. – М.: Мир, 1974 г. – 224 с.
- 13.Buschov K.H.J. Intermetallic compound of Rare Earths and non-magnetic metals//–Rep.Progres Phys.–1979.–vol. 42.–8. –pp.1373-1405.
- 14.ArajsS., MillerD.S. Magnetic Behaviorof Polyorystalline neodymium, holmium and erbium from 300 to 1500⁰K//J.Appl.Phys.– 1960.–Vol.31.–N5.–pp.325S-326S.

15. Arajs S. Paramagnetic Susceptibility of Polycrystalline Thulium from 300 to 1500K//J.Chem.Phys.–1960.–Vol.32.– №3.–pp. 951-952.
16. Arajs S. and Colvin R.V. Paramagnetism of Polycrystalline Gadolinium, Terbium and Dysprosium Metals// J. Appl. Phys.– 1961.– Vol.32.– №3.–pp. 336S -337S.
17. С. Аражс, Р. В. Кольвин, Новые исследования редкоземельных металлов. Москва: Мир, 1964. – с. 100-135
18. Müller M., Huber E., Güntherodt H.J. Magnetic susceptibility of liquid heavy Rare Earth Metals//J.de Physique.–1979.–Т.40.– Suppl.N5.–pp. c5-260-c5-261.
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 Er-In при высоких температурах//Известия вузов. Физика. Россия.- 2004.– №12.– с.7-10.
21. Шакаров Х.О. Магнитная восприимчивость интерметаллидов в системе Dy-In при высоких температурах//Известия вузов. Физика. Россия. - 2005.– №1.– с.88-89
22. О.К. Кувандиков, Х.О. Шакаров, А. Абдурахмонов. Исследование магнитных свойства интерметаллидов в системе РЗМ-In в твёрдом и жидком состояниях. – Металлофизика и новейшие технологии. Украина(г. Киев).- 2013.- Т.35.- №7.- сс.879-888.
23. Антропов В. А., Радовский Н. З., Довгополь С. П., Гельд П. В. Магнитная восприимчивость никель – кремневых сплавов при высоких температурах.//УФЖ.– 1976.–№3.– с.360-364.

24. 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.
25. Усаров У.Т., Шакаров Х.О., Жуланов Х.К., Кодирова Н.И. Полуэмпирическое исследование косвенного обменного взаимодействия в системе РЗМ – In. “Ўзбекистонда архитектура-қурилиш соҳаларини ривожлантиришнинг долзарб муаммолари ва истиқболлари” мавзусида вазирлик миқёсидаги илмий-техник конференция материаллари (Самарқанд давлат архитектура-қурилиш институтининг 50-йиллигига бағишланган), с.131-136, Самарқанд, 2016 йил 24 декабр
26. Yatsenko S.P., Semyanikov S.S., Shakarov H.O., Fedorova E.G. Phase diagrams of binary rare earth metal-indium systems//J.Less-Comm. Metals.– 1983.– v.90.– №1.– pp.95-108.