

AMALIY
YADRO
FIZIKASI



8.532





**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI YADRO
FIZIKASI INSTITUTI**

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM
VAZIRLIGI**

**MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI O'ZBEKISTON MILLIJ
UNIVERSITETI**

**YULDASHEV BEXZOD SODIQOVICH
POL'VONOV SATIMBOY RAJAPOVICH
BOZOROV ERKIN XOJIEVICH**

AMALIY YADRO FIZIKASI

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi tomonidan Oliy
o'quv yurtlari talabalari uchun darslik sifatida tavsiya etilgan

Toshkent
«VNESHINVESTPROM»
2019

8.5.22
6 CG 20

unda
hasida
midan
otdan
ilindi,

telida
(~10~
katta
-ning
butun
, fani

turli
aydo
larini
arida
indan
huhit
it va
shlab

naliy
tadi.
riya,
adro
rdan
deb
ston
i siri
qida
an.

R.S. Yuldashev, S.R. Polonov, E.X. Bozorov. // Amaliy yadro fizikasi // Darslik / Toshkent, "Universitet" 2018. 398 bet

Ushbu darslik amaliy yadro fizikasi sohasidagi mutaxassislar, doktorantlar va oliy o'quv yurtlari maqstrantlari va bakalavrlari uchun mo'ljallangan. Darslikda yadro nurlanishlarining modda bilan o'zaro ta'siri, yadro nurlanishlarining tibbiyotda qo'llanilishi, radioaktiv partchalanishlar, yadro reaksiyalari va ularning turlari, dozimetriya asoslari, aktivatsion tahlil, tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar, pozitron emission tomografiyaning ishlash tamoyili, radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo'llanilishi bayon etilgan.

«Amaliy yadro fizikasi» fanidan ma'ruza va amaliy mashg'ulotlarni o'tkazish, mazkur mashg'ulotlarda topshiriqlarni bajarishga doir darslik O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim Vazirligi tomonidan tasdiqlangan o'quv rejasiga binoan tayyorlangan.

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligining 2018-yil 27-martdagi 274-sonli buyrug'iga asosan, O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi tomonidan litsenziya berilgan nashriyotlarga nashr qilishga ruxsat berildi.

UDK 539.12-13
BBK 22.383

Taqrizchilar: O'zRFA akademigi, O'zMU fizika fakulteti "Yadro fizikasi" kafedrasini professori, fizika – matematika fanlari doktori

T.M. Muminov

O'zMU fizika fakulteti "Yadro fizikasi" kafedrasini professori, fizika – matematika fanlari doktori

I. Xolbaev

O'zRFA akad. O.S. Sodiqov nomidagi Biorganik kimyo instituti, biologiya fanlari doktori

Sh.S. Xushmatov

O'zRFA Yadro fizikasi instituti "Yadroviy tibbiyot" laboratoriyasi mudiri, fizika – matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

G.A. Qulabdullaev.

KIRISH

Yadro fizikasi fani atom yadrosining tuzilishi, xususiyati va unda beradigan jarayonlar haqidagi fandir. Yadro fizikasi sohasida qo'yilgan birinchi qadam 1896 yilda A. Bekkerel tomonidan radioaktivlik hodisasining kashf etilishi bo'ldi. Ushbu kashfiyotdan keyin radioaktivlik hodisasi bo'yicha ketma-ket kashfiyotlar qilindi, yangi radioaktiv izotoplar kashf etildi.

Atom yadrosi to'g'risida birinchi ma'lumot 1911 yilda

E. Rezerford tomonidan taklif etilgan atomning yadro modelida berildi. Bu modelga asosan atom markazida juda kichik o'lchamli ($\sim 10^{-10}$ sm) musbat zaryadlangan yadro va uning atrofida nisbatan katta masofada ($\sim 10^{-8}$ sm) joylashgan elektronlardan iboratdir. Elektronning massasi juda ham kichik bo'lgani sababli, atomning deyarlik butun massasi yadroda to'plangan bo'ladi. Shunday qilib, "Yadro fizikasi" fani dunyoga kelgan sana 1911 yil deb aytish mumkin.

Yadro fizikasining keyingi rivojlanishi va uning yutuqlarini turli sohalarga qo'llash natijasida yangi fan - amaliy yadro fizikasi paydo bo'ldi.

Amaliy yadro fizikasi fani yadro fizikasining muhim yutuqlarini amalda, ya'ni: fan va texnikada, tibbiyotda, sanoatning turli sohalarda qo'llashdan iborat. Amaliy yadro fizikasining asosiy mo-hiyati shundan iboratki, bunda yadro fizikasining yutuqlari asosida modda, atrof-muhit ob'ektlari, texnologik jarayonlarning turli xususiyatlarini nazorat va tadqiq qilish uchun yadro-fizikaviy metodlar, asbob va uskunalar ishlab chiqish, yaratish va qo'llashdan iborat.

Hozirgi kunda ushbu fan jadal rivojlanib borayotgan amaliy fanlardan biridir. Ushbu fan bir necha yo'nalishlarga bo'linib ketadi. Shularning ichida eng muhimlari aktivatsion tahlil, dozimetriya, nurlanishlarning moddalar bilan o'zaro ta'siri, yadro energetikasi, yadro tibbiyoti va yadro ekologiyalari hisoblanadi. Bu yo'nalishlardan tashqari mazkur fan asosida yangi yo'nalish - yadro texnologiyalari deb nomlangan yo'nalish ham vujudga keldi. Mazkur kitobda aktivatsion tahlil, dozimetriya va nurlanishlarning moddalar bilan o'zaro ta'siri yo'nalishlariga asosiy e'tibor berilgan. Qisman yadro tibbiyoti haqida ham muhim ma'lumotlar beradigan mavzular va tushunchalar kiritilgan.

I BOB. RADIOAKTIVLIK HODISASI

Radioaktivlik hodisasi kashf etilganligiga ham yuz yildan oshdi. Ushbu davr ichida bu hodisa har tomonlama o'rganildi, yangi xususiyatlari va turlari kashf etildi. Eng so'nggi kashf etilgan turlardan biri bu klaster radioaktivlik yoki klaster parchalanishdir. Bu parchalanish yigirmanchi asrning oxirlarida kashf etilgan bo'lib, u noyob radioaktivlikliklar guruhiga kiradi. Hozirgi kunda 25 ta yadroning klaster parchalanishi eksperimental aniqlanildi.

Radioaktivlik ikki xil ko'rinishda, ya'ni tabiiy va sun'iy radioaktivlikga bo'linadi. Erda uchraydigan tabiiy radioaktivlikni ilk bor Per va Mariya Kyurilar tadqiq qilgan. Sun'iy radioaktivlikni yoki sun'iy radioaktiv elementlarni ilk hosil qilish imkoniyatlarini ochgan olimlar Iren va Frederik Jolio-Kyurilardir. Ular ilk bor sun'iy radioaktiv elementni sintez qilganlar. Keyinchalik bu radioaktiv izotoplar turli soha-larda keng qo'llanila boshlandi.

Keyingi vaqtlarda radioaktiv izotoplar ishlab chiqarish va ularning qo'llanish sohalari kengayib bormoqda. Ayniqsa buni tibbiyotda qo'llanishi va ishlab chiqarilayotgan radioaktiv izotoplar (radionuklidlar) soni va nomenklaturasi oshishida yaqqol ko'rish mumkin.

Mazkur bobda radioaktivlik, radioaktiv parchalanish qonun-lari, parchalanish turlari, ichki konversiya hodisasi, Myosbauer effekti va uning qo'llanilishi hamda radioaktiv fon mavzulariga to'xtalib o'tiladi.

1.1-§. Radioaktivlik hodisasining umumiy tavsifi

Radioaktivlikning kashf etilishi atom tuzilishi haqidagi ta'limot taraqqiyotida katta ahamiyatga ega bo'ldi. Radioaktivlikni (lotinchadan radio - nurlanish, radius - nur va activus - ta'sirchan) 1896-yilda fransuz olimi Anri Bekkerel kashf etdi. A. Bekkerel uran metalli birikmalari bo'lgan rudada ko'zga ko'rinmaydigan, ammo fotoplastinkaga ta'sir qiladigan nurlar chiqarishini pay-qadi. Agar qorong'i uydagi bir parcha uran rudasi fotoplastinka ustiga bir necha kun qo'yilib, so'ngra plastinka ochiltirilsa, unda ruda parchasi-ning tasviri tushib qolganini ko'rish mumkin. Radioaktivlik hodisasini Bekkerel ana shu yo'l bilan topgan. Bekkerel kashfiyotidan ko'p

Amaliy yadro fizikasiga bag'ishlangan mazkur darslik muallif-larining Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti fizika fakulteti "Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika" mutaxassisligida ta'lim olayotgan talabalarga ko'p yillar davomida o'qilgan ma'ruzalari asosida tayyorlanildi.

Ushbu darslik o'zbek tilida ilk bor yozilgan. Bunda amaliy yadro fizikasi fani sohasida qo'lga kiritilgan eng so'ngi yutuqlar to'liq bayon etilgan. Darslikning asosiy maqsadi amaliy yadro fizikasi yutuqlarini fan va texnikada, tibbiyotda va sanoatda qo'llanilishini yoritishdan iborat.

Darslik beshta bobdan iborat. Kirish qismida amaliy yadro fizikasining rivojlanish bosqichlari bayon etilgan. Radioaktivlik hodisasi va uning turlari, radioaktiv fon, yadro reaksiyalari va ularning turlari, yadro reaksiyalarining radioizotoplar olishda qo'llanilishi, tibbiyotda radioizotoplarining qo'llanilishi va imkoniyatlari birinchi va ikkinchi boblarda bayon etilgan. Zaryadlangan zarralarning modda bilan o'zaro ta'siri, elektronlarning radiatsion tormozlanishi, Vavilov-Cherenkov nurlanishi, sinxrotron nurlanishlar, zaryadlangan zarralarning kristallardan o'tishida kanallashish hodisi, gamma-nurlarning modda orqali o'tishi kabi mavzular uchinchii bobda bayon etilgan. To'rtinchi bob alohida e'ti-borga sazovor bo'lib, bunda zamonaviy tibbiyotda yadro nurlanish-larining qo'llanilishlari, radioizotoplarining tashxis va davolashda qo'llanilishlari to'liq yoritilgan. Zamonaviy yadro fizikaviy tahlil usullaridan biri bo'lgan aktivatsion tahlil metodi va uning turli sohalarda qo'llanilishining analitik imkoniyatlari beshinchi bobda keltirilgan. Shuningdek darslikda nazorat savollar, bobga oid masalalar echimlari va mustaqil echish uchun masalalar, glossariy va test savollari ham keltirilgan bo'lib, bular talabalarga mazkur fanni o'zlashtirishda yordam beradi.

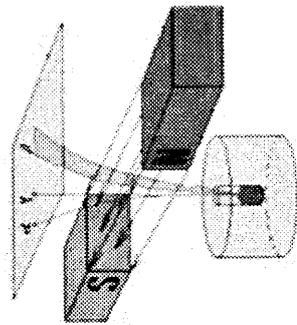
Mualliflar mazkur kitob qo'lyozmasini ko'rib chiqib qimmatli maslahatlar bergan yadro fizikasi kafedrası professori, f.-m.f.d. I. Xolbaevga, O'zR FA Yadro fizikasi instituti katta ilmiy xo-dimlari, f.-m.f.n. G'.A. Qulabdullaevga, M. Kayumovga va O'zR FA akad. O.S.Sodiqov nomidagi Bioorganik kimyo instituti, biologiya fanlari doktori Sh.S. Xushmatovga, shuningdek kitobni nashr etishda maxsus muharririk qilgan O'zR FA akademigi, professor T.M. Mo'minovga o'z minnatdorchiiliklarini izhor qiladilar.

Ushbu darslik amaliy yadro fizikasi fani bo'yicha ilk bor o'zbek tilida yozilgan birinchi kitob bo'lgani uchun u ayrim kamchiliklardan holi emas.

Mualliflar kitobning keyingi nashrlarida bu kamchiliklarni tuzatishlariga imkon beradigan taklif va mulohazalarini yuboruvchi kitobxonlarga minnatdorchilik bildiradilar.

o'tmasdanq bunday ko'zga ko'rinmas nurlarni boshqa moddalar ham chiqarishi aniqlangan. Barcha bunday moddalar radioaktiv moddalar deb, moddalarning bunday nurlar chiqarish xususiyati esa radioaktivlik deb atala boshlandi. Radioaktivlik hodisasini o'rganish sohasida fransuz olimlari Mariya Sklodovskaya-Kyuri va Per Kyurilarning xizmati katta bo'ldi. Ular bir necha tonna uran rudasini qayta ishlab, fanga ma'lum bo'lmagan metallning bir grammiga yaqin miqdorini ajratib olishgan. Bu metallning radioaktivligi uranning radioaktivligidan bir necha million marta ortiq ekanligi anqlanildi. Olimlar bu metallni radiy deb atashgan (radiy – nurlı demakdir, lotincha radius – nur so'zidan olingan). Olimlar radioaktiv parchalanish jarayoniga tabiatdagi qanday kuchlar ta'sir eta oladi (uni tezlashtiradi yoki sekinlashtiradi) degan savolga javob izlay boshladilar. Diqqat bilan o'tkazilgan tekshirishlar natijalaridan ma'lum bo'ldiki, juda yuqori yoki juda past temperaturalar, kuchli elektr va magnit maydonlari, yuqori bosim va tezlanishlar, kuchli ximiyaviy reaktivlar ham radiyning parchalanish jarayoniga ta'sir eta olmasligini ko'rsatdi. Per va Mariya Kyurilar radiy donachasini magnit maydoniga qo'yib, bir jinsli bo'lgan radioaktiv nurlar das-tasini maydon ta'sirida ikki dastaga ajralishini payqadilar. Bu dastalardan birida radioaktiv zarrachalar oldingi yo'nalishda to'g'ri chiziq bo'ylab harakatlanadi, ikkinchisida esa bir tomonga og'ib, o'z yo'lini o'zgartiradi. Nurlarning og'ish yo'nalishi va burchagiga qarab, og'uvchi nurlar manfiy zarralar oqimi ekanligiga ishonch hosil qi-lish mumkin. Juda sinchiklab tekshirishlar natijasi bu nurlarning elektronlar ekanligini ko'rsatdi. Uchib chiqayotgan elektronlarning tezlik-lari turlicha bo'lib chiqdi. Magnit maydon ta'sirida og'uvchi dastada tezliklari yorug'lik tezligiga yaqin tezlik bilan harakatlanuvchi elektronlar ham uchraydi. Radioaktiv nurlarning magnit maydonida og'maydigan qismi qanday tabiatga ega ekanligini aniqlashgina qoldi. Ingliz fizigi Ernest Rezerford bu masalani hal qilishga kirishdi. U Per va Mariya Kyurilar tajribasini kuchli magnit maydonida o'tkazishga ahd qiladi. E.Rezerford tajribasida radio-aktiv nurlarning Per va Mariya Kyurilar tajribasidagi magnit maydon ta'sirida og'maydigan qismi kuchli magnit maydonda ikkita dastaga ajralishi kuzatildi. Bu dastalardan biri magnit maydon ta'sirida mutlaqo og'may, to'g'ri chiziiq bo'ylab boradi, ikkinchisi esa elektronlarning og'ish yo'nalishiga qarama-qarshi tomonga bir oz og'adi. Rezerford o'z

taqrubasi natijalarini tahlil qilib, radio-aktiv nurlarning bu qismi musbat zaryadlangan zarrachalar oqimidan iborat degan xulosaga keladi (1.1-rasm).



1.1-rasm. Tajribada nurlarning hosil bo'lishi.

Ushbu tajribadagi nurlar dastalariga grek alifbosining dast-labki uchta harfining nomi berilgan: alfa (α)-nurlar, beta (β)-nurlar va gamma (γ)-nurlar. Tajriba natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, alfa-nurlar geliy atomi yadrolarining oqimi, beta-nurlar tez harakatlanayotgan elektronlar oqimi, elektr va magnit maydonida hech yoqqa og'maydigan gamma-nurlar esa elektromagnit nurlanish bo'lib, elektromagnit to'lqinlar shkalasida rentgen nurlardan keyin joylashgan.

Radioaktiv parchalanish yuz berishi uchun energetik shart bajarilishi zarur. Bunda radioaktiv parchalanayotgan yadroning massasi parchalanishda hosil bo'lgan zarralar va bo'laklarning massalari yig'indisidan katta bo'lishi shart. Bu esa radioaktivlikning etarli bo'lmagan zaruriy shartidir.

Radioaktiv parchalanish, uning sodir bo'lish vaqti, nurlanayotgan zarralar turi, ularning energiyasi va ularning o'zaro uchib chiqish burchaklari bilan tavsiflanadi.

Radioaktiv yadrolarning yashash vaqtlari sekunddan yillargacha bo'lgan oralig'ida yotadi. Odatda sekunddan yilgacha bo'lgan vaqt radiotexnik usulda, sekunddan kichik vaqt esa yadroning energetik sathi kengligini o'lchashan orqali topiladi. Radioaktiv yadrolarning yashash vaqti, ularning parchalanishda ajralgan energiyaga bog'liqdir. Agarda bu energiya kichik bo'lsa, yashash vaqti keskin ortadi va

bunda yashash vaqti boshlang'ich va oxir-gi holatdagi yadrolarning spinlari farqiga kuchli bog'liq bo'ladi.

Hozirgi kunda quyidagi ko'rinishdagi parchalanishlar ma'lum:

- α -parchalanish (${}^4_2\text{He}$ yadrosi);
- β -parchalanish (e^- , ν_e , $\bar{\nu}_e$);
- γ -parchalanish;
- spontan (o'z-o'zidan) bo'linish;
- nuklonlar chiqishi (biita proton yoki neytron, ikkita proton);
- klasterlar chiqishi (${}^{12}_6\text{C}$ dan ${}^{32}_16\text{S}$ gacha bo'lgan yadrolar).

Radioaktiv parchalanish har doimo ekzotermik, ya'ni energiya ajralishi bilan yuz beradigan jarayondir. Radioaktiv parchalanishda ajralgan E energiya quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$M_f c^2 = M_p c^2 + \sum_s m_s c^2 + E, \quad (1.1)$$

bu yerda M_f ; M_p ; m_s - mos ravishda boshlang'ich yadro, oxirgi yadro va uchib chiqayotgan zarralar massalaridir.

1.2-§. Radioaktiv parchalanishning asosiy qonunlari

Radioaktiv parchalanishlar statistik hodisa hisoblanadi. Muayyan radioaktiv moddada barcha atomlar ayni bir vaqtda parchalanmaydi. Ularning ba'zilarida bu jarayon juda qisqa vaqtda ro'y bersa, boshqalarida esa juda uzoq vaqt davomida sodir bo'ladi. Bundan radioaktiv parchalanish hodisasi statistik hodisa ekanligi, ya'ni noturg'un yadroni qachon parchalanishini oldindan aytish mumkin emasligi va bu jarayonni ehtimollik nazariyasi qonunlari asosida tushuntirishi kelib chiqadi. Ushbu jarayonni tavsiflovchi kattaliklardan eng muhimi bu vaqt birligi ichida parchalanish ehtimolligi, ya'ni parchalanish doimiysi λ hisoblanadi. Agarda N ta bir xil turg'un bo'lmagan yadrolarni olsak, u holda birlik vaqt ichida o'rtacha λN ta yadro parchalanadi. Bu kattalik aktivlik deyiladi. Aktivlik bu radioaktiv yadrolarning parchalanish tezligi.

Xalqoro birliklar sistemasida (XBS) aktivlik birligi qilib, I sekunddagi parchalanishlar soni qabul qilingan, ya'ni I parchalanish/c. Bu birlik Bekkerel (Bk) deb ham aytiladi. I Bk=I

parch./c. Xalqoro birliklar sistemasiga kirmaydigan quyidagi birliklar ham qo'llaniladi:

- 1 Rezerford=1 Rd = 10^6 Bk;
- 1 Kyuri=1 Ku = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bk;
- 1 mKu = 10^3 Ku;
- 1 mkKu = 10^{-6} Ku.

Radioaktiv parchalanish doimiysi λ , vaqtga bog'liq emas. Buning ma'nosi shuki, yadroning yoshi tushunchasi mavjud bo'lmasdan, atom yadrosi uchun o'rtacha yashash vaqti to'g'risidagina gapirish mumkin.

Agar dt vaqt ichida o'rtacha dN ta yadro parchalansa, ushbu parchalanishlar soni faqat parchalanuvchi radioaktiv yadrolar soniga bog'liq bo'ladi, ya'ni:

$$dN = -\lambda N(t) dt \quad (1.2)$$

bu yerda manfiy ishora radioaktiv yadrolarning umumiy sonini vaqt o'tishi bilan kamayishini ko'rsatadi. $t = t_0 = 0$ da $N(t_0) = N_0$ ekanligini hisobga olib (1.2) ifodani integrallaymiz va quyidagi formulani olamiz:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.3)$$

Bu radioaktiv parchalanishning asosiy qonunini ifodalovchi formuladir. Bu yerdan ko'rinadiki, radioaktiv yadrolar soni vaqt o'tishi bilan eksponensial qonun bo'yicha kamayib boradi. Aktivlik (1.2) ga ko'ra:

$$A = -\frac{dN}{dt}, \quad (1.4)$$

bo'ladi. Demak, aktivlik bu parchalanish tezligini ifodalaydi. $A = \lambda N$ ifodani (1.3) formulaga qo'yamiz va quyidagi formulani hosil qilamiz:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.5)$$

Radioaktiv parchalanish hodisasida muhim bo'lgan yana bir kattalik bu yarim emirilish yoki yarim parchalanish davridir. Yarim parchalanish davri deb, radioaktiv yadrolarning yarimi parchalanishi uchun ketgan vaqtga aytiladi va $T_{1/2}$ belgilaniladi. Yarim parchalanish davridan so'ng radioaktiv yadrolar soni ikki baravar kamayganligidan, λ va $T_{1/2}$ orasidagi bog'lanish quyidagicha bo'ladi:

Bu tenglamalarning ma'nosi quyidagicha: birlamchi yadroning soni uning parchalanishi hisobiga kamayadi, ikkilamchi yadroning soni ham o'zining parchalanishi hisobiga kamayadi, ammo shu bilan birga birlamchi yadroning parchalanishi hisobiga ortadi. Bu tenglamalar sistemasini echamiz va quyidagi ifodalarni olamiz:

$$\begin{cases} N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) = N_{20} e^{-\lambda_2 t} + \frac{N_{10} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{cases} \quad (1.12)$$

$t = 0$ da birlamchi yadroning soni N_{10} ta, ikkinchi yadroning soni esa $N_{20} = 0$ bo'lsin, u holda (1.12) tenglamalar sistemasini quyidagi ko'rinishga keladi, ya'ni:

$$\begin{cases} N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) = \frac{N_{10} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{cases} \quad (1.13)$$

Agar esa $N_{20} = 0$ va $T_1 \gg T_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) bo'lsa, $t \ll T_1$ vaqt uchun (1.13) ifoda quyidagiko'rinishga keladi:

$$N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.14)$$

Demak, $T_1 \gg T_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) bo'lgan holda radioaktiv yadrolarning parchalanish qonuni ikkilamchi yadroning parchalanish doimiysi bilan tavsiflanar ekan. Agar $t \gg T_2$ ya'ni $\lambda_2 t \gg 1$ bo'lganda (1.14) ifoda o'zining chegaraviy qiymatiga yaqinlashadi:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2} = const \quad (1.15)$$

Agar $t > 10T$ bo'lsa, (1.15) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

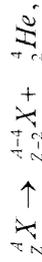
$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2. \quad (1.16)$$

Bu ifoda asriy muvozanat tenglamasi deb ataladi. Bunda vaqt birligi ichida hosil bo'layotgan ikkilamchi yadrolar soni

parchalanayotgan birlamchi yadrolar soniga teng degan ma'noni beradi. Bunga misol qilib radiy parchalanishi natijasida radon hosil jarayonini keltirish mumkin.

1.3-§. Alfa-parchalanish

Og'ir yadrolarning o'z - o'zidan α -zarralar chiqarib parchalanishiga α -parchalanish hodisasi deyiladi. Alfa-parchalanishda yadroning massa soni to'rt birligiga, atom nomeri esa ikkita birligiga kamayadi, ya'ni:



bu yerda ${}^A_Z X$ - birlamchi yadro, ${}^{A-4}_{Z-2} X$ - ikkilamchi yoki hosilaviy yadro.

Alfa-parchalanish sodir bo'lishi uchun quyidagi tengsizlik bajarilishi lozim:

$$M(A, Z) \geq M(A-4, Z-2) + M({}^4_2 He) \quad (1.17)$$

ya'ni birlamchi yadroning massasi (energiyasi) ${}^{A-4}_{Z-2} X$ hosilaviy yadroning va α -zarra massalari yig'indisidan katta bo'lishi kerak. Alfa-parchalanishda ajralgan Q_α energiya α -zarraning kinetik energiyasi va hosilaviy yadroning olgan tepki energiyasiga sarflanadi, ya'ni:

$$Q_\alpha = [M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M({}^4_2 He)]c^2 = T_\alpha + T_l \quad (1.18)$$

bu yerda T_α - α -zarraning kinetik energiyasi, T_l - tepki yadroning kinetik energiyasi. Bu jarayon uchun impuls saqlanish qonuni quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\vec{P}_\alpha + \vec{P}_l = \vec{P}(A, Z).$$

bu yerda \vec{P}_α - α -zarraning impulsi, \vec{P}_l - tepki yadroning impulsi. Agar parchalanayotgan yadro tinch holda turibdi deb faraz qilinsa, quyidagi tenglik o'rinli bo'ladi: $|\vec{P}_\alpha| = |\vec{P}_l|$ bundan

$$T_l = T_\alpha M_\alpha / M_l. \quad (1.19)$$

(1.19) ifodani (1.18) ga qo'yamiz

$$Q_\alpha = T_\alpha + T_l = T_\alpha \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_l} \right). \quad (1.20)$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (1.6)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Yadrolarning o'rtacha yashash vaqti:

$$\tau = \bar{T} = \int_0^\infty t dN(t) / \int_0^\infty dN(t) = N_0 \int_0^\infty \lambda t \exp(-\lambda t) dt / N_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.7)$$

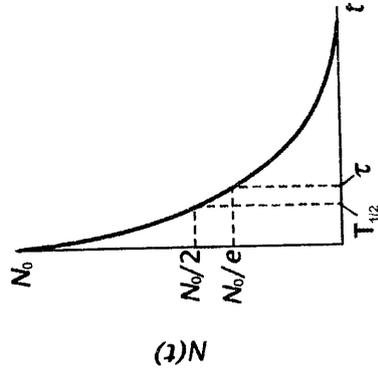
Yuqorida keltirilgan (1.3) ifodaga (1.7) ifodani qo'yib, quyidagi formulani olamiz:

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

Agar $t = \tau$ bo'lsa, u holda

$$N = N_0 / e$$

Demak, yadroning o'rtacha yashash vaqti davomida yadrolar soni e marta kamayadi. Radioaktiv parchalanishning eksponensial qonuni 1.2-rasmda grafik ko'rinishida keltirilgan.



1.2-rasm. Radioaktiv parchalanishning eksponensial qonuni. Bu yerda yarim parchalanish davri $T_{1/2}$ va o'rtacha yashash vaqti $\tau = 1/\lambda$ keltirilgan.

Ayrim hollarda absolyut aktivlikdan tashqari solishtirma, hajmiy va sirt aktivligi deb nomlangan kattaliklardan ham foydalaniladi.

Bir jinsli radioaktiv namunaning solishtirma aktivligi deb massa birligidagi aktivligiga aytiladi:

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad (1.8)$$

bu yerda A - radioaktiv namunaning (modda) aktivligi, m - uning massasi. Solishtirma aktivlikning o'lchov birligi (XBS da) Bk/kg. Shuningdek hosilaviy o'lchov birliklar Bk/g va sistemadan tashqari o'lchov birlik Ki/kg (yuqori aktivlikdagi manbalar uchun).

Bir jinsli suyuq va gazsimon namunalar hajmiy aktivlik bilan tavsiflanadi va u quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$A_v = \frac{A}{V}, \quad (1.9)$$

bu yerda A - radioaktiv namuna (modda) aktivligi, V - uning hajmi. Hajmiy aktivlik o'lchov birligi (XBS da) Bk/m³. Ammo ko'pchilik holalarda Bk/l qo'llaniladi.

Radionuklidlar bilan tekis ifloslangan (to'kilgan yoki yoyilgan) sirtning sirt aktivligi deb birlik yuzaga mos keluvchi aktivlikka aytiladi:

$$A_s = \frac{A}{S}, \quad (1.10)$$

Bu yerda A - sirtning S yuzasi bo'ylab tekis taqsimlangan aktivlik. Sirt aktivligining o'lchov birligi (XBS da) Bk/m². Shuningdek hosilaviy o'lchov birliklar Bk/sm² va sistemadan tashqari o'lchov birlik Ki/km².

Ko'pchilik hollarda radioaktiv yadrolarning parchalanishi natijasida hosil bo'lgan ikkilamchi yadrolar ham radioaktiv bo'lishi mumkin, ya'ni 1 chi radioaktiv yadro parchalanishi natijasida 2 chi yadro va bu parchalanishi natijasida 3 chi yadro va h.k. radioaktiv yadrolar hosil bo'ladi:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$$

Bu holda birinchi yadrolarning soni o'zgarishi N_1 , ikkilamchi yadrolarning sonini o'zgarishini esa N_2 deb belgilab olamiz va ushbu o'zgarishlarni ifodalovchi quyidagi differensial tenglamalar sistemasini hosil qilamiz:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 \quad (1.11)$$

Bu yerdan

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M_r}{M_r + M_\alpha} \quad (1.21)$$

bu yerda M_r - tepki yadro massasi. Shunday qilib, α -parchalanish natijasida ajralib chiqadigan kinetik energiyaning asosiy qismini α -zarra olib ketadi, juda kam qismini (α -radioaktiv og'ir yadrolarda uchun ~2% ga yaqin) ikkilamchi (hosilaviy) yadro olib ketadi.

Alfa-parchalanishning quyidagi o'ziga xos empirik xususiyatlari mavjud:

1. Alfa-parchalanishlar faqat og'ir yadrolarda sodir bo'ladi. Hozirgi kundan alfa-parchalanuvchi yadrolar soni 200 dan oshadi va ular asosan $Z > 83$ sohada kuzatiladi. Alfa-parchalanuvchi yadrolarning kichik guruhi noyob elementlar sohasida, ya'ni $A = 140 - 160$ ham uchraydi.

2. Alfa-parchalanuvchi yadrolarning yarim parchalanish davri juda katta diapozonda yotadi. Qurg'oshin-204 yadrosining yarim parchalanish davri $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{17}$ yil bo'lsa, radon-215 radioaktiv yadrosining parchalanish davri esa $T_{1/2} = 10^{-3}$ s ni tashkil qiladi. Ikkinchi tomondan α -parchalanishda chiqayotgan zarralarning energiyasi kichik diapozonda o'zgaradi, ya'ni og'ir yadrolar uchun 4-9 MeV bo'lsa, noyob elementlar sohasi uchun esa 2-4,5 MeV ga teng bo'ladi.

1911 yilda Jon Mitchel Nettola va Gans Geygerlar alfa-aktiv yadrolarning yarim parchalanish davri bilan alfa-zarralar energiyasi orasidagi bog'lanishni, ya'ni Geygera — Nettola qonuni kashf qildilar. Bu qonun quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$\log T_{1/2} = C + \frac{D}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad (1.22)$$

bu yerda S , D - doimiy kattaliklar bo'lib, A massa soniga va Z ga esa kuchsiz bog'liq. Agar logarifim o'ni va energiya MeV larda ifodalansa, u holda yuqoridagi ifodadagi S va D doimiy kattaliklar quyidagiga teng bo'ladi:

$$Z = 84 \text{ uchun } S = -50,15; D = 128,8 \text{ bo'ladi};$$

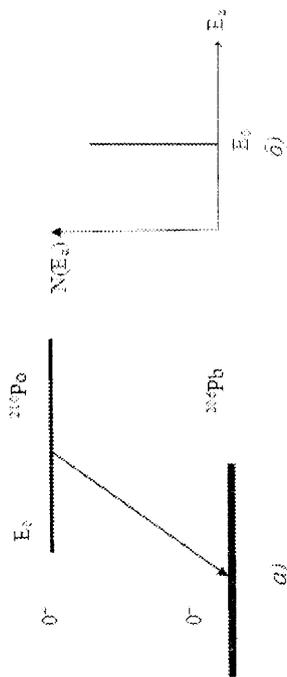
$$Z = 90 \text{ uchun } S = -51,94; D = 139,4 \text{ bo'ladi}.$$

Geygera-Nettola qonuni juft-juft yadrolar uchun yaxshi bajariladi.

Alfa-parchalanish yuz berishi mumkin bo'lgan sxemasini $^{210}_{84}\text{Po}$ yadrosining α -parchalanish misolidada ko'rib chiqamiz. Poloniy-210 yadrosi quyidagi sxema bo'yicha parchalanadi:



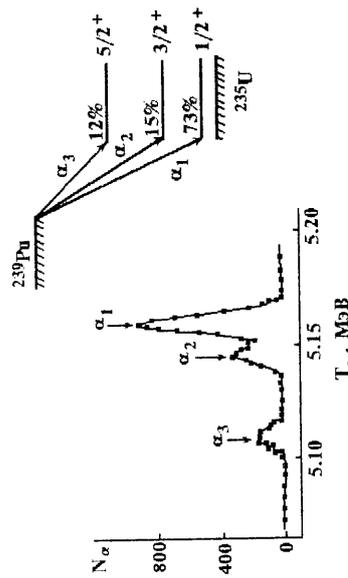
natijada ikkilamichi yadro - qo'rg'oshin-206 hosil bo'ladi. Ushbu o'tish, moment va juftlikni o'zgarimasligi bilan xarakterlanadi, ya'ni birilamchi yadro va ikkilamchi yadrolarning asosiy holatlarining spini va juftliklari bir xil (0^+). Mazkur parchalanish sxemasi va α -zarralar energetik spektri 1.3-rasmda keltirilgan bo'lib, bunda spektrning monoenergetik va diskret ekanligi yaqqol ko'rinib turibdi. Ko'p hollarda α -parchalanish natijasida hosil bo'lgan α -zarralarning kinetik energiyasi bir xil bo'ladi. Ammo ba'zi hollarda bir nechta guruh monoenergetik



1.3-rasm. Poloniy-210 yadrosining parchalanish sxemasi (a) va α -zarralar energetik spektri (b).

α -zarralar hosil bo'ladi. Aniq o'lchashlar shuni ko'rsatdiki, yadrodan chiqayotgan α -zarralar spektri nozik strukturaga, ya'ni bir biriga juda yaqin bo'lgan energiyalardan iborat ekan. Bitta yadroning parchalanishi vaqtida turli energiyali α -zarralarning hosil bo'lishi α -parchalanishning nozik strukturasi deyiladi. Alfa-zarralar spektri oxirgi yadroning nafaqat asosiy holatda, balki uyg'ongan holatlarda ham hosil bo'lishi bilan bog'liq. Ya'ni α -spektr yadro sathlari haqida

axborot beradi. 1.3-rasmda plutoniy ^{239}Pu yadrosining α -parchalanish sxemasi keltirilgan.



1.3-rasm. Plutoniy ^{239}Pu yadrosining α -parchalanish sxemasi.

Alfa-radioaktiv yadrolar yarim parchalanish davrining keng diapazonga egaligi, shuningdek, ko'plab α -radioaktiv yadrolar uchun ushbu davrlarning katta qiymati, α -zarra, energetik qo'lay bo'lishiga qaramay, yadroni "darhol" tark eta olmasligi bilan tushuntiriladi. Yadroni tark etish uchun α -zarra, yadro chegarasi sohasidagi α -zarra bilan oxirgi yadroning (α -zarra chiqib ketgandan keyin qolgan yadro) o'zaro ta'sir elektrostatik potentsiali va nuklonlar orasidagi tortishi kuchlari hisobiga vujudga kelgan potentsial to'siqni engib chiqib ketishi lozim. Klassik fizika nuqtai nazaridan, α -zarra potentsial to'siqni engib o'tolmaydi, chunki buning uchun zarur kinetik energiya yo'q. Ammo kvant mexanikasi bo'yicha α -zarra potentsial to'siqdan o'tib, yadrodan chiqib ketish ehtimoligi mavjud. Ushbu kvant mexanik hodisa "tunnel effekti" deb nomlanadi. To'siqning balandligi va kengligi qancha katta bo'lsa, zarraning tunnel o'tish ehtimoligi shunchalik kichik bo'ladi va yarim parchalanish davri mos ravishda katta bo'ladi. Agar potentsial to'siq yo'q bo'lsa, α -zarra yadroni yadro vaqtiga ($\approx 10^{-21} - 10^{-23}$ s) teng bo'lgan vaqt davomida tark etgan bo'lar edi.

2.6.2
6 6 0

1.4-§. Beta-parchalanishlar

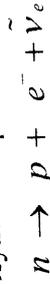
Yadroning o'z - o'zidan elektron (pozitron) va antineytrino (neytrino) chiqarib, parchalanish hodisasiga beta-parchalanish deyiladi. Beta-parchalanishda yadro massa soni o'zgarmaydi, ya'ni parchalanish natijasida izobar yadro hosil bo'ladi. Beta-parchalanishning uch xil turi mavjud bo'lib, ular quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

1. β^- - parchalanish,
2. β^+ - parchalanish,
3. e-qamrash.

Ushbu β -parchalanishning turlari bilan alohida tanishib o'tamiz. **β^- - parchalanish.** Mazkur turdagi parchalanishda yadro zaryadi bitta-ga ortadi, yadrodan elektron va antineytrino chiqib ketadi, ya'ni:



Beta-parchalanish nuklonlarda sodir bo'ladigan jarayon bo'lib, bunda yadrodagı neytronlardan biri protonga aylanadi. Bunda yadrodan elektron va antineytrino chiqadi:



Massa soni A va zaryadi Z bo'lgan yadro uchun β^- parchalanishning energiya bo'yicha bajarilish sharti qo'yidagicha:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e,$$

Bu shartni atomlar massasi orqali ham ifodalash mumkin. Buning uchun tengsizlikning ikkala tomoniga Zm_e hadni qo'shamiz va quyidagi tengsizlikni olamiz:

$$M_{am}(A, Z) > M_{am}(A, Z+1)$$

β^+ - parchalanish. Bu holda yadrodagı protonlardan biri neytronga aylanadi va yadro zaryadi bittaga kamayadi:



Bunda yadrodan pozitron va neytrino chiqadi:



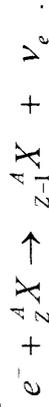
β^- - parchalanishning energetik sharti qo'yidagicha:

$$M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e.$$

Ikkkala tomoniga $(Z+1)m_e$ hadni qo'shamiz va yadro massasidan atom massasiga o'tamiz, ya'ni:

$$M(A, Z+1) > M(A, Z) + 2m_e.$$

Elektron-qamrash. Beta-parchalanishga e-qamrash hodisasi ham kiradi. Ko'pchilik hollarda *K-qamrash* ham deyiladi. Bunda yadro *K-qobiqdagi* bitta elektronni o'ziga yutib (qamrab) oladi va uning zaryadi bittaga kamayadi.



Ushbu hodisada yadrodagı bitta proton neytronga aylanadi va yadrodan neytrino chiqib ketadi, ya'ni:



K-qamrashning energetik sharti qo'yidagicha:

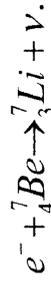
$$M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1)$$

yoki atom massasi orqali ifodalansa:

$$M_{am}(A, Z) > M_{am}(A, Z-1)$$

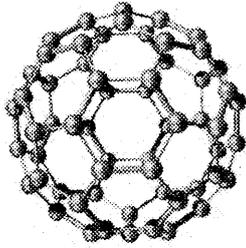
Elektron-qamrash hodisasi 1936 yilda yapon olimlari Xiderik Yukava va Shoichi Sakata tomonidan oldindan nazariy aytilgan va ikki yildan keyin tajribada amerikalik olim Luis Alvares tomonidan kashf etilgan. bo'lib, unga elektron qamrash deb nom berilgan.

Elektron qamrash beta parchalanishlarning bir turi hisoblanadi va bu hodisa bilan yuqorida tanishib o'tdik. Elektron qamrashga misol qilib, ${}^7_4\text{Be}$ yadrosining elektron qamrash orqali beta parchalanishini keltirish mumkin. Uning yadrosi atom elektron qobig'idagi bir elektronni o'ziga «tortib» oladi va litiy yadrosiga aylanadi. To'rtta proton va uchta neytrondan iborat bo'lgan berilliy yadrosi qobiqdagi bitta elektronni o'ziga yutib, uchta protonli va to'rtta neytronli litiy yadrosiga aylanadi. Pozitron parchalanishi kabi protonlardan bittasi neytronga aylanadi:



Elektron qamrash jarayonining ehtimolligi, yadro yaqinidagi elektronlarning zichligiga bog'liq bo'lib, uning oshishi bilan elektron qamrashning ehtimolligi ham oshadi. Bundan elektron qamrashni amalga oshirish imkoniyatiga ega bo'lgan radioaktiv elementlar yadrosining o'rtacha yashash vaqti, ular ushbu elementning sof namunasi tarkibiga kirishi yoki uning kimyoviy birikmalar tarkibiga kirishiga qarab o'zgarishi mumkin. Bu xulosa tajribada tekshirilgan va tasdiqlangan, shu bilan birga yashash vaqtining siljishi (yoki ta'bir joyiz bo'lsa yarim parchalanish davri) bunday hollarda foiz ulushlarini tashkil etadi.

Toxoku universiteti yadro fizika laboratoriyasi va Iokogama Milliy universiteti fizika fakulteti xodimlari ${}^7_4\text{Be}$ yadrosida radioaktiv parchalanish tezligini oshirishga muvaffaq bo'lishdi. Ular tajribada fullerenidan foydalanishdi. Fulleren haqida qisqacha ma'lumot: Fullerenlar bu deyarli sferik bo'lgan, o'nlab atomlardan iborat uglerod molekularidir (1.5-rasm). Birinchi 60-atomli fulleren molekulari 1985-yilda yaratilgan. 60-atomli fulleren qirralari bu 20 ta deyarli ideal to'g'ri oltiburchak va 12 ta besh burchak. Keyinchalik 76, 78, 84, 90 va hatto bir necha yuzlab atomli fullerenlarni ham olishga muvaffaq bo'lishdi.



1.5-rasm. O'nlab atomlardan iborat uglerod molekulari.

Tajribada ${}^7_4\text{Be}$ atomlarini fulleren ichki qismiga haydab kirgizishga erishildi. Natijada berilliy yadrosi atrofidagi elektron zichligi oshgan va bu esa o'z navbatida radioaktiv parchalanish ur'atini oshishga olib keldi. Sof metall berilliy namunasining yarim parchalanish davri 1275 soatni tashkil qilsa, "asirga tushgan" atomlar yarim parchalanish davri uchun 1264 soatga teng. Farqi taxminan 0,85% ni tashkil etadi. Bir qarashda bu miqdor kam bo'lib ko'rinishi

mumkin. Ammo bu hali boshlanishi bo'lib, yangi molekularlarning topilishi bu jarayonlarni yanada tezlashtiradi.

Beta-parchalanish vaqti $T_{1/2}(\beta) = 0.1 \text{ s} - 10^{17}$ yil intervalida bo'ladu. Alfa-parchalanish yadro kuchlari ta'sirida yuz berib, nisbatan qisqa vaqtda ($3 \cdot 10^{-7}$ s gacha) sodir bo'ladi. Beta-parchalanishlar kuchsiz o'zaro ta'sir natijasida yuz berganligi va ushbu ta'sirning kichik intensivlikka ega bo'lganligi sababli, neytronning yashash vaqti (≈ 15 min) katta bo'ladi. Beta-parchalanishda ajralib chiqadigan energiyaga mos kelgan energiyada (0.78 MeV), γ -parchalanishning yuz berish vaqti esa o'rtacha 10^{-12} s ni tashkil qiladi.

Beta-parchalanish energiyasi:

$$Q_{\beta^+} = [M(A, Z) - M(A, Z \mp 1) - m_e]c^2,$$

$$Q_e = [M(A, Z) - M(A, Z - 1) + m_e]c^2.$$

Ushbu ajralib chiqadigan energiya 18.61 keV (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$) dan 13.4 MeV (${}^{12}_5\text{B} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e$) gacha bo'lgan intervalda yotadi.

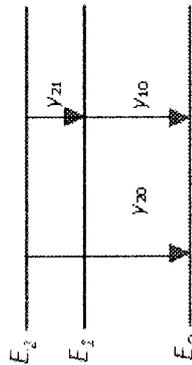
Beta-parchalanishda Kulon to'siqning ta'sirini muhokama qilib o'tirmasa ham bo'ladi. U faqat yadro ichida hosil bo'ladigan pozitron uchun mavjud. Bu yerda eng muhimi, noaniqlik munosabati yadro ichida e^+ uzoq qolib ketishini taqiqlashdir.

Beta parchalanishlar energiyasi uchta zarra orasida taqsimlanadi, ya'ni elektron (pozitron), antineytrino(neytrino) va qoldiq yadro. Natijada β -zarralar energiyasi α -zarralardan farqli ravishda aniq bir energiyaga ega bo'lmaydi va ularning spektri chiziqli (diskret) bo'lmasdan, noldan maksimal kinetik energiyagacha bo'lgan diapozondagi uzluksiz spektrga ega bo'ladi (1.4-rasm). Elektron qamrashda ikkita mahsulot hosil bo'lib, spektri uzluqlikdir.

1.5-§. Gamma-nurlanish

Gamma nurlanishlar deb yadroning o'z-o'zidan γ -kvantlar chiqarish jarayoniga aytiladi. Bu jarayonda yadro uyg'ongan energetik sathidan istalgan bir pastki energetik sathga o'tishi mumkin. Ma'lumki, bunda yadroning A va Z kattaliklari o'zgarmaydi. Atomda elektronlarning o'tishi natijasida hosil bo'ladigan rentgen va yorug'lik kvantlaridan farqli ravishda, yadro chiqarayotgan fotonlar γ -kvantlar deb ataladi. Gamma-kvantlarning nurlanishi yadro ortiqcha energiyasini chiqarishining asosiy jarayonidan biri hisoblanadi. Bunda shunday shart bajarilishi kerakki, ushbu energiya nuklonlarning bog'lanish energiyasidan oshmasligi lozim.

Gamma-kvantlar chiqishi bilan sodir bo'ladigan o'tishlarga radiatsion o'tishlar ham deyiladi. Radiatsion o'tishlar bir karrali, ya'ni yadro birdaniga asosiy holatga o'tadi (1.6-rasm) yoki kaskad (ketma-ket) o'tishlar sodir bo'ladi, natijada yadrodan bir nechta γ -kvantlar chiqib ketadi.



1.6-rasm. γ -o'tishlar sxemasi.

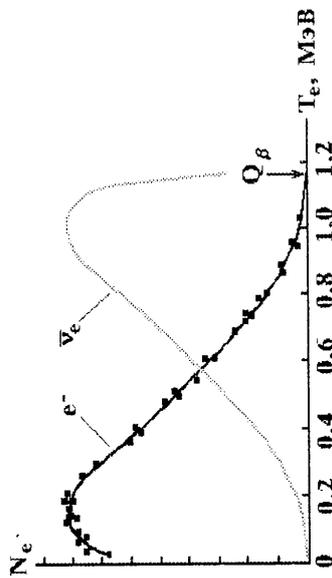
Yadro energetik sathlarining diskret bo'lganligi sababli γ -kvantlarning spektri ham diskret bo'ladi.

Gamma-kvant energiyasi radiatsion o'tish sodir bo'layotgan energetik sathlar energiyalar farqi orqali aniqlaniladi:

$$E = h\nu = E_i - E_j$$

Energiya va impulsning saqlanish qonunlariga asosan (boshlang'ich holatda yadro tinch holda turibdi deb faraz qilinsa):

$$E = E_\gamma + T_{\text{ad}}; \quad 0 = \vec{p}_\gamma + \vec{p}_{\text{ad}}, \quad (1.19)$$



1.4-rasm. $^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} + e^- + \bar{\nu}_e$ parchalanishda hosil bo'ladigan elektron va neytrinolarning energetik spektrlari.

Beta-spektrlarning uzluksizligi 1930-yilda Paulini massasi juda ham kichik va yarim butun spinga ega bo'lgan neytral noma'lum zarra mavjudligi g'oyasiga turtki berdi. Ushbu g'oyaga asosan β^+ -parchalanishda energiyaning bir qismini mazkur zarra olib ketadi. Bu zarraga, 1932 - yilda neytron kashf etilgandan keyin E.Fermi "neytrino" ("neytroncha") deb nom beradi.

Neytrino modda bilan juda kuchsiz ta'sirlashganligi sababli uni kuzatish juda qiyin. Uning qattiq muhitda yugurish yo'li $\approx 10^{15}$ km ga teng. Faqat 1956 yildagina Raynes va Kouenlar tomonidan ney-trino mavjudligi eksperimental tasdiqlangan va uning modda bilan o'zaro ta'sir kesimi $\sigma \approx 10^{-43}$ sm^2 atrofida ekanligi baholandi.

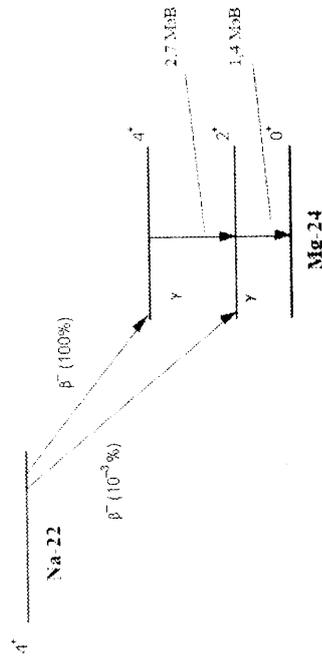
So'nggi paytlarda tadqiqotchilar astrofizik kelib chiqishiga ega bo'lgan neytrinolariga alohida e'tibor berishmoqda, chunki ular modda bilan o'zaro kuchsiz ta'sirlashganligi tufayli, astrofizik kelib chiqadigan boshqa zarralar bilan solishtirganda eng yuqori kirish qobiliyatiga ega bo'lib, ular uzoq kosmik ob'ektlar haqida ma'lumot olishga imkon beradi.

bu yerda T_{yad} va p_{yad} — mos holda tepki yadroning kinetik energiyasi va impulsi, R_γ — γ -kvant impulsi. Yuqoridagi (1.19) tenglamalar sistemasi va $T = p^2 / 2m$ formuladan quyidagi ifodani olamiz:

$$T_{yad} = \frac{E_\gamma^2}{2M_{yad}c^2} \approx \frac{E^2}{2M_{yad}c^2} \quad (1.20)$$

Bu formula yordamida T_{yad} qiymatini baholash mumkin. Agar massa soni $A=100$ bo'lgan yadroning uyg'onish energiyasi $E \approx 0.1 - 1$ MeV oraliqida bo'lsa, tepki yadroning energiyasi $T_{yad} \approx (10^{-6} - 10^{-5}) E$ ga teng bo'ladi. Demak, γ - kvant yadro uyg'ongan holat energiyasining juda katta qismini olib ketar ekan.

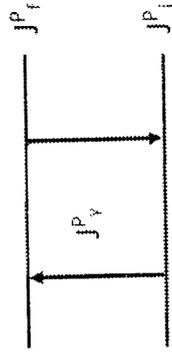
Gamma-nurlar radioaktiv parchalanishning ikkinchi darajali mahsuli hisoblanadi. Alfa yoki beta-parchalanishlar natijasida radioaktiv element o'zgaradi. Ko'pincha bunday o'zgarishdan vujudga keladigan yadrolar uyg'ongan holatda bo'ladi. Uyg'ongan yadro esa gamma-kvant chiqarib pastki energetik sathlarga yoki asosiy holatga o'tadi. Ushbu jarayonga misol qilib, $^{24}_{11}Na$ yadrosining β^- - parchalanishini keltirish mumkin (1.7-rasm). Natriy-24 yadrosining β^- - parchalanish natijasida $^{24}_{12}Mg$ yadrosi asosan 4^+ holatda hosil bo'ladi. Keyin bu yadro energiyalari 2,7 MeV va 1,4 MeV bo'lgan ketma-ket gamma-kvant chiqarib asosiy holatga o'tadi.



1.7-rasm. $^{24}_{11}Na$ yadrosining β^- - parchalanishda hosil bo'ladigan γ -nurlanish

Yadrolardan chiqiyotgan γ -kvantlarning energiyalari 10 keV dan 5 MeV gacha bo'lgan diapozonda joylashgan bo'ladi. Bu esa gamma-nurlanishlar λ_γ to'lqin uzunligining $2 \cdot 10^{10} \div 5 \cdot 10^{14}$ m atrofidagi qiymatlariga mos keladi.

Yadrolarning radiatsion o'tishlariga mos keladigan elektro-magnit maydon nurlanishlarining ba'zi bir xususiyatlarini eslatib o'tamiz. Yadro spini J_i va juftligi R_i bo'lgan holatdan spini J_f va juftligi R_f bo'lgan holatga o'tishida γ -kvant nurlangan bo'lsin (1,8-rasm). Elektromagnit maydon nurlanishi muayyan L multipollilik



1.8-rasm. Yadroda radiatsion o'tishlar.

bilan harakterlanadi. Multipolliliklar elektr va magnit multipolliliklarga bo'linadi. Mazkur multipollilikka ega bo'lgan kvant tomonidan olib ketiladigan harakat miqdori momenti lh ga teng bo'ladi. l_E va l_M kattaliklarning qabul qilishi mumkin bo'lgan qiymatlar to'plami harakat miqdori momenti va juftliklar bo'yicha tanlash qoidalari orqali aniqlanadi. harakat miqdori momenti bo'yicha tanlash qoidasi quyidagicha:

$$|J_i - J_f| \leq l \leq |J_i + J_f|$$

Ikkinchi tanlash qoidasiga asosan l_E elektr γ -nurlanishlar momenti va l_M magnit γ -nurlanishlar momentlari yadroning boshlang'ich va oxirgi holatlarining juftliklari, ya'ni P_i va P_f lar bilan quyidagi munosabat bilan bog'langan:

$$P_i / P_f = (-1)^{l_E}; \quad P_i / P_f = (-1)^{l_M+l} \quad (22)$$

Ushbu munosabatlardan E1-o'tish faqat turli juftlikka ega bo'lgan yadro holatlari orasida, M1-o'tish esa bir xil juftliklarga ega

bo'lgan yadro holatlari orasida sodir bo'lishi mumkin ekan. Bu ikkala holda ham yadro momenti $\Delta I = 0, \pm 1$ munosabatni qanoatlantirishi lozim ($0 \rightarrow 0$ o'tishlardan tashqari).

Gamma-nurlanishlar xususiyatlaridan kelib chiqqan holda quyidagi xulosani qilish mumkin: P_i, P_f va ΔI kattaliklarga ega bo'lgan ikkita holat orasidagi yadro radiatsion o'tishida bosh rolni quyidagi moment va juftlik bo'yicha tanlash qoidasini qanoatlantiruvchi va eng kichik I_f va I_M qiymatli ega bo'lgan, elektr va (yoki) magnit multipollar bajaradi:

$$I = |\Delta I| \quad \text{va} \quad I = |\Delta I| + 1. \quad (22)$$

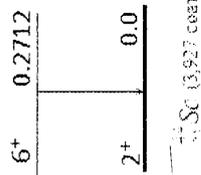
Bulardan bittasi elektr ikkinchisi magnit multipol bo'lishi kerak.

Gamma-nurlanishlar statistik xarakterga ham egadir, ya'ni har bir yadro uchun gamma-kvant nurlanishining ma'lum bir ehtimolligi mavjud. Bu ehtimollik yadroning gamma-kvant nurlanishigacha uyg'on-gan holatda o'rtacha bo'lish vaqtiga bog'liqdir, ya'ni: $W \approx 1/\tau_\gamma$ (odatda $\tau_\gamma \approx 10^{-15} \text{ c}$).

Ayrim hollarda radioaktiv parchalanishlar yoki yadro reaksiyalari natijasida yadrolarning izomer holatlari deb nomlangan uzoq yashovchi holatlari uyg'onishi mumkin. Izomer holatga ega bo'lgan yadrolarga izomerlar deyiladi. Izomer bu neytron va protonlar soni bir xil ammo yarim parchalanish davri har xil bo'lgan atom yadrosidir. Izomer holatlarning yashash vaqti har xil bo'lib, ular sekundlarning ulushlaridan bir necha yillargacha bo'lishi mumkin.

Hozirgi kunda yarim parchalanish davri I_s dan ortiq bo'lgan yuzdan ortiq uyg'ongan izomer holatlar ma'lum. Izomeriya yoki izomer holatlar hosil bo'lishiga asosiy sabab, uyg'onan va asosiy holatlarning spinlar farqining kattaligidir ($I \geq 3$). Bunday izomerlar proton yoki neytronlar sonlari 50, 82 yoki 126 bo'lgan yadrolar yaqinida joylashgan bo'ladi va izomer "orollarini" tashkil qiladilar. Uyg'ongan izomer holat metastabil holat deb ham aytiladi va ular ko'pchilik hollarda "m" indeksi bilan belgilanadi. Masalan ^{84m}Sc yadroda m - metastabil holat, g - asosiy holat (**I.9-rasm**). Skandiy-44 yadrosining izomer holatining yashash vaqti 58,6 soat ekan. Bu yerda uyg'onan va asosiy holatlarning spinlar farqi $\Delta I = I_m - I_g = 4$.

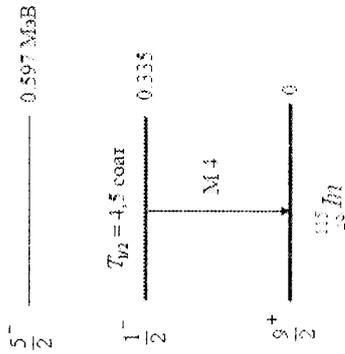
^{44}Sc (58,6 soat)



^{44}Sc (5,927 soat)

1.9-rasm. Skandiy-44 yadrosining asosiy va metastabil (izomer holatlarining) sathlarining sxemalari.

Izomer yadrolarga yana bir misol qilib, indiy-115 izotopini keltirish mumkin (1.10-rasm). Indiy-115 izotopining asosiy holati $J^p = 9/2^+$ spin va juftlikka ega. Birinchi uyg'onan holati energiyasi



1.10-rasm. Indiy-115 yadrosining asosiy va metastabil (izomer holatlarining) sathlarining sxemasi.

335 keV ga teng bo'lib, spin-juftligi - $J^p = 1/2^-$. Shuning uchun bu sathlar orasidagi o'tish $M4$ γ -kvant chiqishi bilan sodir bo'ladi. Bu o'tish qat'iy man etilgan bo'lib, uyg'onan holati 4,5 soat yarim parchalanish davriga ega.

Izomer yadrolar fan va texnikada, tibbiyotda keng qo'llanilmoqda. Yadro izomerlarni yadro elektrik batareyasi sifatida qo'llanilish ham istiqboli hisoblanadi.

1.6-§. Ichki konversiya hodisasi

Uyg'ongan holatdagi yadro asosiy holatga nafaqat gamma-kvant chiqarish, balki uyg'ongan holat energiyasini atom qobig'idagi elektronlardan biriga berish yo'li bilan ham o'tishi mumkin. Bunday jarayon ichki konversiya deyiladi. Bu hodisani 1938 yilda amerikalik fizik Alvares (Alvarez) Luis Uolter tomonidan kashf etilgan. Ichki konversiya hodisasi gamma-nurla-nish bilan raqobatdagi jarayon hisoblanadi. Ichki konversiya jarayoni katta ehtimollik bilan yadroga yaqin bo'lgan elektron qobiqlarda sodir bo'ladi.

Ichki konversiya jarayonida yadroning uyg'onish energiyasi bevosita atom qobig'idagi elektronga beriladi va bu elektron atomni tashlab chiqib ketish imkoniyatiga ega bo'ladi. Ushbu elektronlar konversion elektronlar deyiladi. Konversion elektronlar monoenergetik bo'lib, ularning energiyasi yadro o'tishlar energiyasi va elektron qobiqlar turi bo'yicha aniqlanadi. Ichki konversiya jarayoni eng katta ehtimollik bilan K-qobiqdagi elektronlarda sodir bo'ladi. Ushbu holda:

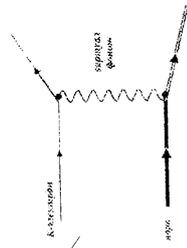
$$T_e = E - E_K \quad (1.21)$$

bu yerda T_e - elektronlarning kinetik energiyasi, E_K - K-qobiqdagi elektronlar bog'lanish energiyasi (yoki ionizatsiya potentsiali). Agar yadro o'tishlarida ajraladigan E energiya qiymati K-qobiqdagi elektronning bog'lanish energiyasidan kichik bo'lsa, bu qobiqda konversiya jarayoni energetik jihatdan mumkin bo'lmaydi va bu jarayon L-, qobiqdagi elektronlarda kuzatiladi va h.k. Yuqoridagi (1.21) ifodani umumiy holda quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$T_e = E - E_{K,L,M,\dots} \quad (1.21)$$

bu yerda $E_{K,L,M,\dots}$ - elektronlarning K-, L-, M-... qobiqlardagi elektronlarning bog'lanish energiyasi.

Konversiya virtual fotonlar bilan amalga oshadi. Bunda energiya uzatish jarayonini quyidagicha tasvirlash mumkin, ya'ni yadro virtual foton (gamma-kvant) chiqaradi va bu foton atom qobig'idagi elektron tomonidan yutiladi. Buning natijasida elektron atomdan chiqib ketadi. Ichki konversiya jarayonining Feynman diagrammasi 1.10-rasmda tasvirlangan.

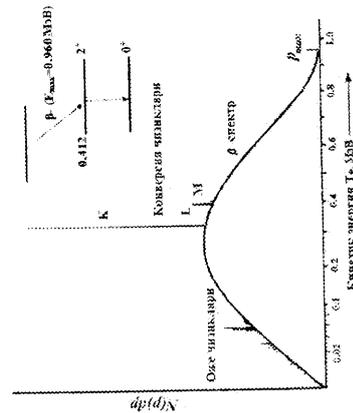


1.10-rasm. Ichki konversiya jarayonining Feynman diagrammasi

Konversiya elektronlari yadrodan γ -kvant chiqishi yoki chiqmasligiga bog'liq bo'lmay kuzatiladi. Ichki konversiya jarayoni xarakteristik rentgen nurlanishi yoki Oje-elektronlarining chiqishi bilan kuzatiladi. Ichki konversiya natijasida atom qobig'idan elektron chiqib ketsa, chiqqan elektronning o'rniga keyingi qobiqda joylashgan elektron o'tadi, natijada xarakteristik rentgen nurlanishi hosil bo'ladi.

Ichki konversiya natijasida uyg'ongan holatga o'tib qolgan atomning uyg'onish energiyasi atom qobig'idagi tashqi elektronlarning birortasiga berilishi va ushbu elektron atomdan chiqib ketishi mumkin, bu elektron Oje - elektron deb ataladi.

Tipik beta-spektr 1.10-rasmda ^{198}Hg yadrosidagi 412 keV energiyali yadro o'tishlar uchun ichki konversiya elektronlarning energetik spektri keltirilgan bo'lib, bunda uluksiz beta-spektrda konversion elektronlarga mos keladigan chiziqlar yaqqol ko'rinib turibdi. Shuningdek, bu yerda konversiya jarayoni sodir bo'layotgan elektron qobiqlar ham keltirilgan (K, L, M qobiqlar).



1.10 -rasm. Konversiya spektri atom qobig' energiyalari farqiga ko'ra to'g'ri keluvchi bir necha monoxromatik spektrlar.

Ichki konversiya bu γ -nurlanish bilan raqobatlashuvchi jarayon hisoblanadi. Gamma-nurlanish va ichki konversiya o'rtasidagi raqobat to'la ichki konversiya koeffitsienti α bilan tavsiflanadi. To'la ichki konversiya koeffitsienti deb ichki konversiya elektronlar sonining (N_e) gamma-kvantlar soniga (N_γ) nisbatiga aytiladi:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (1.21)$$

Bu koeffitsientni quyidagi ko'rinishda ham yozish mumkin:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \dots \quad (1.22)$$

Bu yerda $\alpha_K = (N_e)_K / N_\gamma$ - K-qobiqdagi, α_L - L- qobiqdagi, α_M - M-qobiqdagi va h.k. qobiqlardagi elektronlar uchun parsial ichki konversiya koeffitsientlari deb ataladi.

Konversiya jarayoni quyidagi qonuniyatlarga bo'ysunadi:

- o'tish energiyasi oshishi bilan konversiya koeffitsienti kamayadi, ya'ni konversiya ehtimolligi kamayadi;
 - o'tish multipolligi oshishi bilan konversiya koeffitsienti oshadi;
 - Atom nomeri Z oshishi bilan konversiya koeffitsienti oshadi;
- Ichki konversiya hodisasini o'rganish yadro sathlarining turli xarakteristikalarini (konversion elektronlar energiyasi bo'yicha energiyalarni, konversiya koeffitsientlari bo'yicha harakat miqdor momentlarini va h.k.) aniqlashda katta ahamiyatga egadir.

Yadro uyg'ongan holatdan pastki holatga gamma-kvantlar va ichki konversiya elektronlari chiqarish hodisasidan tashqari elektron-pozitron jufti chiqarish yo'li bilan o'tishi mumkin. Agar o'tish energiyasi $\Delta E > 1,02 \text{ MeV}$ bo'lsa mazkur jarayon sodir bo'ladi. Ammo, bu mexanizmining ehtimolligi gamma-kvant nurlanish ehtimolli-gining 10^{-3} qismini tashkil qiladi.

1.7-§. Myossbauer effekti va uning qo'llanilishi

Yadrolarning gamma-nurlanishlari Myossbauer effekti deb nomlangan qiziq bir hodisa bilan bog'langan. Mazkur effektni 1958 -yilda

nemis fizigi R.Myossbauer kashf qilgan va bu kashfiyot uchun 1960 yilda fizika bo'yicha Nobel mukofotiga sazovor bo'lgan. Myossbauer effekti deb gamma-kvantlarning rezonans yutilishiga aytiladi. Bu effekt yorug'lik kvantlarining atomda rezonans yutili-shining yadroviy analogiyasi hisoblanadi.

Yadrodan chiqqan gamma-kvant uning E uyg'onish energiyasining ham-masini olib ketmaydi. Bu energiyaning bir qismini gamma-kvant chi-qargan yadroning T_{yad} tepki energiyasiga sarflanadi:

$$E_{yuskan} = (E - T_{y0}) < E \quad (1.23)$$

Yadroni E energiyagacha uyg'otish uchun unga energiyasi quyidagiga teng bo'lgan gamma-kvant yutishi lozim:

$$E_{yomun} = (E + T_{y0}) > E \quad (1.24)$$

sababi, energiya va impuls saqlanish qonuniga asosan gamma-kvant energiyasining bir qismi yadro harakatlanish energiyasiga sarf bo'ladi. Natijada chiqarilgan va yutilgan gamma-kvant energiyasi $2T_{yad}$ kattalikka mos tushmaydi.

Kvant fizikasi nuqtai nazaridan qaraganda har bir uyg'ongan energetik sath cheksiz nozik emas, balki u ΔE tabiiy kenglik deb nomlangan kenglikka ega. Tabiiy kenglik G bilan belgilanadi. *I.II-rismda* energetik sath va chiziqning tabiiy kengliklari kelti-rilgan. Tabiiy kenglik noaniqlik munosabati orqali aniqlanadi.

Rezonans yutilish shartini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

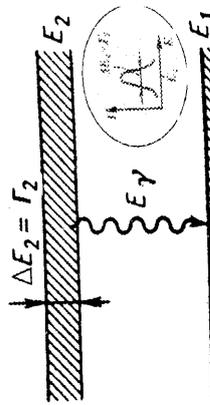
$$\Gamma > 2T_{yad} \quad (1.25)$$

bu yerda

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} \quad (1.26)$$

G - energetik sathning tabiiy kengligi, τ - uyg'ongan holatda yadro-ning yashash vaqti.

Uyg'ongan holatda yadroning τ yashash vaqti qanchalik kichik bo'lsa, uning mazkur holatdagi energiyasining noaniqligi shunchalik katta bo'ladi. Aksincha, uyg'ongan yadroning τ yashash vaqti qanchalik katta bo'lsa, energiyasining qiymati shunchalik aniq va gamma-kvantning monoxromatiklik darajasi katta bo'ladi.



1.11-rasm. Uyg'ongan holat sath va chiziqning tabiiy kengliklari.

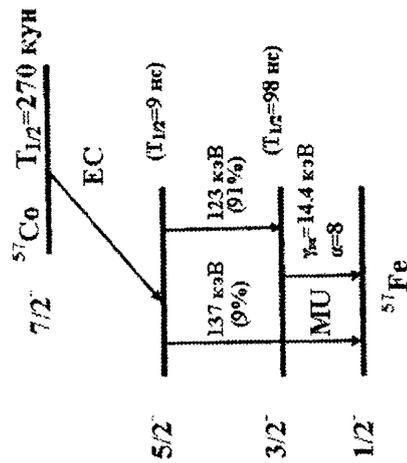
Misol tariqasida 129 keV energiyali uyg'ongan holatga va $\tau \approx 10^{-10}$ s o'rtacha yashash vaqtiga ega bo'lgan ^{191}Ir yadrosini olamiz. (1.26) formula bo'yicha mazkur energetik sathning kengligini aniqlaymiz:

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{0,66 \cdot 10^{-15} \text{ } \vartheta B \cdot c}{10^{-10} c} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ } \vartheta B \quad (1.27)$$

Yadro olgan tepki energiyasi (1.20) formula bo'yicha aniqlanadi:

$$T_{\text{yul}} = \frac{E^2}{2M_{\text{yul}}c^2} = 0,047 \text{ } \vartheta B$$

Bu hisoblashlarni ^{57}Fe yadrosi uchun ham ko'rib chiqamiz. ^{57}Fe yadrosi ^{57}Co yadrosining β -parchalanishi natijasida uyg'ongan holat-da hosil bo'ladi (1.12-rasm).



1.12-rasm. ^{57}So radionuktidining parchalanish sxemasi. MD - Myossbauer o'tishi.

Uning gamma-kvantning energiyasi $E_\gamma = 14,4 \text{ keV}$ va yashash vaqti $\tau = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ energetik sathning kengligini (1.26) formula bo'yicha aniqlaymiz:

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ } \vartheta B.$$

Yadro olgan tepki energiyasi:

$$T_{\text{yul}} = \frac{E^2}{2M_{\text{yul}}c^2} = 0,002 \text{ } \vartheta B.$$

Demak, keltirilgan ikkita misolda ham yadro tepki energiyasi nurlanish chizig'ining tabiiy kengligidan ancha katta ekan. Boshqacha so'z bilan aytganda, yadro tomonidan chiqarilgan gamma-kvantni shu turdagi yadro yuta olmas ekan. Bu esa erkin atomda yadro rezonansi sodir bo'lishini inkor qiladi. Ta'kidlab o'tamiz, optik o'tishlar-ning energiyasi yadro o'tishlariga nisbatan 10^4 marta kichik va (1.25) shart optik yutilishlar uchun o'rinli bo'ladi. Agar tepki energiyasi qiymatini

chiziqning tabiiy kengligi kattaligigacha kamaytirishga erishilsa, unda gamma-kvant energiyasini quyidagicha nisbiy aniqlik bilan o'lchash mumkin bo'lar edi:

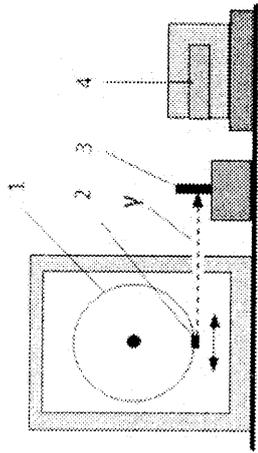
$$\frac{\Gamma}{E_\gamma} = \frac{h}{E_\gamma \tau} \approx 10^{-12} - 10^{-14} \quad (1.28)$$

Kristall strukturaga ega bo'lgan qattiq jismlardagi bog'langan atomlardan biriga energiya uzatilishi, uni o'rab turgan katta sonli atomlarning xaotik tebranishini yuzaga keltiradi, ya'ni kristallning ichki energiyasini oshiradi. Bitta yadroning γ -kvant chiqarishi yoki yutishi natijasida kristalldagi atomlar katta jamosining tartibli tebranishi yuzaga kelishi kichik ehtimolikka ega bo'lsa kerak. Ammo temperatura kamaytirilsa, alohida atomlarning tebra-nishlari eksponensial kamayadi. Bunda kristaldagi alohida bitta atomning ega bo'lishi mumkin bo'lgan tebranma kinetik energiyasi (1.28) ifodadagi tepki energiyasidan kichik bo'ladi. Endi katta miqdordagi atomlar ($\sim 10^8 \div 10^9$) birdamlik bilan (muvofiqlashtirilgan) yagona bir butun tizim bo'lib tebranish imkoniyatiga ega bo'lishadi. Kristall tepki impulsini o'ziga olgan holda ega bo'ladigan kinetik energiya qiymati, alohida bir atomning massasiga nisbatan kristall o'ta katta massaga ega bo'lganligi sababli e'ti-borga olmasa ham bo'ladigan darajada kichikdir. Ushbu holda kris-tallga berilgan tepki energiya juda kichik bo'ladi, nurlanayotgan va yutilayotgan gamma-kvant energiyasi o'zgarmaydi. Kristall oladigan tepki energiyasini baholaymiz:

$$R = \frac{P_n^2}{2 \cdot 10^8 M_n} = \frac{T_n}{10^8} \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ } \text{eB}$$

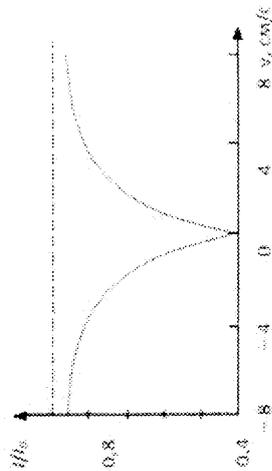
Bu yerda P_{ya} , M_{ya} va T_{ya} – mos holda "teпки" olgan yadro impuls, massasi va kinetik energiyasi. Bu yerdan ko'rinadiki, chiqayotgan va yutilayotgan gamma-kvantlarning energiyasi teng bo'ladi, ya'ni rezo-nans hodisa kuzatiladi. Myossbauer manba va yutkichni suyuq azot tem-peraturasigacha sovutib, birinchi marta gamma-kvantlarning chiqishi va yutilishlarini tepkisiz kuzatgan va imkoniyati mavjudligini nihoyatda yuqori aniqlikda o'lchash effektini ^{57}Fe ($E_\gamma = 14,4 \text{ keV}$, $\tau = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$) va ^{119}Sn ($E_\gamma = 23,9 \text{ keV}$, $\tau = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ s}$) yadrolardagi kichik energiyali gamma-o'tishlar

uchun xona temperaturasida ham kuzatish mumkinligi aniqlandi. Hozirgi vaqtda bu effekt nuklidlar yadro fizikasi va qattiq jismlar fizikasi masalalarini ham tez-tez qo'llanilmoqda.



1.13-rasm. Myossbauer tajribasi

Gamma-kvantlarning rezonans yutilishi bo'yicha tajriba sxemasi 1.13-rasmda keltirilgan: 2 - gamma-nurlanish manbai, 3-yutgich va 4 bitta chiziq bo'ylab joylashgan gamma-nurlanishlar detektori. Manba qanday yadrolardan tashkil topgan bo'lsa, yutgich ham shunday yadrolar-dan tashkil topgan bo'ladi. Gamma-nurlanishlar manbai 1 silindrga joylashtirilgan bo'lib, bu silindr tebranma harakat qiladi. Ushbu tebranma harakat natijasida manba yutgichga davriy ravishda yaqin-lashib va uzoqlashib turadi. Bunda Doppler effekti hisobiga gam-ma-nurlanish chastotasi o'zgaradi. Yutilish qiymatining o'zgarish effektini kuzatish uchun manba va yutqichlarni bir biriga nisbatan bir necha mm/s tezlik bilan siljitish harakatlantirish etarli ekan. Myossbauer tajribasida olingan yutilish egri chizig'i 1.14-rasmda keltirilgan.

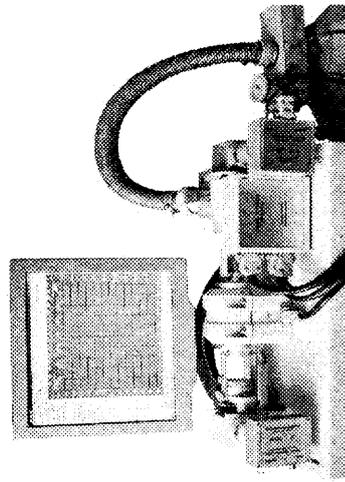


1.14-rasm. Myossbauer tajribasida olingan yutilish egri chiziq

Myossbauer effekti asosida Myossbauer spektroskopiyasi deb nomlanuvchi yangi yoʻnalish vujudga keldi. Bunda radioaktiv manbadan chiqqan monoxromatik gamma-nurlanishlarni yutqichda rezonans yutilishi sodir boʻladi. Absorbtsion Myossbauer spektroskopiyasida (metodning koʻp qoʻllaniladigan turlaridan biri) namuna yutqich gamma-kvantlar bilan "yoritiladi", yaʼni nurlantiriladi. Gamma-nurlanishlar manbai sifatida temir-57, iridiy-191 va boshqa Myossbauer radioizotoplari qoʻllaniladi. Namuna-yutqichdan keyin detektor joylashtiriladi. Bu detektor yordamida gamma-kvantlar-ning namunadagi yutilish koeffitsientlari aniqlanadi. Namuna ham xuddi shunday (^{57}Fe , ^{191}Ir va h.k.) yadrolardan tashkil topgan boʻlishi lozim.

1.15-rasm MS1104Em turdagi ekspress Myossbauer spektrometri keltirilgan. Ushbu spektrometr xona temperaturasidan 85 K gacha boʻlgan temperaturalarda transmission va emission Myossbauer oʻl-chashlarni amalga oshirish uchun moʻljallangan.

Hozirgi kunda yadroviy gamma-rezonans metodi fizikaviy materialshunoslikda, geologiyada, kimyoda va biologiyada keng qoʻllanilmoqda.



1.15-rasm. MS-1104Em turdagi Myossbauer spektrometri

Masalan biologiyada oqsil tarkibida temir moddasi mavjud boʻlgan guruhlarining xususiyatlarini tahlil qilishda keng qoʻllaniladi. Bu metodning katta taassurot qoldiradigan qoʻllanilishi, 1960 – yilda Paund va Rebklar tomonidan oʻtkazilgan tajriba hisoblanadi. Bu tajribada laboratoriya sharoitida umumiy nisbiylik nazariyasida aytib oʻtilgan gamma-kvantlarning gravitatsion siljiishi oʻlchangan.

1.8-§. Klaster radioaktivlik

Radioaktiv yadro tomonidan α -zarra chiqarish hodisasi bizga yaxshi maʼlum. Radioaktiv yadro oʻz-oʻzidan gelyiy atom yadrosidan farqli qandaydir boshqa atom yadrosini chiqarishi mumkinmi? Bu savolga ijobiy javob 1984 – yilda berildi. Bir-biridan mustaqil holda ilmiy tadqiqot olib borayotgan Angliyadagi va Rossiyadagi ikki guruh olimlar ^{223}Ra izotopining radioaktiv parchalanishda ^{14}C yadrosi uchib chiqishini kuzatishgan, yaʼni:



Bu turdagi parchalanishlarga klaster parchalanishlar, yoki klaster radioaktivlik deb nom berildi. Klaster radioaktivlik – yadrolar-ning oʻz-oʻzidan α -zarraga nisbatan ogʻirroq boʻlgan yadro frag-mentlari (klasterlar) chiqarish hodisasi. Hozirgi vaqtda asosiy holatdan ^{14}S , ^{20}O , ^{24}Ne , ^{26}Ne , ^{28}Mg , ^{30}Mg , ^{32}Si va ^{34}Si turdagi klasterlar

chiqaradigan ^{114}Ba dan ^{241}Am gacha bo'lgan 25 ta yadro eksperimental aniqlandi.

Klaster parchalanishlar juda katta sondagi og'ir izotoplar uchun kinematik ruxsat etilgan. Ammo ko'pchilik hollarda bunday jarayonlarning ehtimolligi juda ham kichik bo'lganligi uchun hozirgi kunda mavjud bo'lgan eksperimental qurilmalarning imkoniyatlar chegarasida bu hodisalarni kuzatish mumkin emas. Bu potensial to'siqlarning kengligi yoki balandligi oshishi bilan shaffoflik eksponensial kamayishi bilan bog'liqdir. Uchib chiqayotgan klaster va ikkilamchi yadro nisbiy harakatining Q energiyasi 28 dan 94 MeV gacha o'zgaradi va u hamma holda V_B potensial to'siqning balandligidan sezilarli darajada kichik bo'ladi. Shunday qilib, klaster parchalanish ham alfa-parchalanish kabi klassik fizikadagi potentsial to'siq orqali zarraning o'tishi taqiqlangan, tunnel effekti sababli sodir bo'lar ekan. Klaster parchalanishni, ba'zi bir ma'noda yadroning alfa-parchalanish va spontan bo'linishi orasidagi oraliq jarayon sifatida ham qarash mumkin.

Klaster parchalanishlarni ularning birlamchi yadro asosiy parchalanish turiga nisbatan parchalanish ehtimolliklari **1.1-jadvalda** keltirilgan. Og'ir yadrolar sohasida asosiy parchalanish turi alfa-parchalanish hisoblanadi. Shu sababli, bu jadvalda tajribada kuzatiladigan klaster parchalanishlar alfa-parchalanishga qiyoslashtirilgan. Bu jadvalda birlamchi yadro, uchib chiqayotgan klasterlar, parchalanish energiyasi Q , klaster chiqish ehtimolligining alfa-zarra chiqish ehtimolligiga nisbati λ_c/λ_α , klaster nisbiy chiqishning yarim parchalanish davrlari keltirilgan. Bu jadvalning tahlili shuni ko'rsatadiki, ba'zi bir yadrolarda neyt-ronlarning katta miqdorda oshiqcha bo'lishi neytronga boy bo'lgan engil nuklidlarning emissiyasiga (chiqishiga) imkon beradi.

Tajribalardan ^{14}C yadrosi uchib chiqish ehtimolligi, α -zarraga chiqish ehtimolligiga nisbatan deyarli 10 tartibga kichik ekanligi aniqlandi. Atom yadrsidan uchib chiqqan ^{14}C yadrosi, yarim o'tkazgichli detektorlarning ΔE -E teleskopida qayd qilingan. ^{14}C yadro uchib chiqish ehtimolligi, α -zarrani chiqish ehtimolligiga nisbati $\lambda_c/\lambda_\alpha = (8.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-10}$ teng ekanligi aniqlandi.

Klaster radioaktivlik kashf etilishiga olib keluvchi hal qiluvchi omil bu radioaktiv parchalanuvchi izotopni tanlash bo'ldi.

1.1-jadval

Klaster parchalanishlarni ularning birlamchi yadro asosiy parchalanishga nisbatan ehtimolligi.

Birlamchi yadro	Uchib chiqayotgan klasterlar	Q, MeV	λ_c/λ_α	$T_{1/2}$, yil
^{114}Ba	^{12}C	-	$\sim 3.0 \cdot 10^{-5}$	-
^{221}Fr	^{14}C	31.28	$8.14 \cdot 10^{-13}$	$> 2 \cdot 10^8$
^{221}Ra	^{14}C	32.39	$< 1.2 \cdot 10^{-13}$	$> 7.4 \cdot 10^6$
^{222}Ra	^{14}C	33.05	$(3.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-10}$ $(3.1 \pm 1.0) \cdot 10^{-10}$ $3.07 \cdot 10^{-10}$	
^{223}Ra	^{14}C	31.85	$8.5 \cdot 10^{-10}$ $(8.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-10}$ $(7.6 \pm 3.0) \cdot 10^{-10}$ $(5.5 \pm 2.0) \cdot 10^{-10}$	
^{224}Ra	^{14}C	30.54	$6.1 \cdot 10^{-10}$ $(4.3 \pm 1.2) \cdot 10^{-11}$	$(2.3 \pm 0.6) \cdot 10^8$
^{226}Ra	^{14}C	28.21	$2.9 \cdot 10^{-11}$ $(3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-11}$ $(2.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-11}$	
^{225}Ac	^{14}C	30.47	$6 \cdot 10^{-12}$ $< 4 \cdot 10^{-13}$	$> 7 \cdot 10^{10}$
^{228}Th	^{20}O	-	$1 \cdot 10^{-13}$	-
^{230}Th	Ne	57.78	?	$(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^7$
^{231}Pa	^{24}Ne	51.84	$5.6 \cdot 10^{-13}$ $(5.6 \pm 1.0) \cdot 10^{-13}$	
^{232}U	^{23}F	62.31	$< 4 \cdot 10^{-14}$ $9.97 \cdot 10^{-15}$ $1.34 \cdot 10^{-11}$	$> 8 \cdot 10^{17}$
^{233}U	^{24}Ne	60.50	$(2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-12}$ $2 \cdot 10^{-12}$	$(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^3$
^{234}U	^{28}Mg	74.13	$1.18 \cdot 10^{-13}$ $(7.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-13}$ $(5.3 \pm 2.3) \cdot 10^{-13}$ $1.3 \cdot 10^{-15}$	
	^{28}Mg	58.84	$1 \cdot 10^{-13}$ $(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-13}$ $9 \cdot 10^{-14}$ $< 4 \cdot 10^{-12}$	

^{235}U	^{26}Ne	59.47	$8 \cdot 10^{-12}$	$>9 \cdot 10^{20}$
	^{24}Ne	55.96	$<5 \cdot 10^{-12}$	
	^{28}Mg	56.75	$1,8 \cdot 10^{-12}$	
	^{29}Mg	72.20		
^{236}U	^{24}Ne		$9 \cdot 10^{-12}$	$>1,4 \cdot 10^{20}$
	^{26}Ne	57.36		
	^{28}Mg	58.11	$2 \cdot 10^{-13}$	
	^{30}Mg	72.20		
^{236}Pu	^{28}Mg	79.67	$2 \cdot 10^{-14}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{14}$
	^{32}Si	91.21	$1,38 \cdot 10^{-16}$	$\sim 6,5 \cdot 10^{17}$
	^{28}Mg	75.93	$5,62 \cdot 10^{-17}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{18}$
	^{30}Mg	77.03		
^{240}Pu	^{34}Si		$<1,3 \cdot 10^{-13}$	$>5 \cdot 10^{16}$
		90.95	$6 \cdot 10^{-15}$	
^{237}Np	^{30}Mg	75.02	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$>5 \cdot 10^{19}$
	^{34}Si	93.84	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$>9 \cdot 10^{16}$

Agar klaster parchalanish natijasida ikki marta ^{208}Pb izotopiga yaqin izotop hosil bo'lsa, energiya bo'yicha maksimal ustunlika ega bo'ladi. Bunda klasterning potentsial to'siqdan o'tish ehtimolligi oshadi, bu esa ma'lum bir klasterning hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan parchalanish ehtimolligini oshiradi. Tez orada ^{14}C yadroning spontan uchib chiqishi ^{221}Fr , ^{221}Ra , ^{222}Ra izotoplarda ayon bo'ldi. Hozirgi vaqtda klaster radioaktivlik aniqlangan 10 dan ortiq izotoplar ma'lumdir. ^{14}C yadro chiqishi bilan bir qatorda ^{24}Ne , ^{26}Ne , ^{28}Mg , ^{32}Si izotoplar chiqishlari ham kuzatiladi.

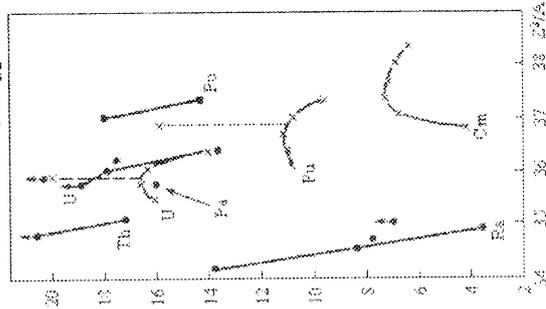
Og'ir klasterning chiqish ehtimolligining α -zarra chiqish ehtimolligiga nisbati $\sim 10^{-10} - 10^{-13}$ intervalda joylashgan. Ammo ayrim hollarda, masalan $^{28,30}\text{Mg}$ izotoplarining chiqish ehtimolliklari 10^{-17} gacha tushishi mumkin.

Klaster radioaktivlik tabiatini tushunish uchun ushbu hodisani. α -parchalanish va kuchli assimetrik yadro bo'linishlari bilan solishtirish tabiiydir.

Atom yadrosi bo'linishida yadroda katta o'zgarish sodir bo'ladi va u ikkita bo'lakka bo'linadi. Agar bo'linishdan oldin u kuchli deformatsiyalangan va cho'zilgan bo'lsa, bo'linish sodir bo'ladi. Uzilish momentida deformatsiya parametri muvozanat qiymatidan ikki marta katta bo'ladi. Uzilish (bo'linish) natijasida kuchli uyg'ongan deformatsiyalangan bo'laklar hosil bo'ladi. Ularning uchib

ketish jarayoni potentsial to'siq usti yoki atrofida bo'lar ekan. Bir necha izotoplar uchun yarim parchalanish davri logarifmining bo'linish parametri Z^2/A bog'lanishi 1.16-rasmda keltirilgan. Bo'linish parametri qancha katta bo'lsa, og'ir yadrolarning o'z-o'zidan bo'linishi shuncha oson bo'ladi. Agar $Z^2/A > 46,56$ shart bajarilganda har qanday yadro beqaror bo'lib, spontan parchalanish imkoniyatiga ega bo'ladi. Z^2/A kattalikning ortib borishi bilan yadrolarning spontan bo'linish ehtimolligi ham ortib, yadroning yarim parchalanish davri-ning kamayishi yangi transuran elementlarni sintez qilishga ma'lum chegara qo'yadi.

1.16-rasmdan ko'rinadiki, ushbu bog'lanish spontan bo'linish uchun odatda "cho'qqisimon" ko'rinishga ega bo'ladi, shu bilan bir vaqtda klaster radioaktivlik uchun bo'linish parametri oshishi bilan yarim parchalanish davri keskin kamayadi.



1.16-rasm. Klaster radioaktivlik (nuqtalar) va spontan bo'linish (krestik) hollarida yarim parchalanish logarifmining Z^2/A bo'linish parametri bog'lanishi.

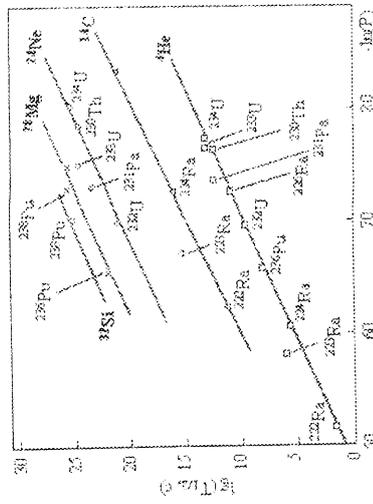
Alfa-parchalanish bo'linish jarayonidan quyidagi bir necha belgilar bo'yicha keskin farq qiladi:

1. α -parchalanish to'siq osti jarayoni.
2. Dastlabki(yoki boshlang'ich) yadro α -zarra va ikkilamchi yadroga parchalanganda, ikkilamchi yadro asosiy yoki kuchsiz uyg'ongan holatda hosil bo'ladi.
3. α -parchalanish natijasida yadroda katta o'zgarishlar sodir bo'lmaydi.

Klaster parchalanish doimiysi λ , yarim parchalanish davri $T_{1/2}$, vaqt birligida yadro sirtida klaster hosil bo'lish ehtimolligi w va D potentsial to'siqdan o'tish ehtimolliklari orqali aniqlanadi:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = wD \quad (1.30)$$

Klaster radioaktivlik parsial yarim parchalanish davrining Kulon potentsial to'sig'i shaffoligi (to'siqdan o'tish ehtimolligi) logarifmiga bog'lanishi 1.17-rasmda keltirilgan. Bu yerda solish-tirish uchun α -parchalanishga oid bog'lanish ham keltirilgan. Rasm-dan ko'rinadiki, hamma hollardagi klasterlar va α -parchalanishda chiziqqli bog'lanishlar kuzatiladi.



1.17-rasm. Klaster radioaktivlik parsial yarim parchalanish davrining Kulon potentsial to'sig'i shaffoligi (to'siqdan o'tish ehtimolligi) logarifmiga bog'lanishi

Alfa-parchalanish va spontan bo'linish jarayonlarini o'rganish shuni ko'rsatdiki, ikkala holda ham hal qiluvchi omil bo'lib, α -zarra yoki og'irroq klasterlarning potentsial to'siqdan o'tishi hisoblanadi.

Keltirilgan dalillar shuni ko'rsatadiki, har klaster parchalanishlar ko'proq α -parchalanish hodisasiga o'hshash ekan.

Dastlabki yadrodan uchib chiqayotgan klasterlarning E_{kin} kinetik energiyasini eksperimental o'lchashlarni bu hulosaga qo'shimcha dalil sifatida keltirish mumkin. Ushbu kinetik energiya quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E = Q(F_1/F_2) \quad (1.31)$$

bu yerda Q - klaster parchalanish energiyasi, F_1 - dastlabki (yoki birlamchi) yadro massasi, F_2 - ikkilamchi yoki parchalanishdan keyin hosil bo'lgan yadro massasi. Chiqayotgan klasterlarning massasi oshishi bilan (1.31) munosabatdan ba'zi bir chetlanishlar og'irroq klasterlar chiqarishida α -parchalanish mexanizimidan uzoq davom etuvchi mexanizmga o'tishga dalolat beradi. Shunday qilib, ushbu holda ham α -parchalanish jarayonidagi kabi parchalanish energiyasi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Ko'pchilik og'ir yadrolar ikkita yadroga, ya'ni, $A \rightarrow A_1 + A_2$ parchalanishga energetik jihatdan noturg'un bo'ladi. Bunda parchalanish energiyasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$Q = [M(A) - M(A_1) - M(A_2)]c^2. \quad (1.32)$$

Demak, bunda Q kattalik katta sonli A_1 va A_2 larning turli kombi-natsiyalari uchun musbat bo'lar ekan. Ammo, A_1 va A_2 massa sonla-rining faqat ba'zi bir birikmasi kuchli ajralib turgan bo'ladi va parchalanishda aynan ushbu birikmalar hosil bo'ladi. Parchalanish energiyasiga berk qobiqlar kuchli ta'sir ko'rsatadi. Klaster parchalanish energiyasi yaqqol ko'rinadigan maksimumga ega. Bu maksimum neytronlar bilan to'lgan qobiq va $N = 8, 14, 20$ kabi engil fragmentlar osti qobiqlari bilan bog'langan.

Klaster radioaktivlik uchun tajribada o'lichangan yarim parchalanish davri bilan nazariy hisoblangan yarim parchalanish davrlarini solishtirish

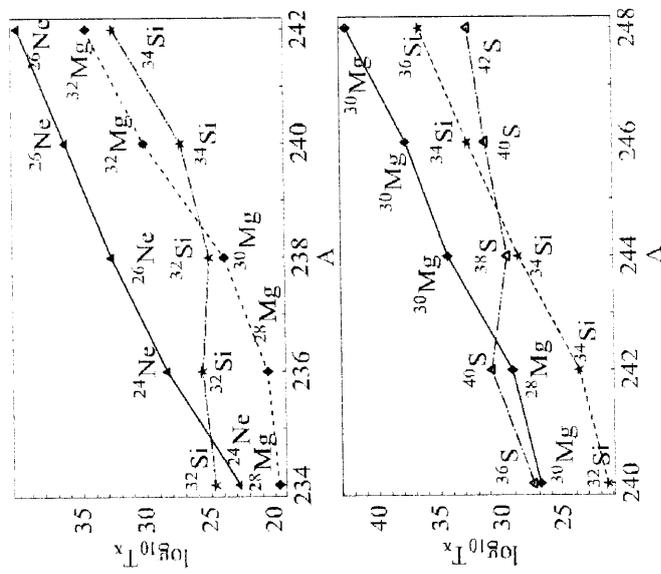
$A \rightarrow A_e + A_f$	Q, MeV	$T_{1/2}^{exp}, c$	$T_{1/2}, s$
$^{222}Ra \rightarrow ^{14}C + ^{208}Pb$	33,05	$1,7 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$
$^{228}Th \rightarrow ^{21}O + ^{208}Pb$	44,73	$5,4 \cdot 10^{20}$	$5,1 \cdot 10^{20}$
$^{232}U \rightarrow ^{24}Ne + ^{208}Pb$	62,32	$2,5 \cdot 10^{20}$	$2,7 \cdot 10^{19}$
$^{234}U \rightarrow ^{26}Ne + ^{208}Pb$	59,48	$1,2 \cdot 10^{25}$	$2,1 \cdot 10^{25}$
$^{236}U \rightarrow ^{30}Mg + ^{206}Hg$	72,51	$3,8 \cdot 10^{27}$	$8,3 \cdot 10^{27}$
$^{236}Pu \rightarrow ^{28}Mg + ^{208}Pb$	79,85	$3,5 \cdot 10^{21}$	$3,4 \cdot 10^{20}$
$^{238}Pu \rightarrow ^{32}Si + ^{206}Pb$	91,20	$1,9 \cdot 10^{25}$	$1,1 \cdot 10^{25}$
$^{242}Cm \rightarrow ^{34}Si + ^{208}Pb$	96,52	$1,4 \cdot 10^{23}$	$4,8 \cdot 10^{23}$

1.18-rasm. ^{208}Pb og'ir fragmenti hosil bo'lishiga olib keluvchi turli parchalanishlar uchun klaster Q parchalanish energiyasining chiqayotgan klaster massa soniga bog'lanishi.

Bu bog'lanish 1.18-rasmda aniq ko'rinish turibdi. Bu rasmda klaster parchalanish energiyasi Q ning, ^{208}Pb hosil bo'lishiga olib keluvchi turli parchalanishlar uchun, chiqayotgan klasterlar massalariga bog'lanishi ko'rsatilgan. Eng katta ehtimollikdagi chiqishlar sehrli sonli fragmentlarga to'g'ri keladi. $A_1=208$ ($Z_1=82$, $N_1=126$) va $A_2=14, 24, 28, 34$ ($N_2=8, 14, 20$) yadrolarda eng katta chiqishlarga ega.

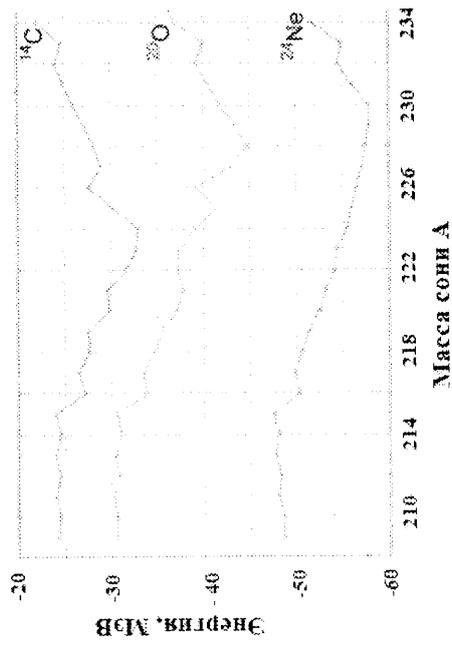
Klaster parchalanishlarni nazariy tushuntirish uchun turli modellar taklif etilgan. Ushbu modellar yordamida keyingi va hali kashf etilmagan klaster parchalanishlarni oldindan bashorat qilinishi mumkin. Tajribalar shuni ko'rsatdiki, ushbu modellar bilan klaster parchalanish parametrlarini hisoblangan natijalari tajriba natijalari bilan yaxshi mos tushar ekan.

Klaster parchalanish modellardan eng oxirgilardan biri yordamida hisoblangan yarim parchalanishlar davri 1.2-jadvalda keltirilgan. Shuningdek, bu jadvalda tajribada olingan natijalar ham solishtirish uchun alohida ustunda keltirilgan. Ushbu model Birlashgan yadro tadqiqotlar instituti (Rossiya) xodimlari G.G. Adamyan, S.R. Kuklin va N.V. Antonenkolar tamonidan taklif etilgan. Mazkur model asosida hisoblangan yarim parchalanish davrining dastlabki (birlamchi) yadro massa soniga bog'lanishi 1.19-rasmda keltirilgan. Bu yerda neon, magniy va kremniy klasterlarining plutoniydan (yuqori grafik), magniy, kremniy va oltinugurt klasterlarining kyuriydan (pastki grafik) chiqishi uchun bog'lanish keltirilgan. 1.2-jadvalda klaster radioaktivlik uchun tajribada o'lichangan yarim parchalanish davri bilan nazariy hisoblangan yarim parchalanish davrlari solishtirilgan. Bu yerdan ko'rinadiki, mazkur model asosida bajarilgan hisoblashlar tajribada olingan ma'lumotlari bilan qoniqarli darajada mos tushar ekan.



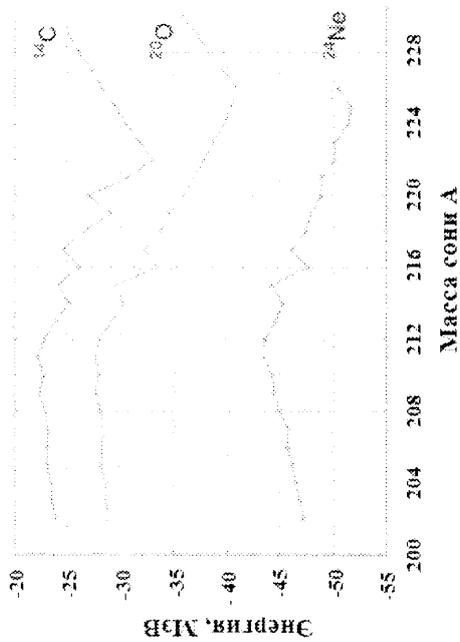
1.19-rasm. Hisoblangan yarim parchalanish davrining dastlabki (birlamchi) yadro massa soniga bog'lanishi. Bu yerda neon (qora uchburchak), magniy (qora romb) va kremniy (yulduzcha) klasterlarning plutoniydan (yuqori grafik), va magniy, kremniy va oltingugurt (yorug' uchburchaklar) klasterlarining kyuriydan (pastki grafik) chiqishi uchun. Nuqtalar yonida engil klasterlarning massa soni ko'rsatilgan.

Bu jadvaldan ko'rinadiki, birlamchi yadroning massa soni oshganda reaksiya energiyasi ham oshadi. Ushbu holni tajribada olingan va 1.18-rasmda keltirilgan ^{208}Pb og'ir fragmenti hosil bo'lishiga olib keluvchi turli parchalanishlar uchun klaster Q parchalanish energiyasining chiqayotgan klaster massa soniga bog'lanishida ham ko'rish mumkin.



1.20-rasm. Toriy ^{90}Th ($A = 209-234$) izotoplaridan ^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne klasterlarni ajratish energiyasining massa soniga bog'lanishi.

Bitta element izotoplaridan klasterlarning chiqishi, massa soni A ga qanday bog'liq bo'lishini 1.20 va 1.21-rasmlardan ko'rish mumkin. 1.20-rasmda toriy ^{90}Th ($A = 209-234$) izotoplaridan ^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne klasterlarni ajratish energiyasining massa soniga bog'lanishi keltirilgan. Ushbu energiya ^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne klasterlar uchun mas-sa soni oshishi bilan kamayib boradi va ma'lum nuqtadan keyin yana ortishi kuzatiladi (1.20-rasm). Bu nuqta engilroq klasterlar uchun kichik massa sonlarida kuzatiladi. Klasterlar og'irlashgan sayin bu nuqta massa sonining katta qiymatlariga to'g'ri keladi. Bu holatni 1.21-rasmda ham kuzatish mumkin. Bu rasmda radiy ^{88}Ra ($A=202-230$) izotop-laridan ^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne klasterlarni ajratish energiyasining massa soniga bog'lanishi ko'rsatilgan.



1.21-rasm. Radly ${}_{88}\text{Ra}$ ($A = 202-230$) izotoplaridan ${}^{14}\text{C}$, ${}^{20}\text{O}$, ${}^{24}\text{Ne}$ klasterlarni ajratish energiyasini massa soniga bog'lanishi.

1.9-§. Qo'shaloq beta-parchalanishlar

Qo'shaloq beta-parchalanishlar kuchsiz o'zaro ta'sir sababli yadro zaryadi ikkiga o'zgaradigan atom yadrolarning radioaktiv parchalanishlaridir. Qo'shaloq beta-parchalanishlar 2β - va $\beta\beta$ -parchalanishlar ko'rinishlarida bo'ladi.

Qo'shaloq β -parchalanishda yadro zaryadi ikkita birlikka oshi va ikkita elektron chiqishi sodir bo'ladi:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

2β -parchalanishning boshqa bir turida esa yadro zaryadi ikki birlikka kamayadi.

Bulardan tashqari qo'shaloq elektron qamrash ($2e$ qamrash) mavjud, ya'ni:

$$(A, Z) + 2e^- \rightarrow (A, Z - 2) +$$

Elektron qamrashning yana bir noyob turi bu pozitron va ikkita neytrino chiqishi bilan sodir bo'ladigan qamrashdir:

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z - 2) + e^+ +$$

Positron parchalanishning ham qo'shaloq parchalanishi mavjud, ya'ni:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z - 2) + 2e^+ + 2$$

Qo'shaloq beta-parchalanishlar barcha radioaktiv jaryonlari ichida eng kam uchraydigan turi hisoblanadi. Hozirgi kunda IIta nuklidda mazkur jarayon yuqori ishonchlikda kuzatilgan bo'lib, ularning yarim parchalanish davri $7 \cdot 10^{18}$ yildan ortiq, ${}^{128}\text{Te}$ izotopining yarim parchalanish davri $(3,5 \pm 2,0) \cdot 10^{24}$ yilni tashkil qilib, bu bugungi kunda hamma radioaktiv izotoplar ichida mutloq rekord hisoblanadi.

Shuni ham ta'kidlab o'tish kerakki, tasdiqlangan kuzatishlar faqat 2β -parchalanishga taalluqlidir. Qo'shaloq qamrashlar faqat bariy-130 izotopida kuzatilgan va uning yarim parchalanish davri $(2,2 \pm 0,5) \cdot 10^{24}$ yilni tashkil qiladi. Ushbu parchalanishlar nafaqat ikkilamchi yadroning asosiy holatida, balki uyg'ongan holatida ham amalga oshishi mumkin. Bunday hollarda bir yoki bir necha gamma-kvant yoki konversion elektronlar nurlanishi sodir bo'ladi.

Hozirgi kunda nazariya bo'yicha ikkita qo'shaloq beta-parchalanishlar mavjud bo'lib, birinchisi yuqorida keltirildi, ya'ni:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

Ikkinchisi esa ekzotik bo'lib, bunda neytrino hosil bo'lmaydi va neytrinosis parchalanish deyiladi:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$

$$E_{\text{simm}} = 23.6(A-2Z)^2/A$$

(1.33)

Proton radioaktivlikdan farqli ravishda neytron radioaktivlikda yarim parchalanish davri asosan parchalanish sodir bo'lganda yadrodan chiqib ketadigan neytron olib ketgan orbital moment bilan aniqlanadi. Neytron zaryadga ega bo'lmaganligi uchun Kulon potensial to'siq mavjud emas. Ammo markazdan qochma potensial to'siq mavjud bo'ladi.

Atom yadrolarining neytronlar chiqarib parchalanishida birlamchi yadroning konfiguratsiyasi kuchli o'zgarishi mumkin. Bu o'z navbatida radioaktiv yadrolarning yashash vaqtining oshishiga olib keladi.

Yadro asosiy holatidan neytron chiqarishi $Z > 8$ bo'lgan quyidagi neytronga boy bo'lgan izotoplarda kuzatilgan: ^{28}F , ^{33}Ne , ^{36}Na , ^{39}Mg , ^{49}S . Bu izotoplarning hammasi toq sonli neytronlarga ega. 1.23-1.26-rasmlarda neytron radioaktivligi aniqlangan kimyoviy elementlar ($Z=4-16$) uchun hisoblab topilgan neytronlar ajratib olish energiya-sining massa soniga bog'lanishlari keltirilgan.

1.3-jadvalda turg'un izotoplarning maksimal massa soni va neytron radioaktivligi aniqlangan izotoplar massa sonlar keltirilgan. Ushbu ma'lumotlar neytron radioaktivlik chegarasi qayerdan o'tishini aniqlash va tushunishga imkon beradi.

Radioaktiv parchalanish sodir bo'layotgan izotoplarning massa soni oshishi bilan ulardan neytronlar ajratish energiyasi ham kamaya boradi. Buni 1.23-1.27-rasmlarda keltirilgan bog'lanishlarda ham kuzatish mumkin. Bu kamayish qonuniyati element tartib nomeri yoki yadrodagi protonlar soni oshishi bilan yaqqol namoyon bo'ladi. Ya'ni, bu yerda kamayish eksponensial qonunga yaqin qonun bo'yicha kamaya boradi.

oli qo'shaloq beta-parchalanish Neytrinosisiz parchalanish esa

berayotgan radionuklidlar juda bo'ladi deb aytilgan edi va bu

o'rganish orqali neytrino mi yoki yo'qmi degan savolga or koinotimizning kelajakdagi muhim ahamiyatga egadir.

Radioaktivlik

agrammaning o'ng tamonida boy (neytronlar soni ortiq) soha hozirgi kunda etarlicha an oldindan aytilgan (bashorat o'lgan 3 mingta yadro aynan hozirgi kunda bu yadrolar

da joylashgan neytronga boy (Z) yadroning asosiy holatidan massa soni A birga kamayadi,

(A-

radioaktiv yadrolar soni ~20

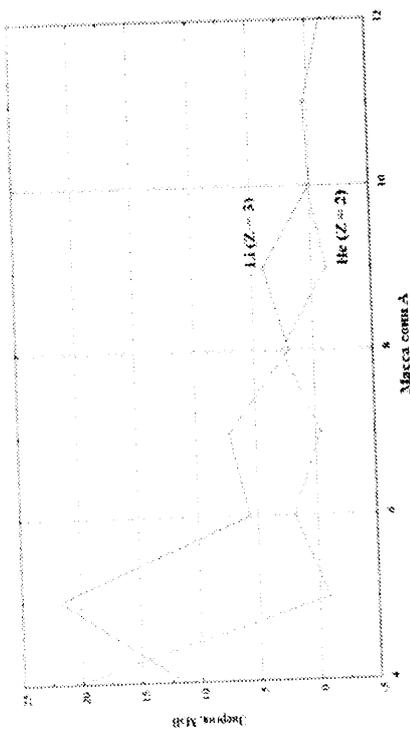
lgan engil yadrolarning og'ir (^3H) va $Z=2$ (^3H , ^7Li , ^9Be) bo'lgan lik $Z=16$ bo'lgan yadrogacha yadrolarning og'ir izotoplari, zotoplar neytron nurlatgichlar

tishi bilan neytronlar chiqarish energiyasining oshishi sabab tga teng:

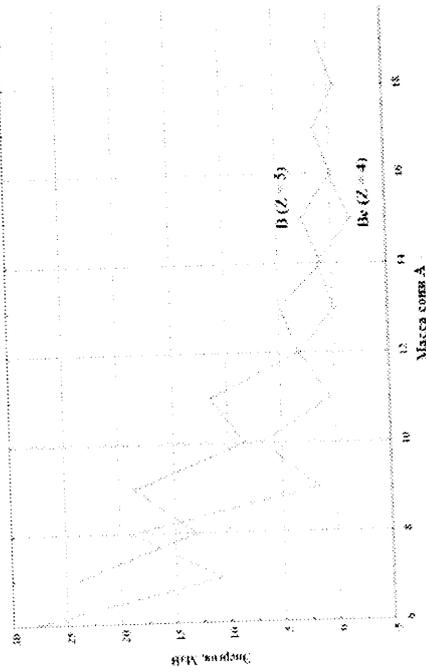
1.3-jadval

Neytronlar nurlanuvchi izotoplarning mavjudlik chegarasi

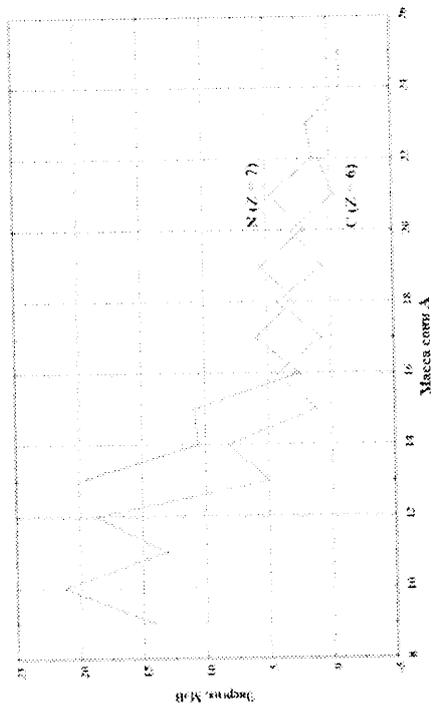
Kimyoviy elementlar tartib nomeri	Kimyoviy element simvoli	Turg'un izotoplar massa soni, A	Neytron-radioaktiv izotoplar massa soni, A
1	H	2, 3	4, 5, 6
2	He	3, 4	7, 9, 10
3	Li	6, 7	10, 12
4	Be	9	13, 15
5	B	10, 11	16, 18
6	C	12, 13	21
7	N	14, 15	17, 18
8	O	16, 17, 18	25, 26, 27, 28
9	F	19	28, 30
10	Ne	20, 21, 22	33
11	Na	23	36
12	Mg	24, 25, 26	39
16	S	32, 33, 34	49



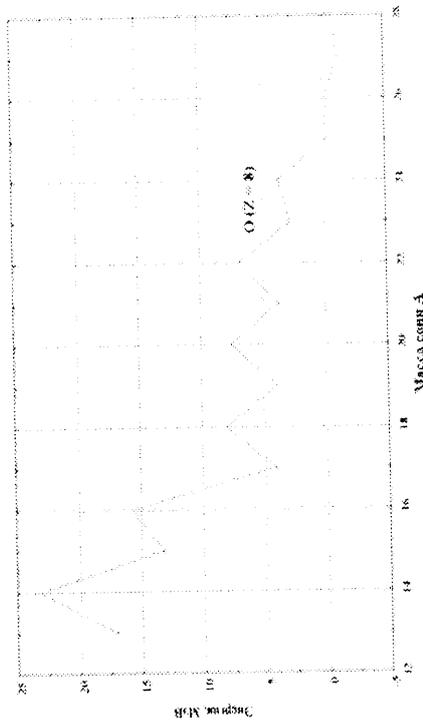
1.23-rasm. He ($Z = 2$) va Li ($Z = 3$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



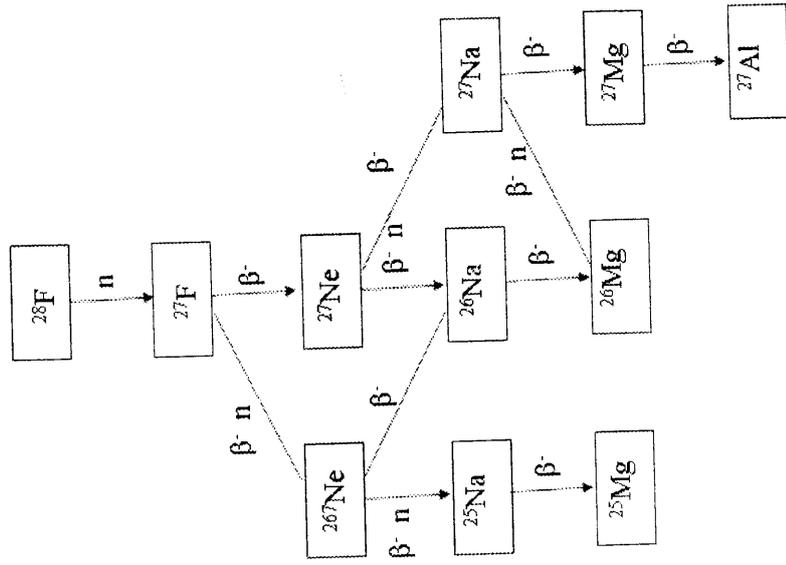
1.24-rasm. Be ($Z = 4$) va B ($Z = 5$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



1.25-рasm. C ($Z = 6$) va N ($Z = 7$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



1.26-рasm. O ($Z = 8$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



1.27-рasm. ^{28}F izotopining parchalanishi.

Neytron radioaktivlikka misol sifatida ^{28}F izotopning parchalanishi sxemasi 1.27-rasmda keltirilgan. Ftor bitta ^{19}F turg'un izotopga ega. ^{28}F izotopi neytronlarga boy va asosiy holatidan neytron chiqarib parchalanadi, ya'ni: $^{28}\text{F} \rightarrow ^{27}\text{F} + n$. ^{28}F izotopning yarim parchalanish davri $T_{1/2} < 40$ ns. ^{28}F izotopi parchala-nishi natijasida hosil bo'lgan izotoplar ham neytronlarga boy bo'lgani uchun ularning asosiy parchalanish kanali bu β^- -parchalanishdir. ^{27}F , ^{26}Ne , ^{27}Na izotoplar kechikkan neytronlar chiqarib parchalanadilar.

1.11-§. Radioaktiv parchalanish jarayonlarini simflarga bo'linishi

Hozirgi kunda ma'lum bo'lgan radioaktiv parchalanish jarayonlari simflarga bo'lib chiqildi. Ushbu ma'lumotlar 1.4-jadvalda keltirilgan.

1.4-jadval
Radioaktiv parchalanishlar turlari

Parchalanish turi	Parchalanishda ishtirok etuvchi zarralar	Ikkilamchi nuklid
<i>Atom yadrosidan engil atom yadrolari chiqishi bilan sodir bo'ladigan parchalanishlar</i>		
α -parchalanish	Yadrodan chiqqan α -zarra	(A-4, Z-2)
Protonlar chiqishi	Yadrodan chiqqan proton	(A-1, Z-1)
Neytronlar chiqishi	Yadrodan chiqqan neytron	(A-1, Z)
Qo'sh neytron emissiyasi	Yadrodan bir vaqtda chiqqan qo'sh neytron	
Spontan bo'linish	Yadro ikki yoki bir necha kichik yadrolarga parchalanadi	
Klaster parchalanishlar	Yadrodan α -zarradan katta ammo birlamchi yadrodan kichik bo'lgan yadro	(A-A1, Z-Z1) + (A1, Z1)
<i>Beta parchalanish turlari</i>		
β^- -parchalanish	Yadro elektron va antineytrino chiqaradi	(A, Z+1)
β^+ -parchalanish	Yadro pozitron va neytrino chiqaradi	(A, Z-1)
Elektron qamrash	Yadro orbital elektronni qamrab oladi va neytrino chiqaradi. Ikkilamchi yadro (yoki nuklid) uyg'ongan va nostabil holatda bo'ladi	(A, Z-1)
Qo'shaloq β -parchalanish	Yadro ikkita elektron va ikkita antineytrino chiqaradi	(A, Z+2)

Qo'shaloq elektron qamrash	Yadro ikkita orbital elektronni qamrab oladi va ikkita neytrino chiqaradi. Ikkilamchi yadro (yoki nuklid) uyg'ongan va nostabil holatda bo'ladi.	(A, Z-2)
Pozitron emissiyasi bilan sodir bo'ladigan elektron qamrash	Yadro orbital elektronni qamrab oladi va bitta pozitron va ikkita neytrino chiqaradi.	(A, Z-2)
Qo'shaloq pozitron chiqadigan parchalanish	Yadro ikkita pozitron va ikkita neytrino chiqaradi.	(A, Z-2)
<i>Gamma-nurlanishlar (yadro holatlari orasidagi o'tish)</i>		
Gamma-parchalanishlar	Uyg'ongan yadro yuqori energiyali foton (gamma-nurlar) chiqaradi.	(A, Z)
Ichki konversiya	Uyg'ongan yadro o'z energiyasini orbital elektronga beradi	(A, Z)

1.12-§. Radioaktiv fon

Har bir tirik organizm, shu jumladan inson o'z individual hayoti davomida va eng quyi formadan Homo sapiens (idrokli odam) deb nomlanuvchi hozirgi insonlargacha bo'lgan tirik tabiatning bu-tun rivojlanishi bosqichida radioaktiv (radiatsion) fon deb nomla-nuvchi ionlovchi nurlar ta'siri ostida bo'lib kelgan.

Radioaktiv fonni shartli ravishda ikkiga bo'lish mumkin, ya'ni:

1. Tabiiy radioaktiv fon.
2. Sun'iy radioaktiv fon.

Radioaktiv fon insonga bog'liq bo'lmagan Quyosh siste-masi vujudga kelgan vaqtda paydo bo'lgan bo'lib, uni asosan tabiatda sochilgan uran-toriy oilasi va tabiiy radionuklidlari vujudga keltiradi. Ikkinchi fon esa bevosita inson faoliyati bilan bog'liq bo'lib, uning vujudga kelishi inson tomonidan yadro qurollari yaratilishi va yadro energetikasini o'zlashtirilishi bilan uzviy bog'liqdir. Sun'iy

radioaktiv fon intensivligi vaqt o'tishi bilan oshib bormoqda va ma'lum bir darajada ekologik xavf tug'dirishi mumkin. Ushbu fonni doimo kuzatish va nazorat qilib turish davr talabidir.

Tabiiy radioaktiv fonni vujudga keltiruvchi omillar asosan quyidagilar:

1. Kosmik nurlanishlar.
2. Uran-toriy oilasi.
3. Tabiiy radionuklidlar.
4. Tabiiy radioaktiv aerozollar.

Har bir inson doimo tashqi radiatsiya manbai bo'lgan kosmik nurlar ta'siri ostida bo'ladi. Ushbu nurlanishlar bizga koinotning uzoq sohalaridan keladi va Erga har tomondan tushadi.

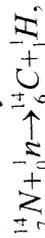
Kosmik yoki kosmik radiatsion nurlanishni Galaktikada va Quyoshda sodir bo'luvchi portlashlar natijasida hosil bo'ladi. Koinotdan Erga kelayotgan zaryadlangan zarrachalar oqimi, odatda, birlamchi koinot nurlanishlari deyiladi. Birlamchi koinot nurlanishlar asosan protonlar (~90%), α -zarralar (geliy atomining yadrosi) va tartib nomeri 30 dan kichik bo'lgan kimyoviy elementlar atom yadrolaridan iborat. Birlamchi koinot nurlanishlari atmosferani tashkil etgan kimyoviy elementlar atom yadrolari bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasida yangi (ikkilamchi) zarralar – ikkilamchi koinot nurlari hosil bo'ladi. Ikkilamchi koinot nurlari asosan 20 km balandlikdan to Er sirtigacha bo'lgan oraliqda sodir bo'ladigan bo'lib, birlamchi koinot nurlanishidan keskin farq qiladi va asosan yuqori energiyali mezonlar, neytronlar, protonlar va «yumshoq» komponentli elektron va gamma kvantlardan iborat. Dengiz sathida yumshoq komponentlar intensivligi koinot nurlanishlari to'liq intensivligining taxminan 1/3 qismini tashkil qiladi.

Kosmik nurlanishlarning 10 sm qalinlikdagi qo'rg'oshinda deyarli yutiladigan qismiga yumshoq, yutilmasdan o'tgan qismiga esa qattiq komponentlar deyiladi. Tekshirishlar shuni ko'rsatdiki, koinot nurlarining yumshoq va qattiq komponentlarga bo'linishi chuqur fizik ma'noga ega bo'lib, komponentlarni tashkil etgan zarralarning tabiati bilan uzviy bog'liq ekan. Masalan, yumshoq komponent modddada kuchli yutiluvchi zarralar-elektronlar va gamma-kvantlardan, qattiq komponenti esa, asosan relyativistik myuonlardan iborat. Myuon massasi elektron massasidan 206,8 marta katta bo'lib, ular modddada kuchsiz yutiladi. Sababi, ularning tormozlanish nurlanishi juda

kuchsiz bo'lib, o'z energiyasini asosan ionlashtirish hisobiga sarflaydi. Myuonlarning ikki asosiy turi mavjud bo'lib, ularning o'rtacha yashash vaqti ~2.2 mks ga teng.

Kosmik nurlanishlar yuzaga keltiruvchi yadro reaksiyalari natijasida hosil bo'ladigan radionuklidlarga kosmogen radionuklidlar deyiladi. Bunda bombardimon qiluvchi zarralar vazifasini birlamchi va ikkilamchi kosmik nurlar tarkibidagi zarralar, nishon sifatida atmosferada havosi tarkibiga kiruvchi kimyoviy elementlar, ya'ni azot, kislorod va argonlar bajaradi. Bu jarayonlar natijasida tritiy, uglerod-14, berilliy-7 va natriy-22 kosmogen radionuklidlari hosil bo'ladi. Tritiy tritilashgan suvga aylanadi va yog'in yog'ishilar bilan er sirtiga tushadi va tabiatda suvning aylanishlarida ishtirok etadi. Tirik organizm to'qimalaridagi tritiy konsentratsiyasi o'rtacha 0,4 Bk/kg ni tashkil etadi. Uglerod-14 oksidlanadi va fotosintez orqali odatdagi karbonat angidrid gazi bilan biotik aylanishlarda qatnashadi. Bu radionuklidning o'rtacha konsentratsiyasi 27 Bk/kg tashkil etadi. Berilliy-7 radionuklidining yomg'ir suvlari bilan o'simliklar, sabzavotlar, inson va hayvonlar organizmlariga tushadigan miqdori 50 Bk/yil ga teng bo'ladi.

Tritiy va uglerod-14 kosmogen radionuklidlari hosil bo'lish jarayoniga batafsil to'htalib o'tamiz. Birlamchi kosmik nurlanishlar ta'sirida atmosfera tarkibi-dagi azot atomidan radioaktiv izotoplar – tritiy va uglerod-14 hosil bo'ladi. Bu murakkab jarayon bo'lib, quyidagi tartibda sodir bo'ladi: birlamchi tez protonlar azot va kislorod atomi yadrolaridan neytronlarni urib chiqaradi, bu neytronlar esa o'z navbatida boshqa azot atomlari yadrosi bilan o'zaro ta'sirlashib, proton va triton (tritiy atom yadrosi) hosil bo'ladi. Ushbu jarayon quyidagi tenglama ko'rinishda yoziladi:



Radioaktiv uglerod-14 inson organizmiga nafas olganda CO₂ gaz bilan, hamda suv va turli oziq-ovqat mahsulotlari orqali kiradi. Shu jumladan tritiy ham organizmda mavjud bo'lib, bu radio-aktiv izotoplar umumiy radioaktiv fonni tashkil qiladi. Atrof-muhit, inson va barcha jonzorlar ushbu radioaktiv fon ta'siri ostida bo'ladi. Kosmik nurlanishlar intensivligi ob'ektning geografik joylashishiga

bog'liq va dengiz sathidan ko'tarilgan sari oshib boradi. Masalan, Toshkent shahri geografik kengligida ekvator-dagiga nisbatan inson to'qimalarida yutiladigan o'rtacha yillik doza taxminan 1,3 marta katta bo'ladi va qutbga yaqinlashgan sayin oshib boradi.

Tabiiy radioaktiv foni vujudga keliruvchi omillardan biri bu uran-toriy oilasi hisoblanadi.

Tabiiy radioaktiv izotoplar orasida yarim parchalanish davri Erning yoshi ($4,5 \cdot 10^9$ yil) ga yaqin uchta izotop ma'lum. Bularga uran-238 ($T_{1/2}=4,5 \cdot 10^9$ yil), uran-235 ($T_{1/2}=7 \cdot 10^8$ yil) va toriy-232 ($T_{1/2}=1,4 \cdot 10^{10}$ yil) lar misol bo'ladi. Bu izotoplarning hammasi Mendeleev davriy sistemasining oxiridan joy olgan bo'lib, uchta radioaktiv oilani boshlab beradi. Uran oilasi davriy sistemada eng barqaror bo'lgan qo'rg'oshinning ^{206}Pb va ^{207}Pb , toriy oilasi esa ^{208}Pb izotoplari bilan tugaydi. Radioaktiv oilalar 1.5-jadvalda keltirilgan bo'lib, bu oilalar ichida neptuniy oilasi hozirgi kunda uchramaydi, sababi yarim parchalanish davri nisbatan kichik bo'lgani sababi bu oila yo'q bo'lib ketgan.

1.5-jadval.

Oilalar	Massa sonining formu-lasi	Radioaktiv oilalar		
		Eng uzoq yashovchi nuklid	Eng uzoq yashovchi nuklidning yarim parchalanish davri	Parchalanis hoxirgi maxsuloti
Toriy	4n	$^{232}\text{Th}_{90}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ yil	$^{208}\text{Pb}_{82}$
Neptuniy	4n+1	$^{237}\text{Np}_{93}$	$2,2 \cdot 10^6$ yil	$^{209}\text{Bi}_{83}$
Uran-radiy	4n+2	$^{238}\text{U}_{92}$	$4,5 \cdot 10^9$ yil	$^{206}\text{Pb}_{82}$
Uran-aktino	4n+3	$^{235}\text{U}_{92}$	$7,8 \cdot 10^8$ yil	$^{207}\text{Pb}_{82}$

Uchta radioaktiv oiladan tashqari radioaktivlik xususiyatiga ega bo'lgan beshta tabiiy radioaktiv yadrolar xam mavjud bo'lib, ularning parchalanishi natijasida turg'un yadrolar hosil qiladi. Bular quyidagilar:

- $^{40}_{19}\text{K}$ (β^- , β^+ , ϵ), $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^8$ *iyul* ;
- $^{87}_{37}\text{Rb}$ (β^-), $T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$ *iyul* ;
- $^{152}_{62}\text{Sm}$ (α), $T_{1/2} = 1,7 \cdot 10^{11}$ *iyul* ;
- $^{176}_{71}\text{Lu}$ (ϵ ; β^-), $T_{1/2} = 5 \cdot 10^{10}$ *iyul* ;
- $^{187}_{75}\text{Re}$ (β^-), $T_{1/2} = 4 \cdot 10^{10}$ *iyul* .

Bular ichida ko'p uchraydigan o'simliklar tarkibida, inson va hayvonlar organizimida uchraydigan kaliy-40 radionuklidi hisoblanadi.

Tabiiy kaliy uchta izotopning aralashmasidan tashkil topgan, ya'ni kaliy-39 ($p=93,08\%$), ^{40}K ($p=0,01\%$) va ^{41}K ($p=6,91\%$) (p-izotopning tabiatda tarqalganligi). Bular ichida kaliy-40 izotopi radioaktivdir. Tabiiy kaliyning izotop tarkibi o'zgarmas bo'lgani uchun, uning istalgan birikmasida kaliy-40 radioizotopi bo'ladi. ^{40}K radionuklidining 89% ulushi β^- parchalanish natijasida, asosiy ho-latdagi $^{40}\text{Ca}_{20}$ izotopiga aylanadi:



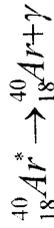
bu yerda $\tilde{\nu}_e$ - elektron antineytrinosi.

^{40}K izotop yadrosi chiqaradigan elektronlar noldan to 1330 KeV gacha bo'lgan uzluksiz energiya spektriga ega, ya'ni chiqayotgan elektron-larning maksimal kinetik energiyasi 1330 keV gacha bo'ladi. Ushbu maksimal energiya β^- spektrning chegara energiyasi ham deyiladi.

$^{40}_{19}\text{K}$ yadrosi, 11% holda orbitadagi elektronn qamrab (K-qamrash, ya'ni K-qobiqdagi elektroni qamrash), uyg'ongan holatdagi $^{40}_{18}\text{Ar}$ yadrosini hosil qiladi:



Ushbu argon yadrosi uyg'ongan holatdan asosiy holatiga $E_\gamma=1461$ keV energiyali γ -kvant chiqarib o'tadi:



Shunday qilib, kaliy radioizotopi β -parchalanishi natijasida uzluksiz spektr maksimal energiyasi **1330 keV** bo'lgan β -zarralar (*elektronlar*) va **1461 keV** energiyali monoenergetik γ -nurlanishlar chiqarar ekan.

Endi mazkur ma'lumotlar asosida 1 g tabiiy kaliy 1 sekundda chiqaradigan β -zarralar va γ -kvantlar sonini hisoblaymiz. Bu hisoblashlarni bajarishdan oldin m massali radioaktiv moddaning aktivligi aniqlanadigan ifodani keltirib chiqaramiz.

Massasi m bo'lgan manbadagi radioaktiv yadrolar soni:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A \quad (1.38)$$

bu yerda N_A - Avogadro soni, μ - izotopning molyar massasi. (1.6) va (1.38) larni $A = \lambda N$ ga qo'yamiz va m massali monoizotop manbaning aktivligini aniqlaydigan ifodani olamiz:

$$A = 0,693 \cdot \frac{m N_A}{T_{1/2} M} \quad (1.40)$$

Agar aktivlik **Bk** larda emas, balki **Kyurilarda** hisoblansa, u holda (1.36) ifodani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$A = \frac{0,693}{3,7 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{m N_A}{T_{1/2} M} K_u \quad (1.41)$$

1g tabiiy kaliy chiqarayotgan β -zarralar sonini topish uchun ${}^{40}\text{K}$ radioizotopining tabiiy aralashmadagi protsent miqdorini va β -zarralar chiqishi yuz beradigan parchalanishlar ulushini hisobga olish kerak. Massasi **1 g** tabiiy kaliyda $m' = p \cdot 12 = 10^{-4} \cdot 12 = 10^{-4} \cdot 2$ miqdorda ${}^{40}\text{K}$ radioizotopi bor; β - *parchalanish* ulushi $I_\beta = 0,89$ ga teng. Ko'rilyotgan hol uchun (1.41) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$A_\beta = 0,693 \cdot m' \cdot \frac{N_A}{T_{1/2}} \cdot M \quad (1.42)$$

Agar bu ifodaga yuqorida ta'kidlangan qiymatlarni qo'yib xisoblasak, $A_\beta = 28$ **Bk** qiymatni olamiz. Boshqacha aytganda **1 g** tabiiy kaliy **1 s** da taxminan **28 ta β -zarracha (*elektron*)** chiqaradi. Shunga o'xshash hisobni **K-qamrash** uchun bajarsak, **1 g** tabiiy kaliy **1 s** taxminan **4 ta γ -kvant** chiqarishini aniqlaymiz. Massasi **1 g** tabiiy kaliy chiqarayotgan β -zarralar va γ -kvantlar sonini bilgan holda, ihtiyoriy massali istalgan kaliy birikmasi chiqarayotgan β -zarralar va γ -kvantlar sonini topish mumkin.

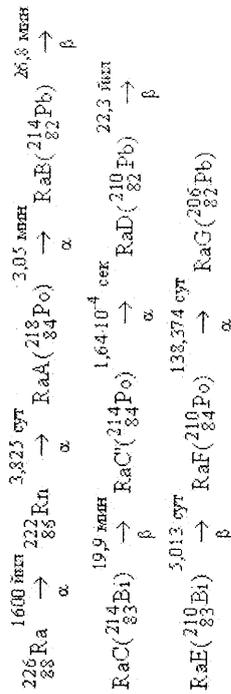
1.13-§. Tabiiy radioaktiv aerozollar

Tabiiy radioaktiv aerozollar emanatsiyalarning atmosferada parchalanishi natijasida hosil bo'ladi. «*Emanatsiya*» - lotincha «emanatio» - ajralib chiqish, sizib chiqish, tarqalish ma'nosini anglatadi. *Emanatsiya* - radiy tabiiy radioaktiv izotoplari parchalanishining gazsimon radioaktiv mahsullari. Radiy-224 (${}^{224}\text{Ra}$) ning parchalanishi natijasida gazsimon radon (Rn), ${}^{224}\text{Ra}$ dan taron (Tn), ${}^{223}\text{Ra}$ dan esa aktinon (An) hosil bo'ladi. Ushbu radionuklidlar ya'ni ${}^{222}\text{Rn}$, ${}^{220}\text{Tn}$ va ${}^{219}\text{An}$ atom nomeri **86** bo'lgan kimyoviy element - radon (Rn) ning nuklidlari bo'lib, ularning parchalanish davrlari ($T_{1/2}$) mos holda **3,825 sut.**, **54,5 s** va **3,92 s** ga teng. Radiy-226, 224, va 223 lar mos ravishda uran-235, toriy-232 va uran-238 radioaktiv otlalarning parchalanish zanjirida joylashgan.

Radon, taron va aktinonlar, ya'ni emanatsiyalar atmosferaga tuproq, tog' jinslari va tabiiy suvlardan o'tadi. Ular atmosferada havo oqimi va diffuziyasi asosida tarqaladi. Ularning havodagi konsentratsiyasi balandlik oshgan sari, ularning parchalanishi tufayli, kamaya boradi. Taron va aktinonlarning yashash vaqti qisqa, shu sababli atmosferaning er sirtiga yaqin bo'lgan qatlamlarida uchraydi. Radon konsentratsiyasi odatda taron konsentratsiyasidan bir necha tartibda yuqori bo'ladi. Radiatsion xavfsizlik nuqtai nazaridan faqat radon muxim ahamiyatga ega bo'lib taron va aktinon gazlari kam ahamiyatga ega. Radon gazi ko'p miqdorda uran konlarida to'planadi hamda er osti tabiiy mineral suvlarida ham bo'ladi.

Emanatsiya inert gaz bo'lib, atmosferada atomar holatda bo'ladi. Emanatsiya atomlari kondensatsiya yadrolariga ya'ni chang zarralari, og'ir ionlar va h.k. birikmaydilar. Shu sababli o'zlarini bevosita aerazol hosil qilmaydilar. Radioaktiv aerazol, emanatsiya parchalanish mahsulotlari bo'lgan poloniy, vismut va qo'rg'oshin izotoplarining kondensatsiya yadrolariga qo'shilishi natijasida hosil bo'ladi.

Radon parchalanish zanjirini batafsil ko'rib chiqamiz:



Bu parchalanishda ^{210}Pb gacha bo'lgan barcha mahsulotlar qisqa yashovchilardir. Uzoq yashovchi ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22 \text{ yil}$) o'zi esa havoda etarli miqdorda to'planishga ulgurmaydi shu sababli undan keyingi parchalanish mahsulotlarini hisobga olmasa ham bo'ladi.

Vismut-214 (0,04%) izotopining parchalanishi tufayli hosil bo'lgan ^{210}Tl izotopining chiqish kattaligi kichik bo'lganligi sababli ^{210}Tl ni ^{214}Po ga nisbatan hisobga olmasa ham bo'ladi. **Poloniy-214** atomlari o'ta qisqa yashashi (10^{-4} s lar atrofida) sababli, ^{214}Po izotopi doimo ^{214}Bi izotopi bilan radioaktiv muvozanatda bo'ladi. Shunday qilib radon parchalanish mahsulotlari o'zaro aylanishini soddalashtirib quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:



Havodagi ^{218}Po , ^{214}Pb va ^{214}Bi atomlari konsentratsiyasi mos holda n_1 , n_2 va n_3 bo'lsin. Radon parchalanish mahsulotlarining aktivlik konsentratsiyalar $A_1 = \lambda_1 n_1$; $A_2 = \lambda_2 n_2$; $A_3 = \lambda_3 n_3$ bo'ladi, bu yerda λ_1 , λ_2 va λ_3 mos holda ^{218}Po , ^{214}Pb va ^{214}Bi izotoplarining parchalanish doimiy-lari. Radon va uning parchalanish mahsulotlari orasida radioaktiv muvozanatda $A_1 = A_2 = A_3$, binobarin bu muvozanat holat uchun

$$n_1 : n_2 : n_3 = 1 : (\lambda_1 / \lambda_2) : (\lambda_1 / \lambda_3) \quad (1.44)$$

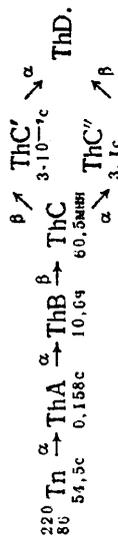
$$A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 1 : 1$$

Doimiy kattaliklarning qiymatlarini (1.40) ga qo'yib, quyidagi natijani olamiz:

$$n_1 : n_2 : n_3 = 1 : 8,8 : 6,45 \quad (1.45)$$

Odatda, ma'lum hajmli berk idishda radioaktiv muvozanat 3 soatdan keyin qator topadi. Real sharoitda, odatda muvozanatning ^{218}Po atomlari konsentratsiyasi ustunlik qiladigan tomonga silji-shi kuzatiladi. Bunga sabab, havo harakati natijasida ^{214}Pb va ^{214}Bi atomlarining ko'chib ketishidir. Havoda faqat ^{218}Po atomlari bo'lganda nihoyatda nomuvozanat holatiga mos keladi.

Taron parchalanish zanjiri quyidagicha:



Parchalanish mahsulotlarining izotop tarkibi quyidagicha:

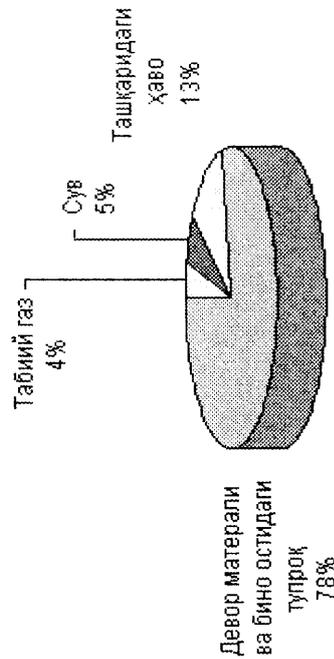


Bu yerda, hamma vaqt ^{218}Po va ^{208}Tl izotoplari ^{12}Bi bilan muvozanatda bo'ladi deb faraz qilish haqqoniy bo'ladi. **Poloniy-216** kichik va ^{212}Pb esa katta yarim parchalanish davriga egaligi e'tiborni o'ziga jalb etadi. Berk idishda taron va parchalanish mahsulotlari orasida muvozanat bir necha o'n soatlardan keyin qator topadi.

Radon va uning parchalanish mahsulotlarining konsentratsiyasi kuzatish joyiga, ob-havo sharoitiga va kuzatish vaqtiga yuqori darajada bog'liq. Er sirtidagi quruqlik ustida **3,7 parchalanish/c** ni

radon yuzaga keltiradi va faqat $0,037$ parchalanish /c esa taron sababli yuzaga keladi. Boshqacha so'z bilan aytganda tabiiy radioaktiv aerozollar aktivligini asosan radon parchalanishi mahsulotlari bilan aniqlanadi.

Atrofimizdagi ushbu inert gazning asosiy manbai Er qobig'i (erning uski qattiq qatlami) hisoblanadi. Radon fundament, pol va devor yoriq va tiriqshlari orqali kirib olib, xonada qolib ketadi. Uy ichidagi (xona ichidagi) radonning yana bir manbai-tarkibida tabiiy radionuklidlar mavjud bo'lgan qurilish materiallari (beton, g'isht va h.k.) hisoblanadi. Bu radionuklidlar parchalanishi natijasida radon gazi hosil bo'ladi. Radon xonaga suv (ayniqsa agar u artezian quduqdan olinayotgan bo'lsa) bilan, tabiiy gazni yoqishda ham va h.k. kirishi mumkin. Radon havodan 7,5 marta og'irdir. Buning natijasida, radon gazining konsentratsiyasi ko'p qavatli binolarning yuqori qavatlarida pastki qavatlariga nisbatan kam bo'ladi. Inson radon gazidan asosiy nurlanish dozasini shamolla-tilmaydigan berk xona ichida oladi. Doimiy ravishda shamollatilib turiladigan xona ichida radon gazining konsentratsiyasini bir necha marta kamaytirish mumkin. Inson organizimiga uzoq vaqt davomida radon va uning mahsulotlari tushib turishi, o'pka raki hosil bo'lish xavfini bir necha marta oshirishi mumkin. 1.28-rasmda keltirilgan diagramma bizga radonning har xil manbalarining nurlanish quvvati-tini solishtirishga imkon beradi.



1.28-rasm. Tevarak-atrofimizdagi radon gazining manbalari.

1.14-§. Sun'iy radioaktiv fon

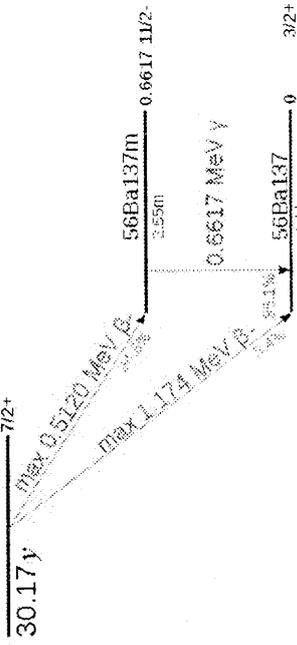
Tabiiy radioaktiv γ -fonning oshishiga maksimal hissani uzoq vaqt davomida tabiiy radioaktiv radionuklidlar qo'shib, ular ichida tirik organizmlar uchun zararli ta'siri kattaligi bilan e'tiborga ega bo'lgan ^{137}Cs hisoblanadi. ^{137}Cs atmosfera, tuproq va suvlarni ifloslab, «tuproq-simlik-inson» va «tuproq-hayvon-o'simlik-inson» bio-logik zanjir bo'yicha inson organizimiga kirib keladi. Biologik o'ta faol hisoblangan ^{137}Cs radionuklidlari o'simliklarda, inson va hayvonlar organizmlarida yuz beradigan hamma almashuv reaksiya-larida faol ishtirok etadi va Er aholisi nurlanishi effektiv ekvivalent dozasi-ning 40% (540 mkZv) ekanligi sabab bo'ladi.

Seziyning massa sonlari $A=114-148$ ga teng bo'lgan 35 ta izotopga ega bo'lib, shulardan 34 tasi radioaktiv va faqat ^{137}Cs izotopi faol hisoblanadi. Massa soni $A=134-148$ ga teng seziiy radionuklidlari U va Th yadrolarining spontan yoki majburiy bo'linishidan hosil bo'ladi. Radiatsion-gigenik nuqtai nazaridan ^{137}Cs radionuk-lidi katta qiziqish uyg'otib, u bo'linish bo'lagi sifatida va massa soni $A=137$ izobara bo'lgan boshqa bo'linish bo'laklarining ketma-ket parchalanish mahsuloti sifatida ham hosil bo'lishi mumkin. Ushbu ketma-ket parchalanishlar qo'yidagicha yuz beradi: $^{137}\text{Tc}(4 \text{ min}) \rightarrow ^{137}\text{I}(24,2 \text{ s}) \rightarrow ^{137}\text{Xe}(3,83 \text{ min}) \rightarrow ^{137}\text{Cs}(30,17 \text{ yil}) \rightarrow ^{137m}\text{Ba}(2,55 \text{ min}) \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ (stabil). Seziya-137 radionuklidining parchalanish sxemasi 1.29-rasmda keltirilgan. Sxemadan ko'rinadiki, ^{137}Cs radionuklidi beta-parchalanish orqali ^{137}Ba nuklidga o'tadi:



Bu jarayonda maksimal kinetik energiyasi 0,512 MeV (β_1 , 94,6%) va 0,1174 MeV (β_2 , 5,4%) bo'lgan elektronlar chiqishi bilan sodir bo'ladi.

55Cs137



1.29 -rasm. Seziva-137 parchalanish sxemasi.

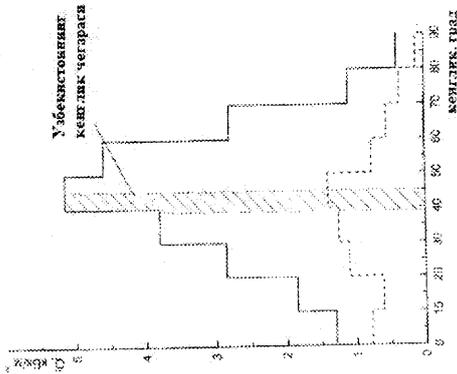
Tuproq va minerallarda tabiiy ^{137}Cs radionuklidining muvozanat solishtirma aktivligi juda kichik bo'lib, 3,7 dan 370 mBk/kg gacha, er qobig'ida muvozanat miqdori $\sim 6 \cdot 10^{16}$ Bk atrofida, tuproqning bir metr ustki qatlamidagi miqdori esa $\sim 8 \cdot 10^{11}$ Bk.

Atrof muhitga ^{137}Cs radionuklidining asosiy kelib tushish manbali bo'lib, atmosferada yadro qo'rollarini sinash natijasida hosil bo'lgan yadro bo'linish mahsulotlarining global va regional yog'ishi hisoblanadi. Yigirmanchi asrda yadro quroliga ega bo'lgan davlatlar tomonidan 2060 dan ortiq termoyadro zaryadlari sinashdan o'tkazilgan bo'lib, shulardan 457 tasi shimoliy va 44 tasi janubiy yarim sharlarning atmosferasida o'tazilgan. Ushbu sinashlar natijasida tashqi muhit, yig'indi aktivligi $\sim 1,8 \cdot 10^{21}$ Bk bo'lgan yadro bo'linish mahsulotlari bilan ifloslanib, shularning $\sim 9 \cdot 10^{17}$ Bk aktivligini ^{137}Cs tashkil etadi. Er sharining turli joyida yadro bo'linish mahsulotlarining kengliklar bo'yicha taqsimoti portlashning quvvatiga, portlash o'tkazish sharoitlariga, geografik, ob-havo sharoitlarga va boshqa omillarga bog'liq bo'ladi.

Yadro bo'linish mahsulotlari ^{30}Zn dan ^{64}Gd gacha bo'lgan element-larning 200 dan ko'pi neytronga boy izotoplarini o'z ichiga oladi. Bu radionuklidlarning ko'pchiligi nisbatan qisqa yarim parchalanish davriga ega bo'lganligi sababli yadro bo'linish mahsulotlarining boshlang'ich aktivligi (portlashdan bir soatdan keyin) juda tez kamayadi. Etti kundan keyin 10 marta, 49 kundan keyin 10^2 marta, 343 kundan keyin 10^3 marta, 10 yildan keyin esa 10^4 marta kamayib, asosan yadro bo'linish mahsulotlarining o'ta uzoq

vashovchilari bo'lgan ^{90}Sr ($T_{1/2}=28$ yil) va ^{137}Cs ($T_{1/2}=30$ yil) radionuklidlarning aktivliklaridan iborat bo'lib qoladi. Tirik organizmlarga ^{137}Cs ning radiatsion ta'siri ^{90}Sr radionuklidga qaraganda ancha katta. Bunga sabab birinchi radionuklidning β -parchalanishda energiyasi 662 keV bo'lgan intensiv γ -nurlanish chiqarishi bilan sodir bo'lishidir.

Seziy-137 radionuklidi global yog'ilishi \bar{Q} o'rtacha zichligining kengliklar bo'yicha taqsimoti 1.31-rasmda keltirilgan.



1.31-rasm. Erning shimoliy(-) va janubiy (---) yarim sharlarida seziv-137 radionuklidining global yog'ilishining o'rtacha zichligining kengliklar bo'yicha taqsimoti.

Ushbu taqsimotdan ko'rinadiki, O'zbekiston territoriyasi bu radionuklidning yog'ilishi maksimal zichligiga to'g'ri keladi, ya'ni $\bar{Q} = 5,17 \text{ kBk/m}^2$. Ammo bu qiymat chegaraviy ruxsat etilgan konsentratsiyadan katta emas.

1.15-§. Seziv-137 radionuklidining tuproqdagi migratsiyasi

Texnogen radionuklidlar bilan atrof muhit ifloslanishini tadqiq qilish, atrof muhit turfi ob'ektlardagi ularning miqdori o'rganish va texnogen radionuklidlarning muhitda migratsiya-siga sabab bo'luvchi

qonuniyatlarini aniqlashdan iborat bo'ladi. Bu tadqiqotlar quyidagi zanjir bo'yicha olib boriladi:

- *atmosfera-tuproq-o'simlik-inson*,
- *atmosfera-tuproq-o'simlik-hayvonlar-inson*

Tuproq Er sirtida eng ko'p tarqalgan tabiiy ion almashuvchi material hisoblanadi va u eng inersion halqa hisoblanib, butun zanjir bo'yicha texnogen radionuklidlarning tarqalish tezligini belgilaydi. Tuproqda radionuklidlarning vertikal va gorizontaal migratsiyasi ularning o'simlik, er osti suvlari (sizot suvlar), hovuz-dagi suvlarga tushishiga (qo'shilishga) sabab bo'ladi. Tuproqda radio-nuklidlarning ko'chish mexanizmlari o'z tabiati bo'yicha turli tumandir:

- havo yog'inlari filtratsiyasi,
- tuproq sirtida suvning harakati,
- o'simliklar ildiz tizimi bo'yicha ko'chishlar,
- erkin va adsorbirlangan ionlar diffuziyasi,
- antropogen faoliyat natijasida va h.k.

Bularning migratsiya tezligi, migratsion jarayondagi ulushi quyidagilar bo'yicha aniqlanadi:

- radionuklidlarning kimyoviy xususiyati (ion zaryadi va kattaligi, birikma shakli, adsorbsiyalanishiga, gidroliziga),
- tuproqning fizik-kimyoviy xususiyatlariga (mineral-lashiga, kimyoviy va granulometrik tarkibiga, zichligiga, namligiga, organik moddalar tarkibi va miqdoriga, kislotaga, yutilish hajmiga, temperaturaga, tuproq erit-masining konsentratsiyasiga va tarkibiga),
- ob-havo sharoitiga (faslning davomiyligiga, temperaturaning davomiyligiga, yilning va oynning o'rtacha temperaturasiga, yillik yog'ingarchilikka va ularning fasllar bo'yicha taqsimotiga).

Yigirmanchi asrning 80-yillariga kelib, radionuklidlarning dunyoning turli regionlaridagi tuproqlardagi miqdori, taqsimoti va siljishi bo'yicha juda katta eksperimental materiallar to'plan-gan. Ushbu ma'lumotlar asosida radionuklidlarning vertikal sil-jishini (migratsiyasi) ifodalovchi qator modellar yaratilgan. Tuproqda texnogen radionuklidlarning migratsiya jarayonini model-lar orqali ifodalani-shi turli amaliy masalalarni echish uchun zarurdir.

Respublikamiz xududida texnogen radionuklidlarning migratsiyasi bo'yicha ham keng qamrovli ilmiy tadqiqot ishlar olib borilgan. Bu tekshirishlar akademik T.M.Mo'minov rahbarlik qilgan guruh tomonidan uzoq yillar davomida olib borilgan va bu tadqiqotlar natijalari e'lon qilingan. Mazkur tadqiqotlar uchun namu-nalar ma'mlakatimizning turli xududlardan olingan va tadqiq qilingan. Bunda ¹³⁷Cs radionuklidining vertikal taqsimotini tajribada va modellar orqali ifodalash uchun O'zbekistonning Jizzax, Navoiy, Samarqand va Toshkent viloyatlarida 20 ta tajriba uchastkallari tanlanib, ulardagi tuproqlardan namunalar olingan va tahlil ishlari olib borilgan.

1.16-§. Radiatsion ekologiya

Radioekologiya» atamasi 1956-yilda fanga kiritilgan bo'lib, ushbu fan sohasi XX asrning 1950-yillarida yadro quroli sinovlari, atom elektr stansiyalari va yadro ob'ektlarida yuz bergan halokatlardan tashqari, ulardagi atrof-muxitning radiatsion ifloslanish darajasi ortishi bilan bog'liq holatda shakllangan.

Radiatsion ekologiya - tabiiy va sun'iy (antropogen) manbalar asosidagi ionlashtiruvchi radiatsion nurlanishning (radionuklidlar) biotsenozlarga ta'sir mexanizmlarini o'rganuvchi fan sohasi hisoblanadi.

Radiatsion ekologiya (radioekologiya) - tirik organizmlar va ularning jamoalarining tabiiy radionuklidlar yoki texnogen tavsifdagi radioaktiv ifloslanish manbalari ta'siri sharoitida mavjudligi xususiyatlarini o'rganuvchi fan sohasi hisoblanadi.

Rossiyada radioekologiya fani rivojlanishiga V.I.Vernadskiy, I.P.Rixvanov, A.M.Kuzin, A.A.Peredelskiy, V.M.Klechkovskiy, N.V.Timofeev-Resovskiy, F.A.Tixomirov, R.M.Aleksaxin, V.A. Shevchenko kabi olimlar katta hissa qo'shishgan.

Radioekologiya fani tabiiy va antropogen kelib chiqish tavsifiga ega bo'lgan ionlashtiruvchi nurlanish turlari va manbalarini o'rganadi, radionuklidlarning biosfera tarkibiy qismlariga tushish qonuniyatlarini tadqiq qiladi va quyidagi bo'limlarga ajratiladi:

Nazariy radioekologiya - radionuklidlarning ekotizimlarda migratsiyasi masalalarini o'rganadi;

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Aktivligi $A=1\text{IkKi}$ ^{60}So radioizotopining massasi aniqlansin. Uning aktivligi $t=10,5$ yildan keyin qancha marta kamayadi.

Yechilishi: Aktivlik bilan radioaktiv element yadrolar soni orasida quyidagi bog'lanish mavjud:

$$A = \lambda N \quad (1)$$

Radioaktiv yadrolar soni:

$$N = \frac{m}{M} N_A \quad (2)$$

bu yerda $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{mole}^{-1}$ - Avogadro doimiysi, m - radioizotop massasi, M - molyar massa. Bu ifodani (1) ifodaga qo'yamiz:

$$A = \frac{m \lambda}{M} N_A \quad (3)$$

λ va $T_{1/2}$ orasidagi bog'lanish, ya'ni (1.5) formulaga ko'ra:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (4)$$

(4) ni (3) ga qo'yamiz,

$$A = \frac{m N_A}{M} \cdot \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

va bu ifodadan m ni topamiz:

Ekspirimental radioekologiya - biologik organizmlarga ion-lashtiruvchi nurlanishning ta'sir mexanizmlarini o'rganadi va ularni radiatsion nurlanishdan himoya qilish chora-tadbirlarini ilmiy asoslab beradi. Radioekologiya bevosita - hayvonlar radioeko-logiyasi, o'simliklar radioekologiyasi, gidroradioekologiya, mikro-organizmlar radioekologiyasi, o'rmonlar radioekologiyasi, qishloq xo'jaligi radioekologiyasi va boshqa yo'nalishlarga ajratiladi.

Ekologik biofizika, jumladan radiatsion ekologiya fan sohalarining amaliy jixatdan muhim vazifalaridan biri - bu atrof-muhitning atropogen omillar ta'sirida ifloslanish (kimyoviy va fizik, jumladan radiatsion) darajasini monitoring qilish va uni bartaraf qilish chora-tadbirlarini ishlab chiqishni ilmiy jihatdan asoslab berishdan tashkil topadi. Ushbu maqsadda 1989-yilda atrof-muhitning ifloslanish darajasini baholash uchun, Halqaro «Biotest» dasturi ishlab chiqilgan. Radiatsion ekologiyada atrof-muhitning turli hil toksik ta'sir ko'rsatish hossasiga ega bo'lgan, radioaktiv chiqindilar bilan ifloslanish darajasini baholashda biotest va bioindikatsiya uslublaridan foydalaniladi:

- Biotest (bioassay) - laboratoriya sharoitida ifloslanish muhi-ti tarkibidan olingan biologik ob'ektlar sinov namuna-larining morfologik, genetik, biokimyoviy va hakozi struk-tura-funksional tizimlaridagi o'zgarishlar asosida muhit-ning ifloslanish darajasini baholash uslub-i hisoblanadi.

- Bioindikatsiya (bioindication) - yashash muhitida tabiiy va antropogen tavsifga ega zararli chiqindilar ta'siriga nisbatan tirik organizmlarning javob reaksiyasi asosida, mavjud ho-latni baholash uslub-i hisoblanadi.

Atrof-muhitni radioekologik monitoring qilish asosida olib borilgan radioekologik tadqiqotlar natijalari, yadro qurollar sinashni cheklash va ularni urish sharoitida ishlatishdan bosh tortish uchun xalqaro konvensiyalarni qabul qilishda katta ta'sir ko'rsatdi. Sanoatda radioekologik tadqiqotlar tavsiyalaridan kelib chiqqan holda, yadro reaktorlarni sovutish yopiq sikllari, radioaktiv aerazol tutqichlar, radioaktiv chiqindilarni saqlash zararsizlantirish usullari ishlab chiqilmoqda va amalga oshirilmoqda.

$$m = \frac{A M T_{1/2}}{N_A \cdot 0,693}$$

Formulaga masala shartidagi qiymatlarni qo'yib, hisoblashlarni bajaramiz.

$$A = 1kKu = 10^3 Ku = 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 10^3 \frac{\text{napu}}{c} = 3,7 \cdot 10^{13} \frac{\text{napu}}{c}$$

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}, \quad M = 60 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$T_{1/2} = 5,25\text{yul} = 5,25 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 16556,4 \cdot 10^4 c.$$

$$m = \frac{3,7 \cdot 10^{13} \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 16556,4 \cdot 10^4}{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,693} = 0,882 \cdot 10^{-3} \text{кг}$$

Javob: $m = 0,882 \cdot 10^{-3} \text{кг}$ yoki $m = 0,882 c$.

Endi $t = 10,5$ yilda aktivlikni qancha marta kamayishini aniqlash uchun $N = N_0 e^{-\lambda t}$ formuladan foydalanamiz.

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

bundan N_0/N ni topamiz.

$$\frac{N_0}{N} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = e^{-\frac{0,693}{5,25\text{yul}} \cdot 10,5\text{yul}} = e^{-2,304} = 4 \text{ marta.}$$

Javob: 4 marta kamayadi.

2-masala. Massasi 1g bo'lgan izolyasiyalangan ^{226}Ra radioizotopining aktivligi va uning qancha vaqtdan keyin 10 % ga kamayishi aniqlansin.

Yechilishi: Aktivlikni quyidagi formula bilan aniqlaymiz:

$$A = \lambda N \quad (1)$$

Radioizotopdagi yadrolar soni:

$$N = \frac{m}{M} N_A \quad (2)$$

(2) ni (1) ga qo'yamiz va quyidagi ifodani olamiz:

$$A = \lambda \frac{m}{M} N_A \quad (3)$$

Formulaga masala shartidagi qiymatlarni qo'yib, hisoblashlarni bajaramiz.

$$T_{1/2} (^{226}\text{Ra}) = 1620 \text{ yil};$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{1620 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} c^{-1} = 1,354 \cdot 10^{-11} c^{-1}$$

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}, \quad M = 226 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$A = 1,354 \cdot 10^{-11} \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-3}}{226 \cdot 10^{-3}} = 3,61 \cdot 10^{10} c^{-1} = 0,975 Ku$$

2) $N = N_0 e^{-\lambda t}$ dan

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{yoki} \quad \frac{N_0}{N} = e^{\lambda t}.$$

Bu ifodaning logariflasak:

$$\ln \frac{N_0}{N} = \ln e^{\lambda t}$$

$$\lambda t = \ln \frac{N_0}{N}$$

bundan

$$\text{va } t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{0,9 N_0} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{0,9} = \frac{1}{1,354 \cdot 10^{-11}} \ln \frac{1}{0,9} \approx 243 \text{ yil}$$

Javob: $A = 0,975 \text{ Ku}$; $t \approx 243 \text{ yil}$.

3-masala. Toza ^{239}Pu radioizotopining solishtirma aktivligini aniqlang. ^{239}Pu radioizotopining yarim parchalanish davri $T_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 24100 \text{ yil}$.

Yechilishi: Radioizotopining solishtirma aktivligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$a = \frac{A}{m} \quad (1)$$

yoki

$$a = \frac{A}{m} = \frac{\lambda \cdot N(t)}{m_0 \cdot N(t)} = \frac{\lambda}{m_0} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2} \cdot m_0},$$

ya'ni solishtirma aktivlik vaqtga bog'liq emas. Formulaga masala shartidagi qiymatlarni qo'yib, hisoblashlarni bajaramiz:

$$a = \frac{\ln 2}{T_{1/2} \cdot m_0} = \frac{0,693}{24100 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 239 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} = 2,3 \cdot 10^9 \text{ Bk/g}$$

Javob: $a = 1,3 \cdot 10^9 \text{ Bk/g} = 6,2 \cdot 10^2 \text{ Ki/g}$.

4-masala. Preparatning solishtirma aktivligi **6,8 Ki/g** bo'lishi uchun **1 mg** radioaktiv bo'lmagan stronsiyga qancha milli-gramm **β -aktiv ^{90}Sr** qo'shish kerak? ^{90}Sr radioizotopining yarim parchalanish davri $T_{1/2}(^{90}\text{Sr}) = 28,6 \text{ yil}$.

Yechilishi: Preparatning solishtirma aktivligi:

$$a = \frac{A(^{90}\text{Sr})}{m(^{90}\text{Sr}) + m(\text{Sr})} = \frac{a(^{90}\text{Sr}) \cdot m(^{90}\text{Sr})}{m(^{90}\text{Sr}) + m(\text{Sr})} \quad (1)$$

Bu tenglamadan

$$m(^{90}\text{Sr}) = \frac{a \cdot m(\text{Sr})}{a(^{90}\text{Sr}) - a} \quad (2)$$

Radionuklidning solishtirma aktivligini **3-masaladagi** for-mula yordamida aniqlaymiz:

$$a(^{90}\text{Sr}) = \frac{\ln 2}{T_{1/2} \cdot m_0} = \frac{0,693}{28,6 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 90 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} = 5,14 \cdot 10 \text{ Bk/g}$$

$$a(^{90}\text{Sr}) = 5,14 \cdot 10^{12} \text{ Bk/g} = 139 \text{ Ki/g}.$$

Bu qiymatni (2) ifodaga quyamiz va **javobni** olamiz:

$$m(^{90}\text{Sr}) = \frac{a \cdot m(\text{Sr})}{a(^{90}\text{Sr}) - a} = \frac{6,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{142 - 6,8} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ g}$$

Javob: $m(^{90}\text{Sr}) = 5 \cdot 10^{-5} \text{ g}$.

5-masala. Berk idishda massasi $m = 0,1 \text{ g}$ bo'lgan radiy bor. Idishda **24 soat**dan keyin qancha miqdorda radon yig'iladi? Radiyning yarim parchalanish davri **1600 yil**, radonniki esa **3,8 kun**.

Yechilishi: Masalani quyidagi formuladan foydalanib echaniz:

$$N_{\text{Ra}} = N_{\text{Ra}} \frac{\lambda_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} (e^{-\lambda_{\text{Rn}} t} - e^{-\lambda_{\text{Ra}} t})$$

Radiy atomlari miqdori:

$$N_{\text{Ra}} = \frac{m}{A_{\text{Ra}}} N_A$$

bu yerda N_A - Avagadro soni

Radioaktiv parchalanish doimiylari:

$$\lambda_{\text{rad}} = \frac{\ln 2}{T_1}, \quad \lambda_{\text{rb}} = \frac{\ln 2}{T_2}$$

Binobarin

$$N_{\text{rb}} = \frac{mN_A}{A_{\text{ra}}} \left[\frac{t}{(e^{\ln 2})^{t_1}} - (e^{\ln 2})^{t_2} \right] \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Bu formulaga masala shartidagi quyidagi

$$m = 0,12 = 10^{-4} \text{ kg}, \quad t = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 8,64 \cdot 10^4 \text{ c}$$

$$A_{\text{ra}} = 226, \quad N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mole}}$$

$$T_1 = 1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 5,05 \cdot 10^{10} \text{ c}$$

$$T_2 = 3,8 \cdot 24 \cdot 3600 = 328,3 \cdot 10^3 = 3,3 \cdot 10^5 \text{ c}$$

qiymatlarni qo'yamiz va hisoblash natijasida quyidagi javobni olamiz:

$$N_{\text{rb}} \approx 32 \cdot 10^{14} \text{ (atom)}$$

Javob: $N_{\text{rb}} \approx 32 \cdot 10^{14}$ (atom).

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

1.1. Yangi tayyorlangan preparat tarkibida 1,4 mkg radioaktiv natriy-24 nuklidi bor. Uning aktivligi bir sutkadan keyin nimaga teng bo'ladi? Natriy-24 nuklidining yarim parchalanish davri 15 soat. (*Javobi:* 4 Ki).

1.2. Massasi 1 mg bo'lgan seriy-144 radioizotopining qancha yadrosi, a) 1s va b) 1 yil vaqt oraliqlarida parchalanishini aniqlang. Seriyning yarim parchalanish davri 285 kun. (*Javobi:* $\Delta N = 2,5 \cdot 10^8$).

1.3. Massasi 1 g bo'lgan radij bilan muvozanatda bo'lgan radonning massa va hajmi topilsin. (*Javobi:* $m_2 = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$; $V = 6,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$).

1.4. Natiriy-22 radioaktiv izotopi energiyasi 1,28 MeV bo'lgan gamma-kvantlarni nurlantirmoqda. Massasi 5 g bo'lgan natriy izotopining 5 min davomida nurlanayotgan gamma-nurlanishlar quvvati va energiyasi aniqlanilsin. Har bir parchalanish aktida energiyasi yuqorida ko'rsatilgan qiymatga teng bo'lgan bitta gamma-kvant nurlanadi deb hisoblansin. (*Javobi:* 70,6 kJ).

1.5. Aktivligi $14,8 \cdot 10^{10}$ Bk bo'lgan nuqtaviy izotrop radioaktiv manbadan 5 sm uzoqlikda gamma-nurlanishlar intensivligi aniqlansin. Radioaktiv parchalanishning har bir aktida har birining energiyasi 0,51 MeV bo'lgan o'rtacha 1,8 gamma-kvantlar nurlaniladi deb hisoblansin (*Javobi:* 0,6 Vt/m²).

NAZORAT SAVOLLAR

1. Radioaktiv parchalanish tezligini qanday kattalik belgilaydi?
2. Radionuklid aktivligi qanday formula bilan aniqlaniladi?
3. Solishtirma, hajmiy va sirt aktivligiga ta'rif bering. Bu kattaliklar qanday birliklarda o'lchaniladi?
4. Radioaktiv oilalar deb nimaga aytiladi?
5. Qanday vaziyatda asr muvozanati vujudga keladi?

TEST SAVOLLAR

1. Stabil yadroning tinchlikdagi massasi m_{ya} va uni tashkil etgan protonlarning Zm_p hamda neytronlarning Nm_n tinchlikdagi massalari yig'indisi orasidagi munosabat qanday?

- A) $m_{ya} > (Zm_p + Nm_n)$;
- B) $m_{ya} < (Zm_p + Nm_n)$;
- C) $m_{ya} = Zm_p + Nm_n$;
- D) $m_{ya} < (Zm_p + Nm_n) \cdot 100$;

2. Atom yadrolarini qanday guruhlarga ajratish mumkin?

- A) Turg'un va radioaktiv
- B) Zaryadlangan va neytral
- C) Kuchli va kuchsiz
- D) Suyuq va qattiq

3. Geiger-Nettol qonunini ifodalovchi munosabatni ko'rsating.

$$A) \log T_{1/2} = C + \frac{D}{\sqrt{E}}$$

$$B) \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2};$$

$$C) \bar{n} = N\lambda;$$

$$D) \tau = \frac{1}{\lambda};$$

4. Radioaktiv parchalanish qonunini ko'rsating.

- A) $N = 120 \cdot e^{-\lambda t}$
- V) $N = N_0 + A$
- S) $N = N_0 e^{-\lambda t}$
- D) $N = A + SX$

5. Beta parchalanish hodisasida Kulon to'sig'i asosan qanday zarralarga ta'sir qiladi?

- A) pozitron;
- B) elektron;
- C) neytron;
- D) proton

6. Radioaktiv parchalanish yuz berayotgan radioaktiv atomlar

o'rtacha soni quyidagiga teng:

- A) $dN = -\lambda N dt$;
- B) $dN = \lambda N dt$;

$$C) dN = -\lambda N dt;$$

$$D) dN = \lambda N dt$$

7. Ikki yarim parchalanish davri davomida qancha radioaktiv yadrolar parchalanadi?

- A) 50%
- B) 10%
- C) 100%
- D) 75%

8. Alfa-parchalanishda yadrodan nima chiqib ketadi?

- A) Geliy atomining yadrosi
- B) Vodorod atomining yadrosi
- C) Foton
- D) Triton

9. Radioaktiv parchalanishda gamma-kvantlar qanday hosil bo'ladi?

- A) γ – kvant atomning uyg'ongan holatidan asosiy holatiga o'tganda nurlaniladi
- B) γ – kvantlar uyg'ongan atom yadrolar tomonidan nurlaniladi
- C) γ – kvantlar α – zarralarning modda orqali o'tganida hosil bo'ladi
- D) γ – kvantlar β – zarralarning modda orqali o'tganida hosil bo'ladi

10. Radioizotoplar qanday qoida bo'yicha parchalanadi?

- A) Chiziqli
- V) Eksponensial
- S) Kimyoviy.
- D) Biologik.

11. Radioaktivlik qanday jarayon?

- A) Statistik.
- V) Dinamik.
- S) Kinetik
- D) to'g'ri javob yo'q.

12. Radioaktiv preparatlarning aktivligi bu ...

- A) Radioaktiv yadrolarning yarimi parchalanishi uchun ketgan vaqt

B) Parchalanish natijasida chiqqotgan zarralar yig'indi energiyasi

C) Vaqt birligi ichida sodir bo'ladigan parchalanishlar soni

D) Radioaktiv yadrolarning o'rtacha yashash vaqti

13. λN kattalik qanday nomlanadi?

A) Tezlik.

V) Dinamik kattalik

S) Aktivlik.

D) Bosim.

14. 1 Ki (Kyuri) nimaga teng?

A) $3,7 \cdot 10^{10}$ parch./s

V) 10^4 parch./s

S) 2 parch./s

D) $2 \cdot 10^5$ parch./s

15. Ichki konversiya koeffitsenti deb nimaga aytiladi?

A) Elektronlar sonining protonlar soniga nisbatiga

V) Neytronlar sonining elektronlar soniga nisbatiga.

S) Ichki konversion elektronlar sonining gamma-kvantlar soniga nisbatiga

D) Gamma-kvantlar sonining ichki konversion elektronlar soniga nisbatiga aytiladi.

16. Nurlanish jarayonida radioizotoplarining hosil bo'lish va parchalanishini ifodalovchi tenglamaga nima deb aytiladi?

A) Aktivatsiya tenglamasi.

V) Kvadrat tenglama.

S) Sintez tenglamasi.

D) Fotosintez tenglamasi.

17. Qisqa yashovchi radioizotoplar deb, yarim parchalanish davri ... ga teng bo'lgan radioizotoplarga aytiladi?

A) $T_{1/2} > 10^6$ yil

V) $0,01 \text{ min} < T_{1/2} < 10 \text{ min}$.

S) $T_{1/2} < 0,01$ yil.

D) $T_{1/2} > 1$ yil.

18. O'ta qisqa yashovchi radioizotoplar deb yarim parchalanish davri ... ga teng bo'lgan radioizotoplarga aytiladi?

A) $T_{1/2} < 0,01$ min.

V) $10 \text{ min} < T_{1/2} < 1$ kun

S) $T_{1/2} > 1$ yil.

D) $0,01 \text{ min} < T_{1/2} < 10 \text{ min}$.

19. Uzoq yashovchi radioizotoplar deb, yarim parchalanish davri ... ga teng bo'lgan radioizotoplarga aytiladi?

A) $T_{1/2} > 1$ yil.

V) 1 kun $< T_{1/2} < 1$ yil

S) $T_{1/2} > 10^6$ yil.

D) $0,01 \text{ min} < T_{1/2} < 10 \text{ min OK}$.

20. Radioaktiv parchalanish jarayonining asosiy oltita ko'rinishini ko'rsating.

A) α -parchalanish; β -parchalanish; $\alpha\gamma$ -parchalanish; yadro reaksiyasi; neytorn va protonlar parchalanishi.

V) α -parchalanish; β -parchalanish; yadro reaksiyasi; molekulyar parchalanish; λ -parchalanish; atom parchalanish.

S) L, β -parchalanish; elektron parchalanish; izomer hosil bo'lish;

D) α -parchalanish; β -parchalanish; γ -parchalanish; yadro bo'linishi; kechikkan neytron va protonlar.

II BOB. YADRO REAKSIYALARI

Birinchi yadro reaksiyasi 1919 yilda E.Rezerford tomonidan amalga oshirildi. Bu insoniyat tarixida ilk bor sun'iy ravishda yadroni o'zgartirish jarayoni edi. E. Rezerford ko'p asrlar davomida alximiklar amalga oshirishga harakat qilib, amalga oshira olmagan va orzu bo'lib qolgan jarayonni, ya'ni bir moddani ikkinchi bir moddaga o'zgartirishni amalga oshirdi. U tajribada geliy atom yadrosi, ya'ni alfa-zarralar bilan azot atom yadrosini bombardimon qilgan. Ushbu jarayon natijasida vodorod atom yadrosi - proton hosil bo'lgan. Protonlar hosil bo'lganligini birinchi tajribada ssintillyasiya metodi bilan so'ngra Vilson kamerasi yordamida kuzatishgan. Keyinchalik zaryadlangan zarralar tezlatkichlari paydo bo'lishi bilan yadro reaksiyalarning turlar kupayib bordi. Yadro reaksiyalarni o'rganish atom yadrosining strukturasi va xususiyatlarini o'rganishga yordam beradi. Bundan tashqari ushbu ma'lumotlar katta amaliy ahamiyatga ham egadir. Hozirgi kunda yadro reaksiyalari yordamida, fan va texnikada, tibbiyotda keng qo'llanilayotgan radioizotoplar olinmoqda.

Mazkur bobda yadro reaksiyalarining turlari, ularni tavsiflovchi kattaliklar, aktivatsiya tenglamasi, radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo'llanilishi, yadro tibbiyotida qo'llanilayotgan radionuklidlarning sinflarga bo'linishi, kobalt-57 va yod-123 radioizotopining olishda qo'llaniladigan yadro reaksiyalar va metodikalariga batafsil to'htalib o'tiladi.

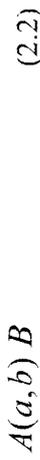
2.1-§. Yadro reaksiyalarining ta'rifi. Asosiy tushunchalar

Yuqori energiyali mikrozzarralar yoki engil yadrolarning yadro bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasida yadro ichki holatining o'zgarishi yoki yangi yadro hosil bo'lish jarayoniga yadro reaksiyasi deyiladi. Yadro bilan o'zaro ta'sirlashayotgan mikrozzarralar turi-ga qarab yadro reaksiyalari bir qancha turlarga bo'linadi: (n,γ), (n,p) (γ,n) (p,n), (α,n) h.k.

Yadro reaksiyalarining eng ko'p tarqalgani bu engil *a* zarra bilan *A* yadro orasidagi o'zaro ta'sirlashishi natijasida *b* zarra va *B* yadro hosil bo'lishidir, ya'ni



yoki qisqacha



Zarralar sifatida neytron (n), proton (p), α-zarra, deytton (d) va γ-kvantni olish mumkin.

Yadro reaksiyalarini xarakterlash uchun quyidagi kattaliklar qo'llaniladi: yadro reaksiya chiqishi (Y) va kesimi (σ), reaksiya energiyasi (Q), ostona energiyasi (E_{th}) va reaksiya natijasida hosil bo'lgan zarralarning energetik va burchak taqsimotlari.

Reaksiya energiyasi Q ifodasini energiya saqlanish qonunidan foydalanib aniqlaymiz. Yuqorida keltirilgan (2.2) reaksiya uchun energiya saqlanish qonunini yozami:

$$E_1 = E_2$$

yoki

$$E_{01} + T_1 = E_{02} + T_2, \quad (2.3)$$

bu yerda E_{01} va E_{02} - mos holda birlamchi va ikkilamchi zarralarning tinchlikdagi energiyasi, T_1 va T_2 esa kinetik energiyasi. Bu kattalik o'z navbatida quyidagilarga teng:

$$E_{01} = M_a c^2 + m_a c^2;$$

$$E_{02} = M_b c^2 + m_b c^2;$$

$$T_1 = T_A + T_a;$$

$$T_2 = T_B + T_a.$$

Umumiy holda $E_{01} = E_{02}$ tenglama bajarilmaydi, chunki tinchlikdagi massasi o'zgaradi. Tinchlikdagi energiyalar farqiga yoki kinetik energiyalar farqiga reaksiya energiyasi deyiladi:

$$Q = E_{01} - E_{02} = T_2 - T_1, \quad (2.4)$$

Agar (2.1) ifodani reaksiyada qatnashgan zarralarning tinchlikdagi massalari orqali ifodalansak:

$$Q = [M_a + M_A - (M_b + M_B)]c^2, \quad (2.5)$$

yoki formulani megageletronvoltlarda yozilsa:

$$Q = (M_a + M_A - M_b - M_B) \cdot 931,5 \text{ MeV}. \quad (2.6)$$

Agar $Q > 0$ bo'lsa, yadro reaksiyasida energiya ajraladi va ekzoenergetik (yoki ekzotermik) reaksiya deyiladi. Agar $Q < 0$ bo'lsa, yadro reaksiyasida energiya yutiladi va endoenergetik (yoki endotermik) reaksiya deyiladi.

Zarraning yadro bilan to'qnashishi natijasida endoenergetik reaksiya yuz berishi mumkin bo'lgan minimal kinetik energiyasiga reaksiya ostonasi deyiladi. Ostona energiyasi bu yadro bilan to'qnashayotgan zarraning yadro reaksiyasini sodir qilishga etarli bo'lgan laboratoriya sanoq sitemasidagi minimal kinetik energiyasidir.

Qo'zg'almas nishonni zarralar oqimi bilan bombardimon qilinsa, ostona va reaksiya energiyalari orasida quyidagicha bog'lanish mavjud bo'ladi:

$$E_{th} = |Q| \frac{M_A}{M_a + M_A},$$

bu yerda M_A va M_a – mos holda nishon yadrosi va u bilan to'qnashayotgan zarra massalari. Agar nishon yadro yuqori energiyali γ -kvantlar bilan nurlantirilsa, ostona energiyasi reaksiya energiyasiga teng bo'ladi, ya'ni $E_{th} = |Q|$.

2.2-§. Yadro reaksiyalarining kesimi va chiqishi

Yadro reaksiyalar kesimi – ikkita o'zaro ta'sirlashuvchi zarralar tizimining ma'lum bir oxirgi holatga o'tish ehtimolligini bildiruvchi kattalik hisoblanadi. Oddiy holda bu kattalik reak-siya yuz berish ehtimolligidir.

Yadro o'zaro ta'sir ehtimolligini zarralar oqimining dasta-si yo'lida joylashgan yadroning effektiv yuzasi orqali aniqlash qabul qilingan. Dasta o'ziga perpendikulyar joylashgan nishon-ning birlik yuzasiga kelib tushayotgan zarralar sonini N_0 orqali belgilaymiz. Ushbu yuzada n ta yadro bo'lsin. U holda o'zaro ta'sirlar soni quyidagi munosabat bilan aniqlanadi:

$$N = N_0 \sigma n \quad (2.8)$$

bu yerda σ - reaksiya to'liq kesimi. Kesim kattaligi yadro geometrik yuzasidan bir necha tartibga farq qiladi.

Agar nishon qalinligi ma'lum bo'lsa, birlik yuzaga mos keluvchi yadrolar sonini hisoblash mumkin:

$$n = \frac{\rho d N_A}{A} \quad (2.9)$$

Bu yerda ρ – nishon moddasining zichligi, d – nishon qalinligi, N_A - Avogadro soni, A – massa soni.

Turli chiqish kanallaridagi reaksiyalar (masalan (p, n) , (p, d) va h.k.) kesimlari parsial kesimlar deyiladi. To'liq kesim, ma'lum bir energiyada yuz berishi mumkin bo'lgan parsial reak-siyalar kesimlarining yig'indisidan iborat bo'ladi:

$$\sigma = \sum \sigma_b$$

$$(2.10)$$

bu yerda σ_b – parsial kesim.

Kesim o'lchov birligi qilib barn qabul qilingan bo'lib, $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ sm}^2$ ga teng.

Qo'yilgan masalaga va tajriba sharoitlariga qarab, integral, differensial va ikki marta differensial kesimlar tushuncha-lari qo'llaniladi.

$a + A \rightarrow b + B$ reaksiya integral kesimi deb quyidagi kattalikka aytiladi:

$$\sigma_{ah} = \frac{dN_b}{nN_0}$$

$$(2.11)$$

bu yerda n – birlik yuzadagi nishon zarralar soni, N_0 – nishonga kelib tushgan a zarralar soni, dN_b – reaksiya mahsuli bo'lgan b zarralar soni.

$a + A \rightarrow b + B$ reaksiya differensial kesimi deb quyidagi katta-likka aytiladi:

$$\frac{d\sigma_{ab}}{d\varepsilon_b} = \frac{1}{nN_0} \frac{dN_b}{d\varepsilon_b}, \quad (2.12)$$

bu yerda n – birlik yuzadagi nishon zarralar soni, N_0 – nishonga kelib tushgan a zarralar soni, $dN_b/d\varepsilon_b$ – energiyasi $\varepsilon_b = (\varepsilon_b + d\varepsilon_b)$ diapazonidagi reaksiya mahsuli bo'lgan b zarralar soni.

$a + A \rightarrow b + B$ reaksiya ikki marta differensial kesimi deb quyidagi kattalikka aytiladi:

$$\frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega d\varepsilon_b} = \frac{1}{nN_0} \frac{dN_b}{d\Omega d\varepsilon_b}$$

bu yerda n – birlik yuzadagi nishon zarralar soni, N_0 – nishonga kelib tushgan a zarralar soni, $dN_b/d\Omega d\varepsilon_b$ – energiyasi $\varepsilon_b = (\varepsilon_b + d\varepsilon_b)$ diapazonidagi va θ qutb, φ azimutal burchaklar bilan xarakterlanuvchi $d\Omega$ fazoviy burchak ichiga uchib kirgan reaksiya mahsuli bo'lgan b zarralar soni.

Yadro reaksiyasini tavsiflovchi yana bir muhim kattaliklardan biri bu reaksiya chiqishi hisoblanadi. Reaksiya chiqishi deb yuz bergan reaksiyalar sonining birlik yuzaga kelib tushgan zarralar soniga nisbatiga aytiladi. Ayrim hollarda yadro o'zgarishlarida ishtirok etayotgan zarralar sonining nishonga kelib tushayotgan zarralar soniga nisbatiga ham reaksiya chiqishi deyiladi:

$$Y = \frac{N_{sp}}{N_0}, \quad (2.14)$$

bu yerda Y – reaksiya chiqishi; N_{var} – yadro o'zgarishlarida ishtirok etayotgan zarralar soni; N_0 – nishonga kelib tushayotgan zarralar soni. Tajribalarda asosan reaksiya chiqishlari o'lchaniladi. Bu ma'lumotlar asosida reaksiya kesimi aniqlaniladi.

Umumiy holda reaksiya chiqishi, nishonda sodir bo'lgan yadro o'zaro ta'sirlar sonining nishonga kelib tushayotgan zarralar oqimiga nisbati ko'rinishda ham ifodalanadi, ya'ni:

$$Y = \frac{N}{\Phi}, \quad (2.15)$$

bu yerda N – nishonda sodir bo'lgan yadro o'zaro ta'sirlar soni; Φ – zarralar oqimi, zarra/(sm²·s).

Yadro reaksiyasi chiqishi bilan kesimi orasidagi munosabatni aniqlaymiz. Buning uchun yadro reaksiyasi tezligi

tushunchasidan foydalanamiz. Reaksiya tezligi bu berilgan nurlanish sharoitida zarralar oqimi, reaksiya kesimi va boshlang'ich yadrolar soni bilan quyidagicha bog'langan:

$$\frac{dN_b}{dt} = \Phi \sigma N_A, \quad (2.16)$$

bu yerda N_B – reaksiya mahsulotining atomlar soni; N_A – boshlang'ich atomlar soni. Ushbu holda reaksiya chiqishi:

$$Y = \frac{dN/dt}{\Phi} = \sigma N_A. \quad (2.17)$$

Bu formula monoenergetik nurlanishlar uchun o'rinlidir. Agar nishonga kelib tushayotgan zarralar yoki nurlanishlar energiyasi monoenergetik bo'lmasa, ya'ni nurlanish spektri uzluksiz bo'lsa, reaksiya chiqishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$Y = N_A \int_0^{E_{max}} \Phi_0(E) \sigma(E) dE, \quad (2.18)$$

bu yerda $\Phi_0(E)$ – nurlanish spektri, $\sigma(E)$ – reaksiya uyg'unish funksiyasi, ya'ni reaksiya kesimining zarra energiyasiga bog'lanishi.

Reaksiya chiqishini aniqlashda laboratoriyada qo'llanilayotgan qo'rilma va o'lchash asboblari parametrlari, o'lchash geometriyasi va h.k. e'tiborga olinadi.

2.3-§. Fotoyadro reaksiyalari

Fotoyadro reaksiyasi deb yuqori energiyali gamma-kvantlarning yadro bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida yadrodan *proton*, *neytron*, *deytron* va boshqa zarralarning chiqib ketish jarayonlariga aytiladi. *Fotoyadro reaksiyasini yadro fotoeffekti* deb ham aytiladi. Fotoyadro reaksiyasini umumiy ko'rinishda quyidagicha yozish mumkin

$$\gamma + A \rightarrow B + b \quad (2.19)$$

yoki quyidagi ko'rinishda ham yozish mumkin:

$$A(\gamma, b)B. \quad (2.20)$$

Yadrodan chiqiyotgan zarralar turiga qarab fotoyadro reaksiyalari quyidagi turlarga bo'linadi: (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$, (γ, d) , (γ, α) va h.k. Hozirgi kunda eng yaxshi o'rganilgan reaksiyalar: (γ, n) va (γ, p) . Bu reaksiyalar endotermik bo'lgani uchun ushbu

reaksiya yuz berishi uchun, γ -kvantlarning energiyasi ushbu zarrani yadrodan ajratish uchun zarur bo'lgan energiyadan katta bo'lishi kerak, ya'ni

$$E_\gamma > \varepsilon_n(\varepsilon_p, \varepsilon_\alpha) \quad (2.21)$$

Yadro fotoeffekti birinchi marta 1934 - yilda Chedvik (James Chadwick) va Goldxaberlar (Maurice Goldhaber) tomonidan deytronni fotoparchalanish misolida kuzatildi:



Tajribada ${}^{208}_{81}Tl$ radionuklididan chiqayotgan energiyasi $E_\gamma = 2.62 \text{ MeV}$ ga teng bo'lgan gamma-kvantlardan foydalanilgan. Keyinchalik tabiiy radioaktiv elementlar gamma-kvantlari ta'sirida bo'ladi-gan yana bir fotoyadro reaksiyasi kuzatildi.



Ushbu reaksiya bilan tabiiy radioaktiv elementlarning gamma-kvantlari ta'sirida yuz beradigan fotoyadro reaksiyalarining ro'yxati cheklanadi. Boshqa hamma yadrolarda nuklonning ajralish energiyasi radioaktiv yadrolar chiqarayotgan gamma-kvantlarining energiyasidan katta bo'lganligi sababli fotoyadro reaksiyasi yuz bermaydi.

Yuqori energiyali gamma-kvantlarni olish imkoniyati faqat elektron tezlatkichlari yaratgandan keyingina paydo bo'ldi. Elektron tezlatkichlarda (betatron, mikrotron va chiziqli elektron tezlatgich) yuqori energiyali gamma-kvantlarni rentgen trubkasida tormozli rentgen nurlar hosil qilishiga o'xshash vaziyatda hosil qilinadi, ya'ni yuqori energiyagacha tezlatilgan monoxromatik elektronlar Z katta bo'lgan elementdan (W, Pb) tayyorlangan nishonga kelib tushadilar va unda tormozlanadilar. Natijada tormozli gamma-nurlar hosil bo'lib, ularning spektri uzluksizdir. Tormozli gamma-nurlanishlar maksimal energiyasi tormozlanayotgan elektronlarning kinetik energiyasiga teng bo'lib, intensivligi esa energiyaga teskari proporsional ravishda kamayadi. Shunday qilib, elektronlarning tormozlanishi natijasida

berilgan maksimal energiyali uzluksiz gamma-kvantlar spektrini olish mumkin ekan.

2.4-§. Neytronlar ishtirokidagi yadro reaksiyalari

Yadroga kelib tushayotgan neytron energiyasiga bog'liq holda har xil turdagi yadro reaksiyalari sodir bo'lishi mumkin. Neytronlarni energiyasiga qarab turli guruhlariga ajratish mumkin. Bu guruhlar 2.1-jadvalda keltirilgan.

2.1-jadval
Neytronlarni energiya bo'yicha guruhlash

Guruhlar	Neytron energiyasi
Sovuq neytronlar	$E_n \leq 0,005 \text{ eV}$
Iссиq neytronlar	$0,005 \text{ eV} \leq E_n \leq 0,1 \text{ eV}$
Sekin neytronlar:	$0,1 \text{ eV} \leq E_n \leq 1000 \text{ eV}$
Oraliq neytronlar	$1 \text{ keV} \leq E_n \leq 500 \text{ keV}$
Tez neytronlar	$0,5 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$
O'ta tez neytronlar	$E_n > 50 \text{ MeV}$

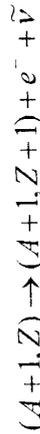
Bu reaksiyalar bilan tanishib o'tamiz. Neytronlar ishtirokidagi reaksiyalar turlari neytronlar energiyasiga bog'liq bo'ladi.

Neytronlarning radiatsion qamrashi

Neytronlar ta'siri ostida yuz beradigan yadro reaksiyalari ichidagi eng ko'p tarqalgani bu radiatsion qamrash reaksiyasi, ya'ni (n, γ)



Bu reaksiya natijasida β^- -radioaktiv $(A+1, Z)$ yadro hosil bo'ladigan va u quyidagi sxema bo'yicha parchalanadi:



Yadro reaksiyalarida neytron yutilishi va undan keyin γ -kvant chiqishi bilan yuz bergani uchun bu reaksiyalar (n, γ) ko'rinishdagi radiatsion qamrash reaksiyasi deyiladi. Radiatsion qamrash reaksiyasi katta ehtimollik bilan energiyasi $0-500 \text{ keV}$ gacha bo'lgan sekin

neytronlar ta'siri ostida yuz beradi. Shuning uchun ham ushbu reaksiya neytronlarni detektirlash uchun keng qo'llaniladi.

Radiatsion qamrash reaksiyasiga misol qilib, energiyasi 1,46 eV bo'lgan neytron-larning indiy yadrosi tomonidan qamrab olishi jarayonini keltirish mumkin:



Bu jarayon natijasida hosil bo'lgan ${}^{116}_{49}\text{In}$ radioaktiv izotopning yarim parchalanish davri $T_{1/2} = 54$ min va u quyidagi sxema bo'yicha parchalanadi:



Protonlar hosil bo'lishi bilan yuz beradigan reaksiyalar.

Energiyasi $T_n \approx 0,5 \div 10$ MeV bo'lgan neytronlar ishtirokida ko'pincha (n,p) turdagi reaksiya yuz beradi:



Odatda (n,p) turdagi reaksiya energiya yutilishi bilan yuz beradi, ya'ni $Q > 0$, agar $Q < 0$ bo'lsa, u holda $|Q| \approx 1$ MeV. Bunda reaksiya natijasida hosil bo'ladigan protonlar Kulon to'sig'ini engib, yadrodan chiqib ketishi uchun neytronlar etarlicha katta energiyaga ega bo'lishi lozim.

(n,p) turdagi reaksiyaga misol qilib ostona energiyasiga ega bo'lgan quyidagi reaksiyani keltirish mumkin:



bu reaksiya energiyasi $Q \approx -0,92$ MeV ga teng.

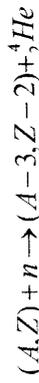
Hatto issiqlik neytronlari ta'siri ostida yuz beradigan reaksiyalar ham mavjud bo'lib, bunga misol qilib quyidagini keltirish mumkin:



bu reaksiya energiyasi $Q \approx 0,6$ MeV ga teng bo'lib, u engil yadrolarda yuz beradi. Bunga sabab, ushbu yadrolarda hosil bo'lgan protonlar uchun Kulon to'sig'ining uncha katta bo'lmasiligidir.

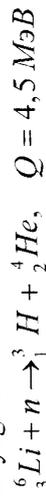
Alfa-zarralar hosil bo'lishi bilan yuz beradigan reaksiyalar.

Yadro fizikasida (n,α) turdagi reaksiyalar keng qo'llaniladi:



(n,α) turdagi reaksiyalarning samarali kechishi uchun energiyalari **0,5** dan **10 MeV** oraliqda bo'lgan neytronlar zarur bo'ladi. Ammo ayrim hollarda ushbu reaksiya katta ehtimollik bilan sekin neytronlarda ham yuz beradi.

Bunday reaksiyaga misollar:

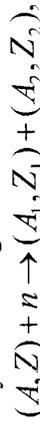


Endoenergetik reaksiyalarga misol qilib quyidagi (n,α) turdagi reaksiyani keltirish mumkin:



Bo'linish reaksiyasi.

Og'ir yadrolarni ya'ni transuran elementlarni (${}_{90}\text{Th}$, ${}_{91}\text{Pa}$, ${}_{92}\text{U}$), energisi $T_n > 1$ MeV bo'lgan tez neytronlar bilan (uranning ayrim izotoplarida va transuran elementlarda hatto issiqlik neytronlarida sodir bo'ladi) nurlantirilganda o'rtacha massalar nisbati 2/3 nisbatni qanoatlayuvchi ikkita yadro bo'lagi hosil bo'ladi:



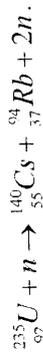
bu yerda

$$A_1 + A_2 = A + 1; \quad Z_1 + Z_2 = Z;$$

$$\bar{A}_1 : \bar{A}_2 \approx 2 : 3.$$

Bunday turdagi reaksiyalarni bo'linish reaksiyasi deyiladi va (n,f) ko'rinishda yoziladi. Bo'linish reaksiyalari yadro energiyasini olishda keng qo'llaniladi. Bunday reaksiyaga misol sifatida issiq

neytronlar ta'sirida uran-235 yadrosining bo'linishini keltirish mumkin:



Ikki va undan ortiq nuklonlar hosil bo'luvchi reaksiyalar.

Energiyasi $T_n > 10 \text{ MeV}$ bo'lgan neytronlar ta'siri ostida porogli detektorlar sifatida keng qo'llaniladigan $(n, 2n)$, (n, pn) , $(n, 3n)$ va boshqa turdagi reaksiyalar sodir bo'ladi. Bu reaksiyalarga misol qilib quyidagi reaksiyalarni keltirish mumkin:



Bu reaksiyalarining ostona energiyalari mos holda **20** va **10 MeV**.

$(n, 2n)$ turdagi reaksiyalarning ostona energiyalari kattaligi, bitta neytronga nisbatan ikkita neytronni yadrodan chiqarish uchun katta energiya sarflashidadir. Mazkur turdagi yadro reaksiyalari neytron aktivatsion tahlilda ham keng qo'llaniladi.

Neytronlarning noelastik sochilishi. Energiyasi bir necha yuz kiloelektronvolt bo'lgan neytronlar yadroga tushgandan keyin uni uyg'ongan holatga o'tkazishi va keyin undan yana kamroq energiya bilan chiqib ketishi mumkin. Bu yerda kelib tushgan neytron chiqib ketishi shart emas, balki boshqa bir neytron ham chiqib ketishi mumkin. Bunday jarayon neytronlarning noelastik sochilishi deyiladi. Neytronlarning noelastik sochilish jarayoni, ya'ni (n, n') og'ir yadrolarda neytronlar kinetik energiyasi $T_n > 0,6 \text{ MeV}$ bo'lganda, engil yadrolarda esa $T_n > 1 \text{ MeV}$ energiyalarda sodir bo'ladi.

Neytronlarning noelastik sochilish kesimi atom nomeriga va neytronlar energiyasiga bog'liq bo'ladi. Engil yadrolardan og'ir yadrolar sohasiga o'tganda va neytronlar energiyasi oshganda reaksiya kesimi ham oshadi. Bunda noelastik sochilish kesimining qiymati keskin o'zgarib, ya'ni 0,6-3 barn chegarasida o'zgaradi.

Neytronlarning elastik sochilishi. Biz to'xtalmoqchi bo'lgan oxirgi jarayon bu neytronlarning elastik sochilishidir. Ma'lumki

elastik sochilish natijasida yadro oldingi holatida qoladi. Neytron esa inersiya markazidagi sanoq sistemaga nisbatan boshlang'ich kinetik energiyasini saqlaydi (laboratoriya sanoq sistemasiga nisbatan esa neytron va yadroning yig'indi kinetik energiyasi saqlanadi). Ushbu turdagi reaksiyalar amaliy yadro fizikasida keng qo'llaniladi.

2.5-§. Aktivatsiya tenglamasi

Aktivatsiya deb, turg'un yadrolarni neytronlar, gamma-kvantlar, protonlar yoki boshqa zarralar bilan nurlantirganda yuz beradigan yadro reaksiyasi natijasida radioaktiv moddalar hosil bo'lishiga aytiladi. Aktivatsion tahlil metodida asosan radioaktiv yadrolar hosil bo'ladigan hol ko'riladi. Aktivatsion tahlil metodining eng muhim tenglamalaridan biri bu aktivatsiya tenglamasidir. Bu yerda biz ushbu tenglama bilan tanishib chiqamiz.

Berilgan sharoitda $A(a, b)B$ yadro reaksiyasining tezligi (2.16) munosabat orqali aniqlanadi. Agar reaksiya natijasida hosil bo'lgan mahsulot radioaktiv va uning parchalanish doimiysi λ bo'lsa, u holda radioaktiv yadrolarning to'planish (yig'ilish) tezligi ikkita jarayon orqali aniqlanadi: yadro o'zaro ta'sir natijasida radioizotoplar hosil bo'lish tezligi va radioaktiv parchalanish natijasida ularning kamayish tezliklari:

$$\frac{dN_B}{dt} = \Phi \sigma N_A - \lambda N \quad (2.24)$$

Ma'lum bir t_0 nurlanish vaqti davomida to'plangan (hosil bo'lgan) B radioizotop atomlarining miqdorini (soni) (2.24) tenglama-integrallash orqali topish mumkin. Nurlanish jarayonida F , σ va N_A kattaliklar o'zgarib, deb faraz qilamiz. Bunda aktivatsiya qiluvchi nurlanish oqim zichligi F nurlanish vaqtida o'zgarib, namunaning ixtiyoriy nuqtasida bir xil bo'ladi. Shuningdek, aktivatsiya qiluvchi nurlanish energiyasi va nurlanayotgan izotopning soni kamayib degani. Mazkur sharoitda (2.24) tenglamani integrallab, quyidagi ifodaga kelamiz:

$$N_B = \frac{\Phi \sigma N_A}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_n}), \quad (2.17)$$

Bu yerda t_n — nurlanish vaqti.

Nurlanish tugagandan keyin ma'lum bir t_u vaqt davomida (o'lchash vaqti) parchalanishlar soni o'lchanadi. Bu o'lchash vaqtini hisobga olinsa (2.17) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$N_B = \frac{\Phi \sigma N_A}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_n}). \quad (2.18)$$

Bu tenglama monoizotop element uchun o'rinli bo'ladi. Agar element ko'pizotopli bo'lsa, u holda tenglama quyidagi ko'rinishni oladi:

$$N_B = \frac{\Phi \sigma N_A \theta}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_n}) (1 - e^{-\lambda t_u}). \quad (2.19)$$

bu yerda N_e — element atomlarining boshlang'ich soni; θ — aktivatsiya qilinayotgan izotopning tabiiy izotoplar aralashmasidagi ulushi.

Ushbu (2.19) tenglama nurlanish tugagan momentdagi parchalanishlar sonini beradi. Agar o'lchash ma'lum bir t_p vaqt o'tgandan keyin (pauza vaqti) amalga oshirilsa, unda mazkur vaqt oralig'ida radioizotop parchala-nishini hisobga olish lozim, ya'ni:

$$N_B = \frac{\Phi \sigma N_A \theta}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_n}) (1 - e^{-\lambda t_p}). \quad (2.20)$$

Agar induksiyalangan (reaksiya natijasida hosil qilingan) aktivlikni o'lchash γ -spektrometrdan bajarilsa, u holda parchalanishlar soni fotocho'qqi yuzasi bilan yoki cho'qqidagi impulslar soni bilan aniqlanadi:

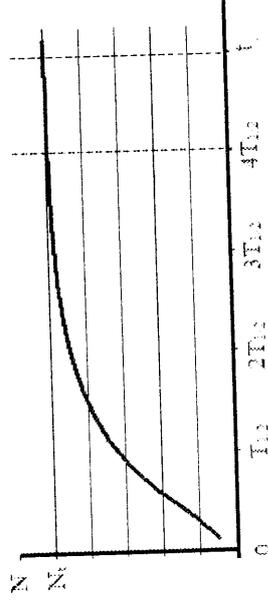
$$N_d = \frac{N_{\Sigma}}{\varepsilon I_{\gamma}}, \quad (2.21)$$

bu yerda N_{Σ} — fotocho'qqidagi impulslar soni; ε — spektrometriming effektivligi; I_{γ} — γ -kvant intensivligi. Yuqoridagi (2.20) va (2.21) tenglamalardan quyidagini olamiz:

$$N_{\Sigma} = \frac{\Phi \sigma N_A \theta \varepsilon I_{\gamma}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_n}) (1 - e^{-\lambda t_p}). \quad (2.22)$$

Endi (2.17) tenglamani tahlil qilamiz. Bu yerdan ko'rinadiki, nurlanish vaqti oshishi bilan hosil bo'lgan radioaktiv yadrolar (yoki radioizotoplar) soni oshib boradi va ma'lum bir vaqtdan keyin egri chizik to'yinishga (platoga) chiqadi. Bunda $dN_B/dt = 0$ va $N_B = \Phi \sigma N_A / \lambda$ bo'ladi. To'yinish yuz berganda nurlanish natijasida hosil bo'layotgan yadrolar soni parchalanayotgan yadrolar soniga tenglashib qoladi. Mazkur hol uchun (2.17) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$N_B = N_A (1 - e^{-\lambda t_n}).$$



2.1-rasm. Aktivatsiya egri chiziqi

To'yinishga $t \approx (4 \div 5) T_{1/2}$ vaqt ichida erishiladi. Kichik t vaqtlarda $N(t)$ bog'lanish chiziqi xarakterga ega bo'ladi (2.1-rasm).

2.6-§. Yadro xususiyati va yadro reaksiyalar bo'yicha ma'lumotlar markazlari

Hozirgi kunda jahonda juda ko'p yadroviy ma'lumot markazlari faoliyat ko'rsatib kelmoqda. Xalqaro yadroviy ma'lumot markazlar tarmoqlari o'z ichiga Avstriya, Vengriya, Xitoy, Rossiya, AQSh, Ukraina, Fransiya, Yaponiya davlatlaridagi tashkilotlarni o'z ichiga oladi. Rossiyaning o'zida beshta yadro ma'lumot markazlari mavjud. Bular ichida bizning mavzuga bevosita aloqasi bo'lgan tashkilot bu

Fotoyadro tajribalar ma'lumotlar markazi (Sentr dannyx fotoyadernyx eksperimentov (SDFE) NIYaF MGU) hisoblanadi. Ushbu markazda yadro reaksiyalari va yadro ma'lumotlariga taluqli hamma ma'lumotlar jamlangan. Bundan tashqari bu markaz orqali boshqa markazlarga chiqish mumkin. Ushbu markazlarning asosiy maqsadi zamonaviy kompyuter texnologiyalaridan foydalangan holda jahonning istalgan nuqtasida joylashgan va internet tizimiga ulangan ilmiy markazlarni eng oxirgi ma'lumotlar bilan ta'minlab turishdan iborat. Gamma-aktivatsion tahlil uchun mo'ljallangan ma'lumotlar markazi bir nechta bo'lib, bular ichida eng ko'p ma'lumotlar bazasiga ega bo'lgani **Rossiyaning Rostov-Don** shahridagi *Rostov davlat universiteti Fizika ilmiy tekshirish institutining* ma'lumotlar markazi hisoblanadi.

Halqaro yadro ma'lumotlar markazlarning saytlari:

1. <http://cdfc.sinp.msu.ru/index.ru.html>
2. <http://www.nds.iaea.org>
3. <http://www.ippe.obninsk.ru/podr/cjd/>
4. <ftp://bnlnd2.dne.bnl.gov>
5. <http://www.nndc.bnl.gov>

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{Be} + {}^4_2\text{He}$ yadro reaksiyasi qanday reaksiya, ya'ni ekzotermikmi yoki endotermikmi ekanligini aniqlang. Yadro reaksiya energiyasi aniqlansin.

Yechilishi: Yadro reaksiya energiyasi quyidagi ifoda bilan aniqlaniladi:

$$Q = c^2 \left(\sum m_i - \sum m_f \right) \quad (1)$$

bu yerda m_i va m_f - mos holda reaksiya boshidagi va oxiridagi zarralarning tinchlikdagi massalarining yig'indisi. Mazkur holda bu tenglama quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$Q = (m_{Li} + m_H - m_{Be} - m_n) c^2 \quad (2)$$

Bu formulaga masala shartidagi va jadvallardagi qiymatlarni qo'yib, hisoblashlarni bajaramiz:

$$m_{Li} = 11,65079 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad m_H = 1,6736 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{Be} = 11,65231 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$Q = -1,64 \text{ MeV}$. Demak yadro reaksiyasi endoter ik reaksiya ekan.

Javob: $Q = -1,64 \text{ MeV}$.

2-masala. Tinch turgan bor yadrosi bilan o'ta sekin neytronlarning o'zaro ta'siri natijasida yuz beradigan quyidagi ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ yadro reaksiyasining Q energiyasi aniqlansin.

Yechilishi: ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ yadro reaksiyasi quyidagi mexanizm bo'yicha yuz beradi, ya'ni bor ${}^{10}_5\text{B}$ yadrosi sekin ${}_0^1\text{n}$ neytronlarni yutadi (ya'ni o'ziga qo'shib oladi) va oraliq ${}^{11}_5\text{B}$ yadroga aylanadi. Ushbu yadro kuchli qo'zg'algan (uyg'ongan) holatda bo'lgani uchun, o'zidan α -zarralar (${}^4_2\text{He}$) chiqaradi va litiy ${}^7_3\text{Li}$ yadrosiga aylanadi. Ushbu reaksiya jarayonini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:



Reaksiya Q energiyasini quyidagi ifoda bilan topamiz:

$$Q = (m_{Be} + m_n - m_{Li} - m_{He}) c^2$$

Javob: $E_{\text{cm}}(\gamma, p) = |Q| = 15,96 \text{ MeV}$, $E_{\text{cm}}(\gamma, n) = |Q| = 18,72 \text{ MeV}$.

4-masala. Massasi M bo'lgan yadroning $h\omega$ energiyali γ -kvantni yutishi natijasida olgan uyg'onish energiyasini toping.

Yechilishi: Mazkur jarayon uchun energiya va impulsning saqlanish qonunlarini yozamiz:

$$\begin{cases} Mc^2 + h\omega = Mc^2 + E_{\gamma} + E^* \\ \frac{h\omega}{c} = p \end{cases}$$

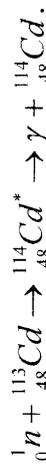
bu yerda E_{γ} -yadroning tepki energiyasi, E^* -uyg'onish energiyasi. Bu tenglamalardan γ -kvantni yutishi natijasida olgan uyg'onish energiyasini topamiz:

$$E_{\gamma} = \frac{p^2}{2M} = \frac{(h\omega)^2}{2Mc^2}, \quad E^* = h\omega \left(1 - \frac{h\omega}{2Mc^2}\right)$$

Javob: $E^* = h\omega \left(1 - \frac{h\omega}{2Mc^2}\right)$

5-masala. Yupqa plastika ko'rinishidagi ^{113}Cd nishonn oqim zichligi $1,0 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$ bo'lgan issiqlik neytronlar bilan nurlantirilgan. Agar nurlanishning 6%-sutkasiidan keyin ^{113}Cd nuklidi miqdori 1% kamaysa, (n, γ) reaksiya kesimi topilsin.

Yechilishi: Reaksiya sxemasini yozamiz:



Birlik vaqt davomida moddaning birlik hajmida yuz beradigan reaksiyalar soni quyidagiga teng bo'ladi:

$$Y = n\sigma\Phi$$

dt vaqt oralig'ida nishon yadrolar konsentratsiyasi quyidagicha o'zgaradi:

$$dn = -Ydt = -n\sigma\Phi dt$$

Ushbu tenglamani $n(t=0) = n_0$ boshlang'ich shartni hisobga olib echil-sa, uning echimi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$n(t) = n_0 \cdot \exp(-\sigma\Phi t)$$

Bu formula asosida quyidagi ifodani olamiz:

$$\frac{n_0 - n(t)}{n_0} = 0,01 = 1 - \exp(-\sigma\Phi t)$$

Bu tenglamadan (n, γ) reaksiya kesimi topiladi:

$$\sigma = \frac{\ln 0,99}{\Phi \cdot t} = \frac{0,01}{1 \cdot 10^{12} \cdot 6 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,9 \cdot 10^{-20} \text{ sm}^2 = 2 \cdot 10^4 \text{ barn}$$

Javob: $2 \cdot 10^4$ barn.

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

2.1. Quyidagi reaksiyaning ostona energiyasi topilsin:



2.2. Quyidagi reaksiyaning ostona energiyasi topilsin:



2.3. Deyteriy va tritiyning termoyadroviy birikish reak-siyasida qancha energiya ajraladi? (*Javob:* $Q = 17,6 \text{ MeV}$)

2.4. Issiqlik neytronlari dastasi bo'shliqda 10 m masofani o't-ganda dastaning intensivligi qanchaga o'zgaradi? (*Javob:* $[N_0 - N(t)] / N_0 \approx 5 \cdot 10^{-6}$)

2.5. $\gamma + ^{14}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C} + n + n$ fotoyadro reaksiyaning ostona energiya-sini toping. (*Javob:* $E_{\text{cm}}(\gamma, 2n) = 18,2 \text{ MeV}$)

2.6. Lity-7 yadrosi sekini neytronni qamrab oladi va γ -kvant chiqaradi. Gamma-kvant energiyasi nimaga teng? (*Javob:* $E_{\gamma} = 2,034 \text{ MeV}$).

2.7. Massasi 0,20 g bo'lgan oltin folgani 6,0 soat davomida issiqlik neytronlari bilan nurlantirilgan. Neytronlar folga sirtiga normal tushmoqda. Nurlanish tamom bo'lgandan keyin 12 soat o'tgandan keyin folga aktivligi o'chhanganda uning aktivligi $1,9 \cdot 10^7 \text{ Bk}$ teng bo'lgan. Agar radioaktiv izotop yadrolarining hosil bo'lish effektiv kesimi 96 barn va yarim parchalanish davri 2,7 sut bo'lsa, neytronlarning oqim zichligini aniqlang.

(*Javob:* $J = Ae^{\lambda t} / \sigma N_0 (1 - e^{-\lambda t}) = 6 \cdot 10^9 \text{ zarra} / (\text{sm}^2 \cdot \text{s})$, bu yerda N_0 - oltin yadrolarining soni).

NAZORAT SAVOLLAR

1. Reaksiya kanali deb nimaga aytiladi?
2. Yadro reaksiyalarida qanday saqlanish qonunlari bajariladi?
3. Qanday reaksiyalar ostona energiyasiga ega bo'ladilar?
4. Yadro reaksiyalarini o'rganishning fundamental va amaliy ahamiyatini tushuntiring.
5. Neytronlar energiyalari bo'yicha qanday guruhlarga bo'linadi?
6. Yuqori energiyali fotonlar ta'sirida qanday yadro reaksiyasi sodir bo'ladi?

TEST SAVOLLAR

1. *Yadro reaksiyasi nima?*
A) Elementar zarralarning yadro bilan o'zaro ta'siri.
V) Molekulalarning yadro bilan o'zaro ta'siri.
S) Ionlarning modda bilan o'zaro ta'siri.
D) Elektronlarning modda bilan o'zaro ta'siri.
2. *Energiya ajralishi bilan yuz beradigan yadro reaksiyasiga ...reaksiya deb ataladi?*
A) Ostona
V) Endotermik.
S) Fotosintez.
D) Ekzotermik
3. *Energiya yutilishi bilan yuz beradigan yadro reaksiyasiga ... reaksiya deb ataladi?*
A) Endotermik. V) Fotosintez. S) Ekzotermik D) Ostona
4. *Yadro reaksiyasining kesimi deb nimaga aytiladi?*
A) Reaksiya ostona energiyasiga
V) Reaksiya yuz berish ehtimolligiga.
S) Reaksiya chiqishiga.
D) Reaksiya turiga.
5. *Yadro reaksiyasining chiqishi deb ... aytiladi?*
A) Hosil bo'lgan yadrolar soniga.
V) Reaksiya ostona energiyasiga.
S) Yadro tartibiga.
D) Reaksiya yuz berish ehtimolligiga
6. *Yadro reaksiyasi kesimining o'lchov birligi nima?*
A) Barn
V) Joul
S) sm^3
D) Bekkerel
7. *(γ, n) turdagi, ya'ni yadrodan neytron chiqib ketadigan fotoyadro reaksiyasida qanday yadro hosil bo'ladi?*
A) Neytronlar soni oshgan
V) Neytrondefitsit
S) Alfa radioaktiv
D) To'g'ri javob yo'q
8. *Issiqlik neytronlar deb energiyasi ... oraliqda bo'lgan neytronlarga aytiladi.*

- A) $E_{\pi} > 50 \text{ MeV}$
 V) $0,5 \text{ MeV} \leq E_{\pi} \leq 50 \text{ MeV}$
 S) $2 \text{ MeV} \leq E_{\pi} \leq 5 \text{ MeV}$
 D) $0,005 \text{ eV} \leq E_{\pi} \leq 0,4 \text{ eV}$

9. $\gamma + {}_{49}^{113}\text{In} \rightarrow x + 2n$ fotoyadro reaksiyasi natijasida qanday "x" yadro hosil bo'ladi?

- A) ${}_{111}^{111}\text{In}$
 V) ${}_{113}^{113}\text{Te}$
 S) ${}_{57}^{57}\text{Co}$
 D) ${}_{56}^{56}\text{So}$

10. Quyidagi yadro reaksiyasi natijasida qanday yadro hosil bo'ladi?



- A) ${}_{15}^{32}\text{P}$ V) ${}_{16}^{32}\text{S}$ S) ${}_{17}^{17}\text{Ce}$ D) ${}_{8}^{16}\text{O}$

11. Qanday yadro reaksiyalari ostona energiyaga ega bo'ladi?

- A) Kinetik.
 V) Endotermik.
 S) Endotermik.
 D) Termodinamik.

12. Yadro reaksiyalarining oraliq yadro modeli kim tomonidan taklif etilgan?

- A) E. Rezerford
 V) I. Kurchatov
 S) N. Bor
 D) Maks Plank

13. $a + A \rightarrow C^* \rightarrow B + b$ reaksiya qanday reaksiya mexanizmi bo'yicha yuz bermoqda?

- A) Oraliq yadro mexanizmi;
 B) To'g'ri yadro reaksiya mexani
 C) Termoyadro reaksiyasi mexanizmi;
 D) Fotoyadro reaksiyasi mexanizmi.

14. $\alpha + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow ? + p$ reaksiya natijasida hosil bo'lgan yadroni ko'rsating.

- A) Azot-17; B) Kislorod-17; C) Uran-27; D) Vodород-3.

15. $p + {}_3^7\text{Li} \rightarrow p + {}_3^7\text{Li}$ reaksiyada qanday jarayon yuz berdi?

- A) Elastik sochilish;
 B) Noelastik sochilish;
 C) Yutilish;
 D) Bo'linish.

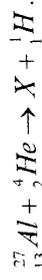
16. Fotoyadro reaksiyasi deb ... yadro bilan o'zaro ta'sirlashish jarayoniga aytiladi.

- A) Past energiyali neytronlarning
 B) Past energiyali protonlarning
 C) Yuqori energiyali elektronlarning;
 D) Yuqori energiyali γ -kvantlarning

17. Nils Bor qanday yadro reaksiya mexanizmini taklif qilgan?

- A) Kompaund yadro hosil bo'lish mexanizmi;
 B) To'g'ri reaksiya mexanizmi;
 C) Uzish reaksiyasi;
 D) Fotoyadro reaksiyasi.

18. Quyidagi yadro reaksiyasi natijasida qanday yadro hosil bo'ladi?



- A) ${}_{11}^{23}\text{Na}$
 V) ${}_{14}^{30}\text{Si}$
 S) ${}_{7}^{14}\text{N}$
 D) ${}_{15}^{31}\text{P}$

19. ${}_{14}^{14}\text{N}$ yadroda (n,p) reaksiya natijasida qanday yadro hosil bo'ladi?

- A) ${}_{14}^{14}\text{C}$
 B) ${}_{13}^{13}\text{C}$
 C) ${}_{14}^{14}\text{N}$
 D) ${}_{15}^{15}\text{N}$

20. Issiq neytronlar ta'siri ostida yuz beradigan reaksiyani ko'rsating

- A) (n, 2n)
 B) (n, 3n)
 C) (n, γ)
 D) (n, p)

III BOB. YADRO NURLANISHLARINING MODDA BILAN O'ZARO TA'SIRI

Yadro nurlanishlari yoki aksariyat hollarda ionlovchi nurlanishlar deb nomlangan nurlanishlar radioaktiv moddalarda sodir bo'ladigan radioaktiv parchalanishlar, og'ir yadro atomlarining bo'linishi, yadro reaksiyalari natijasida hosil bo'ladi. Yadro nurlanishlari quyidagi turlarga bo'linadi: zaryadlangan zarralar oqimi (elektron, pozitron, protonlar, myuonlar, alfa zarralar va h.k.), qisqa to'liqli elektromagnit nurlanishlar (rentgen nurlanishlar, gamma-nurlanishlar) va zaryadlanmagan zarralar oqimi (neytronlar). Ionlovchi nurlanishlar manbalari ham o'z navbatida ikkiga bo'linadi, ya'ni tabiiy va sun'iy manbalar. Tabiiy manbalarga tabiiy radioaktiv moddalarda sodir bo'ladigan radioaktivlik, Quyoshda sodir bo'layotgan termoyadro reaksiyasi, kosmik nurlar. Sun'iy manbalarga sun'iy radionuklidlar, yadro reaktorlari, zaryadlangan zarralar tezlatkichlari, rentgen trubkasi kiradi.

Yadro nurlanishlarining modda bilan o'zaro ta'siri muammosi bilan asosan quyidagi fanlar shug'ullanadilar: radiatsion fizika, radiatsion kimyo, radiobiologiya va boshqalar.

Radiatsion fizika yadro nurlanishlarining modda orqali ko'chish yoki o'tishi jarayonlarini tadqiq qilish bilan shug'ullanadi. Nurlanishning o'tishi va qaytishi (albedo) jarayoni va moddani tashkil etgan element atom yadrolari bilan yuz berishi mumkin bo'lgan turli yadro reaksiyalari, himoya muhitida (moddasida) sochilgan va hosil bo'lgan ikkilamchi neytronlar va foton nurlanishlarning burchak va energetik taqsimotini baholash, neytron va foton nurlanishlarni o'lchash metodologiyalarini ishlab chiqishlarga katta e'tibor qaratiladi. Fizik tadqiqotlar konstruktsion materiallarda yutilgan dozani hisoblash va himoya to'siqlarning optimal konstruktsiyalarini hisoblashga yo'naldirilgan.

Radiatsion kimyo bu kimyo fanining ionlovchi nurlanishlar ta'sirida uyg'onadigan kimyoviy jarayonlarni o'rganadigan sohasi hisoblanadi. Bunda ionlovchi nurlanishlar asosan quyidagilar yo'nalishlarda qo'llaniladi: modda va materiallarni radiatsion modifikatsiya qilish; ularni buzilishlardan saqlash usullarini ishlab chiqishda; ionlovchi nurlanishlarni kimyo texnologiyalarida organik

shuningdek, yuqori molekulyar moddalarni radiatsion-kimyoviy sintez qilishda.

Radiobiologiya bu ionlovchi nurlanishlarning biologik ob'ektlarga (biomolekulalar, xujayrlar, to'qimalar, organizmlar, populyasiya) ta'sirini o'rganuvchi fandir.

Radiobiologiya fanida radiobiologiyaning fizikaviy asoslari, nurlanishning hujayraga ta'siri, radiatsiya ta'sirida hujayraning halokati, radiatsiyadan keyingi tiklanish, radiatsiya ta'sirining nazariy asoslari, tana organlarining radiatsiyaga sezgirtligi, o'tkir nur kasalligi, organizmga kirgan radioaktiv moddalarni biologik ta'siri, radiatsiya ta'sirida umring qisqarishi, nurlanish oqibatlari va undan himoyalaniish kabi masalalar atroficha o'rganiladi.

Mazkur bobda zaryadlangan zarralar va gamma nurlarning muhit atomlari bilan o'zaro ta'sir etish natijasida sodir bo'ladigan jarayonlar bilan tanishamiz.

3.1-§. Zaryadlangan og'ir zarralarning modda orqali o'tishi

Zaryadlangan og'ir zarralarning modda bilan o'zaro ta'siri quyidagicha: Zarra modda ichidan o'tganda, u o'z Kulon maydoni bilan atom elektronlarini "turtadi" ("turtki" beradi) yoki "surib" o'tadi. Buning hisobiga zarra o'z energiyasini asta sekin yo'qotadi. Modda atomlari esa yo ionlashadi, yo bo'lmasa, uyg'ongan holatlarga o'tadi. Ko'pchilik hollarda asosan ionizatsiya jarayoni sodir bo'lib, bunda kamida bitta elektron chiqib ketadi:



bu yerda streka bilan ionlovchi nurlanish ta'siri ko'rsatilgan. Demak, umumiy holda zarra o'z energiyasini modda atomlarini uyg'otishga va ionlashga sarflar ekan.

Kulon kuchlarining uzoqdan ta'sir qilish xususiyati hisobiga modda orqali uchib o'tayotgan zaryadlangan zarra, juda ko'p miqdordagi elektronlar bilan o'zaro ta'sirlashadi (turtib o'tishga ulguradi). Modda orqali o'tayotgan zarraning massasi elektron massasiga nisbatan katta bo'lganligi sababli, u elektron bilan to'qnash-ganda o'z yo'lidan juda kichik miqdorda chetlashadi. Harakat davomida bunday to'qnashishlar juda ko'p bo'lib, bunday xaotik yo'nalishdagi to'qnashishlar bir birini kompensatsiyalaydi. Shu sababli zaryadlan-

gan og'ir zarralarning moddada traektoriyasi deyarli to'g'ri chiziq bo'ladi.

Zaryadlangan og'ir zarralarning modda orqali o'tishi quyidagi fizik kattaliklar orqali tavsiflanadi:

- yo'l birligida energiya yo'qotishi yoki solishtirma ionizatsion yo'qotish - $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$.

- Zarraning moddada to'liq yugurish yo'li - R. Zaryadlangan og'ir zarralar modda orqali o'tganda energiyasini asosan modda atomlarini uyg'otishga va ionlashga sarflaydi. Bu energiya yo'qotish jarayonlarini umumlashtirib, ionizatsion yo'qotish deyiladi. Solishtirma ionizatsion yo'qotishni quyidagi formula yordamida aniqlash mumkin (vaks hol uchun):

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{I(Z)}, \quad (3.1)$$

bu yerda n - muhitning 1 sm^3 hajmidagi elektronlar soni yoki konsentratsiyasi; Z - zarralar o'tayotgan modda (yoki muhit) ning atom nomeri; $I(Z)$ - muhit atomlarining o'rtacha ionizatsiya potentsiali, ya'ni $13,5 \cdot Z \text{ eV}$; m_e - elektronning tinchlikdagi massasi; v - zarra tezligi; ze - zarra zaryadi.

(3.1) formuladagi logarifm ostidagi kasr surati, ya'ni $2m_e c^2$, tezligi vaks bo'lgan og'ir zarra tomonidan qo'zg'almas elektronga yuzma-yuz to'qnashganda beriladigan maksimal kinetik energiya, ya'ni

$$\Delta T_{max} = 2m_e g^2. \quad (3.2)$$

(3.1) formula faqat $E \sim I(Z)$ shart bajarilganda o'rinli bo'ladi. Endi ushbu formuladan kelib chiqadigan xulosalarga to'htalib o'tamiz. (3.1) formuladan ko'rinadiki, ionizatsion yo'qotish asosan quyidagi kattaliklarga bog'liq bo'ladi:

- zarra tezligiga.
- zarra massasiga.

- hajm birligidagi elektronlar soni yoki konsentratsiyasiga.

- o'rtacha ionizatsion potentsialga.

Buni ifoda ko'rinishda yozsak:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} \approx Z^2 n_e \varphi(v). \quad (3.3)$$

Bunda o'rtacha ionizatsion potentsialga bog'lanish logarifmik ravishda kuchsiz bog'langan. Hajm birligidagi elektronlar soni n modda zichligi ρ ga proporsionaldir:

$$n = \frac{Z \rho N_A}{A}, \quad (3.4)$$

bu yerda N_A - Avogadro soni; A - massa soni; Z - atomdagi elekt-ronlar soni.

Demak ionizatsion yo'qotish modda zichligiga to'g'ri proporsional ekan. (3.1) formuladan kelib chiqadiki, zarralarning katta energiyalarida ($v \rightarrow s$ bo'lganda), ionizatsion yo'qotish monoton ravish-da kamaya borishi kerak. Ammo amalda bu hol kuzatilmaydi yoki (3.1) formula aniq bo'lmay qoladi. Bu yerdan kelib chiqadiki, yuqori ener-giyalarda bu formula aniq bajarilmas ekan. Ushbu holni hisobga olib relyativistik hollar uchun quyidagi formula o'rinli bo'lar ekan:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(Z)} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (3.5)$$

bu yerda $\beta = \frac{g}{c}$.

(3.5) formuladan ko'rinadiki, zarra energiyasi oshishi bilan ionizatsion yo'qotish oldin juda tez kamayadi (energiyaga teskari proporsional ravishda) ammo yorug'lik tezligiga yaqinlashgan sayin bu kamayish sekinlashib boradi. Bu (3.5) formulaning maxrajida deyarli o'zgarmas kattalik, ya'ni $g^2 \approx c^2$. Ammo qavs ichidagi hadlarda ko'rinadiki, zarraning ba'zi bir yuqori energiyalaridan

boshlab, dE/dx kattalik asta sekin (logarifmik ravishda) o'sadi, undan keyin to'yinishga chiqadi.

Yuqorida ta'kidlab o'tkandek, zaryadlangan zarralarning modda orqali o'tishini tavsiflovchi yana bir kattalik bu zarraning moddada to'liq yugurish yo'li hisoblanadi. Zarra modda orqali o'tganda energiyasini yo'qotib keyin to'htaydi. Zarraning moddada bosib o'tgan yo'li yugurish yo'li deyiladi. Bu katalik zarra zaryadiga, massasiga va energiyasiga bog'liq bo'ladi. Yugurish yo'li R qo'yidagi formula yordamida aniqlaniladi:

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{-dE/dx}, \quad (3.6)$$

bu yerda E_0 — zarraning moddaga kelib tushungacha bo'lgan energiyasi. Yugurish yo'li uzunlik (m, sm, mkm) yoki "ziehlik" (g/cm^2) o'lchov birliklarida aniqlaniladi. Agar ionizatsion yo'qotishni uchun (3.1) ifoda qo'llanilsa, u holda yugurish yo'li ifodasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$R = \frac{M}{Z^2} f(\rho), \quad (3.7)$$

bu yerdagi $f(\rho)$ funksiya zarra turiga bog'liq emas. Ammo bu ifodadagi solishtirma ionizatsion yo'qotishni aniqlovchi formula turli energiyalar sohasida ham o'rinli emas. Shu sababli haqiqiy yugurish yo'lining zarra energiyasi va modda turiga bog'lanishi (3.7) formulaga qaraganda murakkab bo'lib, uning formulasi nazariy va tajriba natijalarini o'zaro taqqoslash yo'li bilan aniqlaniladi.

Turli muhitlarda ayrim zarralarning yugurish yo'li bilan energiyasini bog'lovchi bir nechta formulalarni keltiramiz.

- Normal sharoitda α -zarralarning havodagi o'rtacha yugurish yo'li:

$$\bar{R}_\alpha = 0,31T^{3/2} cm; \quad 4 < T < 7 \text{ MeV} \quad (3.3)$$
- Massa soni A bo'lgan moddada α -zarraning o'rtacha yugurish yo'li:

$$\bar{R}_\alpha = 0,56R_\alpha(cM) A^{1/3} M^2 / cM^2, \quad (3.4)$$

bu yerda R_α (sm)-shu energiyadagi α -zarraning havodagi yugurish yo'li.

- Normal sharoitda T-kinetik energiyali protonning havodagi yugurish yo'li:

$$R_p(T) = R_\alpha(4T) - 0,2 \text{ sm}; \quad T > 0,5 \text{ MeV}, \quad (3.5)$$

bu yerda R_α —kinetik energiyasi 4T bo'lgan α -zarraning havodagi o'rtacha yugurish yo'li.

3.2-§. Zaryadlangan engil zarralarning modda orqali o'tishi

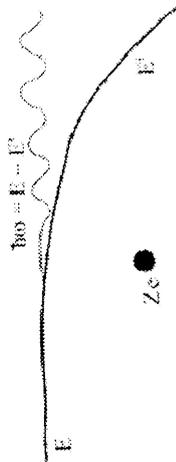
Zaryadlangan engil zarralar, ya'ni elektron va pozitronlarning modda orqali o'tishi barcha zaryadlangan zarralarning modda orqali o'tishidan keskin farq qiladi. Bunga asosiy sabab, **elektron** va **pozitron** massalarining kichikligidir. Moddaga uchib kelayotgan elektronlarning massasi kichikligidan, modda ichidagi har bir to'qnashishda impulsilari o'zgaradi. Buning oqibatida berilgan yo'nalishga nisbatan yo'nalishini o'zgartiradi. Shu sababli elektronlarning traektoriyalari to'g'ri chiziq bo'lmaydi.

Elektronlar ham modda orqali o'tganda boshqa zaryadlangan zarralar kabi, o'z energiyasini atomlarni uyg'otishga va ionlashtirishga sarflaydi. Bundan tashqari elektron energiyasini radiatsion ef-fektga ham sarflaydi. Radiatsion effekt yoki radiatsion yo'qotishda elektron atom qobig'idagi elektronning yoki yadroning Kulon tormozlanish natijasida uzluksiz spektrga ega bo'lgan tormozlanish nurlarni hosil qiladi. Bu holda moddaga uchib kirgan elekt-ron o'z energiyasining bir qismini mazkur jarayon natijasida yo'qotadi.

Demak elektronlar modda orqali o'tganda ularning energiyasi quyidagi jarayonlarga sarflanadi:

1. Ionizatsion yo'qotishga.
2. Radiatsion yo'qotishga

Elektronlarning radiatsion tormozlanishi. Zaryadlangan zarralar atom yadrosining va atom elektronlarining elektr maydonida tez tormozlanishi natijasida radiatsion (yoki tormozli) nurla-nishlar chiqaradi(3.1-rasm).



3.1-rasm. Zaryadi Ze bo'lgan yadro Kulon maydonidagi elektronning tormozlanish nurlanishi.

Energiyani nurlanishga yo'qotishi $(dE/dx)_{hyp}$ tezlanish kvadratiga proporsionaldir, ya'ni \dot{x}^2 . Zaryadlar qiymati teng bo'lgan zarralarning yadro bilan Kulon o'zaro ta'sir kuchi bilan bir xil bo'lgani uchun,

$$d^2 = \dot{x}^2 \approx \frac{1}{m^2} \Big|_{z=const},$$

va

$$\left[\frac{dE}{dx} \right]_{atom} \Big|_{z=const} \sim \frac{1}{m^2}.$$

Demak, zaryadlari bir xil bo'lgan zarralar uchun energiyani nurlanishga sarflanishi, zarra massasining kvadratiga teskari proporsional bo'lar ekan. Ayniqsa bu jarayon zaryadlangan engil zarralar, ya'ni elektronlar uchun juda sezilarli yo'qotish bo'ladi. Zaryadlangan og'ir zarralar uchun bu effektini hisobga olmasa ham bo'ladi.

Elektronlar uchun radiatsion yo'qotish moddada atomlar kon-sentratsiyasiga, yadro zaryadiga va elektronlarning kinetik energiyalariga bog'liq bo'ladi:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{hyp} \sim Z^2 n T_e$$

Monoxromatik elektronlar dastasi yupqa nishonga kelib tushsin. Nishon qalinligi shunchalik kichikki, unda ionizatsion yo'qotish va atom elektronlar bilan ko'p marta to'qnashishlarini hisobga olmasak ham bo'ladi. Bunda energiyani spektri uzluksiz bo'ladi.

Tormozli nurlanishlar quvvati (Vt) quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$W_{moy} = 1,9 \cdot 10^3 (E_e - 0,511) Z^2 \rho d i/A, \quad (3.6)$$

bu yerda W_{form} - tormozli nurlanishlar quvvati, Vt; E_e - nishonga tushayotgan elektronlar energiyasi, MeV; Z va A - mos holda atom zaryadi va massa soni; ρ - modda zichligi, kg/m³; d - nishon qalinligi, m; i - elektronlar oqimining toki kuchi, A.

Elektronning $T_e \gg m_e c^2$ energiyalar sohasida elektronlar tormozlanish nurlanishlarining yo'nalishi, elektronlar harakat yo'nalishi bo'yicha yo'nalgan bo'ladi va yoyilish burchagi quyidagi ifoda bilan aniqlanadigan konus chegarasida to'planadi:

$$\theta \approx \frac{m_e c^2}{E_e} \approx 0,511 \quad (3.7)$$

Bu Yerdan ko'rinadiki, elektronning energiyasi oshishi bilan tormozli nurlar dastasi siqiladi.

Elektron energiyasining ionizatsion va radiatsion yo'qotishlarini solishtirish. Elektronlarning kichik energiyalarida energiyani ionizatsion yo'qotish ustun bo'ladi. Yuqori energiyalarda esa radiatsion yo'qotish ustunlikka erishadi. Radiatsion yo'qotishning roli Z ning qiymati katta bo'lgan moddalarda katta bo'ladi. Ionizatsion yo'qotish, radiatsion yo'qotish bilan tenglashadigan energiyaga E_{kr} kritik energiya deyiladi. Kritik energiyani baholashda quyidagi taxminiy munosabatdan foydalanish qulaydir:

$$\frac{(-dE/dx)_{pob}}{(-dE/dx)_{ion}} \approx \frac{Z E_e (MeV)}{800} \quad (3.10)$$

Bu formuladan quyidagi kritik energiyani aniqlovchi ifodani olish mumkin:

$$E_{kp} = \frac{800}{Z}, \quad (3.8)$$

bu yerda E_{kr} - MeV larda o'lchanadi.

Oxirgi formulada Pb uchun $E_{kr} \approx 10$ MeV, Al uchun $E_{kr} \approx 62$ MeV. $E_e \gg E_{kr}$ bo'lganda ionizatsion yo'qotishni hisobga olmasa ham bo'ladi va elektron o'z energiyasini faqat tormozli nurlanishga sarflaydi. Bunda elektronlar energiyasi eksponensial qonun bo'yicha kamayadi. Elektron energiyasining radiatsion yo'qotish natijasida e martaga kamaydigan masofaga radiatsion uzunlik $x = X_0$ deyiladi:

$$E_c = E_c^0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right). \quad (3.9)$$

X_0 ning qiymati Pb uchun $58 \frac{\kappa^2}{M^2}$ (yoki $5,8 \frac{c^2}{cM^2}$) dan, He uchun $850 \frac{\kappa^2}{M^2}$ gacha o'zgaradi.

3.3-§. Vavilov-Cherenkov nurlanishi

S.I.Vavilov rahbarligida elektromagnit nurlanishlarning moddaga ta'sirini o'rganayotgan yosh olim P.A.Cherenkov 1934 yilda radiy gamma-nurlari ta'sirida suyuqliklarning alohida tur nurla-nishga ega bo'lishini aniqladi. Bunday nurlanishlarning hosil bo'lishi boshqa zarralar, masalan elektronlar ta'sirida ham vujudga kelishi aniqlanildi. S.I.Vavilov bu turdagi nurlanishlarning manbai gamma-nurlarni vujudga keltirayotgan katta tezlikdagi elektronlar bo'lishi kerak degan xulosaga keldi. Bu hodisaga Vavilov-Cherenkov effekti deb nom berildi. Ushbu hodisani 1937 yilda I.E.Tamm va I.M.Franklar klassik elektrodinamik asosida nazariy tushuntirib berishdi. Ushbu kashfiyot uchun 1958 yilda P.A.Cherenkov, I.E.Tamm va I.M.Franklar Nobel mukofotiga sazovor bo'lishdi. V.L.Ginzburg 1940 yilda bu effektning kvant nazariyasini yaratgan bo'lib, bunda ham klassik elektrodinamik asosida olingan nati-jalar kelib chiqdi.

Ma'lumki, muhitdagi yorug'likning tarqalish tezligi quyidagi formula bilan aniqlaniladi:

$$c' = c/n \quad (3.12)$$

bu yerda n — muhitning sindirish ko'rsatkichi.

Agar $n > 1$ bo'lsa, u holda katta energiyaga ega bo'lgan zarra muhitdagi yorug'likning tarqalish tezligidan ham katta tezlikda harakat-lanishi mumkin. Bunda zarracha to'g'ri chiziqli tekis harakat-lansa ham nurlanish hosil bo'ladi. Klassik elektrodinamikaga asosan tezla-nishsiz o'zgarmas tezlikda harakatlanayotgan zarracha elektromagnit to'lqinlar (yoki nurlanishlar) chiqarmaydi. Ammo bu effektida zarra tezlanishga ega bo'lmasa ham nurlanishlar chiqmoqda. Bu yerda elektromagnit to'lqinlarning muhitdagi tarqalish tezligi nazarda tutilmoqda. Nisbiylik nazariyasiga asosan zarraning tezligi elektromagnit to'lqinlarning vakuumdagi tarqalish tezligidan katta

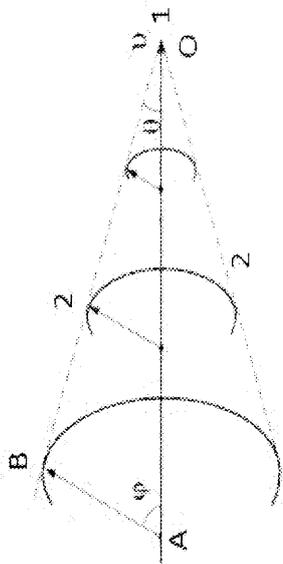
bo'lishi mumkin emas. Ammo yorug'likning shaffof muhitda tarqalish tezligi vakuumdagi tarqalish tezligidan kichik, ya'ni c/n bo'ladi. Masalan yorug'likning suvda tarqalish tezligi $\sim 2,3 \cdot 10^8$ m/s, ya'ni yorug'likning vakuumda tarqalish tezligining 75% ni tashkil qiladi. Shu sababli elektron yoki proton harakatlanayotgan muhitdagi tezli-gi mazkur muhitdagi yorug'likning tarqalish tezligidan katta bo'lishi mumkin.

Zarra tomonidan chiqarilayotgan Vavilov-Cherenkov nurlanish-lar to'lqin fronti egiluvchi sferik to'lqin hisoblanadi. Bu to'lqin fronti (*nurlanishlar*) faqat zarra tezligi yorug'likning mazkur mu-hitdagi tarqalish tezligidan katta bo'lgandagina yuzaga keladi. Bu nurlanishlar zarra hatto tekis harakatlasa ham hosil bo'lar ekan. Bu yerdan $\theta < c/n$ bo'lganda cherenkov nurlanishlar yuzaga kelmas ekan. Ushbu nurlanishlar chiqayotgan θ burchagni 3.1-rasmdagi AVO uchburchakdan topish mumkin:

$$\cos \theta = \frac{AB}{AO} = \frac{c}{gn}$$

Vavilov-Cherenkov nurlanishida qisqa to'lqinlar ko'p bo'lgani uchun u havo rang bo'lib ko'rinadi.

Ko'pchilikda okeanning juda chuqur joylarida tim qorong'ilik (zimiston) bo'ladi, sababi yorug'lik suv sirtidan juda chuqur joy-lariga etib bormaydi degan xato fikr tarqalgan. Okean suvlaridagi radioaktiv izotoplarning xususan *kaliy-40* radioizotopi emiri-lishi natijasida vujudga keladigan Vavilov-Cherenkov effekti hisobiga xattoki katta chuqurliklarda ham kuchsiz nur sochilib turadi. Shunday gipoteza mavjudki, bunga asosan chuqur suv ostida yashovchi mavjudodlar bunday kuchsiz nurlanishlarni ko'rish uchun ularning ko'z-lari katta bo'lishi lozim. Shuningdek yana bir xulosa, bu zarra nurlanish hosil qilishi uchun u o'zining kinetik energiyasini sarflaganligi sababli nurlanish jarayonida zarra tezligi kamayadi.



3.1-rasm. Vavilov-Cherenkov nurlanishi vujudga kelish sxemasi. 1-muhtida harakatlanayotgan zarra vujudga keltingan nurlanish to'liqlarining fronti bo'lib, u zarra tezligi vektoriga θ burchak ostida yo'nalgan bo'ladi.

Cherenkov nurlanishlarini qayd qiluvchi detektorlar yuqori energiyalar fizikasida relyativistik zarralarni qayd qilishda keng qo'llaniladi. Bu detektor yordamida zarra tezligi va harakat yo'nalishini aniqlash mumkin. Agar ushbu nurlanishni vujudga keltiruvchi zarraning massasi ma'lum bo'lsa, u holda bir vaqtning o'zida uning kinetik energiyasi ham aniqlaniladi.

3.4-§. Sinxrotron nurlanishlar

Sinxrotron nurlanish (yoki magnit-tormozli nurlanishi) bir jinsli magnit maydonda relyativistik tezlik bilan harakatlanayotgan zaryadlangan zarralarning elektromagnit to'liqlar nurlanishidir. Ushbu nurlanishga zardlangan zarra traektoriya-sining magnit maydon ta'sirida egrilanishi natijasida vujudga keladigan tezlanish sababchi bo'ladi. Bu nurlanish mexanizmi, elektronning yadro elektrostatik maydonida tormozlanishi, ya'ni traektoriyasini o'zgarishi natijasida tormozlanish nurlanishlari hosil bo'lishiga o'xshashdir.

Sinxrotron nurlanishlar nomi ushbu nurlanishni hosil bo'lgan mamba bilan bog'liq bo'lib, bu nurlanish birinchi marta elektron tezlatkich - sinxrotronda olingan. Sinxrotronda elektron doira-viy orbita bo'ylab harakatlanishi natijasida markazga intilma tezlanish hosil bo'ladi va bu tezlanish natijasida sinxrotr nurlanishlar hosil bo'ladi. Bu nurlanishni infraqizil, inson ko'zi ko'radigan va rentgen nurlar diapazonlarida olish mumkin bo'lib, bu elektronning energiyasiga va magnit maydoni kattaligiga bog'liq. Induksiyasi B

bo'lgan magnit maydon elektronning nurlanishining to'liq intensivligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$I = \frac{2e^2 B^2 \gamma^2 g_e^2}{3m_e^2 c^3}, \quad (3.14)$$

bu yerda g - elektron tezligi, γ - relyativistik faktor bo'lib, u quyidagiga teng:

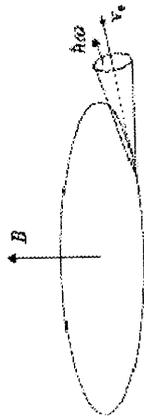
$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - g^2 / c^2}. \quad (3.15)$$

Elektron magnit maydonida doira bo'ylab bir marta aylanganda quyidagi energiyani nurlanadi:

$$\Delta E = 88 E_e^4 / R \quad (3.16)$$

bu yerda E_e - elektron energiyasi, GeV; R - aylanish radiusi, sm.

Relyativistik elektron uchun nurlanishning deyarlik hamma qismi uning tezligi yo'nalishida bo'ladi va nozik konus shaklida bo'ladi (3.2-rasm).



3.2-rasm. Sinxrotron nurlanishning yo'nalishi.

Energiyasi $E = mc^2$ bo'lgan zarraning to'liq nurlanish quvvati quyidagiga teng bo'ladi:

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{2e^2}{3m_e^4 c^7} H_{\perp}^2 E^2 = 0,98 \cdot 10^{-3} H_{\perp}^2 \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \approx B / \text{cek} \quad (3.14)$$

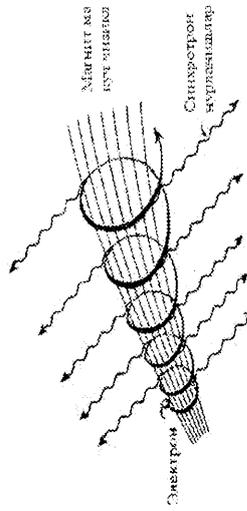
bu yerda e - zarra zaryadi, H_{\perp} - zarra tezligiga perpendikulyar bo'lgan magnit maydon tashkil etuvchisi. Mazkur ifodadan ko'rinadiki, nurlanish quvvati (yoki intensivligi) zarra massasiga tekkari proporsional bo'lib, bu nurlanish quvvati engil zarralarda (elektron va pozitron) katta bo'ladi. Shu sababli sinxrotron nurlanishlar manbai sifatida elektron tezlatgichlar qo'llaniladi.

Sinxrotron nurlanishlarga o'xshash yana bir nurlanish mavjud bo'lib, bu nurlanish norelyativistik zarralarning (energiyasi $E = mc^2$)

bo'lgan zarra) doiraviy yoki spiral traektoriya bo'ylab harakatlanishda hosil bo'ladi va uni siklotron nurlanishlar deyiladi. Umumiy holda siklotron va sinxrotron nurlanishlar magnit maydonida tormozlanish nurlanishlari deyiladi.

Magnit maydonda elektronlar dastasining sinxrotron nurlanishlari, dastadagi elektronlarni o'z-o'zini radiatsion qutblashiga olib keladi (**Sokolov-Ternov effekti**). Bu hodisa texnikada qu-tublangan elektronlar dastasini hosil qilish uchun qo'llaniladi.

Keyingi vaqtlarda intensiv va nozik dasta ko'rinishda yo'nalgan sinxrotron nurlanishlar, elektromagnit nurlanishlarning modda bilan o'zaro ta'sirini o'rganilayotgan zamonaviy fanlarning deyarlik hamma sohalarida keng qo'llanilmoqda. Tibbiyotda tashxis qo'yishda va davolashda qo'llanilmoqda. Bu nurlanish yordamida ko'pchilik kasalliklarga erta tashxis qo'yish mumkin. Nanotexnologiyada mazkur nurlanish yordamida moddaning juda yupqa qatlamlarini ham o'rganish mumkin. Hozirgi kunda turli mamlakatlarda 100 ta tezatkich sinxrotron nurlanishlar manbalari sifatida ishlab turibdi, 40 tasi qurilmoqda.



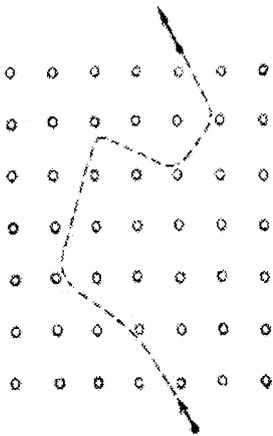
3.3-rasm. Sinxrotron nurlanishlar hosil bo'lishi.

Sinxrotron nurlanishlar astrofizikada ham keng tarqalgan va turli ob'ektlarda (magnit maydon va relyativistik zarralar mavjud bo'lgan ob'ektlar) asosiy rolni uynaydi. Katta tezlik bilan ke-tayotgan elektron o'z yo'lida kuchli magnit maydoniga uchrasa, ushbu maydon magnit maydoni elektronning traektoriyasini burib, spiral ko'rinishga olib keladi. Elektronlar magnit maydon chiziqlari atrofida aylanma harakat qiladi va sinxrotron nurlanishlar hosil bo'ladi (**3.3-rasm**). Bunday magnit maydonlar yulduzlararo fazoni egallagan bo'ladi.

Sinxrotron nurlanishlarining tibbiyotda qo'llanilishiga misol qilib sinxrotron nurlanishlarni **rentgen** sohasida qo'llanilishini keltirish mumkin. Bizga ma'lum bo'lgan **rentgen** trubkalarda hosil qilinayotgan **rentgen nurlar** yordamida tashxis qo'yish metodi keng qo'llanilishiga qaramasdan mazkur metod ham ayrim kamchiliklardan holi emas. Birinchidan **rentgen nurlari** yordamida olingan rasmlar sifati (kontrasti) hamma vaqt ham vrachlarni qoniqtirmaydi. Kontrast tekshirilayotgan ob'ektning zichligi va atom og'irligi farqi orqali aniqlaniladi. Biologik to'qimalar uchun bunday farq nisbatan katta emas. Masalan inson organizmida o'simtalar hosil bo'lishini erta bosqichida aniqlash oson emas. Ikkinchidan puxta tekshirishda nurlanish dozasi etarlicha katta bo'lishi va inson organizmiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bunga sabab, oddiy rentgen trubkasida hosil bo'lgan nurlanishning energetik spektri uzluksiz bo'lishidir. Puxta tekshirish uchun esa monoxromatik fotonlar kerak bo'ladi. Ob'ektning qalindigi va zichligiga mos holdagi energiyaga ega bo'lgan monoxromatik fotonlar yordamidagina sifatlil (kontrasti yaxshi bo'lgan) rasmlar olish mumkin. Rentgen trubkasi bilan nurlantirilganda fotonlarning ko'pchiligi "befoyda" ketadi va nurlanish dozasini oshiradi. Bu muammolarni oson hal qilish yo'li bu sinxrotron nurlanish-larning rentgen sohasidan foydalanishdir. Hozirgi kunda bu tash-xis metodi tibbiyotda keng qo'llanilmoqda.

3.5-§. Zaryadlangan zarralarning kanallashishi. Kanallashish sharti. Linxard burchagi

Zaryadlangan zarralar kuchsiz tartiblangan qattiq ob'ektga kelib tushganda ularning sochilishi ma'lum bir darajada (bir muncha) xaotik bo'ladi. Bunga sabab, ular alohida atomlar bilan to'qnashadi. Agar zaryadlangan zarralar nozik dastasi ma'lum bir burchak ostida kristalga kelib tushsa, u holda alohida atomlarda sochilish kooperativ effektaga olib keladi, ya'ni atomlar zanjiri yoki tekisliklari tomonidan zarralar harakati yo'naltiriladi (kanal-lashtiriladi). Monokristall ichida atomlar parallel qatori yoki tekisliklari hosil qilgan "kanallar" bo'ylab zaryadlangan zarra-larning harakatiga zaryadlangan zarralarning kanallashishi deyiladi. Zaryadlangan zarralarning kristallarda kanallashish hodi-sasi 1961-yilda M.T.Robinson (M.T.Robinson) va



3.7-rasm. Ko'ndalang tekislikda bunday zarraning harakati umumiy holda tasodifiy "tentirash" ni ifodalaydi

Zarra atom yadrosi bilan yaqindan to'qnashishi mumkin. Buning natijasida ular katta burchaklarga sochiladi (θ - egri chiziq) va keyin notartib muhitda harakatga o'hshaydi. θ_1 - *Lindxard burchagi* gradusning ulushlari tartibida bo'ladi. Qalin kristalda zaryadlangan zarralar aksial kanallashuvi rejimida harakatlanib, turli atom qatorlaridan ketma-ket "*ko'zgusimon*" qaytish aktlari yuz beradi.

Tekislikdagi zaryadlangan zarralar kanallashishi kristallo-graf tekislikka nisbatan kichik burchak ostida tushganda kuzatiladi.

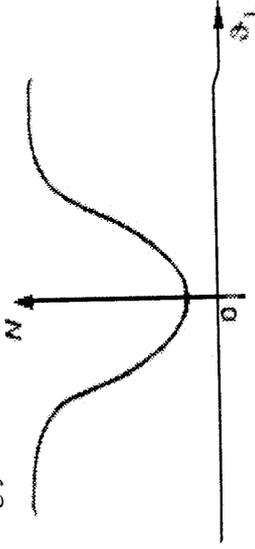
Ushbu holda zarralar qo'shni tekisliklardan galma-gal qaytadi va uning traektoriyasi sinusoidani eslatadi (3.8-rasm). Bunda zarra yadrodan ma'lum bir uzoqlikda ushlab turiladi.



3.8-rasm. Tekislikdagi zaryadlangan zarralar kanallashishi

Zaryadlangan zarralar kanallashishi, monokristalli nishonda yadro reaksiyalari yuz berganda ular mahsulotlarining burchak taqsimotida yaqqol namoyon bo'ladi (3.9-rasm). $\theta_1 = 0$ bo'lganda nishondan chi-qayotgan zarralarning intensivligi keskin kamayib

ketishi, nishonga kelib tushayotgan zarralar dastasining asosiy qismi zaryadlangan zarralar kanallashishi rejimiga tushishidan darak beradi va ularning yadro bilan to'qnashish ehtimolligi, binobarin yadro reaksiya-ari-ning yuz berishi sezilarli kamayadi.



3.9-rasm. Qayd qilingan reaksiya mahsuloti bo'lgan N zarralar sonining tushayotgan zarralar dastasi yo'nalishi bilan kristallografik o'q orasidagi θ_1 burchakka bog'lanishi.

Kanallashgan (yoki kanalga tushgan) zarralarni atomlar qatori yoki zanjiri o'qidan ushlab turish boshqa fizikaviy jarayonlarga ham olib kelishi mumkin. $\theta_1 < \theta_2$ bo'lganda ichki elektron qobiqdan xarakteristik rentgen nurlar chiqishi kamayadi. Kanallashgan zarralar-ning yugirish yo'li, zaryadlangan zarralar kanallashish hodisasi sodir bo'lmagan zarralarning yugirish yo'liga nisbatan sezirali ravishda katta bo'ladi. Bunga sabab, bir tomondan yadro bilan yaqindan to'qnashish mavjud emasligi yadroviy energiya yo'qotishni kamayishi bo'lsa, ikkinchi tamondan esa kanallashgan zarralar traektoriyasi elektron zichligi kamaygan sohada bo'lishidir. Bu o'z navbatida ionizatsion yo'qotishni kamaytirishga olib keladi.

Hozirgi kunda zaryadlangan zarralar kanallashish hodisasi qat-tiq jismlar fizikasida, tezlatkichlar fizikasida va amaliy yadro fizikasining ayrim yo'nalishlarida qo'llanilmoqda.

3.6-§. Gamma-nurlarning modda bilan o'zaro ta'siri

Gamma-kvant zaryadga ega bo'lmagan uchun muhit atomlarini be-vosita ionizatsiya qila olmaydi.

Gamma-kvantlar dastasi modda orqali o'tganda ularning soni yoki intensivligi eksponensial qonun bo'yicha kamayadi, ya'ni:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (3.16)$$

yoki

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.17)$$

bu yerda N_0 , I_0 - qalinligi x bo'lgan modda qatlamiga kelib tusha-yotgan γ -kvantlar soni yoki intensivligi; N , I - ushbu qatlamdan o'tgan γ -kvantlar soni yoki intensivligi; μ - chiziqli yutilish koeffitsienti (yoki yutilish koeffitsienti) m^{-1} . $1/\mu$ kattalik γ -nurlarning o'rtacha yugurish yo'li deyiladi. Gamma-kvantlar moddada $1/\mu$ masofani o'tganda ularning soni yoki intensivligi e marta kamayadi. Chiziqli yutilish koeffitsienti μ moddaning zichligi va tartib nomeriga, shuningdek γ -kvantlar energiyasiga bog'liq bo'ladi:

$$\mu = \mu(\rho, Z, E_\gamma) \quad (3.18)$$

Yutilish koeffitsientidan tashqari, $\mu_m = \mu / \rho$ ga teng bo'lgan massaviy yutilish koeffitsienti tushunchasi ham qo'llaniladi. Bu yerda ρ - modda zichligi. Massaviy yutilish koeffitsienti o'lchov birligi - m^2/kg . Hisoblashlarda massaviy yutilish koeffitsientidan foydalanganda modda qalinligini kg/m^2 birlikda ifodalash qo'laydir.

Agar γ -kvantlar yutilish bir necha turli jarayonlar hisobiga bo'lsa, u holda har bir jarayonning mos holda o'z μ_i yutilish koeffitsientlari bo'ladi. Bu jarayonlarning to'la yutilish koeffitsienti hamma μ_i koeffitsientlar yig'indisiga teng bo'ladi:

$$\mu = \sum_i \mu_i \quad (3.19)$$

Bu yerdagi μ va μ_i kattaliklar o'lchami m^{-1} (sm^{-1}).

Yutilish koeffitsienti γ -kvantlarning moddan orqali o'tishi jarayonini to'liq tavsiflaydi va u ko'rilyotgan jarayonning to'la kesimiga bog'liq bo'ladi. Har bir jarayonning to'liq kesimi yutilish koeffitsienti bilan quyidagicha bog'langan bo'ladi:

$$\mu_i = n_i \sigma_i, \quad (3.20)$$

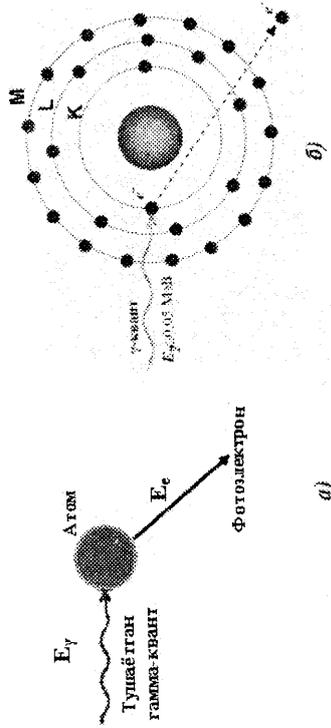
bu yerda n_i - yutuvchi (yoki sochuvchi) markazlar konsentratsiyasi.

Fotoyadro reaksiyalarini hisobga olmaganda γ -kvantlar modda orqali o'tganda quyidagi jarayonlar yuz beradi: a) fotoeffekt, b) Kompton effekti, v) elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi.

Fotoeffekt. Bu jarayonda γ -kvant atom tomonidan yutiladi va undan elektron chiqib ketadi (3.10-rasm). Yanada aniqroq qilib bayon etilsa, fotoeffekt jarayonida γ -kvant butun energiyasini uchragan atom elektronlaridan biriga beradi va γ -kvant butunlay yo'q bo'ladi, elektron esa atomdan chiqib ketadi. Bu elektronning energiyasini energiya saqlanish qonunidan foydalanib aniqlaymiz:

$$E_e = E_\gamma - I_i - E_a \quad (3.21)$$

bu yerda I_i - atomning elektron chiqayotgan i - qobiqdagi ionizatsiya potentsiali (elektronning bog'lanish energiyasi), E_e - yadroning tepki energiyasi, E_e - fotoeffekt natijasida chiqqan elektron kinetik energiyasi, E_γ - γ -kvant energiyasi. Yadro tepki energiyasi qiymati juda kichik bo'lganligi sababli uni e'tiborga olmasa ham bo'ladi.



3.10-rasm. Fotoeffekt jarayonining sxemasi

Fotoeffekt yuz berishi uchun $E_\gamma > I_i$ shart bajarilishi lozim. $E_\gamma < I_K$ shart bajarilganda fotoeffekt faqat L-, M- va h.k. qobiqlarda yuz beradi. K - qobiqda esa yuz bermaydi. $E_\gamma < I_L$ shart bajarilganda fotoeffekt faqat M-, N- va h.k. qobiqlarda yuz beradi. K- va L- qobiqlarda esa yuz bermaydi. Shuni ham ta'kidlab o'tish lozimki, fotoeffekt faqat bog'langan elektronlarda yuz beradi. Erkin elektronlarda esa yuz bermaydi. Buni energiya va impuls saqlanish qonunlari yordamida isbotlash mumkin.

Atomdagi fotoeffekt hodisasi, xarakteristik rentgen nurlar yoki Oje elektronlarning hosil bo'lishi bilan birgalikda yuz bera-di. Xarakteristik rentgen nurlar, fotoeffekt natijasida elektron qobiqda hosil bo'lgan vakant joyga elektronlarning o'tishi natijasida yuzaga keladi. Shuningdek, uyg'ongan holatdagi atom o'z energiyasini

atomning tashqi qobiqidagi elektronlarga ham berishi mumkin. Ushbu holda atomdan energiyasi E_0 bo'lgan fotoelektronlardan tashqari, energiyasining qiymati jihatidan ionizatsiya energiyasiga E_i (atomning i -qobiqidagi bog'lanish energiyasi) yaqin bo'lgan elektronlar — Oje elektronlari ham chiqadi. Oje elektronlari katta ehtimollik bilan atom nomeri Z kichik va o'rtta bo'lgan atomlarda kuzatiladi.

Fotoeffekt yuz berish ehtimolligi atom tartib nomeriga kuchli bog'langan bo'ladi, ya'ni: $\sigma_{\phi} \sim Z^5$. Bu atomdagi elektronlarning har xil bog'lanishga ega ekanligi bilan tushuntiriladi.

Fotoeffekt kesimini hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, bu jarayon asosan K-qobiqda (80%) sodir bo'lar ekan. Gamma-nurlar energiyasining $E_{\gamma} > E_K$ sohalarida K-qobiqda fotoeffekt yuz berish kesimi:

$$\sigma_{\phi}^{[K]} \sim \frac{Z^5}{(E_{\gamma})^{7/2}}. \quad (3.22)$$

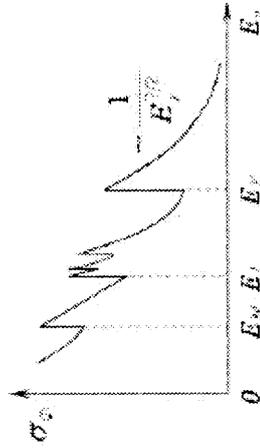
Mazkur jarayonning to'liq kesimi quyidagiga teng:

$$\sigma_{\phi} \approx \frac{5}{4} \cdot \sigma_{\phi}^{[K]}. \quad (3.23)$$

Shuningdek, fotoeffektning turli qobiqlarda yuz berish kesimlari orasida quyidagi munosabat aniqlangan:

$$\frac{\sigma_{\phi}^{[L]}}{\sigma_{\phi}^{[K]}} \approx \frac{1}{5} \text{ va } \frac{\sigma_{\phi}^{[M]}}{\sigma_{\phi}^{[L]}} \approx \frac{1}{4}. \quad (3.24)$$

3.10-rasmda fotoeffekt kesimining γ -kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan.



3.10-rasm. Fotoeffekt kesimining γ -kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan.

Rasmdan ko'rinadiki, γ -kvantlarning katta energiyalarida kesim juda kichik bo'ladi. Bu energiyalarga nisbatan elektronlar bog'lanish energiyalari kichik bo'ladi va elektron deyarli erkin bo'ladi. Gamma-kvantlar energiyasi E_{γ} ning kamayishi bilan kesim dastlab $1/E_{\gamma}$ qonun bo'yicha, keyin $1/E_{\gamma}^{7/2}$ qonun bo'yicha oshib boradi.

Fotoeffekt jarayoni og'ir moddalarda kichik energiyali γ -nurlanishlarning yutilishida asosiy mexanizim hisoblanadi. Masalan alyuminiyda $E_{\gamma} < 60$ keV energiyalarda, qo'rg'oshinda esa $E_{\gamma} < 600$ keV energiyalar sohalarida fotoeffekt jarayoni ustunlik qiladi.

Kompton effekti. Gamma-kvantlar erkin yoki kuchsiz bog'langan elektrolar bilan o'zaro ta'sirlashganda, energiyasining liqat bir qismini elektronga berish jarayoni yuz beradi (3.11-rasm).



3.11-rasm. Kompton effektining yuz berish sxemasi

Bunda sochilish burchagiga qarab, elektron noldan maksimal qiymati quyidagiga teng bo'lgan sohadagi turli energiyalarni qabul qiladi (Kompton sochilishidagi elektronlarning maksimal energiyasi):

$$E_{\text{max}} = \frac{E_{\gamma}}{1 - \frac{m_0 c^2}{2E_{\gamma}}} \quad (3.25)$$

bu yerda m_0 — elektronning tinchlikdagi massasi, s — yorug'lik tezligi ($m_0 c^2 = 0,511$ MeV).

Kompton sochilishining differensial kesimini Kleyn — Nishina — Tamm formulasi bo'yicha topish mumkin:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{E'_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)^2 \left[\frac{E_{\gamma}}{E'_{\gamma}} + \frac{E'_{\gamma}}{E_{\gamma}} - \sin^2 \theta \right] Z, \quad (3.26)$$

bu yerda $r_0 = e^2 / m_e c^2$ - elektronning klassik radiusi, Z - atomning tartib nomeri, E_0 - fotonning boshlang'ich energiyasi, E' - sochilgan foton energiyasi, θ - sochilish burchagi.

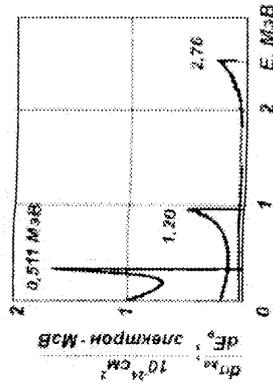
Keltirilgan munosabat, Z ta elektronida (ya'ni tartib nomeri Z bo'lgan atomda), birlik fazoviy bo'rchak va θ - burchak yo'nalishida Kompton sochilish ehtimolligini topishga imkon beradi.

Kompton sochilishi to'liq kesimini (3.26) ifodaning to'liq fazoviy burchak bo'yicha integrallash orqali olish mumkin:

$$\sigma_k = \pi \cdot r_0^2 \frac{Z}{\gamma} \left\{ \left[1 - 2 \frac{(\gamma+1)}{\gamma^2} \right] \ln(2\gamma+1) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\gamma} - \frac{1}{2} (2\gamma+1) \right\}, \quad (3.27)$$

bu yerda $\gamma = E_\gamma / m_e c^2$.

2.6-rasmda tepki elektronlar (Kompton elektronlari) spektri keltirilgan. Bu yerda yuqori energiyalarda Kompton elektronlari taqsimoti deyarlik teng ehtimollikka ega bo'lib, faqat fotonlar energiyasiga yaqin sohadagina sezirali darajada o'sish kuzatiladi.



2.6-rasm. Tepki elektronlar spektri.

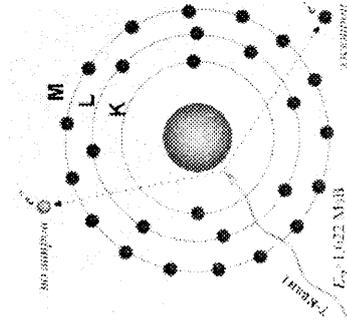
Har bir elektron sochilish jarayonida alohida qatnashganligi sababli sochilish kesimi Z ga proporsional bo'ladi, ya'ni: $\sigma_k \sim Z / E_\gamma$.

$h\nu \gg mc^2$ bo'lganda (3.27) formula quyidagi ko'rinishga o'zgaradi

$$\sigma_k \sim \frac{NZ}{E_\gamma} \left(\ln \frac{2E_\gamma}{mc^2} + \frac{1}{2} \right),$$

bu yerda N - hajm birligida atomlar soni.

Elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi. Gamma-kvantlarning etarlicha yuqori energiyalarida ($E_\gamma > 2m_e c^2$) fotoeffekt va Kompton effektlari bilan bir qatorda uchinchi bir jarayon, ya'ni γ -kvantlarning modda bilan o'zaro ta'sirlashi natijasida elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi jarayoni yuz beradi (3.11-rasm).



3.11-rasm. Elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi sxemasi.

Juflarning hosil bo'lish jarayoni faqat fotonlar energiyalari, elektron va pozitronlarning tinchlikdagi energiyalari yig'indisidan yuqori bo'lgan holdagina sodir bo'lishi mumkin, ya'ni $E_\gamma > 2m_e c^2$.

Bo'shliqda bitta fotonidan elektron-pozitron jufti hosil bo'lmaydi. Bu jarayon energiya saqlanish qonuni bo'yicha taqiqlangan bo'lib, u yadro yoki elektron maydonida sodir bo'lishi mumkin.

Yadro Kulon maydonida elektron va pozitronlar juftining hosil bo'lishi uchun quyidagi shart bajarilishi lozim:

$$E_\gamma > 2mc^2 = 1,02 \text{ MeB}.$$

Atom qobig'idagi elektronlarning Kulon maydonida elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:

$$E_\gamma = 4mc^2 = 2,04 \text{ МэВ}.$$

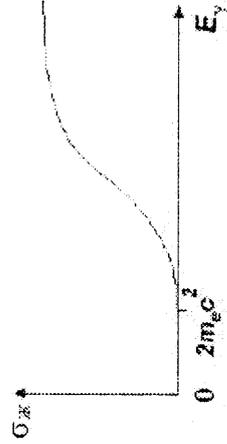
Elektron-pozitron jufti hosil bo'lishi kesimi γ -kvantlar energiyasiga murakkab bog'langan. Agar elektronlarning ekranlovchi ta'sirini hisobga olmaganda, ya'ni elektron qobiqlarsiz "yalang'och" yadro bo'lgan holda, $m_e c^2 \ll E_\gamma \ll 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ energiyalar sohasi uchun elektron-pozitron jufti hosil bo'lish kesimi quyidagiga teng bo'ladi:

$$\sigma_{\text{экран}} = \frac{Z^2}{137^2} r_e^2 \left[\frac{28}{9} \ln \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} - \frac{218}{27} \right]. \quad (3.21)$$

Ekranlovchi ta'siri hisobga olganda va $E_\gamma \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ energiyalar sohasida:

$$\sigma_{\text{экран}} = \frac{Z^2}{137^2} r_e^2 \left[\frac{28}{9} \ln(183Z^{-1/3}) - \frac{2}{27} \right].$$

$E_\gamma \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ kattalik qiymati alyuminiy uchun 30 MeV va qo'rg'oshin uchun 15 MeV atrofida bo'ladi. 3.12-rasmda elektron-pozitron jufti hosil bo'lish kesimining γ -kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan. Elektron va pozitronlar juft hosil bo'lish kesimi oldin keskin oshib borib, keyin sekinlashadi va yuqori energiyalar sohasida, ya'ni $E_\gamma \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ o'zgarmas qiymatga erishadi.



3.12-rasm. Elektron-pozitron jufti hosil bo'lish kesimining γ -kvantlar energiyasiga bog'lanishi.

Kichik energiya va katta Z larda elektron-pozitron juftining yadro maydonida hosil bo'lish kesimi, uning elektron maydonida hosil bo'lish kesimidan taxminan ming marta katta bo'ladi.

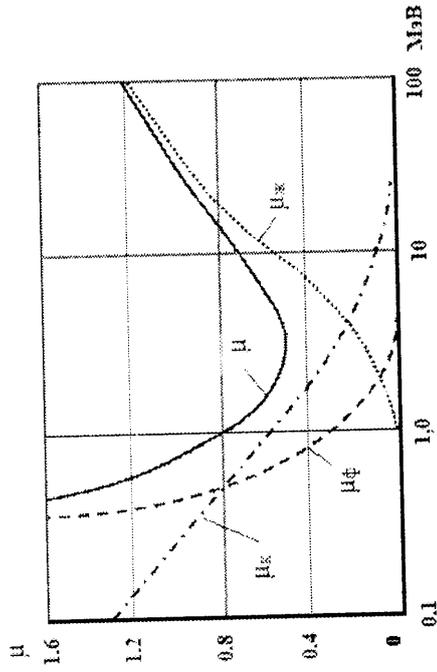
Gamma-kvantlarning to'la yutilish koeffitsienti va kesimi. Gamma-kvantlar modda orqali o'tganda fotoeffekt, kompton effekt va elektron-pozitron jufti hosil bo'lish effektlariga energiyasini sarflaydi. Gamma-kvantlarning moddada to'liq yutilish koeffitsienti, yuqorida ko'rib chiqilgan uch jarayon yutilish koeffitsientlari yig'indisiga teng, ya'ni:

$$\mu = \mu_\phi + \mu_{\text{комп}} + \mu_{\text{жыпм}}$$

yoki ushbu jarayonlarni yuz berish kesimlari orqali ifodalasak:

$$\sigma = \sigma_\phi + \sigma_e + \sigma_e$$

Kichik energiyalar sohasida fotoeffekt jarayoni ustunlik qiladi, o'rta va yuqori energiyalar sohasida esa Kompton effektining yuz berish kesimi oshib boradi, fotoeffekt kesimi esa kamaya boradi, $E_\gamma > 2mc^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ energiyalardan boshlab elektron-pozitron jufti hosil bo'lish jarayoni boshlanadi. Yuqori energiyalar sohasida asosan Kompton va elektron-pozitronlar juftining hosil bo'lish jarayonlari yuz beradi. Ushbu jarayonlar 3.10-rasmda qurg'oshin misolida keltirilgan.



3.10-rasm. Qo'rg'oshin uchun γ -nurlar chiziqli yutilish koeffitsientining γ -kvantlar energiyasiga bog'lanishi.

Gamma-kvantlar modda orqali o'tganda sodir bo'ladigan uchta jarayonning asosiy ustunlik qiladigan energiyalar diapozoni ma'lum bir moddalar, ya'ni havo, alyuminiy, temir va qo'rg'oshinlar misolida 3.2-jadvalda keltirilgan.

3.2-jadval
Gamma-nurlanishlarning havo, alyuminiy, temir va qo'rg'oshinlardan o'tish

Modda	Gamma-kvantlar energiyasining o'zgarish diapozoni, E_γ , MeV		
	Fotoeffekt	Kompton-effekt	Elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi
Havo	<0,02	$0,02 < E_\gamma < 23$	>23
Alyuminiy	<0,05	$0,05 < E_\gamma < 15$	>15
Temir	<0,012	$0,12 < E_\gamma < 9,5$	>9,5
Qo'rg'oshin	<0,50	$0,50 < E_\gamma < 4,9$	>4,7

Yuqorida bayon qilingan uchta o'zaro ta'sir jarayoni to'liq massaviy yutilish koeffitsientiga o'z hissasini qo'shadi. Bu uchta jarayonning nisbiy ulishi γ -kvantlar energiyasiga va moddaning atom nomeriga bog'liq bo'ladi.

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Radioaktiv ^{32}R preparati chiqarayotgan β -zarralarning havo, alyuminiy va qo'rg'oshin uchun yarim yutilish qatlami qalinligi hisoblansin.

Yechilishi: Beta-zarralar modda orqali o'tganda quyidagi qonun bo'yicha yutiladi:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

bu yerda N_0 - moddaga tushayotgan β -zarralar soni, N - qalinligi x bo'lgan qatlamdan o'tgan β -zarralar soni. Agar beta-zarralar oqimi moddaning x qalinligidan o'tganda yarimi yutilsa, ya'ni $N = N_0/2$. Buni (1) formulaga qo'yamiz

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\mu d/2}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu d/2}$$

yoki

Bu ifodani logarifmlab qidirilayotgan yarim yutilish qatlamining qalinligini aniqlaymiz:

$$d/2 = \ln 2 / \mu \quad (2)$$

^{32}R radioizotop uchun beta-zarralar maksimal kinetik energiyasi $T_{\beta\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$. Beta-zarralar energiyasi $0,5 < T_{\beta\text{max}} < 6 \text{ MeV}$ bo'lsa, massaviy yutilish koeffitsienti bilan beta-zarralar kinetik energiyasi orasida quyidagi munosabat o'rinni bo'ladi:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{22}{T_{\beta\text{max}}^{4/3}} \quad (3)$$

bu yerda ρ - modda zichligi. Bu munosabat yordamida μ_{havo} , μ_{Al} va μ_{Rv} koeffitsientlarni aniqlaymiz va bu qiymatlarni (2) ifodaga qo'yib quyidagi qiymatlarni olamiz:

$$d_{1/2}(\text{xavo}) = 50 \text{ cm}$$

$$d_{1/2}(\text{Al}) = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$$

$$d_{1/2}(\text{Pb}) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

Javob: 50 sm; $2,4 \cdot 10^{-2}$ sm; $5,7 \cdot 10^{-3}$ sm.

2-masala. Og'ir zaryadli zarralarning, moddadagi sm^2 larda ifodalangan yugurish yo'li yutuvchi moddaga bog'liq emasligini ko'rsating. Ushbu xulosaning ta'sir etish chegaralarini ko'rsating.

Yechilishi: Og'ir zaryadli zarralar moddadan o'tganda ular hamma energiyasini asosan yutuvchi modda atomlarini ionizatsiyalashga va uyg'ongan holatga o'tkazishga sarflaydi (ionizatsiya yo'qotishlar). Zaryadi Z_1 va tezligi v bo'lgan zarraning ionizatsiya yo'qotishlari quyidagiga teng:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \frac{4\pi e^4 Z_1^2 ZNB}{m\nu^2}$$

bu yerda Z -yutuvchi moddaning atom raqami, N - 1 sm^3 hajmdagi atomlar soni, V -moddaning ionizatsiya potensialiga kuchsiz bog'lan-gan tormozlanish koeffitsienti. Bu bog'lanishni e'tiborga olmagan holda, E_1 energiyali zarraning yugurishini topamiz:

$$R = \int_0^{E_1} \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)} \approx \frac{f(E)}{ZN} = \frac{f(E)}{ZN_A \rho} A$$

bu yerda N_A - Avogadro soni, $f(E)$ zarraning xususiyatlariga bog'liq va yutuvchi moddaga bog'liq bo'lmagan kattalik. Engil va o'rtacha yutgichlar uchun $Z/A = 1/2$, va $R \cdot \rho = R(\frac{Z}{cM^2})$. Demak, bunday yutuvchi moddalar uchun $R \cdot \rho$ kupaytma taxminan doimiy kattalik.

3-masala. Energiyasi $E_p = 10 \text{ MeV}$ bo'lgan protonning havoda chiziqli yugurishi aniqlansin.

Yechilishi: Oldin protonlar boshlang'ich tezligida harakatlanayotgan α -zarraning kinetik energiyasini topamiz:

$$\frac{T_p}{T_\alpha} = \frac{m_p v_p^2 / 2}{m_\alpha v_\alpha^2 / 2} = \frac{m_p}{m_\alpha} \approx \frac{1}{4}$$

Energiyasi $T_\alpha = 40 \text{ MeV}$ bo'lgan-zarraning havodagi chiziqli yugu-rishi:

$$R_\alpha = 0,148 \quad T_\alpha^{1,8} = 114 \text{ cM}$$

Havoda bir xil boshlang'ich tezlik bilan harakatlanayotgan ikki turdagi zarrachalar uchun chiziqli yugurishlar nisbati:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2$$

bu yerda m_1 va m_2 -zarralar massalari, q_1 va q_2 -esa ularning zaryadlari. Bizning hol uchun:

$$\frac{R_p}{R_\alpha} = \frac{m_p}{m_\alpha} \left(\frac{2e}{e} \right)^2 = 4 \frac{m_p}{m_\alpha} = 4 \cdot \frac{1}{4} = 1$$

Bu yerdan R_p ni topamiz:

$$R_p = R_\alpha = 114 \text{ cM}$$

Javob: 114 sm.

4-masala. Kinetik energiyasi $0,2 \text{ MeV}$ bo'lgan alfa zarra, proton va elektronlarning fotoemulsiyadagi qora izlar zichlik-lari nisbatlarini taxminiy baholang.

Yechilishi: Norelyativistik zarralar uchun ionizatsion yo'qotishlar nisbatlarini quyidagiga teng:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_\alpha : \left(\frac{dE}{dx}\right)_p : \left(\frac{dE}{dx}\right)_e \approx \frac{Z_\alpha^2}{v_\alpha^2} : \frac{1}{v_p^2} : \frac{1}{v_e^2} = 4m_\alpha : m_p : m_e$$

Fotoemulsiyadagi izlarning zichligi, taxminan ionizatsion yo'qotishlarga proporsional.

5-masala. Energiyasi 10 GeV bo'lgan elektron va proton uchun ionizatsion yo'qotishlar nisbatlarini baholang.

Yechilishi:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_e : \left(\frac{dE}{dx}\right)_p = \frac{2\pi e^4 zN}{mc^2} \left\{ \ln \frac{E_e^2}{2I^2 \sqrt{1-\beta_e^2}} + \frac{1}{8} \right\} = \frac{4\pi e^4 zN}{mc^2} \ln \frac{mc^2}{I^2 (1-\beta_p^2)}$$

Bu holda ikkala zarra ham relyativistik bo'lgani uchun, ularning ionizatsion yo'qotishlari nisbati yuqoridagiga teng.

Bu yerda I -moddaning ionizatsiya potentsiali bo'lib, u tartib raqami kichik bo'lgan yutuvchi moddalar uchun $I \sim 100 \text{ eV}$ ga teng.

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta_e^2}} = \frac{E_e}{mc^2} = 2 \cdot 10^4; \quad \frac{1}{\sqrt{1-\beta_p^2}} = \frac{E_p}{m_p c} \approx 10$$

ekanligidan ionizatsion yo'qotishlar nisbatini topamiz:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_e : \left(\frac{dE}{dx}\right)_p \approx 2$$

Javob: 2.

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

3.1. Preparat qalinligi oshganda ham, qayd qilinayotgan alfa nurlanishlar intensivligi oshmaydigan radioaktiv ^{238}Ru manba qalinligini aniqlang. Alfa-zarralar energiyasi 5,5 MeV. (*Javob:* $R = 3,3 \text{ m}^2 / \text{cm}^2$).

3.2. Fotoemulsiyadagi zarralar izining oxiri nima uchun kengayishini tushuntiring.

3.3. Elektron va protonni radiatsiya orqali yo'qotishlar nisbatini baholang (*Javob:* $W_e:W_p = a_e^2:a_p^2 \cong m_p^2:m_e^2 = 3 \cdot 10^6$).

3.4. Havoda yugurish yo'li 6 m bo'lgan elektronlar oqimidan himoyalani uchun alyuminiydan tayyorlangan ekran qalinligini aniqlang. (*Javob:* 3 mm).

3.5. Energiyasi $E_e = 5 \text{ MeV}$ bo'lgan α -zarrachaning berilidagi ($A = 9$, $\rho = 1800 \text{ kg} / \text{m}^3$) massaviy va chiziqli yugurishi topilsin. (*Javob:* $33,5 \text{ g} / \text{m}^2$, $18,5 \text{ mkm}$).

3.6. Energiyasi 1 MeV bo'lgan gamma-kvantlar oqimini 1000 marta kamaytiruvchi quyidagi yutuvchi moddalarning qalinligini toping: 1) qo'rg'oshin, 2) grafit. Energiyasi 1 MeV gamma-kvantni qo'rg'oshinda oqim kamayishi effektiv kesimi 24 barn. (*Javob:* $x(\text{Pb}) = 8,5 \text{ sm}$; $x(\text{C}) = 40 \text{ sm}$).

3.7. Erkin elektronlarda fotoeffekt hodisasi sodir bo'lmasligini ko'rsating.

3.8. Vakuumda gamma-kvant elektron-pozitron juftiga aylanganligini isbot qiling.

NAZORAT SAVOLLAR

1. Zaryadlangan og'ir zarralar modda orqali o'tganda qanday jarayonlar sodir bo'ladi?

2. Og'ir zarralarning o'rtacha yugurish yo'li deb qanday kattalikka aytiladi?

3. Ionizatsiya deb qanday jarayonga aytiladi?

4. Solishtirma ionizatsion yo'qotish nima?

5. Elektron modda orqali o'tganda energiyasini qanday jarayonlarga sarflaydi?

6. Elektronlar radiatsion nurlanishlari qanday kattaliklarga bog'liq bo'ladi?

7. Gamma-kvantlar modda orqali o'tganda ularning intensivligi qanday qonun bo'yicha kamayadi?

TEST SAVOLLAR

1. Ionizatsiya jarayoni deb ... aytiladi.

A) Neytral atom yoki molekullardan ionlar hosil bo'lishiga

B) Ionlardan molekullar hosil bo'lishiga

C) Kimyoviy elementlardan molekullar hosil bo'lishiga.

D) Molekulalardan atomlar hosil bo'lishiga.

2. O'rtacha ionizatsion yo'qotish nimaga teng?

A) $\bar{I} \approx 13,5 \cdot Z \text{ eV}$

B) $\bar{I} \approx 100 \cdot Z \text{ eV}$

C) $\bar{I} \approx 13,5 \cdot AZ \text{ eV}$

D) $\bar{I} \approx 135 \cdot \sqrt{AZ} \text{ eV}$

3. Qanday zarralarga zaryadlangan engil zarralar deyiladi?

A) Elektron va pozitron

B) Proton va elektron

C) Ion va proton

D) Pozitron va neytron

4. Qanday zarralarga zaryadlangan og'ir zarralar deyiladi?

A) Pozitron va neytron

B) Proton, ion, alfa-zarra, triton

C) Ion va proton

D) Elektron va pozitron

5. Zaryadlangan og'ir zarralar modda orqali o'tganda asosan qanday jarayonlar sodir bo'ladi?

A) Protonlarning parchalanishi

B) Modda atomlarining uyg'onish va ionizatsiya jarayoni

C) Oon va protonlar hosil bo'ladi.

D) Pozitron va neytronlar hosil bo'ladi.

6. Zaryadlangan engil zarralar modda orqali o'tganda asosan qanday jarayonlar sodir bo'ladi?

A) Pozitron va neytronlar hosil bo'ladi.

B) Modda atomlarining uyg'onish va ionizatsiya jarayoni

C) Ionizatsiya jarayoni.

D) Modda atomlarining uyg'onishi, ionizatsiya va radiatsion nurlanishlar jarayoni

7. Solishtirma ionizatsion yo'qotish qanday kattaliklarga bog'liq bo'ladi?

A) Muhitdagi elektronlar konsentratsiyasiga, zarraning tezligi va zaryadiga

B) Muhitdagi elektronlar konsentratsiyasiga

C) Muhitdagi atomlar zaryadiga va diffuziya koeffitsientiga

D) Muhitning temperaturasiga va massasiga.

8. Zarralarning muhitdagi yugurish yo'li deb ... aytiladi.

A) Zarraning muhitda to'htaguncha bosib o'tgan yo'lga

B) Zarraning muhitda ikki marta bosib o'tgan yo'lga

C) Zarraning muhitda energiyasi ikki marta kamayguncha bosib o'tgan yo'lga

D) Zarraning muhitdan tashqarida bosib o'tgan yo'lga

9. Zarraning muhitdagi yo'lining uzunligi qanday kattalikka bog'liq bo'ladi?

A) Zarraning hajmiga

B) Zarraning traektoriyasiga

C) Zarra energiyasiga bog'liq bo'ladi.

D) Zarraning de Broyl to'lqin uzunligiga.

10. Elektronlar uchun radiatsion yo'qotishi qanday kattalikka bog'liq bo'ladi?

$$A) \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{vyp}} \approx Z^2 n T_e$$

$$B) \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{vyp}} \approx \sqrt{46Z^2 n T_e}$$

$$C) \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{vyp}} \approx 2AZ^2 n$$

$$D) \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{vyp}} \approx 300nT_e$$

11. Yuqori energiyalarda ya'ni radiatsion nurlanishlar ustunlik qiladigan energiyalarda muhitda zarra energiyasi qanday qonuniyat bo'yicha kamayadi?

$$A) E = E_0 e^{-x}$$

$$E = E_0 \sqrt{2} e^{-x}$$

B) $E = E_0 e^{-x/4}$

$$C) E = E_0 2^{-x/4}$$

$$D) E = E_0 2^{-x/4}$$

12. Vavilov-Cherenkov nurlanishi qanday hosil bo'ladi?

A) Zaryadli zarraning muhitdagi tezligi shu muhitdagi yorug'likning tarqalish tezligidan katta bo'lsa.

B) Zaryadlangan zarra tezligi nolga teng bo'lsa.

C) Zaryadlangan zarra tezligi yorug'likning vakuumda tarqalish tezligidan katta bo'lsa.

D) Zaryadlangan zarra harakatlanayotgan muhitning temperaturasi oshganda.

13. Sinxrotron nurlanishi qanday hosil bo'ladi?

A) Zaryadlangan zarra harakatlanayotgan muhitning temperaturasi oshganda.

B) Zaryadlangan zarra tezligi nolga teng bo'lsa.

C) Zaryadlangan zarralarning magnit maydonda relyativistik tezlik bilan harakatlanganda.

D) Zaryadlangan zarra tezligi yorug'likning vakuumda tarqalish tezligidan katta bo'lsa.

14. Gamma-nurlar modda orqali o'tganda uning intesivligi qanday qonuniyat bo'yicha kamayadi?

$$A) J = J_0 e^{-\mu x} \quad B) J = J_0 2^{-\mu x} \quad C) J = J_0 e^{-\mu \sqrt{2} x} \quad D)$$

$$J = \sqrt{3} J_0 e^{-\mu x}$$

15. Gamma-nurlarning yutilish koeffitsienti nimalarga bog'liq bo'ladi?

A) Muhit atomlarining zaryadiga.

B) Muhitning temperaturasiga va zichligiga

C) Gamma-kvant energiyasiga va yugurish yo'lining uzunligiga

D) Muhitning xususiyatiga va gamma-kvant energiyasi.

16. Gamma-nurlarning yutilishi qanday jarayonlar hisobiga sodir bo'ladi?

A) Fotoeffekt, Kompton effekti va elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi.

B) Fotoeffekt va Kompton effektlari.

C) Gamma-kvant energiyasiga va yugurish yo'lining uzunligiga

D) Muhit atomlarining zaryadiga.

17. Gamma-kvantlarning energiyasi qanday bo'lganda elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi sodir bo'ladi?

$$A) E_\gamma > 2m_e c^2 + 511$$

$$B) E_\gamma < 2m_e c^2$$

$$C) E_\gamma > 2m_e c^2$$

$$D) E_\gamma = 100m_e c^2$$

18. Fotoeffekt hodisasi qanday holatdagi elektronlarda sodir bo'ladi?

- A) Erkin elektronlarda.
- B) Bog'langan elektronlarda.
- C) Kuchsiz bog'langan elektronlarda
- D) Elektronlar holatiga bog'liq emas.

19. Kompton effekt hodisasi qanday holatdagi elektronlarda sodir bo'ladi?

- A) Kuchsiz bog'langan elektronlarda
- B) Bog'langan elektronlarda
- C) Erkin elektronlarda.
- D) Elektronlar holatiga bog'liq emas.

20. Elektronning Kulon maydonida elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi uchun gamma-kvantlarning ostona energiyasi qanday bo'lishi lozim?

- A) $E_\gamma > 4m_e c^2$
- B) $E_\gamma > 2m_e c^2$
- C) $E_\gamma > 2m_e c^2 + 511$
- D) $E_\gamma = 100m_e c^2$

IV BOB. YADRO NURLANISHLARINING TIBBIYOTDA QO'LLANILISHI

Yadro nurlanishlarining tibbiyotda tashxis qo'yishda va davolashda keng qo'llaniladi. Yadro nurlanishlari asosan radionuklidlar ko'rinishda tashxis qo'yishda qo'llaniladi. Radionuklid tashxisi yoki ayrim hollarda nishonlangan atomlar deb nomlangan metod qalqonsimon bez kasalligini aniqlash uchun qo'llaniladi. Shuningdek, bu metod qon va boshqa suyuqliklarning taqsimotini o'rganishga, yurak va boshqa a'zolarining kasalliklarini tashxis qo'yishga imkon beradi.

Keyingi vaqtlarda zamonaviy tashxis quyish metodlaridan biri bo'lgan pozitron emission tomografiya metodi tibbiyotda keng qo'llanilmoqda. Bu metod qisqa yashovchi radioizotoplarni qo'llashga asoslangan. Pozitron emission tomografiya (PET), uni ikki fotonli emission tomografiya ham deyiladi. Bu metodda inson va hayvonlarning ichki a'zolarini radionuklidli tomografiya yordamida o'rganiladi.

Yadro nurlanishlari tibbiyotda davolash sifatida ham keng qo'llaniladi. Tibbiyotda bu metod nur terapiyasi deb yuritiladi. Bu metod xavfli o'smalarni (saraton kasalligi) davolashda asosiy vosita hisoblanadi. O'smalarni nurlantirish uchun turli yadro nurlanishlari qo'llaniladi, ya'ni gamma-nurlanish, elektronlar, neytronlar, protonlar. Bu nurlanishlar manbalari sifatida reaktor, tezlatkichlar, radionuklid qo'rilmalar ishlatiladi.

Mazkur bobda yadro nurlanishlarni turli yadro qurilmalarida olish imkoniyatlari va ularning qo'llanilish sohalariga oid ma'lumotlar beriladi. Shuningdek PET metodining ishlash tamoyillari va uning fizikaviy asoslariga ham to'xtalib o'tiladi.

4.1-§. Dozimetriya asoslari

Ionlovchi yadro nurlanishlar, ya'ni zaryadlangan zarralar, gamma-nurlanish va neytronlar muhit orqali o'tganda muhit atomlari tarkibidagi elektronlar, atomlarning yadrolari bilan o'zaro tasirlashib, turli effektlarni yuzaga keltiradi. Bu effektlar uchinchi bobda batafsil yoritilib berilgan.

yuzaga keltiruvchi doza) o'lovchi birligi fanga kiritilgan va radiatsion dozimetriya yo'nalishiga asos solingan.

Ionlovchi nurlanish ta'siri ostida muhitda sodir bo'ladigan va qayd qilinadigan fizika-kimyoviy hodisalarning tabiatiga bog'liq holda ionlovchi nurlanishlarni aniqlash va qayd qilish ionizatsion, kimyoviy, ssintillyasion, fotografik va boshqa usullariga bo'linadi.

Dozimetriyada qo'llaniladigan fizik kattaliklar kutilayotgan radiatsiya effektlari bilan bog'liq bo'ladi. Odatda bu kattaliklar dozimetrik kattaliklar deyiladi. O'lovchi fizik kattaliklar va kutilayotgan radiatsiya effekti o'rtasidagi o'rnatilgan munosabatlar dozimetrik kattaliklarning eng muhim xususiyatidir. Dozimetriyada qo'llaniladigan asosiy fizik kattaliklar va ularning o'lovchi birliklari 4.1-jadvalda keltirilgan.

4.1-jadval
Asosiy dozimetrik kattaliklar va ularning o'lovchi birliklari

Fizika kattaliklar	Birligi, nomlanishi, belgilanishi		Birliklar orasidagi munosabat
	Tizimdan tashqari	Xalqaro birliklar tizimida	
Aktivlik	Kyuri (Ci, Ki)	Bekkerel (Bq, Bk)	$1 \text{ Bk} = 2,7 \times 10^{11} \text{ Ki}$ $1 \text{ Ki} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bk}$
Nurlanishning ekspozitsion dozasi	Rentgen (R, R)	Kulon/kg (C/kg, Kl/kg)	$1 \text{ K/kg} = 3876 \text{ R}$ $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^4 \text{ K/kg}$
Ekspozitsion dozaning quvvati	Rentgen/sekund (R/s, R/s)	Amper/kg (A/Kg, A/kg)	$1 \text{ A/kg} = 3876 \text{ R/s}$ $1 \text{ R/s} = 2,58 \times 10^4 \text{ A/kg}$
Nurlanishning yutilgan dozasi	Rad (rad, rad)	Grey (Gy, Gr)	$1 \text{ Gr} = 100 \text{ rad}$ $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gr}$
Yutilgan dozaning quvvati	Rad/sekund (rad/s, rad/s)	Grey/sekund (Gy/s, Gr/s)	$1 \text{ Gr/s} = 100 \text{ rad/s}$ $1 \text{ rad/s} = 0,01 \text{ Gr/s}$
Nurlanishning integral	rad-gramm	Djoule (J, Dj)*	$1 \text{ Dj} = 10^5 \text{ rad-g}$

Turli jismlarda, jumladan tirik organizm to'qimalarida ham. nurlanishlar ta'sirida malum energiya yutiladi va ulardagi atomlar ionlashadi yoki uyg'ongan holatga o'tadi. Shuning uchun ham nurlanish dozasi o'lovchi asosan ionizatsiya natijasida hosil bo'lgan zaryad miqdorini o'lovchi asoslangan bo'lishi mumkin. Haqiqatan ham, gamma-kvantlar muhit orqali o'tganda yuqorida aytilgan effektlar natijasida elektron yoki pozitronlar yuzaga keladi.

Nurlanish ta'sirida tirik organizm xujayrasida turli o'zgarishlar yuz beradi. Masalan, nurlatilgan hujayralarning bo'linish mexanizmi va xromosoma apparati buziladi, hujayralarning yangilanish va bo'linish jarayonlari susayadi va x.k. Nurlanish organizmning turli qismlariga turlicha ta'sir ko'rsatadi. Masalan, ilik, qora taloq, jimsiy bezlar kabi hujayralari doimo yangilanib turuvchi to'qima va a'zolariga radioaktiv nurlanishlar ta'siri ayniqsa kuchli bo'ladi. Hujayralarning shikastlanishi va nobud bo'lishi esa alohida a'zolarining ishlash funksiyasining buzilishiga sabab bo'ladi va bular o'z navbatida kishi organizmning halok bo'lishiga olib keladi.

Ionlashtiruvchi nurlanishlarning tirik organizm xujayrasiga ta'sirini o'rganish bo'yicha olib borilgan fundamental va amaliy tadqiqotlar natijasida yangi fan - radiologiya vujudga keldi. Radiologiya - turli kasalliklarni tashxislash va davolash uchun inson tanasida ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirini o'rganadigan tibbiyotning maxsus bo'limi. Ushbu fanning tamoyillariga asoslangan radiatsion terapiya bugungi kunda onkologiyani jarrohlik va kimyoterapiya bilan birga davolashda keng qo'llaniladi. Bu fanda ionlashtiruvchi nurlanishlarning tirik organizmga salbiy ta'sirining ijobiy tomonidan keng foydalaniladi, ya'ni mazkur nurlanish yordamida xavfli o'smalarni mayjud bo'lgan soha nurlantiriladi. Bu nurlanishlar natijasida saraton xujayralarining DNK strukturasi buziladi va ular kupayish va bo'linish qobiliyatini yo'qotadilar.

Dozimetriya - ionlashtiruvchi nurlanishni o'lovchi usullari va quvimlari, radioaktiv nurlanishning biologik organizmga ta'sir darajasini miqdoriy ko'rsatkichlar asosida tavsiflash xaqidagi nazariy va amaliy bilimlar majmuasi hisoblanadi.

1901-yilda A.Bekkerel va Mariya Sklodovskaya-Kyuri, Per Kyuri tomonidan radiatsion nurlanishning teriga kuydiruvchi ta'sir ko'rsatishi qayd qilingan va rentgen nurlanishining biologik ta'sirini ifodalash uchun dastlabki - HED (Haut erithem dosis - teri eritemasini

dozasi	(rad-g, rad-g)	$1 \text{ rad-g} = 10^{-5} \text{ Dj}$
Nurlanishning ekvivalent dozasi	Ber (rem, ber)	$1 \text{ Zv} = 100 \text{ ber}$ $1 \text{ ber} = 0,01 \text{ Zv}$
Ekvivalent doza quvvati	Ber/sekund (rem/s, ber/s)	$1 \text{ Zv/s} = 100 \text{ ber/s}$ $1 \text{ ber/s} = 0,01 \text{ Zv/s}$

Ushbu jadvalda keltirilgan kattaliklar bilan tanishib chiqamiz. Dozimetriyada asosan to'rtta nurlanish dozasi qo'llaniladi, ya'ni ekspozitsion doza, yutilgan dozasi, integral doza va ekvivalent doza. Ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirini baholash uchun dozimetriyada qabul qilingan asosiy fizik kattalik bu yutilgan doza yoki oddiygina nurlanish dozasi hisoblanadi. Nurlanish dozasi bu nurlanayotgan moddaning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasidir. Agar modda hajmi elementining massasi dm va o'rtacha yutilgan energiya dE bo'lsa, nurlanish yutilgan dozasi quyidagi formula bilan aniqlaniladi:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Halqaro o'lchov birliklari tizimida yutilgan doza qiymati o'lchov birligi Grey (Gr) hisoblanadi:

$$1 \text{ Gr} = 1 \text{ J/kg}$$

Shuningdek, yutilgan dozani o'lchashda Halkaro o'lchov birliklari tizimidan tashqari o'lchov birligi sifatida Rad ishlatiladi:

$$1 \text{ Rad} = 0,01 \text{ Gr}$$

Yutilgan nurlanish dozasini bevosita aniqlash qiyin masala hisoblanadi, shu sababli ekspozitsion doza deb nomlangan kattalikdan foydalaniladi.

Ekspozitsion doza deb gamma-nurlar ta'sirida havoning elementar hajmida hosil bo'lgan bir xil ishorali barcha ionlar to'liq zaryadining mazkur hajmdagi dm havo massasiga nisbatiga aytiladi:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

bu yerda dQ - havoning elementar hajmida hosil bo'lgan bir xil ionlari ionlarning to'liq zaryadi. Ushbu ionlar havoning elementar hajmida fotonlar ta'sirida yuzaga kelgan barcha ikkilamchi elektronlar tormozlanishi natijasida hosil bo'ladi.

Ekspozitsion doza rentgen va gamma-nurlarining ionlash qobiliyatini belgilaydi va atmosfera havosining birlik massasi bo'yicha zaryadlangan zarrachalarning kinetik energiyasiga aylantirilgan nurlanish energiyasini ifodalaydi.

Ekspozitsion doza birligi Xalqaro o'lchov tizimida Kl/kg qabul qilingan. Shuningdek, amalda va ilmiy adabiyotlarda ekspozitsion dozaning Xalkaro o'lchov birliklari tizimidan tashqari o'lchov birligi sifatida Rentgen (R) ham ishlatiladi:

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Kl/kg}$$

Jonli to'qimalar nurlanishining individual ta'sirini o'rganish shuni ko'rsatdiki, xuddi shu yutilgan dozalarda, turli xil nurlanishlar organizmga bir xil bo'lmagan biologik ta'sir ko'rsatadi. Bu og'ir zarralar (masalan, proton) to'qimada yo'l birligida engil zarralarga (masalan, elektron) nisbatan ko'proq ion hosil qilishi bilan bog'liq. Bir xil yutilgan dozada, nurlanish hosil qilgan ionizatsiya zichligi qanchalik katta bo'lsa, shu nurlanishning radiobiologik halokat ta'siri shunchalik yuqori bo'ladi. Ushbu ta'sirni hisoblash uchun ekvivalent doza tushunchasi joriy etilgan. Ekvivalent doza, yutilgan dozaning qiymatini maxsus koeffitsent - nisbiy biologik samaradorlik koeffitsenti (RBE) yoki sifat koeffitsentiga ko'paytirish bilan hisoblanadi

$$D_{\text{ekv}} = \sum D_i K_i$$

Xalqaro o'lchov birliklari tizimida ekvivalent doza qiymati o'lchov birligi Zivert (Zv) hisoblanadi. Shuningdek, ekvivalent dozani o'lchashda Xalqaro o'lchov birliklari tizimidan tashqari o'lchov birligi sifatida Ber (B) ishlatiladi: $1 \text{ Ber} = 0,01 \text{ Zv}$. Hozirgi vaqtda ishlab chiqariluvchi barcha turdagi dozimetrlar Zv o'lchov birligi shkalasi bo'yicha belgilanadi. Zivert (Zv) o'lchov birligi Shvetsiya'lik radiofiziki Rolf Zivert sharafiga qo'yilgan.

Turli nurlarning biologik ta'sirini taqqoslash uchun sifat koeffitsenti (SK) yoki nisbiy biologik effektivlik deb ataluvchi

$$D \leq 5(N - 18),$$

bu yerda N - radioaktiv nurlanish manbalar bilan ishlayotgan odamning yoshi, 18 - radioaktiv manbalar bilan ishlashni boshlangan yosh, 11-18 da formula ma'nosini yo'qotadi, chunki yoshi 18 dan katta bo'lgan xodimlar radioaktiv nurlanish bilan bog'liq bo'lgan xavfni yo'qotib qolgan bo'lgan. Hamma hollarda yoshi 30 yoshga to'lgan odam uchun uning organizmida to'plangan doza 60 byerdan ortiq bo'lmaydi.

Dozimetriyada dozalardan tashqari doza quvvati deb nomlangan birliklardan ham foydalaniladi. Vaqt birligi ichida nurlanish dozasiga doza quvvati deyiladi. Mos ravishda, yutilish dozasi va doza quvvati quyidagi ifodalarda orqali ifodalanadi:

$$P_{nm} = \frac{D}{t}; P_{sv} = \frac{X}{t}$$

Doza quvvatining o'lchov birligi: yutilgan doza quvvati - Gr/s (rad/s); eks-pozitsion doza quvvati - R/s.

4.2-§. Ionlashtiruvchi radiatsiyaning biologik ta'sir mexanizmi

Ionlashtiruvchi radiatsiyaning ta'sirida organizmdagi atom va molekulyar tuzilishlar va bu esa organizmdagi kimyoviy birikmalar tarkibidagi o'zgarishga va normal molekulyar birikmalarda o'zgarish sodir bo'lishiga olib keladi. Bu o'z navbatida tirik organizmda moddalarning almashinuvining buzilishiga va organizmda moddalarning tarqalishiga olib keladi. Yuqori energiyali ionlashtiruvchi radiatsiyaning ta'siri uzoq vaqt davom etsa, ba'zi bir moddalarning halokati kuzatiladi va bu ayrim a'zolarining, hattoki odam organizmning halokati bilan tugaydi.

Ionlashtiruvchi radiatsiyaning biologik ta'sir quyidagi xarakteristik bo'linadi: determinatsion ta'sir, stoxastik ta'sir.

Determinatsion ta'sir — bu og'irlik darajasi radiatsion ta'sir natijasida yuzaga keladigan biologik ta'sir bo'lib, uning natijasida yuzaga keladigan kasalliklar, katarakta, bepustlik kabi patologik holatlar yuzaga kelishi bilan ifodalanadi.

kattalikdan foydalaniladi. Bu kattaliklar energiya yutilishi bir xil bo'lganda ko'rilayotgan nurlanishning biologik ta'siri gamma-nurlanishning biologik ta'siridan necha marta katta ekanini ko'rsatadi. nurlanishning biologik ta'siridan necha marta katta ekanini ko'rsatadi. 4.2-jadvalda nurlanishlarning sifat koeffitsienti (SK) qiymatlari keltirilgan.

4.2-jadval

Nurlanish turlari va energiya diapazoni	Nurlanishlarning sifat koeffitsienti (SK)	Sifat koeffitsienti (SK)
Gamma va rentgen nurlar	1	1
Barcha energiyadagi elektrodlar	1	1
Alfa-zarralar ($E_\alpha \leq 10 \text{ MeV}$)	10	10
Protonlar ($E_p \leq 10 \text{ MeV}$)	10	10
Og'ir tepki yadrolari	20	20
Issiq neytronlar	3	3
Energialari quyidagi diapozondagi neytronlar		
5 keV	2.5	2.5
20 keV	5	5
100 keV	8	8
500 keV	10	10
1 MeV	10.5	10.5
5 MeV	7.0	7.0
10 MeV	6.5	6.5

Ionlovchi nurlanishlarning manbalar bilan ishlaganda radiatsion xavfsizlik masalalar hal qilish uchun chegaraviy ruxsat etilgan ekvivalent doza tushunchasidan keng foydalaniladi. Agar xodimning yillik olgan nurlanish dozasi shu chegara ekvivalent dozadan ortmasa, bunday nurlanish ta'sirida 50 yil davomida ishlaganda ham xodimning sog'ligida sezilarli o'zgarish yuz bermaydi.

Radioaktiv nurlanishlar ta'sirida ishlovchi kishilar (A kategoria) uchun chegara ekvivalent doza 5 ber/yil (0,05 Zv/yil) deb belgilangan. Boshqa kategoriyadagi kishilar uchun bu qiymat kamidan 10 marta kichik bo'lishi kerak. Har xil yoshdagi (A kategoria) xodimlarning olishi mumkin bo'lgan chegaraviy yig'indi dozaning qiymati quyidagi formuladan aniqlanadi:

Stoxastik ta'sir — radiatsion nurlanish dozasi pag'ona qiymatiga ega bo'lmagan tavsifda, nurlanishdan keyin ma'lum vaqt davomida rivojlanuvchi o'sma kasalliklari, leykoz va irsiy kasalliklar yuzaga kelishi bilan ifodalanadi.

Radiatsion nurlanishning stoxastik ta'siri: A. Leykemiya (qon saratoni); B. Oshqozon limfomasi (saratoni); V. Melanoma (teri saratoni).

Shuningdek, radiatsion nurlanishning biologik ta'siri oqibatlariga ko'ra, quyidagi 3 ta guruxga ajratiladi:

O'tkir zararlantiruvchi dozada radiatsion nurlanish ta'sirida quyidagidek, jumladan, odam organizmida $\sim 0,5-1$ Zv (50-100 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida qon tizimida jiddiy buzilishlar yuzaga keladi. Shuningdek, $\sim 3-5$ Zv (300-500 Ber) radiatsion nurlanish olgan holatda, suyak iligi funksiyasi buzilishi va qon tarkibida leykotsitlar miqdori keskin kamayishi sharoitida, nurlanish olgan $\sim 50\%$ odam o'tkir nur kasalligi oqibatida olamdan o'tishi kuzatiladi. $\sim 10-50$ Zv (100-5000 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida, 1-2 haftadan keyin oshqozon-ichak tizimi shilliq qavati-da xujayralarning nobud bo'lishi natijasida, qon ketishi oqiba-tida olamdan o'tish holati qayd qilinadi. 100 Zv (10 000 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida markaziy asab tizimi funksiyasi izdan chiqishi oqibatida odam bir necha soat yoki bir necha kundan keyin olamdan o'tishi kuzatiladi. Shuningdek, rivojlanayotgan va voyaga etgan odam organizmida bir xil radiatsiya dozasi turli hil ta'sirga ega bo'lishi aniqlangan. Jumladan, o'sayotgan organizmda bo'linish jarayoni jadal amalga oshayotgan xujayralar radiatsion nurlanish ta'sirida nisbatan tez nobud bo'ladi.

Davomiylikda (vaqt o'tishi bilan, asta-sekin) yuzaga ke-luvchi nurlanish oqibatlarini. Tajriba hayvonlari ustida amalga oshirilgan tadqiqotlar va shuningdek, Xirosima va Nagasaki (Yaponiya) shaharlarida atom bombasi portlatilishi oqibatlarini tahlil qilish asosida, radiatsion nurlanish nafaqat odam organizmiga nurlanish kasalligi shaklida namoyon bo'lishi, balki vaqt o'tishi bilan, asta-sekin davomiylikda yuzaga keluvchi oqibatlar ko'rinishida ham kuzatiladi.

Radiatsion nurlanish ta'sirida biologik organizm hujayra-larida yuzaga keluvchi buzilishlar qaytmas tavsifga ega bo'lib, turli hil kasalliklar, jumladan o'sma kasalliklari kelib chiqishiga sabab bo'ladi. Masalan, radiatsion nurlanish ta'sirida yuzaga kelgan leykoz oqibatida

o'tirish muddati o'rtacha 10 yilni tashkil qiladi. Radiatsion nurlanish ta'sirida o'sma kasalliklarining kelib chiqish ehtimolligi doimiy radiatsiya dozasi bog'liq hisoblanadi. Masalan, 1 Zv (100 Ber) radiatsion nurlanish ta'siriga uchragan har 2 tadan bitta odam organizmida leykoz, 10 tadan bitta odamda qalkonsimon bez o'sma keladi, 10 tadan bitta ayolda ko'krak bezi saratoni, shuningdek har 1000 tadan 5 ta odamda o'pka saratoni kasalligi yuzaga kelishi kutilgan. Yuqorida keltirilgan ma'lumotlar asosida, qayd qilish mumkin, voyaga etgan odam organizmida 0,01 Zv (1 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida o'sma (saratoni) kasalligi kelib chiqish ehtimolligi $2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$ ga teng hisoblanadi.

Radiatsion nurlanishning genetik oqibatlarini. Amalga oshirilgan tadqiqotlar natijasida, surunkali tavsifda 1 Zv (100 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida odam organizmi avlodlari davomida 10 yil davomida har 1000 ta tugilgan chaqaloqdan 2 tasi jiddiy genetik nuqson bilan dunyoga kelishi aniqlangan. Agar, radiatsion nurlanish ta'siri doimiy ravishda, surunkali tarzda qayd qilinsa, u holda genetik mutatsiyalarga uchrash ehtimolligi darajasi ham ortadi.

Nisbiy biologik ta'sir effekti. Nisbiy biologik ta'sir effekti (NBE) bu xil ta'sirga olib keladigan standart nurlanish dozasi bilan o'ralgan biologik ta'sirga olib keladigan radiatsiya dozasi taqqoslash yo'li bilan baholanadi. Nisbiy biologik ta'sir effektiining baholanishi quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$K_{nb} = \frac{D_y}{D_x}$$

bu yerda D_y - rentgen yoki γ -nurlanishlarning yutilgan dozasi, D_x - shu effektaga vujudga keltiruvchi o'rganilayotgan yutilish dozasi.

Biologik organizmlarning radiatsion nurlanish ta'siriga chidamlilik darajasi. Biologik organizmlar radiatsion nurlanish ta'siriga chidamlilik xususiyati bo'yicha o'zaro farqlanadi. Masalan, radiatsion nurlanish ta'sirida 30 sutka davomida nurlantirilgan hayvonlarning 50% qismi nobud bo'lishi qayd qilinuvchi radiatsiya dozasi - dengiz chuchqasi uchun - 250 Rentgen, it uchun - 335 Rentgen, maymun uchun - 600 Rentgen, sichqonlar uchun - 550-650 Rentgen, ilon uchun - 8000-20000 Rentgen ga teng hisoblanadi. Shuningdek, ayrim achiqji turlari 30 000 Rentgen, amyoba - 100000 Rentgen, infuzoriya - 300000 Rentgen radiatsion nurlanish ta'sirida

nobud bo'lishi aniqlangan. O'simlik turlari orasida karam o'simligi urug'lari unuvchanligiga 64000 *Rentgen* nurlanish sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatmasligi qayd qilingan.

Radiatsion nurlanish ta'siriga sezgirlik (radiosezgirlik) - bu hujayra, to'qima va biologik organizmning ionlashtiruvchi nurlanish ta'siriga ko'rsatuvi javob reaksiyasining namoyon bo'lish darajasi hisoblanadi. Radiosezgirlik o'lchov birligi sifatida nurlanish dozasi (Gr) qiymatidan foydalaniladi.

Radiosezgirlik xossasi biologik turlarda va shuningdek, organizmlarda yakka tartibda o'zaro farqlanadi.

Turli xil biologik turlarning radiosezgirlik xossasini o'zaro solishtirishda LD_{50} qiymatidan foydalaniladi. LD_{50} - radiatsion nurlanish ta'sirida nurlanish olgan organizmlarning 50% qismi nobud bo'lishi qayd qilinuvchi doza hisoblanadi.

Wangiella dermatitidis, Cryptococcus neoformans, Cladosporium sphaerospermum mikroskopik zambrug' turlari hujayralarida radiatsion nurlanish ta'sirida biosintez jarayoni faollashishi (radiostimulyasiya) qayd qilinadi.

4.3-jadval
Ayrim biologik turlarning γ -nurlanish ta'siri sharoitida LD_{50} qiymati

Biologik tur	LD_{50} (Gr)
<i>Micrococcus radiodurans</i>	>2000
O'simlik turlari	10-1500
Hasharot turlari	10-100
Ilon turlari	80-200
Baliq turlari	8-20
Qush turlari	8-20
Sichqon liniyalari	6-15
Kalamush liniyalari	7-9
Quyov	9-10

buladan, A.Eynshteyn kolleji (Angliya) tadqiqotchilari tomonidan atom reaktorlarida hayot kechiruvchi ayrim mikroskopik o'simlik turlari, masalan - *Wangiella dermatitidis* aynan, radiatsion nurlanish energiyasidan biosintez jarayonida foydalanishi mumkinligi ta'kid qilingan.

2007 yilda amalga oshirilgan tadqiqotlar davomida Chernobyl atom baliqchilik xududida qurilgan «sarkofag» ichki qismidan yig'ib olingan mikroskopik zambrug'lar tarkibida yuqori samaradorlikka ega bo'lgan antioksidant tizim funksiya bajarishi aniqlangan.

4.3. §. Tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar

Tabiiy diagnostikaning (tashxislash) asosiy masalasi bu inson uchun zararli strukturasi o'rganishdan (vizualizatsiyalashdan) iborat. Turli tibbiyot tashxis qo'yish metodini 3 ta guruhga bo'lish mumkin:

- Rentgenografiya, kompyuterli rentgen tomografiyasi;
- Magnit-rezonansli tomografiya (yadromagnit rezonansli tomografiya);
- Tashxis qo'yish uchun radionuklidlardan foydalanish;
- Emission tomografiya.

Radionuklidlar tibbiyotning turli sohalarida diagnostik (tashxis) tadqiqotlari o'tkazish uchun keng qo'llaniladi.

Umumiy holda tibbiyotda radionuklidlar ikki yo'nalishda, ya'ni diagnostika va davolashda qo'llaniladi. Diagnostik tibbiyotda radionuklidlar turli tahlillar uchun qo'llanilmoqda, ya'ni qalqon-simon bo'yig'i funksiyasini tadqiq qilishda, qon hajmini aniqlashda, buyrak va jigar funksiyalarini tadqiq qilishda, B vitamini-nining inson organizmida hazm bo'lishini o'rganishda, ichaklarda yog'larning tarqalishini buzilishini tekshirishda, temir almashi-nuvini o'rganishda, yurak-tomir sistemalarining hajmini aniqlashda, jigar uchun o'rganishda va h.k. Hozirgi vaqtda keng qo'llanilayotgan tibbiyot radionuklidlar siklotron va yadro reaktorlarida ishlab chiqilgan. Shu bilan bir vaqtda radionuklidlar ishlab chiqarishning asosiy elektron tezatgichlarda ham kuzatilmoqda. Tibbiyotda qo'llaniladigan radionuklidlarni ularning xususiyatlari bo'yicha shartli ravishda sinflarga bo'ldik.

Tashxis qo'yishda (diagnostikada) qo'llaniladiganlarni ikkiga, ya'ni β^+ - nurlatgichlar va γ -nurlatgichlar. Bunday maqsadlarda qo'llaniladigan radionuklidlar axborot tashuvchi radionuklidlar bo'lib hismat qiladi.

Beta-nurlatgichlarning yarim emirilish davri sekundan bir necha soatgacha. Bunday radionuklidlar pozitron-emission tomografiyada (PET) qo'llaniladi.

Hozirgi kunda tashxis qo'yishda qo'llanilayotgan va qo'llanilishi mo'jallanayotgan radionuklidlar bo'yicha ma'lumotlar to'planib, ularni ma'lum bir tartibda joylashtirib chiqildi. Bu ma'lumotlar 4.4-jadvalda keltirilgan.

4.4 -jadval
Radionuklidlar xususiyatlari

R*	T _{1/2}	E _γ , keV	R	T _{1/2}	E _γ , keV	R	T _{1/2}	E _γ , keV
⁷ Be	53,2 sut	478	^{81m} Kr	13 s	190	¹²⁸ Cs	3,6 min	441
²⁸ Mg	21,1 soat	401	^{85m} Kr	4,5 soat	151	¹²⁹ Cs	32,1 soat	372
²⁸ Al	2,2 min	1779	⁸¹ Rb	4,6 soat	190	^{133m} Ba	38,9 soat	276
³⁸ Cl	37,2 min	1642	⁸⁵ Sr	64,8 sut	514	^{137m} Ba	2,6 min	662
⁴³ K	22,6 soat	373	^{87m} Sr	2,8 soat	388	¹³⁴ La	6,5 min	605
⁴⁷ Sc	3,4 sut	159	^{89m} Y	16,1 s	909	¹³⁹ Ce	138 sut	166
⁵¹ Cr	27,7 sut	320	^{90m} Nb	18,8 s	122	¹⁴⁰ Pr	3,4 min	307
⁵⁴ Mn	312,2 sut	835	⁹⁵ Tc	20,0 soat	766	¹⁴⁴ Pr	17,3 min	697
⁵⁵ Fe	8,3 soat	169	^{97mTc}	89 sut	96,5	¹⁵⁷ Dy	8,1 soat	326
⁵⁹ Fe	44,5 sut	1099	^{99mTc}	6,0 soat	141	¹⁶⁷ Tm	9,3 sut	208
⁵⁵ Co	17,5 soat	477	⁹⁷ Ru	2,9 sut	216	¹⁶⁹ Yb	32 sut	63
⁵⁷ Co	272 sut	122	^{103m} Rh	56,1 m	40	¹⁷² Lu	6,7 su	109

R*	T _{1/2}	E _γ , keV	R	T _{1/2}	E _γ , keV	R	T _{1/2}	E _γ , keV
⁶⁵ Cu	9,7 m	1173	^{109m} Ag	39,6 s	88	^{195m} Pt	4,0 sut	130
⁶⁴ Cu	12,7 in	1346	¹¹¹ In	2,8 sut	171	^{183m} W	5,2 s	108
⁶⁷ Cu	61,8 soat	185	^{113m} In	99,5 min	392	^{191m} Ir	4,9 s	129
⁶⁵ Zn	9,3 soat	597	^{115m} In	4,5 soat	336	^{195m} Pt	4,0 sut	130
^{68m} Zn	13,9 soat	439	^{117m} Sn	13,6 sut	159	^{195m} Au	30,5 s	262
⁶⁸ Ga	9,4 soat	1039	¹¹⁷ Sb	2,8 soat	159	^{197m} Au	7,8 s	279
⁶⁷ Ga	61,8 soat	185	¹¹⁸ Sb	3,6 min	1230	¹⁹⁸ Au	2,7 sut	412
⁷² As	26 soat	834	¹²¹ Te	16,8 sut	573	¹⁹⁷ Hg	64,1 soat	77
⁷⁴ As	17,8 sut	596	^{123m} Te	119,7 sut	159	^{197m} Hg	23,8 soat	134
⁷² Se	8,4 sut	46	¹²³ I	13,3 soat	159	²⁰³ Hg	46,7 sut	279
⁷³ Se	7,2 soat	361	¹³¹ I	8,1 sut	365	¹⁹⁹ Tl	7,4 soat	455
⁷⁵ Se	120 soat	136	¹³² I	2,3 soat	668	²⁰¹ Tl	72,9 soat	167
⁷⁷ Br	56 soat	239	^{127m} Xe	70 s	125	²⁰⁴ Bi	11,2 soat	668

* R - radionuklid, T_{1/2} - yarim parchalanish davri, E_γ - gamma-kvantlar energiyasi.

Hozirgi kunda tibbiyotda qo'llaniladigan radioizotoplarga bo'lgan talablar kundan kunga oshib, ularning nomenklaturasini esa kengayib bormoqda. Bu esa yuqorida keltirilgan radionuklidlar ro'yxatiga yangi qo'llanilish xususiyatlari keng bo'lgan radionuklidlarning qo'shilishiga olib keladi.

4.4-§. Radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo'llanilishi

Hozirgi kunda radioizotoplar (radioaktiv nuklidlar) va radiopreparatlar fan va texnikaning turli sohalarida keng qo'lla-

nilmoqda. Ionlovchi nurlanishlar manbai va radioaktiv indika-torlar metodlari qo'llanilmagan ilmiy izlanishlar yoki ishlab chiqarishlar sohalarni topish qiyindir. Bu metodlar qo'llanilib, amalga oshirish uchun mo'ljallangan muammolar soni doimo oshib bormoqda va bu esa o'z navbatida keng nomenklatura radioaktiv ni-shon birikmalari va radionuklidlarni olish va ajratish metod-larini rivojlantirishga yo'naltirilgan yadro fizikasi va radioximiya sohasidagi ilmiy tadqiqotlarni kengaytirish va chuqurlashtirish zarurligiga sabab bo'lmoqda.

Meditinsinada radioizotoplar ikki yo'nalishda, ya'ni diagnostika va terapiyada qo'llaniladi. Diagnostik meditsinada radioizotoplar har xil tahlillar uchun qo'llanilmoqda, ya'ni qalqonsimon bezning funksiyasini tadqiq qilishda, qon hajmini aniqlashda, buyrak va jigar funksiyalarini tadqiq qilishda, B₁₂ vitaminining inson organizmida hazm bo'lishini o'rganishda, ichaklarda yog'larning shimilishining buzilishini tekshirishda, temir almashinishini o'rganishda, yurak-tomir sistemalarining hajmini aniqlashda, jigar ishini o'rganishda va h.k. Hozirgi vaqtda keng qo'llanilayotgan ko'pchilik radioizotoplar siklotron va yadro reaktorlarida ishlab chiqarilgan. Shu bilan bir vaqtda radioizotoplarning ishlab chiqarishlarning o'sishi elektron tezlatgichlarda ham kuzatilmogda.

4.6-§. Yadro tibbiyotida qo'llanilayotgan radionuklidlarning sinflarga bo'linishi

Hozirgi kunda radioaktiv izotoplar quyidagi to'rtta yo'nalishlarda qo'llanilishi mumkin:

- 1) ilmiy tadqiqotlarda, sanoatda va meditsinada radio-aktiv indikator sifatida;
- 2) texnologik nazorat qiluvchi radioizotop asboblarda, modda tarkibini yadro-fizikaviy tahlil qiluvchi asbob va qurilmalarda;
- 3) radiatsion texnologiyalarda va radioterapiyada moddaga ta'sir qilish uchun kuchli nurlanish manbalari ko'rinishda;
- 4) "kichik" energetika (ya'ni issiqlik radioizotop manbalari), radioizotop termoelektron generatorlarda va atom bata-reyalarda radioaktiv yoqilg'i sifatida.

Tibbiyotda radioizotoplar ikki yo'nalishda, ya'ni diagnos-tika va davolashda qo'llaniladi. Tibbiyotda qo'llaniladigan radionuklidlarni ularning xususiyatlari bo'yicha shartli ravishda sinflarga bo'ldik.

Tashxislashda (diagnostikada) qo'llaniladiganlarni ikkiga, ya'ni maqsadlarda qo'llaniladigan radionuklidlar axborot tashuvchi radionuklidlar bo'lib hizmat qiladi.

Beta-nurlatgichlarning yarim parchalanish davri sekunddan bir necha soatgacha. Bunday radionuklidlar *pozitron-emission tomografiyada (PET)* qo'llaniladi.

Davolash maqsadida qo'llaniladigan radionuklidlar inson organizmidagi ma'lum bir a'zo yoki kasallikni keltirib chiqarayotgan xo'jayralarni nurlantirishga asoslangan. Bunda boshqa sog'lom xujayralarga minimal ta'sir qilishga xarakat qilinadi.

Davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlar quyidagi uchta guruhga bo'linadi:

- Energiasini **200÷2000 keV** sohada joylashgan β^- - *zarralar* chiqarayotgan β^- - *nurlatgichlar*,

- Yuqori chiziqli energiya uzatuvchi(**LPE ~100 keV/mkm**) va qisqa yugurish yo'lga (**50÷100 mkm**) ega bo'lgan α - *nurlatgichlar*,

- Elektron qamrash (**EQ**) yoki ichki elektron konversiya (**IEK**) bo'yicha parchalanadigan radionuklidlar.

Keyingi **30 yil** ichida **BFEKT** texnikasi yordamida bajariladigan tashxislash protseduralari asosan ^{99m}Tc preparati bilan amalga oshirilib kelinmoqda. Keyingi yillarda tezlatgichlar texnikasining rivojlanishi yangi radionuklidlarni ishlab chiqarishga imkon berdi. Hozirgi kunda **I-123, Tl-201, In-111, Cr-51, Ga-67, Kr-81m, I-131** va h.k. radionuklidlar tashxis qo'yishda keng qo'llanilmoqda. Pozitron nurlanuvchi radionuklidlar ichida asosan **C-11, N-13, O-15** va **F-18** radionuklidlari keng qo'llaniladi.

Hozirgi kunda bemorlarni davolashda nur terapiyasi ham keng qo'llanilmoqda. Bunda ochiq radioaktiv manba bilan bemorlarning a'zolari nurlantiriladi. Ochiq radioaktiv manbalar alohida yoki qo'shimcha vosita sifatida qo'llaniladi. Ushbu metod xavfli limfalanlarni, qalqonsimon bez rakini va h.k. larni nur terapiyasi yordamida davolash samarali hisoblanadi.

123 elektronlar chiqarmaydi va nisbatan qisqa yashovchi radioizotop hisoblanadi. Nurlanish dozasini bunday kamaytirish pediatriya va akusherlikda katta ahamiyatga egadir.

Yodning ba'zi bir radioaktiv izotoplarining xususiyatlari 4.5-jadvalda keltirilgan. 4.5-jadvalda ko'rinadiki yod-123 radionuklidi qulay ya'ni qisqa yarim parchalanish davriga va elektron qamrash jarayoni sodir bo'lishi bilan yod-131 dan ustun-likka ega. Shunga qaramasdan yod-131 radionuklidlari tibbiyotda qo'llanilib kelmog'da. Bu radionuklidni chaqaloq va ayrim bemor-larga qo'llash mumkin emas.

4.5-jadval.
Yodning ba'zi bir radioaktiv izotoplarining xususiyatlari

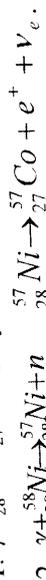
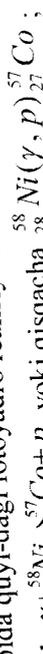
Izotop	¹²³ I	¹²⁴ I	¹²⁵ I	¹³¹ I
$T_{1/2}$	13,3 soat	4,18 kun	60,0 kun	8,05 kun
Parchalanish	ES	ES(77%), β^- (23%)	EC	β^-
Turi				
Nurlanish energiyasi, keV (intensivlik, parchalanish %)	$E_{\gamma}=529(1)$ 159(83) KX 28(87)	$E_{\beta}=2140(11)$ 1530(12) $E_{\gamma}=1691(11)$ 723(10) 603(63) 511(46) KX 28(56)	$E_{\gamma}=36(7)$ KX 28(150)	$E_{\beta}=606(89)$ 334(7) va boshqalar $E_{\gamma}=723(2)$ 637(7) 364(7) 284(82)

Tibbiyot amaliyotida tarkibida radioaktiv nuklid yod-131 bo'lgan preparatlar keng qo'llaniladi. Bu birinchi navbatda qalqonsimon bez va buyrak, shuningdek boshqa organlarni tekshirishda qo'llaniladi. Biroq ¹³¹I diagnostik mulojalar xavfli nurlanish dozasi ga olib keladi chunki bu radionuklid juda katta yarim emirilish davri, ya'ni 8 sutkaga ega va β^- zarralar chiqaradi. Masalan qalqonsimon bezni skaner qilganda organizmga aktivligi 0,5 bo'lgan yod-131 kiritiladi, natijada uning to'qimalari 100 rad doza oladi. Bunday tekshirishlarni chaqaloq a'zolarida o'tkazish esa katta xavf tug'diradi.

Yod-123 radioizotopi siklotronda va elektron tezlatgichlarda olinmoqda. Siklotronda yod-123 radionuklid quyidagi reaksiya yori-damida olinadi:

Inson organizmi funksiyasini tekshirishda keng qo'llaniladi-gan boshqa bir radioizotop bu kobalt-57 hisoblanadi. U B₁₂ vita-minining inson organizmida hazm bo'lishini tadqiq qilish uchun qo'llaniladi. Kobalt-57 nisbatan og'ir kobalt radioizotopiga nisbatan qisqa yashash vaqti va yuqori sanash effektivligi bo'yicha ustunlikka egadir. Hozirgi kunda ushbu radioizotop asosan siklotronda olinadi.

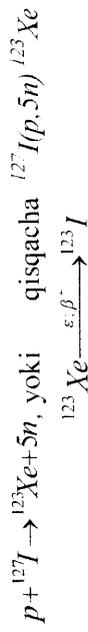
Elektron tezlatkichlarda kobalt-57 radioizotopini olish uchun kimyoviy tozaligi yuqori bo'lgan nikel metalli yuqori energiyali gamma-kvantlar nurlantiriladi va buning natijasida nikel-58 stabil izotopida quyi-dagi fotoyadro reaksiyalari sodir bo'ladi:



Birinchi reaksiya natijasida kobalt-57 bevosita hosil bo'ladi. Ikkinchi reaksiyada esa oldin nikel-57 radioizotopi hosil bo'lib, keyin unda β^- - parchalanish sodir bo'ladi, buning natijasida yadro-dan pozitron va neytrino chiqib ketadi va kobalt-57 radioizotopi hosil bo'ladi. Kobalt-57 va nikel-57 radioizotoplarining yarim parchalanish davri mos holda: 270 kun va 36 soat. Budan ko'rinadiki, birinchi reaksiyada kobalt-57 yuqori chiqishi(hosil bo'lish miqdori) kuzatiladi. Ikkinchi reaksiyadan ham foydalanish uchun nurlantirilgan nishonni kobalt-57 ajratib olishgacha $t > 3T_{1/2}$ ($t > 108$ soat) vaqt davomida ushlab turish lozim. Demak, 108 soatdan keyin kobalt-57 ni ajratib olish boshlansa, biz olayotgan radioizotop miqdori yuqori bo'lar ekan. Kobalt-57 radioizotopining gamma-nurlanishlar energiyasi (~130 keV) kichik bo'lib, inson organizmiga katta ta'sir ko'rsatmaydi. Shu sababli, bu radioizotop meditsinada keng qo'llanilib kelinmoqda.

4.6-§. Yod-123 radioizotopining tibbiyotda qo'llanilishi

Hozirgi kunda yadro tibbiyotida talab katta bo'lgan yana bir radioizotop bu yod-123 radioizotopidir. Yod bir necha radioaktiv izotoplarga ega bo'lib, bulardan yod-123 va yod-131 radionuklidlari tibbiyotda keng qo'llaniladi. Yod-131 o'rniga yod-123 qo'llanganda inson qalqonsimon bezining funksiyasi, qon hajmini o'ichashda, miyani onkologik tekshirishda, buyrak va jigami tekshirishda bemor oladigan nurlanish dozasini 100 marta kamaytiradi. Bunga sabab, yod-



${}^{123}\text{I}$ preparatining yuqori sifatini ko'rsatuvchi uning tarkibida ${}^{124}\text{I}$ va ${}^{125}\text{I}$ lar kam miqdorda bo'lishi hisoblanadi. Bularning ikkala-lasi ham radiatsion dozaning oshishiga olib keluvchi radioizotoplar hisoblanadi.

Keyingi paytlarda ${}^{123}\text{I}$ radioizotopi yuqori energiyali gamma-kvantlar yuzaga keltiradigan (γ, n) turdagi fotoyadro reaksiyalari natijasida ham olimmoqda. Ushbu reaksiyalar orqali ${}^{123}\text{I}$ radioizotopi olish imkoniyatlari o'rganish bo'yicha o'tkazilgan tajriba ishlarida bayon qilingan. Hozirda mavjud bo'lgan elektron tezlat-gichlar (elektronlar energiyasi 20 MeVdan ortiq) ya'ni yuqori ener-giyali (tormozli) gamma-kvantlar manbai hisoblangan chiziqli elektron tezlatgich va mikrotronlar yordamida meditsina diagnos-tikasi uchun ${}^{123}\text{I}$ radioizotopini ishlab chiqarishga mo'ljallangan xududiy markazlarning tarmog'larini yaratish muammosini hal qi-lishi mumkin.

Ushbu usullar reaksiya tarkibida sezilarli ${}^{124}\text{I}$ va ${}^{125}\text{I}$ aralash-malari bo'lmagan, eng yuqori sifatli preparat olishga imkon beradi. Elektron tezlatgichlarda esa ${}^{123}\text{I}$ radioizotopni olish quyidagi reaksiya orqali olish mumkin:



Bu reaksiya ostona energiyasi 10 MeV atrofida bo'lib, reaksiya effektiv kesimi $E_\gamma = 15$ MeV energiyada maksimumga erishadi va u 450 mb ga teng. Ushbu reaksiya samarali amalga oshishi uchun elektronlar energiyasi 20 MeV dan yuqori va 50 MeV dan kichik bo'lishi kerak. Yuqori energiyalarda keraksiz radionuklidlar hosil bo'ladi. $E_\gamma = 25-35$ MeV energiyalar oraliq'i optimal diapazon hisoblanadi.

Nishon tarkibida ${}^{126}\text{Xe}$ izotopi bo'lgani uchun unda ${}^{126}\text{Xe}(\gamma, n) {}^{125}\text{Xe}$ fotoyadro reaksiyasi sodir bo'ladi. Hosil bo'lgan ${}^{125}\text{Xe}$ ($T_{1/2} = 17$ soat, ES) radionuklidining radioaktiv parchalanishi hisobiga ${}^{125}\text{I}$ radionuklidi vujudga keladi, ya'ni



Agarda nishon tarkibidagi ${}^{124}\text{Xe}$ va ${}^{126}\text{Xe}$ lar teng miqdorda bo'lganda ham, ${}^{123}\text{I}$ aktivligi nurlanish tugagandan keyin bir necha soat davomida ${}^{123}\text{I}$ aktivligining 0,3 % ni tashkil etadi va bu foiz-lar ${}^{126}\text{Xe}$ ning nisbiy miqdori kamayishi bilan mos holda kamaya boradi. $E_\gamma = 35$ MeV energiyada ${}^{124}\text{Xe}(\gamma, pn)$ reaksiya bo'yicha hosil bo'lgan ${}^{123}\text{I}$ radioizotopining chiqishi juda ham kichik bo'ladi. Shuning uchun elektron tezlatgichda olingan ${}^{123}\text{I}$ preparat sifati jihatidan hozirgi vaqtidagi tijorat preparatlari bilan bir xil. Nishon tarkibida ksenonning og'irroq izotoplarining miqdoriga bo'lgan talab, ksenon-124 ning boyitilishisobiga avtomatik ravishda qondiriladi.

Yod-123 radioizotopini ishlab chiqarish uchun elektron tezlatgichlarni qo'llashning asosiy texnik va iqtisodiy afzalliklarini qayd qilib o'tamiz. Bular quyidagilardan iborat:

- mahsulot tarkibida ${}^{124}\text{I}$ va ${}^{125}\text{I}$ aralashmalarining miqdori kam bo'lishi;
- nishonni qayta ishlashdagi biologik ximoyaga sarf xara-jat minimal bo'lishi;
- elektron tezlatgichlari siklotronlarga nisbatan bir necha marta arzon, ixcham, xizmat xarajatlari kam bo'lishligi.

Bu usulning kamchiliklariga faqat nishon (${}^{124}\text{Xe}$ 10 g yuqori bo-yitilgan) narxini ajratilgan Te izotoplar siklotron nishoni narxidan bir necha marta yuqori ekanligidir. Shu bilan bir vaqtda bitta Xe regeneratsiya siklidagi nisbiy yo'qotish Te dagiga nisbatan ancha kam hisoblanadi.

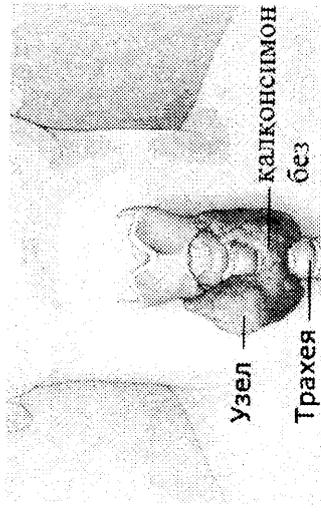
Ksenon-124 izotopi nurlantirilganda ksenon-123 radioizotopi hosil bo'lib, bu izotop radioaktiv bo'lganligi sababli u parchalanib yod-123 radioizotopi hosil bo'ladi. Radioizotop nurlantirilgan nishondan mahsus usullar bilan ajratib olinadi va ulardan radio-aktiv preparatlar tayyorlanadi. Bu preparatlar inson organizmiga kiritiladi va radionuklid (yoki radioizotop) tashxis amalga oshiriladi.

Radionuklid diagnostika, bu nur diagnostikasining bir ko'rini-shi hisoblanib, u inson organizmiga radiofarmatsevtik preparat kiritilgandan keyin, inson a'zo va to'qimalardan chiqayotgan nurla-nishni tashqi radiometrik o'lchashga asoslangan. Inson organizmiga kiritilgan radiofarmatsevtik preparat, insonning kasal a'zo va to'qimalariga ko'proq borib joylashadi va o'zidan gamma-nurlanishlar chiqaradi. Bu nurlanishlarni maxsus radiometrik asboblari

(ssintillyasion datchik) yordamida tashqaridan qayd qilinadi. O'lashlar orqali kiritilgan izotopning lokalizatsiyasi (joylashgani yoki to'plangan), miqdori va taqsimoti aniqlanadi. Olingan ma'lumotlar orqali tashxis qo'yiladi.

Radiofarmatsevtik preparat deb nimaga aytilishini ham eslatib o'tishimiz lozim. Radiofarmatsevtik preparat deb inson organizmiga diagnostik yoki davolash maqsadida kiritiladigan va molekullarida ma'lum bir radioaktiv nuklid bo'lgan kimyoviy birikmaga aytiladi.

Yuqorida bayon qilinganlarni yod-123 izotopi misolida ko'rish mumkin. Bunda bemorga yod-123 radioizotopi mavjud bo'lgan eritma ichiriladi. Bu radioaktiv yod-123 organizmga kiritilmasdan oldin ssintillyasion datchik orqali o'lchab olinadi va 100% deb qabul qilinadi. Organizm ssintillyasion datchik yordamida qalqonsimon bez sohasidan chiqayotgan nurlanishlarni o'lchash amalga oshiriladi. O'lchashlar yod kiritilgandan keyin 2 soat, 4 soat va bir sutka o'tgandan keyin ham bajariladi. Shunday qilib preparatning qalqonsimon bezda to'planish normasi empirik aniqlanadi. Agar to'planish tez bo'lsa, u holda qalqonsimon bezning giperfunksiyasi, agar to'planish normadagidan sekin to'plansa, gipofunksiyasi mavjudligini ko'rsatadi. Yod radioizotopi terapevtik maqsadlarda ham qo'llaniladi. Yod qalqonsimon bez normal ishlashi uchun zarur bo'lgan element hisoblanadi.



2.2- rasm. Qalqonsimon bez ko'rinishi

traxeя

Qalqonsimon bez bo'yin asosida joylashgan (2.2-rasmga qaralsin). U organizmida modda va energiya almashuvini regulyatsiyasida ishtirok etuvchi yodli gormonlar ishlab chiqaradi va

to'playdi. Organizmga kiritilgan radioaktiv yod oddiy yod kabi qalqonsimon bez xujayrasiga kiradi va to'plana boshlaydi. Bu esa o'z navbatida qalqonsimon bezni testlashga, diagnostika va davolashga imkon beradi. Davolash effekti yod-131 radioizotopining radioaktivlik xususiyatiga asoslangan bo'lib, undan chiqayotgan beta- va gamma-nurlanishlar ichkaridan hamma bezni nurlantiradi. Terapevtik effektning 90% beta-nurlanishga asoslangan. Beta-parchalanishda hosil bo'ladigan elektronlarning yugurish yo'li 2-3 mm bo'lib, ular bezni ichkarida nurlantiradi. Radioaktivlik, bez hujayrasini ham, uning chegarasidan tashqariga tarqalayotgan o'sma hujayrasini ham yo'q qiladi. Davolash deyarli og'riqsiz kechadi.

Nurlanishlarni qayd qiluvchi mukammalroq datchiklar, zamona-viy radiofarmpreparatlar va radioaktiv nishonlar qo'llanilishiga qaramasdan, aynan ishlab turgan to'qimalarda radioizotop to'plani-shi qayd qilish va baholash tamoyillari o'zgarimasdan qolmoqda. Radiobiologlar tasdiqlashicha, kichik dozali nurlanishlar inson organizmiga ijobiy ta'sir qo'rsatar ekan. Budan radionuklid diagnostikasida qo'llaniladigan radioizotoplar xavfli emasligi kelib chiqadi.

Shuni ham takidlab o'tishimiz kerakki, hozirgi kunda respublikamizda, O'zbekiston Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida, yod-125, 131 va kobalt-57 radioizotoplari ishlab chiqarilmoqda va chet ellarga eksport qilinmoqda. Ayniqsa yod-131 radioizotopi (radiofarmatsevtik preparati) o'zining yuqori sifatligi bilan boshqa chet el mahsulotlaridan ajralib turadi. Bundan tashqari, mazkur dargohda meditsinada qo'llaniladigan o'ndan ortiq radioizotoplar ishlab chiqilmoqda va meditsinada samarali qo'llanilishi kutilayotgan yangi radioizotoplar ustida ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Institutda radioizotoplar Yadro reaktori va U-150 turdagi siklotronida ishlab chiqiladi. Mazkur institutda ishlab chiqarilayotgan radioaktiv izotoplar bo'yicha batafsil ma'lumotni www.inp.uz sayti orqali olish mumkin.

Hozirgi kunda radionuklidli diagnostika zamonaviy texnologiyalardan biri bo'lib, u ko'pchilik kasalliklarni oldindan, hali boshqa usullar bilan aniqlash mumkin bo'lmagan vaqtda tashxis qo'yishga imkon beradi.

4.7-§. Yadro reaktorlarida olinadigan radionuklidlar

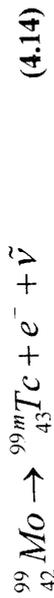
Yadro reaktorlarida hosil bo'ladigan neytronlar energetik spektrini asosiy ulushini issiqlik neytronlari tashkil qiladi. Bu neytronlar ta'sirida radiatsion qamrash reaksiyasi, ya'ni (n, γ) sodir bo'ladi va bu reaksiya natijasida neytronga boy yadrolar yoki radionuklidlar hosil bo'ladi. Mazkur radionuklidlar β^- -parchalanishga uchraydi va o'zidan elektronlar va gamma-kvantlar chiqaradi. **4.6-jadvalda** yadro reaktorida olinadigan radionuklidlar keltirilgan bo'lib, bular asosan yadroviy tibbiyotda tashxis quyishda qo'llaniladi.

4.6-jadval
Yadro tibbiyoti uchun yadro reaktorida ishlab chiqiladigan radionuklidlar.

Izotop	$T_{1/2}$	Izotop	$T_{1/2}$
^{32}P	14,3 sut	^{131}I	8,0 sut
^{35}S	87,4 sut	^{132}I	2,3 soat
^{45}Ca	162,6 sut	^{133}Xe	5,2 sut
^{47}Sc	3,4 sut	^{145}Sm	340 sut
^{51}Cr	27,7 sut	^{153}Sm	46,7 soat
^{55}Fe	2,7 let	^{153}Gd	241,6 sut
^{59}Fe	44,5 sut	^{165}Dy	2,35 soat
^{60}Co	5,3 let	$^{166}\text{Dy}/^{166}\text{Ho}$	81,5soat/26,2 soat
^{75}Se	119,8 sut	^{170}Tm	128,6 sut
^{86}Rb	18,8 sut	^{175}Yb	4,2 sut
^{85}Sr	64,8 sut	^{177}Lu	6,71 sut
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	66 soat/6 soat	^{186}Re	90,6 soat
^{103}Pd	16,7 sut	$^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$	69 sut/16,9 soat
^{109}Pd	13,7 sut	$^{191}\text{Os}/^{191}\text{Ir}$	15,4 sut/4,9 s
^{103}Ru	39,4 sut	^{192}Ir	74 sut
^{115}Cd	53,5 soat	$^{195\text{m}}\text{Pt}$	4 sut
$^{117\text{m}}\text{Sn}$	13,6 sut	^{198}Au	2,6 sut
^{125}I	60,1 sut	^{199}Au	3,2 sut

Radionuklidlar ichida yadro reaktorida olinadigan va insondagi qator kasalliklarni tashxis qo'yish uchun yadro tibbiyotida eng ko'p

tanqilgan va keng qo'llaniladigan radionuklid bu $^{99\text{m}}\text{Tc}$ hisoblanadi. Ushbu izotop ^{99}Mo ikkilamchi izotopi bo'ladi.



Ushbu radionuklidni ishlab chiqarish 90-chi yillar o'rtalariga kelib 10 kKi ga yaqinlashdi(Kanada, Belgiya, Rossiya va h.k davlatlardagi yadro reaktorlari). Yadro reaktorida mazkur radionuklidni olish uchun quyidagi ikkita sxema qo'llaniladi:



Mazkur reaksiya kesimlari mos holda 582,6 va 0,136 barn qiymatlarga teng.

Birinchi metodning kamchiligi, bu kerak bo'lmagan radioaktiv chiqindilarning hosil bo'lishidir, ya'ni 1 Ki ^{99}Mo radionuklidini olishda 50 Ki radioaktiv chiqindi hosil bo'ladi. Bu radioaktiv chiqindini qayta ishlash va utilizatsiya qilish va qayta ishlash maqsadida undan uranni ajratib olish katta ekologik muammolarni tug'diradi. (n, f) radiatsion qamrash reaksiyasini qo'llaganda deyarli chiqindi hosil bo'lmaydi. Bu metodda asosiy muammo yuqori solish-tirma aktivlikdagi ^{99}Mo radionuklidini olish bilan bog'liq. Masa-lan tarkibida 24,13% ^{98}Mo bo'lgan tabiiy molibdeni 1 10^{14} n/sm² issiqlik neytronlar oqimi bilan 100 soat nurlantirganda ^{99}Mo radionuklidning chiqishi 0,35 Ki/g oshmaydigan. Xuddi shunday sharoitda boyitilgan ^{98}Mo (boyitilganlik darajasi > 95 %) izoto-pida ^{99}Mo ning hisoblangan aktivligi, reaktor neytron spektridagi rezonans tashkil qiluvchilarning o'sishi hisobiga (12-15) Ki/g gacha oshishi mumkin. Bunda reaksiyaning kesimi 0,7 barn va undan ham katta qiymatlarga erishishi mumkin. Neytronlar oqimi 5 10^{15} n/sm² bo'lgan reaktorlarda ^{99}Mo radionuklidini 200 Ki/g tartibdagi qiy-matlargacha ishlab chiqarish imkoniyati mavjud. (n, f) reaksiya ^{98}Mo radionuklidini yuqori solishtirma aktivlikda ishlab chiqarishga imkon berishga qaramasdan, uni yuqori samarada bunda xomashyodan yuqori aktivlikdagi texnetsiy-99m radionuklidini olish uchun qo'l-lash mumkin:

Bu radionuklid generatori deyiladi va bunda $^{99\text{m}}\text{Tc}$ radionuklidining to'planishi sodir bo'ladi. Radionuklidlarni ajratib olish uchun

turli radiokimyoviy usullardan foydalanish mumkin: *sorb-sion*, *xromatografiya* va *ekstraksiya*. Birinchi ikkita usul asosida 1-2 *tibbiyot muassasalari* uchun mo'ljallangan ko'chma ko'tarib yurish uchun va uncha katta quvvatga ega bo'lmagan generatorlar ishlab chiqilgan. Ekstraksiya usul asosida ekstraksiya generator ishlab chiqilgan. Bu generator quvvati katta bo'lib, u radionuklidlar bilan butun bir regionini qamrab olishi mumkin.

4.8-§. Siklotronlarda radionuklidlar ishlab chiqarish

Hozirgi vaqtda radionuklidlar ishlab chiqarish uchun bir necha yuzlab tezlantirgichlar qo'llanilmoqda. Yadroviy tibbiyot hozirgi kunda ishlab chiqilayotgan hamma radionuklidlarning 50% istimol qi-ladi. Radionuklidlar ishlab chiqishga mo'ljallangan siklotron-larning katta qismi neytron defitsit bo'lgan radionuklidlarni ishlab chiqaradi. Bu radionuklidlar asosan *pozitron-emission tomografiya* uchun ishlab chiqiladi va ularning energiyasi ~10-18 MeV ni tashkil qiladi. Tezlantirgichlarning energiyasini oshirish yana qo'shimcha radionuklidlar ishlab chiqishga imkon beradi va ularning sonini oshiradi.

Siklotronlarda radionuklidlar ishlab chiqarish uchun quyidagi turdagi yadro reaksiyalar qo'llaniladi: (p,n) , (p,α) , (p,pn) , $(p,2n)$, $(p,3n)$, $(p,5n)$, (d,p) , (d,n) , $(d,2n)$, $(d,3n)$, (d,α) , $(3Ne,n)$, $(3Ne,\alpha)$, $(3Ne,an)$, $(3He,2n)$, $(3He,3n)$, (α,r) , (α,n) , $(\alpha,2n)$, (α,pn) , $(\alpha,3p)$. Siklotronlarda radionuklidlar ishlab chiqarish yadro reaktorida ishlab chiqilganga nisbatan ancha ustunliklarga egadir. 4.7-jadval-da siklotronlarda ishlab chiqilgan va tashxis qo'yishda qo'llaniladigan izotoplar ro'yxati va yadro-fizikaviy xarakteristikalarini keltirilgan.

4.7-jadval
Tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar. Radionuklidlar siklotronlarda ishlab chiqiladi*.

Radionuklid hosil bo'ladigan reaksiya	Nuklid	Yarim emirilish davri	Emirilish turi; chiqayotgan nurlanish va uning energiyasi, MeV	Qo'llanishi sohasi
$^{10}\text{B} (d, n)$	^{11}S	20,38 min	$\beta+(1,0)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{11}\text{B} (d, 2n)$				
$^9\text{Be} ({}^3\text{He}, n)$				
$^{14}\text{N} (p, \alpha)$	^{13}N	9,96 min	$\beta+(1,2)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{12}\text{C} ({}^3\text{He}, \alpha)$				
$^{12}\text{C} (p, pn)$	^{15}O	122 s	$\beta+(1,74)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{14}\text{N} (d, n)$				
$^{16}\text{O} ({}^3\text{He}, n)$	^{18}F	109,8 min	$\beta+(0,63)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{16}\text{O} (\alpha, pn)$				
$^{20}\text{Ne} (d, \alpha)$				
$^{20}\text{Ne} ({}^3\text{He}, an)$	^{28}Mg	21 soat	$\beta-$ (0,42); γ (0,03; 0,40; 0,95; 1,35)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{27}\text{Al} (\alpha, 3p)$				
$^{50}\text{Cr} ({}^3\text{He}, n)$	^{52}Fe	8,3 soat	$\beta+$ (0,80); EZ; γ (0,16)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{52}\text{Cr} ({}^3\text{He}, 3n)$				
$^{50}\text{Cr} (\alpha, 2n)$	^{64}Cu	12,7 soat	$\beta-$ (0,57); $\beta+$ (0,66); EQ; γ (1,34)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{60}\text{Ni} (d, 2n)$				
$^{64}\text{Ni} (d, n)$	^{72}As	26 soat	$\beta+$ (2,5; 3,34); EQ;	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{69}\text{Ga} (\alpha, n)$				
$^{74}\text{Ge} (d, 2n)$	^{74}As	17,78 kun	γ (0,63; 0,83)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{72}\text{Ge} (d, n)$				
$^{71}\text{Ga} (\alpha, n)$	^{77}Br	57 soat	$\beta-$ (0,72; 1,36); $\beta+$ (0,91); EZ; γ (0,60)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{75}\text{As} (\alpha, 2n)$				
$^{79}\text{Br} (\alpha, 2n)$	^{81}Rb	4,6 soat	$\beta+$ (1,05); EQ; γ (0,45; 1,1)	Generator ^{81}Kr (tibbiyot tashxisida)
$^{86}\text{Kr} ({}^3\text{He}, 2n)$	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	2,8 soat	EQ; γ (0,39)	Tibbiyot (diagnostika)
$^{85}\text{Rb} (\alpha, 2n)$	^{87}Y	80 soat	$\beta+$ (0,47); EZ;	Generator $^{87\text{m}}\text{Sr}$

$^{110}\text{Cd} (d, n)$	^{111}In	67 soat	$\gamma (0,48)$	(tibbiyot tashxisida)
$^{111}\text{Cd} (p, n)$			$\gamma (0,17; 0,25)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{112}\text{Cd} (p, 2n)$				
$^{109}\text{Ag} ({}^3\text{He}, n)$	^{109m}Ag			
$^{114}\text{Cd} (\alpha, n)$	^{117m}Sn	14 sut	$\gamma (0,16)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{115}\text{In} (\alpha, 2n)$	^{117}Sb	2,8 soat	$\beta^+ (0,57); \text{E}\gamma;$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{121}\text{Sb} (\alpha, 2n)$	^{121}I	13 soat	$\gamma (0,16)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{123}\text{Sb} ({}^3\text{He}, 3n)$			EQ: $\gamma (0,16)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{122}\text{Te} ({}^3\text{He}, 2n)$				
$^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$				
$^{123}\text{Te} (p, n)$				
$^{127}\text{I} (\alpha, 2n)$	^{129}Cs	32 soat	EQ: $\gamma (0,38)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{131}\text{Xe} (r, n)$	^{131}Cs	9,7 sut	EQ	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{131}\text{Xe} (d, 2n)$				
$^{132}\text{Xe} (r, n)$	^{132}Cs	6,6	$\beta^+ (0,41); \text{E}\gamma;$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{132}\text{Xe} (d, 2n)$		Sut	$\gamma (0,67)$	
$^{155}\text{Gd} (\alpha, 2n)$	^{157}Dy	8,1 sut	EQ: $\gamma (0,33)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{159}\text{Tb} (p, 3n)$				
$^{200}\text{Hg} (d, n)$	^{201}Tl	73 soat	EQ: $\gamma (0,14; 0,17)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{201}\text{Hg} (d, 2n)$				
$^{203}\text{Tl} (r, 3n)$				
$^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$				
$^{203}\text{Tl} (d, 2n)$	^{203}Pb	52 soat	EQ: $\gamma (0,28; 0,40)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{203}\text{Tl} (r, n)$				

* EQ-elektron qamrash.

4.9-§. Elektron tezlatgichlarda radionuklidlar chiqishlarini aniqlash

Mazkur ishdan maqsad ayrim radionuklidlarning elektron tezlatgichlarda olish imkoniyatlarini o'rganish va tibbiyotda tashxis qo'yish va davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlar bo'yicha ma'lumotlarni sistematika qilishdan iborat.

Hozirgi kunda elektron tezlatgichlarda olinayotgan va tibbiyotda tashxis qo'yish va davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlarning sistematikasi 4.8-jadvalda keltirilgan.

4.8-jadval

Elektron tezlatgichlar yordamida olinadigan radionuklidlar

Izotop	$T_{1/2}$	Reaksiya	Qo'llanilish sohalari
^{11}C	20.38 m	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ $^{16}\text{O}(\gamma, na)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, t)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, nd)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, p2n)^{11}\text{C}$	Pozitron-emission tomografiyada (PET) qo'llaniladi
^{13}N	9.98 m	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, t)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, nd)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, p2n)^{13}\text{N}$	Pozitron-emission tomografiyada qo'llaniladi
^{15}O	122 s	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	Pozitron-emission tomografiyada qo'llaniladi
^{18}F	109.8 m	$^{23}\text{Na}(\gamma, na)^{18}\text{F}$ $^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\gamma, d)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\gamma, pn)^{18}\text{F}$	Pozitron-emission tomografiyada qo'llaniladi
^{47}Sc	3.42 sut	$^{48}\text{Tl}(\gamma, p)^{47}\text{Sc}$	Radioimmunoterapiyada (RIT) qo'llaniladi
^{57}Co	271.7 sut	$^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$	A'zo o'lchamlarini baholashda marker sifatida qo'llaniladi.
^{67}Cu	61.9 soat	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$	Beta-nurlatgich bo'lib, radioimmunoterapiyada (RIT) qo'llaniladi.
^{99m}Tc	66.02 soat	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99m}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$	^{99m}Tc generatoridagi birlamchi izotop

^{111}In	2.83 sut	$^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111}\text{In}$ $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn} \rightarrow$	Tashxis qo'yish tadqiqotlari uchun qo'llaniladi.
^{123}I	13.0 soat	$^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{123}\text{Xe} \rightarrow$ ^{123}I	Miya, yurak, qalqonsimon bez, buyraklarni tadqiq qilganda tashxis qo'yish uchun qo'llaniladi.
^{125}I	60.2 sut	$^{126}\text{Xe}(\gamma, n)^{125}\text{Xe} \rightarrow$ ^{125}I	Prostata va miya saraton kasalligi braxiterapiyasida, buyrak filtratsiyasining tezligini baholashda va oyoqdagi chuqur venalar trombozini tashxislashda qo'llaniladi.

Bu jadvaldan ko'rinadiki, elektron tezlatichlarda olingan radionuklidlar qo'llanilish chegarasi juda ham keng bo'lib, u hali etarlicha o'rganilmagan.

Elektron tezlatichlarning eng muhim afzalliklaridan biri katta massaga ega bo'lgan nishonlarni hech qanday boshlang'ich tayyorgarliksiz ham nurlantirish imkoniyatidir. Bunda nurlanti-rishga mo'ljallangan nishonni vakuum kamerasi ichiga kiritmasdan va vakuumni buzmasdan tashqarida ham nurlantirish mumkin. Bundan tashqari, elektron tezlatichlarda nishonni tayyorlash jarayoni siklotronga nisbatan ancha ason va tez bo'ladi. Yana bir muhim ahamiyatga ega bo'lgan ma'lumot bu siklotron narxidir. Siklotronning narxi elektron tezlatichlarning narxidan ancha yuqori bo'ladi. Demak, elektron tezlatichlarda ishlab chiqiladigan radionuklidlarining narxi ham ancha arzon bo'ladi. Xulosa qilib aytish mumkinki, kelajakda radionuklidlar ishlab chiqarishda elektron tezlatichlarning qo'llanish imkoniyati juda katta bo'ladi.

Radionuklidlarni ishlab chiqarish uchun elektron tezlatich-larni qo'llashning prinsipial texnik va iqtisodiy afzalliklarini qayd qilib o'tamiz. Bular quyidagilar: mahsulot tarkibida qo'shimcha aralashmalarining miqdori kam bo'ladi; nishonni qayta ishlashdagi biologik ximoyaga sarf xarajat minimal bo'ladi; elektron tezlatichlari siklotronlarga nisbatan bir necha marta arzon, ular ixcham, ekspluatatsion sarf xarajatlari kam. Ammo bugungi kunda radionuklidlar ishlab chiqarishda elektron tezlatichlar boshqa yadro

qurilmalarining o'rnini to'liq egallamasdan balki ularni to'ldirib turibdi.

4.10-§. Pozitron emission tomografiya

Tibbiyot fani texnikasining rivojlanishi hamma vaqt fizika fanining rivojlanishi bilan chambarchas bog'liq bo'lib kelgan. Fizika fanidagi kashfiyotlar ma'lum vaqt o'tgandan keyin tibbiyot-ga ma'lum bir tashxis qo'yish yoki davolash usullari sifatida kirib kelgan. Bunga misol qilib oddiy inson qon bosimini o'lchash, ultra-tovush tashxis usuli, radioizotoplar usullari va h.k. keltirish mumkin.

Hozirgi kunda tibbiyotning turli sohalarida keng qo'llanilayotgan metod bu pozitron emission tomografiya hisoblanib, bu metod qisqa yashovchi radioizotoplarni qo'llashga asoslangan. **Pozitron emission tomografiya (PET)**, uni ikki fotonli emission tomografiya ham deyiladi. Bu metodda inson va hayvonlarning ichki a'zolarini ra-dionuklidli tomografiya yordamida o'rganiladi.

1933 -yilda nemis bioximiki **Vorburg (Otto Genrix Varburg)** xavfli shish (o'sma) yuqori darajada glyukoza iste'mol qilishini (ehtiyoji) aniqladi. 1977 -yilda olimlar kalamush miyasida xavfli shishning glyukoza-ga bo'lgan ehtiyojini o'rganishda uglerod radioaktiv izotopi yordamida dezoksi-glyukozasining mahalliy tarqalish darajasini o'lchashni o'rganishdi. Ushbu tajriba 1979 -yilda insonlarda o'tkazilgan. Bunda radioaktiv flor ^{18}F izotopining fluor-dezoksi-glyukozasidan foydalanilgan. Florodezoksi-glyukoza bu -glyukozaning analogi hisoblanadi. U glyukozadan farq qilib, uning metabolizimi tez tugallanadi va uning mahsulotlari birikmalarga to'planadi. Radioaktiv **flor-18** izotopi (yarim parchalanish davri 109.8 min) parchalanadi va o'zidan pozitronlar chiqaradi. Bu bajarilgan ilmiy tadqiqot ishlari pozitron emission tomografiya metodining yaratilishiga asos bo'ldi.

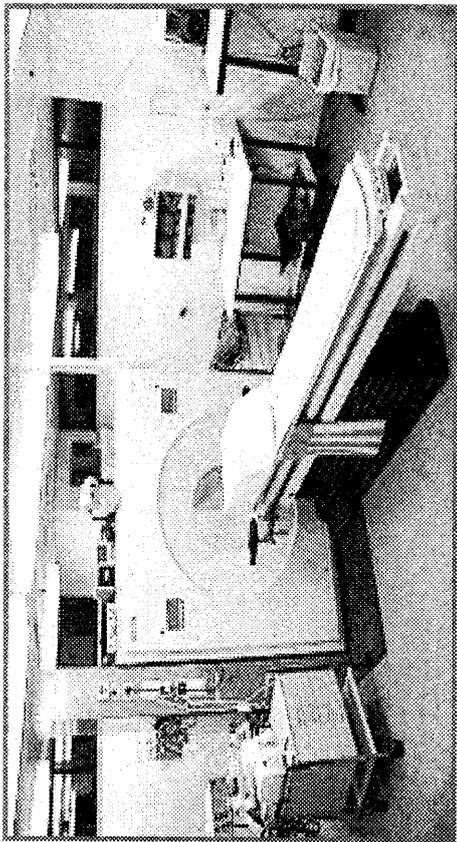
Pozitron-emission tomografiya - bu onkologik, kardiologik va nevrologik kasalliklarga erta tashxis qo'yishning aniq va zamonaviy usuli bo'lib qolmoqda.

Pozitron-emission tomografiya quyidagi sohalarda qo'llaniladi:

1. **onkologiyada: rakni tashxislashda, metastazaga tashxis qo'yishda, rakning samarali davoshni nazorat qilishda;**
2. **kardiologiyada: yurakning ishemik kasalligida, aortokoronar shuntlashdan oldin;**

3. nevrologiyada: parisonxotir skleroz va boshqa kasalliklarda;

4. psixiatriya va gerontologiyada - Alzheymer kasalligida.



4.3-rasm. Pozitron-emission tomografiya umumiy ko'rinishi

Pozitron-emission tomografiya usuli xujayra darajasida modda almashinuvi haqida axborot olishga imkon beradi.

4.9-jadval

Pozitron-emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlarni elektron tezlantgichlar yordamida olish

Radionuklid	Yarim parchalanish davri, $T_{1/2}$	Radionuklidni hosil qiladigan reaksiyalar
^{11}C	20.38 m	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, t)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, nd)^{11}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\gamma, p2n)^{11}\text{C}$

172

^{13}N	9.98 m	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, t)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, nd)^{13}\text{N}$, $^{16}\text{O}(\gamma, p2n)^{13}\text{N}$
^{15}O	122 s	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$
^{18}F	109.8 m	$^{23}\text{Na}(\gamma, \alpha)^{18}\text{F}$, $^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\gamma, d)^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(\gamma, pn)^{18}\text{F}$

Hozirgi kunda pozitron emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlar asosan siklotron va elektron tezlantgichlar yordamida olinadi. Mazkur ishdan biz elektron tezlantgichlarda va siklotronda olinayotgan radionuklidlar bo'yicha ma'lumotlar to'pladik va 4.7 va 4.8-jadvallar ko'rinishida keltirdik. 4.7-jadvalda elektron tezlantgichda olinayotgan radionuklidlar va ularni hosil qiladigan fotoyadro reaksiyalar va ularni olishda ham keltirilgan. Shuningdek, bu jadvalda hozirgi kunda radionuklidlarni olishda qo'llanilayotgan asosiy fotoyadro reaksiyalari qora to'q rangda ajratib ko'rsatilgan. Bu jadvalga qo'shimcha olishi mumkin bo'lgan fotoyadro reaksiyalarni ham kiritdik, ular intensivligi katta bo'lgan elekt-ron tezlantgichlarda amalga oshishi mumkin.

4.10-jadvalda siklotronda olinayotgan radionuklidlar va ularni hosil qiluvchi yadro reaksiyalari keltirilgan.

4.10-jadval

Siklotron yordamida olinadigan radionuklidlar

Radionuklid	Yarim parchalanish davri, $T_{1/2}$	Radionuklidni hosil qiladigan reaksiyalar
^{11}C	20.38 m	$^{10}\text{B}(d, n)$ $^{11}\text{B}(d, 2n)$ $^9\text{Be}(\alpha, n)$ $^{14}\text{N}(p, \alpha)$ $^{12}\text{C}(\alpha, \text{Ne}, \alpha)$ $^{12}\text{C}(p, pn)$
^{13}N	9.98 m	$^{12}\text{C}(d, n)$
^{15}O	122 s	$^{14}\text{N}(d, n)$

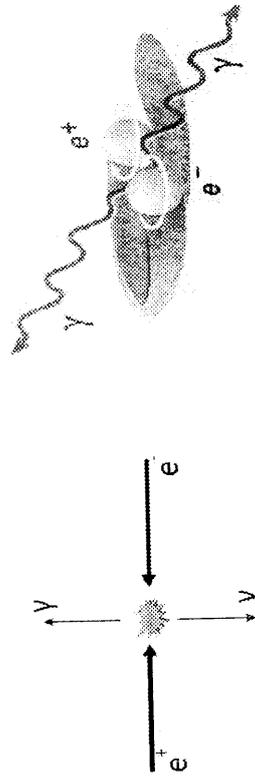
173

^{18}F	109.8 m	^{16}O (^3He , n) ^{16}O (α , pn) ^{20}Ne (d, α) ^{20}Ne (^3He , αn)
-----------------	---------	--

4.11-§. Pozitron emission tomografiyaning ishlash tamoyili

Mazkur metod pozitronlarning elektronlar bilan annigilyasiya bo'lishi natijasida hosil bo'ladigan gamma-kvantlar juftligini qayd qilishga asoslangan. **Pozitron** (inglizcha so'zdan olingan bo'lib, **positive**— musbat va **electron** — elektron, ya'ni musbat zaryadlangan elektron) bu elektronning antizarrasi hisoblanadi. Pozitronning massasi va elektr zaryadining absolyut qiymati mos ravishda elektron massasi va zaryadiga teng. Pozitron stabil zarra hisoblanadi, lekin u modda elektronlari bilan ta'sirlashib annigilyasiya natiijasida qisqa vaqt yashaydi. Masalan qo'rg'oshinda pozitron $5 \cdot 10^{-11}$ s davomida annigilyasiyaga uchraydi. "**Annigilyasiya**" termini (**annihila-tio**) yo'q bo'lish, yo'qlikka aylanish ma'nosini beradi. Pozitron bi-ian elektron to'qnashganda annigilyasiya hodisasi sodir bo'ladi. Annigilyasiya natijasida asosan ikkita gamma-kvant hosil bo'ladi va ular o'zaro 180° burchak ostida sochiladi (4.4-rasm va 4.5-rasm):

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad \text{yoki} \quad \beta^- + \beta^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (4.15)$$



4.4-rasm Gamma-kvant hosil bo'lishi

4.5-rasm Gamma-kvant hosil bo'lishi

Pozitronlar qayerdan paydo bo'ladi, degan savolga javob beramiz. Pozitronlar radioaktiv parchalanish tufayli paydo bo'ladi. Atom yadrosining o'z-o'zidan bir yoki bir nechta zarralar chiqarib parchalanish (**emirilish**) hodisasi radioaktivlik deb ataladi. Radioaktivlik hodisasi yuz beradigan yadrolarga radioaktiv yadrolar deyiladi. Radioaktiv bo'lmagan yadrolar esa turg'un (**stabil**) yadrolar deyiladi.

PET qo'llaniladigan radionuklidlar turlari va ularidan chiqayotgan pozitronlarning biologik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li jadvalda keltirilgan. Bu yerda L_{max} — pozitronning biologik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li. Yugurish yo'li qancha katta bo'l-sa, metodning fazoviy ajratish qobiliyati shunchalik yomonlashadi. Ammo, bu holda tashxis qo'yish chuqurligi oshadi. Shu sababli tashxis qo'yishda chuqurligini e'tiborga olgan holda turli radionuklidlar qo'llaniladi. 4.6-rasmda PETda qo'llanilayotgan radionuklidlar va ularidan β^+ -parchalanish natijasida chiqayotgan pozitronning bio-logik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li keltirilgan.

4.11 jadval

Pozitron-emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlar va ularidan chiqayotgan pozitronlarning biologik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li.

Izotop	L_{max} , mm
^{18}F	2,6
^{11}C	3,8
^{68}Ga	9,0
^{82}Rb	16,5

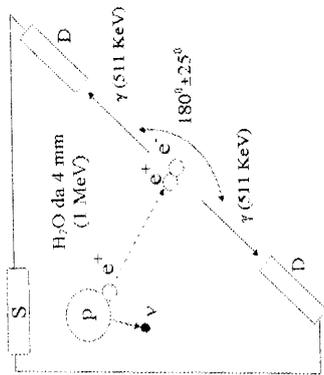
PET qo'llanilayotgan radioizotoplar hammasi pozitron emissiya qilish yo'li bilan parchalanadi. Parchalanayotgan yadro tomonidan chiqarilgan po-zitron (β^+) yaqinida joylashgan atomning elektronlari bilan to'qnashguncha u qisqa masofani (yo'lini) bosib o'tadi.

Pozitron birichi uchragan atom elektron bilan birikadi va pozitronni hosil qiladi. Pozitron, elektron va pozitronlari spinlarining

o'zaro joylashuviga qarab, ortopozitroniya (spinlari parallel) va parapozitroniya (spinlari antiparallel) ga farqlanadi. Pozitroniya nostabil sistema bo'lib, u elektron va pozitron annigilyasisi jarayonida qatnashadi. Zaryad juftligini saqlanish qonunidan parapozitroniya ikkita gamma-kvantga ($1.25 \cdot 10^{-10}$ s ichida) va ortopozitroniya uchta gamma-kvantga ($1.4 \cdot 10^{-7}$ s ichida) parchalanadi. PET uchun bu vaqt juda ham kichik bo'lgani uchun ular deyarli "bir zumda" parchalanadi. Elektron va pozitronning nisbiy tezliklari katta bo'lmasa, ular bazida pozitroniy atomini tashkil qiladi. Uchta gamma-kvantga parchalanish ehtimolligi juda ham kam bo'ladi.

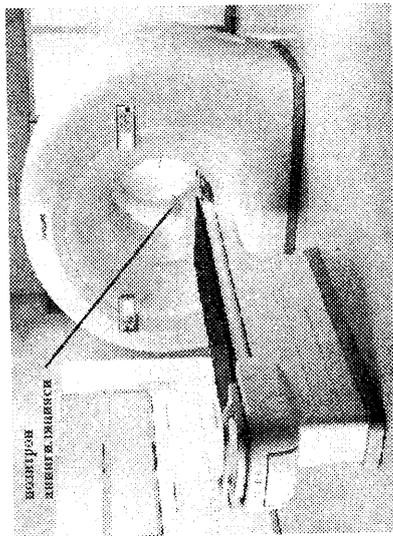
Pozitroniya atomlari parchalanganda elektron va pozitron annigilyasiyalanadi va ularning o'rniga energiyasi 511 keV bo'lgan ikkita gamma-kvantlar hosil bo'ladi. Bu gamma-kvantlar qarama qarshi yo'nalishda, ya'ni 180 gradus ostida yo'nalgan bo'ladi. Ushbu fotonlar jismdan (inson tanasidan) tashqarisiga osongina chiqib ketadi va ularni tashqi detektorlar (qayd qiluvchi qurilmalar) qayd qilishi mumkin. Mazkur detektorlar annigilyasiya natijasida hosil bo'lgan gamma-kvantlarni qayd qiladi. Sababi ular mos tushish sxemasiga ulangan bo'ladi, ya'ni bir vaqtda va o'zaro 180 gradus ostida chiqayotgan gamma-kvantlar detektorlar yordamida qayd qilinadi.

Mos tushish chiziqlari qayd qilish sxemasida pozitron tomografiyada tomografik tasvirlarni shakillantirishda qo'llaniladi. Ob'ekt ichida radioaktiv parchalanish intensivligining kartasini olish uchun bu ma'lumotlar rekonstruksiya qilinadi (molekulyar zondning fazoviy taqsimotini rekonstruksiya). Radiatsion maydon intensivligidagi anomaliyani aniqlash maqsadida olingan tasvirlar maxsus metodlar yordamida tahlil qilinadi. Pozitron molekulyar zondning konsentratsiyasi oshgan(kamaygan) sohasi inson a'zosining normal faoliyat ko'rsatmayotganligini bil-diradi.

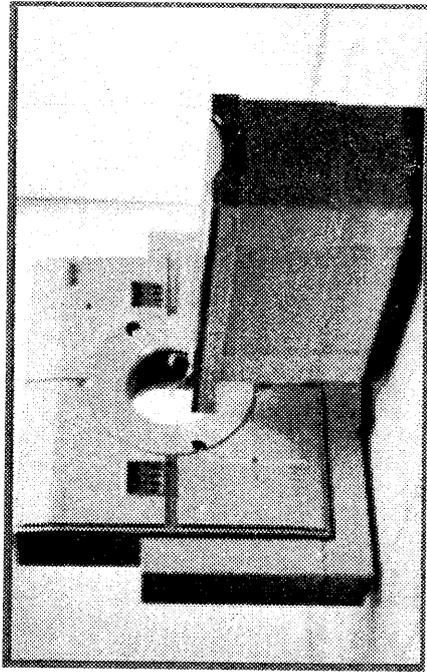


4.7-rasm. Pozitron-emission tomografiya ishlash tamoyili. D — detektor, S — sanagich.

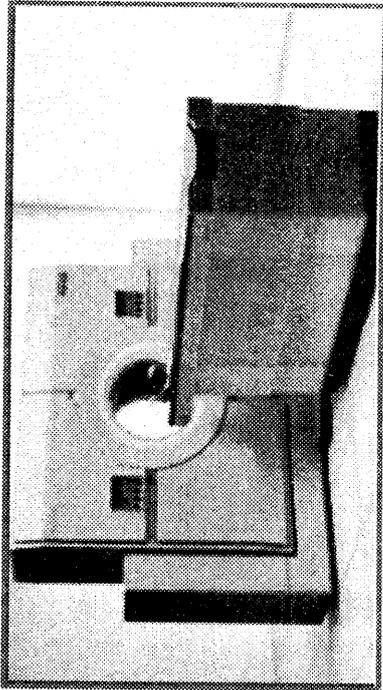
PET-tadqiqot jarayonida pozitron-emitsiya(chiqaruvchi) qiluvchi radioizotop bemor venasiga (vnutrivenno) yoki ingalyatsiya yo'llari bilan kiritiladi. Bundan keyin, radioizotop qon oqirida sirkulyasiya bo'lib, ma'lum bir a'zoga, masalan bosh miyaga yoki yurak muskullariga etib boradi. Annigilyasiya jarayoni boshlatishi bilan tomograf izotop lokalizatsiyasini (bir joyga to'planishini) qayd qiladi va uning konsentratsiyasini hisoblaydi. **Pozitron-emission tomografiya** ishlash tamoyili **4.7-rasm**da keltirilgan.



4.9-rasm. PET diagnostik (tashxislovchi) qurilmasidagi elektron-pozitron juftliklarining annigilyasiyasi.



4.10-rasm. Fazoning biror nuqtasida bir vaqtda yuzaga kelgan va qarama-qarshi tomonga yoʻnalgan ikki gamma-kvantni qayd qilish sxemasi.



4.11-rasm. Tahlit qilinayotgan ob'ekt atrofida halqasimon joylashgan detektorlar.

Mavzu yakunida *pozitron-emission tomografiyani* qoʻllash jarayo-ni bilan tanishib chiqamiz. **RFP** — *bu radioizotop bilan bioximik birikma qoʻshilmasidir*. Koʻpchilik holda radioizotop sifatida **ftor-18** qoʻllaniladi. Bundan tashqari **uglerod-11**, **azot-13** va **kislorod-15** va boshqa radioizotoplar ham qoʻllaniladi. Biokimyoviy modda sifatida yuqorida taʼkidlab oʻtgandek, glyukoza qoʻllaniladi. Inson xoʻjayrasi **RFP** ni yutadi va ular xujayralarda toʻplana boshlaydi. Xoʻjayradagi **RFP** ning radioaktiv parchalanishi (beta parcha-

lan) natijasida pozitron hosil boʻladi. Ushbu pozitron toʻqimada harakatlanib boshlaydi. Pozitron uncha katta boʻlmagan masofani, yaʼni 1 mm masofani bosib oʻtadi. Ushbu vaqt ichida pozitron kinetik energiyani elektron bilan oʻzaro taʼsirlashishi darajasigacha kamayadi va buning natijasida qarama-qarshi tamonga harakatlanadigan ikkita foton (gamma-kvant) hosil boʻladi (**4.7-rasmga qarang**). Bu ikkita foton bir vaqtda ikkita **D detektorlar** orqali qayd qilinadi va mos tushgan ushbu signal **S sanagichga** tushadi, hamda tasvir yasovchi kompyuterga uzatiladi.

Hozirgi kunda PET da ftor-18 radionuklidi keng qoʻllanilmoqda. Ftor-18 PET da qoʻllash uchun optimal xarakteristikaga egadir: nisbatan katta boʻlmagan yarim parchalanish davriga va eng kichik nurlanish energiyasiga ega. Ikkinchi tamondan ftor-18 nisbatan kichik doza bilan nurlanish davriga egaligi boʻlib, bu esa mijozni past doza bilan nurlanishiga va yuqori kontrastli PET-tasvir olishiga imkon beradi. Ushbu izotopning yarim parchalanish davri boshqa qisqa yarim parchalanishga nisbatan kattaligi uchun ftor-18 olingan va bu davrda tayyorlangan RFP ni PET-skanerlarga ega boʻlgan boshqa ftor-18 va institutlarda transportirovka qilishga imkon beradi. Hozirgi kunda PET-tadqiqotlar va RFP sintez vaqt chegarasini koʻrsatishga imkon beradi. Hozirgi kunda dunyodagi etakchi kompaniyalardan biri boʻlgan Siemens AG kompaniyasi oʻzining PET/KF qurilmalarida Lu₂SiO₅ va LSO turdagi ssintillyasyon detektorlarini qoʻllamoqda.

Pozitron-emission tomografiyaning qoʻllash jarayoni quyidagicha: pozitron-emission tomografiyani qoʻllashdan oldin bemorning venasiga tarkibida qisqa yashovchi radioizotop boʻlgan radiofarmpreparat kiritiladi yoki bemorga ushbu radiofarmpreparat natijasi orqali gaz koʻrinishida kiritiladi. Keyin bemor 30-60 min davomida harakat qilmasdan yotishi kerak boʻladi. Bu vaqt davomida preparat inson aʼzolariga tarqaladi. Bunda bemor oʻzini noxush his qilmaydi. Keyin bemor kushetka (zambil) bilan birga halqa ichiga kiritiladi va insondan chiqayotgan nurlanishlarni detektorlar qayd qila boshlaydi. Keyin esa bu signallar detektorlardan kompyuterga uzatiladi. Bu maʼlumotlar kompyuterda qayta ishlanadi va tasvir hosil qilinadi.

Biz bu yerda tibbiyotning zamonaviy tashxis qoʻyish usullaridan foydalanish bilan tanishib chiqdik. Hozirgi kunda bunday usullar soni

kundan kunga oshib bormoqda. Umuman aytganda har kuni tibbiyot fani fizika fanining yutuqlari evaziga modernizatsiyalanib bor-mokda. Bu esa o'z navbatida juda ko'p kasalliklarni oldindan aniq-lashga va davolashga imkon beradi.

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1 masala. Normal sharoitda havoni gamma-nurlar bilan ionlatilmoqda. Nurlanish ekspozitsion dozasi $D=258$ mKkI/kg bo'lganda massasi $m=5$ kg bo'lgan havo yutadigan energiya to'planadi.

Yechilishi: Havo tomonidan yutiladigan energiya quyidagiga teng:

$$E = \varepsilon m N \quad (1)$$

bu yerda ε — havoni ionlash energiyasi, N — massa birligidagi ionlar juftligi.

Masala echishda, gamma-nurlarning hamma energiyasi ionlashga sarf bo'ladi deb faraz qilamiz. Normal sharoitda quruq havoda butta ionlar juftini hosil qilish uchun zarur bo'lgan energiya $\varepsilon = 33,85$ eV $= 5,416 \cdot 10^{-18}$ J ga teng. Massa birligidagi ionlar juftining miqdori quyidagiga teng:

$$N = \frac{D}{e} \quad (2)$$

bu yerda $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ KkI elementar zaryad. (2) formulani (1) formulaga quyamiz va quyidagi ifodani olamiz:

$$E = \varepsilon m N = \varepsilon m \frac{D}{e} \quad (3)$$

Bo formulaga masala shartidagi kattaliklar qiymatlarini qo'yib hisoblaymiz: $D=258$ mKkI/kg $= 258 \cdot 10^{-6}$ KkI/kg;

$$E = \varepsilon m \frac{D}{e} = 4,37 \cdot 10^{-5} \text{ J} = 43,7 \text{ mKJ}$$

Javob: 43,7 mKJ.

2 masala. Kosmik nurlar ta'sirida dengiz sathida 1 sm^3 havoda 1 min vaqt davomida 120 ta ionlar jufti hosil bo'lsa, bir sutkada inson oladigan ekspozitsion doza aniqlansin.

Yechilishi: Inson t vaqt davomida oladigan ekspozitsion doza quyidagi ifoda orqali topiladi:

$$D_3 = P_3 t \quad (1)$$

bu yerda D_e -ekspozitsion doza, R_e -ekspozitsion doza quvvati.
Bu yerda ekspozitsion doza quvvati:

$$P_3 = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Bu yerda ΔQ - massasi Δm bulgan uavoda Δt va t davomida hosil bo'lgan zaryadlar yig'indisi. U holda (2) ni (I) ga qo'yamiz va quyidagi ifodani olamiz:

$$D_e = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t} t \quad (3)$$

Bu yerda xavo massasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$\Delta m = \rho \Delta V \quad (4)$$

ΔV xajmida xosil bo'ladigan zaryadlar yig'indisi bir xil ishorali barcha ionlarning zaryadini e elementar zaryadli ionlar soniga ko'paytmasiga teng:

$$\Delta Q = |e| N \quad (5)$$

(4) va (5) ifodalarni xisobga olsak (3) formula quyidagi ko'rinishga keladi:

$$D_e = \frac{|e| \cdot N \cdot t}{\rho \Delta V \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Formuladagi kattaliklarni SI birliklaridagi

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kt}, \quad N = 120,$$

$$t = 24 \cdot 3600 \text{ c} \quad \rho = 1,29 \cdot \text{kg} / \text{M}^3, \quad \Delta V = 1 \cdot 10^{-6} \text{ M}^3, \quad \Delta t = 60 \text{ c}$$

qiymatlaridan ekspozitsion dozani hisoblaymiz:

$$D_3 = 21,4 \mu\text{Kt} / \text{kg}$$

3-masala. Aktivligi **50 mKi** bo'lgan ^{60}So manbaidan nurlangan nurlanishlar dozasini rentgentlarda hisoblang. Manbagacha bo'lgan masofa **40 sm**, ekspozitsiya vaqti esa **6 soatga** teng. Agar manbaning dozasi ruxsat etilgan dozadan yuqori (haftada **1 mbyerdan** katta) bo'lsa, qo'rg'oshin himoya ekranining qalinligini aniqlang. **Kobalt-60**

domiyasi $I_\gamma = 13,2 \frac{\text{penmg} \cdot \text{cm}^2}{\text{MKu} \cdot \text{c} \cdot \text{cm}}$ ga teng. **Kobalt-60**

manbaidan qo'rg'oshindagi yutilish koeffitsienti esa **1 sm⁻¹**.

Yechilishi: Nurlanish dozasi

$$D = I_\gamma \frac{A \cdot t}{R^2} = 16,5 \text{ penmg}$$

Ibu yerda A - *aktivlik*, t -*vaqt*, R - *masofa*. Qo'rg'oshin himoya dozasining qalinligi **7,5 sm** dan kam emas.

1 masala. Energiyasi $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ ga teng bo'lgan γ -kvantlar partiklalar dastasining qo'rg'oshinda ($Z=82$) va alyuminiyda ($Z=13$) a) qanday tarqalishi qatlamining qalinligi, b) dastani ikki marta ko'paytiruvchi qo'rg'oshin va alyuminiy massalari (kg/m^2 da) hisoblang.

Yechilishi: Chiziqli to'liq susayishi koeffitsientlari:

$$\mu_{\text{pb}} = 80 \text{ M}^{-1}, \quad \mu_{\text{Al}} = 15 \text{ M}^{-1};$$

zichliklari esa:

$$\rho_{\text{pb}} = 11340 \text{ kg} / \text{M}^3, \quad \rho_{\text{Al}} = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{M}^3};$$

a) Yarim susayish qalinligi qo'rg'oshin uchun:

$$d_{1/2} = 0,693 / \mu_{\text{pb}} = 0,693 / 80 \approx 8,65 \cdot 10^{-3} \text{ M}$$

alyuminiy uchun esa $d_{1/2} = 4,6 \cdot 10^{-2} \text{ M}$. Massaviy susayish koeffi-

tsientlari qo'rg'oshin uchun, $\mu_m = \mu / \rho = 80 / 11340 \approx 7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{kg}$,

alyuminiy uchun esa $\mu_m = 5,55 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2 / \text{kg}$ ga teng.

b) Dastani ikki marta susaytiruvchi qo'rg'oshindan bo'lgan nurlanish massasi

$$\mu_{\text{pb}} = \rho_{\text{pb}} d_{1/2} = 11340 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} = 98,7 \text{ kg} / \text{M}^2,$$

alyuminiy uchun esa $\mu_{\text{Al}} = 12,4 \text{ kg} / \text{M}^2$ ga teng.

5-masala. Massasi **10⁻⁶ g** bo'lgan ^{60}So nuqtaviy manbaidan qanday **R** masofada, olti soatlik ish kunida oladigan doza, ruxsat etilgan dozaga teng bo'ladi.

Yechilishi: Massasi 10^{-6} g nuqtaviy ^{60}So manbadagi atomlar miqdori:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{1,0 \cdot 10^{-9}}{60} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} = 1,0 \cdot 10^{16} \text{ ta atomga teng.}$$

Kobalt aktivligi ($T_{1/2} = 5,27 \text{ yil}$):

$$A = \lambda N = \frac{0,693}{5,27 \cdot 3,15 \cdot 10^7} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{16}}{3,7 \cdot 10^7} = 1,13 \text{ mKCi}$$

o'lti soatlik ish kunida chegaraviy ruxsat etilgan doza quvvati

$$P_{p.o.} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ bop / z.}$$

Nuqtaviy manbadan chiqayotgan γ -kvantlarning havodagi ekspozitsion dozasi K_γ ionizatsion doimiy bilan ifodalanadi. Kolbalt ^{60}So nuqtaviy manba uchun

$$K_\gamma(^{60}\text{Co}) = 12,93 \text{ Pcm}^2 / (\text{coam. mKCi})$$

$$P(R) = AK_\gamma / R^2$$

bu yerda **P**-ekspozitsion doza, **R/coat**

A- γ -manbaning mKCi lardagi aktivligi.

R-manbagacha bilan masofa (sm). Ushbu formuladan **R** topamiz:

$$R = \sqrt{AK_\gamma / R_{p.g.}} = \sqrt{1,13 \cdot 12,93 / 2,8 \cdot 10^{-2}} \approx 72 \text{ cm.}$$

Javob: $R \approx 72 \text{ cm.}$

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

11 Energiyasi 0,6 MeV bo'lgan nozik gamma-nurlar taqriban yarim yutilish qatlamlarning qalinligini beton uchun aniq-anoq (*Javob: 55,46*).

12 Nozik gamma-nurlar manbasini (gamma-kant energiyasi 1,6 MeV) qaysi qanday chuqurlikgacha botirilganda suvdan chiqayotgan gamma nurlar intensivligi 1000 marta kamayadi? (*Javob: 115 sm*).

13 Ikkovchi rentgen nurlar ekspozitsion dozasi 1 R bo'lganda normal sharoitda 1 sm^3 havodagi molekullarning qancha ulushi bo'ladi? (*Javob: 0,8 \cdot 10^{16}*).

14 Energiyasi 1 MeV bo'lgan gamma-kvantlar 10 sm qatlamda alyuminiydan o'tganda uning intensivligining 5 marta kamayishi asosan Kompton effekt tufayli bo'ladi. Gamma-kvant intensivligini kamayishi 10 sm qo'rg'oshindan o'tganda 3000 marta kamayishi qo'rg'oshindagi fotoyutilish kesimini toping (*Javob: 0,0099*).

NAZORAT SAVOLLAR

- 1 Yutilgan doza va uning o'lchov birliklari.
- 2 Nutlanish dozasi va doza quvvati nima?
- 3 Sifat koeffitsienti nima?
- 4 γ nurlanish dozimetriyasi.
- 5 β nurlanish dozimetriyasi
- 6 α zarralar va protonlar dozimetriyasi
- 7 Neytron nurlanish dozimetriyasi
- 8 chegaraviy ruxsat etilgan nurlanish
- 9 Nuqtaviy manbaning doza quvvati
- 10 Radioaktiv fon nima?
- 11 Radioaktiv fon qanday manbalar hisobiga vujudga keladi?

TEST SAVOLLAR

- Quyidagi nurlanishlarning qaysi biri bilvosita ionlovchi nurlanishlarga kiradi?
 - Ionlar va myuonlar
 - Elektron, pozitron, proton va ionlar.
 - Kosmik nurlar dastasi.
 - Rentgen va gamma-nurlanishlar.
- Aktivlik o'lchov birligi qilib nima qabul qilingan?
 - Kg/m
 - J/s.
 - Ion/s.
 - Bk.
- Nurlanish dozasi deb qanday kattalikka aytiladi?
 - Har qanday modda, tirik organizm va uning to'qimalari ta'sir darajasi baholash uchun qo'llaniladigan kattalikka aytiladi.
 - Har qanday moddaning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi.
 - Har qanday moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori
 - Har qanday modda massasining uning hajmiga nisbatiga.
- Yutilgan doza deb qanday kattalikka aytiladi?
 - Birlik hajmda yutilgan energiya.
 - Moddaning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi.
 - Moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori
 - Modda massasining uning hajmiga nisbatiga.
- Yutilgan doza o'lchov birligi qilib nima qabul qilingan?
 - Kg/m
 - J/kg.
 - Ion/s.
 - Gr.
- Yutilgan doza qanday formula bilan aniqlaniladi?
 - $D = dE / dm$
 - $D = dE / dm + dV$
 - $D = dP / dm$
 - $D = dE / dt.$
- Ekspozitsion doza deb qanday kattalikka aytiladi?
 - Havoning birlik hajmdagi bir xil ishorali ionlar zaryadlar yig'indisining shu hajmdagi havo massasiga nisbatiga aytiladi.
 - Havoning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi.
 - Havoning moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori

1) Havo massasining uning hajmiga nisbatiga.

2) Ekspozitsion doza o'lchov birligi qilib nima qabul qilingan?

A) J/kg.

B) J/s.

C) Ion/s.

D) Bk.

3) Ekspozitsion doza qanday formula bilan aniqlaniladi?

A) $D = dE / dm$

B) $D = dE / dm + dV$

C) $D = dP / dm$

D) $D = dE / dt.$

4) $C_{ecv}(Gr)$ o'lchov birligi qanday kattalik o'lchanadin?

A) Gamma-ekvivalent

B) Yutilgan doza

C) Doza quvvati.

D) Radioaktivlik.

5) E_{aktiv} doza deb qanday kattalikka aytiladi?

A) Inson butun tanasi va uning alohida a'zolari va to'qimalari umumiy radiosezgiriligini e'tiborga olgan holda nurlanishi oqibatida u oq kelajakda yuzaga kelishi mumkin bo'lgan xavfning o'lchovi sifatida qo'llaniladigan kattalik.

B) Havoning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasini bo'lak bo'lib, u doza kattaligini ko'rsatadi...

C) Havoning moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdorining o'lchov birligi bo'lib, u issiqlikning moddalarda tarqalishini ko'rsatadi.

D) Havo massasining uning hajmiga nisbatiga, ya'ni havoning zichligidir.

6) $R_{radiatsiyaning}$ atomlar bilan o'zaro ta'sirlashishi ... olib boriladi.

A) Ionizatsiya

B) Rentgen nurlanishlar hosil bo'lishi jarayoniga.

C) Annigilyasiya hodisasiga

D) Radioaktivlikka

7) $Z_{vert}(Zp)$ o'lchov birligi qanday kattalik o'lchanadin?

A) Ekvivalent doza

B) Yutilgan doza

- C) Doza quvvati.
D) Ekspozitsion.

14. Sifat koefitsientining qanday nurlanishlar uchun 1 ga teng bo'ladi?

- A) Rentgen va gamma-nurlanishlar, elektronlar, pozitronlar
B) Alfa-zarralar, $E_{kin} < 10 \text{ MeV}$; og'ir yadrolar
C) Neytronlar, $0.1 < E_{kin} < 10 \text{ MeV}$; protonlar, $E_{kin} < 10 \text{ MeV}$
D) Neytronlar, $E_{kin} < 0.02 \text{ MeV}$

15. Alfa-nurlanishlar qanday zarralar oqimidan iborat?

- A) Geliy yadrolaridan
B) Elektronlardan
C) Pozitronlardan.
D) Protonlardan

16. Tabiiy fon qanday bo'lgan xaysiz hisoblanadi?

- A) 25 mkR/soat
B) 150 mkR/soat.
C) 430 mkR/soat
D) 122 mkR/soat

17. Doza quvvati ob'ektgacha bo'lgan masofa oshishi bilan ...

- A) Masofaga teskari proporsional ravishda kamayadi
B) Masofaga to'g'ri proporsional ravishda oshadi
C) Masofaga teskari proporsional ravishda oshadi
D) Masofaning kvadratiga teskari proporsional ravishda kamayadi

18. Quyidagi radioizotoplarning qaysi biri PET qo'llaniladi?

- A) ^{11}S , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F
B) ^{22}Na , ^{63}Cu , ^{16}O , ^{53}Fe
C) ^{13}S , ^{14}N , ^{16}O , ^{19}F
D) ^{12}S , ^{14}N , ^{111}In , ^{19}F

19. Radiofarmpreparatlar (RFP) nima?

- A) Tarkibida radionuklid bo'lgan modda bo'lib, u inson a'zolarida ma'lum bir diagnostik masalalarni hal qilishga imkon beradi
B) Tarkibida radionuklid, farmakinetika bo'lgan kimyoviy birikmalar kompleksi bo'lib, u inson a'zolarida ma'lum bir diagnostik masalalarni hal qilishga imkon beradi
C) Tarkibida farmakinetika bo'lgan kimyoviy birikmalar kompleksi bo'lib, u inson a'zolarida ma'lum bir diagnostik masalalarni hal qilishga imkon beradi

- D) Tarkibida vitaminlar bo'lgan kimyoviy birikmalar kompleksi bo'lib, u inson a'zolarida ma'lum bir diagnostik masalalarni hal qilishga imkon beradi

20. 1933 yilda nemis bioximiki Vorburg (Otto Gënrix Vërburg) nima amiqlagan?

- A) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada glyukoza iste'mol qilishini amiqlagadi
B) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada vitaminlar iste'mol qilishini amiqlagadi.
C) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada temir moddasini iste'mol qilishini amiqlagadi.
D) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada mis moddasini iste'mol qilishini amiqlagadi.

Absolyut metodning yana bir kamchiligi bu aktivatsiya kesimining aniqlash xatoligiga bog'lanishidir. Bu kattalik nisbatan katta xatolik bilan aniqlaniladi.

Etalonlar metodi. Absolyut metodiga xos bo'lgan ayrim kamchiliklardan xoli bo'lgan metod bu etalonlar metodi hisoblanadi. Ushbu metodda tahlil qilinayotgan namuna bilan bir vaqtda tarkibida aniqlanayotgan elementning miqdori ma'lum bo'lgan yoki asosan shu elementdan tashkil topgan modda – etalon nurlantiriladi. Nurlanish tugagandan keyin aktivatsion tahlilning instrumental yoki radiokimyoviy varianti qo'llanilishi mumkin. Ikkala holda ham tekshirilayotgan namuna va etalon aktivligi bir xil sharoitda o'lchaniladi. Bunda aniqlanishi lozim bo'lgan element miqdori quyidagi munosabat yordamida aniqlaniladi

$$\frac{m_x}{m_{et}} = \frac{A_x}{A_{et}}$$

bu yerda m_x va m_{et} - mos holda namuna va etalondagi element miqdori, A_x va A_{et} - mos holda namuna va etalonlarning aktivligi. Agar o'lchashlar γ -spektrometrdan va bir xil sharoitda (bir xil o'lchash vaqti va geometriyasida) olib borilayotgan bo'lsa, unda aktivlik o'rni γ -spektrdagi fotocho'qqi yuzasini olish mumkin.

Etalon metodida aktivatsiya qilinayotgan zarralar yoki γ -kvantlar oqim zichligini aniq bilishga hojat qolmaydi. Bu holdagi muhim shartlardan biri, etalon va namuna egallagan hajimda oqim zichligi bir xil bo'lishi lozim. Shuningdek, nurlanish davomida oqim intensivligi o'zgarimasdan turishga ham talab bo'lmay qoladi. Aktivatsiya kesimi kattaligining xatoligiga va nurlanish spektridagi energetik o'zgarishlar oxirgi natijaga ta'sir qilmaydi. Absolyut o'lchashlar o'rni nisbiy o'lchashlarni qo'llash aktivatsion tahlil o'tkazish jarayonini asonlashtiradi va metodning aniqligini oshiradi.

Monitor metodi. Monitor metodining asosiy mazmuni nurlanish jarayonini, ya'ni aktivatsiya qilayotgan zarralar (γ -kvantlar) oqimi yoki intensivligini nazorat qilishdan iboratdir. Ushbu metodda monitor va etalon birgalikda nurlantiriladi va ularning aktivliklar o'lchanadi. Xuddi shunday jarayon namuna uchun ham bajariladi, ya'ni monitor va etalon birgalikda nurlantiriladi va ularning aktivliklar

o'lchanadi. Miqdoriy natija quyidagi munosabat yordamida aniqlaniladi

$$m_x = \frac{A_x}{A_{et}} \cdot \frac{A_{met}}{A_{mx}} \cdot m_{et}$$

bu yerda m_x va m_{et} - mos holda namuna va etalondagi element miqdori, A_x va A_{et} - mos holda namuna va etalonlarning aktivligi, A_{met} va A_{mx} - mos holda namuna va etalonlarning monitori aktivligi.

Monitor metodi bilan bir vaqtda bir nechta elementni aniqlash mumkin. Bu esa o'z navbatida ekspres va ko'p elementli aktivatsion analizni amalga oshirishga imkon beradi. Monitor sifatida aktivatsiya kesimlari katta va yarim emirilish davri o'lchashga qo'lay bo'lgan elementlar yoki brikmlar olinadi. Monitor tanlash aktivatsion tahlil turiga xam bog'liq bo'ladi. Masalan issiqlik neytronlar ta'siri ostida aktivatsion tahlil amalga oshirilayotgan bo'lsa, oltin, kobalt, marganets, mis va boshqa elementlar, shuningdek ba'zi bir qotishmalar(kobalt va alyuminiy qotishmasi) ham qo'llaniladi. Aktivatsion tahlil jarayonini amalga oshirganda bitta yoki bir shaklda bo'lgan bir nechta monitorlar qo'llaniladi. Monitor tayyorlanmoqchi bo'lgan modda shunday shaklda bo'lishi kerakki unda bir nechta standart monitorlar tayyorlash mumkin bo'lsin. Ko'pchilik hollar monitor folga yoki sim ko'rinishda bo'ladi. Hozirgi kunda aktivatsion tahlil metodida asosan monitor metodi keng qo'llaniladi.

5.3-§. Aktivatsion tahlil sezgirligi. Aniqlanish va payqash chegarasi

Radionuklidlarning (yoki radioizotoplarning) chiqishi quyida-gi ifoda bilan aniqlanadi:

$$Y = \frac{S}{m\Omega\epsilon I_\gamma (1 - e^{-\lambda t_n})} e^{-\lambda t_n} \quad (5.2)$$

bu yerda S – gamma-spektrdagi fotocho'qqining yuzasi, m – namuna massasi, Ω – zarralarni qayd qilish fazoviy burchagi, ϵ – detektorning gamma-kvantlarni qayd qilish effektivligi, I_γ – gamma-

kvantlarning intensivligi, t_c , t_n - mos holda gamma-spektrni o'lchash va pauza (nurlanish tugagandan o'lchashgacha bo'lgan vaqt) vaqtlari.

Aniqlanish chegarasi sifatida spektrometring apparatura (tabiiy) fonida $0,3$ standart chetlanish bilan aniqlash mumkin bo'lgan element massasi qabul qilingan ya'ni foydali signal minimal impulslar soni $N_{\min} = 3\sqrt{N_{\text{fon}}}$. Agarda analitik gamma-chiziq yuqori energiyali gamma-kvantlarning kompton taqsimotida yotgan bo'lsa, N_{\min} sifatida analitik cho'qqi sohasidagi real qayd qilinayotgan fon olinadi. Aniqlanish chegarasi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$m_{\min} = \frac{3\sqrt{N_{\text{fon}}}}{S} m_0 \quad (5.3)$$

Bu yerda S - fotocho'qqi yuzasi, m - etalondagi element namuna massasi. Ayrim hollarda bu kattalik reaksiya chiqishi orqali ham aniqlaniladi:

$$m_{\min} = \frac{3\sqrt{N_{\text{fon}}}}{Y} \quad (5.4)$$

5.4-§. Aktivatsion tahlilning umumiy yo'nalishi

Modda tarkibini aktivatsion tahlil qilish usuli ketma-ket bir nechta bosqichlardan iborat. Tahlil vaqtida bu ketma-ketliklarga qat'iy rioya qilinadi. Bosqichlar soni va ularning xususiyati tadqiq qilinayotgan modda turiga, aniqlanish chegarasiga, aniqlanayotgan elementlar soniga, nurlanish turlariga va boshqa yana bir nechta omillarga bog'liq bo'ladi.

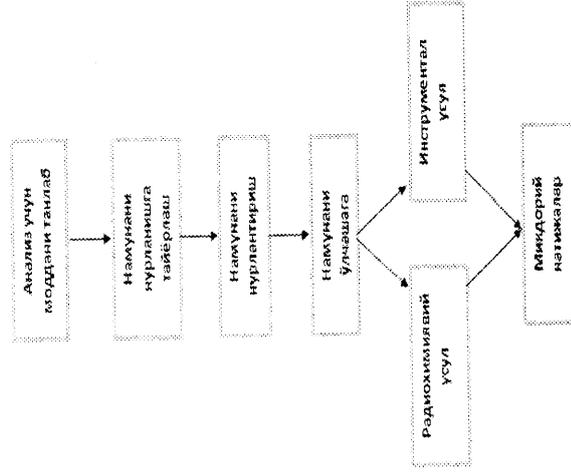
Yuqorida aytib o'tilgandek aktivatsion tahlil, tahlil sxemasi bo'yicha ikkita bosqichga bo'linadi, ya'ni instrumental va radio-kimyoviy aktivatsion tahlil. Ikki hol uchun qattiq moddani tahlil qilish usuli **5.1-rasm**da keltirilgan.

Birinchi bosqichda analitik tadqiqotlar uchun yoki ilmiy yoki ishlab chiqarish masalalarini hal qilish uchun nazorat maqsadida ob'ekt (modda) tanlanadi. Ushbu modda yoki materialning analitik laboratoriyaga etib kelguncha bo'lgan tarixi ma'lum bo'lishi shart.

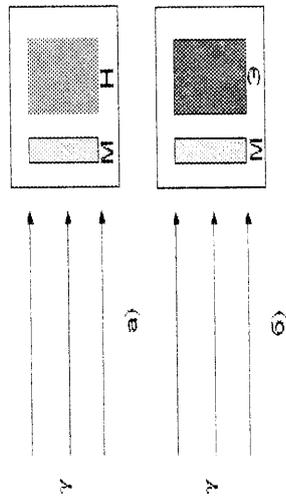
Hundan tashqari uning birlamcha tarkibi (makrokomponentalarining tuzilishi) ham ma'lum bo'lishi kerak. Yana bir muhim shartlardan biri bu uning massasi etarli miqdorda bo'lishidir. Chunki ayrim hol-larda zarur bo'lib qolgan taqdirda qayta tahlil (tahlil) qilishga to'g'ri keladi.

Ikkinchi bosqichda tahlil uchun mo'ljallangan namunani nurlanishga tayyorlash. Namuna bu tekshirish uchun berilgan modda yoki materialdan olinib tayyorlaniladi. Namuna shakli, etalon va moni-tor shakllari bilan bir bo'lishi lozim. Ko'pchilik hollarda namuna-lar disk ko'rinishida tayyorlanadi. Agar namuna poroshok ko'rinishida bo'lsa unda bu parashokdan tabletkaga tayyorlanadi. Buning uchun gidravlik presslardan foydalaniladi. Agar namuna metall ko'rinishida bo'lsa u holda stanokda disk shakliga olib keltiriladi. Namunaning massasi, aktivatsion tahlil turiga va nurlanish doza-siga yoki intensivligiga qarab olinadi.

Namuna (monitor) va etalon (monitor) lar maxsus idishlarga joylashtiriladi. Bu idishni konteyner deyiladi. Konteynerlar ko'pchilik hollarda (neytron- va gamma-aktivatsion tahlilda) po-litilen yoki alyumindan tayyorlaniladi.



5.1-rasm. Aktivatsion tahlilning umumiy yo'nalishi



5.2-rasm. Nurlantirish sxemasi. a) — namuna bilan monitorni nurlantirish; b) — etalon bilan monitorni nurlantirish.

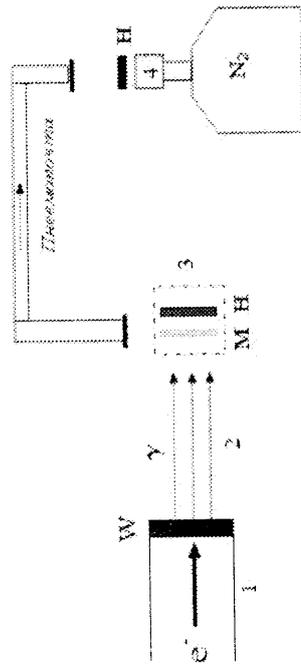
Uchinchi bosqich namunani nurlantirish. Bu bosqichda tekshirilayotgan namuna monitor va etalon bilan birgalikda monitorlar konteynerlarga joylashtiriladi (5.2-rasmga qarang). Biz ushbu jayonni elektron tezlatgichda (mikrotron, betatron yoki chiziqli elektron tezlatgichlar) namunalarni va etalonlarni nurlantirish misolida tushuntiramiz. Namunani nurlantirish va o'lchash sxemasi 5.3-rasmda keltirilgan. Konteynerga joylashtirilgan namuna va monitor pnevmopochta yordamida nurlantirish postiga (maydoniga) olib boriladi va ma'lum bir vaqt nurlantirilgandan keyin, konteyner o'lchash xonasiga, ya'ni detektor joylashgan xonaga keltiriladi. Aktivatsiya tenglamasidan namunalarni nurlantirish vaqti kelib chiqadi, ya'ni namunadagi tekshirilayotgan radioizotopda (yoki analitik radioizotopda) maksimal aktivlikka erishish uchun uni 5÷10 yarim emirilish davrigacha nurlantirish lozim. Ammo bunga hamma vaqt ham erishib bo'lmaydi. Sababi ayrim analitik radioizotoplarning yarim emirilish davrlari bir necha kun yoki oy (uzoq yashovchi radioizotoplar) bo'lishi mumkin, bunday hollarda sharoit-dan kelib chiqqan holda nurlanish vaqti aniqlanadi.

Ko'pchilik kimyoviy elementlarni nurlantirilganda yadro xarakteristikalarini xususan yarim emirilish davrlari har xil bo'lgan ikki yoki undan ortiq radioizotoplar hosil bo'lishi mumkin. U yoki bu radioizotopni element miqdorini aniqlash uchun tanlab olish bir necha faktorga bog'liq bo'ladi. Tadqiqotchi qisqa yashovchi yoki uzoq yashovchi radioizotopni tanlab olishi mumkin. Tanlab olingan radioizotop analitik radioizotop deyiladi. Agar qisqa yashovchi radioizotop

analitik radioizotop sifatida olinsa, u holda tezkor (yoki ekspress) tahlilni amalga oshirish mumkin. Qisqa yashovchi radioizotoplar bilan ishlaganda nurlantirilgan namuna tezkorlik bilan o'lchash qurilmasiga olib kelinishi kerak. Bu pnevmopochta yordamida amalga oshiriladi. Qisqa yashovchi radioizotoplar bilan tahlil o'tkazishning kamchiliklaridan biri bu usul bilan bir vaqtda ko'p elementni aniqlab bo'lmastir. Shunga qaramasdan hozirgi kunda sanoatda asosan ekspress tahlillar qo'llaniladi. O'rta va uzoq yashovchi radioizotoplar bilan bir vaqtda ko'p elementli tahlillarni amalga oshirish mumkin. Bu usul asosan ilmiy tadqiqot ishlarida qo'llaniladi.

Oxirgi bosqich bu namuna, etalon va monitorlarning induksiya qiyalangan aktivliklarini o'lchash va bu o'lchash natijasi bo'yicha element miqdorini aniqlash. Nurlanish tugagandan keyin o'lchashgacha bo'lgan vaqtni pauza vaqti ham deyiladi. Bu vaqt analitik radioizotopning yarim emirilish davriga qarab belgilanadi. Ayrim hollarda analitik radioizotopni o'lchashga xalal beruvchi qisqa yashovchi radioizotoplarni emirilishi kutish uchun namuna ma'lum bir vaqt o'lchamasdan turiladi.

Hozirgi kunda induksiya qiyalangan aktivliklarini o'lchash uchun asosan o'ta toza germaniyli yarim o'tazgichli detektorlar qo'llaniladi. Bu detektorlar yuqori samaradorlikka va yuqori energetik ajratish qobiliyatiga egadir.

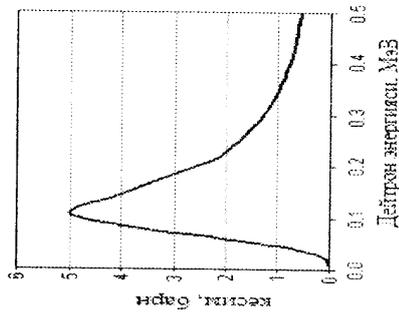


5.3-rasm. Namunani nurlantirish va o'lchash sxemasi. 1 — elektron tezlatgich kanali, 2 — gamma-kvantlar dastasi, 3 — konteyner, 4 — yarim o'tkazgichli detektor, N — namuna

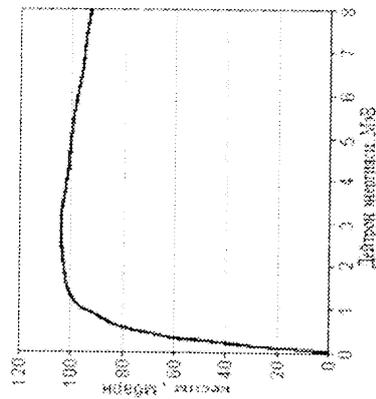
5.2-jadval.

$t(d,n)^4\text{He}$ va $d(d,n)^3\text{He}$ yadro reaksiyalarining asosiy xususiyatlari

Reaksiya	Reaksiya energiyasi Q, MeV	Neytronlar energiyasi, MeV	Maksimal kesim σ_{\max} barn	σ_{\max} bo'lganda i.m.s da tezlatilgan zarralar energiyasi, MeV
$d(d,^3\text{He})n$	3.3	~2.5	~0.1	~1.0
$d(t,^4\text{He})n$	17.6	~14.2	5.0	0.13



5.6-rasm. $t(d,n)^4\text{He}$ reaksiya uchun uyg'onish funksiyasi



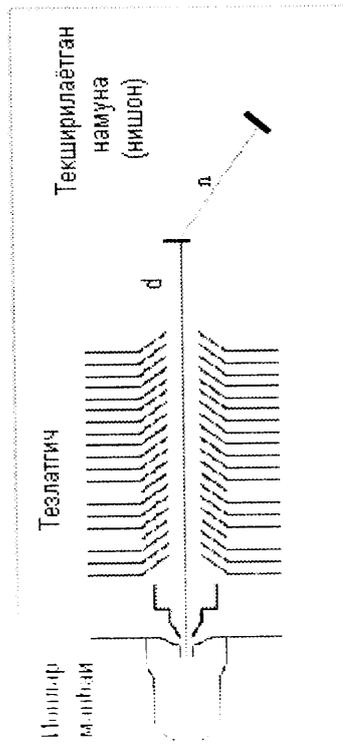
5.7-rasm. $d(d,n)^3\text{He}$ reaksiya uchun uyg'onish funksiyasi.

Neytron generatori nuqtaviy monoenergetik neytronlar manbai bo'lishi mumkin. **d-t** reaksiyada hosil bo'lgan neytronlar

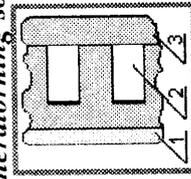
Bunday neytron generatorlarida qo'llaniladigan zarralar odatda uzluksiz ta'sirli tezlatgichlardir.

Impuls dastali ionlarni olish uchun impulsli ionli manbaudan foydalaniladi. 5.8-rasmida neytron generatorning sodda shema sxemasi keltirilgan.

Yuqori intensivlikdagi neytronlar oqimini olishga imkon beradigan neytron generatorlarning nishon konvertorlari odatda qattiq jihatli iborat bo'lib, mis taglik surtilgan titan, skandiy yoki sink yuqori qatlamli (bir necha o'n mikrometrgacha) (**5.9-rasm**) bo'ladi. Bu metallar *metall g'idridlari* deb nomlangan holatni hosil qilishga qodir. Titan yoki skandiy g'idridi bitta metall atomiga ikkitaga yaqin vodorod atomini ushlab qolish qobiliyatiga egadir. Metall g'idridlarning bu xususiyati ularni vodorod izotoplarini akkumulyator sifatida qo'llashga imkon beradi.



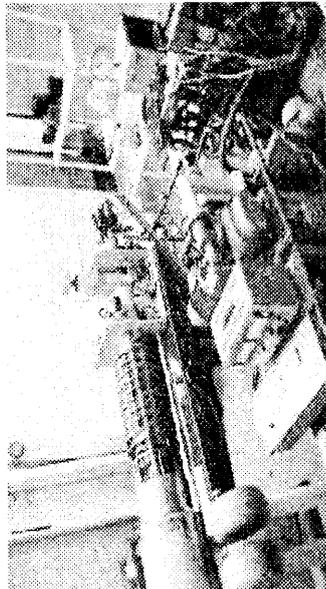
5.8-rasm. Neytron generatorning soddalashtirilgan sxemasi



5.9-rasm. Neytron generator nishoni kesimi; 1) titan qatlami, 2) sovutish uchun kanal, 3) mis taglik.

Zaryadlangan zarralar dastasining nishonda yo'qotadigan energiyasi juda katta qiymatlarga ega bo'lishi mumkin (1 cm^2 ga o'nlab

kVt to'g'ri kelishi mumkin). Bu esa o'z navbatida nishon-konvertorning samarali sovutib turishi talab etadi. Odatda suv bilan sovutish ko'p qo'llaniladi. Bundan tashqari nishon tez aylanuchi disk ko'rinishda bo'ladi. Shunday qilib, dasta tushadigan effektiv maydonni oshiradi. Neytron generatorda $d(t, {}^4\text{He})n$ reaksiya qo'llanganda 4π fazoviy burchakka $\sim 10^{12}$ neytronov/s gacha neytronlar oqimini hosil qilish mumkin. Standart neytron generatorlarda u ancha kam ($\sim 10^{10}$ neytronov/s). O'zbekiston Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida NG-150 neytron generatorida 14 MeV energiyali neytronlar dastasida hosil qilinadi (5.10-rasm).



5.10-rasm. NG-150 neytron generatorning ko'rinishi

NG-150 neytron generatori — yadro fizikasi, va radiatsion fizika sohaslarida keng doirada tadqiqotlar olib borish, shuningdek tez neytronlar oqimidan foydalangan holda modda tarkibini element tahlillarini o'tkazishga mo'ljallangan qurilmadir. Ushbu qurilma deuteriy va tritiy nishonlarida $D+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ yoki $T+d \rightarrow \alpha+n$ reaksiyalar yordamida energiyalari ~ 2.4 va 14 MeV bo'lgan tez neytronlar oqimlari hosil qilinadi. Bunda neytronlar oqimi mos holda $\sim 10^8$ va 10^{10} n/sek tashkil qiladi.

NG-150 neytron generatorining asosiy kattaliklari:

- Neytronlar maksimal oqimi — $2 \cdot 10^{10}$ n/sek.
- Tezlatilgan ionlarning nominal energiyasi — 150 keV.
- Ionlar energiyasini o'zgartirish chegarasi — 50 – 150 keV.
- Nishonga kelib tushayotgan ionlar dastasining tok kuchi — 3 mA gacha.

- Nominal rejimda nishonga kelib tushgan dasta diametri — 10 – 10 mm
- Ishlash rejimi uzluksiz.

5.6-§. Gamma-aktivatsion tahlil

Monone energetik va tormozli gamma-nurlanishlar. Gamma-nurlanishlar manbai sifatida radioizotop va elektron tezlatgichlar manbalari qo'llaniladi. Yarim emirilish davri katta bo'lgan radioizotop manbalarning ba'zi birlaridan chiqayotgan gamma-kvantlarning energiyalari 2 MeVdan katta, ammo 3 MeV dan kichik. Tajribalarda ko'p qo'llaniladigan monoxromatik gamma-nurlanishlar manbalari quyidagilarning xususiyatlari **5.3-jadval**da keltirilgan.

Ushbu reaksiya bilan tabiiy radioaktiv elementlarning gamma-kvantlari ta'sirida yuz beradigan fotoyadro reaksiyalarning ro'yxati chetlanadi. Boshqa hamma yadrolarda nuklonning ajralish energiyasi radioaktiv yadrolar chiqarayotgan gamma-kvantlarining energiyasidan katta bo'lganligi sababli fotoyadro reaksiyasi yuz bermaydi.

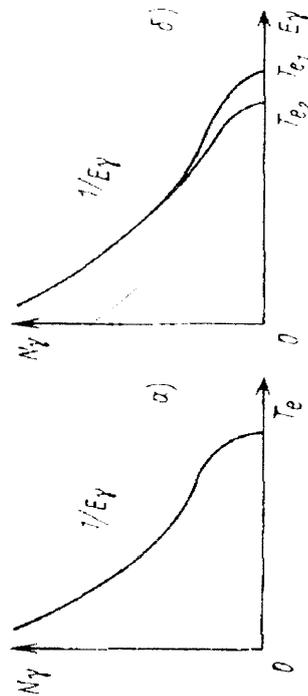
5.3-jadval.

Monoxromatik gamma-nurlanishlar manbai

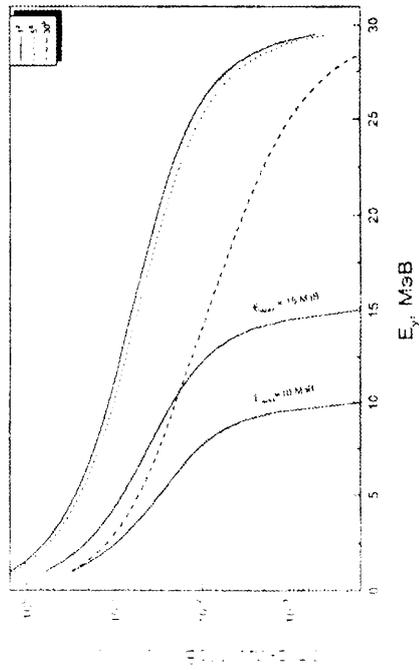
Nuklid	γ -kvantlar energiyasi, MeV	γ -kvantlar intensivligi, %	$T_{1/2}$
${}^{60}\text{Co}$	1173,2 1332,5	99,90 99,98	5,27 let
${}^{137}\text{Cs}$	0,662	85,21	30 let
${}^{22}\text{Na}$	2,754	99,94	15,02 ch
${}^{56}\text{Co}$	1,121	99,99	83,81 sut
${}^{54}\text{Mn}$	0,847	98,90	2,578 ch
	1,811	27,20	
	2,113	14,30	

Yuqori energiyali gamma-kvantlarni olish imkoniyati faqat yuqori energiyali elektron tezlatgichlarni yaratgandan keyingina paydo bo'ladi. Elektron tezlatgichlarda (betatron, mikrotron va chiziqli mikrotron tezlatgich) yuqori energiyali gamma-kvantlarni rentgen

trubkasida tormozli rentgen nurlar hosil qilishiga o'xshash vaziyatda hosil qilinadi, ya'ni yuqori energiyagacha tezlatilgan monoxoromatik elektronlar Z katta bo'lgan elementdan (W, Pb) tayyorlangan nishonpina kelib tushadilar va unda tormozlanadilar. Natijada tormozli gamma nurlar hosil bo'lib, ularning spektri uzluksizdir. Ushbu spektr 5.11 rasmda ko'rsatilgan. Tormozli gamma-nurlanishlarning maksimal energiyasi tormozlanayotgan elektron-larning kinetik energiyasiga teng bo'lib, intensivligi esa energiyaga teskari proporsional ravishda kamayadi. Shunday qilib, elektron-larning tormozlanishi natijasida berilgan maksimal energiyali uzluksiz gamma-kvantlar spektrini olish mumkin ekan. 5.12-rasmda qalin nishonda (mikrotron va chiziqli elektron tezlatgichlarda qo'llaniladigan nishon) hosil bo'ladigan tormozli nurlar spektri-ning hisoblash natijasida olingan shakli keltirilgan. Asosan volfram elementidan yasalgan tormozli nurlar nishonlari keng qo'llaniladi. Betatronlarda nishonlar yuqqa nishon deb qabul qilinadi. Bu ushbu tezlatgichlarda tormozli nurlar hosil qilish mexanizmi bilan bog'liq.



5.11-rasm. Tormozli nurlar spektri: a — energiyasi T_e bo'lgan elektronlar hosil qilgan spektr; energiyalari T_{e1} va T_{e2} bo'lgan elektronlar hosil qilgan spektrlar.



5.12-rasm. Qalin nishonda hosil bo'ladigan tormozli nurlar spektrining hisoblash natijasida olingan shakli.

Chiziqli tezlatgichlar. Chiziqli tezlatgichlar deb undagi tezlatilayotgan zarralar traektoriyasi to'g'ri chiziqqa yaqin bo'lgan qurilmalar aytiladi. Shuni ta'kidlab o'tish kerakki, to'g'ri tezlanish deb nomlangan metodga asoslangan yuqori voltli qurilmalarda ham zarralar to'g'ri chiziqli bo'ylab harakatlanadilar. Ayrim hollarda bunday tezlatgichlarni elektrostatik chiziqli tezlatgichlar deb ham aytiladi. Bunday tezlatgichlarda zarralarga energiya doimiy potentsiallar yarmasi katta bo'lgan oraliqdan bir marta o'tganda beriladi. Bunday potentsiallar farqi manbai sifatida *kaskad gene-ratori*, *Vande-Gravf generatori*, *impuls generatori*, *impulsi transformator* va boshqalar ishlatiladi. Biz ayrim chiziqli chez-latgichlarning ishlash prinsipi bilan tanishib chiqamiz.

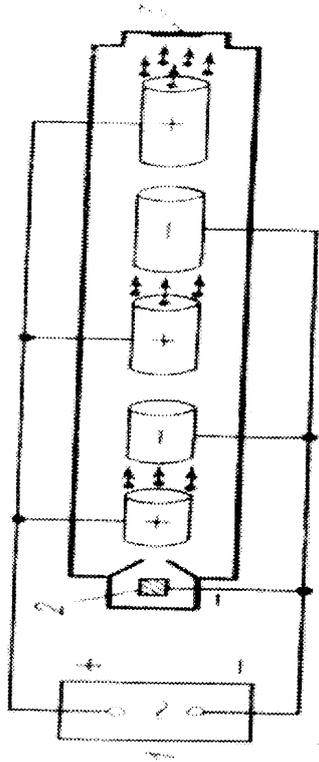
Chiziqli rezonans tezlatgichlar. Ushbu tezlatgichlarda zarralar to'g'ri chiziqli bo'yicha o'zgaruvchan elektr maydon ta'sirida tezlatiladi.

toqchalar ionlarning inersial harakatlanish vaqti hamma trubkalarda bir vaqtda **YuCh generator kuchlanish** o'zgarishining yarim davriga teng. Bu vaqtda har bir trubka uchun elektron elektrodlar **YuCh-generatorning** bitta klemmasiga, toqchalar uchun ikkinchi klemmasiga ulanadi.

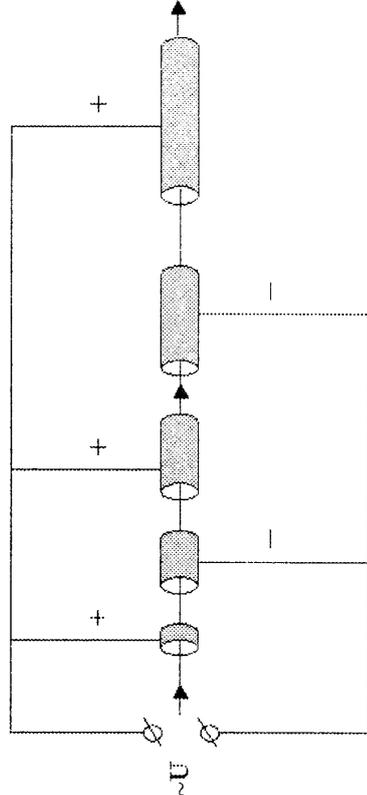
Har bir zarlyadlangan ionlar birinchi va ikkinchi elektrodlar o'rtasida harakatlanib, har bir ion uchun bir vaqtda toq elektrodga musbat, ikkinchi toq elektrodga esa manfiy kuchlanish beriladi. Ionlar ikkinchi toq elektrodga chiqqan momentida esa juft elektrodga musbat, toq elektrodga esa manfiy kuchlanish beriladi va x.k. Har bir elektrod dan ionlarning o'tish vaqti o'zgaruvchan kuchlanish davriga teng. Shuning uchun ham ushbu tezlatgichlarni rezonans tezlatgichlar deyiladi. Chiziqli rezonans tezlatgichlarining chiqishida zarralar energiyasini bir vaqtda o'zgaruvchan kuchlanishda **10-15 MeV** gacha oshirish mumkin. Ushbu tezlatgichlarda zarralar nishonga impuls bo'lib kelib tushadi va tushish vaqti **YuCh-generatorning** davriga teng. Chiziqli rezonans tezlatgichlar impulsli tezlatgichlar hisoblanadilar. Odatda bu tezlatgichlarning o'rtacha toki bir necha **mA** ni (**ba'zan 20-30 mA** gacha) tashkil etadi. Impulsdagi tok **50 mA** gacha bo'ladi.

Chiziqli rezonans tezlatgichlarning ustunligi bu katta tok olish va zarralar injeksiyasi (kiritish) va chiqishining soddaligi hisoblanadi. Hozirgi kunda chiziqli tezlatgichlarda zarralar traektoriyasi to'g'ri chiziqli bo'lganligi sababli ular elektromagnit nurlanishlar chiqaruvchi. Keyingi hol og'ir zarralar uchun hech qanday rol o'ynamaydi, lekin yuqori energiyali (**bir necha yuz MeV va undan ortiq**) elektronlar uchun muhimdir. Elektronlar halqali tezlatgichlarda toqchalar va ularning energiyasining bir qismi elektro-magnit nurlanishlarga sarf bo'ladi. Shuning uchun ham chiziqli tezlatgichlar va har bir elektronlarni tezlatish uchun quriladi.

Siklik tezlatgichlar. Siklik tezlatgichlarni shartli ravishda ikkiga bo'lish mumkin: **rezonans va induksion tezlatgichlar**. Siklik rezonans tezlatgichlarda qo'yilgan boshqaruvchi magnit maydon ta'rifida zarralar traektoriyasi egrilanib, aylana yoki yassi spiral shaklga oladi va shu bilan birga tezlatilayotgan zarralar bitta tezlatuvchi oraliqni ko'p marta o'tadi. Zarralarning tezlatuvchi oraliq orqali keyingi ikki o'tishlar orasidagi vaqt tezlatuvchi maydon davrining o'zgarishiga teng yoki karrali bo'lishi kerak.



5.13-rasm. Chiziqli rezonans tezlatgich: 1-YuCh-generator; 2-ionlar manbai; 3-nishon



5.14-rasm. Chiziqli rezonans tezlatgich

Yuqori voltli chiziqli tezlatgichlardan farqli ravishda, rezonans chiziqli tezlatgichlarda katta kuchlanish emas, balki rezonans tezlatish prinsipi qo'llaniladi. Chiziqli rezonans tezlatgichlar tezlatish trubkasida ionlarni tezlatish yuqori chastotali (**YuCh**) generator dan berilgan uncha katta bo'lmagan kuchlanish orqali ko'p marta o'tish orqali amalga oshiriladi (**5.13 va 5.14-rasm**). Trubkasimon elektrodning uzunligi ionlar harakat yo'nalishi bo'ylab kattalashib

Tezlatuvchi elektr maydon va boshqaruvchi magnit maydonlar xususiyatlariga bog'liq holda siklik rezonansli tezlatgichlar quyidagi turlarga bo'linadi: siklotron, sinxrotron, sinxrofazotron.

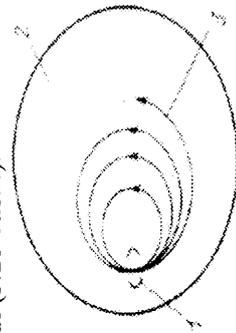
Qo'llanilayotgan fokusirovkalashning xususiyatiga qarab, siklik rezonans tezlatgichlar kuchli fokusirovkali va kuchiz fokusirovkali tezlatgichlarga bo'linadi. Bu yerda siklik tezlatgichlardan *mikrotrot-ron* va *betatronlar* keltirilgan.

Mikrotron. Siklotronda elektronlarni tezlatib bo'lmaydi, sa-babi ular tez relyativistik tezlikka erishadilar. Shunga qaramay shunday tezlatgichlar mavjudki ularda elektronlar bir jinsli magnit maydonda elektr maydon impulsi bilan tezlatiladi. Bunday turdagi tezlatgichlarni mikrotron deyiladi (*bu'zan elektron siklotroni deb ham aytiladi*). Mikrotronda zarracha telatigich kame-rasiga magnit maydonning markaziy qismiga kiritilmasdan balki chetiga kiritiladi. Zarracha chiqish joyiga kovak (*ichi bo'sh*) tezla-tuvchi rezonator joylashtiriladi.

Rezonatorda zarracha har bir aylanishda elektronning tinch-likdagi energiyasiga aniq teng bo'lgan **0,511 MeV** energiya oladi. Elektronning *n-aylanish davri* T_n birinchi aylanish davriga kar-rari bo'ladi:

$$T_n = nT_1 = \frac{2\pi nmc}{eH\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (5.6)$$

Shuning uchun ham elektron har bir aylanishda rezonatorga tezla-tish momentida tushadi. Mikrotronda elektronlar radiusi oshib boruvchi aylana bo'yicha harakatlanib, hamma aylanalar rezonator ichida bir-biriga tegadi (**5.15-rasm**).



5.15-rasm. Mikrotron sxemasi. 1 – rezonator, 2 – elektronlar traektoriyasi.

Mikrotronlar impuls rejimida ham uzluksiz rejimda ham ishlaydi. Ushbu tezlatgichlarda erishilgan chegaraviy energiya **50-100 MeV** ga atolida baholanadi. Energiyaning keyingi oshishiga mag-nit maydonni qo'yiladigan shartlar halqit beradi. Hozirgi kunda mavjud bo'lgan mikrotronlar **4 dan 30 MeV** gacha energiyaga ega. Energiya oshishi bilan mikrotronlarda intensivlik keskin tushadi. Masalan **13 MeV** chegaraviy mikrotron impulsda **100 mA**, **30 MeV** energiyali mikrotronda esa atiga **0,05 mA** tok beradi. Odatda o'rtacha tok impuls qamotidan uch tartibgacha kamdir. Mikrotronning af-zalliklariga elektronlar dastasi chiqishining soddaligi, dastaning yuqori energiya beradiligi (faqat elektrostatik tezlatgichlarga yon beradi) va past energiyalarda etarlicha yuqori intensivlikka ega bo'lishlari kiradi. Shuning uchun ham past energiyalarda mikrotron perspektiv turlari elektron tezlatgich hisoblanadi. Hozirgi kunda **mikrotron** turlari pulblikamizning **Samarkand davlat universitetida** mavjud bo'lib, uning parametrlari quyidagicha: *maksimal orbitalar soni* – **22**; *birinchi tezlatish rejimida elektronlar maksimal energiyasi* – **13 MeV**; *ikkinchi tezlatish rejimida* – **22,5 MeV**; *birinchi rejimdagi o'rtacha tok* **10 mA** gacha; *ikkinchi rejimda* **20 mA** gacha; *impuls toki* **20 mA** gacha; *impuls tokining davromiyligi* – **2,3 mks**; *ist mol qiladigan quvvat* **20 kVt**.

Betatron. O'rtta va past energiyali elektron tezlatgichlardan eng ko'p tarqalgani betatron hisoblanib, u elektronlarning birinchi siklik tezlatgichidir. Uning birinchi nusxasi 1940 – yilda *ameri-kalik olim D.Krest* tomonidan yasalgan. *Betatron* boshqa tezlat-gichlardan shu bilan farq qiladiki, bu turdagi tezlatgichlarda zarra-larni tezlatuvchi elektr maydon tashqaridan berilmaydi, balki zarralarni doiraviy orbitalarda ushlab turuvchi magnit maydonning vaqt bo'yicha tez o'zgarishi natijasida hosil bo'ladi. Haqiqatdan ham agar aksial ammetrik magnit maydon vaqt bo'yicha o'zgarsa, unda **Maksvellning** quyidagi tenglamasiga asosan

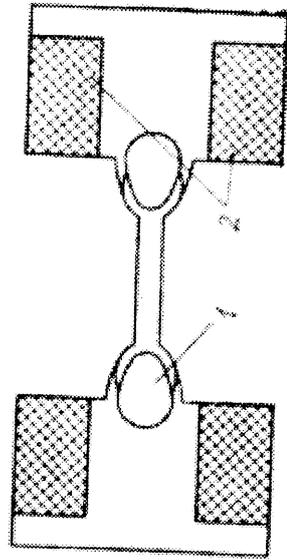
$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (5.7)$$

kuch chiziqlari konsentrik aylanalardan iborat bo'lgan **E** elektr maydon hosil bo'ladi. Ushbu holda elektronlar ultrarelyativistik harakati tufayli magnit maydonning $H(R)$ radial bog'lanishi

shunday tanlab olinishi mumkin, bunda elektron orbitalar radiusi vaqt bo'yicha o'zgaras bo'ladi.

Betatronning ishlashini ma'lum darajada elektr transformatorning ishlashiga o'hshatish mumkin. Ma'lumki transformator berk po'lat o'zakdan va unga kiydirilgan sim cho'lg'amli ikkita g'altakdan iborat.

Agar birlamchi cho'lg'amdan o'zgaruvchan elektr toki o'tkazilsa, o'zakda o'zgaruvchan magnit maydoni hosil bo'ladi. O'z navbatida ikkilamchi cho'lg'amda induksiya **elektr yurituvchi kuch (EYuK)** hosil qiladi.



5.16-rasm. Betatronning vertikal kesimi. 1-elektronlarni tezlatish uchun kamera; 2 – elektromagnit g'altaklar

Agar ikkilamchi cho'lg'amni tutashirsak unda u orqali elektr toki o'tadi. Betatronda ikkinchi o'zak halqasimon vakuum kamerasiga almashtirilgan. Bu kamera «**teshik kulchaga**» o'hshaydi. Betatronning ko'ndalang kesimi sxemasi 5.16-rasmda ko'rsatilgan. Shisha yoki fosfordan yasalgan toroidal kamera magnit qutblari orasiga joylashtiriladi. Kamera ichida 10^6 mm Hg ustuni tartibidagi bosim ushlab turiladi. Energiyalari bir necha o'n kiloelektronvolt bo'lgan elektronlar **0,001 s** vaqt ichida kameraga **«elektron to'p»** yordami bilan injeksiyalanadi (kiritiladi). Elektronlar manbai, elektronlarni chiqaruvchi volfram totali cho'lg'am va elektronlarni dastlabki tezlatuvchi va fokuslovchi elektrodlar sistemasidan iborat.

Kameraga kiritilgan elektronlar uyurmaviy **EYuK** ta'siri ostida aylanadi. Ushbu **EYuK**ni o'zgaruvchan magnit maydon hosil qiladi. Elektronlarni tezlatish vaqtida magnit maydon shunday kattalashadiki, bunda elektronlar trubka ichida turg'un orbita bo'ylab

harakatlanadi. Elektronlarni tezlatish elektromagnit g'altaklarida kuchlanishning noldan maksimal qiymatigacha oshish vaqti ichida, ya'ni ta'minot manbai chorak davri davomida yuz beradi.

Odatga ko'ra betatron elektronlarni bir necha **MeV** dan **50 MeV** gacha tezlatish uchun ishlatiladi. Bir vaqtlar bundan ham katta energiyali hatto **240 MeV** gacha bo'lgan betatronlar ham ishlab chiqilgan. Ammo bunday energiyalarda magnitning katta og'irlikda (sinx-rotroonga nisbatan) bo'lishi, shuningdek **100 MeV** dan yuqori energiya-larda betatronda tezlatish rejimi, elektronlarning elektromagnit nurlanishi tufayli buzilish sababli tezlatishning betatron usuli-ning afzalligi yo'q.

Betatronlarda *intensivlik katta emas*. Impulsdan 10^9 - 10^{10} zarra bo'lganda o'rtacha tok 10^{-2} mA dan oshmaydi. Ushbu tezlatgichlarning kamchiliklardan yana biri unda amalda elektronlar dastasini chiqarib bo'lmashligidir. Shuning uchun ham betatronlar faqat tormozli gamma-nurlar manbai sifatida ishlatiladi.

5.7-§. Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil

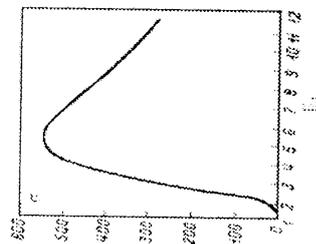
Fotonlar va neytronlardan tashqari zaryadlangan zarralar bilan ham aktivatsion tahlil amalga oshiriladi. Bunda tekshirilayotgan namunalarda zaryadlangan zarralar bilan aktivatsiya qilinadi. Aktivatsiya qiluvchi zarralar sifatida asosan vodorod va geliy izotoplarining yadrolari qo'llaniladi, ya'ni: **proton p**, **deytron d**, **triton t**, **geliy-3 (^3He)** va **α -zarralar**.

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o'tkazilganda quyidagi ikkita faktorni hisobga olish lozim;

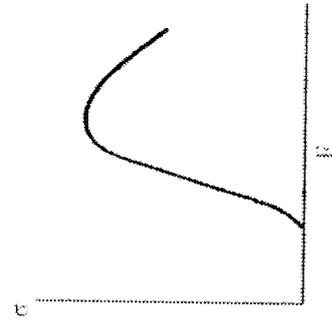
- **Kulon to'sig'i**
- **Zaryadlangan zarralarning kimyoviy element atomlaridagi elektronlar bilan o'zaro ta'siri**. Zaryadlangan zarralar atom yadrolari bilan o'zaro ta'sirlashganda **Kulon potentsialini** hisobga olishga to'g'ri keladi. Sababi musbat zaryadlangan zarra, musbat zaryadlangan yadro bilan o'zaro ta'sirlashganda **Kulon potentsiali** ushbu o'zaro ta'simi amalga oshirishga to'sinlik qiladi va buning natijasida zaryadlangan zarralar ishtirokidagi yadro reaksiyalari ostona energiyasiga ega bo'ladi. Zaryadlangan zarra yadro bilan o'zaro ta'sirlashishi uchun uning energiyasi potentsial to'siq

energiyasidan katta bo'lishi lozim. Ma'lumki energiyasi potensial to'siqning balandligidan kichik bo'lgan zarralar ham tunnel effekti hisobiga yadro ichiga kirishi va yadro reaksiyasini amalga oshirishi mumkin. Ammo bunday jarayonlarning ehtimolliklari juda ham kichik bo'lgani uchun amalda hisobga olinmaydi.

Zaryadlangan zarralar ishtirokidagi yadro reaksiyalar kesimini yadro reaksiyasiga bog'lanishi, ya'ni uyg'onish funksiyasi umumiy ko'rinishi **5.17** va **5.18-rasmda** keltirilgan. **5.18-rasmda** misol tariqasida $^{23}\text{Na}(d,p)^{24}\text{Na}$ reaksiyaning uyg'onish funksiyasi keltirilgan. Zarralarning kichik energiyalarida **Kulon to'sig'i**, zarraning yadroga tushishiga to'siqlik qiladi, buning natijasida reaksiya kesimi kichik bo'ladi. Zarralar energiyasi oshishi bilan **Kulon to'sig'ining** shaffofligi (zarralarning o'tish ehtimolligi) oshadi va bunga mos holda reaksiya kesimi ham oshadi. Reaksiya kesimi maksimum qiy-malga, zarra energiyasining taxminan Kulon to'sig'ining balandligiga teng bo'lganda erishadi. Energiyaning keyingi oshishida reaksiya kesimi kamayadi. Bunga sabab, energiya oshishi bilan raqobatlanuvchi reaksiyalar paydo bo'ladi. Umuman olganda, energiya oshishi bilan yadro reaksiyalarning kanallari soni oshadi. Raqobatlanuvchi reaksiya deb bitta radioaktiv yadro ikkita yoki undan ortiq reaksiya natija-sida hosil bo'lishiga aytiladi. **Ekzotermik** va **endotermik** reaksiya-lar kesimlarining zaryadlangan zarralarning energiyalariga bog'lanishi **5.19-rasmda** keltirilgan. Bu yerda $U_q - \text{Kulon to'sig'ining ba-lan-dlig'i}$, $E_{\text{ost}} - \text{reaksiya ostona energiyasi}$.



5.17-rasm. $^{23}\text{Na}(d,p)^{24}\text{Na}$ reaksiyaning uyg'onish funksiyasi



5.18-rasm. Reaksiya kesimining zaryadlangan zarra energiyasiga bog'lanishi

216

Raqobatlanuvchi reaksiyalar aktivatsion tahlilda ko'pchilik holda alibiy rolni o'ynaydilar. Masalan bitta yadro ikkita har xil element yadrolaridagi reaksiyalar natijasida ham hosil bo'lishi mumkin. Bu esa element miqdorini aniqlashda sistematik xatolik-larni keltirib chiqaradi. O'rta energiyali protonlar ta'sirida quyidagi elementlar to'y berish ehtimolliklari katta bo'ladi:

$${}^M_Z A(p,\gamma) {}^{M+1}_Z B;$$

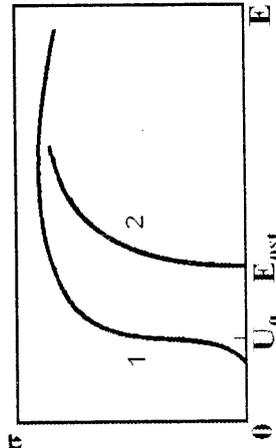
$${}^M_Z A(p,n) {}^{M+1}_Z B;$$

$${}^M_Z A(p,2n) {}^{M+1}_Z B;$$

$${}^M_Z A(p,d) {}^{M-1}_Z B;$$

$${}^M_Z A(p,\alpha) {}^{M-3}_{Z-1} B.$$

Ayur bunga tahlil qilinayotgan namuna tarkibida bir necha element va o'z navbatida ushbu elementlarning izotoplari qo'shilsa, yadro reaksiyalar soni keskin oshib ketadi. Bu esa metodikalar ishlab chiqarishda raqobatlanuvchi reaksiyalarni sifat va miqdoriy jihatdan raqobatlashishni talab qiladi.



5.19-rasm. Ekzotermik va endotermik yadro reaksiyalarining uyg'onish funksiyalari

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o'tkazganda yana bu muhim omilni hisobga olish lozim, ya'ni zaryadlangan zarralarning kimyoviy element atomlaridagi elektronlar bilan o'zaro ta'siri. Bu-ning natijasida zaryadlangan zarralar o'z energiyasini muhit atom-larini uyg'otishga va ionizatsiya qilishga sarflaydilar va ener-giyasini tez yo'qotadilar. Shu sababli, mazkur tahlil metodida namu-na o'lehamini aniqlashda zarralarning yugurish yo'llarini ham hisob-ga olish zarur.

217

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o'tkazganda asosan etalon va monitor tahlil metodlari qo'llaniladi. Ayrim hollarda absolyut metoddan ham foydalanildi. Bu kamdan kam uchraydigan holdir.

Zaryadlangan zarralar manbai sifatida asosan siklotron va chiziqli tezlatgichlar qo'llaniladi. Ushbu qurilmalar yordamida katta energiyali va yuqori intensivlikka ega bo'lgan zarralar oqimini olish mumkin.

Siklotron bu norelyativistik og'ir zaryadlangan zarralarni (*protonlar, ionlar*) tezlatuvchi *siklik tezlatgich* bo'lib, bunda zarralar doimiy va bir jinsli magnit maydonda harakatlanadilar. Ushbu zarralarni tezlatish uchun esa yuqori chastotali elektr maydon qo'llaniladi. *Elektr maydon* chastotasi o'zgarmas bo'ladi. Siklot-ronda protonlar **25 MeV** gacha, *α-zarralar* **50 MeV** gacha tezlatiladi.

Hozirgi kunda *O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi-niing Yadro fizikasi institutida* U-150-II tipdagi siklotron mavjud bo'lib, bu tezlatgichda fundamental yadro fizikasi, radiatsion materialshunoslik, yadroviy radiokimyo, radiobiologiya va tibbiyot sohalarida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu tezlatgichda *protonlar* - **8 - 22 MeV**, *deytronlar* **10 - 20 MeV**, *ion-lar* - **20 - 40 MeV** va *alfa-zarralar* - **25 - 50 MeV** energiya diapazonlarida tezlatiladi. Mazkur tezlatgichda ko'p yillar davomida zaryadlangan zarralar ishtirokidagi aktivatsion tahlil ham amalga oshirib kelingan.

Zaryadlangan zarralarda aktivatsion tahlilni, nurlantirish uchun metodlarga bo'lish mumkin:

- *protonlar bilan nurlantirish metodi*;
- *deytronlar bilan nurlantirish metodi*;
- *tritiy yadrosi bilan nurlantirish metodi*;
- *³He yadrosi bilan nurlantirish metodi*;
- *alfa-zarralar bilan nurlantirish metodi*.

Ushbu nurlantirishlar natijasida quyidagi yadro reaksiyalari sodir bo'lishi mumkin: (*p,γ*), (*p,n*), (*p,α*), (*d,p*), (*t,n*), (*³He,n*), (*³He,p*), (*³He,α*), (*α,n*), (*α,p*), (*α,γn*) va h.k.

Yuqorida keltirilgan metodlarni qo'llab, keng doiradagi elementlar miqdorini turli moddalarda aniqlash bo'yicha metodikalar ishlab chiqish mumkin. Shunga qaramasdan, zaryadlangan zarralarda

o'tkaziladigan aktivatsion tahlil asosan engil elementlar miqdorini aniqlashga qaratilgan. Keyingi vaqtlarda yangi yaratilayotgan materiallar tozaligiga talab oshmoqda. Ayniqsa har xil toza va o'ta toz materiallar tarkibida uglerod, azot va kislorod miqdorini aniqlash alohida o'rin egallaydi. Ushbu hollarda aniqlanish chega-rasi **10⁻⁴ - 10⁻⁷ %** atrofida bo'ladi. Mazkur yo'nalishlarda yuqori sezgirlikka ega bo'lgan zaryadlangan zarralarda o'tkaziladigan aktivatsion tahlil qo'llaniladi. Uglerod, azot va kislorod miqdorini aniqlash uchun quyidagi yadro reaksiyalari qo'llaniladi: ¹⁴N(*p,n*), ¹²C (*³He,n*), ¹⁴O, ¹⁴N(*d,n*), ¹⁴O va ¹⁶O(*³He,α*) ¹⁵O. Ushbu reaksiyalarni qo'llab toza metallar *moliyden, volfram, temir* va *kremniy karbidi* tarkibida *uglerod, azot* va *kislorod* miqdorini aniqlash bo'yicha metodikalar ishlab chiqilgan. Bularidan tashqari turli yarim o'tkaz-gichli materiallar va toza metallar tarkibida tarkibda o'ta muhim bo'lgan elementlardan *bor, uglerod, azot, kislorod* va boshqa engil elementlar miqdorini aniqlash bo'yicha metodikalar ham ishlab chiqilgan va amalda qo'llanilmoqda.

Zaryadlangan zarralar bilan nurlantirish elementning izotop tarkibini aniqlashga imkon beradi. Izotop tarkibini, yuqqa qat-lamda yoki uncha ko'p bo'lmagan moddada ham aniqlash mumkin.

5.8.8. Instrumental aktivatsion tahlilning spektrometrik metodlari

Tahlil qilinayotgan namunalarni *neytronlar, gamma-kvantlar* yoki *zaryadlangan zarralar* bilan nurlantirish, ikkilamchi (oniy yoki kechikkan) nurlanishlarning murakkab spektrini keltirib chiqaradi. Ushbu ikkilamchi nurlanishlarning xususiyatlarini o'rganish yadro reaksiyalarini yoki radioizotoplarini indentifikatsiya qilishga imkon yaratadi. Aktivatsion tahlilda ikkilamchi nurlanishlar ener-getik spektrini tahlil qilish orqali, sifat va miqdoriy natija-lar olish mumkin.

Nurlantirilgan elementlarni, ikkilamchi nurlanish bo'yicha diskriminatsiya, identifikatsiya va miqdoriy aniqlash fizikaviy usullarga to'liq asoslangan tahlil metodini umumlashtirib, instrumental aktivatsion tahlil deb nomlangan. Instrumental akti-vatsion tahlil metodi ham o'z navbatida yana ikkiga bo'linadi, ya'ni spektrometrik instrumental aktivatsion tahlil va aktivatsion tahlilning maxsus metodlari. Aktivatsion tahlilning maxsus metod-lari

yordamida bir yoki ikki elementni aniqlashda yoki spektrometrik instrumental aktivatsion tahlilga qo'shimcha sifatida qo'llanilishi mumkin. Zamonaviy aktivatsion tahlilda asosan spektrometrik instrumental aktivatsion tahlil keng qo'llaniladi.

Ionlovchi nurlanishlar va birinchi navbatda γ -nurlanishlar spektrometriyasi, instrumental aktivatsion tahlilining eng universal va imkoniyatlari katta bo'lgan metodlaridandir. Spektrometrik metodning imkoniyatlari, ionlovchi nurlanishlar xususiyati va qayd qiluvchi qurilmaning ko'rsatgichlari bo'yicha belgilanadi.

Aktivatsion tahlilda ionlovchi nurlanishlar spektrometriya-sining juda ko'p turli metodlaridan bittasi, ya'ni taqtiq qilina-yotgan nurlanish energiyasini, elektrik impulslar ketma ketliga aylantirib, amplitudalar taqsimotini tahlil qilishga asoslangan tamoyil bo'yicha ishlovchi tizim muhim ahamiyat kasb etadi.

Aktivatsion tahlilda asosan quyidagi ionlovchi nurlanishlar spektrometriyasi qo'llaniladi: og'ir zarralar, β -nurlanishlar va γ -nurlanishlar spektrometriyasi. Hozirgi kunda aktivatsion tahlilda birinchi va ikkinchi turdagi spektrometriya deyarli qo'llanilmaydi (ayrim taqtiqlarda qo'llanilishi mumkin), amalda asosan γ -nurlanishlar spektrometriyasi keng qo'llaniladi. Yigirmanchi asrning 60-yillarida sintillyasion γ -spektrometrlar, 70- va 80-yillarda asosan $Ge(Li)$ detektodan iborat bo'lgan γ -spektrometrlar qo'llanilgan. 90-yillarning oxiri va yigirma birinchi asrning bosh-laridan boshlab, asosan toza germaniydan $HPGe$ iborat bo'lgan va kompyuter tizimiga ulangan zamonaviy tahlilatorlardan tashkil topgan γ -spektrometrlar qo'llanilmoqda.

5.9-§. Gamma-nurlanishlar spektrometriyasi

Gamma-nurlanishlar spektrometriyasi yadrodan chiqayotgan γ -kvant-larni qayd qilishga asoslangan. Noelastik yadro o'zaro ta'sir jarayoni natijasida yadro uyg'onishi, yoki radioaktiv parchalanishlar natijasida hosil bo'lgan yadro uyg'ongan holatda bo'lishi mumkin. Yadro uyg'ongan holatdan asiy holatga yoki ikkinchi bir pastki energetik holatga o'tganda γ -kvantlar chiqarishi mumkin. Ushbu gam-ma-nurlanishlar aniq bir energiyaga va juda ham ensiz tabiiy chiziq kengligiga ega bo'ladi. Gamma-nurlanishlarning mazkur

xususiyat-lari, elementlarni identifikatsiya qilish va elementlarni ajratib aniqlash uchun yaxshi asos bo'ladi. Gamma-nurlanishlarning yuqori o'tuvchanlik qobiliyati, etarlicha qalinlikdagi namunalarni γ -spektrometrik tahlil qilishga imkon beradigan qulay usullari biri hisoblanadi. Bu sanab o'tilgan xususiyatlar va imkoniyatlar, γ -spektrometrik metodga, instrumental aktivatsion tahlilda etakchi o'rin egallashga imkon beradi.

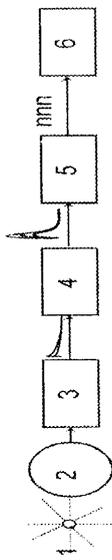
Gamma-spetrometrlar tuzilishi va ishlash tamoyillarini o'rganishdan oldin γ -nurlanishlarning modda bilan o'zaro ta'sirlarini ko'rib chiqamiz.

Yarimo'tkazgichli gamma-spektrometr. $Ge(Li)$ -detektorli γ -spektrometrlar paydo bo'lishi instrumental aktivatsion tahlil uchun mutlaqo yangi imkoniyatlarni ochdi desak mubolag'a bo'lmaydi. Bunga asosiy sabab, mazkur detektorlarning yaxshi energetik ajratish qobiliyatiga ega bo'lganligi bo'lib, ular $NaI(Tl)$ kristalli spektrometrlarga nisbatan bir tartib yuqoridir.

Yarimo'tkazgichli $Ge(Li)$ -detektorlar suyuq azot temperaturasida va chuqur vakuumda normal ishlaydi. Suyuq azot bilan to'ldirilgan Dyuar idishi ushbu detektorli γ -spektrometrlarning doimiy ele-menti hisoblanadi. Suyuq azot detektorni past temperaturada ushlab turadi. Dyuar idishiga ma'lum bir vaqtdan keyin suyuq azot quyilib turiladi. Bu interval idish sig'imiga qarab 6 kundan 15 kungacha bo'lgan intervalni tashkil qiladi.

Yarimo'tkazgichli detektorlardan chiqayotgan signal kattaligi juda ham kichik bo'ladi (millivoltlar kattaligida). Shuning uchun detektor chiqishiga birlamchi kuchaytirgich ulanadi. Bu kuchaytirgich-larga qattiq talab qo'yilib, u detektor energetik ajratish qobiliyatini belgilaydi. Birlamchi kuchaytirgichning shumini kamaytirish uchun uni past temperaturagacha sovutishga to'g'ri keladi. Shumni kamaytirish hisobiga detektor energetik ajratish qobiliyatini yaxshilash mumkin.

Hozirgi kunda asosan toza germaniy $HPGe$ -detektorli γ -spektrometrlar qo'llaniladi. Mazkur detektorlar bilan ishlash qulay bo'lib, ular faqat ishlatilgan vaqtda suyuq azotda saqlanadi. Agar detektor uzoq vaqt davomida ishlatilmasa, uni azotda saqlash shart emas. Toza germaniy $HPGe$ -detektorli γ -spektrometrlarning blok sxemasi 5.20-rasmda keltirilgan.



5.20-rasm. 1 – γ -nurlanish manbai, 2 – o‘ta toza germaniyadan iborat γ -nurlanish detektor ($HPGe$ -detektor), 3 – birlamchi kuchaytirgich (*predusilitel*), 4 – asosiy kuchaytirgich, 5 – amplituda-raqamli o‘zgartirgich, 6 – kompyuter.

O‘ta toza germaniyadan iborat bo‘lgan γ -nurlanishlar detektor ($HPGe$ -detektor) yarim o‘tkazgichli $p-n$ o‘tishli dyoddan iborat bo‘lib, uning sezgir sohasi hajmini oshirish uchun koaksial (*si-lindrik*) geometriyada tayyorlanadi. Detektorning koaksial geometriyasi γ -kvantlar qayd qilish effektivligini, tekislik geometriyadagi detektorga nisbatan ancha oshiradi.

Detektorning γ -kvantlarni qayd qilish effektivligi ishchi so-ha hajmidan tashqari detektor tayyorlagan materialga ham kuchi bog‘liq bo‘ladi. Hozirgi vaqtda yarim o‘tkazgichli detektorlar tayyorlanadigan eng keng tarqalgan materiallar bu kremniy va germaniy hisoblanadi. Gamma-kvantlarni qayd qilish uchun ko‘pincha germaniy-dan yasalgan detektorlar qo‘llaniladi.

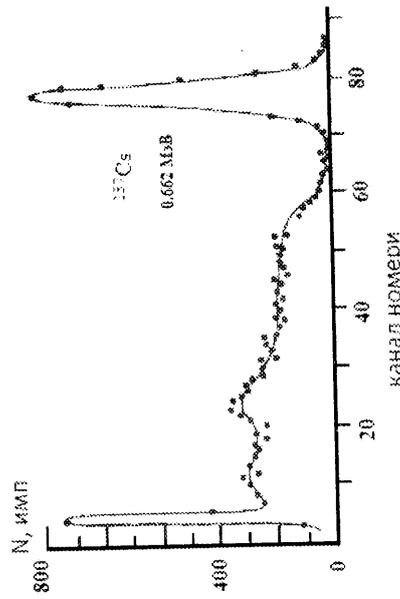
Tayyorlash qiyin bo‘lishiga qaramasdan, detektorni tayyorlash uchun boshlang‘ich material sifatida germaniy tanlab olinadi. Bu γ -kvantlarning o‘zaro ta’sir kesimi moddaning Z atom nomeriga kuchli bog‘langanligidir. Ayniqsa *fotoeffekt* kesimi Z ga kuchli bog‘liq bo‘ladi ($\sigma \sim Z^5$), *Compton effekti* kesimi esa Z ga proporsional bo‘ladi. *Elektron-pozitron jufti hosil bo‘lish* jarayonining kesimi $\sim Z^2$. Germaniyda Z katta qiymatga ega bo‘ladi ($Z(Ge)=32$, $Z(Si)=14$). Shu sababli ushbu material tanlangan bo‘lib, u detektorning γ -kvantlarni qayd qilish yuqori effektivligini ta’minlaydi.

Spektrometr asosini yadro nurlanishlarining $HPGe$ -detektor tashkil qiladi. Gamma-kvantlarning detektor moddasi bilan o‘zaro ta’sir qilishi natijasida uning chiqishida elektr zaryadlar hosil bo‘lib, uning kattaligi γ -kvantning detektorda yo‘qotgan energiya-siga proporsional bo‘ladi. Hosil bo‘lgan zaryad kattaligini proporsional ravishda kuchlanish amplitudasiga aylantirish uchun yuqorida aytib o‘tilgan birlamchi kuchaytirgichdan, davomiyliqi bo‘yicha sig-nallarni

shakllantirish va shovqinlarni bostirish uchun esa asosiy kuchaytirgichlardan foydalaniladi.

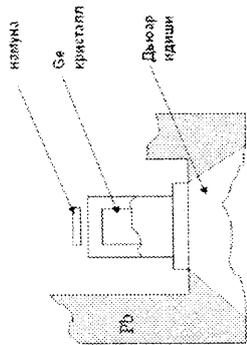
Kuchaytirgich trakti chiqishidagi signallarning amplituda taqsimoti bo‘yicha nurlanish spektrini baholash mumkin.

Amplituda taqsimoti kompyuter yordamida qayd qilinadi va qayta ishlanadi. Amplitudaning tadqiq qilinayotgan diapazoni teng chekli sonli intervallarga bo‘linadi va har biriga tartib nomer beriladi. Ushbu intervallarni *kanallar* deb nomlash qabul qilin-gan. Asosiy kuchaytirgich chiqishidagi analog signallarni, kompyu-ter ishlay oladigan raqamli kodlarga aylantirishni, amplituda-raqamli o‘zgartirgich yordamida amalga oshiriladi. Amplituda-raqamli o‘zgartirgich har bir impuls amplitudasini o‘lchaydi va unga mos keladigan kanal nomerini aniqlaydi. Keyin mazkur ma’lumotlar kompyuterda qayta ishlanadi va kompyuter monitorida γ -spektr hosil bo‘ladi (5.21-rasm).



5.21-rasm. $Cs-137$ radionuklidning γ -spektri

Gamma-nurlanishlar detektor tashqi tabiiy γ -nurlanishlar va kosmik nurlanishlar fonidan himoya qilish uchun uni qo‘rg‘oshin uycha ichiga joylashtiriladi. Mazkur himoya radionuklidlarning juda ham kichik aktivliklarini o‘lchash aniqliklarini oshiradi (5.22-rasm).



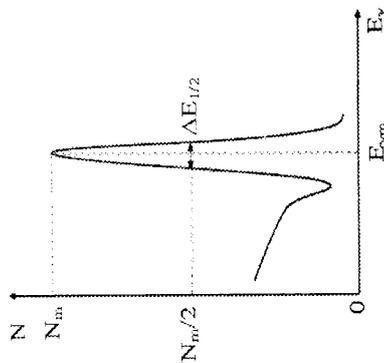
5.22-rasm. Namunaning aktivligini o'lchash sxemasi

Aktivatsion tahlilda gamma-spektrmetrlarni tavsiflovchi quyidagi ikkita asosiy kattalik e'tiborga olinadi:

1. Energiya bo'yicha ajratish qobiliyati;
2. γ -kvantlarni qayd qilish effektivligi.

Energetik ajratish qobiliyatini ikki xil ko'rinishda ifodalash mumkin, ya'ni: absolyut va nisbiy energetik ajratish qobiliyati. Absolyut ajratish qobiliyati deb fotocho'qqi balandligi yarmining kengligiga ($\Delta E_{1/2}$) aytiladi (5.23-rasm). Nisbiy ajratish qobiliyati deb quyidagi kattalikka aytiladi:

$$\delta_{1/2} = \Delta E_{1/2} / E_{\gamma}$$



5.23-rasm. Gamma-spektr.

Ssintillyasion γ -spektrmetrlarni energetik ajratish qobiliyatini tavsiflashda nisbiy ajratish qobiliyati ishlatiladi. Yarim o'tkazgichli γ -spektrmetrlarda esa absolyut ajratish qobiliyati qo'llaniladi.

Yarim o'tkazgichli γ -spektrmetrlarning energetik ajratish qobiliyatidan tashqari uni tavsiflaydigan yana bir muhim kattalik bu detektorning qayd qilish effektivligidir. Gamma-spektrmetr-larning effektivligi deb fotocho'qqidagi qayd impuls-lar sonining γ -manbada 4π fazoviy burchakda γ -kvantlar soniga nisbatiga ayti-ladi. Tajribada γ -spektrmetrlarning absolyut va nisbiy effek-tivliklari aniqlanadi. Tanlangan o'lchash sharoiti (fazoviy burchak va yutilish filtrlari) uchun absolyut effektivlik quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$\epsilon_{\text{abs}} = \frac{S}{I} \cdot \frac{1}{\exp(-\lambda t)} \quad (5.8)$$

Bu yerda S — berilgan energiyadagi fotocho'qqi yuzasi;

τ — γ -spektrni o'lchash vaqti;

I — 4π fazoviy burchakda $1s$ vaqt davomida manba chiqarqoygan berilgan energiyada monoenergetik γ -kvantlar soni;

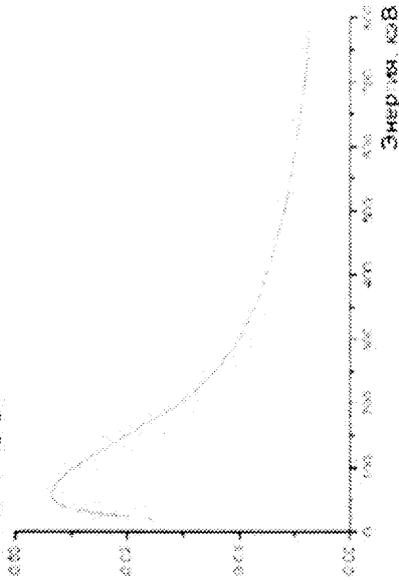
$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ — parchalanish doimiyisi, *sul.*;

t — attestatsiya momentidan o'lchash momentigacha o'tgan vaqt, *sul.*

Yuqorida ta'kidlab o'tkanimizdek gamma-spektrmetrni energiya va effektivlik bo'yicha kalibrovka qilish (darajalash) namunaviy spektrometrik gamma-manbalar to'plami (NSGM yoki rus tilida OSGI) yordamida amalga oshiriladi. Attestatsiya momenti bu namunaviy radionuklid ishlab chiqarilgan sana(oy va yil).

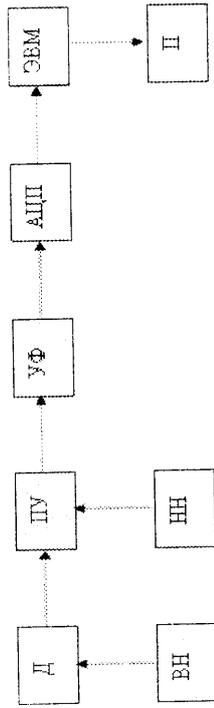
O'zbekiston Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutining Radioanalitik markazida zamonaviy γ -spektrmetrlar majmuasi mavjud bo'lib, bu majmuada fundamental va amaliy tadqiqotlar olib boriladi.

Нисбонӣ эффе́ктивлиги

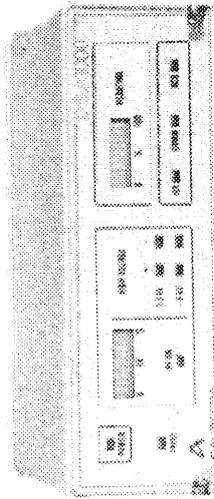


5.24-rasm. Nisbiy effektivlikning gamma-kvantiyar energiyasiga bog'lanishi

Mazkur markazda namunalarning kiritilgan aktivligini ener-getik ajratish qobiliyati **1332,5 keV** (^{60}So) gamma-chiziq uchun $\Delta E_{1/2} = 1,8 \text{ keV}$ va nisbiy effektivligi **15 %** bo'lgan **HPGe** detektordan tashkil topgan gamma-spektrometr bilan o'lichandi. Gamma-spektrometr **DSA-1000** turdagi ko'p kanalli raqamli tahlilator va **γ -spektrlarni** qayta ishlovchi **Genie-2000** programmalar paketlari bilan butlangan. **Genie-2000** programmalar majmuasi ko'p kanalli tahlilator bilan spektrlarni o'lichash va qayta ishlash imkoniyatiga ega va **WINDOWS-XP** muhitida ishlash uchun mo'ljallangan. Mazkur programmalar paketi yordamida gamma-spektrning asosiy xususiyatlarini, ya'ni gamma-chiziq fotocho'q-qilarining o'rni, energiyasini, fotocho'qqi yuzasini va uning statistik xatosini avtomatik ravishda aniqlab beradi. Gamma-spektrometrlar energiya va effektivlik bo'yicha kalibrovkalash **OSGI** namunaviy spektrometrik gamma-manbalar to'plami (**NSGM yoki rus tilida OSGI**) yordamida amalga oshiriladi. Gamma-spektrometr blok-sxemasi **5.25-rasmda** keltirilgan. **5.26-rasmda DSA-1000** turdagi raqamli ko'p kanalli tahlilator rasmi ilova qilingan.



5.25-rasm. O'lichash kompleksining blok-sxemasini: D — Ge-detektor; PU — oldingi kuchaytirgich; UF — kuchaytirgi-impuls; NN — shakillatgich (formirovatel); VN — yukori kuchlanish manbai; NN — past kuchlanish manbai; ATSP — analogoi-raqamli aylantirgich; EVM — Pentium-4; P — printer HP Laser Jet 1000



5.26-rasm. DSA-1000 turdagi raqamli ko'p kanalli tahlilator

Gamma-spektrometr chiziqlarining apparatura shakli.

Monoenergetik gamma-nurlashlarni registratsiya (qayd) qilganda gamma-spektrometr chiqishidagi signal amplituda taqsimotining shakli murakkab bo'lib, u ko'pgina omillarga bog'liq bo'ladi. Albatta amplituda taqsimotining shaklini birinchi navbatda **γ -nurlar** ning detektor moddasi bilan o'zaro ta'siri belgilaydi. Ikkinchi tomondan amplituda taqsimotining shakliga qator omillar ma'lum bir ta'sir ko'rsatadi, ya'ni detektorda kechadigan ikkilamchi jarayonlar yuzaga keltiradigan, **γ -spektrometr** konstruksiyasining o'ziga xos xususiyati, o'lichanayotgan radioizotoplar aralashmasining tarkibi, shuningdek nurlanishi **γ -spektrometrdagi** tahlil qili-nayotgan namunaning modda tarkibi, massasi va geometrik shakli ham muhim ahamiyatga egadir.

aktivatsion tahlil uchun eng qulayi elektron tezlatich-lardir. Tezlatichlarni qo'llaganda, ma'lum bir energiyagacha tezla-tilgan elektronlar dastasi og'ir metallardan iborat nishonga yo'nal-tiriladi. Elektronlarning tormozlanishi hosil bo'lgan yuqori ener-giyali γ - nurlanishlar yuqori intensivlikka ega va yuqori sezgirlik-dagi gamma - aktivatsion tahlil o'tkazishga imkon beradi.

Elektron tezlatichlar oddiy, kichik o'lehamli. Shuning uchun hozirgi vaqtda gamma - aktivatsion tahlil uchun eng qulayi betatron hisoblanadi.

Betatronning vakuumli tezlatich kamerasida elektronlarni tezlatichi uyurmaviy elektr maydon orqali amalga oshiriladi. Betatronlar olinayotgan tormozli γ - nurlanishlar energiyasini 10 dan 30 MeV gacha diapozonida aniq o'zgartirish va doza quvvatini 100 - 200 r/min (nishondan 1 m uzoqlikda) atrofida olishga imkon beradi. O'ta yuqori perspektivaga ega bo'lgan katta intensivlikdagi γ -nurlanishlar manbalaridan biri bu mikrotronidir. Uning o'lehami betatronikidan kichik bo'lib, ancha katta intensivlikdagi tormozli nurlanish olishga imkon berishi bilan farq qiladi.

Neytron-aktivatsion tahlil metodida nurlanish manbalari sifa-tida quyidagilar qo'llaniladi: radioizotop manbalar, neytron gene-ratorlar va yadro reaktori. Ayrim hollarda neytronlar manbai sifatida elektron va ion tezlatichlar ham qo'llaniladi.

Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil o'tkazganda nurlanishlar manbalari sifatida asosan siklotronlar qo'llaniladi.

Namunani nurlanish manbaidan detektorga olib boruvchi vositalar. Kuchi aktivatsiya manbalari bilan, shuningdek nurlangan namunalar bilan ishlaganda xavfsizlikni ta'minlash uchun namunani nurlanish manbaidan detektorga olib boruvchi maxsus sis-temalardan (qurilmalardan) foydalaniladi. Bundan tashkari, olib boruvchi sistemalar transportirovkani tezlatici, aktivatsiya va o'lehash orasidagi vaqt oralig'ini kamaytiradi.

Hammadan ko'proq olib boruvchi sistemalarning ikki turi, ya'ni: mexanik va pnevmatik turlari qo'llaniladi. Namunani transpor-tirovka qilishni mexanik sistemasi odatda buriladigan poromislo, aylanuvchi disk yoki chizikli transport mexanizmi (konveyer, borib - kelib turuvchi mexanizm va xokazo) ko'rinishda bo'ladi. Pnevmo-tran-sport oddiy chang yutgichlarga o'lehsab ishlaydi.

SB-50 betatronida namunalarni nurlanish postiga va undan o'lehash xonasiga olib kelish uchun K5-2A turdagi pnevmotransport qurilmisidan foydalaniladi. Ushbu qurilmada namunalar joylash-tirilgan konteyner harakatlanadigan trubalarning (yo'lining) uzun-ligi 40 metrga teng. Qurilma quyidagi texnik ko'rsatgichlarga ega:

- Namunalarni bir tomonga ya'ni nurlanish postigacha yoki undan o'lehash xonasiga olib borish vaqti - 4 s;
- Konteynerning foydali hajmi - 800 mm³;
- Nurlanayotgan namunalarning maksimal massasi - 50 g.

Mexanik sistemaning ustunligi, katta massali, ya'ni massasi bir necha kilogrammgacha bo'lgan namunalarni transportirovka qilish imkoniyatiga ega bo'lishidadir.

Pnevmo-transport sistemalari (yoki ko'pehlik hollarda «pnev-mopochta» deb nomlanadi) kuchli nurlanish manbalari: yadro reaktori, neytronlar generatori va xokazo bilan ishlaganda keng qo'llaniladi. Pnevmo-transport sistemasi namunalarni tashuvchi (soluvchi) va chiqarib oluvchi maxsus qurilma bilan ta'minlangan, doira yoki to'rt-burchak kesimli trubalar (metaldan yoki polietilendan) sistema-sidan iborat. Metall yoki polietilen kapsulalarga solingan namu-nalar, siqilgan havo yoki inert gaz yordamida nurlanish joyiga yoki teskari qaytarib olib keladi. Ba'zan pnevmotransport sistemalari namunani talab qilingan detektorga, ma'lum vaqt saqlab turuvchi joyga yoki namunani saqlaydigan joyga olib borish uchun strelkalar bilan ta'minlangan, ko'p sonli tarmoqqa egadir. Zamonaviy tran-sport sistemalarida namunani kapsuladan olishni ham o'z ichiga olgan holda amallarni boshqarish to'liq avtomatlashgandir.

Ionlovchi nurlanishlarni o'lehash. Yadro jarayonlarida yoki ra-dioaktiv parchalanishlarda chiqayotgan nurlanishlarni (α , β va γ - nurlanishlar) qayd qilish, miqdoriy hisoblashlar va aniqlayotgan elementlarni identifikatsiya qilish uchun muhim ma'lumotlar beradi.

Eng muhim va keng qo'llaniladigan qayd qilish usullari qayd qilina-yotgan zarra (kvant) energiyasini elektr impulsiga aylan-tirishga asoslangan. Ushbu impulslar keyin maxsus elektron quril-malarga uzatiladi va bu qurilmalarda impulslar qayta ishlanadi. Zarra energiyasini elektr impulsiga aylantiruvchi qurilmalar nurlanish detektorlari deyiladi. Nurlanish detektorlarining turlari juda ko'p

bo'lib, ularning ishlash tamoyili ularda zaryadlangan zarralar o'tganda modda atomlarini ionizatsiyalash yoki uyg'ongan holatga o'tkazishga asoslangan. Bunda gamma-kvantlar va neytronlar ularning modda bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasida hosil bo'lgan zaryadlangan zarralar (ikkilamchi zarralar) ionizatsiyasi bo'yicha qayd qilinadi.

Proporsional schetchik. Proporsional schetchiklarda kuchlanishning ma'lum bir ionizatsion tok birlamchi ionizatsiyaga proporsional, binobarin tushayotgan nurlanish energiyasiga ham. Shuning uchun nurlanish detektorlari sifatida proporsional schetchikni qo'llab, γ - nurlanishlar va β -zarralar energetik taqsimotini olish mumkin.

Geyger schetchigi. Geyger schetchiklarda zaryadlangan zarralar va γ - kvantlar kayd qilish uchun schetchik orqali zarrachalar o'tishda hosil bo'ladigan mustaqil gaz razryadidan foydalaniladi. Geyger schetchigidan tushayotgan nurlanishning energetik taqsimotini olish uchun foydalanib bo'lmaydi.

Bugungi kunda proporsional va Geyger schetchiklari qo'llanilmaydi. Zamonaviy aktivatsion tahlilda boshqalarga nisbatan ko'proq ssintilyasion va yarim o'tkazgichli detektorlar qo'llaniladi.

Ssintilyasion detektorlar. Ssintilyasion detektor blokinurlanish ta'sirida yorug'lik chaqnashlari yuz beradigan ssintilyasiyator va fotoelektron kuchaytirgichlar kombinatsiyasidan iborat bo'ladi. Fotokuchaytirgichda yorug'lik chaqnashlari elektr impulslariga aylantiriladi. Ushbu impulslar amplitudasi qayd qilinayotgan (registratsiya kilinayotgan) nurlanish energiyasiga proporsional bo'ladi.

Ssintilyasiyator sifatida talliy bilan aktivlangan natriy yod kristallari ya'ni NaI(Te), talliy bilan aktivlangan seziiy yod kristallari ya'ni CsJ(Te), rux sulfat - ZnS, ssintilyasiyalanuvchi plastmassalar - antratsen, stilben va xokazo qo'llaniladi.

Ssintilyasion detektorlash bloki yuqori qayd qilish effektivligiga ega bulib, ular ancha «o'lik vaqt»ga ega bo'lgan gazorazryadli schetchiklardan farq qilib, katta intensivlikdagi nurlanishlarni o'lchash uchun ishlatilishi mumkin. Ssintilyasion detektorlash blokining kamchiliklaridan biri fotokuchaytirgichga berilayotgan yukori kuchlanishning yaxshi stabil bo'lishi kerakligidadir. Bu schetchik temperatura tebranishlariga o'ta sezgirdir.

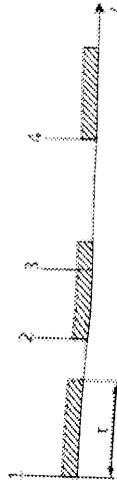
Bundan tashqari, mazkur detektorlarning energetik ajratish qobiliyati juda ham past.

Yarim o'tkazgichli detektorlar. Yadro zarrasi yarim o'tkazgichli detektorning ishchi xajmiga tushganda u energiyasini elektron-teshik juftini hosil qilishga sarflaydi. Ushbu jarayon natijasida elektr zaryadlar hosil bo'lib, ular elektrodlanga yig'iladi va elektr impulsi hosil qiladi. Bunday impulslar amplitudasi zarra detektorning ishchi hajmidan o'tgan vaqtda sarf qilgan energiyasiga proporsional bo'ladi. Yarim o'tkazgichli detektorlarning asosiy us-tunligi ularning yuqori ajratish qobiliyati bo'lib, u ssintilyasion detektornikidan bir tartib yuqoridir. Kamchiliklaridan biri past effektivligi va u bilan ishlaganda va uni saqlashda past temperaturali suyuq azotdan foydalanishdir.

Hozirgi kunda asosan o'ta toza germaniyli yarim o'tazgichli detektorlar qo'llaniladi. Bu detektorlar yuqori effektivlikka va yuqori energetik ajratish qobiliyatiga egadir.

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Ajratish vaqti $\tau = 0,20$ ms bo'lgan Geyger-Myuller sanagichi $3,0 \cdot 10^4$ imp./min ni qayd qilgan. Sanagich orqali **1 minut**-da o'tgan o'rtacha zarralar sonini baholang.



Yechilishi: Har qanday yadro nurlanishlar sanagichlari zarrani qayd qilgandan keyin o'zining xususiyatini tiklash uchun ma'lum bir τ vaqt oraligini sarflaydi. Bu τ vaqtini yadro zarralar sanagichlarining eng asosiy xarakteristikalaridan biri bo'lib, uni tiklanish vaqti deyiladi. Agar ushbu vaqt oralig'ida sanagichga zarra kelib tushgan bo'lsa, uni sanagich qayd qilmaydi. Ushbu hodisa quyidagi rasmda tasvir ettirilgan bo'lib, bunda **1, 2, 4 zarralar** qayd qilinadi, **3 zarra** esa qayd qilinmaydi. Bunga sabab **3-zarra** sanagich o'z xususiyatini tiklash uchun ketgan vaqt intervaliga to'g'ri kelganda kelib tushgan.

Ushbu vaqt ichida sanagich orqali o'tgan zarralarning N_0 o'rtacha sonini aniqlash ifodasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$N_0 = N + \Delta N \quad (1)$$

bu yerda $t \gg \tau$ vaqt davomida qayd etilgan zarralar soni N ga teng; $\Delta N = n_0 \cdot \Delta t$ - quyidagi yig'indi to'lik vaqt ichida qayd qilinmagan zarralar soni:

$$\Delta t = \tau N = \tau n t \quad (2)$$

bu yerda τN - yig'indi vaqt bo'lib, bu vaqt davomida sanagich zarralarni qayd qilmaydi. U holda

$$N_0 = N + n_0 \tau N \quad (3)$$

Bu ifodaning chap va o'ng tomonlarini t ga bo'lamiz va quyidagini olamiz

$$n_0 = n + n_0 \tau \quad (4)$$

$$n_0 = \frac{n}{1 - \tau n} = \frac{3 \cdot 10^4}{1 - 3 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-4} / 60} = 3,3 \cdot 10^4 \text{ imp./min}$$

Javob: $n_0 = 3,3 \cdot 10^4$ imp./min.

2-masala. Ajratish vaqti $\tau = 1,0$ mks bo'lgan sanagich orqali o'tayotgan zarralar sonining qancha ulishi sanash tezligi $n = 100$ va $1,0 \cdot 10^5$ imp./s bo'lganda sanagich tomonidan qayd etilmaydi?

Yechilishi. Qayd qilinmagan zarralar sonini oldingi masalada keltirilgan formula bilan aniqlash mumkin. U holda qayd qilinmagan zarralarning ulushi quyidagi ifoda bilan aniqlantiladi:

$$\eta = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{n + n_0 \tau - n}{n_0} = n \tau$$

u holda

$$\eta_1 = 100 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 10^{-4} = 0,01\%$$

$$\eta_2 = 10^5 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 0,1 = 10\%$$

Javob: $\eta_1 = 0,01\%$, $\eta_2 = 10\%$.

3-masala. Agar ${}^9\text{Ve}(\alpha, n) {}^{12}\text{S}$ reaksiyaning chiqishi $0,8 \cdot 10^{-4}$ ga teng bo'lsa, tarkibida ${}^{210}\text{Ro}$: $0,63 \cdot 10^{10}$ Bk (**0,17 Ki**) bo'lgan uncha katta bo'lmagan ${}^{210}\text{Ro-Ve}$ -manbaidan **10 sm** uzoqlikdagi masofada neytron-lar oqimini toping.

Yechilishi. Zarralar oqimi deb yuza birligidan vaqt birligida o'tayotgan zarralar soniga aytiladi (1-rasm):



$$\Phi = \frac{dN}{dS} \quad (1)$$

Bu yerda Φ - zarralar oqimi, dN - sferaning ichki hajmiga vaqt birligida tushayotgan zarralar soni, dS - sfera sig'imentining yuzasi (1-rasm).

$R = 10$ sm masofada manbani nuqtaviy nurlanish manbai deb hisoblash mumkin. Faraz qilamiz S manbaidan bir sekunda N_0 ta izotrop neytronlar chiqayotgan bo'lsin. U holda cheksiz kichik hajimdagi sfera chegarasida $F = \text{const}$ deb hisoblash mumkin va S nuqtaviy manbaidan R masofada joylashgan dS yuzaga sekundiga kelib tushayotgan neytronlar soni:

$$d\dot{N} = \frac{\dot{N}_0}{4\pi} d\Omega \quad (2)$$

Ta'rifiga asosan fazoviy burchak elementi

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} \quad (3)$$

(3) ni (2) ga qo'yamiz va quyidagi ifodani ega bo'lamiz

$$d\dot{N} = \frac{\dot{N}_0}{4\pi} \frac{dS}{R^2} \quad (4)$$

(4) ni (1) ga qo'yamiz va zarralar oqimini topishga imkon beruvchi quyidagi ifodani olamiz:

$$\Phi(R) = \frac{dN}{dS} = \frac{\dot{N}_0}{4\pi R^2} \quad (5)$$

Manbada sekundiga chiqayotgan neytronlar soni:

$$\dot{N}_0 = Y \cdot \dot{N}_\alpha = Y \cdot A(^{210}\text{Po})$$

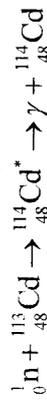
Bitta ^{210}Po yadrosi α -parchalanganda bitta α -zarra paydo bo'la-di. Ushbu ifodani (5) ga qo'yamiz va manbada 10 sm uzoqliqdagi masofada neytronlar oqimini topamiz

$$\Phi(R=10) = \frac{Y \cdot A(^{210}\text{Po})}{4\pi R^2} = \frac{0,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,63 \cdot 10^{10}}{4 \cdot 3,14 \cdot 100} = 4,0 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{c}}$$

Javob: $\Phi(R=10) = 4,0 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{c}}$

4-masala. Oqim zichligi $1,0 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ bo'lgan issiq neytronlar oqimi bilan **kadmii-116** dan tashkil topgan yupqa plastinka nurlantirilgan. Agar nurlanishdan olti sutka o'tkandan keyin ^{113}Cd nuklid yadrolari tarkibi 1% kamaygan bo'lsa, (n, γ) reaksiya kesimini aniqlang.

Yechilishi. Reaksiya sxemasini yozamiz:



Vaqt birligida moddaning hajm birligida sodir bo'layotgan reaksiyalar soni:

$$v = n\sigma F$$

dt vaqt oralig'ida nishon yadrolarning konsentratsiyasining o'zgarishi:

$$dn = -v dt = -n\sigma F dt$$

Ushbu tenglamani $n(t=0) = n_0$ boshlang'ich shart bilan echilganda tenglama echimi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$n(t) = n_0 \exp(-\sigma F t)$$

bundan

$$\frac{n_0 - n(t)}{n_0} = 0,01 = 1 - \exp(-\sigma F t)$$

Ushbu ifodadan reaksiya kesimini aniqlaymiz:

$$\sigma = -\frac{\ln 0,99}{\Phi \cdot t} = \frac{0,01}{1 \cdot 10^{12} \cdot 6 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,9 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ barn}$$

Javob: $2 \cdot 10^{-4}$ barn.

5-masala. Kinetik energiyasi **1 MeV** bo'lgan deytronlar bilan og'ir muzdan iborat bo'lgan yupqa nishon nurlantirilganda $^2\text{N}(d, n)$ ^3Ne reaksiyaning chiqishi va kesimi mos holda **0,8 \cdot 10^{-5}** va **0,020 mb** ga teng bo'lgan. Kinetik energiyasi **2 MeV** bo'lgan deytronlar uchun mazkur reaksiyaning kesimini aniqlang. Ushbu energiya uchun reaksiya chiqishi **4,0 \cdot 10^{-5}** ga teng.

Yechilishi. Yupqa nishon uchun $^2\text{N}(d, n)$ ^3Ne reaksiya chiqishi quyidagiga teng

$$Y = \frac{\dot{N}}{\Phi_0} = n\sigma d$$

bu yerda \dot{N} - vaqt birligida birlik yuzada sodir bo'layotgan reaksiyalar soni. U holda

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2},$$

bu yerdan

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{Y_2}{Y_1} = 0,020 \frac{4,0 \cdot 10^{-5}}{0,8 \cdot 10^{-5}} = 0,10 \text{ b}$$

Javob: $\sigma_2 = \sigma_1 \frac{Y_2}{Y_1} = 0,020 \frac{4,0 \cdot 10^{-5}}{0,8 \cdot 10^{-5}} = 0,10 \text{ b}$

NAZORAT SAVOLLAR

1. Aktivatsion analiz sezgirliigi, aniqlanish va payqash chegarasi.
2. Aktivatsion analiz umumiy yo'nalishi qanday jarayondan boshlanadi?
3. Neytron aktivatsion analiz.
4. Neytronlarning manbalarini ko'rsating.
5. Issiqlik neytronlar aktivatsion analiz metodlari.
6. Neytron aktivatsion analizning analitik imkoniyatlari.
7. Monoenergetik va tormozli gamma-nurlanishlar manbalari.

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

5.1. Radiouglerod metodi bilan qadimgi topilmaning yoshini aniqlash bo'yicha o'tkazilgan tajribada topilmadagi sanash tezligi minutiga 14 impuls, fonni sanash tezligi esa minutiga 9,5 impulsni tashkil etgan. Topilma yoshini 5% aniqlikda topish uchun qancha vaqt o'lehash zarur bo'ladi? (*Javobi: 19 soat*).

5.2. Sanagichning ajratish vaqti $\tau = 8 \cdot 10^{-6}$ s bo'lsa, sanash tezligi qanday bo'lganda zarralarni sanamaslik holati 5% dan oshmaydi? (*Javobi: $2,5 \cdot 10^5$ imp./s*).

5.3. Pluton-berilliy neytronlar manbai sekundiga $2,8 \cdot 10^7$ neytron chiqaradi. Agar plutoniy chiqarayotgan α -zarra ta'sirida berilliyda sodir bo'lgan (α, n) turdagi reaksiya chiqishi $2,6 \cdot 10^{-5}$ ga teng bo'lsa, plutoniy miqdori aniqlansin. Manbada plutoniy berilliy bilan aralashma ko'rinishida bo'ladi. (*Javobi: $9,0 \cdot 10^{-4}$ g*).

5.4. Kinetik energiyasi 1,0 MeV bo'lgan proton deyttron tomonidan qamrab olinadi. Hosil bo'lgan yadroning uyg'onish energiyasini aniqlang. Bu qanday yadro? (*Javobi: $6,16$ MeV*).

5.5. Kinetik energiyasi 7,8 MeV bo'lgan α -zarra bilan havoda normal sharoitda uyg'otilgan $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ reaksiya o'rtacha kesimini aniqlang. Ushbu sharoitda va energiyada o'lehangan reaksiya chiqishi $2,0 \cdot 10^{-5}$ ni tashkil etadi. (*Javobi: 0,14 b*).

TEST SAVOLLAR

- Aktivatsion tahlilni amalga oshirish bosqichlari qanday?*
 - Tahlil uchun moddani tanlash, namunani nurlanishga tayyorlash, nurlanish, aktivlikni o'lchash, natija olish
 - Nurlantirish, nurlanish dozasini o'lchash, energiyani aniqlash
 - Nurlanish dozasini o'lchash, namunani massasini o'lchash, namunani maydalash
 - Namunani kimyoviy tahlil qilish va nurlantirish.
- Aktivatsion tahlil ikkiga bo'linadi ya'ni ... aktivatsion tahlil.*
 - Instrumental va kimyoviy.
 - Instrumental va radiokimyoviy.
 - Radiokimyoviy va biokimyoviy.
 - Kimyoviy va fizikaviy.
- Quyidagi detektorlardan qaysi birining energetik ajratish qobiliyati yuqori?*
 - Proporsional schetchigi.
 - Nal(Ta)-detektor
 - Organik ssintilyator.
 - Ge(Li)-detektor;
- Detektorning effektivligi deb ... aytiladi?*
 - Detektor registratsiya qilgan impulslar sonining uning ishchi hajmi kelib tushgan zarralar soniga nisbatiga.
 - Detektor qayd qilingan impulslar kattaligi va o'lchamiga.
 - Detektorga tushgan zarralar sonining u qayd qilgan impulslar soniga nisbatiga.
 - Detektorga tushgan zarralar turiga.
- Detektorlarning asosiy xarakteristikalarini ko'rsating.*
 - Ajratish qobiliyati, massasi
 - Zichligi, hajmi, umumiy effektivligi.
 - Umumiy effektivligi, o'lik vaqti, energetik ajratish qobiliyati;
 - Umumiy effektivligi, o'lik vaqti, zichligi.
- Aktivatsion tahlilda miqdoriy natijalar olinadigan metodlarni ko'rsating.*
 - Absolyut metod, etalon metodi, monitor metodi
 - Absolyut metod, gamma-metodi, energetik metod.

- Monitor metodi, aktivlash metodi, ostona metodi.
- Etalon metodi, monitor metodi, energetik metod.

7. Etalon nima?

- Moddani tashkil etgan elementlar soni.
 - Tarkibi noma'lum bo'lgan modda.
 - Elementar modda.
 - Aniqlamoqchi bo'lgan elementlardan tayyorlangan modda.
8. *Monitor nima uchun qo'llaniladi?*
- Modda tarkibini aniqlash uchun.
 - Nurlanish intensivligini nazorat qilish uchun.
 - Gamma-kvantlar oqimini o'lchash uchun.
 - Moddaning tuzilishini o'rganish uchun.

9. *Instrumental aktivatsion tahlilda qo'llaniladigan spektrometriya metodlarini ko'rsating.*

- α -spektrometriya, β -spektrometriyasi va γ -spektrometriya.
- Og'ir zaryadlangan zarralar spektrometriyasi, β -nurlanishlar spektrometriyasi va λ -nurlanishlar spektrometriyasi.
- UK-spektrometriya, SDO-spektrometriya L-spektrometriya.
- L-spektrometriya, λ -spektrometriya va UK-spektrometriya.

10. *Etalon sifatida qanday modda olinadi?*

- Kimyoviy toza, tahlil uchun toza va o'ta toza markali moddalar.
- Namuna, manitor va o'ta toza.
- Tahlil uchun toza markali, namuna va manitor.
- Radioaktiv modda, geologik namuna va yarim o'tkazgichli modda.

11. *Detektorlar tashqi radioaktiv fondan qanday himoya qilinadi?*

- O'lchash vaqtini kamaytirish
 - Betonli uycha ichiga joylashtiriladi.
 - Yog'ochdan yasalgan uycha ichiga joylashtiriladi.
 - Qo'rg'oshin uycha ichiga joylashtiriladi
12. *Ekspress aktivatsion tahlil o'tkazish uchun qanday radionuklidlarning gamma-chiziqlaridan va qanday qurilmalardan foydalanish lozim?*

- Uzoq yashovchi radioizotoplar, ampermetrlardan
- Qisqa yashovchi radioizotoplar, pnevmopochtalaridan

S) O'ta uzoq yashovchi radioizotoplar, mikroskoplardan
D) Uzoq yashovchi radioizotoplar, teleskoplardan

13. Neytron aktivatsion tahlil usulining qanday metodlari mavjud?

A) Issiqlik neytronlarda aktivatsion tahlil, rezonans neytronlarda aktivatsion tahlil, tez neytronlarda aktivatsion tahlil
V) Issiqlik neytronlarda aktivatsion tahlil, energetik aktivatsion tahlil, gamma-kvantlarda aktivatsion tahlil
S) O'ta uzoq yashovchi radioizotoplarda aktivatsion tahlil, mikro-skoplardan aktivatsion tahlil, fotonlarda aktivatsion tahlil
D) Uzoq yashovchi radioizotoplar aktivatsion tahlil, teleskoplardan neytron aktivatsion tahlil

14. Aktivatsion tahlilda interferensiyalamuvchi yadro reaksiyasi deb nimaga aytiladi?

A) Bir necha reaksiya natijasida bir xil radioizotop hosil bo'lishiga.
V) Radioizotoplar hosil bo'lishiga.
S) Yadro reaktorida neytronlar hosil bo'lishiga
D) Neytron ta'sirida reaksiya yuz berishiga.

15. Gamma-spektrdagi gamma-chiziq va fotocho'qqilar qanday jarayon hisobiga hosil bo'ladi?

A) Kompton effekti
B) Ionizatsiya
C) Fotoeffekt
D) Gamma-kvantlar sochilishi

16. Qanday aktivatsion tahlil usulida katta massali namunalarni tezkor tahlil qilish mumkin?

A) Spektral tahlil usuli
B) Neytron-aktivatsion usuli
C) Gamma-aktivatsion usuli
D) Gamma-yutilish usuli

17. Analitik gamma-chiziq deb qanday gamma-chiziqqa aytiladi?

A) Elementni aniqlash uchun qo'llaniladigan
B) Gamma-aktivatsion usulida qo'llaniladigan
C) Energiyani aniqlash uchun qo'llaniladigan
D) Neytron-aktivatsion usuli qo'llaniladigan

18. Etalon metodida element miqdori qanday munosabat vositasida aniqlanadi?

A) $\frac{m_x}{m_j} = \frac{A_x}{A_j}$;
B) $m_x = \frac{A_x}{A_j} \cdot \frac{A_{mj}}{A_{mx}} m_j$;
C) $\frac{m_x}{m_j} = \frac{A_x}{A_j} \sqrt{3}$;
D) $\frac{m_x}{m_j} = \frac{A_x}{A_j} \sqrt{N}$.

19. Monitor metodida element miqdori qanday munosabat yordamida aniqlanadi?

A) $\frac{m_x}{m_j} = \frac{A_x}{A_j}$;
B) $m_x = \frac{A_x}{A_j} \cdot \frac{A_{mj}}{A_{mx}} m_j$;
C) $\frac{m_x}{m_j} = \frac{A_x}{A_j} \sqrt{150}$;
D) $\frac{m_x}{m_j} \sqrt{N} = \frac{A_x}{A_j}$.

20. Gamma spektrdagi 511 keV energiyali gamma-chiziq qanday jarayon hisobiga vujudga keladi?

A) Kompton effekti
B) Ionizatsiya
C) Pozitronlarning annigilyatsiyasi
D) Gamma-kvantlar sochilish

GLOSSARIY

absolyut metod – modda tarkibini bevosita tahlil qilish metodi.
aktivatsion tahlil – modda atom yadrolarini aktivatsiya qilish usuli.
atom – kimyoviy tarkibini tahlil qilish metodi.
anion – musbat zaryadlangan og'ir yadro va manfiy elektronlar qobiqlaridan tashkil topgan mikrozarra.
atom yadrosi – musbat zaryadlangan protonlar va zaryadsiz neytronlardan tashkil topgan mikrozarra.
aktivlik – radioaktiv moddalarning parchalanish tezligini ifodalovchi kattalik. Birlik vaqt ichidagi parchalanishlar soni.
alfa-zarra – gelyiy atomining yadrosi bo'lib, ikkita proton va ikkita neytronlardan tashkil topgan.
beta-parchalanish – yadrolarning o'z-o'zidan elektron, pozitron (beta-minus) chiqarib parchalanishi.
beta-zarra – radioaktiv modda yadrolar parchalanishi natijasida chiqarilgan elektron yoki pozitron.
beta-izotop – elektronlarni yuqori energiyagacha tezlatuvchi qurilma.
beta-atom – bitta proton va bitta elektronidan tashkil topgan mikrozarra.
gamma-nurlar – radioaktiv yadrolar parchalanishi natijasida chiqarilgan energiya. Gamma-nurlar bu qisqa to'lqin uzunlikdagi elektromagnit nurlanishlar.
deyteriy – vodorodning tabiiy turg'un izotopi bo'lib, u bitta proton va bitta elektronidan tashkil topgan. "Og'ir vodorod" deyiladi.
deyteriy – deyteriy atomining yadrosi bo'lib, u bitta neytron va bitta protonidan tashkil topgan.
aktivatsiya – elektr neytral atomlarni aktiv ionlarga aylantirish jarayoni.
ion – elektronini yo'qotgan yoki elektron biriktirib olgan atom.
ionizatsiya – protonlar soni bir xil bo'lgan yadrolar. Masalan, alfa-izotop mavjud.
ion yadrolar – protonlar va massa sonlari bir xil bo'lib, faqatgina usuliyatlarini har hil bo'lgan yadrolar.

Kvant sonlar – kvant sistemalarning (atom, yadro, molekula va boshqalar) tavsiflovchi fizik kattaliklarning qabul qiluvi qiyomatlarini aniqlovchi butun yoki kasr sonlar.

Leptonlar – kuchsiz o'zaro ta'sirda ishtirok etuvchi zarralar bo'lib, bularga elektron, myuon, tau-lepton va neytrinolar kiradi.

Massa soni – atom yadrosini tashkil etgan nuklonlar (proton va neytronlar) soni.

Nuklon – proton va neytronlarning umumiy nomlanishi. Yadro zarrasi degan ma'noni anglatadi.

Mikrozarralar – elementar zarralar, yadro, atom, molekular.

Mikrotron – elektronlarni yuqori energiyagacha tezlatuvchi qurilma.

Molekula – atomlardan tashkil topgan zarracha bo'lib, u moddaning kimyoviy xususiyatlarini belgilaydi.

Pauli prinsipi – bitta atomda 4 ta kvant soni bir xil bo'lgan elektron mavjud bo'lmastik prinsipi.

Protiy – yadrosi bitta protondan iborat bo'lgan engil vodorod atomi.

Radioaktivlik – yadroning o'z-o'zidan bir yoki bir nechta zarralar chiqarib parchalanish (emirilish) hodisasi.

Radioaktiv oilalar – bir biridan radioaktiv parchalanish natijasida hosil bo'ladigan elementlar zanjiri. Tabiatda to'rtta radioaktiv oila mavjud.

Tritiy – vodorodning tabiiy izotopi bo'lib, u ikkita neytron, bitta proton va bitta elektronidan tashkil topgan "O'ta og'ir vodorod" ham deyiladi.

Triton – tritiy atomining yadrosi bo'lib, ikkita neytron va bitta protondan iborat.

Rentgen nurlanishlari – juda qisqa to'lqin uzunlikka ega bo'lgan elektromagnit nurlanishlar ($0,06 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 20 \text{ \AA}$).

Fermionlar – spin kvant sonlari butun yarim qiyomatlar qabul qiladigan zarralar.

Foton – elementar zarra, elektromagnit nurlanishlarning kvanti.

Yadro reaksiyasi – yuqori energiyali mikrozarra yoki engil yadrolarning yadro bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasida yadro ichki holatining o'zgarishi yoki yangi yadro hosil bo'lish jarayoni.

Yadro reaksiya kesimi – reaksiya yuz berish ehtimolligi.

ADABIYOTLAR

1. T.M. Muminov, A.B. Xoliqov, Sh.X. Xolmurudov. Atom yadrosi va zarralar fizikasi. T.: O'zbekiston faylasuflar jamiyati, 2009.
2. Kadilin V.V., Miloserdin V.Yu., Samosadnyy V.T. Prikladnaya yadernaya fizika. Uchebnoe posobie. M.: MIFI, 2007.
3. Muxin, K. N. Eksperimentalnaya yadernaya fizika / K. N. Muxin. -SPb.-M.-Krasnodar: Lan, 2009. - T. 1. - S. 297-363.
4. Polvonov S.R., Kanokov Z., Karaxodjaev A., Ruzimov Sh.M. Yadro fizikasidan masalalar to'plami. O'quv qo'llanma. Toshkent, O'zMU, 2006, 119 b.
5. Kayumov M.A. Dozimetriya asoslari va ionlashtiruvchi nurla-nishlardan himoyalanih. T.: Davr, 2013.
6. Fizicheskie velichiny. Spravochnik. - M.: Energoatomizdat, 1991.
7. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. Yadernaya fizika, M.: Nauka, 1980.
8. Bekjonov R.B. Atom yadrosi va zarralar fizikasi. Toshkent, O'kituvchi, 1994.
9. Irodov I. E. Sbornik zadach po atomnoy i yadernoy fizike. uch. pos. Atomizdat. M. 1971.
10. Teshaboev Q.T. Yadro va elementar zarralar fizikasi. O'qituvchi, Toshkent, 1992.
11. Irodov, I. E. Zadachi po kvantovoy fizike. - M.: Vyssh. shkola, 1991.
12. Xoll E.Dj. - Radiatsiya i jizn - M., Meditsina, 1989.
13. Yarmonenko S.P. - Radiobiologiya cheloveka i jivotnyx-M., Vysshaya shkola, 1988.
14. Praktikum po yadernoy fizike - M., Izd-vo MGU, 1980.
15. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. - Yadernaya fizika -M., NAUKA, 1980.
16. Morey A.N., Barxudarov R.M., Novikov N.Ya. Globalnye vyipadeniya seziya-137 i chelovek. M.: Atomizdat, 1974.-168 s.
17. Mostev A.A. Seziy-137. Okrujayushaya sreda. Chelovek. M., Energoatomizdat, 1985. -121 s.
18. Shukolyukov Yu.A. Delenie yader urana v prirode. M.: Atomizdat, 1970. - 270 s.
19. Vasilenko I.Ya. - Radiatsionnye porajeniya produktami yadernogo deleniya - Zdravoohranenie Belorussii. 1986, N12., s.68.
20. Informatsiya ob avarii na Chernobylskoy AES i ee posledstviyax, podgotovlennaya dlya MAGATE - Atomnaya energiya, 1986. t. 61, vyp. 5., s. 301-320.
21. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (nrb-2006) i osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (osporb-2006). www.lex.uz
22. Biologicheskoe deystvie produktov yadernogo deleniya. Metabo-lizm i ostrye porajeniya - Radiobiologiya, 1992, t.32, v.1, s.69-78.
23. Biologicheskoe deystvie produktov yadernogo deleniya. Otda-lennye posledstviya porajeniya - Radiobiologiya, 1993, t.ZZ, v.Z, s. 442-452.
24. Ivanov, V. I. Kurs dozimetrii / V. I. Ivanov. - M.: Atomizdat, 1978. - S. 12-36.
25. Shultis, J. K. Radiation shielding / J. K. Shultis, R. E. Faw. - Illinois: American Nuclear Society, Inc., 2000. - P. 28-72.
26. Vasilenko O.I. - "Radiatsionnaya ekologiya" - M.: Meditsina, 2004. - 216 s.
27. Rose, H. J. and Jones, G. A. (1984-01-19). «A new kind of natural radioactivity». *Nature* **307**: 245-247. DOI: 10.1038/307245a.
28. Baum, E. M. et al. (2002). Nuclides and Isotopes: Chart of the nuclides 16th ed.. Knolls Atomic Power Laboratory (Lockheed Martin).
29. Aleksandrov D.V. i dr. Pisma v JETP. 1984 t.40 s152-154/ N.V.
30. Kuklin S.N., Adamian G.G., Antonenko N.V. Spectroscopic factors and cluster decay half-lives of heavy nuclei.//Phys.Rev. C.71, 014301(2005).
31. Kuklin S.N., Shneidman T.M., Adamian G.G., Antonenko N.V. Alpha-decay fine structures of U isotopes and systematics for isotopes chains of Po and Rn.//Eur. Phys. J. 2012, **A48**, p.112-120.
32. <http://www.nndc.bnl.gov>
33. <http://www.oecd-nea.org>
34. <http://www-nds.iaea.org>
35. G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A. H. Wapstra (2003). «The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties».

Nuclear Physics A 729: 3–128. DOI:10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.

36. List of Adopted Double Beta ($\beta\beta$) Decay Values. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory, 2010. Brookhaven National Laboratory Report BNL-91299-2010.
37. Ajabov A.K., Muxamedov A.K., Poteskin G.V., Mamatqulov O.B., Muminov I.T., Rashidova D.Sh. «Vertikalnaya migratsiya ^{137}Cs v nekotoryx pochvax Uzbekistana». Atomnaya energiya, t.87, vyp.4, 1999, s.311-314.
38. Alimov G.R., Rashidova D.Sh., Xolbaev I., Mamatqulov O.B., Muminov I.T., Xudayberdiyev A.T., Begimkulov X.X., Muxamedov A.K., Poteskin G.V., Xazratov T. Gamma-spektrometricheskoe opredelenie sodержaniya radionuklidov v pochvax. Uzbekskiy fizicheskij jurnal, №5-6, 2000, s.447-455.
39. <http://www.phys.msu.ru>
40. <http://nuclphys.sinp.msu.ru>
41. <http://cdfc.sinp.msu.ru/index.ru.html>
42. <http://cdfc.sinp.msu.ru>
43. <http://www.inp.uz>
44. <http://www.phys.msu.ru>
45. <http://nuclphys.sinp.msu.ru>

MUNDARIJA

Soʻz boshi.....	3
Kirish	5
I BOB. RADIOAKTIVLIK HODISASI	6
1.1-§. Radioaktivlik hodisasining umumiy tavsifi.....	6
1.2-§. Radioaktiv parchalanishning asosiy qonunlari.....	9
1.3-§. Alfa-parchalanish	14
1.4-§. Beta-parchalanishlar.....	18
1.5-§. Gamma-nurlanish.....	23
1.6-§. Ichki konversiya hodisasi.....	28
1.7-§. Myossbauer effekti va uning qoʻllanilishi.....	30
1.8-§. Klaster radioaktivlik	37
1.9-§. Qoʻshaloq beta-parchalanishlar.....	48
1.10-§. Neytron radioaktivlik	50
1.11-§. Radioaktiv parchalanish jarayonlarining sinflarga boʻlinishi.....	56
1.12-§. Radioaktiv fon.....	57
1.13-§. Tabiiy radioaktiv aerozollar	63
1.14-§. Sunʼiy radioaktiv fon.....	67
1.15-§. Seziy-137 radionuklidining tuproqdagi migratsiyasi.....	69
1.16-§. Radiatsion ekologiya.....	71
Masalalar yechish uchun namunalar.....	73
Mustaqil yechish uchun masalalar.....	78
Test savollar.....	80
II BOB. YADRO REAKSIYALARI	84
2.1-§. Yadro reaksiyalarining taʼrifi. Asosiy tushunchalar.....	84
2.2-§. Yadro reaksiyalarining kesimi va chiqishi	86
2.3-§. Fotoyadro reaksiyalari.....	89
2.4-§. Neytronlar ishtirokidagi yadro reaksiyalari.....	91
2.5-§. Aktivatsiya tenglamasi	95

1.11-§. Pozitron emission tomografiyaning ishlash tamoyili.....	174
Masalalar yechish uchun namunalari.....	181
Mustaqil yechish uchun masalalar.....	185
Test savollar.....	186
V BOB. AKTIVATSION TAHLIL.....	190
5.1-§. Aktivatsion tahlil metodi.....	190
5.2-§. Miqdoriy natijalarni olish uslubiyatlari.....	193
5.3-§. Aktivatsion tahlil sezgirligi. Aniqlanish va payqash chegarasi.....	195
5.4-§. Aktivatsion tahlilning umumiy yo'nalishi.....	196
5.5-§. Neytron-aktivatsion tahlil.....	201
5.6-§. Gamma-aktivatsion tahlil.....	207
5.7-§. Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil.....	215
5.8-§. Instrumental aktivatsion tahlilning spektrometrik metodlari.....	219
5.9-§. Gamma-nurlanishlar spektrometriyasi.....	220
5.10-§. Aktivatsion tahlil o'tkazish uchun zarur bo'lgan apparaturalar kompleksini.....	230
Masalalar yechish uchun namunalari.....	236
Mustaqil yechish uchun masalalar.....	240
Test savollar.....	242
Test savollarining javoblari.....	246
Glossariy.....	248
Adabiyotlar.....	250

2.6-§. Yadro xususiyati va yadro reaksiyalari bo'yicha ma'lumotlar markazlari.....	97
Masalalar yechish uchun namunalari.....	99
Mustaqil yechish uchun masalalar.....	103
Test savollar.....	105
III BOB. YADRO NURLANISHLARINING MODDA	108
BILAN O'ZARO TA'SIRI.....	109
3.1-§. Zaryadlangan og'ir zarralarning modda orqali o'tishi.....	113
3.2-§. Zaryadlangan engil zarralarning modda orqali o'tishi.....	116
3.3-§. Vavilov-Cherenkov nurlanishi.....	118
3.4-§. Sinxroton nurlanishlar.....	118
3.5-§. Zaryadlangan zarralarning kanallashishi. Kanallashish sharti. Linxard burchagi.....	121
3.6-§. Gamma-nurlarning modda bilan o'zaro ta'siri.....	125
Masalalar yechish uchun namunalari.....	134
Mustaqil yechish uchun masalalar.....	138
Test savollar.....	139

IV BOB. YADRO NURLANISHLARINING TIBBIYOTDA	143
QO'LLANILISHI.....	143
4.1-§. Dozimetriya asoslari.....	143
4.2-§. Tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar.....	149
4.3-§. Yadro reaktorlarida olinadigan radionuklidlar.....	153
4.4-§. Radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo'llanilishi.....	155
4.5-§. Yadro tibbiyotida qo'llanilayotgan radionuklidlarning sinflarga bo'linishi.....	156
4.6-§. Yod-123 radioizotopining tibbiyotda qo'llanilishi.....	158
4.7-§. Yadro reaktorlarida olinadigan radionuklidlar.....	164
4.8-§. Siklotronlarda radionuklidlar ishlab chiqarish.....	166
4.9-§. Elektron tezlatgichlarda radionuklidlar chiqishlarini aniqlash.....	168
4.10-§. Pozitron emission tomografiya.....	171

**YULDASHEV BEZZOD SODIQOVICH
POLVONOV SATIMBOY RAJAPOVICH
BOZOROV ERKIN XOJIEVICH**

AMALIY YADRO FIZIKASI

Muharrir: S. T. Xashimov
Musahhih: S. Gapurova
Sahifalovchi: A. Hidoyatov

Nashriyot litsenziyasi №Al 242. 04.07.2013 y.
Ofset qog'oz. Boshiga ruxsat etildi 14.12.2019.
Format 60x84 $\frac{1}{16}$. Garnitura «PT Serif».
Bosma taboq 16.0 Adadi 300 nusxa. Buyurtma №63.

«VNESHINVESTPROM» mas'uliyati
cheklangan jamiyati.
100029, Toshkent shahri, Navoiy ko'chasi, 30.
Tel./faks: (+99871) 244-75-75