

Bexzod Sodiqovich YULDASHEV
Satimboy Rajapovich POLVONOV
Erkin Xojiyevich BOZOROV

AMALIY YADRO FIZIKASI



**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 MILLIY UNIVERSITETI

**Bexzod Sodiqovich YULDASHEV
Satimboy Rajapovich POLVONOV
Erkin Xojiyevich BOZOROV**

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*

«Donishmand ziyosi»
Toshkent – 2020

Taqrizchilar:

T.M. Mo‘minov – O‘zMU fizika fakulteti «Yadro fizikasi» kafedrası professori, O‘zR FA akademigi;

M.A. Qayumov – O‘zR FA Yadro fizikasi instituti, «Siklotron radioizotoplari fizikasi va texnologiyasi laboratoriyasi» katta ilmiy xodimi, fizika-matematika fanlari nomzodi;

G‘.A. Qulabdullayev – O‘zR FA Yadro fizikasi instituti «Yadroviy tibbiyot» laboratoriyasi mudiri, fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim.

Darslik Mirzo Ulug‘bek nomli O‘zbekiston Milliy universiteti Kengashining kengaytirilgan yig‘ilishida muhokama qilinib, chop etishga tavsiya etilgan (2017-yil 25-oktabr, № 2-son yig‘ilish bayoni).

Darslikda yadro nurlanishlarining modda bilan o‘zaro ta’siri, yadro nurlanishlarining tibbiyotda qo‘llanilishi, radioaktiv parchalanishlar, 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.

Ushbu darslik amaliy yadro fizikasi sohasidagi mutaxassislar, doktorantlar va oliy o‘quv yurtlari bakalavrlari hamda magistrantlari uchun mo‘ljallangan.

«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.

Ro‘yxatga olish raqami 274-317.

SO‘ZBOSHI

Amaliy yadro fizikasiga bag‘ishlangan mazkur darslik mualliflarining Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti fizika fakulteti «Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi, tezlashitiruvchi texnika» mutaxassisligi bo‘yicha ta‘lim olayotgan talabalarga ko‘p yillar davomida o‘qilgan ma‘ruzalari asosida tayyorlandi.

Ushbu darslikning ahamiyati shundaki, u o‘zbek tilida ilk bor yozilishi. Bunda amaliy yadro fizikasi fani sohasida qo‘lga kiritilgan eng so‘nggi 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 hodisasi, gamma-nurlarning modda orqali o‘tishiga sodir bo‘ladigan ta‘sir kabi mavzular uchinchi bobda bayon etilgan. To‘rtinchi bob alohida e‘tiborga sazovor bo‘lib, bunda zamonaviy tibbiyotda yadro nurlanishlarining qo‘llanilishi, radioizotoplarining tashxis va davolashda qo‘llanilishi to‘liq yoritilgan. Zamonaviy yadro fizikaviy tahlil usullaridan biri bo‘lgan aktivatsion tahlil metodi va uning turli sohalarda qo‘llanilishining tahliliy imkoniyatlari beshinchi bobda keltirilgan. Shuningdek, darslikda nazorat savollari, bobga oid masalalar yechimlari va mustaqil yechish uchun masalalar, glosariy 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 O‘zMU fizika fakulteti yadro fizikasi kafedrasini professori, O‘zR FA akademigi T.M. Mo‘minovga, O‘zR FA Yadro fizikasi instituti Yadroviy tibbiyot laboratoriyasi mudiri, fizika-matematika f. n., katta ilmiy xodim G‘.A. Qulabdullayevga, «Siklotron radioizotop-

lari fizikasi va texnologiyasi» laboratoriyasi katta ilmiy xodimi, fizika-matematika f. n. M.A. Qayumovga o'z minnatdorchiliklarini 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 tuzatishga imkon beradigan taklif va mulohazalarini yuboruvchi kitobxonlarga minnatdorchilik bildiradilar.

KIRISH

Yadro fizikasi fani atom yadrosining tuzilishi, xususiyati va unda yuz beradigan jarayonlar haqidagi fandır. 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 ($\sim 10^{-12}$ 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 deyarli butun massasi yadroda to'plangan bo'ladi. Shunday qilib, «Yadro fizikasi» fani dunyoga kelgan sanani 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 yadro fizikasining yutuqlarini amalda, ya'ni fan va texnikada, tibbiyotda, sanoatning turli sohalarida qo'llashdan iborat. Amaliy yadro fizikaning asosiy mohiyati shundaki, yadro fizikasining yutuqlari asosida modda, atrof-muhit obyektlari, 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. U 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 qaratilgan. Berilgan mavzularda yadro tibbiyotiga tegishli bir qator ma'lumot va tushunchalar berib o'tilgan.

I BOB

RADIOAKTIVLIK HODISASI

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

Radioaktivlik ikki xil, ya'ni tabiiy va sun'iy radioaktivlikka bo'linadi. Yerda uchraydigan tabiiy radioaktivlikni ilk bor Pyer 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 sohalarda keng qo'llanila boshlandi.

Keyingi vaqtlarda radioaktiv izotoplar ishlab chiqarish va ularning qo'llanilish sohalari kengayib bormoqda. Ayniqsa, uni tibbiyotda qo'llanilishi va ishlab chiqarilayotgan radioaktiv izotoplar (radionuklidlar) soni va nomenklaturasi oshishida yaqqol ko'rish mumkin.

Mazkur bobda radioaktivlik, radioaktiv parchalanish qonunlari, parchalanish turlari, ichki konversiya hodisasi, Myossbauer 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 kasb etdi. 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 ruda ko'zga ko'rinmaydigan, ammo fotoplastinkaga ta'sir qiladigan nurlar chiqarishini payqadi. Agar qorong'i uyda bir parcha uran rudasi fotoplastinka ustiga bir necha kun qo'yilib, so'ngra plastinka ochtirilsa, unda ruda parchasining tasviri tushib qolganini ko'rish

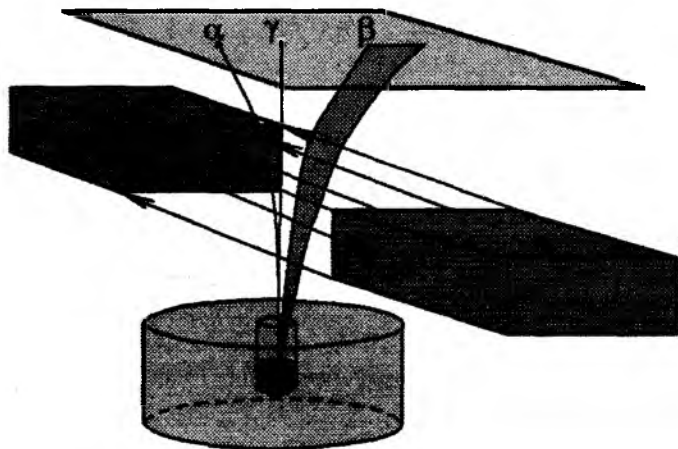
mumkin. Radioaktivlik hodisasini Bekkerel ana shu yoʻl bilan topgan. Bekkerel kashfiyotidan koʻp oʻtmasdan bunday koʻzga koʻrinmas nurlarni boshqa moddalar ham chiqarishi aniqlangan. Barcha bunday moddalar radioaktiv moddalar deb, moddalarning bunday nurlar chiqarish xususiyati esa radioaktivlik deb atala boshlandi. Radioaktivlik hodisasini oʻrganish sohasida fransuz olimlari Mariya Sklodovskaya-Kyuri va Pyer Kyurilarning xizmati katta boʻldi. Ular bir necha tonna uran rudasini qayta ishlab, fanga maʼlum boʻlmagan metallning bir grammiga yaqin miqdorini ajratib olishgan. Bu metallning radioaktivligi uranning radioaktivligidan bir necha million marta ortiq ekanligi aniqlandi. Olimlar bu metallni radiy deb atashgan (radiy – nurli demakdir, lotincha radius – nur soʻzidan olingan). Olimlar radioaktiv parchalanish jarayoniga tabiatdagi qanday kuchlar taʼsir eta oladi (uni tezlashtiradi yoki sekinlashtiradi) degan savolga javob izlay boshladilar. Izchil tekshirishlar natijalaridan maʼlum boʻldiki, juda yuqori yoki juda past harorat, kuchli elektr va magnit maydonlari, yuqori bosim va tezlanishlar, kuchli kimyoviy reaktivlar ham radiyning parchalanish jarayoniga taʼsir eta olmasligini koʻrsatdi. Pyer va Mariya Kyurilar radiy donachasini magnit maydoniga qoʻyib, bir jinsli boʻlgan radioaktiv nurlar dastasini maydon taʼsirida ikki dastaga ajralishini payqadilar. Bu dastalardan birida radioaktiv zarrachalar oldingi yoʻnalishda toʻgʻri chiziq boʻylab harakatlanadi, ikkinchisida esa bir tomonga ogʻib, oʻz yoʻlini oʻzgartiradi. Nurlarning ogʻish yoʻnalishi va burchagiga qarab, ogʻuvchi nurlar manfiy zarralar oqimi ekanligiga ishonch hosil qilish mumkin. Juda sinchiklab tekshirishlar natijasi bu nurlarning elektronlar ekanligini koʻrsatdi. Uchib chiqayotgan elektronlarning tezliklari turlicha boʻlib chiqdi. Magnit maydon taʼsirida ogʻuvchi dastada tezliklari yorugʻlik tezligiga yaqin tezlik bilan harakatlanuvchi elektronlar ham uchraydi. Radioaktiv nurlarning magnit maydonida ogʻmaydigan qismi qanday tabiatga ega ekanligini aniqlashgina qoldi. Ingliz fizigi Ernest Rezerford bu masalani hal qilishga kirishdi. U Pyer va Mariya Kyurilar tajribasini kuchli magnit maydonida oʻtkazishga ahd qiladi. E. Rezerford tajribasida radioaktiv nurlarning Pyer va Mariya Kyurilar tajribasidagi magnit maydon taʼsirida ogʻmaydigan qismi kuchli magnit maydonda ikkita dastaga ajralishi kuzatildi. Bu dastalardan biri magnit maydon taʼsirida mutlaqo ogʻmay, toʻgʻri chiziq boʻylab boradi,

ikkinchisi esa elektronlarning og'ish yo'nalishiga qarama-qarshi tomonga biroz og'adi. Rezerford o'z tajribasi natijalarini tahlil qilib, radioaktiv nurlarning bu qismi musbat zaryadlangan zarrachalar oqimidan iborat degan xulosaga keladi (*1.1-rasm*).

Ushbu tajribadagi nurlar dastalariga grek alifbosining dastlabki 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 yetarli bo'lmagan zaruriy shartidir.

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



1.1-rasm. Tajribada nurlarning hosil bo'lishi.

Radioaktiv yadrolarning yashash vaqtlari soniyadan yillargacha bo'lgan oraliqda yotadi. Odatda soniyadan yilgacha bo'lgan vaqt radiotexnik usulda, soniyadan kichik vaqt esa yadroning energetik sathi kengligini o'lchash 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 hamda oxirgi 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^{\pm} , ν_e , $\bar{\nu}_e$);
- γ -parchalanish;
- spontan (o'z-o'zidan) bo'linish;
- nuklonlar chiqishi (bitta proton yoki neytron, ikkita proton);
- klasterlarning chiqishi (${}^{12}\text{C}$ dan ${}^{32}\text{S}$ 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:

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

bu yerda M_i ; M_f ; 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 moddadagi 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 tushuntirilishi 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 tezligidir.

Xalqaro birliklar sistemasida (XBS) aktivlik birligi etib 1 soniyadagi parchalanishlar soni qabul qilingan, ya'ni 1 parchalanish/c. Bu birlik Bekkerel (Bk) deb ham aytiladi. $1 \text{ Bk} = 1 \text{ parch/c}$. Xalqaro birliklar sistemasiga kirmaydigan quyidagi birliklar ham qo'llaniladi:

$$1 \text{ Rezerford} = 1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ Bk};$$

$$1 \text{ Kyuri} = 1 \text{ Ku} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bk};$$

$$1 \text{ mKu} = 10^{-3} \text{ Ku};$$

$$1 \text{ mkKu} = 10^{-6} \text{ Ku}.$$

Radioaktiv parchalanish doimiysi λ , vaqtga bog'liq emas. Buning ma'nosi shuki, yadroning yoshi tushunchasi o'rniga yadroning o'rtacha yashash vaqti kattaligini ishlatish o'rinlidir.

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 yerda N — t paytdagi parchalanmagan yadrolar soni, N_0 — boshlang'ich paytdagi yadrolar soni.

Bu radioaktiv parchalanish qonunining ifodasidir. Bu ifodadan ko'rinib turibdiki, radioaktiv yadrolar soni vaqt o'tishi bilan eksponensial qonun bo'yicha kamayib boradi. Aktivlik (1.2) ga ko'ra quyidagi ko'rinishni oladi:

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

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 yemirilish yoki yarim parchalanish davridir. Yarim parchalanish davri deb, radioaktiv yadrolarning yarmi parchalanishi uchun ketadigan vaqtga aytiladi va $T_{1/2}$ bilan belgilanadi. Bitta yarim parchalanish davridan so'ng radioaktiv yadrolar soni ikki baravar kamayganligidan, λ va $T_{1/2}$ orasidagi bog'lanish quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \\ T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.6)$$

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:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.8)$$

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

$$N = N_0 / e \quad (1.9)$$

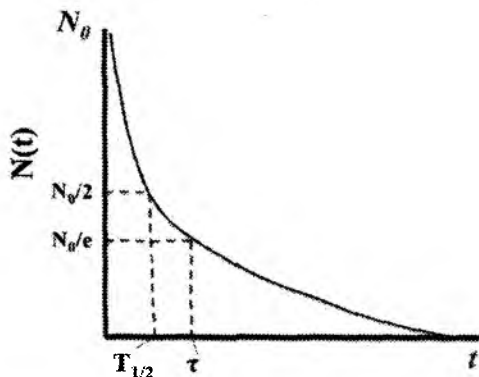
Demak, yadroning o'rtacha yashash vaqti davomida yadrolar soni e marta kamayadi. Radioaktiv parchalanishning eksponensial qonuni 1.2-rasmida grafik ko'rinishida keltirilgan.

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

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

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad (1.10)$$

bu yerda A – radioaktiv namunaning (modda) aktivligi, m – uning massasi. Solishtirma aktivlikning o'lchov birligi (XBSda) Bk/kg. Shuningdek,



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

hosilaviy o'lchov birliklar Bk/g va sistemadan tashqari o'lchov birlik Ki/kg (yuqori aktivlikdagi manbalar uchun)lar ham qabul qilingan.

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

$$A_V = \frac{A}{V}, \quad (1.11)$$

bu yerda A – radioaktiv namuna (modda) aktivligi, V – uning hajmi. Hajmiy aktivlik o'lchov birligi (XBSda) Bk/m³. Ammo ko'p hollarda Bk/l qo'llaniladi.

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

$$A_S = \frac{A}{S}, \quad (1.12)$$

bu yerda A – sirtning S yuzasi bo'ylab tekis taqsimlangan aktivlik. Sirt aktivligining o'lchov birligi (XBSda) Bk/m². Shuningdek, hosilaviy o'lchov birliklar Bk/sm² va sistemadan tashqari o'lchov birlik Ki/km² qo'llaniladi.

Ko'p hollarda radioaktiv yadrolarning parchalanishi natijasida hosil bo'lgan ikkilamchi yadrolar ham radioaktiv bo'lishi mumkin, ya'ni

birlamchi radioaktiv yadro parchalanishi natijasida ikkilamchi yadro va bu parchalanish natijasida uchlamchi yadro va h.k. radioaktiv yadrolar hosil bo'ladi:



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

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 \quad (1.14)$$

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 yechamiz va quyidagi ifodalarni olamiz:

$$\begin{cases} N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) = N_{20} e^{-\lambda_2 t} + \frac{N_{10} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{cases} \quad (1.15)$$

$t = 0$ da birlamchi yadroning soni N_{10} ta, ikkinchi yadroning soni esa $N_{20} = 0$ bo'lsin, u holda (1.15) tenglamalar sistemasini quyidagi ko'rinishga keladi, ya'ni:

$$\begin{cases} N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) = \frac{N_{10} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{cases} \quad (1.16)$$

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 quyidagi ko'rinishga keladi:

$$N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.17)$$

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 (1.17) ifoda o'zining chegaraviy qiymatiga yaqinlashadi:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2} = \text{const} \quad (1.18)$$

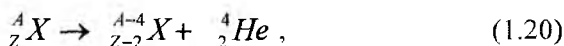
Agar $t > 10T$ bo'lsa, (1.18) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (1.19)$$

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 bo'lishi jarayonini keltirish mumkin.

1.3-§. Alfa-parchalanish

Og'ir yadrolarning o'z-o'zidan b-zarralar chiqarib parchalanishiga b-parchalanish hodisasi deyiladi. Alfa-parchalanishda yadroning massa soni to'rt birlikka, atom nomeri esa ikki birlikka 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:

$$M(A, Z) \geq M(A-4, Z-2) + M({}^4_2 \text{He}) \quad (1.21)$$

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

$$Q_\alpha = [M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M({}^4_2 \text{He})] c^2 = T_\alpha + T_t \quad (1.22)$$

bu yerda T_b – b-zarraning kinetik energiyasi, T_t – tepki yadroning kinetik energiyasi. Bu jarayon uchun impuls saqlanish qonuni quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\bar{P}_\alpha + \bar{P}_t = \bar{P}(A, Z) \quad (1.23)$$

bu yerda \bar{P}_α – b-zarraning impuls, \bar{P}_t – tepki yadroning impuls. Agar parchalanayotgan yadro tinch holda turibdi deb faraz qilinsa, quyidagi

tenglik o‘rinli bo‘ladi: $|\bar{P}_\alpha| = |\bar{P}_t|$ bundan

$$T_t = T_\alpha M_\alpha / M_t \quad (1.24)$$

(1.24) ifodani (1.22) ga qo‘yamiz

$$Q_\alpha = T_\alpha \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_t} \right) \quad (1.25)$$

bu yerdan

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M_t}{M_t + M_\alpha} \quad (1.26)$$

bu yerda M_t – tepki yadro massasi. Shunday qilib, b-parchalanish natijasida ajralib chiqadigan kinetik energiyaning asosiy qismini b-zarra olib ketadi, juda kam qismini (b-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 kunda alfa-parchalanuvchi yadrolar soni 200 dan oshadi va ular asosan $Z > 83$ sohada kuzatiladi. Alfa-parchalanuvchi yadrolarning kichik guruhi noyob elementlar, ya‘ni $A = 140 - 160$ soha oralig‘ida ham uchraydi.

2. Alfa-parchalanuvchi yadrolarning yarim parchalanish davri juda katta diapazonda yotadi. Qo‘rg‘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 b-parchalanishda chiqayotgan zarralarning energiyasi kichik diapazonda o‘zgaradi, ya‘ni og‘ir yadrolar uchun 4 – 9 MeV oralig‘ida 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 Geyger – Nettola qonunini kashf qildilar. Bu qonun quyidagi ko‘rinishda ifodalanaadi:

$$\log T_{1/2} = C + \frac{D}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad (1.27)$$

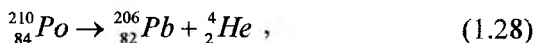
bu yerda S , D – doimiy kattaliklar bo‘lib, A massa soniga va Z ga esa kuchsiz bog‘liq. Agar logarifm o‘nli va energiya MeV larda ifodalansa, u holda yuqoridagi ifodadagi S va D doimiy kattaliklar quyidagiga teng bo‘ladi:

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

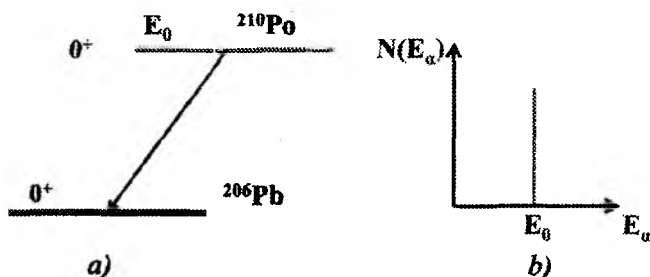
$$Z = 90 \text{ uchun } S = -51,94; D = 139,4 \text{ bo‘ladi}.$$

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

Alfa-parchalanishning sodir bo‘lish jarayonini ${}_{84}^{210}\text{Po}$ yadrosining b-parchalanishi misolida ko‘rib chiqamiz. Poloniy-210 yadrosi quyidagi sxema bo‘yicha parchalanadi:



natijada ikkilamchi yadro – qo‘rg‘oshin-206 hosil bo‘ladi. Ushbu o‘tish, moment va juftlikni o‘zgarmasligi bilan xarakterlanadi, ya’ni birlamchi yadro va ikkilamchi yadrolarning asosiy holatlarining spini va juftliklari bir xil (0^+). Mazkur parchalanish sxemasi va b-zarralar energetik spektri *1.3-rasm*da keltirilgan bo‘lib, bunda spektrning monoenergetik va diskret ekanligi yaqqol ko‘rinib turibdi. Ko‘p hollarda



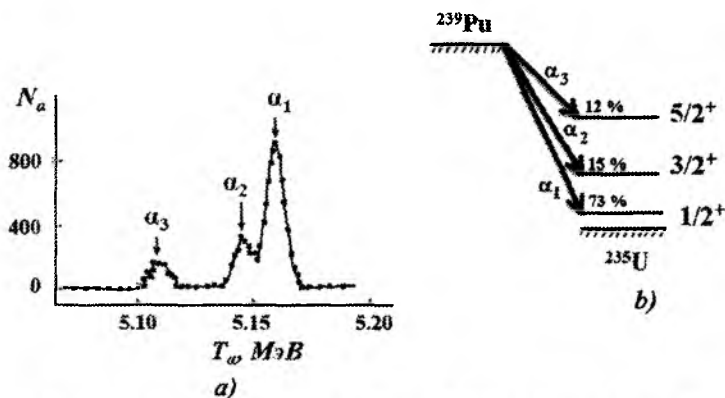
1.3-rasm. Poloniy-210 yadrosining parchalanish sxemasi (a) va b-zarralar energetik spektri (b).

b-parchalanish natijasida hosil bo'lgan b-zarralarning kinetik energiyasi bir xil bo'ladi. Ammo ba'zi hollarda bir nechta guruh monoenergetik b-zarralar hosil bo'ladi.

Aniq o'lchashlar shuni ko'rsatdiki, yadrodan chiqayotgan b-zarralar spektri nozik strukturaga, ya'ni bir-biriga juda yaqin bo'lgan energiyalardan iborat ekan. Bitta yadroning parchalanishi vaqtida turli energiyali b-zarralarning hosil bo'lishi b-parchalanishning nozik strukturasi deyiladi.

Alfa-zarralar spektri oxirgi yadroning nafaqat asosiy holatda, balki uyg'ongan holatlarda ham hosil bo'lishi bilan bog'liq. Bu o'z navbatida kuzatilgan b-spektrlar orqali yadroning energetik holatlariga tegishli ma'lumotlarni olishga yordam beradi. *1.4-rasm*da plutoniy ^{239}Pu yadrosining b-parchalanish sxemasi (a) va b-spektrlar (b) ko'rsatilgan.

Alfa-radioaktiv yadrolar yarim parchalanish davrining keng diapazonga egaligi, shuningdek, ko'plab b-radioaktiv yadrolar uchun ushbu davrlarning katta qiymati, b-zarra, energetik qulay bo'lishiga qaramay, yadroni «darhol» tark eta olmasligi bilan tushuntiriladi. Yadroni tark etish uchun b-zarra, yadro chegarasi sohasidagi b-zarra bilan oxirgi yadroning (b-zarra chiqib ketgandan keyin qolgan yadro) o'zaro ta'sir elektrostatik potentsiali va nuklonlar orasidagi tortishish kuchlari hisobiga vujudga kelgan potensial to'siqni yengib chiqib ketishi lozim.



1.4-rasm. Plutoniy ^{239}Pu yadrosining b-parchalanish sxemasi (a) va b-spektrlar (b).

Klassik fizika nuqtai nazaridan, b-zarracha potensial to‘siqni yengib o‘ta olmaydi, chunki uning kinetik energiyasi yetarli emas. Ammo kvant mexanikasi bo‘yicha b-zarra potensial to‘siqdan o‘tib, yadrodan chiqib ketish ehtimolligi mavjud. Ushbu kvant mexanik hodisa «tunnel effekti» deb nomlanadi. To‘siqning balandligi va kengligi qancha katta bo‘lsa, zarraning tunnel o‘tish ehtimolligi shunchalik kichik bo‘ladi va yarim parchalanish davri mos ravishda katta bo‘ladi. Agar potensial to‘siq yo‘q bo‘lsa, b-zarracha yadroni yadro vaqtiga ($\approx 10^{-21} - 10^{-23}$ s) teng bo‘lgan vaqt davomida tark etgan bo‘lar edi.

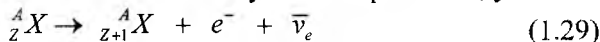
1.4-§. Beta-parchalanish

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 bittaga ortadi, yadrodan elektron va antineytrino chiqib ketadi, ya’ni:



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



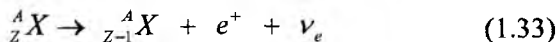
Massa soni A va zaryadi Z bo‘lgan yadro uchun β^- -parchalanishning energiya bo‘yicha bajarilish sharti quyidagicha:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e, \quad (1.31)$$

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

$$M_{am}(A, Z) > M_{am}(A, Z+1) \quad (1.32)$$

β^+ – **parchalanish**. Bu holda yadrodagi protonlardan biri neytronga aylanadi va yadro zaryadi bittaga kamayadi:



Bunda yadrodan pozitron va neytrino chiqadi:



β^+ -parchalanishning energetik sharti qo‘yidagicha:

$$M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e \quad (1.35)$$

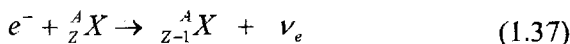
Ikkala tomoniga $(Z+1)m_e$ hadni qo‘shamiz va yadro massasidan atom massasiga o‘tamiz, ya‘ni:

$$\begin{aligned} M(A, Z) &> M(A, Z-1) + \\ M(A, Z) + (Z+1)m_e &> M(A, Z-1) + m_e + (Z+1)m_e \\ M(A, Z) + Zm_e + m_e &> M(A, Z-1) + Zm_e + m_e + m_e \\ M(A, Z) + Zm_e &= M_{am}(A, Z) \\ M(A, Z-1) + (Z-1)m_e &= M_{am}(A, Z-1) \end{aligned}$$

Demak,

$$M_{am}(A, Z) > M_{am}(A, Z-1) + 2m_e \quad (1.36)$$

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 yadrodagi bitta proton neytronga aylanadi va yadrodan neytrino chiqib ketadi, ya‘ni:



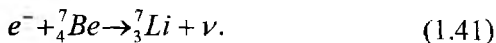
K-qamrashning energetik sharti qo‘yidagicha:

$$M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1) \quad (1.39)$$

yoki atom massasi orqali ifodalansa:

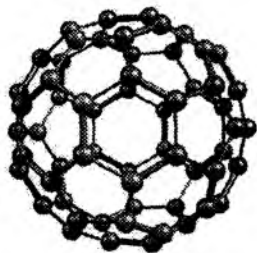
$$M_{am}(A, Z) > M_{am}(A, Z-1) \quad (1.40)$$

Elektron-qamrash hodisasi 1936-yilda yapon olimlari Xiderik Yukava va Shoichi Sakata tomonidan oldindan nazariy yo'l bilan aytilgan va ikki yildan keyin tajribada amerikalik olim Luis Alvares tomonidan kashf etilgan bo'lib, unga elektron qamrash deb nom berilgan. Elektron qamrashga misol qilib, ${}^7_4\text{Be}$ yadrosining elektron qamrash jarayonini keltirish mumkin. Bunga ${}^7\text{Be}$ atomning yadrosi, atom qobig'idagi bitta elektronni o'ziga «tortib» oladi va litiy yadrosiga aylanadi. Pozitron parchalanishiga o'xshash yadrodagi protonlardan biri 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 o'z tasdig'ini topgan, shu bilan birga yashash vaqtining siljishi (yoki ta'bir joiz bo'lsa yarim parchalanish davri) bunday hollarda foizning 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 fullerendan foydalanishdi. Fulleren haqida qisqacha ma'lumot: Fullerenlar bu deyarli sferik bo'lgan, o'nlab atomlardan iborat uglerod molekulalaridir (*1.5-rasm*). Birinchi 60 atomli fulleren molekulalari 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 olishga erishildi.



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

Tajribada ${}^7_4\text{Be}$ atomlarini fulleren ichki qismiga haydab kirgizishga erishildi. Natijada

berilliy yadrosi atrofidagi elektron zichligi oshdi va bu esa o'z navbatida radioaktiv parchalanish sur'atining oshishiga olib keldi. Sof metall berilliy namunasining yarim parchalanish davri 1275 soatni tashkil qilsa, «asirga tushgan» atomlarning yarim parchalanish davri 1264 soatga teng bo'ldi. Vaqtlar orasidagi farqi taxminan 0,85 % ni tashkil etadi. Bir qarashda bu miqdor kam bo'lib ko'rinishi mumkin. Ammo bu hali boshlanishi bo'lib, yangi molekullarning topilishi bu jarayonlarni yanada tezlashtiradi.

Beta-parchalanishlar vaqti $T_{1/2}(\beta) = 0,1\text{s} - 10^{17}$ yil intervalida bo'ladi. 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:

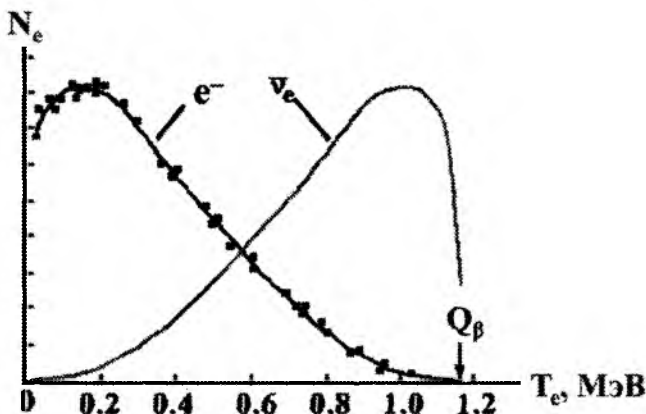
$$Q_{\beta^+} = [M(A, Z) - M(A, Z \mp 1) - m_e]c^2, \quad (1.42)$$

$$Q_e = [M(A, Z) - M(A, Z - 1) + m_e]c^2. \quad (1.43)$$

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^\pm uzoq qolib ketishini ta'qiqlashidir.

Beta parchalanishlar energiyasi uchta zarra orasida taqsimlanadi, ya'ni elektron (pozitron), antineytrino (neytrino) va qoldiq yadro. Natijada ν -zarralar energiyasi β -zarralardan farqli ravishda aniq bir energiyaga ega bo'lmaydi va ularning spektri chiziqli (diskret) bo'lmasdan, noldan maksimal kinetik energiyagacha bo'lgan diapazondagi uzluksiz spektrga ega bo'ladi (*1.6-rasm*). Elektron qamrashda ikkita mahsulot hosil bo'lib, spektri uzluqlikdir. *1.6-rasm*da keltirilgan neytrino spektri hisoblash yo'li orqali olingan, shuning uchun tajriba natijalari qo'yilmagan.



1.6-rasm. $^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{210}_{84}\text{Po} + e^- + \bar{\nu}_e$ parchalanishda hosil bo'ladigan elektron va neytrinolarning energetik spektrlari (neytrino spektri hisoblash yo'li orqali olingan).

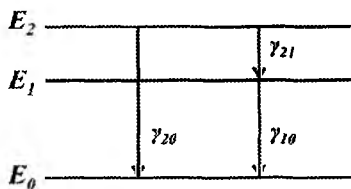
Beta-spektrlarning uzluksizligi 1930-yilda Paulini massasi juda ham kichik va yarim butun spinga ega bo'lgan neytral noma'lum zarra mavjudligi g'oyasiga turtki berdi. Ushbu g'oyaga asosan β^- -parchalanishda energiyaning bir qismini mazkur zarra olib ketadi. Bu zarraga, 1932-yilda neytron kashf etilgandan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

Neytrino modda bilan juda kuchsiz ta'sirlashganligi sababli uni tajribada kuzatish juda qiyin. Uning qattiq muhitdagi yugurish yo'li $\approx 10^{15}$ km ga teng. Faqat 1956-yildagina Raynes va Kouenlar tomonidan neytrinoning mavjudligi tajriba orqali tasdiqlandi va uning modda bilan o'zaro ta'sir kesimi $\sigma \approx 10^{-43}$ sm² 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 obyektlar haqida ma'lumot olishga imkon beradi.

1.5-§. Gamma-nurlanish

Gamma nurlanishlar deb yadroning o'z-o'zidan g-quantlar chiqarish jarayoniga aytiladi. Bu jarayonda yadro uyg'ongan energetik sathdan belgilangan quyi energetik sathlarga o'tadi. Ma'lumki, bunda yadroning A va Z kattaliklari o'zgarmaydi. Gamma-nurlanish yadroning uyg'ongan holatidagi holatlar energiyalarining ayirmasiga



1.7-rasm. Gamma-o'tishlar sxemasi.

teng bo'lgan diskret energiyali nurlanishlaridir. Gamma-kvantlarning nurlanishi yadrodagi ortiqcha energiyani chiqarishning asosiy jarayonlaridan biridir. 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 (1.7-rasm) yoki kaskad (ketma-ket) o'tishlar sodir bo'ladi, natijada yadrodan bir nechta g-quantlar chiqadi.

Yadro energetik sathlarining diskret bo'lganligi sababli g-quantlarning spektri ham diskret bo'ladi.

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

$$E = h\nu = E_i - E_j \quad (1.44)$$

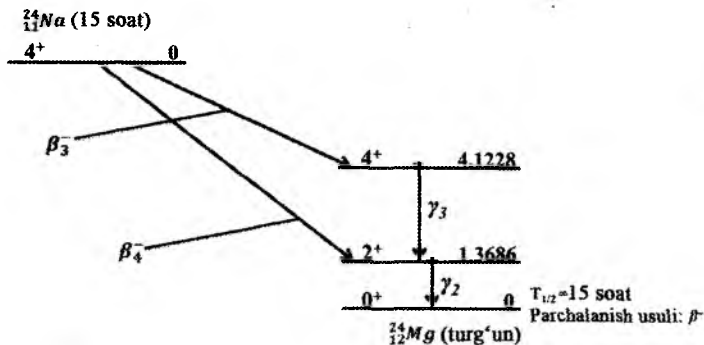
Energiya va impulsning saqlanish qonunlariga asosan (boshlang'ich holatda yadro tinch holda turibdi deb faraz qilinsa):

$$E = E_\gamma + T_{yad}; \quad 0 = \vec{p}_\gamma + \vec{p}_{yad}, \quad (1.45)$$

bu yerda T_{yad} va p_{yad} – mos holda tepki yadroning kinetik energiyasi va impuls, R_g – g-kvant impuls. Yuqoridagi (1.45) tenglamalar sistemasi va $T = p^2 / 2m$ formuladan quyidagi ifodani olamiz:

$$T_{yad} = \frac{E_\gamma^2}{2M_{yad}c^2} \approx \frac{E^2}{2M_{yad}c^2}. \quad (1.46)$$

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



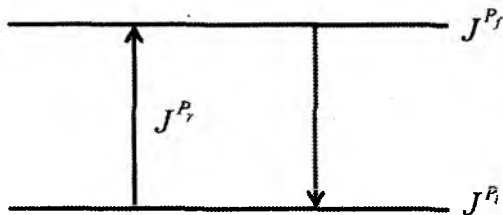
1.8-rasm. ${}^{24}_{11}\text{Na}$ yadrosining β^- -parchalanishda hosil bo'ladigan g-nurlanish.

oralig'ida bo'lsa, tepki yadroning energiyasi $T_{\text{yad}} = (10^{-6} \cdot 10^{-5}) E$ ga teng bo'ladi. Demak, g-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, ${}^{24}_{11}\text{Na}$ yadrosining β^- -parchalanishini keltirish mumkin (**1.8-rasm**). Natriy-24 yadrosining β^- -parchalanish natijasida ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ yadrosi asosan 4^+ holatda hosil bo'ladi. Keyin bu yadro energiyalari 2,7 MeV va 1,4 MeV bo'lgan gamma-kvant chiqarib, asosiy holatga o'tadi.

Yadrolardan chiqayotgan g-kvantlarning energiyalari 10 keV dan 5 MeV gacha bo'lgan diapazonda joylashgan bo'ladi. Bu esa gamma-nurlanishlar l_g to'lqin uzunligining $2 \cdot 10^{-10}$ ch $5 \cdot 10^{-14}$ m atrofidagi qiymatlariga mos keladi.

Yadrolarning radiatsion o'tishlariga mos keladigan elektromagnit 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 g-kvant nurlangan bo'lsin (**1.9-rasm**). Elektromagnit maydon nurlanishi muayyan l multipollik bilan xarakterlanadi.



1.9-rasm. Yadroda radiatsion o'tishlar.

Multipollklar elektr va magnit multipollklarga bo'linadi. Mazkur multipollikka ega bo'lgan kvant tomonidan olib ketiladigan harakat miqdori momenti $l\hbar$ ga teng bo'ladi. l_E va l_M kattaliklarning qabul qilishi mumkin bo'lgan qiymatlar to'plami harakat miqdor momenti va juftliklar bo'yicha tanlash qoidalari orqali aniqlanadi. Harakat miqdor momenti bo'yicha tanlash qoidasi quyidagicha:

$$|J_i - J_f| \leq l \leq |J_i + J_f| \quad (1.47)$$

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

$$P_i / P_f = (-1)^{l_E} ; \quad P_i / P_f = (-1)^{l_M+1} \quad (1.48)$$

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_f, P_f va D1 kattaliklarga ega bo'lgan ikkita holat orasidagi yadro radiatsion o'tishida bosh rol ni quyidagi moment va juftlik bo'yicha tanlash qoidasini qanoatlantiruvchi va eng kichik l_E va l_M qiymatli ega bo'lgan, elektr va (yoki) magnit multipollar bajaradi:

$$l = |\Delta I| \quad \text{va} \quad l = |\Delta I| + 1, \quad (1.49)$$

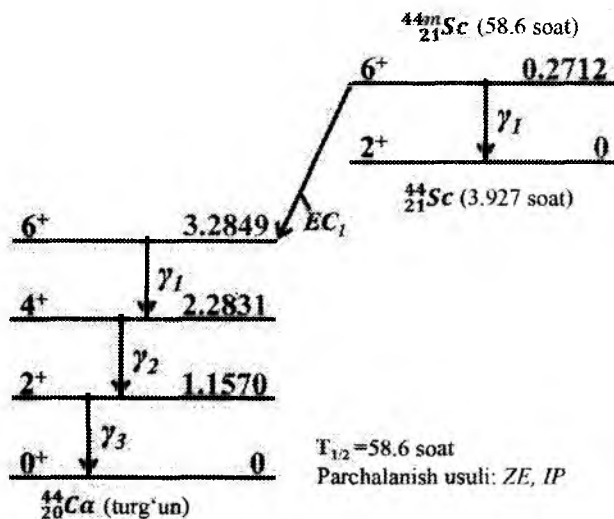
bulardan bittasi elektr ikkinchisi magnit multipol bo'lishi kerak.

Gamma-nurlanishlar statistik xarakterga egadir, ya'ni har bir yadro uchun gamma-kvant nurlanishining ma'lum bir ehtimolligi mavjud. Bu

ehtimollik yadroning uygʻongan holatining oʻrtacha boʻlish vaqtiga quyidagicha ifoda bilan bogʻlangan, yaʼni: $W \approx 1/\tau_\gamma$ (odatda $\tau_\gamma \approx 10^{-13} \text{ c}$).

Ayrim hollarda radioaktiv parchalanishlar yoki yadro reaksiyalari natijasida yadrolarning izomer holatlari deb nomlangan uzoq yashovchi holatlari uygʻonishi mumkin. Izomer holatga ega boʻlgan yadrolarga izomerlar deyiladi. Izomer bu neytron va protonlar soni bir xil, ammo yarim parchalanish davri har xil boʻlgan atom yadrosidir. Izomer holatlarning yashash vaqti har xil boʻlib, ular soniyalarning ulushlaridan bir necha yillargacha boʻlishi mumkin.

Hozirgi kunda yarim parchalanish davri 1 s dan ortiq boʻlgan yuzdan ortiq uygʻongan izomer holatlar maʼlum. Izomeriya yoki izomer holatlar hosil boʻlishiga asosiy sabab, uygʻongan va asosiy holatlarning spinlar farqining kattaligidir ($I \geq 3$). Bunday izomerlar proton yoki neytronlar sonlari 50, 82 yoki 126 boʻlgan yadrolar yaqinida joylashgan boʻladi va izomer «yadrolarini» tashkil qiladilar. Uygʻongan izomer holat metastabil holat deb ham aytiladi va ular koʻpchilik hollarda « m » indeksi bilan belgilanadi. Masalan, $^{84m,g}\text{Sc}$ yadroda m – metastabil holat, g – asosiy holat (1.10-rasm).

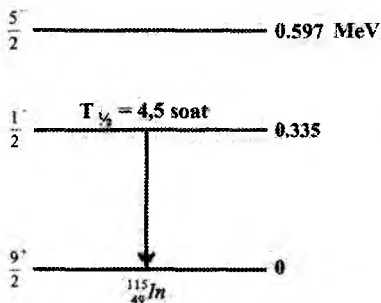


1.10-rasm. Skandiy-44 yadrosining asosiy va metastabil (izomer holatlarining) sathlarining sxemalari.

Skandiy-44 yadrosining izomer holatining yashash vaqti 58,6 soat ekan. Bu yerda uygʻongan va asosiy holatlarining spinlar farqi $\Delta I = I_m - I_g = 4$.

Izomer yadrolarga yana bir misol qilib, indiy-115 izotopini keltirish mumkin (*1.11-rasm*). Indiy-115 izotopining asosiy holati $J^P = 9/2^+$ spin va juftlikka ega.

Birinchi uygʻongan holati energiyasi 335 keV ga teng boʻlib, spin-juftligi $J^P = 1/2^-$. Shuning uchun bu sathlar orasidagi oʻtish M4 g-kvant chiqishi bilan sodir boʻladi. Bu oʻtish qatʼiy man etilgan boʻlib, uygʻongan holati 4,5 soat yarim parchalanish davriga ega.



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

Izomer yadrolar fan va texnikada, tibbiyotda keng qoʻllanilmoqda. Yadro izomerlarni yadro elektr batareyasi sifatida qoʻllanilishi ham istiqbolli hisoblanadi.

1.6-§. Ichki konversiya hodisasi

Uygʻongan holatdagi yadro asosiy holatga nafaqat gamma-kvant chiqarish, balki uygʻongan holat energiyasini atom qobigʻidagi elektronlardan biriga berish yoʻli bilan ham oʻtishi mumkin. Bunday jarayon ichki konversiya deyiladi. Bu hodisa 1938-yilda amerikalik fizik Alvares (Alvarez) Luis Uolter tomonidan kashf etilgan. Ichki konversiya hodisasi gamma-nurlanish bilan raqobatdagi jarayon hisoblanadi. Ichki konversiya jarayoni katta ehtimollik bilan yadroga yaqin boʻlgan elektron qobiqlarda sodir boʻladi.

Energiya olgan 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:

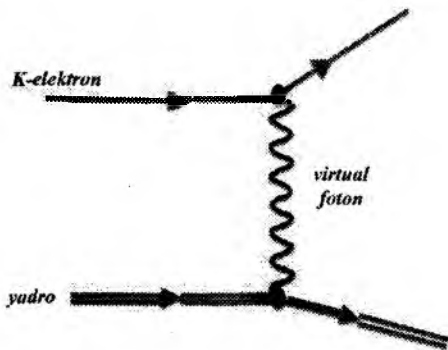
$$T_e = E - E_K \quad (1.50)$$

bu yerda T_e – elektronlarning kinetik energiyasi, E_K – K-qobiqdagi elektronlar bog‘lanish energiyasi (yoki ionlashtirish 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 (1.50) ifodani umumiy holda quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$T_e = E - E_{K,L,M,\dots}, \quad (1.51)$$

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 1.12-rasm^{da} tasvirlangan.



1.12-rasm. Ichki konversiya jarayonining Feynman diagrammasi.

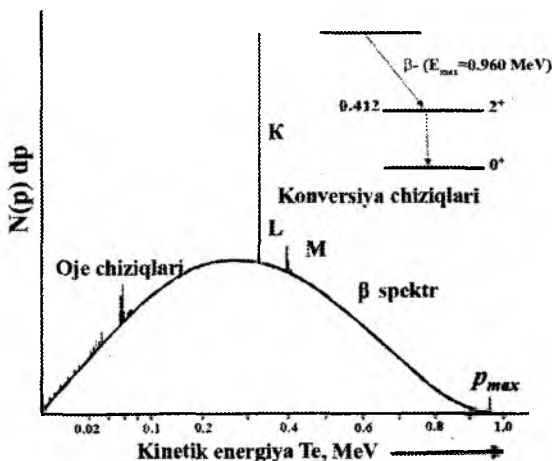
Konversiya elektronlari yadrodan g-kvant chiqishi yoki chiqmasligiga bog'liq bo'lmay kuzatiladi. Ichki konversiya jarayoni xarakteristik rentgen nurlanishi yoki Oje-elektronlarining chiqishi bilan kuzatiladi. Ichki konversiya natijasida atom qobig'idan elektron chiqib ketsa, chiqqan elektronning o'rniga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

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

1.13-rasm^{da} namunadan chiqayotgan beta-spektri berilgan va ushbu rasm^{da} ^{198}Hg yadrosidagi 412 keV energiyali yadro o'tishlar uchun ichki konversiya elektronlarning energetik spektri keltirilgan bo'lib, bunda uluksiz beta-spektr^{da} konversion elektronlarga mos keladigan chiziqlar yaqqol ko'rinib turibdi.

Shuningdek, bu yer^{da} konversiya jarayoni sodir bo'layotgan elektron qobiqlar ham keltirilgan (K, L, M qobiqlar).

Gamma-nurlanish va ichki konversiya o'rtasidagi raqobat to'la ichki konversiya koeffitsienti b bilan tavsiflanadi. To'la ichki konversiya



1.13-rasm. Konversiya spektri ^{198}Hg atom qobiq energiyalari farqiga ko'ra to'g'ri keluvchi bir necha monoxromatik spektrlar.

koefitsienti deb ichki konversiya elektronlar sonining (N_e) gamma-kvantlar soniga (N_γ) nisbatiga aytiladi:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (1.52)$$

Bu koefitsientni quyidagi ko‘rinishda ham yozish mumkin:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \dots \quad (1.53)$$

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 koefitsientlari deb ataladi.

Konversiya jarayoni quyidagi qonuniyatlarga bo‘ysunadi:

- o‘tish energiyasi oshishi bilan konversiya koefitsienti kamayadi, ya’ni konversiya ehtimolligi kamayadi;

- o‘tish multipolligi oshishi bilan konversiya koefitsienti oshadi;

- Atom nomeri Z oshishi bilan konversiya koefitsienti oshadi;

Ichki konversiya hodisasini o‘rganish yadro sathlarining turli xarakteristikalarini (konversion elektronlar energiyasi bo‘yicha energiyalarni, konversiya koefitsientlari 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 hodidasidan tashqari pozitron chiqarish yo‘li bilan ham o‘tishi mumkin. So‘ngra pozitron atomdagi elektron bilan to‘qnashib annigilyatsiya jarayonini sodir etadi. Agar o‘tish energiyasi $\Delta E \geq 1,02 \text{ MeV}$ bo‘lsa mazkur jarayon sodir bo‘ladi. Ammo bu mexanizmning ehtimolligi gamma-kvant nurlanish ehtimolligining 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 yutilishining yadroviy analogiyasi hisoblanadi.

Yadrodan chiqqan gamma-kvanti yadroning E uyg'otish energiyasining hammasini olib ketmaydi. Bu energiyaning bir qismi yadroning T_{yad} tepki energiyasiga sarflanadi:

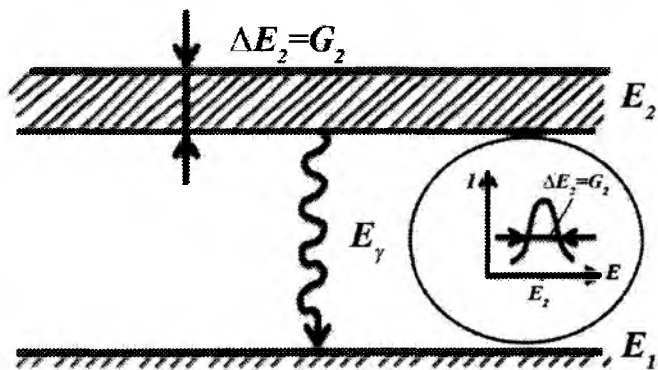
$$E_{chikan} = (E - T_{yad}) < E \quad (1.54)$$

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

$$E_{yutil} = (E + T_{yad}) > E \quad (1.55)$$

sababi, energiya va impuls saqlanish qonuniga asosan gamma-kvant energiyasining bir qismi yadroning harakatlanish energiyasiga sarf bo'ladi. Natijada chiqarilgan va yutilgan gamma-kvant energiyasi $2T_{yad}$ (teпки yadro energiyasi orqali ifodalangan) 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. *1.14-rasm*da energetik sath va chiziqning tabiiy kengliklari keltirilgan. Tabiiy kenglik noaniqlik munosabati orqali aniqlanadi.



1.14-rasm. Uyg'ongan holat sathi va chizig'ining tabiiy kengliklari.

Rezonans yutilish shartini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$G > 2T_{yad} \quad (1.56)$$

bu yerda

$$G = \frac{\hbar}{\tau} \quad (1.57)$$

G – energetik sathning tabiiy kengligi, f – uyg‘ongan holatdagi yadroning yashash vaqti.

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

Misol tariqasida 129 keV energiyali uyg‘ongan holatga va $f \approx 10^{-10}$ s o‘rtacha yashash vaqtiga ega bo‘lgan ^{191}Ir yadrosini olamiz. (1.57) formula bo‘yicha mazkur energetik sathning kengligini aniqlaymiz:

$$G = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{0,66 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot c}{10^{-10} c} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \quad (1.58)$$

Yadro olgan tepki energiyasi (1.59) formula bo‘yicha aniqlanadi:

$$T_{yad} = \frac{E^2}{2M_{yad}c^2} = 0,047 \text{ eV} \quad (1.59)$$

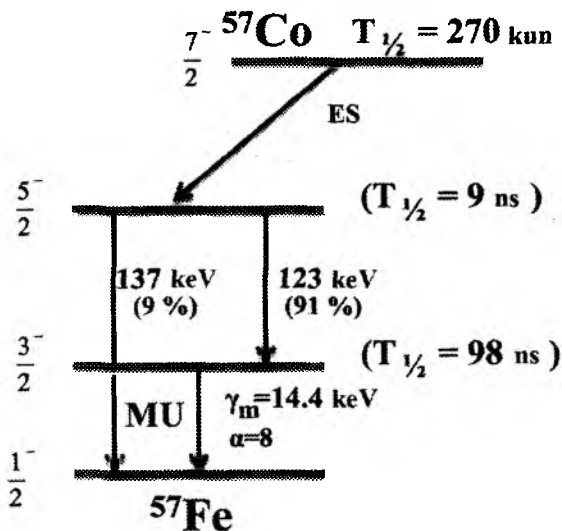
Bu hisoblashlarni $^{57}_{26}\text{Fe}$ yadrosi uchun ham ko‘rib chiqamiz. $^{57}_{26}\text{Fe}$ yadrosi $^{57}_{25}\text{Co}$ yadrosining b-parchalanishi natijasida uyg‘ongan holatda hosil bo‘ladi (1.15-rasm).

Uning gamma-kvantining energiyasi $Y_e = 14,4 \text{ keV}$ va yashash vaqti $f = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ energetik sathning kengligini (1.57) formula bo‘yicha aniqlaymiz:

$$G = \frac{\hbar}{\tau} \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ eV} . \quad (1.60)$$

Yadro olgan tepki energiyasi:

$$T_{Yad} = \frac{E^2}{2M_{Yad}c^2} = 0,002 \text{ eV} . \quad (1.61)$$



1.15-rasm. ${}^{57}\text{So}$ radionuklidining parchalanish sxemasi.
MD – Myossbauer o'tishi.

Demak, keltirilgan ikkita misolda ham yadroning tepki energiyasi nurlanish chizig'ining tabiiy kengligidan ancha katta ekan. Boshqacha 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'tishlarning energiyasi yadro o'tishlariga nisbatan 10^4 marta kichik va (1.56) shart optik yutishlar uchun o'rinli bo'ladi. Agar tepki energiyasi qiymatini chiziqning tabiiy kengligi kattaligigacha kamaytirishga erishilsa, unda gamma-kvant energiyasini quyidagi nisbiy aniqlik bilan o'lchash mumkin bo'lar edi:

$$\frac{G}{E_\gamma} = \frac{\hbar}{E_\gamma \tau} \approx 10^{-12} - 10^{-14} \quad (1.62)$$

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 ener-

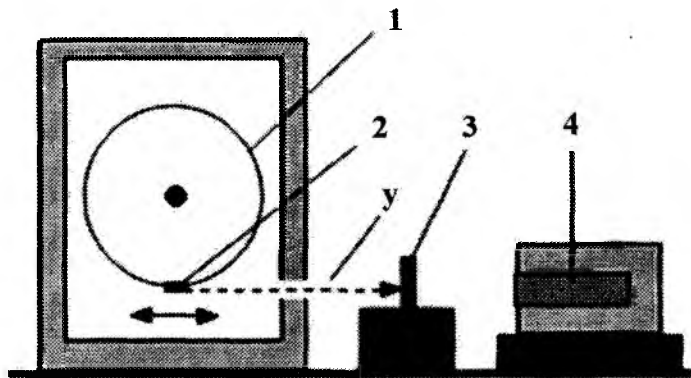
giyasini oshiradi. Bitta yadroning *g*-kvant chiqarishi yoki yutishi natijasida kristalldagi atomlar katta jamoasining tartibli tebranishi yuzaga kelishi kichik ehtimolikka ega bo'lsa kerak. Ammo harorat kamaytirilsa, alohida atomlarning tebranishlari eksponensial kamayadi. Bunda kristalldagi alohida bitta atomning ega bo'lishi mumkin bo'lgan tebranma kinetik energiyasi (1.62) ifodadagi tepki energiyasidan kichik bo'ladi. Endi katta miqdordagi atomlar ($\sim 10^8$ ch 10^0) birdamlik bilan (muvofiq-lashtirilgan) yagona bir butun tizim bo'lib tebranish imkoniyatiga ega bo'ladi. 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'tiborga olmasa ham bo'ladigan darajada kichikdir. Ushbu holda kristallga berilgan tepki energiya juda kichik bo'ladi, nurlanayotgan va yutilayotgan gamma-kvant energiyasi o'zgarmaydi. Kristall oladigan tepki energiyasini baholaymiz:

$$R = \frac{P_{ya}^2}{2 \cdot 10^8 M_{ya}} = \frac{T_{ya}}{10^8} \approx 5 \cdot 10^{-10} eV \quad (1.63)$$

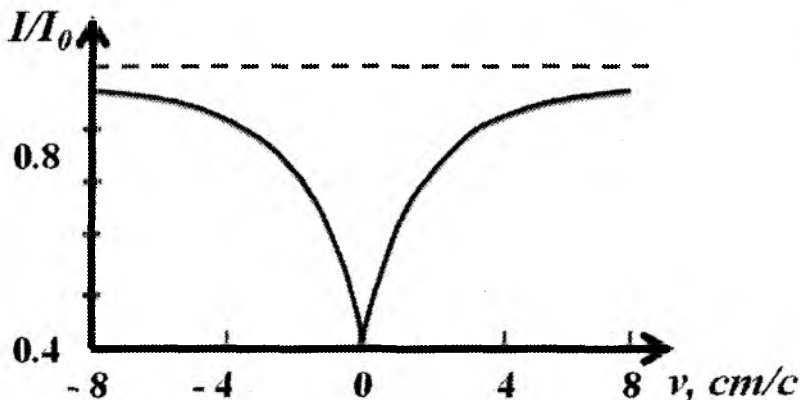
bu yerda p_{ya} , M_{ya} va T_{ya} – mos holda «teпки» olgan yadro impulsi, massasi va kinetik energiyasi. Bu yerdan ko'rinadiki, chiqayotgan va yutilayotgan gamma-kvantlarning energiyasi teng bo'ladi, ya'ni rezonans hodisasi kuzatiladi. Myossbauer manba va yutgichni suyuq azot haroratigacha sovutib, birinchi marta gamma-kvantlarning chiqishi va yutilishlarini tepkisiz kuzatgan va gamma-kvantlar energiyasini nihoyatda yuqori aniqlikda o'lchash imkoniyati mavjudligini isbotlagan. Keyinchalik, Myossbauer effektini ^{57}Fe ($E_\gamma = 14,4$ keV, $\tau = 1,4 \cdot 10^{-7}$ s) va ^{110}Sn ($E_\gamma = 23,9$ keV, $f = 2,8 \cdot 10^{-8}$ s) yadrolardagi kichik energiyali gamma-o'tishlar uchun xona haroratida ham kuzatish mumkinligi aniqlandi. Hozirgi vaqtda bu effekt yadro fizikasi va qattiq jismlar fizikasi masalalarida ham tez-tez qo'llanilmoqda.

Gamma-kvantlarning rezonans yutilishi bo'yicha tajriba sxemasi *1.16-rasm*da keltirilgan: 2 – gamma-nurlanish manbai, 3 – yutgich va 4 – bitta chiziq bo'ylab joylashgan gamma detektor. Manba qanday yadrolardan tashkil topgan bo'lsa, yutgich ham shunday yadrolardan 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 yaqinlashib va uzoqlashib turadi. Bunda Doppler effekti hisobiga gamma-kvantining chastotasi o'zgaradi. Yutilish qiymatining o'zgarish effektini kuzatish uchun manba va yutgichlarni bir-biriga nisbatan bir necha mm/s tezlik bilan siljitish yetarli ekan. Myossbauer tajribasida olingan yutilish egri chizig'i 1.17-rasmda keltirilgan.



1.16-rasm. Myossbauer tajribasi.



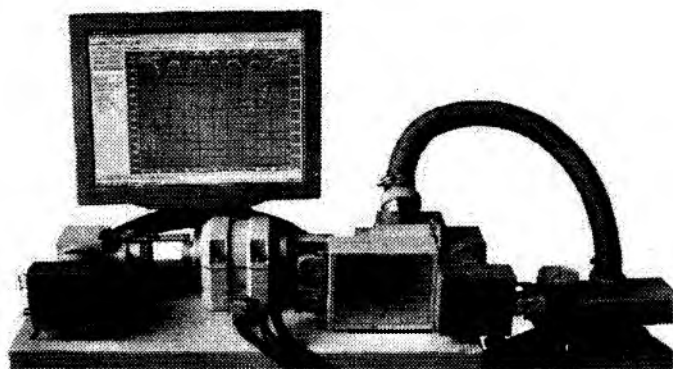
1.17-rasm. Myossbauer tajribasida olingan yutilish egri chizig'i.

Myossbauer effekti asosida Myossbauer spektroskopiyasi deb nomlanuvchi yangi yo'nalish vujudga keldi. Bunda radioaktiv manbadan chiqqan monoxromatik gamma-nurlanishlarni yutgichda rezonans yutilishi sodir bo'ladi. Absorbsion Myossbauer spektroskopiyasida (metodning ko'p qo'llaniladigan turlaridan biri) namuna gamma-kvantlar bilan «yoritiladi», ya'ni nurlantiriladi. Gamma-nurlanishlar manbai sifatida temir-57, iridiy-191 va boshqa Myossbauer radioizotoplari qo'llaniladi. Namunadan keyin detektor joylashtiriladi. Bu detektor yordamida gamma-kvantlarning namunadagi yutilish koeffitsientlari aniqlanadi. Namuna ham xuddi shunday (^{57}Fe , ^{191}Ir va h.k.) yadrolardan tashkil topgan bo'lishi lozim.

1.18-rasmda MS1104Yem turdagi ekspress Myossbauer spektrometri keltirilgan. Ushbu spektrometr xona haroratidan 85 K gacha bo'lgan haroratlarda transmission va emission Myossbauer o'lchashlarni amalga oshirish uchun mo'ljallangan.

Hozirgi kunda yadroviy gamma-rezonans metodi fizikaviy materialshunoslik, geologiya, kimyo va biologiyada keng qo'llanilmoqda.

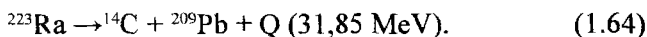
Masalan biologiyada oqsil tarkibida temir moddasi mavjud bo'lgan guruhlarning xususiyatlarini tahlil qilishda keng qo'llaniladi. Bu metodning katta taassurot qoldiradigan qo'llanilishi, 1960-yilda Paund va Rebkilar tomonidan o'tkazilgan tajriba hisoblanadi. Bu tajribada laboratoriya sharoitida umumiy nisbiylik nazariyasida aytib o'tilgan gamma-kvantlarning gravitatsion siljishi o'lchangan.



1.18-rasm. MS-1104Yem turdagi Myossbauer spektrometri.

1.8-§. Klaster radioaktivlik

Radioaktiv yadro tomonidan b-zarra chiqarish hodisasi bizga yaxshi ma'lum. Radioaktiv yadro o'z-o'zidan geliy atom yadrosidan farqli qandaydir boshqa atom yadrosini chiqarishi mumkinmi? Bu savolga ijobiy javob 1984-yilda berildi. Bir-biridan mustaqil holda ilmiy tadqiqot olib boragan Angliyadagi va Rossiyadagi ikki guruh olimlar ^{223}Ra izotopining radioaktiv parchalanishda ^{14}C yadrosi uchib chiqishini kuzatishgan, ya'ni:



Bu turdagi parchalanishlarga klaster parchalanishlar, yoki klaster radioaktivlik deb nom berildi. Klaster radioaktivlik – yadrolarning o'z-o'zidan b-zarraga nisbatan og'irroq bo'lgan yadro fragmentlari (klasterlar) chiqarish hodisasidir. 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 energiya ruxsat etilgan. Ammo ko'pchilik hollarda bunday jarayonlarning ehtimolliklari 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 natijasida 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 potensial to'siqning balandligidan sezilarli darajada kichik bo'ladi. Shunday qilib, klaster parchalanish ham alfa-parchalanish kabi klassik fizikadagi potensial 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 sponton bo'linishi orasidagi oraliq jarayon sifatida ham qarash mumkin.

Klaster parchalanishlarni ularning birlamchi yadro asosiy parchalanish turiga nisbatan parchalanish ehtimolliklari *1.1-jadval*da keltirilgan.

*Klaster parchalanishlarni ularning birlamchi yadro asosiy
parchalanishga nisbatan ehtimolligi.*

Birlam- chi yadro	Uchib chiqayot- gan klasterlar	Q, MeV	L_s / L_b	$T_{1/2}$, 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	$(3,7\text{yo}0,6) \cdot 10^{-10}$ $(3,1\text{yo}1,0) \cdot 10^{-10}$ $3,07 \cdot 10^{-10}$	
^{223}Ra	^{14}C	31,85	$8,5 \cdot 10^{-10}$ $(8,5 \text{ yo } 2,5) \cdot 10^{-10}$ $(7,6 \text{ yo } 3,0) \cdot 10^{-10}$ $(5,5 \text{ yo } 2,0) \cdot 10^{-10}$	
^{224}Ra	^{14}C	30,54	$6,1 \cdot 10^{-10}$ $(4,3 \text{ yo } 1,2) \cdot 10^{-11}$	$(2,3 \text{ yo } 0,6) \cdot 10^8$
^{226}Ra	^{14}C	28,21	$2,9 \cdot 10^{-11}$ $(3,2\text{yo}1,6) \cdot 10^{-11}$ $(2,9\text{yo}1,0) \cdot 10^{-11}$	
^{225}Ac	^{14}C	30,47	$6 \cdot 10^{-12}$ $< 4 \cdot 10^{-13}$	$> 7 \cdot 10^{10}$
^{228}Th	^{20}O Ne	—	$1 \cdot 0^{-13}$?	—
^{230}Th	^{24}Ne	57,78	$5,6 \cdot 10^{-13}$ $(5,6\text{yo}1,0) \cdot 10^{-13}$	$(1,3 \text{ yo } 0,3) \cdot 10^{17}$
^{231}Pa	^{23}F ^{24}Ne	51,84 —	$< 4 \cdot 10^{-14}$ $9,97 \cdot 10^{-15}$ $1,34 \cdot 10^{-11}$	$> 8 \cdot 10^{17}$
^{232}U	^{24}Ne ^{28}Mg	62,31	$(2,0 \text{ yo } 0,5) \cdot 10^{-12}$ $2 \cdot 10^{-12}$ $1,18 \cdot 10^{-13}$	$(3,4 \text{ yo } 0,8) \cdot 10^{13}$
^{233}U	^{24}Ne ^{25}Ne ^{28}Mg	60,50 60,85	$(7,5 + 2,5) \cdot 10^{-13}$ $(5,3 + 2,3) \cdot 10^{-13}$ $1,3 \cdot 10^{-15}$	

^{234}U	^{28}Mg	74,13	$1 \cdot 10^{-13}$ (1,4 yo 0,2) $\cdot 10^{-13}$	
	^{24}Ne	58,84	$9 \cdot 10^{-14}$	
	^{26}Ne	59,47	$<4 \cdot 10^{-12}$	
^{235}U	^{24}Ne		$8 \cdot 10^{-12}$	$>9 \cdot 10^{20}$
	^{25}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		
	^{30}Mg	72,20	$2 \cdot 10^{-13}$	
^{236}Pu	^{28}Mg	79,67	$2 \cdot 10^{-14}$	$\sim 1,5 \cdot 10^{14}$
^{238}Pu	^{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	90,95	$<1,3 \cdot 10^{-13}$ $6 \cdot 10^{-15}$	$>5 \cdot 10^{16}$
^{237}Np	^{30}Mg	75,02	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$>5 \cdot 10^{19}$
^{241}Am	^{34}Si	93,84	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$>9 \cdot 10^{16}$

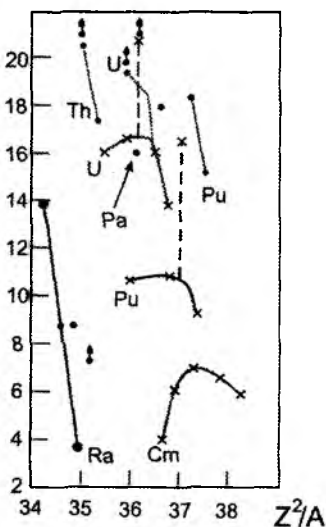
Og'ir yadrolar sohasida asosiy parchalanish turi alfa-parchalanish hisoblanadi. Shu sababli, bu jadvalda tajribada kuzatiladigan klaster parchalanishlar alfa-parchalanishga qiyoslashtirilgan. Bu jadvalda birlamchi yadro, uchib chiqayotgan klasterlar, parchalanish energiyasi Q , klaster chiqish ehtimolligining alfa-zarra chiqish ehtimolligiga nisbati L_s/L_b , klaster nisbiy chiqishning yarim parchalanish davrlari keltirilgan. Bu jadvalning tahlili shuni ko'rsatadiki, ba'zi bir yadrolarda neytronlarning katta miqdorda ortiqcha bo'lishi neytronga boy bo'lgan yengil nuklidlarning emissiyasiga (chiqishiga) imkon beradi.

Atom yadrosidan uchib chiqqan ^{14}C yadrosi, yarim o'tkazgichli detektorlarning DYE-Ye teleskopida qayd qilingan. ^{14}C yadro uchib chiqish ehtimolligi, b-zarrani chiqish ehtimolligiga nisbati $L_s/L_b = (8,5\text{yo}2,5) \cdot 10^{-10}$ teng ekanligi aniqlandi.

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

Agar klaster parchalanish natijasida ikki marta sehrli ^{208}Pb izotopiga yaqin izotop hosil bo'lsa, energiya bo'yicha maksimal ustunlik ega bo'ladi. Bunda klasterning potensial 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 b-zarra chiqish ehtimoligiga nisbati $\sim 10^{-10} - 10^{-13}$ intervalda joylashgan. Ammo ayrim hollarda, masalan $^{28,30}\text{Mg}$ izotoplarining chiqish ehtimolliklari 10^{-17} gacha tushishi mumkin.



1.19-rasm. Klaster radioaktivlik (nuqtalar) va spontan bo'linish (krestik) holla ridayarim parchalanish logarifmining Z^2/A bo'linish parametriga bog'lanishi.

Klaster radioaktivlik tabiatini tushunish uchun ushbu hodisani, b-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 potensial to'siq usti yoki atrofida bo'lar ekan. Bir necha izotoplar uchun yarim parchalanish davri logarifmining bo'linish parametriga Z^2/A bog'lanishi 1.19-rasmida 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 davrining kamayishi yangi transuran elementlarni sintez qilishga ma'lum chegara qo'yadi.

1.19-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.

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

1. b-parchalanish to'siq osti jarayoni.

2. Dastlabki(yoki boshlang'ich) yadro b-zarra va ikkilamchi yadroga parchalanganda, ikkilamchi yadro asosiy yoki kuchsiz uyg'ongan holatda hosil bo'ladi.

3. b-parchalanish natijasida yadroda katta o'zgarishlar sodir bo'lmaydi.

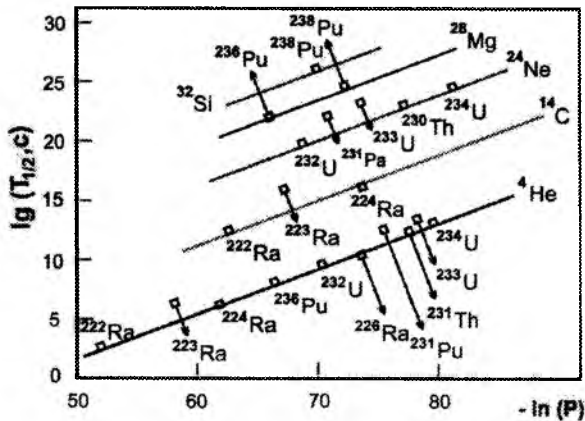
Klaster parchalanish doimiysi I , yarim parchalanish davri $T_{1/2}$ vaqt birligida yadro sirtida klaster hosil bo'lish ehtimolligi w va D potensial to'siqdan o'tish ehtimolliklari orqali aniqlanadi:

$$I = \ln 2 / T_{1/2} = wD \quad (1.65)$$

Klaster radioaktivlik parsial yarim parchalanish davrining Kulon potensial to'sig'i shaffofligi (to'siqdan o'tish ehtimolligi) logarifmiga bog'lanishi **1.20-rasmda** keltirilgan. Bu yerda solishtirish uchun b-parchalanishga oid bog'lanish ham keltirilgan.

Rasmdan ko'rinadiki, hamma hollardagi klasterlar va b-parchalanishda chiziqli bog'lanishlar kuzatiladi.

Alfa-parchalanish va spontan bo'linish jarayonlarini o'rganish shuni ko'rsatdiki, ikkala holda ham hal qiluvchi omil bo'lib, b-zarra yoki og'irroq klasterlarning potensial to'siqdan o'tishi hisoblanadi. Keltirilgan dalillar shuni ko'rsatadiki, klaster parchalanishlar ko'proq b-parchalanish hodisasiga o'xshash ekan.



1.20-rasm. Klaster radioaktivlik parsial yarim parchalanish davrining Kulon potensial to'sig'i shaffofligi (to'siqdan o'tish ehtimolligi) logarifmiga bog'lanishi.

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

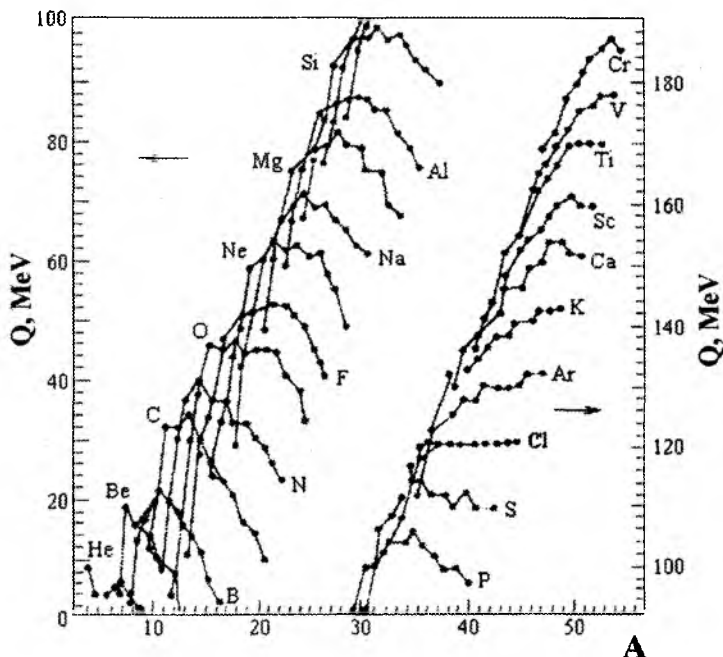
$$E = Q(F_1/F) \quad (1.66)$$

bu yerda Q – klaster parchalanish energiyasi, F_1 – dastlabki (yoki birlamchi) yadro massasi, F – ikkilamchi yoki parchalanishdan keyin hosil bo'lgan yadro massasi. Chiqayotgan klasterlarning massasi oshishi bilan (1.66) ba'zi bir chetlanishlar og'irroq klasterlar chiqarishida b-parchalanish mexanizimidan uzoq davom etuvchi mexanizmga o'tishidan dalolat beradi. Shunday qilib, ushbu holda ham b-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:

$$Q = [M(A) - M(A_1) - M(A_2)]c^2. \quad (1.67)$$

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 sonlari-

ning 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 yengil fragmentlar osti qobiqlari bilan bog'langan. Bu bog'lanish *1.21-rasm*da aniq ko'rinib turibdi.



1.21-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 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 sehri sonli fragmentlarga to'g'ri keladi. $A_1 = 208$ ($Z_1 = 82$, $N_1 = 126$) va $A_2 = 14, 24, 28, 34$ ($N_2 = 8, 14, 20$) yadrolar eng katta chiqishlarga ega.

Klaster parchalanishlarni nazariy tushuntirish uchun turli modellar taklif etilgan. Ushbu modellar yordamida keyingi va hali kashf etilmagan klaster parchalanishlar oldindan bashorat qilinmoqda.

Tajribalar shuni ko'rsatdiki, ushbu modellar bilan hisoblangan klaster parchalanish parametrlari tajriba natijalari bilan juda mos tushar ekan.

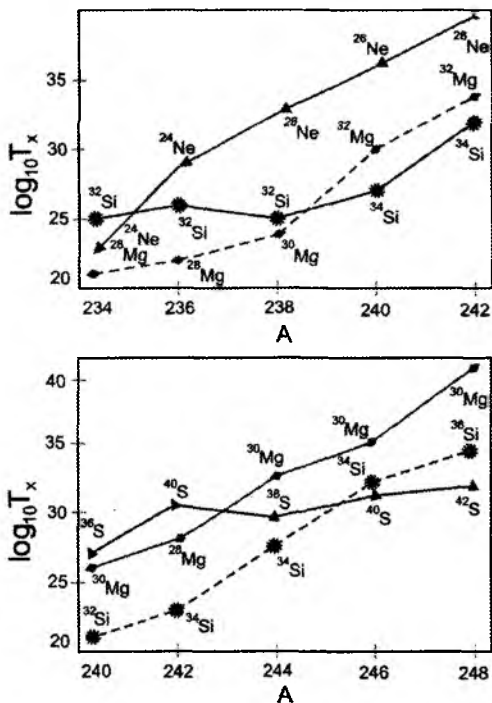
Klaster parchalanish modellaridan eng oxirgilaridan biri yordamida hisoblangan yarim parchalanishlar davri **1.2-jadval**da keltirilgan. Shuningdek, bu jadvalda tajribada olingan natijalar ham solishtirish uchun alohida ustunda keltirilgan.

1.2-jadval.

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

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

Ushbu model Birlashgan yadro tadqiqotlar instituti (Rossiya) xodimlari G.G. Adamyani, S.R. Kuklin va N.V. Antonenko tamonidan taklif etilgan. Mazkur model asosida hisoblangan yarim parchalanish davrining dastlabki (birlamchi) yadro massa soniga bog'lanishi **1.22-rasm**da keltirilgan.

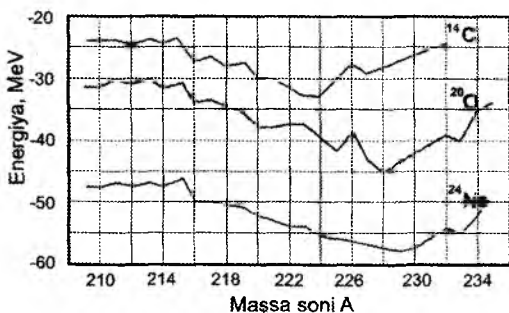


1.22-rasm. Hisoblangan yarim parchalanish davrining dastlabki(birlamchi) yadro massa soniga bog'lanishi. Bu yerda neon (qora uchburchak), magniy (qora romb) va kremniy (yulduzcha) klasterlarining plutoniydan (yuqori grafik), va magniy, kremniy va oltingugurt (yorug' uchburchaklar) klasterlarining kyuriydan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

Bu yerda neon, magniy va kremniy klasterlarining plutoniydan (yuqori grafik), magniy, kremniy va oltingugurt klasterlarining kyuriydan (pastki grafik) chiqishi uchun bog'lanish keltirilgan.

1.2-jadvalda klaster radioaktivlik uchun tajribada o'lgan yarim parchalanish davri bilan nazariy hisoblangan yarim parchalanish davrlari solishtirilgan.

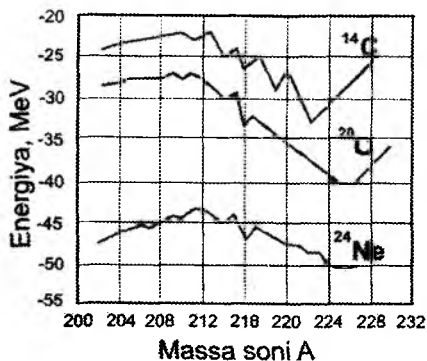
Bu yerdan ko'rinadiki, mazkur model asosida bajarilgan hisoblashlar tajribada olingan ma'lumotlari bilan qoniqarli darajada mos tushar ekan.



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

Bitta element izotoplaridan klasterlarning chiqishi, massa soni A ga qanday bog'liq bo'lishini **1.23** va **1.24-rasmlardan** ko'rish mumkin

1.23-rasmda toriy ${}_{90}\text{Th}$ ($A = 209\text{--}234$) izotoplaridan ${}^{14}\text{C}$, ${}^{20}\text{O}$, ${}^{24}\text{Ne}$ klasterlarni ajratish energiyasining massa soniga bog'lanishi keltirilgan. Ushbu energiya ${}^{14}\text{C}$, ${}^{20}\text{O}$, ${}^{24}\text{Ne}$ klasterlar uchun massa soni oshishi bilan kamayib boradi va ma'lum nuqtadan keyin yana ortishi kuzatiladi (**1.23-rasm**). Bu nuqta yengilroq klasterlar uchun kichik massa sonlarida kuzatiladi. Klasterlar og'irlashgan sayin bu nuqta massa sonining katta qiymatlariga to'g'ri keladi. Bu holatni **1.24-rasm**da ham kuzatish mumkin. Bu rasmda radiy ${}_{88}\text{Ra}$ ($A=202\text{--}230$) izotoplaridan ${}^{14}\text{C}$, ${}^{20}\text{O}$, ${}^{24}\text{Ne}$ klasterlarni ajratish energiyasining massa soniga bog'lanishi ko'satilgan.



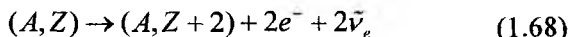
1.24-rasm. Radiy ${}_{88}\text{Ra}$ ($A = 202\text{--}230$) izotoplaridan ${}^{14}\text{C}$, ${}^{20}\text{O}$, ${}^{24}\text{Ne}$ klasterlarni ajratish energiyasini massa soniga bog'lanishi.

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 $2b^-$ va bb^- parchalanishlar ko'rinishlarida beriladi.

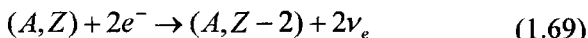
Qo'shaloq b^- -parchalanishda (A, Z) atom yadrosi ikkita elektron va ikkita antineytrino yoki ikkita pozitron va ikkita neytrino chiqaradi. Buning natijasida izobar yadro hosil bo'ladi va uning elektr zaryadi ikki birlikka oshadi yoki kamayadi.

Qo'shaloq $2b^-$ -parchalanishda yadroning zaryadi ikki birlikka oshadi va ikkita elektron chiqishi sodir bo'ladi:

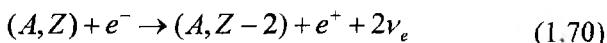


$2b^-$ -parchalanishning boshqa bir turida esa yadro zaryadi ikki birlikka kamayadi.

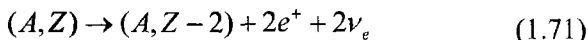
Bulardan tashqari qo'shaloq elektron qamrash ($2e^-$ qamrash) mavjud, ya'ni:



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



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

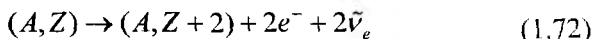


Qo'shaloq beta-parchalanishlar barcha radioaktiv jarayonlar ichida eng kam uchraydigan turi hisoblanadi. Hozirgi kunda 11 ta nuklidda mazkur jarayon yuqori ishonchlikda kuzatilgan bo'lib, ularning yarim parchalanish davri $7 \cdot 10^{18}$ yildan ortiq, ^{128}Te izotopining yarim parchalanish davri $(3,5 \text{ yo } 2,0) \cdot 10^{24}$ yilni tashkil qilib, bu bugungi kunda hamma radioaktiv izotoplar ichida mutloq rekord hisoblanadi.

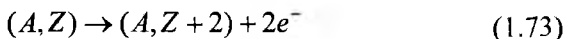
Shuni ham ta'kidlab o'tish kerakki, tasdiqlangan kuzatishlar fa-

qat *2b-parchalanishga* taalluqlidir. Qo'shaloq qamrashlar faqat bariy-130 izotopida kuzatilgan va uning yarim parchalanish davri $(2,2 \text{ yo } 0,5) \cdot 10^{24}$ 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:



Ikinchisi esa ekzotik bo'lib, bunda neytrino hosil bo'lmaydi va neytrinosiz parchalanish deyiladi:



Hozirgi davrda faqat ikki neytrinoli qo'shaloq beta-parchalanish mavjudligi aniqlangan. Neytrinosiz parchalanish esa aniqlanmagan.

Qo'shaloq beta-parchalanish yuz berayotgan radionuklidlar juda katta yarim parchalanish davriga ega bo'ladi deb aytilgan edi va bu tajribalarda tasdiqlandi.

Qo'shaloq beta-parchalanishlarni o'rganish orqali neytrino tinchlikdagi massaga egami yoki yo'qmi degan savolga ham javob berish mumkin. Bu faktor koinotning kelajakdagi kosmologik tadqiqotlarida ham muhim ahamiyatga egadir.

1.10-§. Neytron radioaktivlik

Bizga ma'lum bo'lgan N-Z diagrammaning o'ng tomonida turg'un yadrolardan keyin neytronga boy (neytronlar soni ortiq) bo'lgan yadrolar joylashgan. Ushbu soha hozirgi kunda yetarlicha o'rganilmagan. Yadro modeli tomonidan oldindan aytilgan (bashorat qilingan) mavjud bo'lishi mumkin bo'lgan 3 mingta yadro aynan ushbu sohada joylashgan bo'lib, hozirgi kunda bu yadrolar topilmagan.

Neytron radioaktivlik chegarasida joylashgan neytronga boy yengil yadrolarda (neutron dripline) (A, Z) yadroning asosiy holatidan neytronning chiqishi kuzatiladi. Bunda massa soni A birga kamayadi, yadro zaryadi esa o'zgarmaydi:

$$(A, Z) \rightarrow (A-1, Z) + n \quad (1.74)$$

Hozirgi kunda aniqlangan neytron radioaktiv yadrolar soni ~20 ta.

Neytron radioaktivlikka ega bo'lgan yengil yadrolarning og'ir izotoplari topilmoqda. Masalan, $Z=1$ (${}^4,5,6\text{H}$) va $Z=2$ (${}^{5,7,9,10}\text{He}$) bo'lgan yengil yadrolarda. Neytron radioaktivlik $Z=16$ gacha bo'lgan yadrolarda kuzatiladi. Yengil yadrolarning og'ir izotoplari, ya'ni ${}^{26}\text{O}$, ${}^{33}\text{Ne}$, ${}^{36}\text{Na}$, ${}^{39}\text{Mg}$ va ${}^{49}\text{S}$ izotoplar neytron nurlatgichlar hisoblanadi.

Yadrodagi neytronlar sonining ortishi bilan neytronlar chiqarish ehtimolliklari oshishiga simmetriya energiyasining oshishi sabab bo'ladi. Simmetriya energiyasi quyidagiga teng:

$$E_{\text{simm}} = 23,6(A-2Z)^2/A \quad (1.75)$$

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

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

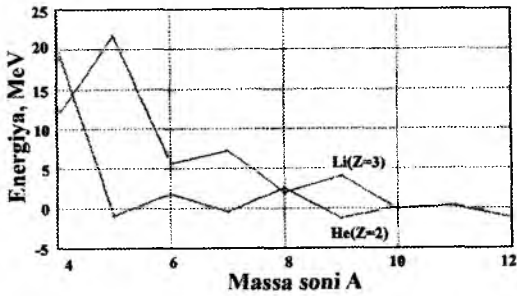
Atom yadrolarining neytronlar chiqarib parchalanishida birlamchi yadroning konfiguratsiyasi kuchli o'zgarishi mumkin. Bu o'z navbatida radioaktiv yadrolarning yashash vaqtining oshishiga olib keladi.

Yadro asosiy holatidan neytron chiqarishi $Z > 8$ bo'lgan quyidagi neytronga boy bo'lgan izotoplarda kuzatilgan: ${}^{28}\text{F}$, ${}^{33}\text{Ne}$, ${}^{36}\text{Na}$, ${}^{39}\text{Mg}$, ${}^{49}\text{S}$. Bu izotoplarning hammasi toq sonli neytronlarga ega. *1.25-1.28-rasm-larda* neytron radioaktivligi aniqlangan kimyoviy elementlar ($Z = 4\text{ch}16$) uchun hisoblab topilgan neytronlar ajratib olish energiyasining massa soniga bog'lanishlari keltirilgan.

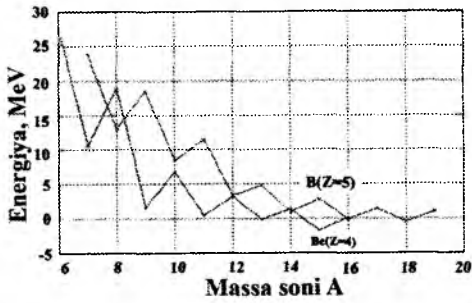
Neytronlar nurlanuvchi izotoplarining mavjudlik chegarasi.

Kimyoviy elementlar tartib raqami	Kimyoviy element simboli	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

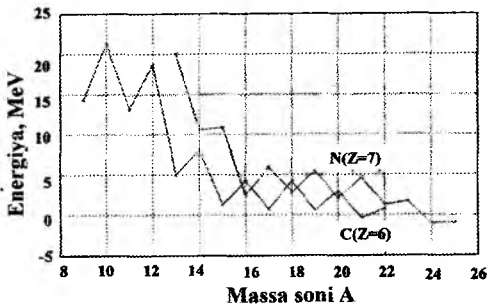
Radioaktiv parchalanish sodir bo'layotgan izotoplarining massa soni oshishi bilan ulardan neytronlar ajratish energiyasi ham kamaya boradi. Buni *1.25-1.29-rasmlarda* keltirilgan bog'lanishlarda ham kuzatish mumkin. Bu kamayish qonuniyati element tartib raqami yoki yadrodagi protonlar soni oshishi bilan yaqqol namoyon bo'ladi. Ya'ni bu yerda kamayish eksponensial qonunga yaqin qonun bo'yicha kamaya boradi.



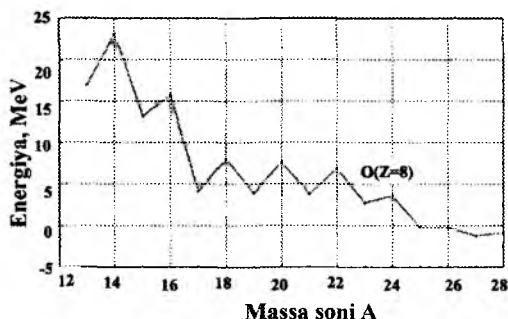
1.25-rasm. He ($Z = 2$) va Li ($Z = 3$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



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

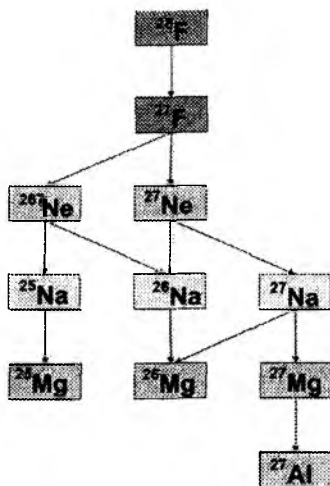


1.27-rasm. C ($Z = 6$) va N ($Z = 7$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.



1.28-rasm. O ($Z = 8$) izotoplarida neytronni ajratish energiyasi.

Neytron radioaktivlikka misol sifatida ^{28}F izotopning parchalanishi sxemasi 1.29-rasmida 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 parchalanishi natijasida hosil bo'lgan izotoplar ham neytronlarga boy bo'lgani uchun ularning asosiy parchalanish kanali bu σ -parchalanishdir. ^{27}F , ^{26}Ne , ^{27}Na izotoplar kechikkan neytronlar chiqarib parchalanadilar.



1.29-rasm. ^{28}F izotopining parchalanishi.

1.11-§. Radioaktiv parchalanish jarayonlarining sinflarga bo'linishi

Hozirgi kunda ma'lum bo'lgan radioaktiv parchalanish jarayonlari sinflarga 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 yengil atom yadrolari chiqishi bilan sodir bo'ladigan parchalanishlar</i>		
b-parchalanish	Yadrodan chiqqan b-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 b-zarradan katta, ammo birlamchi yadrodan kichik bo'lgan yadro	(A-A1, Z-Z1) + (A1,Z1)
<i>Beta parchalanish turlari</i>		
b ⁻ - parchalanish	Yadro elektron va antineytrino chiqaradi	(A, Z+1)
b ⁺ - 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 b - 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

Insoniyat o'z hayoti davomida radioaktiv fon nurlanishlar maydoni ichida yashaydi.

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'lmasdan Quyosh sistemasi vujudga kelgan vaqtda paydo bo'lgan bo'lib, uni asosan tabiatda sochilgan uran-toriy oilasi va tabiiy radionuklidlar 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 yetib keladi.

Kosmik yoki kosmik radiatsion nurlanishlar Galaktikada va Quyoshda sodir bo'layotgan portlashlar natijasida hosil bo'ladi. Koinotdan Yerga kelayotgan zaryadlangan zarrachalar oqimi, odat-da, birlamchi koinot nurlanishlari deyiladi. Birlamchi koinot nurlanishlari asosan protonlar (~90%), b-zarralar (geliy atomining yadrosi) va tartib raqami 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 Yer sirtigacha bo'lgan oraliqda sodir 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.

Gamma va rentgen nurlari yumshoq va qattiq tashkil etuvchilarga bo'linadi. Kosmik nurlanishlarning 10 sm qalinlikdagi qo'rg'oshinda deyarli yutiladigan qismiga yumshoq, yutilmasdan o'tgan qismiga esa qattiq komponentlar deyiladi. 1,25 MeV energiyada intensivlik $K=500$ marta kamayadi. 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 moddada kuchli yutiluvchi zarralar-elektronlar va gamma-kvantlardan, qattiq komponenti esa, asosan relativistik myuonlardan iborat. Myuon massasi elektron massasidan 206,8 marta katta bo'lib, ular moddada 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 nurlanishlarni 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 atmosfera 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 izotopi havo tarkibida hosil bo'ladi va yog'ingarchiliklar natijasida yer sirtiga tushadi. Tabiatda havo-tuproq-suv aylanishlarida qatnashadi. Tirik organizm to'qimalaridagi tritiy konsentratsiyasi o'rtacha 0,4 Bk/kg ni tashkil etadi. Uglerod-14 oksidlanadi va fotosintez orqali odatdagi karbonat anhidrid 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/yilga teng bo'ladi.

Tritiy va uglerod-14 kosmogen radionuklidlari hosil bo'lish jarayoniga batafsil to'xtalib o'tamiz. Birlamchi kosmik nurlanishlar ta'sirida atmosfera tarkibidagi 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 radioaktiv izotoplar umumiy radioaktiv fonni tashkil qiladi. Atrof-muhit, inson va barcha jonzotlar ushbu radioaktiv fon ta'siri ostida bo'ladi. Kosmik nurlanishlar intensivligi obyektning geografik joylashishiga bog'liq va dengiz sathidan ko'tarilgan sari oshib boradi. Masalan, Toshkent shahri geografik kengligida ekvatordagiga nisbatan inson to'qimalarida yutiladigan

o'rtacha yillik doza taxminan 1,3 marta katta bo'ladi va qutbga yaqinlashgani sayin oshib boradi.

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

Tabiiy radioaktiv izotoplar orasida yarim parchalanish davri Yerning yoshi ($4,5 \cdot 10^9$ yil) a 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 sababli bu oila yo'q bo'lib ketgan.

1.5-jadval.

Radioaktiv oilalar.

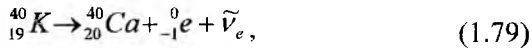
Oilalar	Massa sonining formulasi	Eng uzoq yashovchi nuklid	Eng uzoq yashovchi nuklidning yarim parchalanish davri	Parchalanishning oxirgi mahsuloti
Toriy	4n	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ yil	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Neptuniy	4n+1	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2,2 \cdot 10^6$ yil	$^{209}_{83}\text{Bi}$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

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

$$\begin{aligned}
& {}_{19}^{40}K (\beta^-, \beta^+, \varepsilon), T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9 \text{ yil}; \\
& {}_{37}^{87}Rb (\beta^-), T_{1/2} = 4,7 \cdot 10^{10} \text{ yil}; \\
& {}_{62}^{147}Sm (\alpha), T_{1/2} = 1,06 \cdot 10^{11} \text{ yil}; \\
& {}_{71}^{176}Lu (\varepsilon; \beta^-), T_{1/2} = 5 \cdot 10^{10} \text{ yil}; \\
& {}_{75}^{187}Re (\beta^-), T_{1/2} = 4 \cdot 10^{10} \text{ yil}.
\end{aligned}
\tag{1.78}$$

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

Tabiiy kaliy uchta izotopning aralashmasidan tashkil topgan, ya'ni kaliy-39 ($p = 93,08\%$), 40 ($p = 0,01\%$) va 41 ($p = 6,91\%$) (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. ${}^{40}\text{K}$ radionuklidining 89% ulushi β^- parchalanish natijasida, asosiy holatdagi turg'un ${}^{40}\text{Ca}$ izotopiga aylanadi:



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

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

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



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



Demak, ${}^{40}\text{K}$ izotopi maksimal energiyasi $0,585 \text{ MeV}$ bo'lgan, uzluksiz spektrga ega bo'lgan β^- zarrachalar chiqaradi. Bundan tashqari 1461 keV energiyali monoenergetik γ -nurlanishlarni chiqaradi.

Endi mazkur ma'lumotlar asosida 1 g tabiiy kaliy 1 soniyada 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:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A \quad (1.82)$$

bu yerda N_A – Avogadro soni, μ – izotopning molyar massasi. (1.6) va (1.82) larni $A = \lambda N$ ga qo'yamiz va m massali monoizotop manbaning aktivligini aniqlaydigan ifodani olamiz:

$$A = 0,693 \cdot \frac{mN_A}{T_{1/2} M} \quad (1.83)$$

Agar aktivlik Bk larda emas, balki Kyurilarda hisoblansa, u holda (1.40) ifodani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$A = \frac{0,693}{3,7 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{mN_A}{T_{1/2} M} \text{Ku} \quad (1.84)$$

1 g tabiiy kaliy chiqarayotgan β -zarralar sonini topish uchun ^{40}K radioizotopining tabiiy aralashmadagi foiz miqdorini va β -zarralar chiqishi yuz beradigan parchalanishlar ulushini hisobga olish kerak. Massasi 1 g tabiiy kaliyda $m' = \delta \cdot 1g = 10^{-4} \cdot 1g = 10^{-4}g$ miqdorda ^{40}K radioizotopi bor; β -parchalanish uchun chiqish kattaligi $I_\beta = 0,893$ ga teng. Ko'rilyotgan hol uchun (1.41) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$A_\beta = 0,693 \cdot m' \cdot \frac{N_A}{T_{1/2} \cdot M} I_\beta \quad (1.85)$$

Agar bu ifodaga yuqorida ta'kidlangan qiymatlarni qo'yib hisoblasak, $A_\nu = 28$ 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, ixtiyoriy massali istalgan

kaliy birikmasi chiqarayotgan β -zarralar va γ -kvantlar sonini topish mumkin.

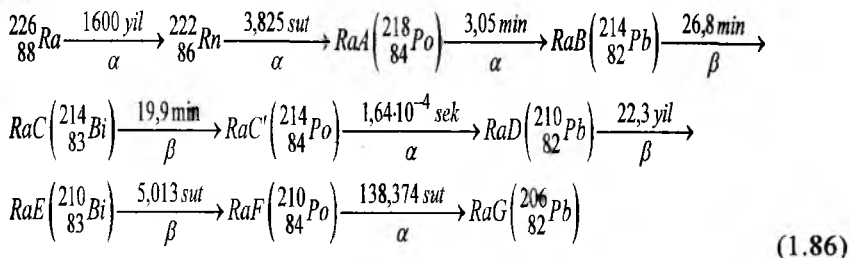
1.13-§. Tabiiy radioaktiv aerozollar

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}Ra)ning parchalanishi natijasida gazsimon radon (Rn), ^{224}Ra dan taron (Tn), ^{223}Ra dan esa aktinon (An) hosil bo'ladi. Ushbu radionuklidlar ya'ni ^{222}Rn , ^{220}Tn va ^{219}An atom raqami 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 oilalarning 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 ortgani sari, parchalanishi tufayli kamaya boradi. Taron va aktinonlarning yashash vaqti qisqa, shu sababli atmosferaning yer sirtiga yaqin bo'lgan qatlamlarida uchraydi. Radon konsentratsiyasi odatda taron konsentratsiyasidan bir necha tartibda yuqori bo'ladi. Radiatsion xavfsizlik nuqtai nazaridan faqat radon muhim ahamiyatga ega bo'lib taron va aktinon gazlari kam ahamiyatga ega. Radon gazi ko'p miqdorda uran konlarida to'planadi hamda yerosti tabiiy mineral suvlarida ham bo'ladi.

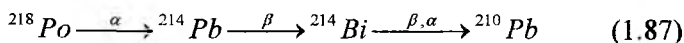
Emanatsiya inert gaz bo'lib, atmosferada atomar holatida bo'ladi. Emanatsiya atomlari kondensatsiya yadrolariga, ya'ni chang zarralari, og'ir ionlar va h.k. birikmaydilar. Shu sababli o'zlari bevosita aerazol hosil qilmaydilar. Radioaktiv aerozollar, emanatsiya parchalanish mahsulotlari bo'lgan poloniy,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

Radon parchalanish zanjirini batafsil ko'rib chiqamiz:



Bu parchalanishda ${}^{210}\text{Pb}$ gacha bo'lgan barcha mahsulotlar qisqa yashovchilardir. Uzoq yashovchi ${}^{210}\text{Pb}$ ($T_{1/2} = 22 \text{ yil}$) o'zi esa havoda yetarli 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 ${}^{210}\text{Tl}$ izotopining chiqish kattaligi kichik bo'lganligi sababli ${}^{210}\text{Tl}$ ni ${}^{214}\text{Po}$ ga nisbatan hisobga olmasa ham bo'ladi. Poloniy-214 atomlari o'ta qisqa yashashi (10^{-4} s lar atrofida) sababli, ${}^{214}\text{Po}$ izotopi doimo ${}^{214}\text{Bi}$ izotopi bilan radioaktiv muvozanatda bo'ladi. Shunday qilib radon parchalanish mahsulotlari o'zaro aylanishini soddalashtirib quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:



Havodagi ${}^{218}\text{Po}$, ${}^{214}\text{Pb}$ va ${}^{214}\text{Bi}$ atomlari konsentratsiyasi mos holda n_1 , n_2 va n_3 bo'lsin. Radon parchalanish mahsulotlarining aktivlik konsentratsiyalar $A_1 = I_1 n_1$, $A_2 = I_2 n_2$, $A_3 = I_3 n_3$ bo'ladi, bu yerda I_1 , I_2 va I_3 mos holda ${}^{218}\text{Po}$, ${}^{214}\text{Pb}$ va ${}^{214}\text{Bi}$ izotoplarining parchalanish doimiylari. Radon va uning parchalanish mahsulotlari orasida radioaktiv muvozanatda $A_1 = A_2 = A_3$, binobarin bu muvozanat holat uchun

$$n_1 : n_2 : n_3 = 1 : (I_1 / I_2) : (I_1 / I_3) \tag{1.88}$$

$$A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 1 : 1 \tag{1.89}$$

Doimiy kattaliklarning qiymatlarini (1.83) ga qo'yib, quyidagi natijani olamiz:

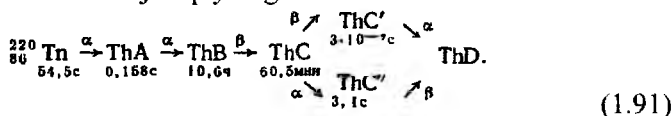
$$n_1 : n_2 : n_3 = 1 : 8,8 : 6,45 \tag{1.90}$$

Odatda, ma'lum hajmli berk idishda radioaktiv muvozanat 3 soatdan keyin qaror topadi. Real sharoitda, odatda muvozanatning ${}^{218}\text{Po}$ atomlari konsentratsiyasi ustunlik qiladigan tomonga siljishi kuzati-

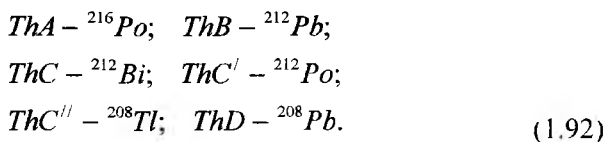
ladi. Bunga sabab, havo harakati natijasida ^{214}Pb va ^{214}Bi atomlarining ko‘chib ketishidir. Havoda faqat ^{218}Po atomlari bo‘lganda nihoyatda no-muvozanat holatiga mos keladi.

Radon va uning parchalanish mahsulotlarining konsentratsiyasi kuzatish joyiga, ob-havo sharoitiga va kuzatish vaqtiga yuqori darajada bog‘liq. Yer sirtidagi quruqlik ustida $3,7$ *parchalanish/s* ni radon yuzaga keltiradi va faqat $0,037$ *parchalanish/s* esa taron sababli yuzaga keladi. Boshqacha so‘z bilan aytganda tabiiy radioaktiv aerozollar aktivligi asosan radon parchalanishi mahsulotlari bilan aniqlanadi.

Taron parchalanish zanjiri quyidagicha:

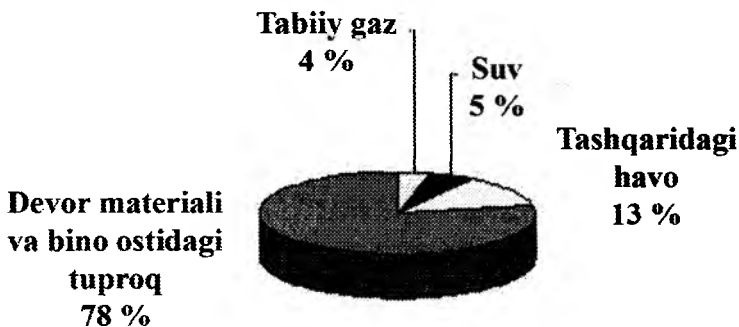


Parchalanish mahsulotlarining izotop tarkibi quyidagicha:



Bu yerda, hamma vaqt ^{218}Po va ^{208}Tl izotoplari ^{12}Bi bilan muvozanatda bo‘ladi deb faraz qilish to‘g‘ri 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 qaror topadi.

Atrofimizdagi ushbu inert gazning asosiy manbai yer qobig‘i (yerning ustki qattiq qatlami) hisoblanadi. Radon fundament, pol va devor yoriq va tirqishlari 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. **1.30-rasm**da keltirilgan diagramma biz-



1.30-rasm. Tevarak-atrofimizdagi radon gazining manbalari.

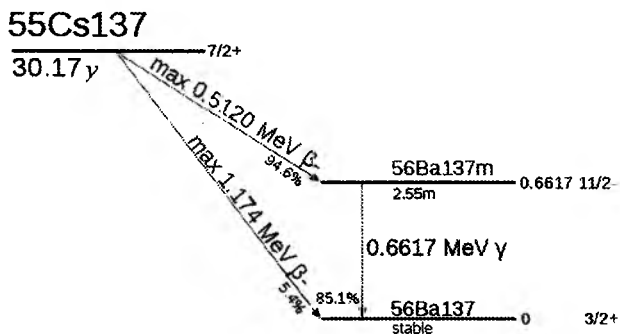
ga radonning har xil manbalarining nurlanish quvvatini solishtirishga imkon beradi.

Inson radon gazidan asosiy nurlanish dozasi shamollatilmaydigan berk xona ichida oladi. Doimiy ravishda shamollatib 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.

1.14-§. Sun'iy radioaktiv fon

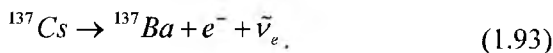
Tabiiy radioaktiv g-fonning oshishiga maksimal hissi uzoq yashovchi texnogen radionuklidlar qo'shib, ular ichida tirik organizmlarga o'zining toksik ta'siri kattaligi bilan e'tiborga ega bo'lgan ^{137}Cs hisoblanadi. ^{137}Cs atmosfera, tuproq va suvlarni ifloslab, «tuproq-o'simlik-inson» va «tuproq-hayvon-o'simlik-inson» biologik 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 reaksiyalarida faol ishtirok etadi va dunyo aholisi nurlanishi effektiv ekvivalent dozasi $\sim 40\%$ (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 ^{133}Cs izotopi turg'un hisoblanadi. Massa soni $A = 134 - 148$ ga teng seziy radionuk-



1.31-rasm. Seziy-137 parchalanish sxemasi.

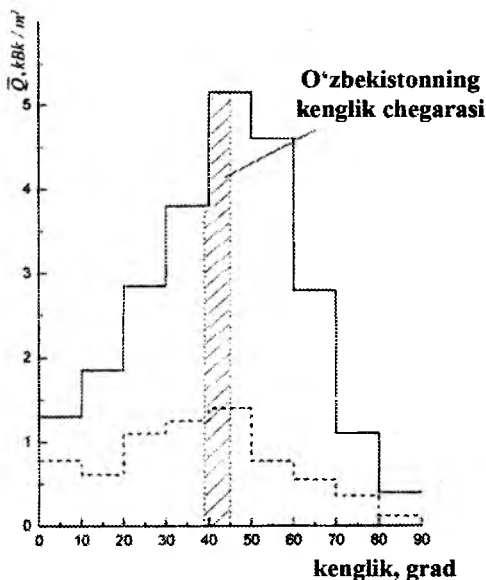
lidlari U va Th yadrolarning spontan yoki majburiy bo‘linishidan hosil bo‘ladi. Radiatsion-gigienik nuqtai nazaridan ^{137}Cs radionuklidi katta qiziqish uyg‘otib, u bo‘linish bo‘lagi sifatida va massa soni $A=137$ izobara bo‘lgan boshqa bo‘linish bo‘laklarining ketma-ket parchalanish mahsuloti sifatida ham hosil bo‘lishi mumkin. Ushbu ketma-ket parchalanishlar qo‘yidagicha yuz beradi: $^{137}\text{Tc}(4\text{ s}) \rightarrow ^{137}\text{I}(24,2\text{ s}) \rightarrow ^{137}\text{Xe}(3,83\text{ min}) \rightarrow ^{137}\text{Cs}(30,17\text{ yil}) \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}(2,55\text{ min}) \rightarrow ^{137}\text{Ba}(\text{stabil})$. Seziy-137 radionuklidining parchalanish sxemasi *1.31-rasm*da keltirilgan. Sxemadan ko‘rinadiki, ^{137}Cs radionuklidi beta-parchalanish orqali ^{137}Ba nuklidiga o‘tadi:



Bu jarayon maksimal kinetik energiyalari 0,512 MeV (β_1^- , 94,6%) va 0,1174 MeV (β_2^- , 5,4%) bo‘lgan elektronlar chiqishi bilan sodir bo‘ladi.

Tuproq va minerallarda tabiiy ^{137}Cs radionuklidining muvozanat solishtirma aktivligi juda kichik bo‘lib, 3,7 dan 370 mBk/kg gacha, yer 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 kelib tushish manbalari asosan, atmosferada yadro qurollarini sinash natijasida hosil bo‘lgan yadro bo‘linish mahsulotlarining global va regional yog‘ishi hisoblanadi. XX asrda yadro quroliga ega bo‘lgan davlatlar tomonidan 2060 dan ortiq termoyadro zaryadlari sinovdan o‘tkazilgan bo‘lib, shulardan



1.32-rasm. Yerning shimoliy(-) va janubiy (---) yarim sharlarida seziiy-137 radionuklidining global yog'ilishining o'rtacha zichligining kengliklar bo'yicha taqsimoti.

457 tasi shimoliy va 44 tasi janubiy yarim sharlarning atmosferasida o'tkazilgan. Ushbu sinovlar natijasida tashqi muhitga, 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. Yer 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 elementlarning 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. Yetti 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 yashovchilari 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 ν -parchalanishda energiyasi 662 keV bo'lgan intensiv g -nurlanish chiqarishi bilan sodir bo'lishidir.

Seziy-137 radionuklidining global yog'ilishi \bar{Q} o'rtacha zichligining kengliklar bo'yicha taqsimoti *1.32-rasmda* keltirilgan.

Ushbu taqsimotdan ko'rinadiki, O'zbekiston hududi 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-§. Seziy-137 radionuklidining tuproqdagi migratsiyasi

Texnogen radionuklidlar bilan atrof-muhit ifloslanishini tadqiq qilish, atrof-muhit turli obyektlardagi ularning miqdorini o'rganish va texnogen radionuklidlarning muhitda migratsiyasiga sabab bo'luvchi qonuniyatlarni aniqlashdan iborat bo'ladi. Bu tadqiqotlar quyidagi zanjir bo'yicha olib boriladi:

- *atmosfera-tuproq-o'simlik-inson;*
- *atmosfera-tuproq-o'simlik-hayvonlar-inson.*

Tuproq yer 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 gorizontal migratsiyasi ularning o'simlik, yerosti suvlari (sizot suvlar), hovuzdagi suvlarga tushishiga (qo'shilishga) sabab bo'ladi. Tuproqda radionuklidlarning 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 (minerallashishiga, kimyoviy va granulometrik tarkibiga, zichligiga, namligiga, organik moddalar tarkibi va miqdoriga, kislota miqdori, yutilish hajmiga, haroratga, tuproq eritmasining konsentratsiyasiga va tarkibiga);

— ob-havo sharoitiga (faslning davomiyligiga, haroratning davomiy-
ligiga, yilning va oyning o'rtacha haroratiga, yillik yog'ingarchilikka va ularning fasllar bo'yicha taqsimotiga) bog'liq.

XX asrning 80-yillariga kelib, radionuklidlarning dunyoning turli regionlaridagi tuproqlardagi miqdori, taqsimoti va siljishi bo'yicha juda katta eksperimental materiallar to'plangan. Ushbu ma'lumotlar asosida radionuklidlarning vertikal siljishini (migratsiyasi) ifodalovchi qator modellar yaratilgan bo'lib, ular tuproqda texnogen radionuklidlarning migratsiya jarayonini modellar orqali ifodalanishi turli amaliy masalalarni yechish uchun zarurdir.

Respublikamiz hududida texnogen radionuklidlarning migratsiyasi bo'yicha ham keng qamrovli ilmiy tadqiqot ishlari olib borilgan. Bu tekshirishlar O'zR FA akademigi T.M. Mo'minov rahbarlik qilgan guruh tomonidan uzoq yillar davomida olib borilgan va bu tadqiqotlar natijalari e'lon qilingan. Mazkur tadqiqotlar uchun namunalar mamlakatimizning turli hududlaridan olingan. Bunda ^{137}Cs radionuklidining vertikal taqsimotini tajribada va modellar orqali ifodalash uchun O'zbekistonning Jizzax, Navoiy, Samarqand va Toshkent viloyatlarida 20 ta tajriba uchastkalari 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 50-yillarida yadro quroli sinovlari, atom elektr stansiyalari va yadro obyektlarida yuz bergan halokatlar ta'sirida atrof-muhitning radiatsion ifloslanish darajasi ortishi bilan bog'liq holatda shakllangan.

Radiatsion ekologiya — tabiiy va sun'iy (antropogen) manbalar asosidagi ionlashtiruvchi radiatsion nurlanishning (radionuklidlar) biotse-
nozlariga 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, L.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;

Ekspperimental radioekologiya – biologik organizmlarga ionlashtiruvchi nurlanishning ta'sir mexanizmlarini o'rganadi va ularni radiatsion nurlanishdan himoya qilish chora-tadbirlarini ilmiy asoslab beradi.

Radioekologiya bevosita – hayvonlar radioekologiyasi, o'simliklar radioekologiyasi, gidroradioekologiya, mikroorganizmlar radioekologiyasi, o'rmonlar radioekologiyasi, qishloq xo'jaligi radioekologiyasi va boshqa yo'nalishlarga ajratiladi.

Ekologik biofizika, jumladan, radiatsion ekologiya fan sohalarining amaliy jihatdan muhim vazifalaridan biri – bu atrof-muhitning antropogen 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 xalqaro «Biotest» dasturi ishlab chiqilgan. Radiatsion ekologiyada atrof-muhitning turli xil 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 muhiti tarkibidan olingan biologik obyektlar sinov namunalari morfologik, genetik, biokimyoviy va hokzzo struktura-funksional tizimlaridagi o'zgarishlar asosida muhitning ifloslanish darajasini baholash uslubi hisoblanadi.

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

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

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Aktivligi $A = 1 \text{ kCi}$ ^{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 $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ – 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 (1.6) formulaga ko'ra:

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

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

$$A = \frac{mN_A}{M} \cdot \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (5)$$

va bu ifodadan m ni topamiz:

$$m = \frac{A M T_{1/2}}{N_A \cdot 0,693} \quad (6)$$

Formulaga masala shartidagi qiymatlarni qo'yib, hisoblashlarni bajaramiz.

$$A = 1 \text{ kCu} = 10^3 \text{ Cu} = 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 10^3 \frac{\text{parch}}{\text{c}} = 3,7 \cdot 10^{13} \frac{\text{parch}}{\text{c}}$$

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

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

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

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

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

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (7)$$

bundan N_0 / N ni topamiz.

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

Javob: 4 marta kamayadi.

2-masala. Massasi 1 g bo'lgan izolyatsiyalangan ^{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.

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

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

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

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

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

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{yoki} \quad \frac{N_0}{N} = e^{\lambda t} \quad (4)$$

Bu ifodaning logariflasak:

$$\ln \frac{N_0}{N} = \ln e^{\lambda t} \quad (5)$$

bundan

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

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

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

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

Yechilishi: Radioizotopining solishtirma aktivligi quyidagiga teng bo'ladi:

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

yoki

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

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

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

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 milligramm v-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 formula yordamida aniqlaymiz:

$$a(^{90}\text{Sr}) = \frac{\ln 2}{T_{1/2} \cdot m_a} = \frac{0,693}{28,6 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 90 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} = 5,14 \cdot 10^{12} \text{ Bk/g}$$

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

Bu qiymatni (2) ifodaga qo'yamiz 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 soatdan keyin qancha miqdorda radon yig'iladi? Radiyning yarim parchalanish davri 1600 yil, radonniki esa 3,8 kun.

Yechilishi: Masalani quyidagi formuladan foydalanib yechamiz:

$$N_{Rn} = N_{Ra} \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} (e^{-\lambda_{Ra}t} - e^{-\lambda_{Rn}t}) \quad (1)$$

Radiy atomlari miqdori:

$$N_{Ra} = \frac{m}{A_{Ra}} N_A \quad (2)$$

bu yerda N_A – Avogadro soni

Binobarin

$$N_{Ra} = \frac{mN_A}{A_{Ra}} \left[(e^{\ln 2})^{\frac{t}{T_1}} - (e^{\ln 2})^{\frac{t}{T_2}} \right] \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

Bu formulaga masala shartidagi quyidagi

$$m = 0,1 \text{ g} = 10^{-4} \text{ kg}, \quad t = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 8,64 \cdot 10^4 \text{ c}$$

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

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

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

qiymatlarni qo‘yamiz va hisoblash natijasida quyidagi javobni olamiz:

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

Javob: $N_{Ra} \approx 32 \cdot 10^{14}$ (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. Seriy-ning yarim parchalanish davri 285 kun. (*Javobi: $\Delta N = 2,5 \cdot 10^{18}$*).

1.3. Massasi 1 g bo'lgan radiy bilan muvozanatda bo'lgan radonning massa va hajmi topilsin. (*Javobi: $m_2 = 6,5 \cdot 10^{-9}$ kg; $V = 6,6 \cdot 10^{-10}$ m³*).

1.4. Natriy-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 SAVOLLARI

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'lchanadi?
4. Radioaktiv oilalar deb nimaga aytiladi?
5. Qanday vaziyatda asr muvozanati vujudga keladi?

TEST SAVOLLARI

1. Turg'un 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 guruhlariga ajratish mumkin?

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

3. Geyger-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) $\bar{n} = N\lambda t$

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

4. Radioaktiv parchalanish qonunini ko'rsating.

A) $N = 120 \cdot e^{-\lambda t}$

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

B) $N = N_0 + A$

D) $N = A + SX$

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

- A) Pozitron
B) Elektron
C) Neytron
D) Proton

6. Radioaktiv parchalanish yuz berayotgan radioaktiv atomlar
o'rtacha soni quyidagiga teng:

- A) $dN = -\lambda Ndt$
B) $dN = \lambda Ndt$
C) $dN = -\lambda \ln Ndt$
D) $dN = -\lambda Ndt$

7. Ikkita 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) g-kvant atomning uyg'ongan holatidan asosiy holatiga o'tganda
nurlanadi;

- B) g-kvantlar uyg'ongan atom yadrolar tomonidan nurlanadi;
C) g-kvantlar b-zarralarning modda orqali o'tganida hosil bo'ladi;
D) g-kvantlar b-zarralarning modda orqali o'tganida hosil bo'ladi.

10. Radioizotoplar qanday qoida bo'yicha parchalanadi?

- A) Chiziqli;
B) Eksponensial;
C) Kimyoviy;
D) Biologik.

11. Radioaktivlik qanday jarayon?

- A) Statistika
B) Dinamik
C) Kinetik
D) To'g'ri javob yo'q

12. Radioaktiv preparatlarning aktivligi bu ...

- A) Radioaktiv yadrolarning yarimi parchalanishi uchun ketgan vaqt
B) Parchalanish natijasida chiqayotgan zarralar yig'indi energiyasi
C) Vaqt birligi ichida sodir bo'ladigan parchalanishlar soni
D) Radioaktiv yadrolarning o'rtacha yashash vaqti

13. IN kattalik qanday nomlanadi?

- A) Tezlik
B) Dinamik kattalik
C) Aktivlik
D) Bosim

14. 1 Ki (Kyuri) nimaga teng?

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

C) 2 parch./s

B) 10^4 parch./s

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

15. Ichki konversiya koeffitsienti deb nimaga aytiladi?

A) Elektronlar sonining protonlar soniga nisbatiga

B) Neytronlar sonining elektronlar soniga nisbatiga

C) Ichki konversion elektronlar sonining gamma-kvantlar soniga nisbatiga

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

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

A) Aktivatsiya tenglamasi

C) Sintez tenglamasi

B) Kvadrat tenglama

D) Fotosintez tenglamasi

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

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

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

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

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

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

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

C) $T_{1/2} > 1$ yil

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

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

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

B) $1 \text{ kun} < T_{1/2} < 1$ yil

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

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

A) b-parchalanish; β -parchalanish; bg-parchalanish; yadro reaksiyasi; neytron va protonlar parchalanishi

B) b-parchalanish; β -parchalanish; yadro reaksiyasi; molekular parchalanish; λ -parchalanish; atom parchalanish

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

D) b-parchalanish; β -parchalanish; g-parchalanish; yadro bo'linishi; kechikkan neytron va protonlar

II BOB

YADRO REAKSIYALARI

Birinchi yadro reaksiyasi 1919-yilda E. Rezerford tomonidan amalga oshirilgan. Bu insoniyat tarixida ilk bor sun'iy ravishda yadroni o'zgartirish jarayoni edi. E. Rezerford ko'p asrlar davomida alkimyogarlar 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 gely atom yadrosi, ya'ni alfa-zarralar bilan azot atomi yadrosini bombardimon qilgan. Ushbu jarayon natijasida vodorod atom yadrosi – proton hosil bo'lgan. Protonlar hosil bo'lganligini birinchi tajribada ssintillatsiya metodi bilan, so'ngra Vilson kamerasi yordamida kuzatishgan. Keyinchalik zaryadlangan zarralar tezlatkichlari paydo bo'lishi bilan yadro reaksiyalarining turlari ko'payib 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 radioizotopini olishda qo'llaniladigan yadro reaksiyalari va metodikalariga batafsil to'xtalib o'tiladi.

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

Yuqori energiyali mikrozaralar yoki yengil 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 mikrozaralar turiga qarab yadro reaksiyalari bir necha turlarga bo'linadi: (n,γ) , (n,p) (γ,n) (p,n) , (α,n) h.k.

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

$$a + A \rightarrow B + b \quad (2.1)$$

yoki qisqacha ifodalash mumkin:

$$A(a, b) B \quad (2.2)$$

Zarralar sifatida neytron (n), proton (p), α -zarra, deytон (d), γ -kvanti va og'ir ionlarni ishlatish 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 ni energiya saqlanish qonunidan foydalanib aniqlaymiz. Yuqorida keltirilgan (2.2) reaksiya uchun energiya saqlanish qonunini yozamiz:

$$E_1 = E_2 \quad (2.3)$$

yoki

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

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

$$E_{01} = M_A c^2 + m_a c^2; \quad (2.5)$$

$$E_{02} = M_B c^2 + m_b c^2; \quad (2.6)$$

$$T_1 = T_A + T_a; \quad (2.7)$$

$$T_2 = T_B + T_b. \quad (2.8)$$

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

$$Q = E_{01} - E_{02} = T_2 - T_1, \quad (2.9)$$

Agar (2.9) ifodani reaksiyada qatnashgan zarralarning tinchlikdagi massalari orqali ifodalasak:

$$Q = [M_a + M_A - (M_b + M_B)]c^2, \quad (2.10)$$

yoki formulani megaelektronvoltlarda yozilsa:

$$Q = (M_a + M_A - M_b - M_B) \cdot 931,5 \text{ MeV}. \quad (2.11)$$

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 yetarli bo'lgan laboratoriya sanoq sitemasidagi minimal kinetik energiyadir.

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

$$E_{th} = \frac{(M_A + M_a)}{M_A} \cdot |Q|, \quad (2.12)$$

bu yerda M_A va M_a – mos holda nishon yadrosi va u bilan to'qnashayotgan zarra massalari. Agar nishon yadro yuqori energiyali g-kvantlar bilan nurlantirilsa, ostona energiyasi reaksiya energiyasiga teng bo'ladi, ya'ni

$$E_{th} = |Q| \quad (2.13)$$

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 reaksiya yuz berish ehtimoligidir.

Yadro o'zaro ta'sir ehtimolligini zarralar oqimining dastasi yo'lida joylashgan yadroning effektiv yuzasi orqali aniqlash qabul qilingan.

Dasta o'qiga perpendikular joylashgan nishonning 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:

$$N = N_0 \sigma n \quad (2.14)$$

bu yerda σ – reaksiyaning 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:

$$n = \frac{\rho d N_A}{A} \quad (2.15)$$

bu yerda c – nishon moddasining zichligi, d – nishon qalinligi, N_A – Avogadro soni, A – massa soni.

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

$$\sigma = \sum \sigma_b \quad (2.16)$$

bu yerda σ_b – parsial kesim.

Kesim o'lchov birligi sifatida barn qabul qilingan bo'lib, 1 barn = 10^{-24} sm² ga teng.

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

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

$$\sigma_{ab} = \frac{dN_b}{nN_0} \quad (2.17)$$

bu yerda n – nishonning birlik yuzadagi yadrolar 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 kattalikka aytiladi:

$$\frac{d\sigma_{ab}}{d\varepsilon_b} = \frac{1}{nN_0} \frac{dN_b}{d\varepsilon_b}, \quad (2.18)$$

$dN_b/d\varepsilon_b$ – energiyasi $e_b - (e_b + de_b)$ diapazondagi, reaksiya mahsuli bo‘lgan b zarralar soni.

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

$$\frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega d\varepsilon_b} = \frac{1}{nN_0} \frac{dN_b}{d\Omega d\varepsilon_b} \quad (2.19)$$

Yadro reaksiyasini tavsiflovchi yana bir muhim kattaliklardan biri reaksiyaning chiqish kattaligi 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:

$$Y = \frac{N_{yar}}{N_0}, \quad (2.20)$$

bu yerda Y – reaksiyaning chiqishi; N_{yar} – yadro o‘zgarishlarida ishtirok etayotgan zarralar soni; N_0 – nishonga kelib tushayotgan zarralar soni. Tajribalarda asosan reaksiyaning chiqish kattaliklari o‘lchanadi. Bu ma’lumotlar asosida reaksiyaning kesimi aniqlanadi.

Yadroning chiqish kattaligini quyidagi ifoda orqali ham aniqlash mumkin:

$$Y = \frac{N}{F}, \quad (2.21)$$

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

Yadro reaksiyasining chiqishi va kesimi kattaligi orasidagi munosabatni aniqlaymiz. Buning uchun yadro reaksiyasi tezligi tushunchasidan foydalanamiz. Reaksiya tezligi berilgan nurlanish sharoitida zarralar oqimi, reaksiya kesimi va boshlang‘ich yadrolar soni bilan quyidagicha bog‘langan:

$$\frac{dN_B}{dt} = F\sigma N_A, \quad (2.22)$$

bu yerda N_B – reaksiya mahsulidagi atomlar soni; N_A – boshlang'ich atomlar soni. Ushbu holda reaksiyaning chiqishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$Y = \frac{dN / dt}{F} = \sigma N_A. \quad (2.23)$$

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, reaksiyaning chiqishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$Y = N_A \int_0^{E_{\max}} F_0(E) \sigma(E) dE, \quad (2.24)$$

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

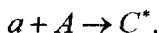
Reaksiyaning chiqishini aniqlashda laboratoriyada qo'llanilayotgan qurilma va o'lchash asboblarning parametrlari, o'lchash geometriyasi va h.k. e'tiborga olinadi.

2.3-§. Yadro reaksiyalarning yuz berish mexanizmlari

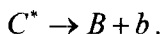
Yadro reaksiyalarning yuz berish jarayoni asosan ikki xil mexanizm orqali tushuntiriladi, ya'ni kompaund (oraliq) yadro mexanizimi va bevosita o'zaro ta'sir mexanizmlari.

Kompaund yadro mexanizmi. 1936-yilda Nils Bor tomonidan taklif etilgan oraliq yadro mexanizmiga binoan yadro reaksiyalari ikki bosqichda yuz beradi.

Birinchi bosqichda yuqori energiyali elementar zarra, yadro yoki gamma-kvantlar yadroda yutiladi va uyg'ongan holatdagi oraliq S^* yoki kompaund yadro hosil bo'ladi:



Ikkinchi bosqichda kompaund yadro quyidagi sxema bo'yicha parchalanadi:

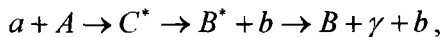


B zarracha neytron, proton, deytron va boshqa zarralar bo'lishi mumkin.

Yadro reaksiyasining yuz berish jarayonini umumiy holda quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:



yoki



bu yerda B^* – reaksiya natijasida uyg'ongan holatda hosil bo'lgan yadro.

Yadroga yutilgan α -zarra energiyasi nuklonlar orasida juda tez taqsimlanadi. Natijada α -zarra olib kirgan energiyaning qiymati yadrodagi nuklonlarning bog'lanish energiyasidan katta bo'lishiga qaramasdan, nuklonlardan bittasi ham yadrodan chiqib ketish uchun zarur bo'lgan energiyaga ega bo'lmaydi. Shu sababli uyg'ongan C^* oraliq yadro kvazistatsionar sistema kabi yadro vaqtiga ($\sim 10^{-22}$ s) nisbatan o'zoq vaqt ($\sim 10^{-14}$ s) yashaydi. Yadro vaqti deb tez neytronning (~ 10 MeV) yadro radiusiga teng bo'lgan masofani bosib o'tish uchun kerak bo'lgan vaqtga aytiladi, ya'ni

$$\Delta t = \frac{R_{yad}}{v_n} \approx \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \text{ sm}}{4 \cdot 10^9 \text{ sm/c}} \approx 10^{-22} \text{ c.}$$

Kompaund yadro yashash vaqti davomida ($\sim 10^{-14}$ s) yadroda juda ko'p marta energiya taqsimoti yuz beradi. Binobarin, oraliq yadro hosil bo'lishi va uning parchalanishi bir-biriga bog'liq bo'lmagan yadro reaksiyasining ikkita bosqichidan iborat. Bunda yadro qanday hosil bo'lganini «esdan» chiqaradi va uning parchalanishi hosil bo'lish usuliga bog'liq emas.

Kompaund yadroning u yoki bu parchalanish turi uyg'onish energiyasiga, harakat miqdori momentiga va boshqa kompaund yadroni tavsiflovchi parametrlarga bog'liq bo'lib, kompaund yadro qanday yo'llar bilan vujudga kelganiga bog'liq emas. Shuning uchun yadro reaksiyasining ikkinchi bosqichi oraliq yadro har xil ko'rinishda parchalanishi mumkin.

Zamonaviy dunyoqarashga asosan, jarayon boshida yadrodagi nuklonlar orasida taqsimlangan oraliq yadroning o'yg'onish energiyasi, ko'p sonli qayta taqsimlanishlardan keyin statistik qonunga asosan birtorta zarraga yig'ilib qolishi mumkin. Ortiqcha energiya olgan ushbu zarracha oraliq yadrodan chiqib ketishi mumkin. Reaksiyaning ikkinchi

bosqichi (etapi) $C^* \rightarrow B + b$, α -parchalanishni eslatadi. Farqi, ushbu holda kuchli uygʻongan S^* yadro parchalanadi.

Bevosita reaksiya mexanizmi. Yadro reaksiyalarini eksperimental oʻrganish boʻyicha oʻtkazilgan tadqiqotlar shuni koʻrsatdiki, kompaund yadro mexanizimi hamma vaqt ham oʻrinli boʻlmas ekan. Bu birinchi marta fotoprotonlar hosil boʻladigan yadro reaksiyada kuzatilgan. Fotoprotonlar, yaʼni (γ, p) fotoyadro reaksiyasi natijasida hosil boʻladigan protonlarning energetik va burchak taqsimotlarini oʻrganish, ushbu reaksiyalar ikkita mexanizm boʻyicha yuz berishi, yaʼni oraliq yadro mexanizmi va bevosita yadro reaksiyasi mexanizmlari mavjudligini koʻrsatdi. Ayrim hollarda birinchisini bugʻlanish mexanizmi, ikkinchisi esa fotoeffekt mexanizmi ham deyiladi. Bevosita reaksiya (fotoeffekt) mexanizmida γ – kvantlar energiyasining asosiy qismini sirtida joylashgan protonga beradi va ushbu proton, γ – kvantlar olib kelgan energiya nuklonlar orasida taqsimlanmasdan oldin yadrodan uchib chiqib ketadi. Mazkur protonning maksimal energiyasi quyidagiga teng:

$$(T_p)_{\max} = E_\gamma - \varepsilon_p,$$

bu yerda ε_p – protonning bogʻlanish energiyasi.

Shunday bevosita ajralib chiqqan protonlar yordamida (γ, p) fotoyadro reaksiyasi chiqishining oraliq yadro mexanizmida kutilayotgan chiqishiga nisbatan oshishini va uchib chiqayotgan protonlarning burchak taqsimotidagi anizotropiyani ham tushuntirish mumkin.

Protonlarni bevosita «uzib» olish γ -kvantlar yutilish kesimining faqat maʼlum bir qismiga javob beradi. Ammo (γ, p) reaksiya uchun u muhim ahamiyatga ega boʻlishi mumkin. Bunda sirtida joylashgan protonlar uchun kulon barerining roli bugʻlanish protonlari uchun kulon bareri rovidan ancha kichikligi bilan bogʻliq.

Bevosita oʻzaro taʼsir mexanizmi ogʻir yadrolardagi reaksiyalarda oʻta muhim ahamiyatga ega boʻladi. Bunga sabab ushbu yadrolarda kichik energiyali bugʻlanish protonlarga qarshilik qiluvchi Kulon toʻsigʻining kattaligidir.

2.4-§. 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:



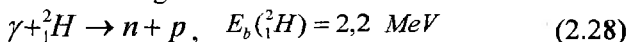
yoki quyidagi ko'rinishda ham yozish mumkin:



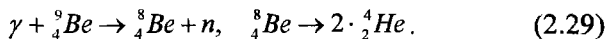
Yadrodan chiqayotgan zarralar turiga qarab fotoyadro reaksiyalari quyidagi turlarga bo'linadi: (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$, (γ, d) , (γ, α) va h.k. Hozirgi kunda eng yaxshi o'rganilgan reaksiyalar: (γ, n) va (γ, p) . Bu reaksiyalar endotermik bo'lgani uchun ushbu reaksiya yuz berishi uchun, γ -kvantlarning energiyasi ushbu zarrani yadrodan ajratish uchun zarur bo'lgan energiyadan katta bo'lishi kerak, ya'ni

$$E_\gamma > \varepsilon_n(\varepsilon_p, \varepsilon_\alpha) \quad (2.27)$$

Yadro fotoeffekti birinchi marta 1934-yilda Chedvik (James Chadwick) va Goldxaberlar (Maurice Goldhaber) tomonidan deytronning fotoparchalanishi misolida kuzatilgan:



Tajribada ${}_{81}^{208}Tl$ 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'ladigan 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 yaratilgandan keyingina paydo bo'ldi. Elektron tezlatkichlarda (betatron, mikrotron va chizikli elektron

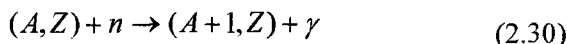
tezlatkich) yuqori energiyali gamma-kvantlarni rentgen trubkasida tormozli rentgen nurlar hosil qilishiga o'xshash vaziyatda hosil qilinadi, ya'ni yuqori energiyagacha tezlatilgan monoxromatik elektronlar Z katta bo'lgan elementdan (W, Pb) tayyorlangan nishonga kelib tushadi va unda tormozlanadi. Natijada tormozli gamma-nurlar hosil bo'lib, ularning spektri uzluksizdir. Tormozli gamma-nurlanishlarning maksimal energiyasi tormozlanayotgan elektronlarning maksimal 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.

2.5-§. Neytronlar ishtirokidagi yadro reaksiyalari

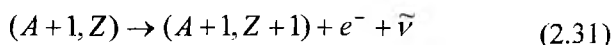
Yadroga kelib tushayotgan neytron energiyasiga bog'liq holda har xil turdagi yadro reaksiyalari sodir bo'lishi mumkin. Neytronlarni energiyasiga qarab turli guruhlar ajratish mumkin. Bu guruhlar **2.1-jadvalda** keltirilgan.

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 ichida eng ko'p tarqalgani bu radiatsion qamrash reaksiyasi, ya'ni (n, γ)



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

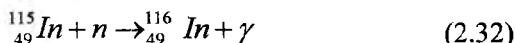


Yadro reaksiyalarida neytron yutilishi va undan keyin γ -kvant chiqishi bilan yuz bergani uchun bu reaksiyalar (n, γ) ko'rinishdagi radiatsion qamrash reaksiyasi deyiladi. Radiatsion qamrash reaksiyasi katta ehtimollik bilan energiyasi *0ch500 keV* gacha bo'lgan sekin neytronlar ta'siri ostida yuz beradi. Shuning uchun ham ushbu reaksiya neytronlarni qayd qilish uchun keng qo'llaniladi.

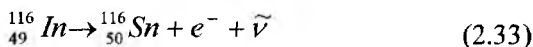
Neytronlarni energiya bo'yicha guruhlash.

Guruhlar	Neytron energiyasi
Sovuq neytronlar	$E_n \leq 0,005 \text{ eV}$
Issqlik neytronlari	$0,005 \text{ eV} \leq E_n \leq 0,1 \text{ eV}$
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	$0,5 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$
Q'ta tez neytronlar	$E_n > 50 \text{ MeV}$

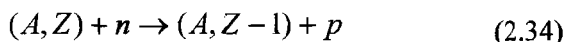
Radiatsion qamrash reaksiyasiga misol qilib, issiqlik neytronlarning indiy yadrosi tomonidan qamrab olishi jarayonini keltirish mumkin:



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

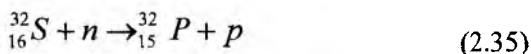


Protonlar hosil bo'lishi bilan yuz beradigan reaksiyalar. Energiyasi $T_n \approx 0,5 \div 10 \text{ MeV}$ bo'lgan neytronlar ishtirokida ko'pincha (n,p) turdagi reaksiya yuz beradi:



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

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



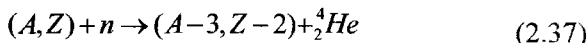
bu reaksiya energiyasi $Q \approx -0,92 \text{ MeV}$ ga teng.

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



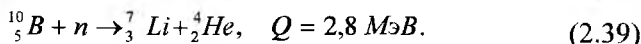
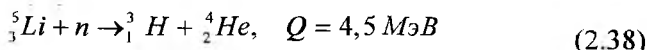
Bu reaksiya energiyasi $Q \approx 0,6$ MeV ga teng bo'lib, u yengil yadrolarda yuz beradi. Bunga sabab, ushbu yadrolarda hosil bo'lgan protonlar uchun Kulon to'sig'ining uncha katta bo'lmashidir.

Alfa-zarralar hosil bo'lishi bilan yuz beradigan reaksiyalar. Yadro fizikasida (n, α) turdagi reaksiyalar keng qo'llaniladi:

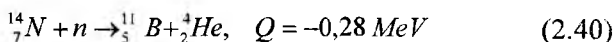


(n, α) turdagi reaksiyalarning samarali kechishi uchun energiyalari 0,5 dan 10 MeV oraliqda bo'lgan neytronlar zarur bo'ladi. Ammo ayrim hollarda ushbu reaksiya katta ehtimollik bilan sekin neytronlarda ham yuz beradi.

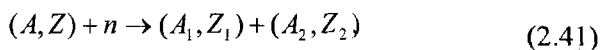
Bunday reaksiyaga misollar:



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



Bo'linish reaksiyasi. Og'ir yadrolarni, ya'ni transuran elementlarini (${}_{90}\text{Th}$, ${}_{91}\text{Pa}$, ${}_{92}\text{U}$) energiyasi $T_n > 1$ 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 qanoatlatiruvchi ikkita yadro bo'lagi hosil bo'ladi:

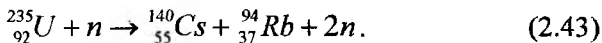


bu yerda

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= A + 1; & Z_1 + Z_2 &= Z; \\ \bar{A}_1 : \bar{A}_2 &\approx 2 : 3. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Bunday turdagi reaksiyalar bo'linish reaksiyasi deyiladi va (n, f) ko'rinishda yoziladi. Bo'linish reaksiyalari yadro energiyasini olish-

da 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 $T_n > 10$ 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 enregiyalari kattaligi, bita 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 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 $T_n > 0,6$ MeV bo'lganda, yengil yadrolarda esa $T_n > 1$ MeV energiyalarda sodir bo'ladi.

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

Neytronlarning elastik sochilishi. Neytronlar moddalarga tushganda quyidagi ko'rinishdagi jarayonlarni sodir etadi. Yuqorida aytib o'tilganidek noelastik sochilish, shu bilan bir qatorda, neytronning elastik sochilishi ham yuz beradi. Elastik sochilish neytron kelib urilayot-

gan yadroning massasiga juda katta bog'liq bo'ladi. Neytron zarralari-ning qayd qilinishi neytronlarning elastik sochilishiga ham asoslanadi. Bu jarayonda tepki yadrosi hosil bo'ladi (yoki nuklon hosil bo'ladi). Odatda tepki proton hosil bo'ladi.

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.

2.6-§. 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 metodi asosan radioaktiv yadrolarning hosil bo'lishiga asoslanadi. Aktivatsion tahlil metodining eng muhim tenglamalaridan biri bu aktivatsiya tenglamasidir. Bu yerda biz ushbu tenglama bilan tinishib chiqamiz.

Berilgan sharoitda $A(a,b)B$ yadro reaksiyasining tezligi (2.22) 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:

$$\frac{dN_B}{dt} = F\sigma N_A - \lambda N_B. \quad (2.46)$$

Ma'lum bir t_0 nurlanish vaqti davomida to'plangan (hosil bo'lgan) B radioizotop atomlarining miqdorini (soni) (2.46) tenglamani integrallash orqali topish mumkin. Nurlanish jarayonida F , y va N_A kattaliklar o'zgarmaydi deb faraz qilamiz. Bunda aktivatsiya qiluvchi nurlanish oqim zichligi F nurlanish vaqtida o'zgarmaydi va namunaning ixtiyoriy nuqtasida bir xil bo'ladi. Shuningdek, aktivatsiya qiluvchi nurlanish

energiyasi va nurlanayotgan izotopning soni kamaymaydi. Mazkur sharoitda (2.46) tenglamani integrallab, quyidagi ifodaga kelamiz:

$$N_B = \frac{F\sigma N_A}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_n}), \quad (2.47)$$

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 vaqti hisobga olinsa (2.47) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$N_B = \frac{F\sigma N_A}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_n})(1 - e^{-\lambda t_u}). \quad (2.48)$$

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

$$N_B = \frac{F\sigma N_e \theta}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_n})(1 - e^{-\lambda t_u}). \quad (2.49)$$

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

Ushbu (2.49) 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 parchalanishini hisobga olish lozim, ya'ni:

$$N_B = \frac{F\sigma N_e \theta}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_n})(1 - e^{-\lambda t_u})e^{-\lambda t_p}. \quad (2.50)$$

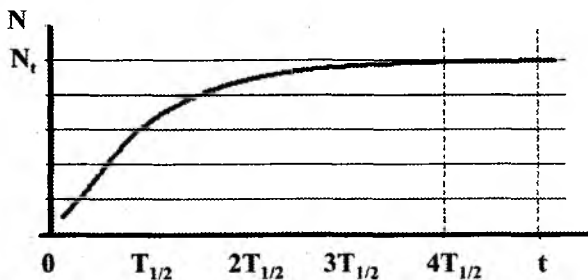
Agar induksiyalangan (reaksiya natijasida hosil qilingan) aktivlikni o'lchash *g-spektrometr*da bajarilsa, u holda parchalanishlar soni fotocho'qqi yuzasi bilan yoki fotocho'qqidagi impulslar soni bilan aniqlanadi:

$$N_d = \frac{N_\Sigma}{\epsilon I_\gamma}, \quad (2.51)$$

bu yerda N_γ – fotocho'qqidagi impulslar soni; ϵ – spektrometrning effektivligi; I_γ – g-kvantning intensivligi. Yuqoridagi (2.50) va (2.51) tenglamalardan quyidagini olamiz:

$$N_{\Sigma} = \frac{F\sigma N_e \theta \varepsilon I_{\gamma}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda_n})(1 - e^{-\lambda_p}) e^{-\lambda_p}. \quad (2.52)$$

To'yinishga $t \approx (4.45) T_{1/2}$ vaqt ichida erishiladi. Kichik t vaqtlarda $N(t)$ bog'lanish chiziqli xarakterga ega bo'ladi (2.1-rasm).



2.1-rasm. Aktivatsiya egri chizig'i.

Endi (2.47) 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 chiziq to'yinishga (platoga) chiqadi. Bunda $dN_B / dt = 0$ va $N_t = F\sigma N_A / \lambda$ bo'ladi. To'yinish yuz berganda nurlanish natijasida hosil bo'layotgan yadrolar soni parchalanayotgan yadrolar soniga tenglashib qoladi. Mazkur hol uchun (2.47) ifoda quyidagi ko'rinishga keladi:

$$N_B = N_t(1 - e^{-\lambda t}). \quad (2.53)$$

2.7-§. 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 dannix fotoyadernix eksperimentov (SDFE) NIIYAF MGU) hisoblanadi. Ushbu markazda yadro reaksiyalari va yadro ma'lumotlariga taalluqli 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. Bundan tashqari quyidagi ma'lumotlar markazlari mavjud.

1. ENDF/B, ENDL, UKNDL, KEDAK, SOKRATOR va Obninskda yadro reaksiyalari bo'yicha ma'lumotlar markazi;
2. CUHDA – AQSHda joylashgan ma'lumotlar markazi;
3. EXFUR (4 ta markazni o'z ichiga oladi.);
4. MAGATE tomonidan tashkil etilgan «UHUC» ma'lumotlar sistemasi;
5. NDC – Venada joylashgan ma'lumotlar markazi;
6. UKNDL – Angliyada joylashgan ma'lumotlar markazi;
7. ENDL LLL – AQSHda joylashgan ma'lumotlar markazi.

Halqaro yadro ma'lumotlar markazlarining saytlari:

1. <http://cdfesinp.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. ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ yadro reaksiyasi qanday reaksiya, ya'ni ekzotermik yoki endotermik 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:

$$Q = (m_{\text{Li}} + m_{\text{H}} - m_{\text{Be}} - m_{\text{n}})c^2 \quad (2)$$

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

$$m_{\text{Li}} = 11,65079 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad m_{\text{H}} = 1,6736 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (3)$$

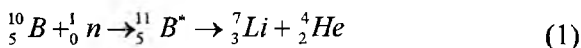
$$m_{\text{Be}} = 11,65231 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad m_{\text{n}} = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (4)$$

$Q = -1,64 \text{ MeV}$. Demak yadro reaksiyasi endotermik 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 ${}^{10}\text{B}(\text{n},\text{b}){}^7\text{Li}$ yadro reaksiyasining Q energiyasi aniqlansin.

Yechilishi: ${}^{10}\text{B}(\text{n},\text{b}){}^7\text{Li}$ yadro reaksiyasi quyidagi mexanizm bo'yicha yuz beradi, ya'ni bor ${}^{10}_5\text{B}$ yadrosi sekin ${}^1_0\text{n}$ 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 -zarra (${}^4_2\text{He}$) chiqaradi va litiy ${}^7_3\text{Li}$ yadrosiga aylanadi. Ushbu reaksiya jarayonini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:



Reaksiya Q energiyasini quyidagi ifoda bilan topamiz:

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

Yadrolarning tinchlikdagi massalarini, ushbu yadro atomlarining tinchlikdagi massalariga almashtiramiz va jadvaldan olingan atom massalarini oxirgi ifodaga qo'yamiz:

$$Q = 931 \cdot (10,01294 + 1,00867 - 7,01601 - 4,00260)M\text{eV} = 2,80M\text{eV} \quad (3)$$

Reaksiya mahsulotlari bo'lgan litiy 7Li va α -zarralarning kinetik energiyasini topish uchun reaksiya energiyasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$Q = \sum T_f - \sum T_i \quad (4)$$

bu yerda T_i va T_f – mos holda reaksiya boshidagi va oxiridagi zarralarning kinetik energiyalarining yig'indisi. Masala shartiga ko'ra $\sum T$ kattalikni hisobga olmasa ham bo'ladi. U holda 7Li va 4He zarralar kinetik energiyalarining yig'indisi:

$$T_{Li} + T_{He} = Q \quad (5)$$

T_{Li} va T_{He} noma'lumlarni bog'lovchi ikkinchi bir tenglamani tuzish uchun impulsni saqlanish qonunini qo'llaymiz. Zarralar impulslari yig'indisi, reaksiyagacha nolga teng desak, u holda reaksiyadan keyin ham u nolga teng bo'ladi.

$$\vec{P}_{Li} + \vec{P}_{He} = 0 \quad (6)$$

bu yerdan impuls modullari uchun:

$$P_{Li} = P_{He} \quad (7)$$

Zarralar impulslari tenglamalaridan ularning kinetik energiyasi tenglamalariga o'tamiz:

$$T_{Li} = \frac{P_{Li}^2}{2m_{Li}}, \quad T_{He} = \frac{P_{He}^2}{2m_{He}} \quad (7)$$

(7) va (8) dan

$$m_{Li}T_{Li} = m_{He}T_{He} \quad (8)$$

ni hosil qilamiz. (5) va (8) tenglamalarni birgalikda yechib,

$$\begin{aligned} T_{Li} &= Qm_{He} / (m_{Li} + m_{He}) \\ T_{He} &= Qm_{Li} / (m_{Li} + m_{He}) \end{aligned} \quad (9)$$

tenglamalarni olamiz va m_{He} va m_{Li} yadro massalar qiymatini butun son-ga yaxlitlab quyidagilarni topamiz:

$$T_{Li} = 4Q / 11 = 1,02 \text{ MeV}, \quad T_{He} = 7Q / 11 = 1,78 \text{ MeV} \quad (10)$$

Javob: $T_{Li} = 4Q / 11 = 1,02 \text{ MeV}, \quad T_{He} = 7Q / 11 = 1,78 \text{ MeV}.$

3-masala. Quyidagi fotoyadro reaksiyasining ostona energiyasi to-pilsin: $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{B} + p$, $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{C} + n$.

Yechilishi: Yuqori energiyali γ -kvantlar ta'sirida yuz beradigan yadro reaksiyalariga fotoyadro reaksiyasi deyiladi. Ushbu reaksiya en-doenergetik reaksiya bo'lgani uchun, u ostona energiyasiga egadir. Re-aksiya ostona energiyasi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E_{ost} = \frac{m + M}{M} |Q| \quad (1)$$

bu yerda m va M – mos holda yadroga uchib kelayotgan zarra va nishon yadro massalari. (1) ifodani fotoyadro reaksiyasi uchun yozamiz.

$$E_{ost} = |Q| \quad (2)$$

Reaksiya energiyasini Q ni topamiz,

$$Q = c^2 (\sum M_i - \sum M_f) \quad (3)$$

$$\sum M_i = m_c = 12 \text{ m.a.b.} \quad (4)$$

$$\sum M_f = m_B + m_p = (11,00930 + 1,0078) \text{ m.a.b.} \quad (5)$$

Ushbu qiymatlarni (3) ga qo'yamiz.

$$Q = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{m.a.b.}} (12 - (11,00930 + 1,0078)) = -15,96 \text{ MeV} \quad (6)$$

Xuddi shunga o'xshash hisoblashlarni ikkinchi reaksiya uchun ham bajaramiz va quyidagini olamiz:

$$Q = -18,72 \text{ MeV} \quad (7)$$

demak,

$$E_{ost}(\gamma, p) = |Q| = 15,96 \text{ MeV} \quad (8)$$

$$E_{ost}(\gamma, n) = |Q| = 18,72 \text{ MeV}. \quad (9)$$

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

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

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

$$\begin{cases} Mc^2 + \hbar\omega = Mc^2 + E_{ya} + E^* \\ \frac{\hbar\omega}{c} = p \end{cases} \quad (1)$$

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

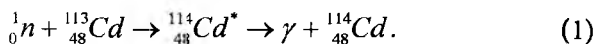
$$E_{ya} = \frac{P^2}{2M} = \frac{(\hbar\omega)^2}{2Mc^2}, \quad E^* = \hbar\omega\left(1 - \frac{\hbar\omega}{2Mc^2}\right) \quad (2)$$

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

5-masala. Yupqa plastika ko'rinishidagi ^{113}Cd nishon oqim zichligi $1,0 \cdot 10^{12} \text{ N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$ bo'lgan issiqlik neytronlar bilan nurlantirilgan.

Agar nurlanishning 6 sutkadan keyin ^{113}Cd nuklidining 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:

$$Y = n\sigma F. \quad (2)$$

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

$$dn = -Ydt = -n\sigma Fdt. \quad (3)$$

ushbu tenglama $n(t=0) = n_0$ boshlang'ich shartni hisobga olib yechilsa, uning yechimi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$n(t) = n_0 \cdot \exp(-\sigma Ft) \quad (4)$$

Bu formula asosida quyidagi ifodani olamiz:

$$\frac{n_0 - n(t)}{n_0} = 0,01 = 1 - \exp(-\sigma Ft). \quad (5)$$

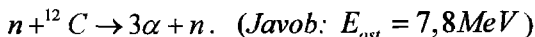
Bu tenglamadan (n, γ) reaksiya kesimi topiladi:

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

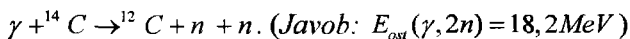
Javob: $2 \cdot 10^4$ barn.

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 reaksiyasida qancha energiya ajraladi? (Javob: $Q = 17,6 \text{ MeV}$)

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

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

2.6. Litiy-7 yadrosi sekin neytronni qamrab oladi va g-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'lchanganda uning aktivligi $1,9 \cdot 10^7 \text{ Bk}$ ga teng bo'lgan. Agar radioaktiv izotop yadrolarining hosil bo'lish effektiv kesimi 96 barn va yarim parchalanish davri 2,7 sutka bo'lsa, neytronlarning oqim zichligini aniqlang.

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

NAZORAT SAVOLLARI

1. Reaksiya kanali deb nimaga aytiladi?
2. Yadro reaksiyalarida qanday saqlanish qonunlari bajariladi?
3. Qanday reaksiyalar ostonaga energiyasiga ega bo'ladilar?
4. Yadro reaksiyalarini tadqiq qilishning 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 SAVOLLARI

1. Yadro reaksiyasi nima?
 - A) Elementar zarralarning yadro bilan o'zaro ta'siri
 - B) Molekulalarning yadro bilan o'zaro ta'siri
 - C) 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) Ostonaga
 - B) Endotermik
 - C) Fotosintez
 - D) Ekzotermik
3. Energiya yutilishi bilan yuz beradigan yadro reaksiyasiga ... reaksiya deb ataladi?
 - A) Endotermik
 - B) Fotosintez
 - C) Ekzotermik
 - D) Ostonaga
4. Yadro reaksiyasining kesimi deb nimaga aytiladi?
 - A) Reaksiya ostonaga energiyasiga
 - B) Reaksiya yuz berish ehtimoliligiga
 - C) Reaksiya chiqishiga
 - D) Reaksiya turiga
5. Yadro reaksiyasining chiqishi deb ... aytiladi?
 - A) Hosil bo'lgan yadrolar soniga
 - B) Reaksiya ostonaga energiyasiga
 - C) Yadro tartibiga
 - D) Reaksiya yuz berish ehtimoliligiga

6. Yadro reaksiyasi kesimining o'lchov birligi nima?

- A) Barn B) Joul C) sm^3 D) Bekkerel

7. (g, n) turdagi, ya'ni yadrodan neytron chiqib ketadigan fotoyadro reaksiyasida qanday yadro hosil bo'ladi?

- A) Neytronlar soni oshgan C) Alfa radioaktiv
B) Neytron defitsit D) To'g'ri javob yo'q

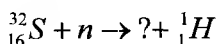
8. Issiqlik neytronlar deb energiyasi shartli ravishda qaysi oraliqda bo'lgan neytronlarga aytiladi?

- A) $E_n > 50 \text{ MeV}$ C) $2 \text{ MeV} \leq E_n \leq 5 \text{ MeV}$
B) $0,5 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$ D) $0,005 \text{ eV} \leq E_n \leq 0,4 \text{ eV}$

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

- A) ${}^{111}\text{In}$ B) ${}^{113}\text{Te}$ C) ${}^{57}\text{Co}$ D) ${}^{56}\text{So}$

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



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

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

- A) Kinetik C) Endotermik
B) Enzotermik D) Termodinamik

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

- A) E. Rezerford C) N. Bor
B) I. Kurchatov D) Maks Plank

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

- A) Kompaund yadro mexanizmi
B) To'g'ri yadro reaksiya mexanizmi
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) Kislород-17 C) Uran-27 D) Vodorod-3

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

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

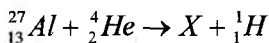
16. Fotoyadro reaksiyasi deb ... yadro bilan o'zaro ta'sirlashish jarayoniga aytiladi.

- 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) ${}^{23}_{11}\text{Na}$ B) ${}^{30}_{14}\text{Si}$ C) ${}^{14}_7\text{N}$ D) ${}^{31}_{15}\text{P}$

19. ${}^{14}_7\text{N}$ yadroda (n,p) reaksiya natijasida qanday yadro hosil bo'ladi?

- A) ${}^{14}_6\text{C}$
B) ${}^{13}_6\text{C}$
C) ${}^{14}_7\text{N}$
D) ${}^{13}_7\text{N}$

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'liqliqni 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.

Radionuklidlar va yadro qurilmalarida olingan nurlanishlar moddalardan o'tishi davomida modda atomi yadrolar bilan o'zaro ta'sirlashadi. 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 konstruksion materiallarda yutilgan dozani hisoblash va himoya to'siqlarning optimal konstruksiyalarini hisoblashga yo'naltirilgan.

Radiatsion kimyo bu kimyo fanining ionlovchi nurlanishlar ta'sirida uyg'onadigan kimyoviy jarayonlarni o'rganadigan sohasi hisob-

lanadi. Radiatsion kimyo 1865 – 1896-yillarda paydo bo‘ldi. Radiatsion kimyodagi dastlabki kuzatish ishlari nurlarning fotoplastinkaga ta’sir etib qoraytirishidan boshlangan. Ko‘p o‘tmay radiy nurlarining suvni kislorod va vodorodga parchalashi ma’lum bo‘ldi. Radiatsion kimyo rivojining keyingi bosqichi yadro reaktorlarining kashf etilishi bilan bog‘liq bo‘lib, XX asrning 40-yillaridan kimyo fanining mustaqil sohasi sifatida shakllandi. Atom energetikasida ishlatiladigan har xil materiallarga turlicha nurlar ta’siri o‘rganildi. Atom reaktorlarining ishlatilishi va yadro yonilg‘isining qayta ishlanishi suvning parchalanish jarayonlarini, yuqori radioaktivlikka ega bo‘lgan texnologik aralashmalardagi kimyoviy o‘zgarishlarni tushuntirib berishni talab qildi.

Bunda ionlovchi nurlanishlar asosan quyidagi yo‘nalishlarda qo‘llaniladi: modda va materiallarni radiatsion modifikatsiya qilish; ularni buzilishlardan saqlash usullarini ishlab chiqishda; ionlovchi nurlanishlarni kimyo texnologiyalarida organik, shuningdek, yuqori molekular moddalarni radiatsion-kimyoviy sintez qilishda.

Radiatsion kimyoviy sintezda kimyoviy sistemalarga nur ta’sirida yangi kimyoviy moddalar olinadi. Ionlovchi nurlar zanjirli jarayonlarni initsirlashda keng qo‘llaniladi. Bunga xlorlash, sulfirlash, oksidlash, sulfoxlorlash, sulfooksidlash, qo‘sh bog‘larga birikish va boshqalar zanjirli mexanizm bo‘yicha boradigan boshqa radiatsion kimyoviy sintez jarayonlari kiradi. Radiatsion initsirlashning katalitik yoki fotokimyoviy initsirlashga qaraganda bir qancha afzalligi bor: sistemaga initsirlovchi moddalar qo‘shish va trani ko‘tarish zarurati yo‘qoladi, ko‘pgina zanjirli jarayonlarning yong‘in va portlash xavfi bilan bog‘liq bo‘lgan bir qancha texnik talablarini amalga oshirish mumkin bo‘ladi. Laboratoriya tadqiqotlari ionlovchi nurlarning bir qator elementorganik birikmalarni, fosfororganik va qalayorganik birikmalarni sintezlashda yaxshi natija berishini ko‘rsatdi. Polimerlarni radiatsion modifikatsiyalash va kauchuklarni vulkanizatsiyalash jarayonlari radiatsion kimyoning mustaqil sanoat tarmog‘i hisoblanadi. Radiatsion termik vulkanizatsiyalash shinalarning sifatini ancha yaxshilaydi. Radiatsion kimyoning keyingi rivoji bir qator fan va texnika sohalari bilan chambarchas bog‘liq. Yadro fizikasi, atom energetikasi, kosmik tadqiqotlar va boshqalar shular jumlasidandir.

Radiobiologiya bu ionlovchi nurlanishlarning biologik obyektlarga (biomolekulalar, hujayrlar, to'qimalar, organizmlar, populatsiya) ta'sirini o'rganuvchi fanidir.

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 sezgirligi, o'tkir nur kasalligi, organizmga kirgan radioaktiv moddalarning biologik ta'siri, radiatsiya ta'sirida umrning qisqarishi, nurlanish oqibatlari va undan himoyalaniş kabi masalalar atroflicha o'rganiladi.

Radiobiologiya radioaktiv zarrachalarni nurlanayotgan obyektlarning ichki qismiga kirib borib, ularning atom va molekulalardan tashkil topgan barcha tarkibiy qismlariga ta'sir etish xususiyatlarini hamda yuqori energiyaga ega bo'lgan kvantlar va zarrachalar (zarracha, elektronlar, pozitronlar, protonlar, neytronlar va boshqalar) bilan bog'liq jarayonlarni o'rganadi. Ionlovchi nurlarning biologik ta'sirini o'rganish V.K. Rentgen rentgen nurlarini (1888), A. Bekkerel radioaktivlikni (1896), P. Kyuri va M. Sklodovskaya Kyuri tomonidan radiy elementining kashf etilishi bilan deyarli bir vaqtda boshlangan. Lekin radiobiologiya mustaqil fan sifatida faqat XX asrning birinchi yarmida shakllandi. Bu ko'p jihatdan texnika va yadro fizikasining rivojlanishi bilan bog'liq. 1925-yilda ionlovchi nurlarning mutagen ta'siri kashf etilishi radiatsion genetikaning fan sifatida shakllanishiga imkon berdi. XX asrning 20 – 30-yillarida radiobiologiya sohasida qilingan tadqiqotlar tahlili asosida hujayraning nurlanish dozasidan halok bo'lishini tushuntirish uchun unda sezgir – nishon – mo'ljal mavjudligi haqidagi gipoteza ishlab chiqildi. Gipotezaga ko'ra, ionlashgan zarrachalarning «nishon»ga tegishi radiatsion effekttni paydo qiladi. «Nishon» nazariyasi ingliz olimi D. Li (1946), rus olimi N.V. Timofeev-Resovskiy va nemis olimi K. Sitter (1947) tomonidan to'liq ishlab chiqilgan.

XX asrning 40 – 50-yillarida yadro fizikasi va texnikaning jadal rivojlanishi, atom energiyasi va radioaktiv izotoplarning texnika, tibbiyot va ionlovchi ta'sir ishlarida keng qo'llanilishi hamda yadro qurollarining sinovdan o'tkazilishi bir qator yangi muammolarni paydo qildi. Bu muammolar ko'p hujayrali organizmlar yoppasiga nurlanganida ularning radiatsion shikastlanganini tadqiq qilish; organizmlarning nur-

lanishga turli darajada sezgirliги sabablarini aniqlash, zararli mutatsiyalarning paydo bo'lishida radiatsiyaning ahamiyatini aniqlash, nurlanish ta'siri oqibatlarini o'rganish (umrning qisqarishi, o'sma kasalliklarining ko'payib ketishi, immunitetning pasayishi sabablari) va boshqalardan iborat. Radiobiologiyaning aktual amaliy vazifalariga organizmni nurlanishdan himoya qilish va shikastlangan to'qimalarni postradiatsion tiklash, atrof-muhitda radiatsiya ortib ketishining insoniyatga ta'sirini bashorat qilish, qishloq xo'jaligi, oziq-ovqat va mikrobiologiya sanoatida ionlovchi nurlardan foydalanishning yangi istiqbolli yo'llarini aniqlash kiradi.

1950–60-yillarda radiobiologiya sohasidagi ionlovchi ta'sirlarda biofizika va biokimyo metodlaridan keng foydalanila boshlandi. Natijada hujayra strukturalari va makromolekulalar faqat kvantlar va zarrachalarning bevosita ta'siri ostida emas, balki suv va boshqa kichik molekulali birikmalar radikallari (peroksidlar, gidroperoksidlar, xinonlar, semixinonlar) kislorod ishtirokida ham nurlanishi ma'lum bo'ldi. Ana shu davrda radiatsiyadan himoya qiluvchi vositalar (radioprotektorlar), kimyoviy moddalar ham kashf etildi. Nurlanish kasalligini davolashning samarali usullari ishlab chiqildi.

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 yo ionlashadi, yo bo'lmasa, uyg'ongan holatlarga o'tadi. Ko'p hollarda asosan ionlashgan jarayoni sodir bo'lib, bunda kamida bitta elektron chiqib ketadi:



bu yerda ko'rsatkich 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'qnashganda 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 zaryadlangan og'ir zarralarning moddadagi traektoriyasi deyarli to'g'ri chiziq bo'ladi.

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

- Birlik masofadagi energiya yo'qotishi yoki yo'qotilgan solishtirma ionlashtirish energiyasi

– $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$ bilan ifodalanadi.

- Zarraning moddadagi 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 ($x \ll \lambda$ hol uchun):

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \frac{4\pi n_e Z^2 z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{I(Z)}, \quad (3.2)$$

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

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

$$\Delta T_{max} = 2m_e \mathcal{G}^2, \quad (3.3)$$

(3.2) formula faqat $E \sim I(Z)$ shart bajarilganda o'rinli bo'ladi. Endi ushbu formuladan kelib chiqadigan xulosalarga to'xtalib o'tamiz. (3.2) 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 ionlashtirish potensialiga.

Buni ifoda ko'rinishida yozsak quyidagicha bo'ladi:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} \approx Z^2 n_e \phi(v). \quad (3.4)$$

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

$$n = \frac{Z \rho N_A}{A}, \quad (3.5)$$

bu yerda N_A – Avogadro soni; A – massa soni; Z – atomdagi elektronlar soni.

Demak ionizatsion yo'qotish modda zichligiga to'g'ri proporsional ekan. (3.2) formuladan kelib chiqadiki, zarralarning katta energiyalarida ($x \rightarrow s$ bo'lganda), ionizatsion yo'qotish monoton ravishda kamaya borishi kerak. Ammo amalda bu hol kuzatilmaydi yoki (3.1) formula aniq bo'lmay qoladi. Bu yerdan kelib chiqadiki, yuqori energiyalarda bu formula aniq bajarilmas ekan. Ushbu holni hisobga olib relyativistik hollar uchun quyidagi formula o'rinli bo'lar ekan:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rel} = \frac{4\pi n_e Z^2 z^2 e^4}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(Z)} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (3.6)$$

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

(3.6) 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 (3.6) formulaning mahrajida 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'tilganidek, zaryadlangan zarralarning modda orqali o'tishini tavsiflovchi yana bir kattalik bu zarraning moddadagi to'liq yugurish yo'li hisoblanadi. Zarra modda orqali o'tganda energiyasini yo'qotib keyin to'xtaydi. Zarraning moddada bosib o'tgan yo'li yugurish yo'li deyiladi. Bu kattalik zarra zaryadiga, massasiga va energiyasiga bog'liq bo'ladi. Yugurish yo'li R quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{-dE/dx}, \quad (3.7)$$

bu yerda E_0 - zarraning moddaga kelib tushguncha bo'lgan energiyasi. Yugurish yo'li uzunlik (m, sm, mkm) yoki «zichlik» (g/sm^2) o'lchov birliklarida aniqlanadi. Agar ionizatsion yo'qotish uchun (3.2) ifoda qo'llanilsa, u holda yugurish yo'li ifodasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$R = \frac{M}{z^2} f(\mathcal{G}), \quad (3.8)$$

bu yerdagi $f(\mathcal{G})$ 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 (3.8) formulaga qaraganda murakkab bo'lib, uning formulasi nazariy va tajriba natijalarini o'zaro taqqoslash yo'li bilan aniqlanadi.

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:

$$\bar{R}_\alpha = 0,31T^{3/2} sm; \quad 4 < T < 7 MeV \quad (3.9)$$

- Massa soni A bo'lgan moddada α -zarraning o'rtacha yugurish yo'li:

$$\bar{R}_\alpha = 0,56R_\alpha(sm)A^{1/3} mg/sm^2, \quad (3.10)$$

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

• Normal sharoitda T-kinetik energiyali protonning havodagi yugurish yo‘li:

$$R_p(T) = R_\alpha(4T) - 0,2 \text{ sm}; \quad T > 0,5 \text{ MeV}, \quad (3.11)$$

bu yerda R_α – kinetik energiyasi $4T$ bo‘lgan α -zarraning havodagi o‘rtacha yugurish yo‘li.

3.2-§. Zaryadlangan yengil zarralarning modda orqali o‘tishi

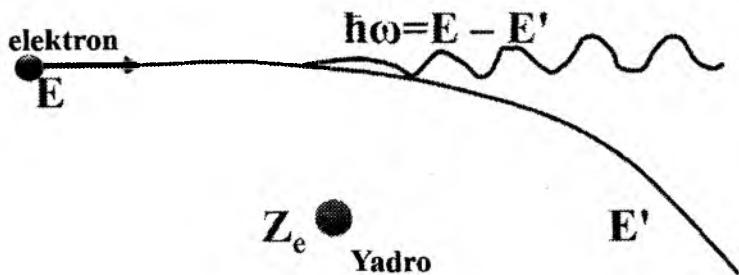
Zaryadlangan yengil zarralar, ya’ni elektron va pozitronlarning modda orqali o‘tishi barcha zaryadli og‘ir zarralarning modda orqali o‘tishidan keskin farq qiladi. Bunga asosiy sabab, elektron va pozitron massalarining kichikligidir. Moddaga uchib kelayotgan elektronlarning massasi kichikligidan, modda ichidagi har bir to‘qnashishda impulsleri 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 energiyasining bir qismini radiatsion effektga ham sarflaydi. Radiatsion effekt yoki radiatsion yo‘qotishda elektron atom qobig‘idagi elektronning yoki yadroning Kulon maydonida tormozlanishi natijasida uzluksiz spektrga ega bo‘lgan tormozlanish nurlarni hosil qiladi. Bu holda moddaga uchib kirgan elektron o‘z energiyasining bir qismini mazkur jarayon natijasida yo‘qotadi.

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

1. Ionlashtirishga
2. Nurlanishga

Elektronlarning radiatsion tormozlanishi. Zaryadli zarralar atom yadrosi va atom elektronlarining elektr maydonida tez tormozlanishi natijasida radiatsion (yoki tormozli) nurlanishlar chiqaradi (**3.1-rasm**).



3.1-rasm. Zaryadi Z_e bo'lgan yadroning Kulon maydonidagi elektronning tormozlanish nurlanishi.

Nurlanishga sarflangan energiya dE/dx_{nur} tezlanishning kvadrati-ga proporsionaldir, ya'ni \ddot{x}^2 . Tezlanish massaga teskari munosabatda bog'lanishga ega. Bu bog'lanish quyidagi ifodada berilgan:

$$\left(a^2 = \ddot{x}^2 \approx \frac{1}{m^2} \right)_{z=const}, \quad (3.12)$$

va

$$\left[\left(\frac{dE}{dx} \right)_{ion} \right]_{z=const} \sim \frac{1}{m^2} \quad (3.13)$$

Demak, zaryadlari bir xil bo'lgan zarralar uchun energiyaning nurlanishga sarflanishi, zarra massasining kvadratiga teskari proporsional bo'lar ekan. Ayniqsa, bu jarayon zaryadlangan yengil 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 moddadaagi atomlar konsentratsiyasiga, yadro zaryadiga va elektronlarning kinetik energiyalariga bog'liq bo'ladi:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{nur} \sim Z^2 n T_e \quad (3.14)$$

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 energiyaning spektri uzluksiz bo'ladi.

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

$$W_{torm} = 1,9 \cdot 10^3 (E_e - 0,511) Z^2 \rho d i/A, \quad (3.15)$$

bu yerda W_{torm} – tormozli nurlanishlar quvvati, W_t ; Y_{e_e} – nishonga tushayotgan elektronlar energiyasi, MeV; Z va A – mos holda atom zaryadi va massa soni; c – modda zichligi, kg/m^3 ; d – nishon qalinligi, m ; i – elektronlar oqimining tok kuchi, A .

Elektronning $T_e \sim m_e c^2$ 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:

$$\theta \approx \frac{m_0 c^2}{E_e} \approx \frac{0,511}{E_e}. \quad (3.16)$$

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

Elektron energiyasining ionlashtirishga va radiatsion nurlanishga yo'qotishlarini solishtirish. Past energiyali elektronlar o'z energiyasini asosan ionlashtirishga sarflaydi. 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 munosabatlardan foydalanish qulaydir:

$$\frac{(-dE/dx)_{rad}}{(-dE/dx)_{ion}} \approx \frac{ZE_c (MeV)}{800}. \quad (3.17)$$

Bu formuladan quyidagi kritik energiyani aniqlovchi ifodani olish mumkin:

$$E_{kr} = \frac{800}{Z}, \quad (3.18)$$

bu yerda Ye_{kr} – MeV larda o'lchanadi.

Oxirgi formulada Pb uchun $Ye_{kr} \approx 10 \text{ MeV}$, Al uchun $Ye_{kr} \approx 62 \text{ MeV}$. $Ye_e \gg E_{kr}$ bo'lganda ionlashtirish asosida 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 kamayadigan masofaga *radiatsion uzunlik* ($x = X_0$) deyiladi:

$$E_e = E_e^0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right). \quad (3.19)$$

X_0 ning qiymati Pb uchun $58 \frac{kg}{m^2}$ (yoki $5,8 \frac{g}{sm^2}$) dan, He uchun $850 \frac{kg}{m^2}$ 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 nurlanishga ega bo'lishini aniqladi. Bunday nurlanishlarning hosil bo'lishi boshqa zarralar, masalan elektronlar ta'sirida ham vujudga kelishi aniqlandi. 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.Y. Tamm va I.M. Franklar klassik elektrodinamik asosida nazariy tushuntirib berishdi. Ushbu kashfiyot uchun 1958-yilda P.A. Cherenkov, I.Y. 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 natijalar kelib chiqdi.

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

$$c' = c / n \quad (3.20)$$

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 harakatlaniishi mumkin. Bunda zarracha to'g'ri chiziqli tekis harakatlansa ham

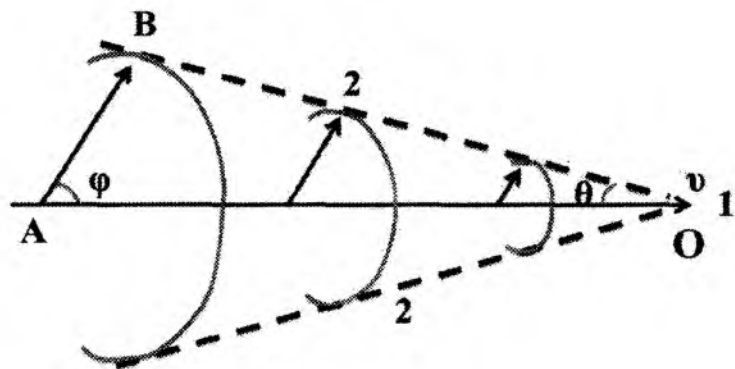
nurlanish hosil bo'ladi. Klassik elektrodinamikaga asosan tezlanishsiz o'zgarmas tezlikda harakatlanayotgan zarracha elektromagnit to'liqlar (yoki nurlanishlar) chiqarmaydi. Ammo bu effektida zarra tezlanishga ega bo'lmasa ham nurlanishlar chiqmoqda. Bu yerda elektromagnit to'liqlarning muhitdagi tarqalish tezligi nazarda tutilmoqda. Nisbiylik nazariyasiga asosan zarraning tezligi elektromagnit to'liqlarning 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 tezligi mazkur muhitdagi yorug'likning tarqalish tezligidan katta bo'lishi mumkin.

Zarra tomonidan chiqarilayotgan Vavilov-Cherenkov nurlanishlar to'liq fronti egiluvchi sferik to'liq hisoblanadi. Bu to'liq fronti (*nurlanishlar*) faqat zarra tezligi yorug'likning mazkur muhitdagi tarqalish tezligidan katta bo'lgandagina yuzaga keladi. Bu nurlanishlar zarra hatto tekis harakatlasa ham hosil bo'lar ekan. Bu yerdan $\vartheta < c/n$ bo'lganda Cherenkov nurlanishlar yuzaga kelmas ekan. Ushbu nurlanishlar chiqayotgan u burchakni 3.2-rasmdagi AVO uchburchakdan topish mumkin:

$$\cos \theta = \frac{AB}{AO} = \frac{c}{gn} \quad (3.21)$$

Vavilov-Cherenkov nurlanishida qisqa to'liqlar ko'p bo'lgani uchun u havorang bo'lib ko'rinadi.

Ko'pchilikda okeanning juda chuqur joylarida tim qorong'ilik (zimiston) bo'ladi, sababi yorug'lik suv sirtidan juda chuqur joylariga yetib bormaydi degan xato fikr shakllangan. Okean suvlaridagi radioaktiv izotoplarning, xususan, *kaliy-40* radioizotopi yemirilishi natijasida vujudga keladigan Vavilov-Cherenkov effekti hisobiga hattoki o'ta chuqur joylarda ham kuchsiz nurlarning mavjud ekanligi kuzatiladi. Shunday gipoteza mavjudki, bunga asosan chuqur suv ostida yashovchi mavjudotlar bunday kuchsiz nurlanishlarni ko'rish uchun ularning ko'zlari 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.



3.2-rasm. Vavilov-Cherenkov nurlanishi vujudga kelish sxemasi. 1-muhitda harakatlanayotgan zarra vujudga keltirgan nurlanish to'liqlarining fronti bo'lib, u zarra tezligi vektoriga u 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 aniqlanadi.

3.4-§. Sinxrotron nurlanishlar

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

Sinxrotron nurlanishlar nomi ushbu nurlanish hosil bo'lgan manba bilan bog'liq bo'lib, bu nurlanish birinchi marta elektron tezlatkich – sinxrotronda olingan. Sinxrotronda elektron doiraviy orbita bo'ylab ha-

rakatlanishi natijasida markazga intilma tezlanish hosil bo‘ladi va bu tezlanish natijasida sinxrotron nurlanishlar paydo 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 V bo‘lgan magnit maydon elektron nurlanishining to‘liq intensivligi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$I = \frac{2e^2 B^2 \gamma^2 \vartheta^2}{3m_e^2 c^5}, \quad (3.22)$$

bu yerda ϑ – elektron tezligi, γ – relyativistik faktor bo‘lib, u quyidagiga teng:

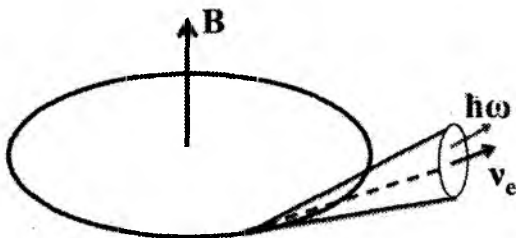
$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \vartheta^2 / c^2}. \quad (3.23)$$

Elektron magnit maydonida doira bo‘ylab bir marta aylanganda quyidagi energiya nurlanadi:

$$\Delta E = 88 E_e^4 / R \quad (3.24)$$

bu yerda E_e – elektronning energiyasi, GeV; R – aylanish radiusi, sm.

Relyativistik elektron uchun nurlanishning deyarli hamma qismi uning tezligi yo‘nalishida bo‘ladi va tor konus shaklida bo‘ladi (3.3-rasm).



3.3-rasm. Sinxrotron nurlanishning yo‘nalishi.

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

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{2e^2}{3m_e^4 c^7} H_{\perp}^2 E^2 = 0,98 \cdot 10^{-3} H_{\perp}^2 \cdot \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 eV/sek \quad (3.25)$$

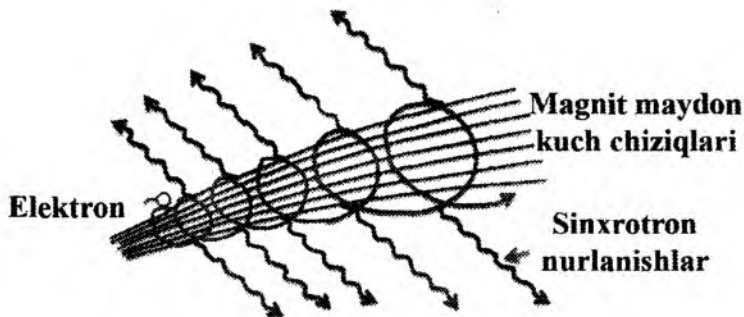
bu yerda e – zarra zaryadi, H_{\perp} – zarra tezligiga perpendikular bo‘lgan magnit maydon kuchlanganligining tashkil etuvchisi. Mazkur ifodadan ko‘rinadiki, nurlanish quvvati (yoki intensivligi) zarra massasiga teskari proporsional bo‘lib, bu nurlanishning quvvati yengil zarralarda (elektron va pozitron) katta bo‘ladi. Shu sababli sinxrotron nurlanishlar manbai sifatida elektron tezlatkichlar 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 u *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 qutblangan elektronlar dastasini hosil qilish uchun qo‘llaniladi.

Keyingi vaqtlarda intensiv va nozik dasta ko‘rinishida yo‘nalgan sinxrotron nurlanishlar, elektromagnit nurlanishlarning modda bilan o‘zaro ta‘sirini o‘rganilayotgan zamonaviy fanlarning deyarli hammasohalarida keng qo‘llanilmoqda. Tibbiyotda esa tashxis qo‘yishda va davolashda foydalanilmoqda. 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 tezlatkich sinxrotron nurlanishlar manbalari sifatida ishlab turibdi, 40 tasi qurilmoqda.

Sinxrotron nurlanishlar astrofizikada ham keng tarqalgan va turli obyektlarda (magnit maydon va relyativistik zarralar mavjud bo‘lgan obyektlar) asosiy rol o‘ynaydi. Katta tezlik bilan ketayotgan elektron o‘z yo‘lida kuchli magnit maydoniga uchrasa, ushbu maydon magnit kuchlari elektronning traektoriyasini burib, spiral ko‘rinishga olib keladi. Elektronlar magnit maydon chiziqlari atrofida aylanma harakat qiladi va sinxrotron nurlanishlar hosil bo‘ladi (**3.4-rasm**). Bunday magnit maydonlar yulduzlararo fazoni egallagan bo‘ladi.



3.4-rasm. Sinxrotron nurlanishlarning hosil bo'lishi.

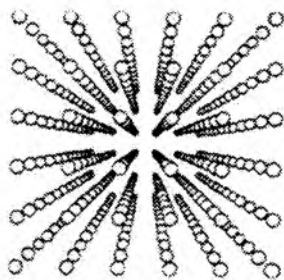
Sinxrotron nurlanishlarning tibbiyotda qo'llanilishiga misol qilib ularning rentgen sohasida qo'llanilishini keltirish mumkin. Bizga ma'lum bo'lgan rentgen trubkalarda hosil qilinayotgan rentgen nurlar yordamida tashxis qo'yish metodi keng qo'llanilishiga qaramasdan mazkur metod ayrim kamchiliklardan holi emas. Birinchidan, rentgen nurlari yordamida olingan rasmlar sifati (kontrasti) hamma vaqt ham vrachlarni qoniqtirmaydi.

Tekshirilayotgan obyektning tiniqlik darajasi, uning 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 yetarlicha 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. Obyektning qalindigi va zichligiga mos holdagi energiyaga ega bo'lgan monoxromatik fotonlar yordamidagina sifatli (kontrasti yaxshi bo'lgan) rasmlar olish mumkin. Rentgen trubkasi bilan nurlantirilganda fotonlarning ko'pchiligi «befoyda» ketadi va nurlanish dozasi oshiradi. Bu muammolarni oson hal qilish yo'li bu sinxrotron nurlanishlarning rentgen sohasidan foydalanishdir. Hozirgi kunda bu tashxis metodi tibbiyotda keng qo'llanilmoqda.

3.5-§. Zaryadlangan zarralarning kanallashishi.

Kanallashish sharti. Lindxard burchagi

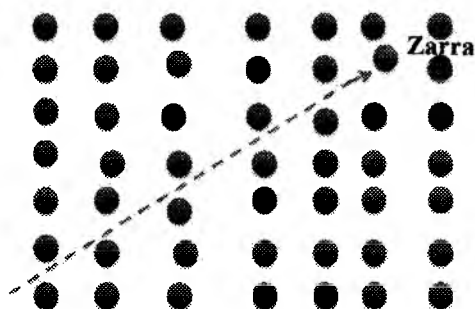
Zaryadlangan zarralar kuchsiz tartiblangan qattiq obyektga kelib tushganda ularning sochilishi ma'lum bir darajada xaotik bo'ladi. Bunga sabab, ular alohida atomlar bilan to'qnashadi. Agar zaryadlangan zarralar nozik dastasi ma'lum bir burchak ostida kristallga kelib tushsa, u holda alohida atomlarda sochilish kooperativ effektga olib keladi, ya'ni atomlar zanjiri yoki tekisliklari tomonidan zarralar harakati yo'naltiriladi (kanallashtiriladi). Monokristall ichida atomlar parallel qatori yoki tekisliklari hosil qilgan «kanallar» bo'ylab zaryadlangan zarralarning harakatiga zaryadlangan zarralarning kanallashishi deyiladi. Zaryadlangan zarralarning kristallarda kanallashish hodisasi 1961-yilda M.T. Robinson va O.S. Oen tomonidan oldindan aytilgan bo'lib, u 1963-yilda tajribada kuzatildi. Zaryadlangan zarralarning bunday kanallashgan harakati ularning kristall ichiga chuqur kirib borishiga imkon beradi. Kristalldagi asosiy kristallografik yo'nalishlar bo'ylab atomlar qatorlari (zanjiri) shakllantirgan kanallari *3.5-rasm*da ko'rsatilgan.



3.5-rasm. Kristalldagi asosiy kristallografik yo'nalishlar bo'ylab atomlar qatorlari (zanjiri) shakllantirgan kanallar.

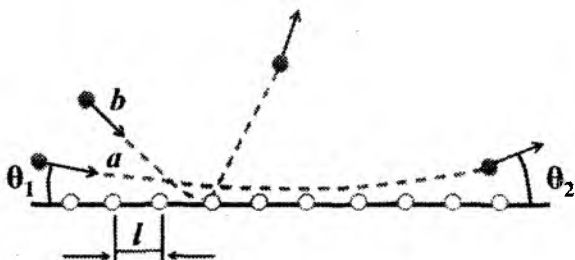
Kristallning simmetriya tekisligi bo'ylab harakatlanayotgan zaryadlangan zarralar odatdagidan boshqacharoq bo'ladi, ya'ni ular alohida (yakka) atomlar bilan o'zaro ta'sirlashmasdan, balki atom tekisliklari yoki qatorlari bilan o'zaro ta'sirlashadi. Kristallarda zaryadlangan zarralarning kanallashishi zarralarning bir-biriga parallel bo'lgan atomlar

qatorlari hosil qilgan «kanallar»dagi harakatidir. Bunda zarralar ularni mazkur kanallarda ushlab turuvchi atomlar qatorlari bilan sirpanuvchi (sirgʻanuvchi) (impuls deyarli oʻzgarmaydi) toʻqnashishlarni «boshidan kechiradi» (3.6-rasm).



3.6-rasm. Zaryadlangan zarralarning kristallarda kanallashuvi.

Zaryadlangan zarralarning kanallashuvi, aksial va tekislikdagilar-dan farq qiladi. Kanallashuv zaryadlangan zarralar dastasi monokristal-lga uning kristallografik oʻqlarining biriga kichik ϑ_1 burchak ostida tushganda kuzatiladi. Bunda tez harakatlanayotgan musbat zaryadlangan zarra (masalan, proton) kristallografik oʻqqa parallel boʻlgan atomlar qatoriga (zajiriga) yaqinlashadi va ketma-ket sodir boʻlgan kuchsiz sochilishlar natijasida oʻz traektoriyasini silliq egri chiziq koʻrinishida oʻzgartiradi. Bu yerda zarralarning atomlar zanjiridan deyarli koʻzguşimon qaytishi sodir boʻladi ($\vartheta_2 = \vartheta_1$; 3.7-rasm)dagı «a» egri chiziq).



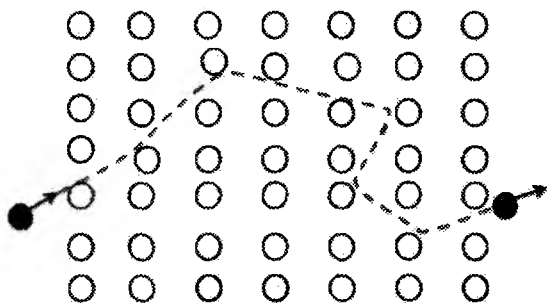
3.7-rasm. Zaryadlangan zarralarning kristaldagi traektoriyasi:
1) $\vartheta < \vartheta_L$ («a» egri chiziq); 2) $\vartheta > \vartheta_L$ («b» egri chiziq).

Nazariyadan kelib chiqadiki, bunday «ko'zgusimon» sochilishlar $\vartheta < \vartheta_L$ (ϑ_L – Lindxard burchagi) bo'lganda kuzatiladi.

Lindxard burchagi quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi:

$$\vartheta_L = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{El}}. \quad (3.26)$$

bu yerda $Z_1 e$, $Z_2 e$ – mos holda harakatlanayotgan zarra va mono-kristall atom yadrolarining zaryadlari, E – zarralar energiyasi, l – qator-dagi (yoki zanjirdagi) qo'shni atomlar orasidagi masofa (**3.8-rasm**). ϑ_1 burchakning qiymatini $\vartheta > \vartheta_1$ gacha oshirganda, zarralarning harakatlanish xususiyati o'zgaradi.

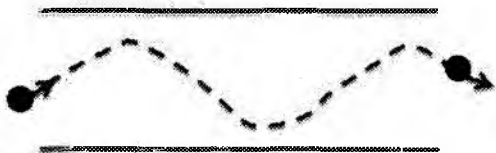


3.8-rasm. Ko'ndalang tekislikda bunday zarraning harakati umumiy holda tasodifiy «tentirash»ni ifodalaydi.

Zarra atom yadrosi bilan yaqindan to'qnashishi mumkin. Buning natijasida ular katta burchaklarga sochiladi (b – egri chiziq) bu notartib muhitdagi harakatga o'xshaydi. ϑ_L – Lindxard burchagi gradusning ulushlari tartibida bo'ladi. Qalin kristallda zaryadlangan zarralar aksial kanallashuvi rejimida harakatlanib, turli atom qatorlaridan ketma-ket «ko'zgusimon» qaytish aktlari yuz beradi.

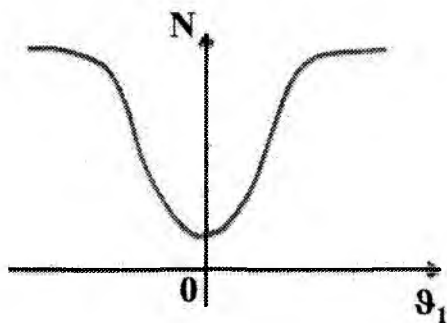
Tekislikdagi zaryadlangan zarralar kanallashishi kristallograf tekislikka nisbatan kichik burchak ostida tushganda kuzatiladi.

Ushbu holda zarralar qo'shni tekisliklardan galma-gal qaytadi va uning traektoriyasi sinusoidani eslatadi (**3.9-rasm**). Bunda zarra yadrodan ma'lum bir uzoqlikda ushlab turiladi.



3.9-rasm. Tekislikdagi zaryadlangan zarralar kanallashishi.

Zaryadlangan zarralar kanallashishi, monokristalli nishonda yadro reaksiyalari yuz berganda ular mahsulotlarining burchak taqsimotida yaqqol namoyon bo‘ladi (3.10-rasm). $\vartheta_1 = 0$ bo‘lganda nishondan chiqayotgan 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 reaksiyalarining yuz berishi sezilarli kamayadi.



3.10-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. $\vartheta_1 < \vartheta_L$ bo‘lganda ichki elektron qobiqdan xarakteristik rentgen nurlar chiqishi kamayadi. Kanallashgan zarralarning yugurish yo‘li, zaryadlangan zarralar kanallashish hodisasi sodir bo‘lmagan zarralarning yugurish yo‘liga nisbatan sezilarli ravishda katta bo‘ladi.

Bunga sabab, bir tomondan yadro bilan yaqindan to'qnashish mavjud emasligi yadroviy energiya yo'qotishni kamayishi bo'lsa, ikkinchi tomondan esa kanallashgan zarralar traektoriyasi elektron zichligi kamaygan sohada bo'lishidir. Bu o'z navbatida ionlashtirishning kamayishiga olib keladi.

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

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

Gamma-kvanti zaryadga ega bo'lmagani uchun muhit atomlarini bevosita ionlashtira olmaydi.

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

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (3.27)$$

yoki

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.28)$$

bu yerda N_0 , I_0 – qalinligi x bo'lgan modda qatlamiga kelib tushayotgan g-kvantlar soni yoki intensivligi; N , I – ushbu qatlamdan o'tgan g-kvantlar soni yoki intensivligi; μ – chiziqli yutilish koeffitsienti m^{-1} . $1/\mu$ kattalik g-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 raqamiga, shuningdek, g-kvantlar energiyasiga bog'liq bo'ladi:

$$\mu = \mu(\rho, Z, E_\gamma) \quad (3.29)$$

Chiziqli 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 koeffitsientining o'lchov birligi – m^2/kg . Hisoblashlarda massaviy yutilish koeffitsientidan foydalanganda modda qalinligini kg/m^2 birlikda ifodalash qulaydir.

Agar g-kvantlarning yutilishi bir necha turli jarayonlar hisobiga bo'lsa, u holda har bir jarayonning mos holda o'z μ_i yutilish koeffitsi-

entlari bo'radi. Bu jarayonlarning to'la yutilish koeffitsienti barcha μ_i koeffitsientlar yig'indisiga teng bo'radi:

$$\mu = \sum_i \mu_i. \quad (3.30)$$

bu yerdagi μ va μ_i kattaliklar o'lchami m^{-1} (sm^{-1}).

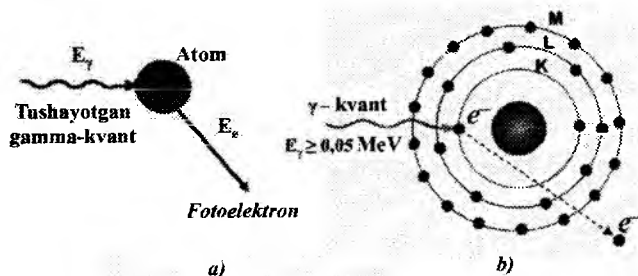
Yutilish koeffitsienti g-kvantlarning modda orqali o'tishi jarayonini to'liq tavsiflaydi va u ko'rilayotgan jarayonning to'la kesimiga bog'liq bo'radi. Har bir jaryonning to'liq kesimi yutilish koeffitsienti bilan quyidagicha bog'langan bo'radi:

$$\mu_i = n_i \sigma_i, \quad (3.31)$$

bu yerda n_i – yutuvchi (yoki sochuvchi) markazlar konsentratsiyasi.

Fotoyadro reaksiyalarini hisobga olmaganda g-kvantlar modda orqali o'tganda quyidagi jarayonlar yuz beradi: a) fotoeffekt, b) Kompton effekti, v) elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi.

Fotoeffekt. Bu jarayonda g-kvant atom tomonidan yutiladi va undan elektron chiqib ketadi (3.11-rasm).



3.11-rasm. Fotoeffekt jarayonining sxemasi.

Yanada aniqroq qilib bayon etilsa, fotoeffekt jarayonida g-kvant butun energiyasini uchragan atom elektronlaridan biriga beradi va g-kvant butunlay yo'q bo'radi, elektron esa atomdan chiqib ketadi. Bu elektronning energiyasini energiya saqlanish qonunidan foydalanib aniqlaymiz:

$$E_e = E_\gamma - I_i - E_{ya} \quad (3.32)$$

bu yerda I_i – atomning elektron chiqayotgan i – qobiqdagi ionlashtirish potentsiali (elektronning bog'lanish energiyasi), E_e – yadroning tepki energiyasi, E_e – fotoeffekt natijasida chiqqan elektron kinetik energiya-

si, E_g – g-kvant energiyasi. Yadro tepki energiyasi qiymati juda kichik bo‘lganligi sababli uni e‘tiborga olmasa ham bo‘ladi.

Fotoeffekt yuz berishi uchun $E_g > I_i$ shart bajarilishi lozim. $E_g < I_K$ shart bajarilganda fotoeffekt faqat L-, M- va h.k. qobiqlarda yuz beradi. K – qobiqda esa yuz bermaydi. $E_g < I_L$ 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 beradi. 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 qobig‘idagi elektronlarga ham berishi mumkin. Ushbu holda atomdan energiyasi E_e bo‘lgan fotoelektronlardan tashqari, energiyasining qiymati jihatidan ionlashtirish 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‘rta bo‘lgan atomlarda kuzatiladi.

Fotoeffekt yuz berish ehtimolligi atom tartib raqamiga kuchli bog‘langan bo‘ladi, ya‘ni: $y_f \sim Z^5$. 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 $E_g > E_K$ sohalarida K-qobiqda fotoeffekt yuz berish kesimi:

$$\sigma_f^{[K]} \sim \frac{Z^5}{(E_\gamma)^{3/2}}. \quad (3.33)$$

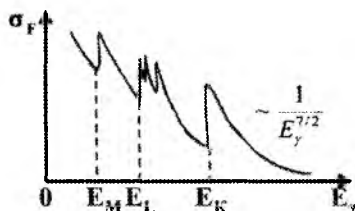
Mazkur jarayonning to‘liq kesimi quyidagiga teng:

$$\sigma_f \approx \frac{5}{4} \cdot \sigma_f^{[K]}. \quad (3.34)$$

Shuningdek, fotoeffektning turli qobiqlarda yuz berish kesimlari orasida quyidagi munosabat aniqlangan:

$$\frac{\sigma_f^{[L]}}{\sigma_f^{[K]}} \approx \frac{1}{5} \quad \text{va} \quad \frac{\sigma_f^{[M]}}{\sigma_f^{[L]}} \approx \frac{1}{4} \quad (3.35)$$

3.12-rasmda fotoeffekt kesimining g-kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan.

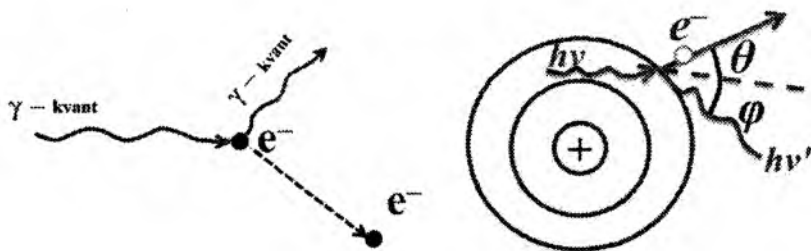


3.12-rasm. Fotoeffekt kesimining g-kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan.

Rasmdan ko'rinadiki, g-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_g ning kamayishi bilan kesim dastlab $1/E_g$ qonuni bo'yicha, keyin $1/E_g^{7/2}$ qonuni bo'yicha oshib boradi.

Fotoeffekt jarayoni og'ir moddalarda kichik energiyali g-nurlanishlarning yutilishida asosiy mexanizm hisoblanadi. Masalan, aluminida $E_g < 60$ keV energiyalarda, qo'rg'oshinda esa $E_g < 600$ keV energiyalar sohalarida fotoeffekt jarayoni ustunlik qiladi.

Kompton effekti. Gamma-kvanti erkin yoki kuchsiz bog'langan elektron bilan o'zaro ta'sirlashganda, energiyasining faqat bir qismini elektronga beradi (3.13-rasm).



3.13-rasm. Kompton effektining yuz berish sxemasi.

Bunda sochilish burchagiga qarab, elektron noldan boshlab maksimal qiymatlarni energiya oralig'ida qabul qilishi mumkin. (Kompton sochilishidagi elektronlarning maksimal energiyasi):

$$E_{\max} = \frac{E_{\gamma}}{1 - \frac{m_0 c^2}{2E_{\gamma}}} \quad (3.36)$$

bu yerda m_0 – elektronning tinchlikdagi massasi, s – yorug'lik tezligi ($m_0 \cdot s^2 = 0,511 \text{ MeV}$).

Kompton sochilishining differensial kesimini Kleyn – Nishina – Tamm formulasi bo'yicha topish mumkin:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{E'_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)^2 \left[\frac{E_{\gamma}}{E'_{\gamma}} + \frac{E'_{\gamma}}{E_{\gamma}} - \sin^2 \theta \right] Z, \quad (3.37)$$

bu yerda $r_0 = e^2 / m_e c^2$ – elektronning klassik radiusi, Z – atomning tartib raqami, E_0 – fotonning boshlang'ich energiyasi, E' – sochilgan foton energiyasi, θ – sochilish burchagi.

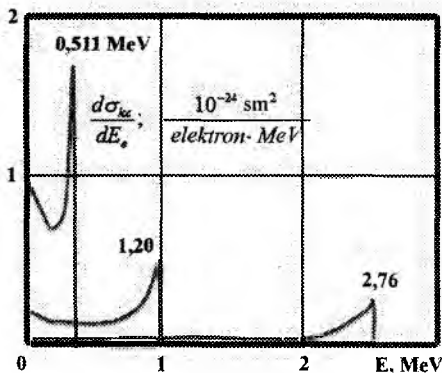
Keltirilgan munosabat, Z ta elektronda (ya'ni tartib raqami Z bo'lgan atomda), birlik fazoviy burchak va θ – burchak yo'nalishida Kompton sochilish ehtimolligini topishga imkon beradi.

Kompton sochilishi to'liq kesimini (3.37) ifodaning to'liq fazoviy burchak bo'yicha integrallash orqali olish mumkin:

$$\sigma_k = \pi \cdot r_0^2 \frac{Z}{\gamma} \left\{ \left[1 - 2 \frac{(\gamma + 1)}{\gamma^2} \right] \ln(2\gamma + 1) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\gamma} - \frac{1}{2} (2\gamma + 1) \right\}, \quad (3.38)$$

bu yerda $\gamma = E_{\gamma} / m_e c^2$.

3.14-rasmda tepki elektronlarning (Kompton elektronlari) spektri keltirilgan. Bu yerda yuqori energiyalarda Kompton elektronlarining taqsimoti deyarli teng ehtimollikka ega bo'lib, faqat fotonlar energiyasi-ga yaqin sohadagina sezirali darajada o'sishi kuzatiladi.



3.14-rasm. Tepki elektronlar spektri.

Har bir elektron sochilish jarayonida alohida qatnashganligi sababli sochilish kesimi Z ga proporsional bo‘ladi, ya’ni: $y_k \sim Z/E_k$.

$hN \sim mc^2$ bo‘lganda (3.38) formula quyidagi ko‘rinishga o‘zgaradi:

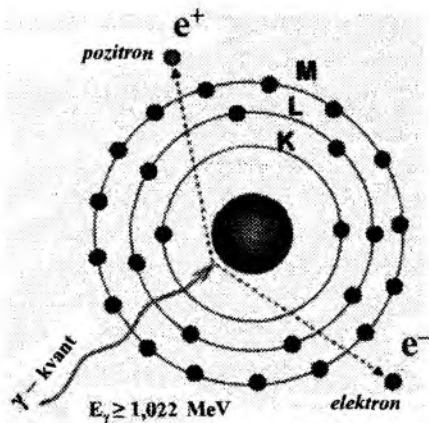
$$\sigma_k \sim \frac{NZ}{E_\gamma} \left(\ln \frac{2E_\gamma}{mc^2} + \frac{1}{2} \right), \quad (3.39)$$

bu yerda N – hajm birligida atomlar soni.

Elektron-pozitron juftining hosil bo‘lishi. Gamma-kvantlarning yetarlicha yuqori energiyalarida ($E_\gamma \geq 2m_e c^2$) fotoeffekt va Kompton effektlari bilan bir qatorda uchinchi bir jarayon, ya’ni g-kvantlarning modda bilan o‘zaro ta’sirlashishi natijasida elektron-pozitron juftining hosil bo‘lishi jarayoni yuz beradi (3.15-rasm).

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 ($E_\gamma \geq 2m_e c^2$).

Bo‘shliqda bitta fotondan 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.



3.15-rasm. Elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi sxemasi.

Yadroning Kulon maydonida elektron va pozitronlar juftining hosil bo'lishi uchun quyidagi shart bajarilishi lozim:

$$E_{\gamma} \geq 2mc^2 = 1,02 \text{ MeV}. \quad (3.40)$$

Atom qobig'idagi elektronlarning Kulon maydonida elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:

$$E_{\gamma} = 4mc^2 = 2,04 \text{ MeV} \quad (3.41)$$

Elektron-pozitron jufti hosil bo'lishi kesimi g-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:

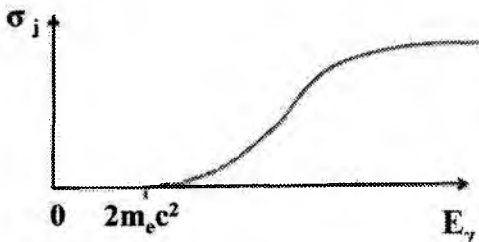
$$\sigma_{juft} = \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left[\frac{28}{9} \ln \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2} - \frac{218}{27} \right] \quad (3.42)$$

Ekranlovchi ta'sirni hisobga olganda va $E_{\gamma} \sim 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$ energiyalar sohasida:

$$\sigma_{juft} = \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left[\frac{28}{9} \ln(183Z^{-1/3}) - \frac{2}{27} \right] \quad (3.43)$$

$E_{\gamma} \sim 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$ kattalik qiymati aluminiy uchun 30 MeV va qo'rg'oshin uchun 15 MeV atrofida bo'ladi. **3.16-rasm**da elektron-pozitron jufti hosil bo'lish kesimining g-kvantlar energiyasiga bog'lanishi keltirilgan. Elektron va pozitronlar jufti hosil bo'lish kesimi oldin keskin oshib borib, keyin sekinlashadi va yuqori energiyalar sohasida, ya'ni $E_{\gamma} \sim 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$ o'zgarmas qiymatga erishadi.

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.



3.16-rasm. Elektron-pozitron jufti hosil bo'lish kesimining g-kvantlar energiyasiga bog'lanishi.

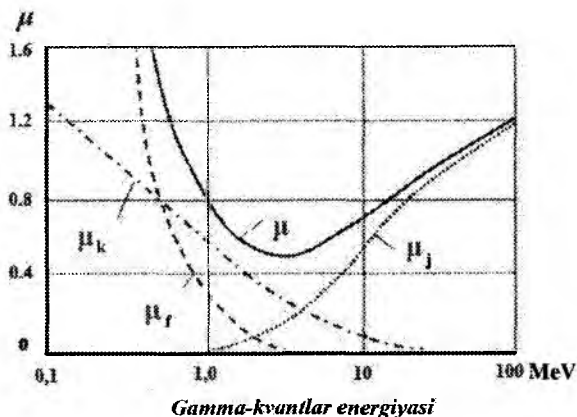
Gamma-kvantlarning to'la yutilish koeffitsienti va kesimi. Gamma-kvantlar modda orqali o'tganda fotoeffekt, Kompton effekt va elektron-pozitron jufti hosil bo'lish effektlariga energiyasini sarflaydi. Gamma-kvantlarning moddada to'liq yutilish koeffitsienti, yuqorida ko'rib chiqilgan uch jarayon yutilish koeffitsientlari yig'indisiga teng, ya'ni:

$$\mu = \mu_f + \mu_{komp} + \mu_{juft} \quad (3.44)$$

yoki ushbu jarayonlarni yuz berish kesimlari orqali ifodalasak:

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_{komp} + \sigma_{juft} \quad (3.45)$$

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, $E_g \geq 2m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ 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 3.17-rasmida qo'rg'oshin misolida keltirilgan.



3.17-rasm. Qo'rg'oshin uchun g-nurlar chiziqli yutilish koeffitsientining g-kvantlar energiyasiga bog'lanishi.

Gamma-kvantlar modda orqali o'tganda sodir bo'ladigan uchta jarayonning asosiy ustunlik qiladigan energiyalar diapazoni ma'lum bir moddalar, ya'ni havo, aluminiy, temir va qo'rg'oshinlar misolida 3.1-jadvalda keltirilgan.

Yuqorida bayon qilingan uchta o'zaro ta'sir jarayoni to'liq massaviy yutilish koeffitsientiga o'z hissasini qo'shadi. Bu uchta jarayoning nisbiy ulishi g-kvantlar energiyasiga va moddaning atom raqamiga bog'liq bo'ladi.

3.1-jadval.

Gamma-nurlanishlarning havo, aluminiy, temir va qo'rg'oshinlardan o'tish.

Modda	Gamma-kvantlar energiyasining o'zgarish diapazoni, E_g , MeV		
	Fotoeffekt	Kompton-effekt	Elektron-pozitron juftining hosil bo'lishi
Havo	<0,02	$0,02 < E_g < 23$	>23
Aluminiy	<0,05	$0,05 < E_g < 15$	>15
Temir	<0,012	$0,12 < E_g < 9,5$	>9,5
Qo'rg'oshin	<0,50	$0,50 < E_g < 4,9$	>4,7

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Radioaktiv ^{32}R preparati chiqarayotgan β -zarralarning havo, aluminiy va qo'rg'oshin uchun yarim yutilish qatlami qalinligi hisoblangin.

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

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\mu d_{1/2}} \quad (2)$$

yoki

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu d_{1/2}} \quad (3)$$

Bu ifodani logarifmlab qidirilayotgan yarim yutilish qatlamining qalinligini aniqlaymiz:

$$d_{1/2} = \ln 2 / \mu \quad (4)$$

^{32}R radioizotop uchun beta-zarralar maksimal kinetik energiyasi $T_{\beta\text{max}} = 1,71$ MeV. Beta-zarralar energiyasi $0,5 < T_{\beta\text{max}} < 6$ MeV bo'lsa, massaviy yutilish koeffitsienti bilan beta-zarralar kinetik energiyasi orasida quyidagi munosabat o'rinli bo'ladi:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{22}{T_{\beta\text{max}}^{4/3}} \quad (5)$$

bu yerda c – modda zichligi. Bu munosabat yordamida μ_{havo} , μ_{Al} va μ_{Pb} koeffitsientlarni aniqlaymiz va bu qiymatlarni (4) ifodaga qo'yib quyidagi qiymatlarni olamiz:

$$d_{1/2}(\text{havo}) = 50 \text{ sm} \quad (6)$$

$$d_{1/2}(\text{Al}) = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ sm} \quad (7)$$

$$d_{1/2}(\text{Pb}) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ sm} \quad (8)$$

Javob: 50 sm; $2,4 \cdot 10^{-2}$ sm; $5,7 \cdot 10^{-3}$ sm.

2-masala. Zaryadli og'ir 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: Zaryadli og'ir 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 ionizatsion yo'qotishlari quyidagiga teng:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \frac{4\pi e^4 z_1^2}{mv^2} ZNB, \quad (1)$$

bu yerda Z – yutuvchi moddaning atom raqami, N – 1 sm^3 hajmdagi atomlar soni, V – moddaning ionizatsiya potensialiga kuchsiz bog'langan tormozlanish koeffitsienti. Bu bog'lanishni e'tiborga olmagan holda, Ye_1 energiyali zarraning yugurishini topamiz:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)} \cong \frac{f(E)}{ZN} = \frac{f(E)}{ZN_A \rho} A \quad (2)$$

bu yerda N_A – Avogadro soni, $f(E)$ zarraning xususiyatlariga bog'liq va yutuvchi moddaga bog'liq bo'lmagan kattalik. Yengil va o'rtacha yutgichlar uchun $Z/A = 1/2$, va $R \cdot \rho = R(\frac{g}{sm^2})$. Demak, bunday yutuvchi moddalar uchun $R\rho$ ko'paytma 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:

$$\frac{T_p}{T_\alpha} = \frac{m_p v_p^2 / 2}{m_\alpha v_\alpha^2 / 2} = \frac{m_p}{m_\alpha} \approx \frac{1}{4} \quad (1)$$

Energiyasi $T_\alpha = 40\text{ MeV}$ bo'lgan zarraning havodagi chiziqli yugurishi:

$$R_\alpha = 0,148 \quad T_\alpha^{1,8} = 114\text{ sm} \quad (2)$$

Havoda bir xil boshlang'ich tezlik bilan harakatlanayotgan ikki turdagi zarrachalar uchun chiziqli yugurishlar nisbati:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2 \quad (3)$$

bu yerda m_1 va m_2 – zarralar massalari, q_1 va q_2 – esa ularning zaryadlari. Bizning hol uchun:

$$\frac{R_p}{R_\alpha} = \frac{m_p}{m_\alpha} \left(\frac{2e}{e} \right)^2 = 4 \frac{m_p}{m_\alpha} = 4 \cdot \frac{1}{4} = 1 \quad (4)$$

bu yerdan R_p ni topamiz:

$$R_p = R_\alpha = 114 \text{ sm} \quad (5)$$

Javob: 114 sm.

4-masala. Kinetik energiyasi 0,2 MeV bo'lgan alfa zarra, proton va elektronlarning fotoemulsiyadagi qora izlar zichliklari nisbatlarini taxminiy baholang.

Yechilishi: Norelyativistik zarralar uchun ionizatsion yo'qotishlar nisbatlari quyidagiga teng:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_\alpha : \left(\frac{dE}{dx} \right)_p : \left(\frac{dE}{dx} \right)_e \cong \frac{Z_\alpha^2}{v_\alpha^2} : \frac{1}{v_p^2} : \frac{1}{v_e^2} = 4m_\alpha : m_p : m_e \quad (1)$$

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:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_e : \left(\frac{dE}{dx} \right)_p = \frac{2\pi e^4 zN \left\{ \ln \frac{E_e^2}{2I^2 \sqrt{1 - \beta_e^2}} + \frac{1}{8} \right\}}{4\pi e^4 zN \ln \frac{mc^2}{I^2 (1 - \beta_p^2)}} \quad (1)$$

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~100 eV ga teng.

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta_e^2}} = \frac{E_e}{mc^2} = 2 \cdot 10^4; \quad \frac{1}{\sqrt{1-\beta_p^2}} = \frac{E_p}{m_p c} \cong 10 \quad (2)$$

ekanligidan ionizatsion yo‘qotishlar nisbatini topamiz:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_e : \left(\frac{dE}{dx} \right)_p \cong 2 \quad (3)$$

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: $R = 3,3 \text{ mg/sm}^2$*).

3.2. Fotoemulsiyadagi zarralar izining oxiri nima uchun kengayishi-ni 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 himo-yanlanish uchun aluminiydan tayyorlangan ekran qalinligini aniqlang. (*Javob: 3 mm*).

3.5. Energiyasi $E_\alpha = 5 \text{ MeV}$ bo'lgan α -zarrachaning berilliydagi ($A = 9, \rho = 1800 \text{ kg/m}^3$) massaviy va chiziqli yugurishi topilsin. (*Javob: 33,5 g/m³, 18,5 mkm*).

3.6. Energiyasi 1 MeV bo'lgan gamma-kvantlar oqimini 1000 marta kamaytiruvchi quyidagi yutuvchi moddalarning qalinligini toping: 1) qo'rg'oshin; 2) graffit. Energiyasi 1 MeV gamma-kvant-ni qo'rg'oshinda oqim kamayishi effektiv kesimi 24 barn. (*Javob: $x(\text{Pb}) = 8,5 \text{ sm}$; $x(^{12}\text{C}) = 40 \text{ sm}$*).

3.7. Erkin elektronda fotoeffekt hodisasi sodir bo'lmashligini ko'rsating.

3.8. Vakuumda gamma-kvant elektron-pozitron juftiga aylanmasli-gini isbot qiling.

NAZORAT SAVOLLARI

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 ionlashtirish asosida 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 SAVOLLARI

1. Ionizatsiya jarayoni deb ... aytiladi.
A) Neytral atom yoki molekulalardan ionlar hosil bo'lishga
B) Ionlardan molekularlar hosil bo'lishiga
C) Kimyoviy elementlardan molekularlar hosil bo'lishiga
D) Molekulalardan atomlar hosil bo'lishiga
2. O'rtacha ionlashtirish asosida 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 yengil 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 uygʻonish va ionizatsiya jarayoni
- C) Ion va protonlar hosil boʻladi
- D) Pozitron va neytronlar hosil boʻladi

6. Zaryadlangan yengil zarralar modda orqali oʻtganda asosan qanday jarayonlar sodir boʻladi?

- A) Pozitron va neytronlar hosil boʻladi
- B) Modda atomlarining uygʻonish va ionizatsiya jarayoni
- C) Ionizatsiya jarayoni
- D) Modda atomlarining uygʻonishi, ionizatsiya va radiatsion nurlanishlar jarayoni

7. Solishtirma ionlashtirish asosida yoʻqotish qanday kattaliklarga bogʻliq boʻladi?

- A) Muhitdagi elektronlar konsentratsiyasiga, zarraning tezligi va zaryadiga
- B) Muhitdagi elektronlar konsentratsiyasiga
- C) Muhitdagi atomlar zaryadiga va diffuziya koeffitsientiga
- D) Muhitning harorati va massasiga

8. Zarralarning muhitdagi yuugurish yoʻli deb ... aytiladi.

- A) Zarraning muhitda toʻxtaguncha bosib oʻtgan yoʻliga;
- B) Zarraning muhitda ikki marta bosib oʻtgan yoʻliga;
- C) Zarraning muhitda energiyasi ikki marta kamayguncha bosib oʻtgan yoʻliga;
- D) Zarraning muhitdan tashqarida bosib oʻtgan yoʻliga

9. Zarraning muhitdagi yoʻlining uzunligi qanday kattalikka bogʻliq boʻladi?

- A) Zarraning hajmiga
- B) Zarraning traektoriyasiga
- C) Zarra energiyasiga
- D) Zarraning de Broyl toʻlqin uzunligiga

10. Elektronlar uchun radiatsion yoʻqotishi qanday kattaliklarga bogʻliq boʻladi?

- | | |
|---|---|
| A) $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{top}} \approx Z^2 n T_e$ | C) $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{top}} \approx 2AZ^2 n$ |
| B) $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{top}} \approx \sqrt{46} Z^2 n T_e$ | D) $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{top}} \approx 300 n T_e$ |

11. Yuqori energiyalarda, ya'ni radiatsion nurlanishlar ustunlik qiladigan energiyalar muhitida zarra energiyasi qanday qonuniyat bo'yicha kamayadi?

A) $E = E_0 e^{-x}$

C) $E = E_0 2^{-x/t}$

B) $E = E_0 e^{-x/t}$

D) $E = E_0 \sqrt{2} e^{-x}$

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 harorati oshganda

13. Sinxroton nurlanishi qanday hosil bo'ladi?

A) Zaryadlangan zarra harakatlanayotgan muhitning harorati 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) $J = J_0 e^{-\mu x}$

C) $J = J_0 e^{-\mu \sqrt{2} x}$

B) $J = J_0 2^{-\mu x}$

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 harorati va zichligiga

C) Gamma-kvant energiyasi va yugurish yo'lining uzunligiga

D) Muhitning xususiyati va gamma-kvant energiyasiga

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 energiyasi 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) $E_\gamma > 2m_e c^2 + 511$

C) $E_\gamma > 2m_e c^2$

B) $E_\gamma < 2m_e c^2$

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) $E_\gamma > 4m_e c^2$

C) $E_\gamma > 2m_e c^2 + 511$

B) $E_\gamma > 2m_e c^2$

D) $E_\gamma = 100m_e c^2$

IV BOB

YADRO NURLANISHLARINING TIBBIYOTDA QO'LLANILISHI

Yadro nurlanishlari tibbiyotda tashxis qo'yishda va davolashda keng qo'llaniladi. Yadro nurlanishlari asosan radionuklidlar ko'inishda 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 kasalliklariga tashxis qo'yishga imkon beradi.

Keyingi vaqtlarda zamonaviy tashxis qo'yish 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'zolari 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 qurilmalar ishlatiladi.

Mazkur bobda yadro nurlanishlarni turli yadro qurilmalarida olish imkoniyatlari va ularning qo'llanilish sohaslariga oid ma'lumotlar beriladi. Shuningdek, PET metodining ishlash tamoyillari va uning fizika-viy 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 ta'sirlashib, turli effektlarni yuzaga keltiradi. Bu effektlar uchinchi bobda batafsil yoritilib berilgan.

Turli jismlarda, jumladan, tirik organizm to'qimalarida ham, nurlanishlar ta'sirida ma'lum energiya yutiladi va ulardagi atomlar ionlashadi yoki uyg'ongan holatga o'tadi. Shuning uchun ham nurlanish dozasi o'lchash asosan ionlashtirish natijasida hosil bo'lgan zaryad miqdorini o'lchashga asoslangan bo'lishi mumkin. Haqiqatan ham, gamma-kvantlar muhit orqali o'tganda yuqorida aytilgan effektlar natijasida elektron yoki pozitronlar yuzaga keladi.

Dozimetriyaning asosiy vazifasi ionlovchi nurlanishning aholiga va boshqa obyektlarga nisbatan xavflilik darajasini aniqlash va baholashdan iborat. Bunday joylarda odamlar bevosita nurlanish manbalari bilan ish olib boradi. Nurlanishdan himoyalaniшни tashkil etish kerak. Nuqtaviy manbaning nurlanish dozasini amalga oshirishning 3 ta yo'li bor.

- 1) Nurlanish dozasi masofa bo'yicha $1/r^2$ bo'yicha kamayadi.
- 2) Nurlanish vaqti kam bo'lishi kerak.
- 3) Odam bilan nurlanish orasiga himoya devori qo'yish kerak.

Nurlanish ta'sirida tirik organizm hujayrasida turli o'zgarishlar yuz beradi. Masalan, nurlatilgan hujayralarning bo'linish mexanizmi va xromosoma apparati buziladi, hujayralarning yangilanish va bo'linish jarayonlari susayadi va h.k. Nurlanish organizmning turli qismlariga turlicha ta'sir ko'rsatadi. Masalan, ilik, qora taloq, jinsiy bezlar kabi hujayralari doimo yangilanib turuvchi to'qima va a'zolarga radioaktiv nurlanishlar ta'siri, ayniqsa, kuchli bo'ladi. Hujayralarning shikastlanishi va nobud bo'lishi esa alohida a'zolarning ishlash funksiyasining buzilishiga sabab bo'ladi va bular o'z navbatida kishi organizmining halok bo'lishiga olib keladi.

Ionlashtiruvchi nurlanishlarning tirik organizm hujayrasiga 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'smalar mavjud bo'lgan soha nurlantirila-

di. Bu nurlanishlar natijasida saraton hujayrlarining DNK strukturasi buziladi va ularning ko'payish hamda bo'linish qobiliyati kamayadi.

Dozimetriya – ionlashtiruvchi nurlanishni o'lchash usullari va qurilmalari, radioaktiv nurlanishning biologik organizmga ta'sir darajasini miqdoriy ko'rsatkichlar asosida tavsiflash haqidagi 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 nurlanishning biologik ta'sirini ifodalash uchun dastlabki – HED (Haut erithem dosis – teri eritemasini yuzaga keltiruvchi doza) o'lchov birligi fanga kiritilgan va radiatsion dozimetriya yo'nalishiga asos solingan.

Ionlovchi nurlanish ta'siri ostida muhitda sodir bo'ladigan va qayd qilinadigan fizik-kimyoviy hodisalarning tabiatiga bog'liq holda ionlovchi nurlanishlarni aniqlash va qayd qilish ionizatsion, kimyoviy, ssintillatsion, fotografik va boshqa usullar yordamida amalga oshiriladi.

Dozimetriyada qo'llaniladigan asosiy fizik kattaliklar va ularning o'lchov birliklari **4.1-jadval**da keltirilgan.

4.1-jadval.

Asosiy dozimetrik kattaliklar va ularning o'lchov birliklari.

Fizik kattaliklar	Birligi, nomlanishi, belgilanishi		Birliklar orasidagi munosabat
	Tizimdan tashqari	Xalqaro birliklar tizimida	
Aktivlik	Kyuri (Ci, Ki)	Bekkerel (Bq, Bk)	1 Bk = $2,7 \times 10^{-11}$ Kj 1 Ki = $3,7 \times 10^{10}$ Bk
Nurlanishning ekspozitsion dozasi	Rentgen (R, R)	Kulon/kg (C/kg, Kl/kg)	1 K/kg = 3876 R 1 R = $2,58 \times 10^4$ Kl/kg
Ekspozitsion dozaning quvvati	Rentgen/ sekund (R/s, R/s)	Amper/kg (A/Kg, A/kg)	1 A/kg = 3876 R/s 1 R/s = $2,58 \times 10^{-4}$ A/kg
Nurlanishning yutilgan dozasi	Rad (rad, rad)	Grey (Gy, Gr)	1 Gr = 100 rad 1 rad = 0,01 Gr

Yutilgan dozaning quvvati	Rad/sekund (rad/s, rad/s)	Grey/sekund (Gy/s, Gr/s)	1 Gr/s = 100 rad/s 1 rad/s = 0,01 Gr/s
Nurlanishning integral dozasi	rad·gramm (rad·g, rad·g)	Djoul (J, Dj)*	1 Dj = 10 ⁵ rad·g 1 rad·g = 10 ⁻⁵ Dj
Nurlanishning ekvivalent dozasi	Ber (rem, ber)	Zivert (Sv, Zv)	1 Zv = 100 ber 1 ber = 0,01 Zv
Ekvivalent doza quvvati	Ber/sekund (rem/s, ber/s)	Zivert/sekund (Sv/s, Zv/s)	1 Zv/s = 100 ber/s

Dozimetriyada qo'llaniladigan fizik kattaliklar kutilayotgan radiatsiya effektlari bilan bog'liq bo'ladi. Odatda bu kattaliklar dozimetrik kattaliklar deyiladi. O'lgangan fizik kattaliklar va kutilayotgan radiatsiya effekti o'rtasida o'rnatilgan munosabatlar dozimetrik kattaliklarning eng muhim xususiyatidir.

Ushbu jadvalda keltirilgan kattaliklar bilan tanishib chiqamiz. Dozimetriyada asosan to'rtta nurlanish dozasi qo'llaniladi, ya'ni ekspozitsion doza, yutilgan doza, integral doza va ekvivalent doza.

Ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirini baholash uchun dozimetriyada qabul qilingan asosiy fizik kattalik yutilgan doza yoki oddiygina nurlanish dozasi hisoblanadi. Nurlanish dozasi 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:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4.1)$$

Xalqaro o'lchov birliklari tizimida yutilgan doza qiymati o'lchov birligi *Grey (Gr)* hisoblanadi:

$$1 \text{ Gr} = 1 \text{ J/kg}. \quad (4.2)$$

Shuningdek, yutilgan dozani o'lchashda xalqaro o'lchov birliklari tizimidan tashqari o'lchov birligi sifatida Rad ishlatiladi:

$$1 \text{ Rad} = 0,01 \text{ Gr}. \quad (4.3)$$

Yutilgan nurlanish dozasi 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 havo massasiga dm nisbatiga aytiladi:

$$X = \frac{dQ}{dm}, \quad (4.4)$$

bu yerda dQ – havoning elementar hajmida hosil bo'lgan bir xil ishorali 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 xalqaro o'lchov birliklari tizimidan tashqari o'lchov birligi sifatida *Rentgen* (R) ham ishlatiladi:

$$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} Kl/kg. \quad (4.5)$$

Jonli to'qimalar nurlanishining individual ta'sirini o'rganish shuni ko'rsatadiki, 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 yengil 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 koeffitsient nisbiy biologik samaradorlik koeffitsienti (RBE) yoki sifat koeffitsientiga ko'paytirish bilan hisoblanadi:

$$D_{ekv} = \sum D_i K_i \quad (4.6)$$

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* ishlatiladi: $1 Ber = 0,01 Zv$. Hozirgi vaqtda ishlab chiqariluvchi barcha turdagi dozimetrlar Zv o'lchov birligi shkalasi bo'yicha

belgilanadi. *Zivert (Zv)* o'lchov birligi shvetsiyalik radiofizik Rolf Zivert sharafiga qo'yilgan.

Nurlanish bilan ishlaydigan odamlar guruhi yoki turar-joylardagi aholiga nurlanishning ko'rsatgan dozasi kollektiv effektiv ekvivalent doza atamasi bilan ifodalanadi. Bu dozani quyidagi ifoda orqali topish mumkin:

$$D_{koll. eff. ekv. d.} = D_{eff. d.} \cdot F_i$$

bu yerda, F_i – guruhdagi odamlar soni.

Kollektiv effektiv ekvivalent dozaning o'lchov birligi qilib, odam-zivert (odam-Zv) qabul qilingan.

Turli nurlarning biologik ta'sirini taqqoslash uchun sifat koeffitsienti (SK) yoki nisbiy biologik effektivlik deb ataluvchi 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. **4.2-jadvalda** nurlanishlarning sifat koeffitsienti (SK) qiymatlari keltirilgan.

Ionlovchi nurlanishlarning manbalar bilan ishlaganda radiatsion xavfsizlik masalalarini hal qilish uchun chegaraviy ruxsat etilgan ekvivalent doza tushunchasidan keng foydalaniladi. Agar xodimning bir yilda olgan nurlanish dozasi shu chegara ekvivalent dozasi ortmasa, bunday nurlanish ta'sirida 50 yil davomida ishlaganda ham xodimning sog'lig'ida sezilarli o'zgarish ro'y bermaydi.

Radioaktiv nurlanishlar ta'sirida ishlovchi kishilar (A kategoriya) uchun chegara ekvivalent doza *2 ber/yil (0,02 Zv/yil)* deb belgilangan. Boshqa kategoriyadagi kishilar uchun bu qiymat taxminan 10 marta kichik bo'lishi kerak. Har xil yoshdagi (A kategoriyadagi) xodimlarning olishi mumkin bo'lgan chegaraviy yig'indi dozaning qiymati quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$D \leq 5(N - 18), \quad (4.7)$$

bu yerda N – radioaktiv nurlanish manbalar bilan ishlayotgan xodimning yoshi, 18 – radioaktiv manbalar bilan ishlash boshlangan yoshi. Yoshi $N \geq 18$ va shu bilan birga tibbiy ko'rikdan o'tgan hamda maxsus imtihonlarni topshirgan insonlarda radioaktiv bilan ishlashga ruxsat beriladi. Barcha hollarda yoshi 30 yoshga to'lgan xodim uchun uning organizmida to'plangan doza 60 berdan ortmasligi lozim.

Nurlanishlarning sifat koeffitsienti (SK).

Nurlanish turlari va energiya diapazoni	Sifat koeffitsienti (SK)
Gamma va rentgen nurlar	1
Barcha energiyadagi elektronlar	1
Alfa-zarralar ($E_{\alpha} \leq 10 \text{ MeV}$)	10
Protonlar ($E_p \leq 10 \text{ MeV}$)	10
Og'ir tepki yadrolari	20
Issiq neytronlar	3
Energiyalari quyidagi diapazondagi neytronlar	
5 keV	2,5
20 keV	5
100 keV	8
500 keV	10
1 MeV	10,5
5 MeV	7,0
10 MeV	6,5

Dozimetriyada dozalardan tashqari doza quvvati deb nomlangan kattaliklardan ham foydalaniladi. Vaqt birligi ichidagi nurlanish dozasiga doza quvvati deyiladi. Mos ravishda, yutilish doza va ekspozitsion doza quvvatlari quyidagi ifodalalar orqali ifodalanadi:

$$P_{yut} = \frac{D}{t}; \quad P_{ekz} = \frac{X}{t}. \quad (4.9)$$

Doza quvvatining o'lchov birliklari: yutilgan doza quvvati – Gr/s (rad/s), ekspozitsion doza quvvati – R/s .

4.2-§. Ionlashtiruvchi radiatsiyaning biologik ta'sir mexanizmi

Ionlashtiruvchi nurlar ta'sirida organizmdagi atom va molekular ionlashadi, bu esa organizmdagi kimyoviy birikmalar tarkiblarining o'zgarishiga va normal molekular birikmalarda uzilishlarning sodir bo'lishiga olib keladi. Bu o'z navbatida tirik hujayralardagi modda almashinuvining buzilishiga va organizmda biokimyoviy jarayonlarning ishdan chiqishiga sabab bo'ladi. Yuqori intensivlikdagi nurlanishlar

ta'siri uzoq vaqt davom etsa, ba'zi bir hujayralarning nobud bo'lishi kuzatiladi va bu ayrim a'zolarining, hattoki butun organizmning halokati bilan tugaydi.

Ionlashtiruvchi radiatsiyaning biologik ta'siri quyidagi ko'rinishlarga bo'linadi: determinatsion ta'sir, stoxastik ta'sir.

Determinatsion ta'sir – bu og'irlik darajasi radiatsion nurlanish dozasi qiymatiga bog'liq holatda belgilanuvchi, shuningdek, pog'ona darajasiga ega bo'lgan tavsifda yuzaga keluvchi va nurlanish kasalligi, dermatit, katarakta, bepushtlik kabi patologik holatlar yuzaga kelishi bilan ifodalanadi.

Stoxastik ta'sir – radiatsion nurlanish dozasi pog'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 guruhga ajratiladi:

O'tkir zararlanish yuqori dozada radiatsion nurlanish ta'sirida qayd qilinadi. Jumladan, odam organizmida $\sim 0,5 - 1 \text{ Zv}$ ($50 - 100 \text{ Ber}$) radiatsion nurlanish ta'sirida qon tizimida jiddiy buzilishlar yuzaga keladi. Shuningdek, $\sim 3 - 5 \text{ Zv}$ ($300 - 500 \text{ Ber}$) 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. $\sim 10 - 50 \text{ Zv}$ ($100 - 5000 \text{ Ber}$) radiatsion nurlanish ta'sirida, 1-2 haftadan keyin oshqozon-ichak tizimi shilliq qavatida hujayralarning nobud bo'lishi natijasida, qon ketishi oqibatida olamdan o'tish holati qayd qilinadi. 100 Zv ($10\,000 \text{ Ber}$) 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 yetgan odam organizmida bir xil nurlanish dozasi turli xil ta'sirga ega bo'lishi aniqlangan. Jumladan, o'sayotgan organizmda bo'linish jarayoni jadal amalga oshayotgan hujayralar nurlanish ta'sirida nisbatan tez nobud bo'ladi.

Davomiylikda (vaqt o'tishi bilan, asta-sekin) yuzaga keluvchi nurlanish oqibatlari. Tajriba hayvonlar ustida amalga oshirilgan tadqiqot-

lar, 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 ifodalanishi kuzatiladi.

Nurlanish ta'sirida biologik organizm hujayralarida yuzaga keluvchi buzilishlar qaytmas tavsifga ega bo'lib, turli xil kasalliklar, jumladan, o'sma kasalliklari kelib chiqishiga sabab bo'ladi. Masalan, radiatsion nurlanish ta'sirida yuzaga kelgan leykoz oqibatida olamdan o'tish muddati o'rtacha 10 yilni tashkil qiladi. Radiatsion nurlanish ta'sirida o'sma kasalliklarining kelib chiqish ehtimolligi darajasi 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 qalqonsimon bez o'sma kasalligi, 10 tadan bitta ayolda ko'krak bezi saratoni, shuningdek, har 1000 tadan 5 ta odamda o'pka saratoni kasalligi yuzaga kelishi aniqlangan. Yuqorida keltirilgan ma'lumotlar asosida, qayd qilish lozimki, voyaga yetgan odam organizmida 0,01 Zv (1 Ber) radiatsion nurlanish ta'sirida o'sma (saron) kasalligi kelib chiqish ehtimolligi $2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$ ga teng bo'ladi.

Nurlanishning genetik oqibatlari. Amalga oshirilgan tadqiqotlar natijasida, surunkali tavsifda 1 Zv (100 Ber) nurlanish ta'sirida odam avlodlarida (~30 yil davomida) har 1000 ta tug'ilgan chaqaloqdan 2 tasi jiddiy genetik nuqson bilan dunyoga kelishi aniqlangan. Agar nurlanish ta'siri doimiy ravishda, surunkali tarzda qayd qilinsa, u holda genetik mutatsiyalarga uchrash ehtimoli ham ortadi.

Nisbiy biologik ta'sir effekti. Nisbiy biologik ta'sir effekti (NBE) bir xil ta'sirga olib keladigan standart nurlanish dozasi bilan ma'lum bir biologik ta'sirga olib keladigan radiatsiya dozasi taqqoslash yo'li bilan baholanadi. Nisbiy biologik ta'sir effektining koeffitsienti quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$K_{nbe} = \frac{D_r}{D_x}, \quad (4.9)$$

bu yerda D_r – rentgen yoki γ -nurlanishlarning yutilgan dozasi, D_x – shu effektni 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 qiymati dengiz cho'chqasi uchun – 250 *Rentgen*, it uchun – 335 *Rentgen*, maymun uchun – 600 *Rentgen*, sichqonlar uchun – 550–650 *Rentgen*, ilon uchun – 8000 – 20 000 *Rentgen* ga teng bo'ladi. Shuningdek, ayrim achiq turlari 30 000 *Rentgen*, amyoba – 100 000 *Rentgen*, infuzoriya – 300 000 *Rentgen* radiatsion nurlanish ta'sirida nobud bo'lishi aniqlangan. O'simlik turlari orasida karam o'simligi urug'lari unuvchanligiga 64 000 *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'rsatuvchi javob reaksiyasining namoyon bo'lish darajasi hisoblanadi. Radiosezgirlik o'lchov birligi sifatida nurlanish dozasi (Gr) qiymatidan foydalaniladi.

Radiosezgirlik xossasi biologik turlarda va 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 (4.3-jadval).

Wangiella dermatitidis, *Cryptococcus neoformans*, *Cladosporium sphaerospermum* mikroskopik zamburug' turlari hujayralarida radiatsion nurlanish ta'sirida biosintez jarayoni faollashishi (radiostimulatsiya) qayd qilinadi.

Jumladan, A. Eynshteyn kolleji (Angliya) tadqiqotchilari tomonidan atom reaktorlarida hayot kechiruvchi ayrim mikroskopik zamburug' turlari, masalan *Wangiella dermatitidis* aynan radiatsion nurlanish energiyasidan biosintez jarayonida foydalanishi mumkinligi taxmin qilingan.

2002-yilda amalga oshirilgan tadqiqotlar davomida Chernobil atom halokati hududida qurilgan «sarkofag» ichki qismidan yig'ib olingan mikroskopik zamburug'lar tarkibida yuqori samaradorlikka ega bo'lgan antioksidant tizim funktsiya bajarishi aniqlangan.

Ayrim biologik turlarning g-nurlanish ta'siri sharoitida LD₅₀ qiymati.

Biologik tur	LD50 (Gr)
Micrococcus radiodurens	>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
Quyon	9-10

4.3-§. Tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar

Tibbiy diagnostikaning (tashxislash) asosiy masalasi bu inson ichki a'zolari strukturasi o'rganishdan (vizualizatsiyalashdan) iborat. Nurlil 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 (tashxislash) tadqiqotlar o'tkazish uchun keng foydalaniladi.

Umumiy holda tibbiyotda radionuklidlar ikki yo'nalishda, ya'ni diagnostika va davolashda qo'llaniladi. Diagnostik tibbiyotda radionuklidlar turli tahlillar uchun foydalanilmoqda, ya'ni qalqonsimon bezning funksiyasini tadqiq qilishda, qon hajmini aniqlashda, buyrak va jigar funksiyalarini tadqiq qilishda, B vitaminining inson organizmda hazm bo'lishini o'rganishda, ichaklarda yog'larning shimilishining buzilishini tekshirishda, temir almashinuvini o'rganishda, yurak-tomir tizimining hajmini aniqlashda, jigar funksiyasini o'rganishda va h.k. Hozirgi vaqtda keng qo'llanilayotgan ko'pchilik radionuklidlar siklotron va yadro reaktorlarida ishlab chiqilgan. Shu bilan bir vaqtda radionuklidlar ishlab

chiqarishning o‘shishi elektron tezlatkichlarda ham kuzatilmoqda. Tibbiyotda qo‘laniladigan radionuklidlarni ularning xususiyatlari bo‘yicha shartli ravishda sinflarga bo‘ldik.

Tashxis qo‘yishda (diagnostikada) qo‘llaniladiganlarni ikkiga, ya’ni v^+ – nurlatgichlar va g-nurlatgichlar. Bunday maqsadlarda qo‘llaniladigan radionuklidlar axborot tashuvchi radionuklidlar bo‘lib xizmat qiladi.

Beta-nurlatgichlarning yarim yemirilish davri daqiqalardan bir necha soatgacha. Bunday radionuklidlar pozitron-emission tomografiyada (PET) qo‘llaniladi.

Hozirgi kunda tashxis qo‘yishda foydalanilayotgan va qo‘llanilishi mo‘jallanayotgan radionuklidlar bo‘yicha ma’lumotlar to‘planib, ular ma’lum bir tartibda joylashtirib chiqildi. Bu ma’lumotlar **4.4-jadvalda** keltirilgan.

Hozirgi kunda tibbiyotda qo‘llaniladigan radioizotoplarga bo‘lgan talablar kundan kunga oshib, ularning nomenklaturasi esa kengayib bormoqda. Bu esa yuqorida keltirilgan radionuklidlar ro‘yxatiga yangi qo‘llanilish xususiyatlari keng bo‘lgan radionuklidlarning qo‘shilishiga olib keladi.

4.4-jadval.

Radionuklidlarning yadro-fizikaviy xususiyatlari

R*	T _{1/2}	E _g , keV	R	T _{1/2}	E _g , keV	R	T _{1/2}	E _g , 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	307307
⁵⁴ Mn	312,2 sut	835	⁹⁵ Tc	20,0 soat	766	¹⁴⁴ Pr	17,3 min	697
⁵² Fe	8,3 soat	169	^{97m} Tc	89 sut	96,5	¹⁵⁷ Dy	8,1 soat	326
⁵⁹ Fe	44,5 sut	1099	^{99m} Tc	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 min	40	¹⁷² Lu	6,7 sut	1094
⁶² Cu	9,7 min	1173	^{109m} Ag	39,6 s	88	^{195m} Pt	4,0 sut	130
⁶⁴ Cu	12,7 soat	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
⁶² Zn	9,3 soat	597	^{115m} In	4,5 soat	336	^{195m} Pt	4,0 sut	130
^{69m} Zn	13,9 soat	439	^{117m} Sn	13,6 sut	159	^{195m} Au	30,5 s	262
⁶⁶ 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 sut	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	6687

* <i>R</i> – radio- nuklid, <i>T</i> _{1/2} – yarim parchala- nish davri, <i>E</i> _g – gamma- kvantlar energiyasi.								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

4.4-§. Radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo'llanilishi

Hozirgi kunda radioizotoplar (radioaktiv nuklidlar) va radiopreparatlardan fan va texnikaning turli sohalarida keng foydalanilmoqda. Ionlashtiruvchi nurlanishlar manbai va radioaktiv indikatorlar metodlari qo'llanilmagan ilmiy izlanishlar yoki ishlab chiqarishlar sohalarini topish qiyindir. Bu metodlar foydalanilib, amalga oshirish uchun mo'ljallangan muammolar soni oshib bormoqda va bu esa o'z navbatida keng nomenklatura radioaktiv nishon birikmalari va radionuklidlarni olish va ajratish metodlarini rivojlantirishga yo'naltirilgan yadro fizikasi va radiokimyo sohasidagi ilmiy tadqiqotlarni kengaytirish va chuqurlashtirish zarurligiga sabab bo'lmoqda.

Radioizotoplar turli tezlatkichlar va reaktorlar yordamida olinadi. Reaktorlarda olish mumkin bo'lmagan radioizotoplar siklotronlar yordamida olinadi. Hozirgi paytda radioizotoplarni ishlab chiqarish uchun maxsus ixcham dastur ta'minotiga ega bo'lgan siklotronlar yaratilgan. Bu siklotronlarda nurlanishlar oqimidan foydalanish unumdorligi 100 % darajasiga keltirilgan. Demak, siklotronning aktivlanishi umuman yo'q.

Tibbiyotda radioizotoplar ikki yo'nalishda: diagnostika va terapiyada qo'llaniladi. Diagnostik tibbiyotda radioizotoplardan har xil tahlillar uchun foydalaniladi, 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 almashinuvini o'rganishda, yurak-tomir tizimining hajmini aniqlashda, jigar funksiyasini o'rganishda va h.k. Hozirgi vaqtda keng foydalanilayotgan ko'pchilik radioizotoplar siklotron va yadro reaktorlarida ishlab

chiqarilgan. Shu bilan birga radioizotoplarning ishlab chiqarishlarning o'lishi elektron tezlatkichlarda ham kuzatilmoqda.

4.5-§. 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 tibbiyotda radioaktiv 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'rinishida;
- 4) «kichik» energetika (ya'ni issiqlik radioizotop manbalarida, radioizotop termoelektron generatorlarda va atom batareyalarida) radioaktiv yonilg'i sifatida.

Tibbiyotda radioizotoplar ikki yo'nalishda, ya'ni diagnostika va davolashda qo'llaniladi.

Davolash maqsadida qo'llaniladigan radionuklidlar inson organizmidagi ma'lum bir a'zo yoki kasallikni keltirib chiqarayotgan hujayralarni nurlantirishga asoslangan. Bunda boshqa sog'lom hujayralarga minimal ta'sir qilishga harakat qilinadi.

Davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlar quyidagi uchta guruhga bo'linadi:

- energiyasi $200\text{ch}2000\text{ keV}$ sohada joylashgan ν - zarralar chiqarayotgan ν - nurlatgichlar;
- yuqori chiziqli energiya uzatuvchi ($LPE \sim 100\text{ keV/mkm}$) va qisqa yugurish yo'liga ($50\text{ ch }100\text{ mkm}$) ega bo'lgan b-nurlatgichlar;
- elektron qamrash (EQ) yoki ichki elektron konversiya (IEK) bo'yicha parchalanadigan radionuklidlar.

Keyingi 30 yil ichida BFEKT texnikasi yordamida bajariladigan tashxislash jarayoni asosan ^{99m}Tc preparati bilan amalga oshirib kelinmoqda. Keyingi yillarda tezlatkichlar texnikasining rivojlanishi yangi radionuklidlarni ishlab chiqarishga imkon berdi. Hozirgi kunda I-123,

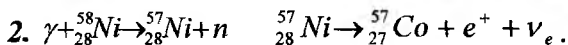
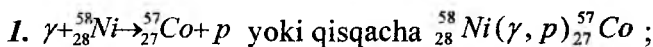
Tl-201, In-111, Cr-51, Ga-67, Kr-81m, I-131 va h.k. radionuklidlar tashxis qo'yishda keng foydalanilmoqda. Pozitron nurlanuvchi radionuklidlar ichida asosan C-11, N-13, O-15 va F-18 radionuklidlari keng qo'llaniladi.

Hozirgi kunda bemorlarni davolashda nur terapiyasi ham keng foydalanilmoqda. Nur terapiyasining asosiy maqsadi saraton hujayralarining DNK spiralini shikastlash, ularni bo'linish qobiliyatidan mahrum qilish. Bunda ochiq radioaktiv manba bilan bemorlarning a'zolari nurlantiriladi. Ochiq radioaktiv manbalar alohida yoki qo'shimcha vosita sifatida qo'llaniladi. Ushbu metod xavfli limfalarni, qalqonsimon bez rakini va h.k. larni nur terapiyasi yordamida davolash samarali hisoblanadi.

Nur terapiyasida proton terapiyasi deb nomlangan davolash metodi alohida ahamiyatga egadir. Proton terapiyasida, boshqa radioterapiya singari, tezlashtirilgan protonlar oqimi bilan o'simta nurlantiriladi. Ushbu protonlar hujayralarning DNK lariga zarar yetkazadi va natijada ularni shikastlantiradi.

Inson organizmi funksiyasini tekshirishda keng qo'llaniladigan boshqa bir radioizotop bu kobalt-57 hisoblanadi. U B₁₂ vitaminining 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 siklotronida olinadi.

Elektron tezlatkichlarda kobalt-57 radioizotopini olish uchun kimyoviy tozaligi yuqori bo'lgan nikel metalli yuqori energiyali gammakvantlar nurlantiriladi va buning natijasida nikel-58 stabil izotopida quyidagi fotoyadro reaksiyalari sodir bo'ladi:



Birinchi reaksiya natijasida kobalt-57 bevosita hosil bo'ladi. Ikkinchi reaksiyada esa oldin nikel-57 radioizotopi paydo bo'lib, keyin unda ν^- -parchalanish sodir bo'ladi, buning natijasida yadrodan 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. Bundan ko‘rinadiki, birinchi reaksiyada kobalt-57 yuqori chiqishi (hosil bo‘lish miqdori) kuzatiladi. Ikkinchi reaksiyadan ham foydalanish uchun nurlantirilgan nishonni kobalt-57 ajratib olinguncha $t > 3T_{1/2}$ ($t > 108$ soat) vaqt davomida ushlab turish lozim. Demak, 108 soatdan keyin kobal-57 ni ajratib olish boshlansa, biz olayotgan radioizotop miqdori yuqori bo‘lar ekan. Kobalt-57 radioizotopining gamma-nurlanishlar energiyasi (~ 122 keV) kichik bo‘lib, inson organizmiga katta ta‘sir ko‘rsatmaydi. Shu sababli, bu radioizotop tibbiyotda 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 izotoplariga 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‘lchashda, miyani onkologik tekshirishda, buyrak va jigarni tekshirishda bemor oladigan nurlanish dozasi 100 marta kamaytiradi. Bunga sabab, yod-123 elektronlar chiqarmaydi va nisbatan qisqa yashovchi radioizotop hisoblanadi. Nurlanish dozasi 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 ga nisbatan ustunlikka ega. Shunga qaramasdan yod-131 radionuklidlari tibbiyotda qo‘llanilib kelmoqda. Bu radionuklidni chaqaloq va ayrim bemorlarga qo‘llash mumkin emas.

4.5-jadval.

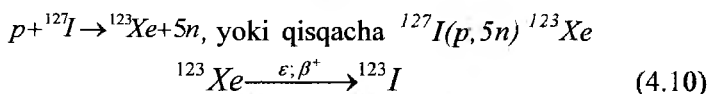
Yodning ba‘zi bir radioaktiv izotoplarining xususiyatlari.

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 turi	EC	EC(77 %), β^+ (23 %)	EC	β^-

Nurlanish energiyasi, keV (intensivlik, parchalanish %)	$E_{\gamma} = 529(1)$ 159(83) KX 28(87)	$E_{\beta}^{+} = 2140(11)$ 1530(12)	$E_{\gamma} = 36(7)$ KX 28(150)	$E_{\beta}^{+} = 606(89)$ 334(7)
		$E_{\gamma} = 1691(11)$ 723(10) 603(63) 511(46) KX 28(56)		va boshqalar $E_{\gamma} = 723(2)$ 637(7) 364(7) 284(82)

Tibbiyot amaliyotida tarkibida radioaktiv nuklid yod-131 bo'lgan preparatlar keng foydalaniladi. Bu birinchi navbatda qalqonsimon bez va buyrak, shuningdek, boshqa organlarni tekshirishda zarur. Biroq ^{131}I diagnostik mulojalar xavfli nurlanish dozasiga olib keladi chunki bu radionuklid juda katta yarim yemirilish davri, ya'ni 8 sutkaga ega va vzarralar chiqaradi. Masalan, qalqonsimon bez skaner qilinganda organizmga aktivligi 0,5 bo'lgan yod-131 kiritiladi, natijada uning to'qimalari 100 rad doza oladi. Bunday tekshirishlarni chaqaloqlarda o'tkazish juda xavflidir.

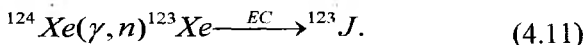
Yod-123 radioizotopi siklotronda va elektron tezlatkichlarda olinmoqda. Siklotronda yod-123 radionuklid quyidagi reaksiya yordamida olinadi:



^{123}I preparatining yuqori sifatini ko'rsatuvchi uning tarkibida ^{124}I va ^{125}I lar kam miqdorda bo'lishi hisoblanadi. Bularning ikkalasi ham radiatsion dozaning oshishiga olib keluvchi radioizotoplar hisoblanadi.

Keyingi paytlarda ^{123}I radioizotopi yuqori energiyali gamma-kvantlar yuzaga keltiradigan (g.n.) turdagi fotoyadro reaksiyalari natijasida ham olinmoqda. Ushbu reaksiyalar orqali ^{123}I radioizotopi olish imkoniyatlarini o'rganish bo'yicha o'tkazilgan tajriba ishlarida bayon qilingan. Hozirda mavjud bo'lgan elektron tezlatkichlar, (elektronlar energiyasi 20 MeV dan ortiq) ya'ni yuqori energiyali (tormozli) gamma-kvantlar manbai hisoblangan chiziqli elektron tezlatkich va mikrotronlar yordamida tibbiy diagnostika uchun ^{123}I radioizotopini ishlab chiqarishga mo'ljallangan hududiy markazlarning tarmoqlarini yaratish muammosini hal qilish mumkin.

Ushbu usullar reaksiya tarkibida sezilarli ^{124}I va ^{125}I aralashmalari bo'lmagan, eng yuqori sifatli preparat olishga imkon beradi. Elektron tezlatkichlarda esa ^{123}I radioizotopni quyidagi reaksiya orqali olish mumkin:



Bu reaksiya ostona energiyasi 10 MeV atrofida bo'lib, reaksiya effektiv kesimi $Y_e = 15$ 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. $E_e = 25-35$ MeV energiyalar oralig'i optimal diapazon hisoblanadi.

Nishon tarkibida ^{126}Xe izotopi bo'lgani uchun unda $^{126}\text{Xe}(\gamma, p)^{125}\text{Xe}$ fotoyadro reaksiyasi sodir bo'ladi. Hosil bo'lgan ^{125}Xe ($T_{1/2} = 17$ soat) radionuklidining radioaktiv parchalanishi hisobiga ^{125}I radionuklidi vujudga keladi, ya'ni



Agarda nishon tarkibidagi ^{124}Xe va ^{126}Xe lar teng miqdorda bo'lganda ham, ^{125}I aktivligi nurlanish tugagandan keyin bir necha soat davomida ^{123}I aktivligining 0,3 % ni tashkil etadi va bu foizlar ^{126}Xe ning nisbiy miqdori kamayishi bilan mos holda kamaya boradi. $E_e < 35$ MeV energiyada $^{124}\text{Xe}(\gamma, np)$ reaksiya bo'yicha hosil bo'lgan ^{124}I radioizotopining chiqishi juda ham kichik bo'ladi. Shuning uchun elektron tezlatkichda olingan ^{123}I preparat sifati jihatidan hozirgi vaqtdagi tijorat preparatlari bilan bir xil. Nishon tarkibida ksenonning og'irroq izotoplarining miqdoriga bo'lgan talab, ksenon-124 ning boyitilishi hisobiga avtomatik ravishda qondiriladi.

Yod-123 radioizotopini ishlab chiqarish uchun elektron tezlatkichlarni qo'llashning asosiy texnik va iqtisodiy afzalliklarini qayd qilib o'tamz. Bular quyidagilardan iborat:

- mahsulot tarkibida ^{124}I va ^{125}I aralashmalarining miqdori kam bo'lishi;
- nishonni qayta ishlashdagi biologik himoyaga sarf-xarajat minimal bo'lishi;
- elektron tezlatkichlari siklotronlarga nisbatan bir necha marta arzon, ixcham, xizmat xarajatlari kam bo'lishi.

Bu usulning kamchiliklariga faqat nishon (^{124}Xe 10 g yuqori boyitilgan) 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 maxsus usullar bilan ajratib olinadi va ulardan radioaktiv preparatlar tayyorlanadi. Bu preparatlar inson organizmiga kiritiladi va radionuklid (yoki radioizotop) tashxis amalga oshiriladi.

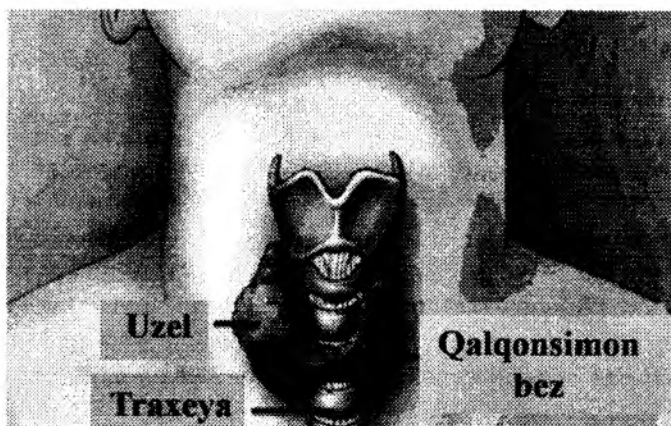
Radionuklid diagnostika nur diagnostikasining bir ko'rinishi hisoblanib, u inson organizmiga radiofarmatsevtik preparat kiritilgandan keyin, inson a'zo va to'qimalaridan chiqayotgan nurlanishni tashqi radiometrik o'lchashga asoslangan. Inson organizmiga kiritilgan radiofarmatsevtik preparat, insonning kasal a'zo va to'qimalariga ko'proq borib joylashadi va o'zidan gamma-nurlanishlar chiqaradi. Bu nurlanishlar maxsus radiometrik asboblari (ssintillatsion datchik) yordamida tashqaridan qayd qilinadi. O'lchashlar orqali kiritilgan izotopning lokalizatsiyasi (joylashgani yoki to'plangani), miqdori va taqsimoti aniqlanadi. Olingan ma'lumotlar orqali tashxis qo'yiladi.

Radiofarmatsevtik preparat deb, inson organizmiga diagnostik yoki davolash maqsadida kiritiladigan va molekularida 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 ssintillatsion datchik orqali o'lchab olinadi va 100 % deb qabul qilinadi. Organizm ssintillatsion 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.

Qalqonsimon bez bo'yin qismida joylashgan (*4.1-rasmga* qaralsin). U organizmda modda va energiya almashinuvida ishtirok etuvchi yodli gormonlar ishlab chiqaradi va to'playdi. Organizmga kiritilgan radioaktiv yod oddiy yod kabi qalqonsimon bez hujayrasiga 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 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, zamonaviy radiofarmpreparatlar va radioaktiv nishonlar qo'llanilishiga qaramasdan, aynan ishlab turgan to'qimalarda radioizotop to'planishini qayd qilish va baholash tamoyillari o'zgarmasdan qolmoqda. Radiobiologlarning tasdiqlashicha, kichik dozali nurlanishlar inson organizmiga ijobiy ta'sir ko'rsatar ekan. Budan radionuklid diagnostikasida qo'llaniladigan radioizotoplar xavfli emasligi kelib chiqadi.



4.1-rasm. Qalqonsimon bez ko'rinishi.

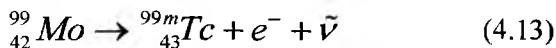
Shuni ham ta'kidlab o'tishimiz kerakki, hozirgi kunda respublikamizda, O'zbekiston Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida, yod-125, 131 va kobalt-57 radioizotoplari ishlab chiqarilmoqda va chet ellarga eksport qilinmoqda. Ayniqsa, yod-131 radioizotopi (radiofarmatsevtik preparati) o'zining yuqori sifatlilikligi bilan boshqa chet el mahsulotlaridan ajralib turadi. Bundan tashqari, mazkur dargohda tibbiyotda qo'llaniladigan o'ndan ortiq radioizotoplar ishlab chiqilmoqda va 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 ν -parchalanishga uchraydi va o'zidan elektronlar hamda gamma-kvantlar chiqaradi. **4.6-jadvalda** yadro reaktorida olinadigan radionuklidlar keltirilgan bo'lib, bular asosan yadro tibbiyotida tashxis qo'yishda qo'llaniladi.

Radionuklidlar ichida yadro reaktorida olinadigan va insondagi qator kasalliklarga tashxis qo'yish uchun yadro tibbiyotida eng ko'p tarqalgan va keng foydalaniladigan ^{99m}Ts radionuklid hisoblanadi. Ushbu izotop ^{99}Mo ning parchalanishidan hosil bo'ladi.



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

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ radionuklidni ishlab chiqarish XX asrning 90-yillari 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:

uran bo'linish reaksiyasi - $^{235}\text{U}(n, f)^{99}\text{Mo}$,

radiatsion qamrash reaksiyasi - $^{98}\text{Mo}(n, f)^{99}\text{Mo}$.

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 $1 \text{ Ki } ^{99}\text{Mo}$ radionuklidini olishda 50 Ki radioaktiv chiqindi hosil bo'ladi. Bu radioaktiv chiqindini qayta ishlash va utilizatsiya qilish 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 solishtirma aktivlikdagi ^{99}Mo radionuklidini olish bilan bog'liq. Masalan, tarkibida $24,13 \%$ ^{98}Mo bo'lgan tabiiy molibdenni $1 \cdot 10^{14} \text{ n/sm}^2\text{s}$ issiqlik neytronlar oqimi bilan 100 soat nurlantirganda ^{99}Mo radionuklidning chiqishi $0,35 \text{ Ki/g}$ dan oshmaydi. Xuddi shunday sharoitda boyitilgan ^{98}Mo (*boyitilganlik darajasi* $> 95 \%$) izotopida ^{99}Mo ning hisoblangan aktivligi, reaktor neytron spektridagi rezonans tashkil qiluvchilarining o'sishi hisobiga ($12-15$) Ki/g gacha oshishi mumkin. Bunda reaksiyaning kesimi $0,7 \text{ barn}$ va undan ham katta qiymatlarga erishishi mumkin. Neytronlar oqimi $5 \cdot 10^{15} \text{ n/sm}^2$ bo'lgan reaktorlarda ^{99}Mo radionuklidini 200 Ki/g tartibdagi qiymatlargacha ishlab chiqarish imkoniyati mavjud. (n, f) reaksiya ^{99}Mo radionuklidini yuqori solishtirma aktivlikda ishlab chiqarishga imkon berishiga qaramasdan, uni yuqori samarada bunda xomashyodan yuqori aktivlikdagi texnetsiy-99 m radionuklidini olish uchun qo'llash mumkin:

Bu radionuklid generatori deyiladi va bunda ^{99m}Tc radionuklidining to'planishi sodir bo'ladi. Radionuklidlarni ajratib olish uchun turli radiokimyoviy usullardan foydalanish mumkin: *sorbsion, xromatografiya va ekstraksion*. 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. Ekstraksion usul asosida ekstraksion generator ishlab chiqilgan. Bu generator quvvati katta bo'lib, u radionuklidlar bilan butun bir hududni qamrab olishi mumkin.

4.8-§. Siklotronlarda radionuklidlar ishlab chiqarish

Hozirgi vaqtda radionuklidlar ishlab chiqarish uchun bir necha yuzlab tezlatichlar qo'llanilmoqda. Yadroviy tibbiyot hozirgi kunda ishlab chiqilayotgan hamma radionuklidlarning 50% iste'mol qiladi. Radionuklidlar ishlab chiqishga mo'ljallangan siklotronlarning katta qismi

neytron defitsit bo'lgan radionuklidlarni ishlab chiqaradi. Bu radionuklidlar asosan *pozitron-emission tomografiya* uchun ishlab chiqiladi va ularning energiyasi $\sim 10 - 18$ MeV ni tashkil qiladi. Tezlatkichlarning 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) , $(3Ne,n)$, $(3Ne,\alpha)$, $(3Ne,\alpha n)$, $(3He,2n)$, $(3He,3n)$, (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 siklotronda ishlab chiqilgan va tashxis qo'yishda qo'llaniladigan izotoplar ro'yxati va yadro-fizikaviy xarakteristikalari keltirilgan.

4.7-jadval.

*Tashxis qo'yishda qo'llaniladigan radionuklidlar.
Radionuklidlar siklotronda ishlab chiqiladi*.*

Radionuklid hosil bo'ladigan reaksiya	Nuklid	Yarim yemirilish davri	Yemirilish turi; chiqayotgan nurlanish va uning energiyasi, MeV	Qo'llanilish sohasi
$^{10}\text{B} (d, n)$ $^{11}\text{B} (d, 2n)$ $^9\text{Be} ({}^3\text{Ne}, n)$ $^{14}\text{N} (p, b)$ $^{12}\text{C} ({}^3\text{Ne}, b)$ $^{12}\text{C} (p, pn)$	^{11}S	20,38 min	$\beta+(1,0)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{12}\text{C} (d, n)$	^{13}N	9,96 min	$\beta+(1,2)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)

$^{14}\text{N} (d, n)$	^{16}O	122 s	$\beta+(1,74)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{16}\text{O} (^3\text{He}, n)$ $^{16}\text{O} (b, pn)$ $^{20}\text{Ne} (d, b)$ $^{20}\text{Ne} (^3\text{He}, bn)$	^{18}F	109,8 min	$\beta+(0,63)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{27}\text{Al} (b, 3p)$	^{28}Mg	21 soat	$\beta- (0,42); \gamma$ (0,03; 0,40; 0,95; 1,35)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{50}\text{Cr} (^3\text{He}, n)$ $^{52}\text{Cr} (^3\text{He}, 3n)$ $^{50}\text{Cr} (b, 2n)$	^{52}Fe	8,3 soat	$\beta+ (0,80); \text{EZ}; \gamma$ (0,16)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{64}\text{Ni} (d, 2n)$ $^{64}\text{Ni} (d, n)$	^{64}Cu	12,7 soat	$\beta- (0,57);$ $\beta+ (0,66); \text{EQ};$ $\gamma (1,34)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{69}\text{Ga} (b, n)$	^{72}As	26 soat	$\beta+ (2,5; 3,34);$ $\text{EQ};$ $\gamma (0,63; 0,83)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{74}\text{Ge} (d, 2n)$ $^{73}\text{Ge} (d, n)$ $^{71}\text{Ga} (b, n)$	^{74}As	17,78 kun	$\beta- (0,72; 1,36);$ $\beta+ (0,91); \text{EZ};$ $\gamma (0,60)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda); qishloq xo'jaligida (metka)
$^{75}\text{As}(b, 2n)$	^{77}Br	57 soat	$\gamma (0,24; 0,52)$	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)

^{79}Br (b, 2n)	^{81}Rb	4,6 soat	β^+ (1,05); EQ; γ (0,45; 1,1)	Generator ^{81}Kr (tibbiyot tashxisida)
^{86}Kr (^3He , 2n)	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	2,8 soat	EQ; g (0,39)	Tibbiyot (diagnostika)
^{85}Rb (b, 2n)	^{87}Y	80 soat	β^+ (0,47);EZ; γ (0,48)	Generator $^{87\text{m}}\text{Sr}$ (tibbiyot tashxisida)
^{110}Cd (d, n) ^{111}Cd (p, n) ^{112}Cd (p, 2n) ^{109}Ag (^3He , n)	^{111}In	67 soat	γ (0,17; 0,25)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{114}Cd (b, n)	$^{117\text{m}}\text{Sn}$	14 sut	γ (0,16)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{115}In (b, 2n)	^{117}Sb	2,8 soat	β^+ (0,57); EZ; γ (0,16)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{121}Sb (b, 2n) ^{123}Sb (^3He , 3n) ^{122}Te (^3He , 2n) ^{123}Xe $^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$ ^{123}Te (p, n)	^{123}I	13 soat	EQ; γ (0,16)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{127}I (b, 2n)	^{129}Cs	32 soat	EQ; γ (0,38)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{131}Xe (r, n) ^{131}Xe (d, 2n)	^{131}Cs	9,7 sut	EQ	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
^{131}Xe (d, n) ^{132}Xe (r, n) ^{132}Xe (d, 2n)	^{132}Cs	6,6 Sut	β^+ (0,41); EQ; γ (0,67)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)

$^{155}\text{Gd} (b, 2n)$ $^{159}\text{Tb} (p, 3n)$	^{157}Dy	8,1 sut	EQ; γ (0,33)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
$^{200}\text{Hg} (d, n)$ $^{201}\text{Hg} (d, 2n)$ $^{203}\text{Tl}(r, 3n)$ ^{201}Pb $^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	^{201}Tl	73 soat	EQ; γ (0,14; 0,17)	Tibbiyotda (tashxis qo'yishda)
* EQ-elektron qamrash.				

4.9-§. Elektron tezlatkichlarda radionuklidlar chiqishlarini aniqlash

Mazkur ishdan maqsad ayrim radionuklidlarning elektron tezlatkichlarda olish imkoniyatlarini o'rganish va tibbiyotda tashxis qo'yish hamda davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlar bo'yicha ma'lumotlarni sistematika qilishdan iborat.

Hozirgi kunda elektron tezlatkichlarda olinayotgan va tibbiyotda tashxis qo'yish hamda davolash maqsadida qo'llanilayotgan radionuklidlarning sistematikasi **4.8-jadval**da keltirilgan.

4.8-jadval.

Elektron tezlatkichlar yordamida olinadigan radionuklidlar.

Izotop	$T_{1/2}$	Reaksiya	Qo'llanilish sohalari
^{11}C	20.38 m	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ $^{16}\text{O}(\gamma, nb)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, t)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, nd)^{11}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\gamma, p2n)^{11}\text{C}$	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	$^{23}\text{Na}(\gamma, \text{nb})^{18}\text{F}$, $^{19}\text{F}(\gamma, \text{n})^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(\gamma, \text{d})^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(\gamma, \text{pn})^{18}\text{F}$	Pozitron-emission tomografiyada qo'llaniladi
^{47}Sc	3.42 sut	$^{48}\text{Ti}(\gamma, \text{p})^{47}\text{Sc}$	Radioimmunoterapiyada (RIT) qo'llaniladi
^{57}Co	271.7 sut	$^{58}\text{Ni}(\gamma, \text{p})^{57}\text{Co}$	A'zo o'lchamlarini baholashda marker sifatida qo'llaniladi
^{67}Cu	61.9 soat	$^{68}\text{Zn}(\gamma, \text{p})^{67}\text{Cu}$	Beta-nurlatgich bo'lib, radioimmunoterapiyada (RIT) qo'llaniladi
^{99}Mo	66.02 soat	$^{100}\text{Mo}(\gamma, \text{n})^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ generatoridagi birlamchi izotop
^{123}I	13.0 soat	$^{124}\text{Xe}(\gamma, \text{n})^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	Miya, yurak, qalqonsimon bez, buyraklarni tadqiq qilganda tashxis qo'yish uchun qo'llaniladi
^{125}I	60.2 sut	$^{126}\text{Xe}(\gamma, \text{n})^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$	Prostata va miya saraton kasalligi braxiterapiyasida, buyrak filtratsiyasining tezligini baholashda va oyoqdagi chuqur venalar trombozini tashxislashda qo'llaniladi

Bu jadvaldan ko'rinadiki, elektron tezlatkichlarda olingan radio-nuklidlar qo'llanilish chegarasi juda ham keng bo'lib, u hali yetarlicha o'rganilmagan.

Elektron tezlatkichlarning eng muhim afzalliklaridan biri katta mas-saga ega bo'lgan nishonlarni hech qanday boshlang'ich tayyorgarlik-siz ham nurlantirish imkoniyatidir. Bunda nurlantirishga mo'ljallangan nishonni vakuum kamerasi ichiga kiritmasdan va vakuumni buzmasdan tashqarida ham nurlantirish mumkin. Bundan tashqari, elektron tezlat-kichlarda nishonni tayyorlash jarayoni siklotronga nisbatan ancha oson va tez bo'ladi. Demak, elektron tezlatkichlarda ishlab chiqiladigan ra-

dionuklidlarning narxi ham ancha arzon bo'ladi. Xulosa qilib aytish mumkinki, kelajakda radionuklidlar ishlab chiqarishda elektron tezlatichklarning qo'llanish imkoniyati juda katta bo'ladi. Radionuklidlarni ishlab chiqarish uchun elektron tezlatichklarni qo'llashning prinsipial texnik va iqtisodiy afzalliklarini qayd qilib o'tamiz. Bular quyidagilar: mahsulot tarkibida qo'shimcha aralashmalarning miqdori kam bo'ladi; nishonni qayta ishlashdagi biologik himoyaga sarf-xarajat minimal bo'ladi; elektron tezlatichklari siklotronlarga nisbatan bir necha marta arzon, ular ixcham, ekspluatatsion sarf-xarajatlari kam. Ammo bugungi kunda radionuklidlar ishlab chiqarishda elektron tezlatichklar boshqa yadro qurilmalarining o'rini 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 tibbiyotga ma'lum bir tashxis qo'yish yoki davolash usullari sifatida kirib kelgan. Bunga misol qilib oddiy inson qon bosimini o'lchash, ultratovush tashxis usuli, radioizotoplar usullari va boshqalarni 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) ikki fotonli emission tomografiya ham deyiladi. Bu metodda inson va hayvonlarning ichki a'zolarini radionuklidli tomografiya yordamida o'rganiladi.

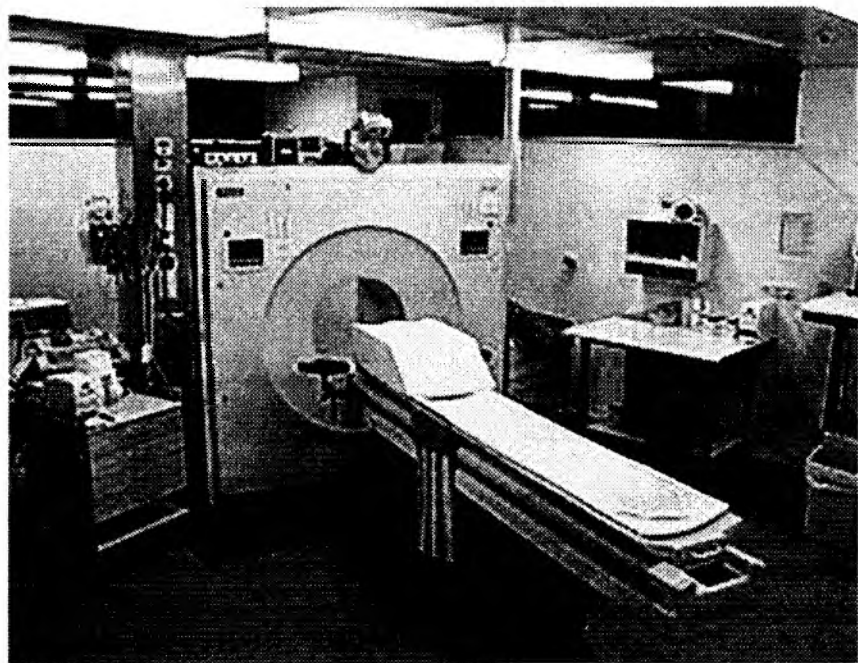
1933-yilda nemis biokimyogari Varburg (Otto Genrix Varburg) xavfli shish (o'sma) yuqori darajada glukoza iste'mol qilishini (ehtiyoji) aniqladi. 1977-yilda olimlar kalamush miyasida xavfli shishning glukozaga bo'lgan ehtiyojini o'rganishda uglerod radioaktiv izotopi yordamida dezoksiglukozasining mahalliy tarqalish darajasini o'lchashni o'rganishdi. Ushbu tajriba 1979-yilda insonlarda o'tkazilgan. Bunda radioaktiv ftor ^{18}F izotopining ftorodezoksiglukozasidan foydalanilgan. Ftorodezoksiglukoza bu – glukozaning analogi hisoblanadi. U glukozadan farq qilib, uning metabolizimi tez tugallanadi va mahsulotlari birik-

malarga to'planadi. Radioaktiv fluor-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 (4.2-rasm).

Pozitron-emission tomografiya quyidagi sohalarda qo'llaniladi:

1. Onkologiyada: saraton kasalligini tashxislashda, metastazaga tashxis qo'yishda, saratonni samarali davoshni nazorat qilishda;
2. Kardiologiyada: yurakning ishemik kasalligida, aortokoronar shuntlashdan oldin;
3. Nevrologiyada: parisonxotir skleroz va boshqa kasalliklarda;
4. Psixiatriya va gerontologiyada: Alsgeymer kasalligida.



4.2-rasm. Pozitron-emission tomografiyaning umumiy ko'rinishi.

Radionuklidlarni elektron tezlatkichlar yordamida olish yo'llari ishlab chiqilgan bo'lib, bunda tormozlanish nurlanishlari ishlatiladi.

Pozitron-emission tomografiya usuli hujayra darajasida modda almashinuvi haqida axborot olishga imkon beradi.

Hozirgi kunda pozitron emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlar asosan siklotronda olinadi. Elektron tezlatkichlarda va siklotronlarda olinayotgan radionuklidlar bo'yicha ma'lumotlar to'plandi va ular **4.9** va **4.10-jadvallarda** berildi.

4.9-jadval.

Pozitron-emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlarni elektron tezlatkichlar yordamida olish.

Radionuklid	Yarim parchalanish davri, $T_{1/2}$	Radionuklidni hosil qiladigan reaksiyalar
^{11}C	20.38 m	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ $^{16}\text{O}(\gamma, nb)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, t)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, nd)^{11}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\gamma, p2n)^{11}\text{C}$
^{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	$^{23}\text{Na}(\gamma, nb)^{18}\text{F}$, $^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\gamma, d)^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(\gamma, pn)^{18}\text{F}$

4.9-jadvalda elektron tezlatkichda olinayotgan radionuklidlar va ularni hosil qiladigan fotoyadro reaksiyalar keltirilgan. Shuningdek, bu jadvalda hozirgi kunda radionuklidlarni olishda qo'llanilayotgan asosiy fotoyadro reaksiyalari ko'rsatilgan. Bu jadvalga qo'shimcha olishi mumkin bo'lgan fotoyadro reaksiyalarni ham kiritdik, ular intensivligi katta bo'lgan elektron tezlatkichlarda amalga oshishi mumkin.

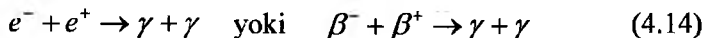
Siklotron yordamida olinadigan radionuklidlar.

Radionuklid	Yarim parchalanish davri, $T_{1/2}$	Radionuklidni hosil qiladigan reaksiyalar
^{11}C	20.38 m	$^{10}\text{B} (d, n)$ $^{11}\text{B} (d, 2n)$ $^9\text{Be} (^3\text{He}, n)$ $^{14}\text{N} (p, \alpha)$ $^{12}\text{C} (^3\text{He}, \alpha)$ $^{12}\text{C} (p, pn)$
^{13}N	9.98 m	$^{12}\text{C} (d, n)$
^{15}O	122 s	$^{14}\text{N} (d, n)$
^{18}F	109.8 m	$^{16}\text{O} (^3\text{He}, n)$ $^{16}\text{O} (\alpha, pn)$ $^{18}\text{O} (p, n)$ $^{20}\text{Ne} (d, \alpha)$

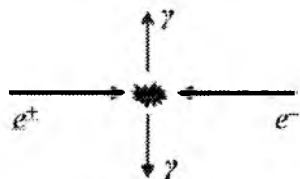
4.10-jadvalda siklotronda olinayotgan radionuklidlar va ularni hosil qiluvchi yadro reaksiyalari keltirilgan.

4.11-§. Pozitron emission tomografiyaning ishlash tamoyili

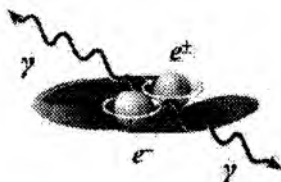
Mazkur metod pozitronlarning elektronlar bilan annigilatsiya bo'lishi natijasida hosil bo'ladigan gamma-kvantlar juftligini qayd qilishga asoslangan. Pozitron (inglizcha so'zdan olingan bo'lib, positive – musbat va elektron – elektron, ya'ni musbat zaryadlangan elektron) elektronning antizarrasi hisoblanadi. Pozitronning massasi va elektr zaryadining absolut qiymati mos ravishda elektron massasi va zaryadiga teng. Pozitron turg'un zarra hisoblanadi, lekin u modda elektronlari bilan ta'sirlashib annigilatsiya natijasida qisqa vaqt yashaydi. Masalan qo'rg'oshinda pozitron $5 \cdot 10^{-11}$ s davomida annigilatsiyaga uchraydi. «Annigilatsiya» termini (annihilatio) yo'q bo'lish, yo'qlikka aylanish ma'nosini beradi. Pozitron bilan elektron to'qnashganda annigilatsiya hodisasi sodir bo'ladi. Annigilatsiya natijasida asosan ikkita gamma-kvant hosil bo'ladi va ular o'zaro 180° burchak ostida sochiladi (4.3-rasm va 4.4-rasm):



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 (yemirilish) hodisasi radioaktivlik deb ataladi. Radioaktivlik hodisasi yuz beradigan yadrolarga radioaktiv yadrolar deyiladi. Radioaktiv bo'lmagan yadrolar esa turg'un (stabil) yadrolar deyiladi.



4.3-rasm. Gamma-kvant hosil bo'lishi.



4.4-rasm. Gamma-kvant hosil bo'lishi.

PET qo'llaniladigan radionuklidlar turlari va ulardan chiqayotgan pozitronlarning biologik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li 4.11-jadvalda keltirilgan. Bu yerda L_{\max} – pozitronning biologik to'qimalarda maksimal yugurish yo'li. Yugurish yo'li qancha katta bo'lsa, 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.

4.11 jadval.

Pozitron-emission tomografiyada qo'llanilayotgan radionuklidlar va ulardan 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 radioizotoplarning hammasi pozitron chiqarish yo'li bilan parchalanadi. Parchalanayotgan yadro tomonidan chiqarilgan pozitron (β^+) yaqinida joylashgan atomning elektronlari bilan to'qnashguncha qisqa masofani (yo'lni) bosib o'tadi.

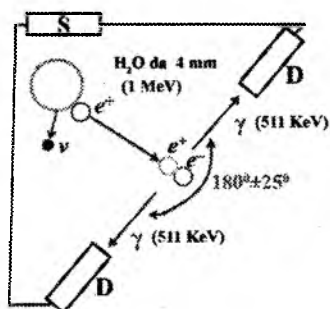
Pozitron birichi uchragan atom elektroni bilan birikadi va pozitroniya hosil qiladi. Pozitroniya, elektron va pozitronlar spinlarining o'zaro joylashuviga qarab, ortopozitroniya (spinlari parallel) va parapozitroniya (spinlari antiparallel)ga farqlanadi. Pozitroniya nostabil sistema bo'lib, u elektron va pozitron annigilatsiyasi 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 ba'zida pozitroniy atomini tashkil qiladi. Uchta gamma-kvantga parchalanish ehtimolligi juda kam bo'ladi.

Pozitroniy atomlari parchalanganda elektron va pozitron annigilatsiyalanadi 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 daraja ostida yo'nalgan bo'ladi. Ushbu fotonlar jismdan (inson tanasidan) tashqariga osongina chiqib ketadi va ularni tashqi detektorlar (qayd qiluvchi qurilmalar) qayd qilishi mumkin. Mazkur detektorlar annigilatsiya natijasida hosil bo'lgan gamma-kvantlarni qayd qiladi. Sababi ular mos tushish sxemasiga ulangan bo'ladi, ya'ni bir vaqtda va o'zaro 180 daraja ostida chiqayotgan gamma-kvantlar detektorlar yordamida qayd qilinadi.

Mos tushish spektrlar qayd qilish sxemasida pozitron tomografiyada tomografik tasvirlarni shakillantirishda qo'llaniladi. Obyekt ichida radioaktiv parchalanish intensivligining kartasini olish uchun bu ma'lumotlar rekonstruksiya qilinadi (molekular zondning fazoviy taqsimoti rekonstruksiyasi). Radiatsion maydon intensivligidagi anomaliyani aniqlash maqsadida olingan tasvirlar maxsus metodlar yordamida tahlil qilinadi. Pozitron molekular zondning konsentratsiyasi oshgan (kamaygan) sohasi inson a'zosining (tarqashi 40 daqiqa davom etadi) normal faoliyat ko'rsatmayotganligini bildiradi.

PET tadqiqot jarayonida pozitron-emitatsiya (chiqaruvchi) qiluvchi radioizotop bemor venasiga yoki ingalatsiya yo'llari bilan kiritiladi.

di. Bundan keyin, radioizotop qon oqimida sirkulatsiya bo'lib, ma'lum bir a'zoga, masalan bosh miyaga yoki yurak muskullariga yetib boradi. Annigilatsiya jarayoni boshlanishi bilan tomograf izotop lokalizatsiyasini (bir joyga to'planishini) qayd qiladi va uning konsentratsiyasini hisoblaydi. Pozitron-emission tomografiya ishlash tamoyili **4.5-rasm**da keltirilgan. Gamma-kvantlar ssintillatsion detektorlar yordamida qayd qilinadi.



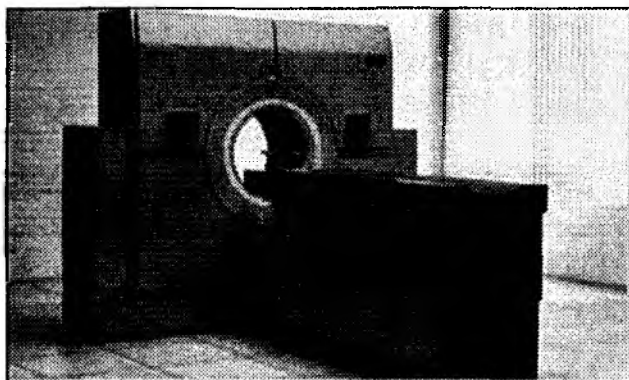
4.5-rasm. Pozitron-emission tomografiya ishlash tamoyili.
D – detektor, S – sanagich.



4.6-rasm. PET diagnostik (tashxislovchi) qurilmasidagi elektron-pozitron juftliklarining annigilatsiyasi.



4.7-rasm. Fazoning biror nuqtasida bir vaqtda yuzaga kelgan va qarama-qarshi tomonga yo'nalgan ikki gamma-kvantni qayd qilish sxemasi.



4.8-rasm. Tahlil qilinayotgan obyekt atrofiga detektorlar halqasimon ko'rinishida joylashtiriladi.

Mavzu yakunida pozitron-emission tomografiyani qo'llash jarayoni bilan tanishib chiqamiz. RFP – bu radioizotop bilan biokimyoviy birikma qo'shilmasidir. Ko'pchilik holda radioizotop sifatida ftor-18 qo'llaniladi. Bundan tashqari uglerod-11, azot-13 va kislorod-15 va boshqa radioizotoplar ham qo'llaniladi. Biokimyoviy modda sifatida yuqorida ta'kidlab o'tilganidek, glukoza qo'llaniladi. Inson hujayrasi RFPni yutadi va ular hujayralarda to'plana boshlaydi. Hujayradagi RFPning radioaktiv parchalanishi (beta parchalanish) natijasida po-

zitron hosil bo'ladi. Ushbu pozitron to'qimada harakatlanib boshlaydi. Pozitron uncha katta bo'lmagan masofani, ya'ni ~ 1 mm masofani bosib o'tadi. Ushbu vaqt ichida pozitron kinetik energiyasi elektron bilan o'zaro ta'sirlashishi darajasigacha kamayadi va buning natijasida qarama-qarshi tomonga harakatlanadigan ikkita foton (gamma-kvant) hosil bo'ladi (**4.5-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.

Ftor-18 PETda qo'llash uchun optimal xarakteristikaga egadir: nisbatan katta bo'lmagan yarim parchalanish davriga va eng kichik nurlanish energiyasiga ega. Ikkinchi tomondan ftor-18 nisbatan kichik yarim parchalanish davriga ega bo'lib, bu esa mijozni past doza bilan nurlanishiga va yuqori kontrastli PET tasvir olishga imkon beradi. Ushbu izotopning yarim parchalanish davri boshqa qisqa yashovchi izotoplarga nisbatan kattaligi uchun ftor-18 olingan va bu asosda tayyorlangan RFP ni PET skanerlarga ega bo'lgan boshqa klinika va institutlarda transportirovka qilishga imkon beradi. Shuningdek, PET tadqiqotlar va RFP sintez vaqt chegarasini kengaytirishga imkon beradi. Hozirgi kunda dunyodagi yetakchi korxonalaridan biri bo'lgan "Siemens AG" kompaniyasi o'zining PET/KT qurilmalarida Lu_2SiO_5 va LSO turdagi ssintillatsion detektorlarni qo'llamoqda.

Pozitron-emission tomografiyaning qo'llash jarayoni quyidagicha: pozitron-emission tomografiyani qo'llashdan oldin bemorning venasiga tarkibida qisqa yashovchi radioizotop bo'lgan radiofarmpreparat kiritiladi yoki bemorga ushbu radiofarmpreparat nafas olishi orqali gaz ko'rinishda kiritiladi. Keyin bemor 30-60 daqiqada davomida harakat qilmasdan yotishi kerak bo'ladi. Bu vaqt davomida preparat inson a'zolariga tarqaladi. Bunda bemor o'zini 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 ma'lumotlar kompyuterda qayta ishlanadi va tasvir hosil qilinadi.

Biz bu yerda tibbiyotning zamonaviy tashxis qo'yish usullaridan bittasi bilan tanishib chiqdik. Hozirda bunday usullar soni kundan kunga ortib bormoqda. Umuman olganda, tibbiyot fizika fani yutuqlari evaziga modernizatsiyalashib bormoqda. Bu esa o'z navbatida juda ko'p kasalliklarni oldindan aniqlashga va davolashga imkon beradi.

MASALALAR YECHISH UCHUN NAMUNALAR

1-masala. Normal sharoitda havo gamma-nurlar bilan nurlantirilmoqda. Nurlanish ekspozitsion dozasi $D = 258$ mkKl/kg bo'lsa, massa $m = 5$ kg bo'lgan havoda qancha energiya yutiladi.

Yechilishi: Havoda yutiladigan energiya quyidagiga teng:

$$E = \varepsilon m N \quad (1)$$

bu yerda e – havoni ionlash energiyasi, N – massa birligidagi ionlar juftligi.

Masalani yechishda gamma-nurlarning hamma energiyasi ionlashga sarf bo'ladi deb faraz qilamiz. Normal sharoitda quruq havoda bitta ionlar juftini hosil qilish uchun zarur bo'lgan energiya $e = 33,85$ eV $= 5,416 \cdot 10^{-18}$ J ga teng. Massa birligidagi ionlar juftining miqdori quyidagiga teng:

$$N = \frac{D}{e} \quad (2)$$

bu yerda $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Kl elementar zaryad. (2) formulani (1) formulaga quyamiz va quyidagi ifodani olamiz:

$$E = \varepsilon m N = \varepsilon m \frac{D}{e} \quad (3)$$

Bu formulaga masala shartidagi kattaliklar qiymatlarini qo'yib hisoblaymiz: $D = 258$ mkKl/kg $= 258 \cdot 10^{-6}$ Kl/kg;

$$E = \varepsilon m \frac{D}{e} = 4,37 \cdot 10^{-5} \text{ J} = 43,7 \text{ mkJ} \quad (4)$$

Javob: 43,7 mkJ.

2-masala. Kosmik nurlar ta'sirida dengiz sathida 1 sm^3 havoda 1 daqiqa 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:

$$D_E = P_E t \quad (1)$$

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 bo‘lgan havoda Δt va t davomida hosil bo‘lgan zaryadlar yig‘indisi. U holda (2) ni (1) ga qo‘yamiz va quyidagi ifodani olamiz:

$$D_n = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t} t \quad (3)$$

Bu yerda havo massasi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$\Delta m = \rho \Delta V \quad (4)$$

ΔV hajmida hosil 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 hisobga olsak, (3) formula quyidagi ko‘rinishga keladi:

$$D_n = \frac{|e| \cdot N \cdot t}{\rho \Delta V \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Formuladagi kattaliklarni SI birliklaridagi

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl},$$

$$N = 120$$

$$t = 24 \cdot 3600 \text{ s} \quad \rho = 1,29 \cdot \text{kg} / \text{m}^3,$$

$$\Delta V = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \quad \Delta t = 60 \text{ s}$$

qiymatlaridan ekspozitsion dozani hisoblaymiz:

$$D_E = 21,4 \text{ nKl/kg}$$

Javob: 21,4 nKl/kg.

3-masala. Aktivligi 50 mKi bo‘lgan ^{60}So manбайдan nurlangan nurlanishlar dozasi rentgentlarda hisoblang. Manbagacha bo‘lgan masofa 40 sm, ekspozitsiya vaqti esa 6 soatga teng. Agar manbaning dozasi ruxsat etilgan dozadan yuqori (haftada 1 mberdan katta) bo‘lsa, qo‘rg‘oshin himoya ekranining qalinligini aniqlang. *Kobalt-60* gamma doimiysi $I_\gamma = 13,2 \frac{\text{rentgen} \cdot \text{sm}^2}{\text{MKu} \cdot \text{soat}}$ ga teng. *Kobalt-60* manbaning qo‘rg‘oshindagi yutilish koeffitsienti esa 1 sm^{-1} .

Yechilishi: Nurlanish dozasi

$$D = I_{\gamma} \frac{A \cdot t}{R^2} = 16,5 \text{ rentgen} \quad (1)$$

bu yerda A – aktivlik, t – vaqt, R – masofa. Qo‘rg‘oshin himoya ekranining qalinligi 7,5 sm dan kam emas.

4-masala. Energiyasi $Y_e = 1 \text{ MeV}$ ga teng bo‘lgan g-kvantlar parallel dastasining qo‘rg‘oshinda ($Z = 82$) va aluminiyda ($Z = 13$) a) yarim susayishi qatlamining qalinligi, b) dastani ikki marta susaytiruvchi qo‘rg‘oshin va aluminiy massalari (kg/m^2da) hisoblansin.

Yechilishi: Chiziqli to‘liq susayish koeffitsientlari:

$$\mu_{Pb} = 80 m^{-1}, \quad \mu_{Al} = 15 m^{-1} :$$

zichliklari esa:

$$\rho_{Pb} = 11340 \text{ kg} / m^3, \quad \rho_{Al} = 2700 \frac{\text{kg}}{m^3} :$$

a) Yarim susayish qalinligi qo‘rg‘oshin uchun:

$$d_{1/2} = 0,693 / \mu_{Pb} = 0,693 / 80 \approx 8,65 \cdot 10^{-3} m$$

aluminiy uchun esa $d_{1/2} = 4,6 \cdot 10^{-2} m$. Massaviy susayish koeffitsientlari, qo‘rg‘oshin uchun, $\mu_m = \mu / \rho = 80 / 11340 \approx 7 \cdot 10^{-2} m^2/kg$, aluminiy uchun esa $\mu_m = 5,55 \cdot 10^{-3} m^2 / kg$ ga teng.

b) Dastani ikki marta susaytiruvchi qo‘rg‘oshindan bo‘lgan nishon massasi

$$\mu_{Pb} = \rho_{Pb} d_{1/2} = 11340 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} = 98,7 \text{ kg} / m^2,$$

aluminiy uchun esa $\mu_{Al} = 12,4 \text{ kg} / m^2$ ga teng.

5-masala. Massasi $10^{-6} g$ bo‘lgan ^{60}So nuqtaviy manbadan qanday R masofada, olti soatlik ish kunida oladigan doza, ruxsat etilgan dozaga teng bo‘ladi?

Yechilishi: Massasi $10^{-6} g$ nuqtaviy ^{60}Co manbadagi atomlar miqdori:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{1,0 \cdot 10^{-9}}{60} 6,02 \cdot 10^{26} = 1,0 \cdot 10^{16} \text{ ta atomga teng.}$$

Kobalt aktivligi ($T_{1/2} = 5,27$ yil):

$$A = \lambda N = \frac{0,693}{5,27 \cdot 3,15 \cdot 10^7} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{16}}{3,7 \cdot 10^7} = 1,13 \text{ mKu} \quad (1)$$

olti soatlik ish kunida chegaraviy ruxsat etilgan doza quvvati

$$P_{R.d.} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ ber / g:}$$

Nuqtaviy manbadan chiqayotgan γ -kvantlarning havodagi ekspozitsion dozasi K_γ ionizatsion doimiy bilan ifodalanadi. Kobalt ^{60}So nuqtaviy manba uchun

$$K_\gamma(^{60}\text{Co}) = 12,93 \text{ Psm}^2 / (\text{soat.mKu})$$

$$P(R) = AK_\gamma / R^2 \quad (2)$$

bu yerda P – ekspozitsion doza, R/soat

A – γ -manbaning mKu lardagi aktivligi.

R – manbagacha bo‘lgan masofa (sm).

Ushbu formuladan R topamiz:

$$R = \sqrt{AK_\gamma / P_{p.g.}} = \sqrt{1,13 \cdot 12,93 / 2,8 \cdot 10^{-2}} \approx 72 \text{ sm.} \quad (3)$$

Javob: $R = 72 \text{ sm.}$

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

4.1. Energiyasi 0,6 MeV bo'lgan nozik gamma-nurlar dastasining yarim yutilish qatlamining qalinligini beton uchun aniqlang. (*Javob: 35,46*).

4.2. Nozik gamma-nurlar manbasini (gamma-kvant energiyasi 1,6 MeV) suvga qanday chuqurlikgacha botirilganda suvdan chiqayotgan gamma-nurlar intensivligi 1000 marta kamayadi? (*Javob: 115 sm*).

4.3. Ionlovchi rentgen nurlar ekspozitsion dozasi 1 R bo'lganda normal sharoitda 1 sm³ havodagi molekulalarning qancha ulushi ionlanadi? (*Javob: $0,8 \cdot 10^{-10}$*).

4.4. Energiyasi 1 MeV bo'lgan gamma-kvantlar 10 sm qalinlikdagi aluminiydan o'tganda uning intensivligining 5 marta kamayishi, asosan Kompton effekti tufayli bo'ladi. Gamma-kvant intensivligini kamayishi 10 sm qo'rg'oshindan o'tganda 3000 marta bo'lsa, ularni qo'rg'oshindagi fotoyutilish kesimini toping (*Javob: 6,3 barn*).

NAZORAT SAVOLLARI

1. Yutilgan doza va uning o'lchov birliklari.
2. Nurlanish 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 SAVOLLARI

1. Quyidagi nurlanishlarning qaysi biri bilvosita ionlovchi nurlanishlarga kiradi?
 - A) Ionlar va myuonlar
 - B) Elektron, pozitron, proton va ionlar
 - C) Kosmik nurlar dastasi
 - D) Rentgen va gamma-nurlanishlar
2. Aktivlik o'lchov birligi qilib nima qabul qilingan?
 - A) Kg/m
 - B) J/s.
 - C) Ion/s.
 - D) Bk.
3. Nurlanish dozasi deb qanday kattalikka aytiladi?
 - A) Har qanday modda, tirik organizm va uning to'qimalari ta'sir darajasini baholash uchun qo'llaniladigan kattalikka aytiladi
 - B) Har qanday moddaning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi
 - C) Har qanday moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori
 - D) Har qanday modda massasining uning hajmiga nisbatiga
4. Yutilgan doza deb qanday kattalikka aytiladi?
 - A) Birlik hajmda yutilgan energiya
 - B) Moddaning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi

C) Moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori

D) Modda massasining uning hajmiga nisbatiga

5. Yutilgan doza o'lchov birligi sifatida nima qabul qilingan?

A) Kg/m

B) J/kg

C) Ion/s

D) Gr

6. Yutilgan doza qanday formula bilan aniqlanadi?

A) $D=dE/dm$

C) $D=dP/dm$

B) $D=dE/dm+dV$

D) $D=dE/dt$

7. Ekspozitsion doza deb qanday kattalikka aytiladi?

A) Havoning birlik hajmidagi bir xil ishorali ionlar zaryadlar yig'indisining shu hajmdagi havo massasiga nisbatiga aytiladi

B) Havoning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasi

C) Havoning moddaning birlik massasida yutilgan issiqlik miqdori

D) Havo massasining uning hajmiga nisbatiga

8. Ekspozitsion doza o'lchov birligi sifatida nima qabul qilingan?

A) Kl/kg

B) J/kg

C) ion/s

D) Gr

9. Ekspozitsion doza qanday formula bilan aniqlanadi?

A) $D=dE/dm$

C) $D=dQ/dm$

B) $D=dE/dm+dV$

D) $D=dE/dt$

10. Grey (Gr) o'lchov birligi qanday kattalik bilan o'lchanadi?

A) Gamma-ekvivalent

C) Doza quvvati

B) Yutilgan doza

D) Radioaktivlik

11. Effektiv doza deb qanday kattalikka aytiladi?

A) Inson butun tanasi va uning alohida a'zolari hamda to'qimalari ularning radiosezgirligini e'tiborga olgan holda nurlanishi oqibatida uzoq kelajakda yuzaga kelishi mumkin bo'lgan xavfning o'lchovi sifatida qo'llaniladigan kattalik

B) Havoning birlik massasida yutilgan nurlanish energiyasini belgilovchi kattalik 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.

12. Radiatsiyaning atomlar bilan o'zaro ta'sirlashishi ... olib keladi.

- A) Ionizatsiyaga
- B) Rentgen nurlanishlar hosil bo'lishi jarayoniga
- C) Annigilyatsiya hodisasiga
- D) Radioaktivlikka

13. Zivert(Zv) o'lchov birligida qanday kattalik o'lchamadi?

- A) Ekvivalent doza
- B) Yutilgan doza
- C) Doza quvvati
- D) Ekspozitsion

14. Sifat koeffitsienti qanday nurlanishlar uchun 1 ga teng bo'ladi?

- A) Rentgen va gamma-nurlanishlar, elektronlar, pozitronlar
- B) Alfa-zarralar, $Ye_{kin} < 10 \text{ MeV}$; og'ir yadrolar
- C) Neytronlar, $0.1 < Ye_{kin} < 10 \text{ MeV}$; protonlar, $Ye_{kin} < 10 \text{ MeV}$
- D) Neytronlar, $Ye_{kin} < 0.02 \text{ MeV}$

15. Alfa-nurlanishlar qanday zarralar oqimidan iborat?

- A) Geliy yadrolaridan
- B) Elektronlardan
- C) Pozitronlardan
- D) Protonlardan

16. Tabiiy fon qanday bo'lgan xavfsiz hisoblanadi?

- A) 25 mkR/soat
- B) 150 mkR/soat
- C) 430 mkR/soat
- D) 122 mkR/soat

17. Doza quvvati obyektgacha 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 birlari 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 biokimyogari Varburg (*Otto Genrix Varburg*) nimani aniqlagan?

A) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada glukoza iste'mol qilishini aniqladi

B) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada vitaminlar iste'mol qilishini aniqladi

C) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada temir moddasini iste'mol qilishini aniqladi

D) Xavfli shish (o'sma) yuqori darajada mis moddasini iste'mol qilishini aniqladi

AKTIVATSION TAHLIL

Yadro fizikasi va analitik kimyo fanlari chegarasida yangi yo'nalish – yadro-fizikaviy tahlil metodi vujudga keldi. Ushbu metod paydo bo'lishidan oldin, modda tarkibining element tahlili faqat analitik kimyo yordamida amalga oshirilgan. Hozirgi kunda bunday metodlarning soni ellikdan oshdi. Bu metodlar aktivatsiya sifatida qo'llanilayotgan zarralar va o'lchash metodlari bilan farq qiladi. Yadro-fizikaviy metodlar quyidagi turlarga bo'linadi: rentgenoradiometrik metod (rentgenofluoessent va rentgenoabsorbsion tahlil metodlari), neytron metod (neytron-radiatsion, neytron-aktivatsion tahlil metodlari), fotoyadroviy metod (foto-neytron, foto-aktivatsion yoki gamma-aktivatsion tahlil metodlari), zaryadlangan zarralar tahlil metodi (oniy nurlanishlarni qayd qilish va aktivatsion tahlil metodlari). Shuningdek, yadro-fizikaviy metodlarga Rezerford teskari sochilish metodini ham kiritishadi.

Mazkur bobda aktivatsion tahlil metodining fizikaviy asoslari, metodlari, uni tavsiflovchi asosiy fizikaviy kattaliklar va umumiy yo'nalishlariga to'xtalib o'tiladi.

5.1-§. Aktivatsion tahlil metodi

Zamonaviy fan va texnika, murakkab moddalarning kimyoviy tarkibi, toza metall va yarim o'tkazgichlarda mikroaralashmalar haqida yanada aniq ma'lumotlar berishni talab qilmoqda. Masalan, tranzistorlar ishlab chiqarish texnologiyasining yanada rivojlanishiga, germaniy va kremniy tarkibidagi juda kam miqdordagi aralashmalarni aniqlashda erishilgan yutuqlar sabab bo'ldi. Bunday kam miqdordagi aralashmalarni aniqlash uchun zamonaviy yadro-fizikaviy metodlarni qo'llash kerak bo'ladi. Yadro fizika va analitik kimyo orasida vujudga kelgan va keyingi yillarda fan va texnikaning turli sohalarida keng qo'llanilayotgan metodlardan biri bu aktivatsion tahlildir. Aktivatsion tahlil metodi modda tarkibini aniqlovchi metod bo'lib, u atom yadrosini aktivatsiya qilish va yadroning nuklon tarkibi yoki energetik holatlarining o'zgarishlari natijasida vujudga keladigan radioaktiv nurlanishlarni tadqiq qilishga asoslangan.



D. Xevishi (1885–1966)

Aktivatsion tahlil metodi modda tarkibini aniqlovchi yadro-fizikaviy metodlardan biridir. Ushbu metod birinchi bo'lib venger olimlari D. Xevishi (D. Hevesy) va G. Levi (Levi) tomonidan 1936-yilda taklif etilgan. D. Xevishi radiokimyoviy va aktivatsion tahlil sohasida olib borgan ilmiy ishlari uchun 1943-yilda Nobel mukofotiga sazovor bo'lgan. Hozirgi kunda aktivatsion tahlil metodining sanoatda, geologiyada va xalq ho'jaligining turli sohalarida keng qo'llanishiga misol qilib, Navoiy

tog'-kon kombinatida oltin miqdorini aniqlash va Polshaning Lyubinskiy mis ruda kombinatidagi ruda tarkibidagi mis miqdorlarini aniqlash bo'yicha sanoat miqyosidagi ishlayotgan aktivatsion laboratoriyalarni aytish mumkin.

Aktivatsion tahlilning muvaffaqiyatli qo'llanishiga yana bir misol qilib, Napoleon Bonapart sochini o'rganish bo'yicha o'tkazilgan tajribani keltirish mumkin. Napoleon soch tolalaridan olingan namunani yadro reaktorida nurlantirish natijasida hosil bo'lgan radioizotoplarning aktivligini (induksiyalangan aktivligini) o'lchash orqali uning tarkibida margimush (mishyak As) borligi aniqlandi. Bu ma'lumotlar asosida Napoleon o'limidan oldin ma'lum vaqt davomida tarkibida margimush bo'lgan ovqat iste'mol qilgan degan xulosaga kelingan. Bunday juda kam miqdordagi margimushni aniqlash uchun qo'llanayotgan metod o'ta katta sezgirlikka ega bo'lishi lozim. Yuqori sezgirlik, bu aktivatsion tahlil metodi tabiatiga xos bo'lib, u moddani yuqori o'tish qobiliyatiga ega bo'lgan nurlanishlar, ya'ni neytronlar, zaryadlangan zarralar va gamma-kvantlar bilan nurlantirish jarayonida hosil bo'ladigan har bir radioaktiv yadrolar parchalanishini qayd qilishdan kelib chiqadi.

Bir guruh ingliz va amerikalik tadqiqotchilar buyuk ingliz olimi Isaak Nyuton xatlarini o'rganish orqali uning kasalligiga asosiy sabab, simobdan zaharlanishidir deb taxmin qilishadi. Uning simob bilan tajribalar o'tkazganligi haqida yetarlicha ma'lumotlar saqlanib qolgan. Oldermastondagi ingliz yadro tadqiqotlar markazi xodimlari I. Nyutonga tegishli bo'lgan soch tolalarining tarkibini neytron-aktivatsion metodi bilan tahlil qiladilar. Tajribada Nyuton sochi tolalaridan olingan na-

munani yadro reaktorida neytronlar oqimi bilan 5 kundan 14 kungacha nurlantiriladi. Tahlil metodi sochdagi natriy, xlor, marganes, brom, rux, aluminiy, oltin va simob elementlar konsentratsiyalarini aniqlashga imkon berdi. Nyuton sochida inson organizimi uchun zaharli bo'lgan metallarning to'planishi normadan ancha yuqori, simob miqdori esa normadagidan 40 marta ortiq ekanligini ko'rsatdi. Olingan natijalar olimlar taxminini isbotladi.

Aktivatsion tahlil metodi kriminalistikada ham keng qo'llanilmoqda. Bunga misol qilib XX asrning o'rtalarida Kanadaning Edmundston shahrchasida sodir bo'lgan jinoyatning ochilish jarayonini keltirish mumkin. 1958-yil 13-mayda Kanada – Amerika chegarasi yaqinidagi Kanadaning Edmundston shaharchasida 16 yoshli Gaetan Bushar ismli qizning murdasi topiladi. Mazkur ish bo'yicha mavjud bo'lgan bilvosita dalillar asosida Edmundstonga ish bo'yicha kelgan yosh amerikalik Jon Follmen gumon qilinadi. Ammo u mazkur jinoyatga aloqadorligini qat'iy inkor qiladi. Tergov ishlari bevosita dalillarga muhtoj edi. Busharning murdasi sinchiklab ko'zdan kechirilganda uning qo'lida siqilib qolgan bitta soch tolasi borligi aniqlanadi. Ushbu soch tolasi qizniki yoki qotilniki bo'lishi mumkin edi.

Bitta soch tolasi bilan uning kimga tegishli ekanligini aniqlash mumkinmi? Bunday savol bilan politsiyachilar neytron aktivatsion tahlil bo'yicha mutaxassis Robert Jerviga murojaat qiladilar. Bu savolga javob berish uchun murakkab tadqiqotlar olib borishga to'g'ri keladi. Mazkur tadqiqotlarining asosiy g'oyasi shundan iboratki, bunda har bir insonning sochi o'zining takrorlanmaydigan mikroelementlar to'plami va konsentratsiyasi (miqdori) bilan tavsiflanadi. Buni to'g'ri ekanligini isbot qilish uchun Jervi o'nlab kishilarning sochlarini tekshirib chiqishga to'g'ri keldi. Izchillik bilan olib borilgan izlanishlar natijasida qizning qo'lidan topilgan soch tolasi Follmenga tegishli ekani oydinlashdi. Bu uning qotil ekanligining isboti edi. Bu masalani aktivatsion tahlil metodidan tashqari boshqa hech qanday metod hal qilishga kuchi yetmas edi. Axir bu yerda gap inson soch tolasidagi konsentratsiyasi 10^{-6} % dan oshmaydigan mishyak, natriy, mis, rux, brom elementlari haqida edi.

Aktivatsion tahlil arxeologiyada ham keng qo'llanilmoqda. Olimlar po'latdan yasalgan mashhur Damashq qilichi tarkibagi uglerod miqdo-

rini va bronzadan yasalgan san'at asari tarkibidagi Fe, Ni, Zn, Sn va Pb elementlar miqdorlarini aniqlaganlar.

5.2-§. Miqdoriy natijalarni olish usullari

Olingan (yoki induksiyalangan) aktivlik (A_p) kattaligi bombardion qilinayotgan nurlanish oqimi (f), aktivatsiya qilinayotgan elementdagi yadrolar soni (N), aktivatsiya kesimi (σ), hosil bo'lgan izotoplarning yarim parchalanish davri ($T_{1/2}$) va aktivatsiya vaqtiga bog'liq bo'lib, quyidagi munosabatga bo'ysunadi:

$$A_p = f\sigma N(1 - e^{-0.693t/T_{1/2}}). \quad (5.1)$$

Aktivatsion tahlil metodida miqdoriy natijalarni olish uchun absolut, nisbiy va monitor metodlari qo'llanishi mumkin.

Absolut metod. Absolut metod, aktivatsiya qilinayotgan element yadrolar sonini (N) kiritilgan aktivlik kattaligini o'lchash yo'li bilan aniqlashga asoslangan. Yuqorida keltirilgan tenglamadan kelib chiqqan holda, o'lchangan absolut aktivlik A_p , ma'lum nurlanish va o'lchash shartlari (f , t_{nur} , $t_{\text{o'lch}}$) va yadro parametrlarining jadvaldagi qiymatlari (σ , A , θ , λ) bo'yicha element miqdorini aniqlash mumkin.

Shunday o'lchashlar borki, bu o'lchashlarda etalon manbalarni tayyorlab bo'lmaydi. Bunday holatda o'lchashning absolut metodini qo'llashga to'g'ri keladi. Absolut metodni amalga oshirishda bir qator qiyinchiliklar mavjud. Buning uchun bir nechta qiymatlarni son kattaliklarini bilishga to'g'ri keladi. Bu kattaliklarga quyidagilar kiradi:

- nurlanishlar oqimining quvvati;
- reaksiyaning kesim kattaligi;
- detektorning effektivligi;
- o'lchash geometriyasiga kiritilgan tuzatma.

Absolut metodning yana bir kamchiligi bu aktivatsiya kesimining aniqlash xatoligiga bog'lanishidir. Bu kattalik nisbatan katta xatolik bilan aniqlanadi.

Nisbiy (Etalon) metod. Absolut metodga xos bo'lgan ayrim kamchiliklardan xoli bo'lgan metod etalonlar metodi hisoblanadi. Ushbu metodda tahlil qilinayotgan namuna bilan birgalikda 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 tajriba geometriyasida o'lchanadi. Bunda aniqlanishi lozim bo'lgan element miqdori quyidagi munosabat yordamida aniqlanadi:

$$\frac{m_x}{m_{et}} = \frac{A_x}{A_{et}}, \quad (5.2)$$

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 g-spektrmetrda va bir xil sharoitda (bir xil o'lchash vaqti va geometriyasida) olib borilayotgan bo'lsa, unda aktivlik o'rniga g-spektrdagi fotocho'qqi yuzasini ishlatish mumkin.

Etalon metodida nurlantirilayotgan zarralar yoki g-kvantlar oqim zichligini aniq bilishga hojat qolmaydi. Bu holdagi muhim shartlardan biri, etalon va namuna egallagan hajmda oqim zichligi bir xil bo'lishi lozim. Shuningdek, nurlanish davomida oqim intensivligi o'zgarmasdan turishga ham talab shart bo'lmay qoladi. Aktivatsiya kesimi kattaligining xatoligiga va nurlanish spektridagi energetik o'zgarishlar oxirgi natijaga ta'sir qilmaydi. Absolut o'lchashlar o'rniga nisbiy o'lchashlarni qo'llash aktivatsion tahlil o'tkazish jarayonini osonlashtiradi va metodining aniqligini oshiradi.

Monitor metodi. Monitor metodining asosiy mazmuni nurlanish jarayonini, ya'ni aktivatsiya qilayotgan zarralar (g-kvantlar) oqimi yoki intesivligini nazorat qilishdan iboratdir. Ushbu metodda monitor va etalon birgalikda nurlantiriladi hamda ularning aktivliklari o'lchanadi. Xuddi shunday jarayon namuna uchun ham bajariladi, ya'ni monitor va etalon birgalikda nurlantiriladi va ularning aktivliklari o'lchanadi. Miqdoriy natija quyidagi munosabat yordamida aniqlanadi:

$$m_x = \frac{A_x}{A_{et}} \cdot \frac{A_{met}}{A_{mx}} \cdot m_{et}. \quad (5.3)$$

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_{mx} va A_{met} – mos holda namuna va etalon monitorlarining aktivligi.

Monitor metodi yordamida bir vaqtda bir nechta elementni aniqlash mumkin. Bu esa o'z navbatida ekspres va ko'p elementli aktivatsion tahlilni amalga oshirishga imkon beradi. Monitor sifatida aktivatsiya kesimlari katta va yarim yemirilish davri o'lchashga qo'lay bo'lgan elementlar yoki brikmalar olinadi. Monitor tanlash aktivatsion tahlil turiga ham bog'liq bo'ladi. Masalan, issiqlik neytronlar ta'siri ostida aktivatsion tahlil amalga oshirilayotgan bo'lsa, oltin, kobalt, marganes, mis va boshqa elementlar, shuningdek, ba'zi bir qotishmalar (kobalt va aluminiy qotishmasi) ham qo'llaniladi. Aktivatsion tahlil jarayonini amalga oshirganda bitta yoki bir shaklda bo'lgan bir nechta monitorlar qo'llaniladi. Monitor sifatida ishlatilgan modda shunday ko'rinishda bo'lishi kerakki, undan bir nechta standart monitorlarni 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 sezgirlik chegarasi

Radionuklidlarning (yoki radioizotoplarning) chiqishi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$Y = \frac{S}{m\Omega\varepsilon I_{\gamma} (1 - e^{-\lambda t_c}) e^{-\lambda t_n}}, \quad (5.4)$$

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 sovitish (nurlanish tugagandan o'lchashgacha bo'lgan vaqt) vaqtlari.

Aniqlanish chegarasi sifatida spektrometrning apparatura (tabiiy) fonida 0,3 standart chetlanish bilan aniqlanishi mumkin bo'lgan element massasi qabul qilingan, ya'ni foydali signallarning minimal impulslarining soni shartli bajarilishi quyidagiga $N_{\min} = 3\sqrt{N_{fon}}$ teng. 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:

$$m_{\min} = \frac{3 \sqrt{N_{\text{fon}}}}{S} m_0 \quad (5.5)$$

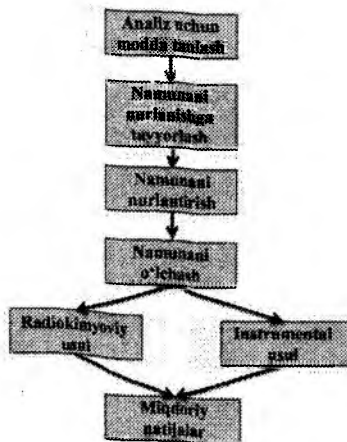
bu yerda S – fotocho‘qqi yuzasi, m – etalondagi element namuna masasi. Ayrim hollarda bu kattalik reaksiya chiqishi orqali ham aniqlanadi:

$$m_{\min} = \frac{3 \sqrt{N_{\text{fon}}}}{Y} \quad (5.6)$$

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‘tilganidek, aktivatsion tahlil, tahlil sxemasi bo‘yicha ikkita bosqichga bo‘linadi, ya‘ni instrumental va radiokimyoviy aktivatsion tahlil. Ikki hol uchun qattiq moddani tahlil qilish usuli 5.1-rasmida keltirilgan.



5.1-rasm. Aktivatsion tahlilning umumiy yo‘nalishi.

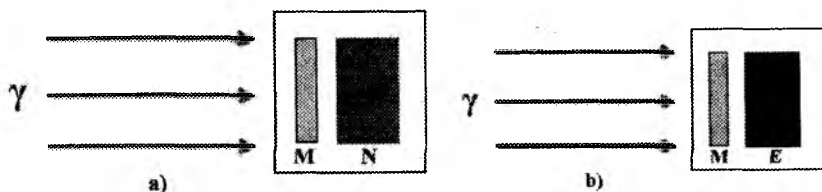
Birinchi bosqichda analitik tadqiqotlar uchun yoki ilmiy yoki ishlab chiqarish masalalarini hal qilish uchun nazorat maqsadida obyekt (modda) tanlanadi. Ushbu modda yoki materialning analitik laboratoriyaga yetib kelguncha bo'lgan tarixi ma'lum bo'lishi shart. Bundan tashqari uning birlamcha tarkibi (makrokomponentalarining tarkibi) ham ma'lum bo'lishi kerak. Yana bir muhim shartlardan biri bu uning massasi yetarli miqdorda bo'lishidir. Chunki ayrim hollarda zarur bo'lib qolgan taqdirda qayta tahlil qilishga to'g'ri keladi.

Ikkinchi bosqichda tahlil uchun mo'ljallangan namunani nurlanishga tayyorlash. Namuna bu tekshirish uchun berilgan modda yoki materialdan olinib tayyorlanadi. Namuna shakli, etalon va monitor shakllari bilan bir bo'lishi lozim. Ko'pchilik hollarda namunalar disk ko'rinishida tayyorlanadi. Agar namuna kukun ko'rinishida bo'lsa unda bu kukundan tabletka tayyorlanadi. Buning uchun gidravlik presslardan foydalaniladi. Agar namuna metall ko'rinishida bo'lsa u holda stanokda disk shakliga keltiriladi. Namunaning massasi, aktivatsion tahlil turiga va nurlanish dozasiga yoki intensivligiga qarab aniqlanadi.

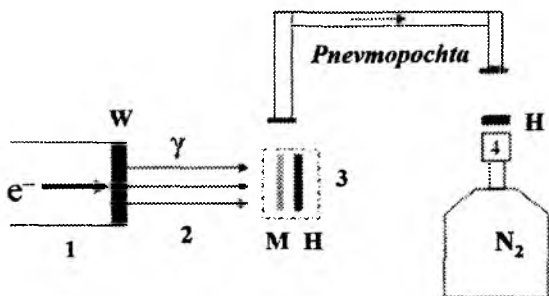
Namuna (monitor) va etalon (monitor)lar maxsus idishlarga joylashtiriladi. Bu idish konteyner deyiladi. Konteynerlar ko'pchilik hollarda (neytron va gamma-aktivatsion tahlilda) polietilen yoki alumindan tayyorlaniladi. Konteynerlarda yadro nurlanishlari bilan aktivlanmaydigan elementlar, erish haroratigacha bormasligi talab qilinadi.

Uchinchi bosqich namunani nurlantirish. Bu bosqichda tekshirilayotgan namuna monitor va etalon bilan birgalikda monitorlar konteynerlarga joylashtiriladi (*5.2-rasmga qarang*). Biz ushbu jarayonni elektron tezlatkichda (mikrotron, betatron yoki chiziqli elektron tezlatkichlar) namunalarni va etalonlarni nurlantirish misolida tushuntiramiz. Namunani nurlantirish va o'lchash sxemasi *5.3-rasm*da 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 *5ch10 yarim yemirilish davrigacha* nurlantirish lozim. Ammo

bunga hamma vaqt ham erishib bo'lmaydi. Sababi ayrim analitik radioizotoplarning yarim yemirilish davrlari bir necha kun yoki oy (uzoq yashovchi radioizotoplar) bo'lishi mumkin, bunday hollarda sharoitdan kelib chiqqan holda nurlanish vaqti aniqlanadi.



5.2-rasm. Nurlantirish sxemasi. a) – namuna bilan monitorni nurlantirish; b) – etalon bilan monitorni nurlantirish.



5.3-rasm. Namunani nurlantirish va o'lchash sxemasi. 1 – elektron tezlatkich kanali, 2 – gamma-kvantlar dastasi, 3 – konteyner, 4 – yarim o'tkazgichli detektor, N – namuna.

Bir qator kimyoviy elementlar nurlantirilganda yadro xarakteristikalari, xususan, yarim yemirilish 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 omillarga bog'liq bo'ladi. Tadqiqotchi qisqa 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'ldash 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'lmashidir. 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.

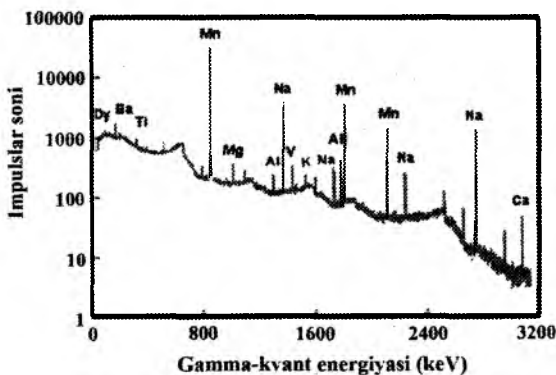
Oxirgi bosqich bu namuna, etalon va monitorlarning induksiyaangan aktivliklarini o'ldash va o'ldash natijasi bo'yicha element miqdorini aniqlash. Nurlanish tugagandan keyin o'ldashgacha bo'lgan vaqt pauza vaqti ham deyiladi. Bu vaqt analitik radioizotopning yarim yemirilish davriga qarab belgilanadi. Ayrim hollarda analitik radioizotopni o'ldashga xalal beruvchi qisqa yashovchi radioizotoplarning yemirilishini kutish uchun namuna ma'lum bir vaqt o'ldashmasdan turiladi.

Hozirgi kunda induksiyaangan aktivliklarini o'ldash uchun asosan o'ta toza germaniyali yarim o'tazgichli detektorlar qo'llaniladi. Bu detektorlar yuqori samaradorlikka va energiya bo'yicha yuqori ajratish qobiliyatiga ega.

Aktivatsion tahlil spektrometrlarida bir qator yordamchi elektron qurilmalar ishlatiladi. Bu qurilmalarga yordamchi va asosiy kuchaytirgichlar, tok manbalari, filtrlar, formirovka qilish moslamalari, ko'p kanalli analizatorlar va yarim o'tkazgichli detektorlar kiradi. Biz bu lar ichida zamonaviy bo'lgan ko'p kanalli analizatorga to'xtalamiz. Ko'p kanalli analizator – impulslar amplituda taqsimotini olish uchun mo'ljallangan qurilma bo'lib, undagi kanallar soni 4096 va undan ortiq bo'ladi. Ko'p kanalli analizatorlar tarkibiga γ -spektrlarni qayta ishlashga yordam beruvchi dasturga ega bo'lgan kompyuter ham kiradi.

Hozirgi kunda aktivatsion tahlilda olinadigan ma'lumotlarni qayta ishlovchi har xil turdagi dasturlar ishlab chiqilgan bo'lib, ular tahlil jarayonini to'liq avtomatlashtirishga yordam beradi. Nurlanish turi va energiyasi, shuningdek, yarim parchalanish davri kattaligi bo'yicha izotoplarni saralash, ya'ni qaysi yadroga tegishli ekanligini, nurlanish intensivligi bo'yicha esa miqdorini (yoki konsentratsiyasini) aniqlash mumkin. Har bir kimyoviy element atom yadrosi o'ziga tegishli α , β va γ -nurlanishlar chiqaradi. Oddiy qilib aytganda har bir radioizotop

o'zining «barmoq izlariga» ega. **5.4-rasmda** gamma-nurlanishlar yanim o'tazgichli detektorda o'lchanganda hosil bo'lgan gamma-spektr bo'yicha modda tarkibida aniqlangan elementlar ko'rsatilgan.



5.4-rasm. Gamma-nurlanish bo'yicha modda tarkibida aniqlangan elementlar.

Oxirgi bosqichda aktivliklarini o'lchash va bu o'lchash natijasi bo'yicha element miqdorini aniqlash. Aktivliklar ma'lum bo'lgandan keyin quyidagi formula orqali modda miqdori aniqlanadi:

$$m_x = \frac{A_x}{A_{et}} m_{et} \quad (5.7)$$

bu yerda m_{et} – etalondagi element massasi; A_x va A_{et} – namuna va etalon aktivligi.

5.5-§. Neytron-aktivatsion tahlil

Neytron elektr zaryadga ega bo'lmagani uchun, u atom qobig'idagi elektronlar va yadroning Kulon maydoni bilan o'zaro ta'sirlashmaydi. Shu sababli neytron yadro ichiga kichik energiyaga ega bo'lgan taqdirda ham kirib boradi.

Neytronning atom yadrosi bilan o'zaro ta'sir turlari juda ham turli-tumandir. Bu o'zaro ta'sirlar neytronning energiyasiga va atom yadrosining strukturasi bog'liq bo'ladi. Neytronlar energiya bo'yicha bir necha guruhlarga bo'lingan bo'lib, bular orasidagi chegara ma'lum

darajada shartlidir. Analitik maqsadlarda sovuq va o'ta tez neytronlar qo'llanilmaydi.

Yadroga kelib tushayotgan neytron energiyasiga bog'liq holda har xil turdagi yadro reaksiyalari sodir bo'lishi mumkin.

Neytron manbalari

Radioizotop manbalar. Radioizotop manbalar asosan neytron aktivatsion tahlilda keng qo'llaniladi va ular neytronlar manbai deyiladi. Neytronlar izotop manbalarining uchta turi mavjud, ya'ni:

- (α, n) reaksiyaga asoslangan manbalar;
- (γ, n) reaksiyaga asoslangan manbalar;
- Yadrolarning spontan bo'linishida hosil bo'ladigan neytronlar manbai.

Neytronlarning izotop manbalariga misollar 5.1-jadvalda keltirilgan.

5.1-jadval.

Neytronlarning bir nechta izotop manbalari.

Manba	Manba turi	Yarim parchalanish davri	Neytronlar o'rtacha energiyasi, MeV
²²⁶ Ra-Be	α, n	1620 yil	4,5
²¹⁰ Po-Be	α, n	138 kun	4,5
²³⁹ Pu-Be	α, n	24000 yil	4,5
²³⁸ Pu-Be	α, n	85 yil	4,5
²⁴¹ Am-Be	α, n	462 yil	4,5
²¹⁰ Po-B	α, n	138 kun	2,5
¹²⁴ Sb-Be	γ, n	60 kun	$25 \cdot 10^{-6}$
²⁵² Cf	Spontan	2,2 yil	1,4

Radioizotop manbalar yadro reaksiyalarini tadqiq qilishda deyarli qo'llanilmaydi. Xususan, $(n, 2n)$ turdagi reaksiyalarni o'rganishda qo'llanilmaydi. Bunga sabab, mazkur turdagi yadro reaksiyalari endotermik reaksiya bo'lib, ular ostona energiyasiga egadirlar. Mazkur reaksiyalar energiyasi $T_n > 10 \text{ MeV}$ bo'lgan neytronlar ta'siri ostida sodir bo'ladi. Bundan tashqari radioizotop manbalarining asosiy kamchiliklaridan biri ularning intensivliklari nisbatan kichikligidir.

Yadro reaktorlari. Yadro reaktorlari – bu boshqariladigan zanjir reaksiyasi amalga oshadigan qurilma. Bu qurilma katta oqimga ega boʻlgan neytronlar manbayi hisoblanadi. Har bir yadroni bombardimon qiluvchi neytronlar taʼsiri ostida boʻlinish jarayonida 2-3 ta erkin neytronlar vujudga keladi. Bu hodisa yadro reaktorida ulkan neytronlar oqimini olishga imkon beradi. Yadro reaktorlari oʻz maqsadi boʻyicha quyidagi turlarga boʻlinadi: tadqiqot, ixtisoslashtirilgan va energetik. Aktivatsion tahlil uchun tadqiqot va ixtisoslashtirilgan reaktorlar ishlatiladi. Tadqiqot reaktorlari neytronlar dastasini chiqarish uchun moʻljallangan kanallarning koʻpligi bilan farq qiladi, koʻpincha issiqlik neytronlarini olish uchun issiqlik kolonna bilan jihozlangan boʻladi. Odatda eksperimental bir yoki bir necha kanallar namunalari aktiv zonaga kiritib qoʻyuvchi va ularni reaktordan chiqarib qoʻyuvchi pnevмотransport bilan jihozlangan boʻladi. Zamonaviy tadqiqot reaktorlari aktiv zonali issiqlik neytronlar oqimi 10^{13} – 10^{15} neytron/($\text{sm}^2 \cdot \text{s}$)ni tashkil etadi. Reaktorda neytronlar oqimi juda yuqori turgʻunligi bilan farq qiladi.

Ixtisoslashgan reaktorlar. Bu turdagi reaktorlar togʻ-kon metallurgiyasi va xalq xoʻjaligining boshqa sohalarida qoʻllaniladigan izotoplar olish maqsadida tanlangan boʻlib, aktivatsion tahlilni oʻtkazishda ham foydalaniladi. Odatda bu reaktorlar uncha katta boʻlmagan quvvatga va tadqiqot reaktori bilan solishtirganda ancha kichik neytronlar oqimi 10^{11} – 10^{12} neytron/($\text{sm}^2 \cdot \text{s}$)ga ega. Bunday reaktorlar seriyalab ishlab chiqariladi, ularni joylashtirish uchun va laboratoriyaviy hamda kontrol-oʻlchash jihozlari uchun maxsus binolar va loyihalar ishlab chiqilgan.

Rossiyada R1-1 va RG-1M turdagi ixtisoslashgan reaktorlar ishlab chiqilgan. Hozigi kunda yangi IVV-3 turdagi reaktorlar ishlab chiqarilmoqda. Oxirgi turi maxsus aktivatsion tahlil uchun moslashgan.

Neytron generatori. Neytron generatorlarida koʻpincha kesim maksimumi uncha katta boʻlmagan energiyalarda joylashgan $t(d,n)^4\text{He}$ va $d(d,n)^3\text{He}$ yadro reaksiyalari qoʻllaniladi (**5.5 va 5.6-rasmlarga qaralsin**). Bu esa oʻz navbatida uncha katta boʻlmagan tezlatkichlarni qoʻllashga imkon beradi. Masalan, kaskad generatorlarini. Inersiya markazidagi sistemaga nisbatan deutron energiyasi 120 keV, laboratoriya sistemasida $d(t,^4\text{He})n$ reaksiya kesimi maksimumga erishadigan

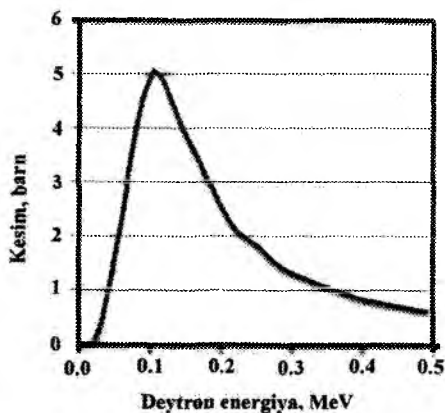
energiyaga ~ 110 keV mos keladi. Neytron generatorida tezlatilgan zarralar energiyasi $100 - 300$ keV soha oralig'ida bo'ladi.

5.2-jadval.

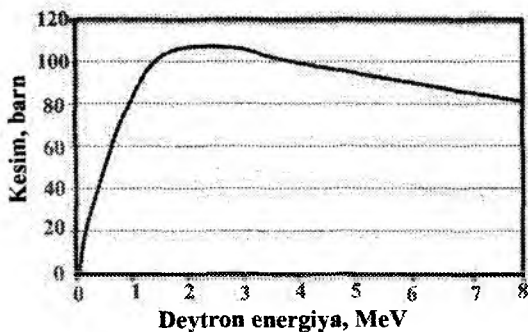
$t(d,n)^4\text{He}$ va $d(d,n)^3\text{He}$ yadro reaksiyalarining asosiy xususiyatlari

Reaksiya	Reaksiya energiyasi Q, MeV	Neytronlar energiyasi, MeV	Maksimal kesim y_{\max} , barn	y_{\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

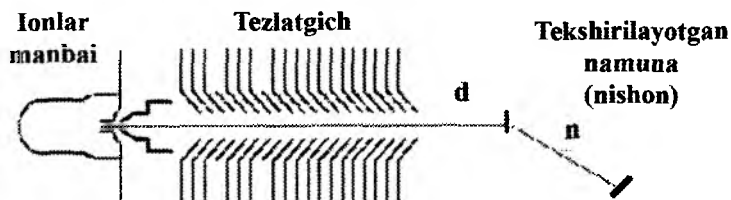
5.5-rasmdan ko'rinib turibdiki, $t(d, n)^4\text{He}$ yadro reaksiyasining kesim kattaligining maksimal qiymati deytronning ~ 110 keV energiyalariga to'g'ri keladi. Bu energiyada reaksiyaning kesim qiymati o'zining maksimal qiymatiga erishadi ($\sigma = 5$ barn). Bundan deytronning 110 keV energiyalarida neytronlarning chiqish kattaligi o'zining eng yuqori qiymatiga erishadi. Shu sababli neytron generatori deytronning ~ 110 keV energiyalarida ish olib boriladi.



5.5-rasm. $t(d,n)^4\text{He}$ reaksiya uchun uyg'onish funksiyasi.



5.6-rasm. $d(d,n)^3\text{He}$ reaksiya uchun uyg'onish funksiyasi.



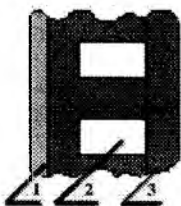
5.7-rasm. Neytron generatorning soddalashtirilgan sxemasi.

Ushbu reaksiya energiyalari tezlatilgan zarralar energiyalarida sezilarli katta bo'lgani uchun neytronlar nishondan deyarli bir xil energiyada chiqadilar. Deytronlarning 200 keV energiyasida $\theta = 0^\circ$ ch 180° burchaklar oralig'ida neytronlarning energiyasi 15.1 dan 13.2 MeV gacha o'zgaradi.

Neytron generatori nuqtaviy monoenergetik neytronlar manbai hisoblanadi. d-t reaksiyada hosil bo'lgan neytronlar izotropdir. Bunday neytron generatorlarida qo'llaniladigan tezlatkichlar odatda uzluksiz ta'sirli tezlatkichlardir.

Impulsi ionlar dastasini olish uchun impulsi ionli manbalardan foydalaniladi. 5.7-rasm^{da} neytron generatorning soddalashtirilgan sxemasi keltirilgan.

Yuqori intensivlikdagi neytronlar oqimini olishga imkon beruvchi neytron generatorlarning nishon konvertorlari odatda qattiq jismdan



5.8-rasm.

Neytron generator nishoni kesimi;
1) titan qatlami,
2) sovitish uchun kanal,
3) mis taglik.

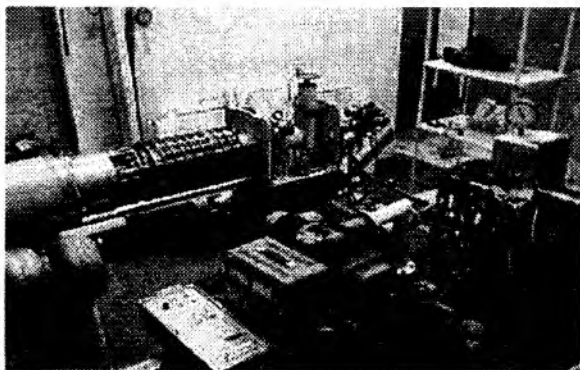
iborat bo'lib, mis taglik surtilgan titan, skandiy yoki rux yupqa qatlamli (bir necha o'n mkm gacha) (5.8-rasm) bo'ladi.

Bu metallar *metall gidridlari* deb nomlangan holatni hosil qilishga qodir.

Titan yoki skandiy gidridi bitta metall atomiga ikkita yaqin vodorod izotopi atomini ushlab qolish qobiliyatiga egadir. Metall gidridlarning bu xususiyati ularni vodorod izotoplarini akkumulator sifatida qo'llashga imkon beradi.

Zaryadlangan zarralar dastasining nishonda yo'qotadigan energiyasi juda katta qiymatlarga ega bo'lishi mumkin (1 sm² ga o'nlab kVt to'g'ri kelishi mumkin). Bu esa o'z navbatida nishon-konvertorni

samarali sovutib turishni talab etadi. Odatda suv bilan sovitish ko'p qo'llaniladi. Bundan tashqari nishon tez aylanuchi disk ko'rinishida bo'ladi. Shunday qilib, dasta tushadigan effektiv maydonni oshiradi. Neytron generatorida $T(d,n)^4He$ reaksiya qo'llanganda 4π fazoviy burchakka $\sim 10^{12}$ neytron/s gacha neytronlar oqimini hosil qilish mumkin. Standart neytron generatorlarda esa bu qiymat $\sim 10^{10}$ neytron/s ga teng. O'zbekiston Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida NG-150 neytron generatorida 14 MeV energiyali neytronlar dastasida hosil qilinadi (5.9-rasm).



5.9-rasm. NG-150 neytron generatorining ko'rinishi.

NG-150 neytron generatori – yadro fizikasi va radiatsion fizika so-halarida keng doirada tadqiqotlar olib borish, shuningdek, tez neytron-lar oqimidan foydalangan holda modda tarkibidagi yengil elementlarni aniqlashga mo‘ljallangan qurilmadir.

NG-150 neytron generatorining asosiy kattaliklari:

- Neytronlarning 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 tushayotgan ion dastasining di-ametri –10 – 30 mm;
- Ishlash rejimi uzluksiz.

5.6-§. Gamma-aktivatsion tahlil

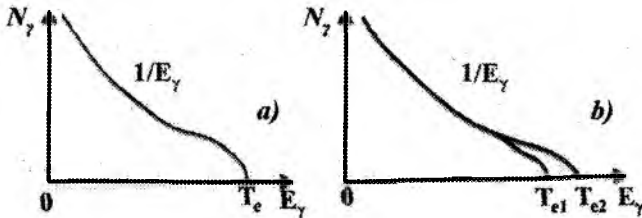
Monoenergetik va tormozli gamma-nurlanishlar. Gamma-nur-lanishlar manbayi sifatida radioizotop va elektron tezlatkichlar man-balari qo‘llaniladi. Yarim yemirilish davri katta bo‘lgan radioizotop manbalarning ba’zi birlaridan chiqayotgan gamma-kvantlarning energi-yalari 2 MeV dan katta, ammo 3 MeV dan kichik. Tajribalarda keng qo‘llaniladigan monoxormatik gamma-nurlanishlar manbalari va ular-ning xususiyatlari *5.3-jadvalda* keltirilgan.

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

Monoxromatik gamma-nurlanishlar manbai.

Nuklid	g-kvantlar energiyasi, MeV	g-kvantlar intensivligi, %	$T_{1/2}$
^{60}Co	1173,2	99,90	5,27 yil
	1332,5	99,98	
^{137}Cs	0,662	85,21	30 yil
^{24}Na	2,754	99,94	15,02 soat
^{46}Sc	1,121	99,99	83,81 sut
^{56}Mn	0,847	98,90	2,578 soat
	1,811	27,20	
	2,113	14,30	

Yuqori energiyali gamma-kvantlarni olish imkoniyati faqat yuqori energiyali elektron tezlatkichlarni yaratgandan keyingina paydo bo'ldi. Elektron tezlatkichlarda (betatron, mikrotron va chiziqli elektron tezlatkich) 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 tushadi va unda tormozlanadi. Natijada tormozli gamma-nurlar hosil bo'lib, ularning spektri uzluksizdir. Ushbu spektr 5.10-rasmda ko'rsatilgan.



5.10-rasm. Tormozli nurlar spektri:

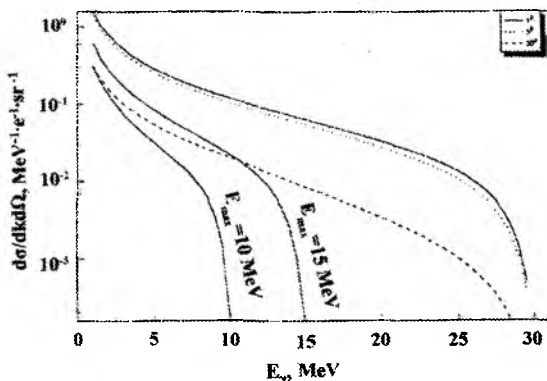
a) energiyasi T_e bo'lgan elektronlar hosil qilgan spektr;

b) energiyalari T_{e1} va T_{e2} bo'lgan elektronlar hosil qilgan spektrlar.

Tormozli gamma-nurlanishlarning maksimal energiyasi tormozlanayotgan elektronlarning kinetik energiyasiga teng bo'lib, intensivligi esa energiyaga teskari proporsional ravishda kamayadi. Shunday qilib,

elektronlarning tormozlanishi natijasida olingan maksimal energiyali uzluksiz gamma-kvantlar spektrini olish mumkin bo'ldi.

5.11-rasmda qalin nishonda (mikrotron va chiziqli elektron tezlatkichlarda qo'llaniladigan nishon) hosil bo'ladigan tormozli nurlar spektrining hisoblash natijasida olingan shakli keltirilgan. Bu ushbu tezlatkichlarda tormozli nurlar hosil qilish mexanizmi bilan bog'liq.



5.11-rasm. Qalin nishonda hosil bo'ladigan tormozli nurlar spektri.

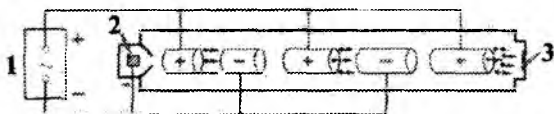
Chiziqli tezlatkichlar. Chiziqli tezlatkichlar deb undagi tezlashayotgan zarralar traektoriyasi to'g'ri chiziqqa yaqin bo'lgan qurilmalarga aytiladi. Shuni ta'kidlab o'tish kerakki, to'g'ri tezlanish deb nomlangan metodga asoslangan yuqori voltli qurilmalarda ham zarralar to'g'ri chiziq bo'ylab harakatlanadilar. Ayrim hollarda bunday tezlatkichlar elektrostatik chiziqli tezlatkichlar deb ham aytiladi. Bunday tezlatkichlarda zarralarga energiya doimiy potentsiallar ayirmasi katta bo'lgan oraliqdan bir marta o'tganda beriladi. Bunday potentsiallar farqi manbaji sifatida *kaskad generatori*, *Vande-Graaf generatori*, *impuls generatori*, *impulsli transformator* va boshqalar ishlatiladi. Biz ayrim chiziqli tezlatkichlarning ishlash prinsipi bilan tanishib chiqamiz.

Chiziqli rezonans tezlatkichlar. Ushbu tezlatkichlarda zarralar to'g'ri chiziq bo'yicha o'zgaruvchan elektr maydon ta'sirida tezlatiladi.

Yuqori voltli chiziqli tezlatkichlardan farqli ravishda, rezonans chiziqli tezlatkichlarda katta kuchlanish emas, balki rezonans tezlatish prinsipi qo'llaniladi. Chiziqli rezonans tezlatkichlar tezlatish trubkasida

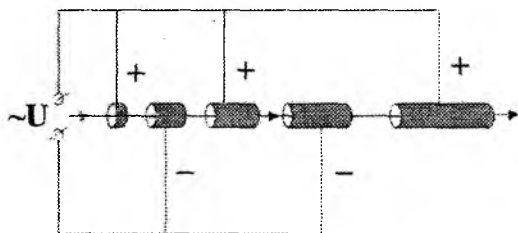
ionlarni tezlatish yuqori chastotali (YuCh) generatordan berilgan uncha katta bo‘lmagan kuchlanish orqali ko‘p martalab o‘tish orqali amalga oshiriladi (5.12 va 5.13-rasmlar). Trubkasimon elektrodning uzunligi ionlar harakat yo‘nalishi bo‘ylab kattalashib boradi. Ionlarning inertial harakatlanish vaqti hamma trubkalarda bir xil va YuCh-generator kuchlanish o‘zgarishining yarim davriga teng. Juft trubkasimon elektrodlar YuCh-generatorning birinchi klemmasiga, toqlari esa ikkinchi klemmasiga ulanadi.

Musbat zaryadlangan ionlar birinchi va ikkinchi elektrodlar orasidagi tirqishga kirgan bo‘lsin. Bu vaqtda toq elektrodga musbat, juft elektrodga esa manfiy kuchlanish beriladi. Ionlar ikkinchi elektrod-dan chiqqan momentida esa juft elektrodga musbat, toq elektrodga manfiy kuchlanish beriladi va h.k. Har bir elektrod-dan ionlarning o‘tish vaqti o‘zgaruvchan kuchlanish davriga teng. Shuning uchun ham ushbu tezlatkichlar rezonans tezlatkichlar deyiladi. Chiziqli rezonans tezlatkichlarning chiqishida zarralar energiyasini bir metr uzunlikda 10ch15 MeV gacha oshirishi mumkin. Ushbu tezlatkichlarda zarralar nishonga impuls bo‘lib kelib tushadi va tushish vaqti YuCh-generatorning davriga teng. Chiziqli rezonans tezlatkichlar impulsli tezlatkichlar hisoblanadi. Odatda bu tezlatkichlarning o‘rtacha toki bir necha mA ni (ba‘zan 20ch30 mA gacha) tashkil etadi. Impulsdagi tok 50 mA gacha bo‘ladi.



5.12-rasm. Chiziqli rezonans tezlatkich:

1) YuCh-generator; 2) ionlar manbayi; 3) nishon.



5.13-rasm. Chiziqli rezonans tezlatkich.

Chiziqli rezonans tezlatkichlarning ustunligi bu katta tok olish va zarralar injeksiyasi (kiritish) va chiqishining soddaligi hisoblanadi. Bundan tashqari chiziqli tezlatkichlarda zarralar traektoriyasi to'g'ri chiziq bo'lganligi sababli ular elektromagnit nurlanishlar chiqarmaydi. 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 tezlatkichlarda tezlatilganda ularning energiyasining bir qismi elektromagnit nurlanishlarga sarf bo'ladi. Shuning uchun ham chiziqli tezlatkichlar asosan elektronlarni tezlatish uchun quriladi.

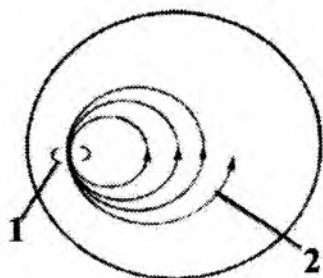
Siklik tezlatkichlar. Siklik tezlatkichlarni shartli ravishda ikkiga bo'lish mumkin: *rezonans va induksion tezlatkichlar*. Siklik rezonans tezlatkichlarda qo'yilgan boshqaruvchi magnit maydon ta'sirida zarralar traektoriyasi egrilanib, aylana yoki yassi spiral shaklini oladi va shu bilan birga tezlatilayotgan 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.

Tezlatuvchi elektr maydon va boshqaruvchi magnit maydonlar xususiyatlariga bog'liq holda siklik rezonansli tezlatkichlar quyidagi turlarga bo'linadi: siklotron, sinxrotron, sinxrofazotron.

Qo'llanilayotgan fokusirovkalashning xususiyatiga qarab, siklik rezonans tezlatkichlar kuchli fokusirovkali va kuchiz fokusirovkali tezlatkichlarga bo'linadi. Bu yerda siklik tezlatkichlardan *mikrotron* va *betatronlar* keltirilgan.

Mikrotron. Siklotronda elektronlarni tezlatib bo'lmaydi, sababi ular tez relyativistik tezlikka erishadilar. Shunga qaramay shunday tezlatkichlar mavjudki, ularda elektronlar bir jinsli magnit maydonda elektr maydon impulsi bilan tezlatiladi. Bunday turdagi tezlatkichlar mikrotron deyiladi (*ba'zan elektron siklotroni deb ham aytiladi*). Mikrotronda zarracha tezlatkich kamerasiga magnit maydonning markaziy qismiga kiritilmasdan balki chetiga kiritiladi. Zarracha chiqish joyiga kovak (*ichi bo'sh*) tezlatuvchi rezonator joylashtiriladi.

Rezonatorda zarracha har bir aylanishida elektronning tinchlikdagi energiyasiga aniq teng bo'lgan $0,511 \text{ MeV}$ energiya oladi. Elektronning *n*-aylanish davri T_n birinchi aylanish davriga karrali bo'ladi:



5.14-rasm. Mikrotron sxemasi. 1 – rezonator, 2 – elektronlar traektoriyasi.

$$T_n = nT_1 = \frac{2\pi mc}{eH\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (5.6)$$

Shuning uchun ham elektron har bir aylanishda rezonatorga tezlatish momenti tushadi. Mikrotronda elektronlar radiusi oshib boruvchi aylana bo'yicha harakatlanib, hamma aylanalar rezonator ichida bir-biriga tegadi (5.14-rasm).

Mikrotronlar impuls rejimida ham, uzluksiz rejimda ham ishlaydi. Ushbu tezlatkichlarda erishilgan chegaraviy

energiya 50-100 MeV lar atrofida baholanadi. Energiyaning keyingi oshishiga magnit maydoniga 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 energiyali mikrotron impulsda 100 mA, 30 MeV energiyali mikrotronda esa atigi 0,05 mA tok beradi. Odatda o'rtacha tok impuls qiymatidan uch tartibgacha kamdir. Mikrotronning afzalliklariga elektronlar dastasi chiqishining soddaligi, dastaning yuqori monoenergetikligi (faqat elektrostatik tezlatkichlarga yon beradi) va past energiyalarda yetarlicha yuqori intensivlikka ega bo'lishi kiradi. Shuning uchun ham past energiyalarda mikrotron perspektiv turdagi elektron tezlatkich hisoblanadi. Hozirgi kunda mikrotron Samarqand 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 30 mkA gacha; ikkinchi rejimda 20 mkA gacha; impuls toki – 20 mA; impuls tokining davomiyliigi – 2,3 mks; iste'mol qiladigan quvvat – 20 kVt.

Betatron. O'rta va past energiyali elektron tezlatkichlardan eng ko'p tarqalgani betatron hisoblanib, u elektronlarning birinchi siklik tezlatkichidir. Uning ilk nusxasi 1940-yilda amerikalik olim D.Krest tomonidan yasalgan. Betatron boshqa tezlatkichlardan shu bilan farq qiladiki, bu turdagi tezlatkichlarda zarralarni tezlatuvchi elektr maydon tashqaridan berilmaydi, balki zarralarni doiraviy orbitalarda ushlab tu-

ruvchi magnit maydonning vaqt bo'yicha tez o'zgarishi natijasida hosil bo'ladi. Haqiqatan ham agar aksial simmetrik magnit maydon vaqt bo'yicha o'zgarsa, unda Maksvellning quyidagi tenglamasiga asosan

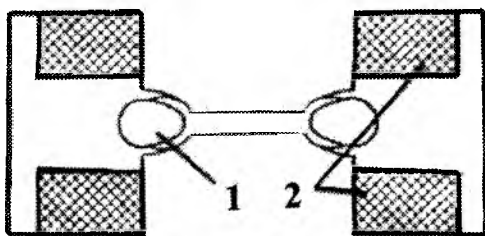
$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (5.7)$$

kuch chiziqlari konsentrik aylanalardan iborat bo'lgan E elektr maydon hosil bo'ladi. Ushbu holda elektronlar ultra-relyativistik xususiyati tufayli magnit maydonining $H(R)$ radial bog'lanishi shunday talab olinishi mumkinki, bunda elektron orbitalar radiusi vaqt bo'yicha o'zgarimas bo'ladi.

Betatronning ishlashini ma'lum darajada transformatorning ishlashiga o'xshatish mumkin. Ma'lumki, transformator berk po'lat o'zakdan va unga o'ralgan 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 (E_{YuK}) hosil bo'ladi.

Agar ikkilamchi cho'lg'amni tutashtirsak unda u orqali elektr toki o'tadi. Betatronda ikkinchi o'zak halqasimon vakuum kamerasiga almashtirilgan. Bu kamera «teshik kulchaga» o'xshaydi. Betatronning ko'ndalang kesimining sxemasi 5.15-rasm^{da} 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



5.15-rasm. Betatronning vertikal kesimi.
1) Elektronlarni tezlatish uchun kamera.
2) Elektromagnit g'altaklar.

0,001 s vaqt ichida kameraga «elektron to‘p» yordami bilan injeksiyalanadi (kiritiladi). Elektronlar manbayi, elektronlarni chiqaruvchi volfram tolali cho‘lg‘am va elektronlarni dastlabki tezlatuvchi hamda 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 qiymatgacha oshish vaqti ichida, ya’ni ta’minot manbayi 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 (sinxrotronga nisbatan) bo‘lishi, shuningdek, *100 MeV* dan yuqori energiyalarda betatronda tezlatish rejimi, elektronlarning elektromagnit nurlanishi tufayli buzilish sababli tezlatishning betatron usulining afzalligi yo‘q.

Betatronlarda zarrachalar oqimining intensivlik katta emas. Impulsdan 10^9 – 10^{10} zarra bo‘lganda o‘rtacha tok 10^{-2} *mA* dan oshmaydi. Ushbu tezlatkichlarning kamchiliklardan yana biri unda amalda elektronlar dastasini chiqarib bo‘lmasligidir. Shuning uchun ham betatronlar faqat tormozli gamma-nurlar manbayi sifatida ishlatiladi.

5.7-§. Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil

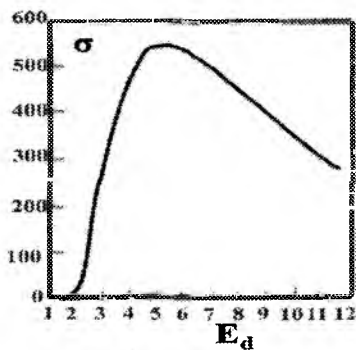
Fotonlar va neytronlardan tashqari zaryadlangan zarralar bilan ham aktivatsion tahlil amalga oshiriladi. Bunda tekshirilayotgan namunalarda zaryadlangan zarralar bilan aktivatsiya qilinadi. Aktivatsiya qiluvchi zarralar sifatida asosan vodorod va geliy izotoplarining yadrolari qo‘llaniladi, ya’ni: *proton p*, *deytron d*, *triton t*, *geliy-3 (³He)* va *b-zarralar*.

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o‘tkazilganda quyidagi ikkita faktorni hisobga olish lozim:

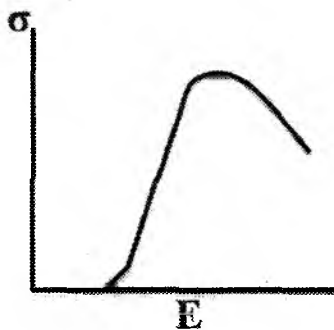
- Kulon to‘sig‘i;
- Zaryadlangan zarralarning kimyoviy element atomlaridagi elektronlar bilan o‘zaro ta’siri.

• Zaryadlangan zarralar atom yadrolari bilan o‘zaro ta’sirlashganda Kulon potensialini hisobga olishga to‘g‘ri keladi. Sababi musbat zaryadlangan zarra, musbat zaryadlangan yadro bilan o‘zaro ta’sirlashganda Kulon potentsiali ushbu o‘zaro ta’sirni amalga oshirishga to‘sqinlik 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 potensial 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 oshirish mumkin. Ammo bunday jarayonlarning ehtimolliklari juda ham kichik bo‘lgani uchun amalda hisobga olinmaydi.

Zaryadlangan zarralar ishtirokidagi yadro reaksiyalar kesimining zarra energiyasiga bog‘lanishi, ya’ni uyg‘onish funksiyasi umumiy ko‘rinishi 5.16 va 5.17-rasmda keltirilgan. 5.16-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‘sqinlik qiladi, buning natijasida reaksiya kesimi kichik bo‘ladi.



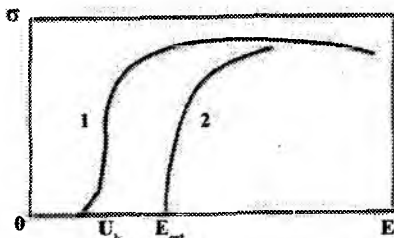
5.16-rasm. $^{23}\text{Na}(d,p)^{24}\text{Na}$ reaksiyaning uyg‘onish funksiyasi



5.17-rasm. Reaksiya kesimining zaryadlangan zarra energiyasiga bog‘lanishi

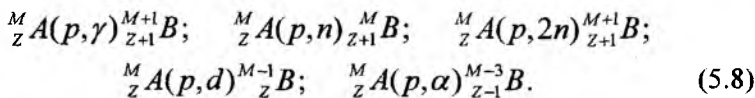
Zarralar energiyasi oshishi bilan Kulon to‘sig‘ining shaffofligi (zarralarning o‘tish ehmolligi) oshadi va bunga mos holda reaksiya kesimi ham oshadi. Reaksiya kesimi maksimum qiymatga, zarra energiyasi-

ning 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 natijasida hosil bo'lishiga aytiladi. Ekzotermik va endotermik reaksiyalar kesimlarining zaryadlangan zarralarning energiyalariga bog'lanishi *5.18-rasm*da keltirilgan. Bunda 1-egri chiziq ekzotermik reaksiyaga, 2-egri chiziq esa endotermik reaksiyaga tegishlidir. Zaryadlangan zarralar ta'sirida bo'ladigan yadro reaksiyalarda Kulon to'sig'i ham ushbu reaksiyalarni ma'lum bir energiyadan boshlashini olib keladi. *5.18-rasm*da U_q – Kulon to'sig'ining balandligi, E_{ost} – reaksiya ostona energiyasi berilgan.



5.18-rasm. Ekzotermik va endotermik yadro reaksiyalarining uyg'onish funksiyalari.

Raqobatlanuvchi reaksiyalar aktivatsion tahlilda ko'pchilik hollarda salbiy rol o'ynaydi. Masalan, bitta yadro ikkita har xil element yadrolaridagi reaksiyalar natijasida ham hosil bo'lishi mumkin. Bu esa element miqdorini aniqlashda sistematik xatoliklarni keltirib chiqaradi. O'rta energiyali protonlar ta'sirida quyidagi reaksiyalar ro'y berish ehtimolliklari katta bo'ladi:



Agar bunga tahlil qilinayotgan namuna tarkibida bir necha element va o'z navbatida ushbu elementlarning izotoplari qo'shilsa, yadro reak-

siyalar soni keskin oshib ketadi. Bu esa metodikalar ishlab chiqishda raqobatlanuvchi reaksiyalarni sifat va miqdoriy jihatdan hisobga olishni talab qiladi.

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o'tkazganda yana bir muhim omilni hisobga olish lozim, ya'ni zaryadlangan zarralarning kimyoviy element atomlaridagi elektronlar bilan o'zaro ta'siri. Buning natijasida zaryadlangan zarralar o'z energiyasini muhit atomlarini o'yg'otishga va ionizatsiya qilishga sarflaydilar va energiyasini tez yo'qotadilar. Shu sababli, mazkur tahlil metodida namuna o'lchamini aniqlashda zarralarning yugurish yo'llarini ham hisobga olish zarur.

Zaryadlangan zarralar bilan aktivatsion tahlil o'tkazganda asosan etalon va monitor tahlil metodlari qo'llaniladi. Ayrim hollarda absolut metoddan ham foydalanildi. Bu kamdan kam uchraydigan holdir.

Zaryadlangan zarralar manbayi sifatida asosan siklotron va chiziqli tezlatkichlar 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 tezlatkich 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. Siklotronda protonlar 20 MeV gacha, b-zarralar 40 MeV gacha tezlatiladi.

Hozirgi kunda O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining Yadro fizikasi institutida U-150-II tipidagi siklotron mavjud bo'lib, bu tezlatkichda fundamental yadro fizikasi, radiatsion materialshunoslik, yadroviy radiokimyoy, radiobiologiya va tibbiyot sohalarida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu tezlatkichda *protonlar* – 8 – 20 MeV, *deytronlar* – 10 – 20 MeV, *ionlar* – 20 – 40 MeV va *alfa-zarralar* – 20 – 40 MeV energiya diapazonlarida tezlatiladi. Mazkur tezlatkichda ko'p yillar davomida zaryadlangan zarralar ishtirokidagi aktivatsion tahlil ham amalga oshirib kelingan.

Zaryadlangan zarralarda aktivatsion tahlilni, nurlantirish uchun qo'llanilayotgan zaryadlangan zarralarning turiga qarab quyidagi 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 reaksiya-lari sodir bo'lishi mumkin: (p,γ) , (p,n) , (p,α) , (d,p) , (t,n) , $(^3\text{He},n)$, $(^3\text{He},p)$, $(^3\text{He},\alpha)$, (α,n) , (α,p) , $(\alpha,\gamma n)$ va h.k.

Yuqorida keltirilgan metodlarni qo'llab, keng doiradagi elementlar miqdorini turli moddalarda aniqlash bo'yicha metodikalar ishlab chiqilgan. Shunga qaramasdan, zaryadlangan zarralarda o'tkaziladigan aktivatsion tahlil asosan yengil elementlar miqdorini aniqlashga qaratilgan. Keyingi vaqtlarda yangi yaratilayotgan materiallar tozaligiga talab oshmoqda. Ayniqsa, har xil toza va o'ta toza materiallar tarkibida uglerod, azot va kislorod miqdorini aniqlash alohida o'rin egallaydi. Ushbu hollarda aniqlanish chegarasi $10^{-4} - 10^{-7} \%$ atrofida bo'ladi. Mazkur yo'nalishlarda yuqori sezgirlikka ega bo'lgan zaryadlangan zarralarda o'tkaziladigan aktivatsion tahlil qo'l keladi. Uglerod, azot va kislorod miqdorini aniqlash uchun quyidagi yadro reaksiyalari qo'llaniladi: $^{14}\text{N}(p,n)^{14}\text{O}$, $^{12}\text{C}(^3\text{He},n)^{14}\text{O}$, $^{14}\text{N}(d,n)^{14}\text{O}$ va $^{16}\text{O}(^3\text{He},\alpha)^{15}\text{O}$. Ushbu reaksiyalarni qo'llab toza metallar molibden, volfram, temir va kremniy karbidi tarkibida uglerod, azot va kislorod miqdorini aniqlash bo'yicha metodikalar ishlab chiqilgan. Bulardan tashqari turli yarim o'tkazgichli materiallar va toza metallar tarkibida tarkibda o'ta muhim bo'lgan elementlardan bor, uglerod, azot, kislorod va boshqa yengil 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, yupqa qatlamda yoki uncha ko'p bo'lmagan moddada ham aniqlash mumkin.

5.8-§. 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. Aktivat-

sion tahlilda ikkilamchi nurlanishlar energetik spektrini tahlil qilish orqali, sifat va miqdoriy natijalar olish mumkin.

Nurlantirilgan elementlarni, ikkilamchi nurlanish bo'yicha diskriminatsiya, identifikatsiya va miqdoriy aniqlash fizikaviy usullarga to'liq asoslangan tahlil metodi umumlashtirilib, instrumental aktivatsion tahlil deb nomlangan. Instrumental aktivatsion tahlil metodi o'z navbatida yana ikkiga bo'linadi, ya'ni spektrometrik instrumental aktivatsion tahlil va aktivatsion tahlilning maxsus metodlari. Aktivatsion tahlilning maxsus metodlari 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 tahlilning eng universal va imkoniyatlari katta bo'lgan metodlaridandir. Spektrometrik metodning imkoniyatlari ionlovchi nurlanishlar xususiyati va qayd qiluvchi qurilmaning ko'rsatkichlari bo'yicha belgilanadi.

Aktivatsion tahlilda ionlovchi nurlanishlar spektrometriyasining juda ko'p turli metodlaridan bittasi, ya'ni tadqiq qilinayotgan nurlanish energiyasini, elektrik impulslar ketma-ketligiga aylantirib, amplitudalar taqisimotini 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 tadqiqotlarda qo'llanilishi mumkin), amalda asosan γ -nurlanishlar spektrometriyasi keng qo'llaniladi. XX asrning 60-yillarida ssintillatsion γ -spektrometrlar, 70- va 80-yillarda asosan $Ge(Li)$ detektordan iborat bo'lgan γ -spektrometrlar qo'llanilgan. 90-yillarning oxiri va XXI asrning boshlaridan boshlab, asosan toza germaniydan ($HPGe$) iborat bo'lgan va kompyuter tizimiga ulangan zamonaviy dastur ta'minotiga ega bo'lgan γ -spektrometrlar qo'llanilmoqda.

5.9-§. Gamma spektrometr

Gamma spektrometri yadrodan chiqayotgan γ -kvantlarni 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 asosiy holatga yoki ikkinchi bir quyi energetik holatga o'tganda γ -kvantlar chiqaradi.

Ko'p holatlarda turli zarrachalarni yadrolarga kelib urilishida turli ko'rinishdagi yadro jarayonlari sodir bo'ladi. Bu jarayonlarda yadrolar uyg'ongan holatga o'tadi. Uyg'ongan holatda uzoq vaqt yashay olmaydi. Bu yadrolar asosiy holatiga o'tishda, uyg'ongan holat energiyalari gamma nurlari ko'rinishida tashqariga chiqaradi. Gamma kvantlarni qayd etish orqali yadroga tegishli bo'lgan spektroskopik ma'lumotlarni olish mumkin. Gamma nurlarni qayd qilish uchun maxsus detektorlar va spektrometriyalar yaratilgan. Ularga qisqacha qilib gamma spektrometr deb nom berilgan.

Gamma spektrometrlarning asosini quyidagilar:

- 1) gamma nurini qayd qiluvchi detektorlar;
- 2) kuchaytirgich;
- 3) ko'p kanalli analizator;
- 4) ma'lumotlarni to'plovchi qurilmalar.

Hozirgi paytda gamma spektrometrlar 3D dastur ta'minotiga ega va qisqa vaqtda tahlil qiladi.

Gamma-nurlari aniq bir energiyaga ega bo'ladi. Gamma-nurlanishlarning mazkur xususiyatlari, elementlarni identifikatsiya qilish va elementlarni ajratib aniqlash uchun yaxshi asos bo'ladi. Gamma-nurlanishlarning yuqori o'tuvchanlik qobiliyati yetarlicha qalinlikdagi namunalarni γ -spektrometrik tahlil qilishga imkon beradigan qulay usullaridan biri hisoblanadi. Bu sanab o'tilgan xususiyatlar va imkoniyatlar γ -spektrometrik metodga instrumental aktivatsion tahlilda yetakchi o'rin egallashga imkon beradi.

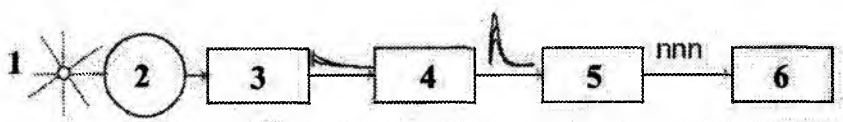
Gamma-spektrometrlarning tuzilishi va ishlash tamoyillarini o'rganishdan oldin γ -nurlarning modda bilan o'zaro ta'sirlarini ko'rib chiqamiz.

Yarimo'tkazgichli gamma-spektrometr. Ge(Li)-detektorli g-spektrometrlar paydo bo'lishi instrumental aktivatsion tahlil uchun mutlaqo yangi imkoniyatlarni ochdi desak mubolag'a bo'lmaydi. Bunga asosiy sabab, mazkur detektorlar yuqori energiya bo'yicha ajratish qobiliyatiga ega bo'lganligidir.

Yarimo'tkazgichli Ge(Li)-detektorlar suyuq azot haroratida va chuqur vakuumda normal ishlaydi. Suyuq azot bilan to'ldirilgan Dyuar idishi ushbu detektorli γ -spektrometrlarning doimiy elementi hisoblanadi. Suyuq azot detektorni past haroratda 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 muddatni tashkil qiladi.

Yarimo'tkazgichli detektorlardan chiqayotgan signal amplitudasi juda ham kichik bo'ladi (millivoltlar kattaligida). Shuning uchun detektorning chiqishiga birlamchi kuchaytirgich ulanadi. Bu kuchaytirgichlarga katta talab qo'yilib, u detektorning energiya bo'yicha ajratish qobiliyatini belgilaydi. Birlamchi kuchaytirgichning shovqinini kamaytirish uchun uni past haroratgacha sovitishga to'g'ri keladi. Shovqinni kamaytirish hisobiga detektorning energiya bo'yicha ajratish qobiliyatini yaxshilash mumkin.

Hozirgi kunda asosan toza germaniy HPGe-detektorli g-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 g-spektrometrning blok sxemasi **5.19-rasm**-da keltirilgan.



5.19-rasm. 1) g-nurlanish manbayi; 2) o'ta toza germaniy detektori (HPGe-detektor); 3) yordamchi kuchaytirgich (predusilitel); 4) asosiy kuchaytirgich; 5) ko'p kanalli analizator; 6) kompyuter.

O'ta toza germaniydan iborat bo'lgan detektorlar (HPGe-detektor) yarim o'tkazgichli p-n o'tishli dioddan iborat bo'lib, uning sezgir sohasi hajmini oshirish uchun koaksial (silindrik) geometriyada tayyorlanadi.

di. Detektorning koaksial geometriyasi g-kvantlarni qayd qilish effektivligini, tekislik geometriyadagi detektorga nisbatan ancha oshiradi.

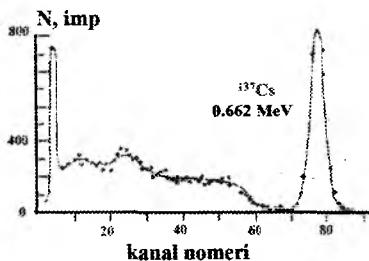
Detektorning g-kvantlarni qayd qilish effektivligi ishchi soha hajmidan tashqari detektor tayyorlagan materialga ham bog'liq bo'ladi. Hozirgi vaqtda yarim o'tkazgichli detektorlar tayyorlanadigan keng tarqalgan materiallar bu kremniy va germaniy hisoblanadi. Gamma-kvantlarni qayd qilish uchun ko'pincha germaniydan yasalgan detektorlar qo'llaniladi.

Tayyorlash qiyin bo'lishiga qaramasdan, detektorni tayyorlash uchun boshlang'ich material sifatida germaniy tanlab olinadi. Bu g-kvantlarning o'zaro ta'sir kesimi moddaning Z atom nomeriga kuchli bog'langanligidir. Ayniqsa, *fotoeffekt* kesimi Z ga kuchli bog'liq bo'ladi ($y_f \sim Z^5$), *Kompton effekti* kesimi esa Z ga proporsional bo'ladi. *Elektron-pozitron jufti hosil bo'lish* jarayonining kesimi – Z^2 . *Germaniyda* Z katta qiymatga ega bo'ladi ($Z(\text{Ge})=32$, $Z(\text{Si})=14$). Shu sababli ushbu material tanlangan bo'lib, u detektorning g-kvantlarni qayd qilish yuqori effektivligini ta'minlaydi.

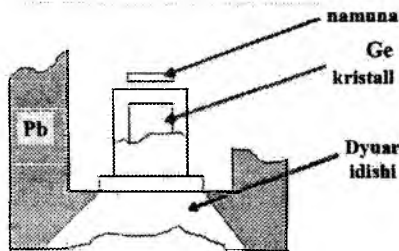
Gamma-kvantlarning detektor moddasi bilan o'zaro ta'sir qilishi natijasida uning chiqishida elektr zaryadlar hosil bo'lib, uning kattaligi g-kvantning detektorda yo'qotgan energiyasiga proporsional bo'ladi. Hosil bo'lgan zaryad kattaligini proporsional ravishda kuchlanish amplitudasiga aylantirish uchun yuqorida aytib o'tilgan birlamchi kuchaytirgichdan, davomiyligi bo'yicha signallarni shakllantirish va shovqinlarni bostirish uchun esa asosiy kuchaytirgichlardan foydalaniladi.

Gamma spektrometrining asosini toza HP Ge detektori tashkil qiladi. Asosiy o'lchash ishlarining aksariyati shu detektor yordamida amalga oshiriladi. Kuchaytirishga sabab detektordan olingan amplituda juda kichik bo'lib keyingi bloklarga yetib bormaydi. Shuning uchun pastki kichik amplitudani kuchaytirish kerak. Bu kuchaytirgichlar chiziqli bo'lishi kerak.

Amplitudaning tadqiq qilinayotgan diapazoni teng chekli sonli intervallarga bo'linadi va har biriga tartib raqami beriladi. Ushbu intervallarni kanallar deb nomlash qabul qilingan. Asosiy kuchaytirgich chiqishidagi analog signallarni kompyuter ishlay oladigan raqamli kodlarga aylantirish amplituda-raqamli o'zgartirgich yordamida amalga oshiriladi. Amplituda-raqamli o'zgartirgich har bir impuls amplitudasini



5.20-rasm. Cs-137 radionuklidning g-spektri.



5.21-rasm. Namunaning aktivligini o'lchash sxemasi.

o'lchaydi va unga mos keladigan kanal nomerini aniqlaydi. Keyin mazkur ma'lumotlar kompyuterda qayta ishlanadi va kompyuter monitorida g-spektr hosil bo'ladi (5.20-rasm).

HP Ge detektori tashqi tabiiy γ -nurlanishlar va kosmik nurlanishlar fonidan himoya qilish uchun uni qo'rg'oshin devorli uycha ichiga joylashtiriladi. Mazkur himoya radionuklidlarning juda kichik aktivliklarini o'lchash aniqliklarini oshiradi (5.21-rasm). O'lchanayotgan natijalarning aniqlik darajasini oshiradi.

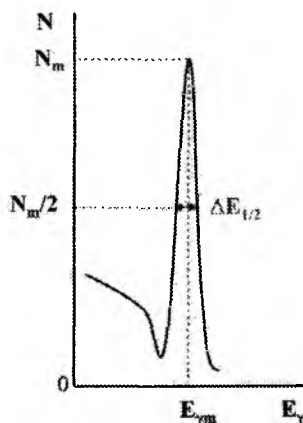
Aktivatsion tahlilda gamma-spektrometrlarni tavsiflovchi quyidagi ikkita asosiy kattalik e'tiborga olinadi:

1. Energiya bo'yicha ajratish qobiliyati;
2. g-kvantlarning effektivligi.

Energetik ajratish qobiliyatini ikki xil ko'rinishda ifodalash mumkin, ya'ni absolut va nisbiy energiya bo'yicha ajratish qobiliyati. Absolut ajratish qobiliyati deb fotocho'qqi balandligi yarmining kengligiga ($\Delta E_{e_{1/2}}$) aytiladi (5.22-rasm). Nisbiy ajratish qobiliyati deb quyidagi kattalikka aytiladi:

$$D_{1/2} = \Delta E_{e_{1/2}} / E_g \quad (5.9)$$

Ssintillatsion g-spektrometrlarni energiya bo'yicha ajratish qobiliyatini tavsiflashda nisbiy ajratish qobiliyati ishlatiladi.



5.22-rasm. Gamma-spektr.

Yarim o'tkazgichli g-spektrometrlarda esa absolut ajratish qobiliyati qo'llaniladi.

Yarim o'tkazgichli g-spektrometrlarning energetik ajratish qobiliyatidan tashqari uni tavsiflaydigan yana bir muhim kattalik bu detektorning qayd qilish darajasidir. Gamma-spektrometrlarning effektivligi deb fotocho'qqidagi qayd impulslar sonining g-manbadan 4π fazoviy burchakda g-quantlar soniga nisbatiga aytiladi. Tajribada g-spektrometrlarning absolut va nisbiy effektivliklari aniqlanadi. Tanlangan o'lchash sharoiti (fazoviy burchak va yutilish filtrlari) uchun absolut effektivlik quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{\sum \left(\frac{\mu_{f_{oy}}}{\tau} \right)}{A_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot I_\gamma} \quad (5.10)$$

bu yerda $S = \mu_{f_{oy}}/f$ – berilgan energiyadagi fotocho'qqi yuzasi; f – g-spektrni o'lchash vaqti;

I – 4π fazoviy burchakda 1s vaqt davomida manba chiqarayotgan berilgan energiyada monoenergetik g-quantlar soni;

$\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ – parchalanish doimiysi, sut^{-1} ;

t – attestatsiya momentidan o'lchash momentigacha bo'lgan vaqt, sut;

A_0 – boshlang'ich aktivlik.

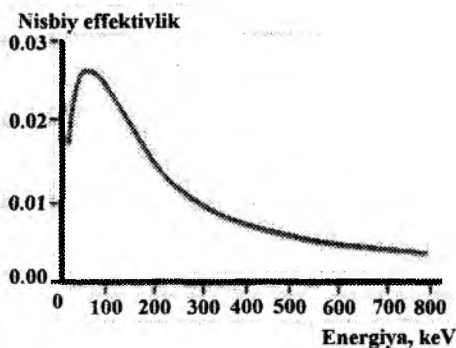
Yuqorida ta'kidlab o'tganimizdek, gamma-spektrometрни energiya va effektivlik bo'yicha kalibrovka qilish (darajalash) namunaviy spektrometrik gamma-manbalar to'plami (NSGM yoki rus tilida OSGI) yordamida amalga oshiriladi. Attestatsiya momenti bu namunaviy radionuklid ishlab chiqarilgan sana (oy va yil).

O'zbekiston Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutining Radioanalitik markazida zamonaviy g-spektrometrlar majmuasi mavjud bo'lib, bu majmuada fundamental va amaliy tadqiqotlar olib boriladi (5.23-rasm).

Mazkur markazda namunalarning kiritilgan aktivligini energetik ajratish qobiliyati 1332,5 keV (^{60}So) gamma-chiziq uchun $\Delta Y e_{1/2} = 1,8$ keV va nisbiy effektivligi 15 % bo'lgan HPGe detektordan tashkil topgan gamma-spektrometr bilan o'lchanadi (5.24-rasm).



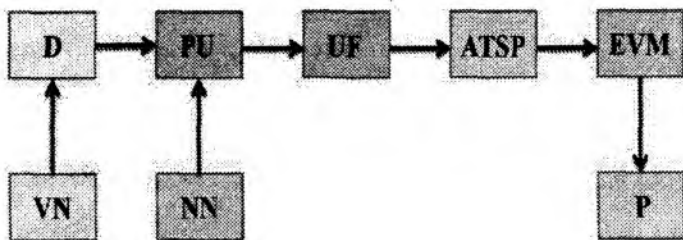
5.23-rasm. Yarim o'tkazgichli g-spektrometr majmuasi (O'zFA Yadro fizikasi instituti).



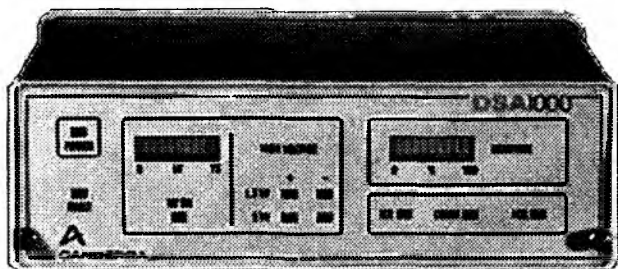
5.24-rasm. Nisbiy effektivlikning gamma-kvantlar energiyasiga bog'lanishi

Gamma-spektrometr DSA-1000 turdagi ko'p kanalli raqamli analizator va γ -spektrlarni qayta ishlovchi Genie-2000 programmalar dasturiga ega.

Genie-2000 programmalar majmuasi bilan spektrlarni o'lchash 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'qqilari-ning o'rnini, energiyasini, fotocho'qqi yuzasini va uning statistik xatosini avtomatik ravishda aniqlab beradi.



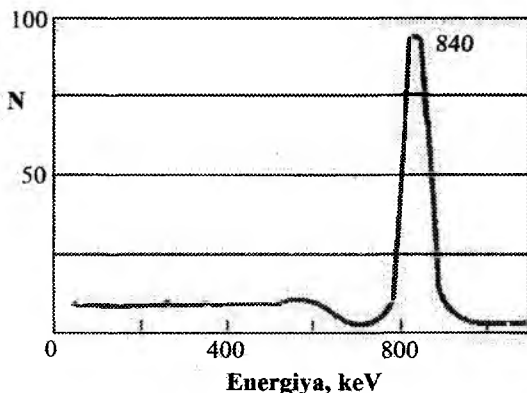
5.25-rasm. O'lchash kompleksining blok-sxemasi: D – Ge-detektor; PU – dastlabki kuchaytirgich; UF – kuchaytirgich-impulslarni shakllatgich (formirovatel); VN – yuqori kuchlanish manbayi; NN – past kuchlanish manbayi; ASP – analog-raqamli aylantirgich; EVM – Pentium-4; P – printer HP Laser Jet 1000.



5.26-rasm. DSA-1000 turdagi raqamli ko'p kanalli analizator.

Gamma-spektrometрни energiya va effektivlik bo'yicha sozlash OSGI namunaviy spektrometrik gamma-manbalar to'plami (NSGM yoki rus tilida OSGI) yordamida amalga oshiriladi. Gamma-spektrometr blok-sxemasi 5.25-rasmida keltirilgan. 5.26-rasmida DSA-1000 turdagi raqamli ko'p kanalli analizator rasmi ilova qilingan.

Gamma-spektrometr chiziqlarining apparatura shakli. Monoenergetik gamma-nurlanishlarni 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 g-nurlanishlarning detektor moddasi bilan o'zaro ta'siri belgilaydi. Ikkinchi tomondan amplituda taqsimotining shakliga bir qator omillar ham ta'sir ko'rsatadi, ya'ni detektorda



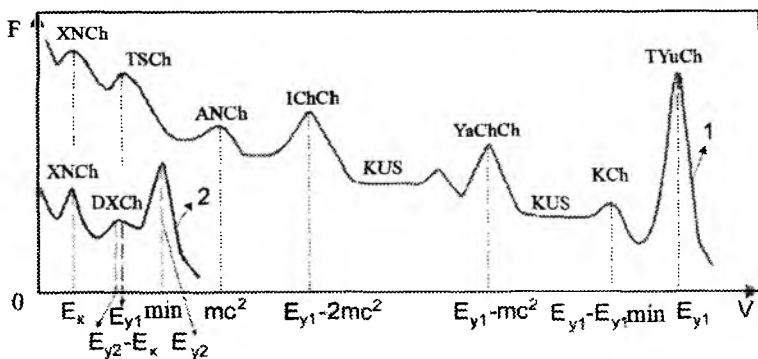
5.27-rasm. g-nurlanisharni qayd qilganda amplituda taqsimotining tipik shakli.

kechadigan ikkilamchi jarayonlar yuzaga keltiradigan, g-spektrometr konstruksiyasining o'ziga xos xususiyati, o'lchanayotgan radioizotoplar aralashmasining tarkibi, shuningdek, nurlanishi g-spektrometrda tahlil qilinayotgan namunaning modda tarkibi, massasi va geometrik shakli ham muhim ahamiyatga egadir.

Eksperimental sharoit shunday sozlangan bo'lsinki, bunda gamma-spektrning shakllanishiga salbiy ta'sir ko'rsatuvchi hamma qo'shimcha omillarnig ulushi minimal bo'lsin. Ushbu holda monoenergetik g-nurlanisharni qayd qilganda amplituda taqsimotining tipik shakli 5.27-rasmdagi ko'rinishda bo'ladi. Bu olingan amplituda taqsimotida ikkita soha aniq ajralib turibdi, ya'ni g-kvantlar energiyasi to'liq yutilishi bilan bog'liq bo'lgan cho'qqi (fotoeffekt va ko'p karrali sochilish) va hosil bo'lishiga Kompton sochilishi sababchi bo'lgan uzluksiz amplituda taqsimoti.

To'liq yutilish cho'qqisi g-spektrometrik tahlil uchun fundamental ahamiyatga ega. To'liq yutilish cho'qqisi maksimumining o'rni (holati), qayd qilingan g-nurlanishlarning energiyasini, uning yuzasi yoki balandligi mazkur energiyali nurlanish intensivligini aniqlashga xizmat qiladi.

To'liq yutilish cho'qqisi uzluksiz amplituda taqsimotining chetidan uncha katta bo'lmagan chuqurlik bilan ajralib turadi. Bu energetik bir-



5.28-rasm. Ssintillytsion yoki yarim o'tkazgichli detektorli gamma-spektrometrdagi gamma spektr. 1 – $E > 1,02 \text{ MeV}$. 2 – $\leq 200 \text{ keV}$. TYuCh – to'liq yutilish cho'qqisi (fotocho'qqi); KCh – Kompton cho'qqisi; YaChCh – yakka(bitta) gamma-kvant chiqib ketish cho'qqisi; KUS – kompton uzluksiz spektri; IChCh – ikkitalik chiqib ketish cho'qqisi; ANCh – annigilyatsiya nurlanish cho'qqisi; DXCh – detektor xarakteristik nurlanishning chiqib ketish cho'qqisi; TSCh – teskari sochilish cho'qqisi; XNCh – himoyaning xarakteristik nurlanishining cho'qqisi.

liklarda 250 keV ni tashkil etadi. Murakkab spektrlarda uzluksiz amplituda taqsimoti xalal beruvchi rolni o'ynaydi. Shu sababli, cho'qqilarni identifikatsiya qilganda va spektrlarni miqdoriy qayta ishlaganda uzluksiz amplituda taqsimotini alohida e'tiborga olish zarur. 5.28-rasmda gipotik gamma spektr ko'rsatilgan. Bu yerda turli jarayonlar hisobiga vujudga keladigan cho'qqilar va uzluksiz taqsimotlar keltirilgan.

5.28-rasmdagi g-spektr ideallashtirilgan bo'lib, bunda spektr shakliga ta'sir qiluvchi omillar hisobga olinmagan. Amalda bunday ideallashtirilgan spektrni olish juda murakkab masala. Real sharoitda ushbu omillar spektrga sezilarli ta'sir qilib, uning amplituda taqsimotini deformatsiyalashga olib keladi va buning natijasida spektrda qo'shimcha piklar paydo bo'ladi.

Amplituda taqsimotining shaklini o'zgartirishga ichki (detektorning turi, o'lchami va shakli) va tashqi (tahlil qilinayotgan namunaning tarkibi, o'lchami, massasi, shuningdek, spektrometr konstruksiyasining o'ziga xos xususiyati va h.k.) omillar sababchi bo'ladilar.

Ikkilamchi jarayonlar va g-spektrometr konstruksiyasining ta'siri.

• Ikkilamchi zarra va kvantlarning detektordan chiqib ketish effektlari;

- Teskari sochilishlar;
- Murakkab fluoressensiya;
- Geometriyaning ta'siri;
- Tormozlanish nurlanishlari;
- Energiyalar qo'shilishi;
- Pozitron nurlanishlar.

Ikkilamchi zarra va kvantlarning detektordan chiqib ketish effektlari. Yutilgan g-kvant to'liq yutilish cho'qqisiga o'z ulushini qo'shishi uchun u hosil qilgan ikkilamchi zarralar va kvantlarning detektor ishchi hajmida energiyalarini to'liq yo'qotishlari kerak. Ammo ikkilamchi nurlanishlar o'zi bilan energiyaning bir qismini yoki hammasini olib, detektor ishchi hajmini tashlab chiqib ketishi ma'lum bir ehtimollikka ega. Birlamchi g-kvant detektorning sirtiga qanchalik yaqin sohada yutilsa, chiqib ketish ehtimolligi shunchalik katta bo'ladi.

5.10-§. Aktivatsion tahlil o'tkazish uchun zarur bo'lgan apparaturalar uyushmasi

Aktivatsion tahlilni amalga oshirish metodi bo'yicha ikkita katta guruhga ajratish mumkin:

- 1) instrumental aktivatsion tahlil;
- 2) kimyoviy qayta ishlash va namunalarni kimyoviy ajratish bilan amalga oshiriladigan tahlil.

Instrumental aktivatsion tahlil. Instrumental metod nurlanishni detektorlash bloki va elektron apparaturalar yordamida namunani kimyoviy ajratmasdan, aniqlanayotgan elementni identifikatsiya qilish va miqdorini aniqlashga imkon beradi. Alohida eng sodda hollarda faqat umumiy kiritilgan radioaktivlikni qayd qilish, boshqa hollarda esa nurlanish spektrometriyasini amalga oshirish zarur. Ba'zan, alohida hollarda murakkab tarkibli modda tahlil qilinayotganda qayd qilishning yanada murakkab metodlarini ishlatish zarur, yadrolarning parchalanish sxemalarining o'ziga xos xususiyatlaridan foydalangan

holda, masalan nurlanishning har xil turlari orasida vaqt bo'yicha mos kelishgi e'tiborga olinadi (γ - γ -yoki β - γ -mos tushish deb nomlangan). Hosil bo'lgan radioizotoplarning yarim yemirilish davrlari ancha farq qilganda ularni aniqlash, o'lchash vaqtlari orasidagi farqni aniqlash orqali amalga oshiriladi. Ayrim holda instrumental tahlilning selektivligi ma'lum bir nurlanish sharoitini yaratish yo'li bilan ham amalga oshirishi mumkin, ya'ni har xil energiyali neytron yoki γ -kvantlar bilan aktivatsiya qilish, optimal nurlanish vaqtini tanlash va hokazo.

Instrumental tahlil ko'pchilik hollarda yuqori ekspresslikka ega bo'lib, bu texnologik nazoratlar uchun juda muhimdir. Bunday ekspress tahlilga tipik misol qilib, oltin miqdorini γ -aktivatsion tahlil metodi bilan aniqlashni keltirish mumkin.

Ko'p komponentali instrumental tahlilni o'tkazish, detektorlash bloklarining ajratish qobiliyatini oshirish va o'lchangan natijalarni tahlil qilish kompyuterlar bilan bog'liqdir.

Radiokimyoviy usulni qo'llab aktivatsion tahlil o'tkazish. U yoki bu elementni murakkab kimyoviy tarkibdan iborat bo'lgan namunada instrumental aktivatsion tahlil bilan aniqlash imkoni bo'lmaganda radiokimyoviy usulni qo'llash orqali aktivatsion tahlil o'tkaziladi. Ushbu metodda nurlantirilgan namunaning kiritilgan aktivligini o'lchashdan oldin unga kimyoviy ajratish va tindirish jarayonlari qo'llaniladi. Oddiy qilib aytganda nurlantirilgan namunadan radiokimyoviy usul bilan kerakli radioizotoplar ajratilib olinadi va instrumental aktivatsion tahlil kabi kiritilgan aktivlik o'lchanadi.

Aktivatsion tahlil metodini o'tkazish uchun kerak bo'lgan asbob va uskunalarga quyidagilar kiradi:

- aktivatsiya qilish uchun nurlanish manbalari;
- nurlantirilgan namunani detektorlash sistemasiga olib boruvchi vosita;
- nurlanishlarni detektorlash bloklari;
- Tahlil va natijalarni qayta ishlash jarayonlarini avtomatlashtiruvchi qurilmalar.

Gamma-aktivatsion tahlil uchun quyidagi yuqori energiyali γ -kvantlar manbalari ishlatilishi mumkin: radioizotop, elektronlar elektrostatik tezlatkichi, chiziqli elektron tezlatkichlar, betatronlar, mikrotronlar. Gamma-aktivatsion tahlil uchun eng qulayi elektron tezlatkich-

lardir. Tezlatkichlarni qoʻllaganda, maʼlum bir energiyagacha tezlatilgan elektronlar dastasi ogʻir metallardan iborat nishonga yoʻnaltiriladi. Elektronlarning tormozlanishida hosil boʻlgan yuqori energiyali γ -nurlanishlar yuqori intensivlikka ega va yuqori sezgirlikdagi gamma-aktivatsion tahlil oʻtkazishga imkon beradi.

Elektron tezlatkichlar oddiy, kichik oʻlchamli boʻlgani bois hozirgi vaqtda gamma-aktivatsion tahlil uchun eng qulayi betatron hisoblanadi.

Betatronning vakuumli tezlatish kamerasida elektronlarni tezlatish uyurmaviy elektr maydon orqali amalga oshiriladi. Betatronlar olinayotgan tormozli γ -nurlanishlar energiyasini 10 MeV dan 30 MeV gacha diapozonida aniq oʻzgartirish va doza quvvatini 100 – 200 r/min (nishondan 1 m uzoqlikda) atrofida olishga imkon beradi. Yuqori istiqbolga ega boʻlgan katta intensivlikdagi γ -nurlanishlar manbalaridan biri bu mikrotrondir. Uning oʻlchami betatronnikidan kichik boʻlib, ancha katta intensivlikdagi tormozli nurlanish olishga imkon berishi bilan farq qiladi.

Neytron-aktivatsion tahlil metodida nurlanish manbalari sifatida quyidagilar qoʻllaniladi: radioizotop manbalar, neytron generatorlar va yadro reaktorlari. Ayrim hollarda neytronlar manbayi sifatida elektron va ion tezlatkichlar ham qoʻllaniladi.

Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil oʻtkazganda nurlanishlar manbalari sifatida asosan siklotronlar qoʻllaniladi.

Kuchli aktivatsiya manbalari bilan, shuningdek, nurlangan namunalardan ishlaganda xavfsizlikni taʼminlash uchun namunani nurlanish manbayidan detektorga olib boruvchi maxsus sistemalardan (qurilmalardan) foydalaniladi. Bundan tashqari, olib boruvchi sistemalar transportirovkani tezlatadi, aktivatsiya va oʻlchash orasidagi vaqt oraligʻini kamaytiradi.

Koʻproq olib boruvchi sistemalarning ikki turi, yaʼni mexanik va pnevmatik turlari qoʻllaniladi. Namunani transportirovka qilishni mexanik sistemasi odatda buriladigan poromislo, aylanuvchi disk yoki chiziqli transport mexanizmi (konveyer, borib-kelib turuvchi mexanizm va hokazo) koʻrinishida boʻladi. Pnevmotransport oddiy changyutgichlar kabi ishlaydi.

SB-50 betatronida namunalarni nurlanish postiga va undan oʻlchash xonasiga olib kelish uchun K5-2A turdagi pnevmotransport qurilmasi-

dan foydalanilgan. Ushbu qurilmada namunalar joylashtirilgan konteyner harakatlanadigan trubalarning (yoʻlining) uzunligi 40 metrga teng. Qurilma quyidagi texnik koʻrsatkichlarga ega:

- namunalarni bir tomonga, yaʼni nurlanish postigacha yoki undan oʻlchash xonasiga olib borish vaqti – 4 s;
- konteynerning foydali hajmi – 800 mm³;
- nurlanayotgan namunalarning maksimal massasi – 50 g.

Mexanik sistemaning ustunligi, katta massali, yaʼni massasi bir necha kilogrammgacha boʻlgan namunalarni transportirovka qilish imkoniyatiga ega boʻlishidadir.

Pnevмотransport sistemalari (yoki koʻpchilik hollarda «pnevmo-pochta» deb nomlanadi) kuchli nurlanish manbalari: yadro reaktori, neytronlar generatori va hokazo bilan ishlaganda keng foydalaniladi. Pnevмотransport sistemasi namunalarni tashuvchi (soluvchi) va chiqarib oluvchi maxsus qurilma bilan taʼminlangan, doira yoki toʻrtburchak kesimli trubalar (metaldan yoki polietilendan) sistemasidan iborat. Metall yoki polietilen kapsulalarga solingan namunalar, siqilgan havo yoki inert gaz yordamida nurlanish joyiga yoki detektorning oldiga olib keladi. Baʼzan pnevмотransport sistemalari namunani talab qilingan detektorga, maʼlum vaqt saqlab turuvchi joyga yoki namunani saqlaydigan joyga olib borish uchun strelkalar bilan taʼminlangan, koʻp sonli tarqiqqa egadir. Zamonaviy transport sistemalarida namunani kapsuladan olishni ham oʻz ichiga olgan holda amallarni boshqarish toʻliq avtomatlashgandir.

Ionlovchi nurlanishlarni oʻlchash. Yadro jarayonlarida yoki radioaktiv parchalanishlarda chiqayotgan nurlanishlarni (α , β va γ -nurlanishlar) qayd qilish, miqdoriy hisoblashlar va aniqlayotgan elementlarni identifikatsiya qilish uchun muhim maʼlumotlar beradi.

Eng muhim va keng qoʻllaniladigan qayd qilish usullari qayd qilinayotgan zarra (kvant) energiyasini elektr impulslariga aylantirishga asoslangan. Ushbu impulslar keyin maxsus elektron qurilmalarga uzatiladi va bu qurilmalarda impulslar qayta ishlanadi. Zarra energiyasini elektr impulsiga aylantiruvchi qurilmalar nurlanish detektorlari deyiladi. Nurlanish detektorlarlarining turlari juda koʻp boʻlib, ularning ishlash tamoyili ulardan zaryadlangan zarralar oʻtganda modda atomlarini ionizatsiyalashtirish yoki uygʻongan holatga oʻtkazishga 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 hisoblagich. Proporsional hisoblagichlarda kuchlanishning ma'lum bir ionizatsion tok birlamchi ionizatsiyaga proporsional, binobarin tushayotgan nurlanish energiyasiga ham. Shuning uchun nurlanish detektori sifatida proporsional hisoblagichni qo'llab, γ -nurlanishlar va β -zarralar energetik taqsimotini olish mumkin.

Geyger hisoblagichi. Geyger hisoblagichlarda zaryadlangan zarralar va γ -kvantlar qayd qilish uchun hisoblagich orqali zarrachalar o'tishida hosil bo'ladigan mustaqil gaz razryadidan foydalaniladi. Geyger hisoblagichidan tushayotgan nurlanishning energetik taqsimotini olish uchun foydalanib bo'lmaydi.

Bugungi kunda proporsional va Geyger hisoblagichlari qo'llanilmaydi. Zamonaviy aktivatsion tahlilda boshqalarga nisbatan ko'proq ssintillatsion va yarim o'tkazgichli detektorlar qo'llaniladi.

Ssintillatsion detektorlar. Ssintillatsion detektor bloki nurlanish ta'sirida yorug'lik chaqnashlari yuz beradigan ssintillatsiyator va fotoelektron kuchaytirgichlar kombinatsiyasidan iborat bo'ladi. Fotokuchaytirgichda yorug'lik chaqnashlari elektr impulslariga aylantiriladi. Ushbu impulslar amplitudasi qayd qilinayotgan (registratsiya qilinayotgan) nurlanish energiyasiga proporsional bo'ladi.

Ssintillatsiyator sifatida talliy bilan aktivlangan natriy yod kristallari, ya'ni NaJ(Te), talliy bilan aktivlangan seziy yod kristallari, ya'ni CsJ(Te), rux sulfat – ZnS, ssintillatsiyalanuvchi plastmassalar – antratsen, stilben va hokazo qo'llaniladi.

Ssintillatsion detektori yuqori qayd qilish effektivligiga ega bo'lib, ular ancha «o'lik vaqt»ga ega bo'lgan gaz razryadli hisoblagichlardan farq qilib, katta intensivlikdagi nurlanishlarni o'lchash uchun ishlatilishi mumkin. Ssintillatsion detektorlash blokining kamchiliklaridan biri fotokuchaytirgichga berilayotgan yuqori kuchlanishning turg'un bo'lishi kerakligidadir. Bu hisoblagich harorat tebranishlariga o'ta sezgirdir. Bundan tashqari, mazkur detektorlarning energiya bo'yicha ajratish qobiliyati juda ham past.

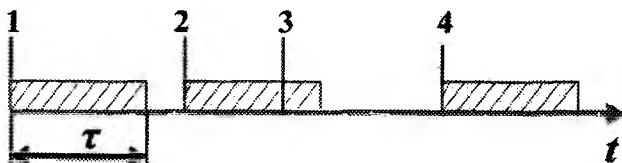
Yarim o'tkazgichli detektorlar. Yadro zarrasi yarim o'tkazgichli detektorning ishchi hajmiga tushganda u energiyasini elektronteshik

juftini hosil qilishga sarflaydi. Ushbu jarayon natijasida elektr zaryadlar hosil bo'lib, ular elektrodلarga 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 detektorلarning asosiy ustunligi ularning yuqori ajratish qobiliyati bo'lib, u ssintillatsion detektornikidan bir tartib yuqoridir. Kamchiliklaridan biri past effektivligi, u bilan ishlaganda va uni saqlashda past haroratli suyuq azotdan foydalanishdadir.

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 $f = 0,20$ ms bo'lgan Geyger-Myuller sanagichi $3,0 \cdot 10^4$ imp./min ni qayd qilgan. Sanagich orqali 1 daqiqada 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 f vaqt oralig'ini sarflaydi. Bu f vaqtni yadro zarralar sanagichlarining eng asosiy xarakteristikalaridan biri bo'lib, u 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:

$$N_0 = N + DN \quad (1)$$

bu yerda $t \gg f$ vaqt davomida qayd etilgan zarralar soni N ga teng; $DN = n_0 \cdot \Delta t$ – quyidagi yig'indi to'liq vaqt ichida qayd qilinmagan zarralar soni:

$$Dt = fN = \tau \dot{n}t \quad (2)$$

bu yerda fN – yig'indi vaqt bo'lib, bu vaqt davomida sanagich zarralarini qayd qilmaydi. U holda

$$N_0 = N + \dot{n}_0 \tau \dot{n}t \quad (3)$$

Bu ifodaning chap va o'ng tomonlarini t ga bo'lamiz va quyidagini olamiz:

$$\dot{n}_0 = \dot{n} + \dot{n}_0 \dot{n} \tau. \quad (4)$$

Bu tenglamadan quyidagini olamiz:

$$\dot{n}_0 = \frac{\dot{n}}{1 - \dot{n}\tau} = \frac{3 \cdot 10^4}{1 - 3 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-4} / 60} = 3,3 \cdot 10^4 \text{ imp./min}$$

Javob: $\dot{n}_0 = 3,3 \cdot 10^4 \text{ imp./min}$.

2-masala. Ajratish vaqti $f = 1,0 \text{ mks}$ bo'lgan sanagich orqali o'tayotgan zarralar sonining qancha ulushi sanash tezligi $\dot{n} = 100$ va $1,0 \cdot 10^5 \text{ imp./s}$ bo'lganda sanagich tomonidan qayd etilmaydi?

Yechilishi. Qayd qilinmagan zarralar sonini yuqoridagi masalada keltirilgan formula bilan aniqlash mumkin. U holda qayd qilinmagan zarralarning ulushi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\eta = \frac{\dot{n}_0 - \dot{n}}{\dot{n}_0} = \frac{\dot{n} + \dot{n}_0 \dot{n}\tau - \dot{n}}{\dot{n}_0} = \dot{n}\tau \quad (1)$$

u holda

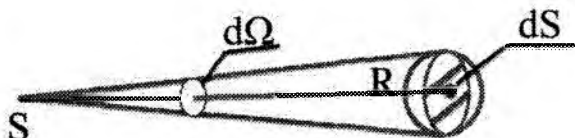
$$\alpha_1 = 100 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 10^{-4} = 0,01\% \quad (2)$$

$$\alpha_2 = 10^5 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} = 0,1 = 10\% \quad (3)$$

Javob: $\alpha_1 = 0,01\%$, $\alpha_2 = 10\%$.

3-masala. Agar ${}^9\text{Be}(b, n){}^{12}\text{S}$ reaksiyaning chiqishi $0,8 \cdot 10^{-4}$ ga teng bo'lsa, tarkibida ${}^{210}\text{Ro}:0,63 \cdot 10^{10}$ Bk ($0,17 \text{ Ki}$) bo'lgan uncha katta bo'lmagan ${}^{210}\text{Ro}$ -Ve-manbayidan 10 sm uzoqlikdagi masofada neytronlar oqimini toping.

Yechilishi. Zarralar oqimi deb yuza birligidan vaqt birligida o'tayotgan zarralar soniga aytiladi (rasmga qarang):



$$\Phi = \frac{d\dot{N}}{dS} \quad (1)$$

Bu yerda S – zarralar oqimi, $d\dot{N}$ – sferaning ichki hajmiga vaqt birligida tushayotgan zarralar soni, dS – sfera sigmentining yuzasi.

$R = 10 \text{ sm}$ masofada manbani nuqtaviy nurlanish manbai deb hisoblash mumkin. Faraz qilamiz, S manbadan bir soniyada \dot{N}_0 ta izotrop neytronlar chiqayotgan bo'lsin. U holda cheksiz kichik hajmdagi sfera chegarasida $F = \text{const}$ deb hisoblash mumkin va S nuqtaviy manbadan R masofada joylashgan dS yuzaga soniyasiga 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 ifodaga 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:

$$F(R) = \frac{dN}{dS} = \frac{\dot{N}_0}{4\pi R^2} \quad (5)$$

Manbadan soniyasiga chiqayotgan neytronlar soni:

$$\dot{N}_0 = Y \cdot \dot{N}_\alpha = Y \cdot A(^{210}\text{Po}) \quad (6)$$

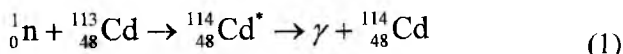
Bitta ^{210}Po yadrosi b-parchalanganda bitta b-zarra paydo bo'ladi. Ushbu ifodani (5) ga qo'yamiz va manbadan 10 sm uzoqliqdagi masofada neytronlar oqimini topamiz

$$F(R = 10) = \frac{Y \cdot A(^{210}\text{Po})}{4\pi R^2} = \frac{0,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,63 \cdot 10^{10}}{4 \cdot 3,14 \cdot 100} = 4 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{sm}^2 \cdot \text{c}} \quad (7)$$

Javob: $F(R = 10) = 4,0 \cdot 10^2$

4-masala. Oqim zichligi $1,0 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$ bo'lgan issiq neytronlar oqimi bilan kadmiy-116 dan tashkil topgan yupqa plastinka nurlantirilgan. Agar nurlanishdan olti sutka o'tgandan keyin ^{113}Cd nuklid yadrolari tarkibi 1% kamaygan bo'lsa, (n,g) reaksiya kesimini aniqlang.

Yechilishi. Reaksiya sxemasini yozamiz:



Vaqt birligida moddaning hajm birligida sodir bo'layotgan reaksiyalar soni:

$$H = nyF \quad (2)$$

dt vaqt oralig'ida nishon yadrolarning konsentratsiyasining o'zgarishi:

$$dn = -n \lambda dt = -nyF dt \quad (3)$$

Ushbu tenglama $n(t=0) = n_0$ boshlang'ich shart bilan yechilganda quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$n(t) = n_0 \exp(-yFt) \quad (4)$$

bundan

$$\frac{n_0 - n(t)}{n_0} = 0,01 = 1 - \exp(-yFt) \quad (5)$$

Ushbu ifodadan reaksiya kesimini aniqlaymiz:

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

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 ${}^2\text{N}(d,n){}^3\text{Ne}$ 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 ${}^2\text{N}(d,n){}^3\text{Ne}$ reaksiya chiqishi quyidagiga teng:

$$Y = \frac{\dot{N}}{F_0} = n\sigma d \quad (1)$$

bu yerda \dot{N} – vaqt birligida birlik yuzada sodir bo'layotgan reaksiyalar soni. U holda

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (2)$$

bu yerdan

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{Y_2}{Y_1} = 0,020 \frac{4,0 \cdot 10^{-5}}{0,8 \cdot 10^{-5}} = 0,10 \text{ b} \quad (3)$$

Javob: $\sigma_2 = \sigma_1 \frac{Y_2}{Y_1} = 0,020 \frac{4,0 \cdot 10^{-5}}{0,8 \cdot 10^{-5}} = 0,10 \text{ b}.$

MUSTAQIL YECHISH UCHUN MASALALAR

5.1. Radiouglerod metodi bilan qadimgi topilmaning yoshini aniqlash bo'yicha o'tkazilgan tajribada topilmadagi sanash tezligi daqiqasiga 14 impuls, fonni sanash tezligi esa daqiqasiga 9,5 impulsni tashkil etgan. Topilma yoshini 5% aniqlikda topish uchun qancha vaqt o'lchash zarur bo'ladi? (*Javobi: 19 soat*).

5.2. Sanagichning ajratish vaqti $f = 8 \cdot 10^{-6}$ s bo'lsa, sanash tezligi qanday bo'lganda zarralarni sanamaslik holati 5 % dan oshmaydi? (*Javobi: $2,5 \cdot 10^3$ imp. /s*).

5.3. Pluton-berilliy neytronlar manbayi soniyasiga $2,8 \cdot 10^7$ 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 deytron 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'lchangan reaksiya chiqishi $2,0 \cdot 10^{-5}$ ni tashkil etadi. (*Javobi: 0,14 b*).

NAZORAT SAVOLLARI

1. *Aktivatsion analiz sezgirligi, 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.*

TEST SAVOLLARI

1. *Aktivatsion tahlilni amalga oshirish bosqichlari qanday?*
 - A) Tahlil uchun moddani tanlash, namunani nurlanishga tayyorlash, nurlanish, aktivlikni o'lchash, natija olish
 - B) Nurlantirish, nurlanish dozasini o'lchash, energiyani aniqlash
 - C) Nurlanish dozasini o'lchash, namuna massasini o'lchash, namunani maydalash
 - D) Namunani kimyoviy tahlil qilish va nurlantirish
2. *Aktivatsion tahlil ikkiga bo'linadi, ya'ni ... aktivatsion tahlil.*
 - A) Instrumental va kimyoviy
 - B) Instrumental va radiokimyoviy
 - C) Radiokimyoviy va biokimyoviy
 - D) Kimyoviy va fizikaviy
3. *Quyidagi detektorlardan qaysi birining energetik ajratish qobiliyati yuqori?*

A) Proporsional hisoblagich	C) Organik ssintillator
B) NaI(Ta)-detektor	D) Ge(Li)-detektor
4. *Detektorning effektivligi deb ... aytiladi?*
 - A) Detektor registratsiya qilgan impulslar sonining uning ishchi hajmi kelib tushgan zarralar soniga nisbatiga
 - B) Detektor qayd qilingan impulslar kattaligi va o'lchamiga
 - C) Detektorga tushgan zarralar sonining u qayd qilgan impulslar soniga nisbatiga
 - D) Detektorga tushgan zarralar turiga

5. *Detektorlarning asosiy xarakteristikalarini ko'rsating.*

- A) Ajratish qobiliyati, massasi
- B) Zichligi, hajmi, umumiy effektligi
- C) Umumiy effektligi, o'lik vaqti, energetik ajratish qobiliyati
- D) Umumiy effektligi, o'lik vaqti, zichligi

6. *Aktivatsion tahlilda miqdoriy natijalar olinadigan metodlarni ko'rsating.*

- A) Absolut metod, etalon metodi, monitor metodi
- B) Absolyut metod, gamma-metodi, energetik metod
- C) Monitor metodi, aktivlash metodi, ostona metodi
- D) Etalon metodi, monitor metodi, energetik metod

7. *Etalon nima?*

- A) Moddani tashkil etgan elementlar soni
- B) Tarkibi noma'lum bo'lgan modda
- C) Elementar modda
- D) Aniqlamoqchi bo'lgan elementlardan tayyorlangan modda

8. *Monitor nima uchun qo'llaniladi?*

- A) Modda tarkibini aniqlash uchun
- B) Nurlanish intensivligini nazorat qilish uchun
- C) Gamma-kvantlar oqimini o'lchash uchun
- D) Moddaning tuzilishini o'rganish uchun

9. *Instrumental aktivatsion tahlilda qo'llaniladigan spektrometriya metodlarini ko'rsating.*

- A) b-spektrometriya, v-spektrometriya va g-spektrometriya
- B) Og'ir zaryadlangan zarralar spektrometriyasi, β -nurlanishlar spektrometriyasi va λ -nurlanishlar spektrometriyasi
- C) UK-spektrometriya, SDO-spektrometriya L-spektrometriya
- D) L-spektrometriya, λ -spektrometriya va UK-spektrometriya

10. *Etalon sifatida qanday modda olinadi?*

- A) Kimyoviy toza, tahlil uchun toza va o'ta toza markali moddalar.
- B) Namuna, manitor va o'ta toza.
- C) Tahlil uchun toza markali, namuna va manitor.
- D) Radioaktiv modda, geologik namuna va yarim o'tkazgichli modda.

11. Detektorlar tashqi radioaktiv fondan qanday himoya qilinadi?

- A) O'lchash vaqtini kamaytirish
- B) Betonli uycha ichiga joylashtiriladi
- C) Yog'ochdan yasalgan uycha ichiga joylashtiriladi.
- D) Qo'rg'oshin uycha ichiga joylashtiriladi

12. Ekspress aktivatsion tahlil o'tkazish uchun qanday radionuklidlarning gamma-chiziqlaridan va qanday qurilmalardan foydalanish lozim?

- A) Uzoq yashovchi radioizotoplar, ampermetrlardan
- B) Qisqa yashovchi radioizotoplar, pnevmopochtalardan
- C) 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

B) Issiqlik neytronlarda aktivatsion tahlil, energetik aktivatsion tahlil, gamma-kvantlarda aktivatsion tahlil

C) O'ta uzoq yashovchi radioizotoplarda aktivatsion tahlil, mikroskoplarda aktivatsion tahlil, fotonlarda aktivatsion tahlil

D) Uzoq yashovchi radioizotoplarda aktivatsion tahlil, teleskoplarda neytron aktivatsion tahlil

14. Aktivatsion tahlilda interferensiyalanuvchi yadro reaksiyasi deb nimaga aytiladi?

A) Bir necha reaksiya natijasida bir xil radioizotop hosil bo'lishiga

B) Radioizotoplar hosil bo'lishiga

C) 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

C) Fotoeffekt

B) Ionizatsiya

D) Gamma-kvantlar sochilishi

16. Qanday aktivatsion tahlil usulida katta massali namunalarni tezkor tahlil qilish mumkin?

A) Spektral tahlil usuli

C) Gamma-aktivatsion usuli

B) Neytron-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 yordami-da aniqlanadi?

A) $\frac{m_x}{m_y} = \frac{A_x}{A_y}$

C) $\frac{m_x}{m_y} = \frac{A_x}{A_y} \sqrt{3}$

B) $m_x = \frac{A_x}{A_y} \cdot \frac{A_{m3}}{A_{mx}} m_y$

D) $\frac{m_x}{m_y} = \frac{A_x}{A_y} \sqrt{N}$

19. Monitor metodida element miqdori qanday munosabat yordami-da aniqlanadi?

A) $\frac{m_x}{m_y} = \frac{A_x}{A_y}$

C) $\frac{m_x}{m_y} = \frac{A_x}{A_y} \sqrt[3]{150}$

B) $m_x = \frac{A_x}{A_y} \cdot \frac{A_{m3}}{A_{mx}} m_y$

D) $\frac{m_x}{m_y} \sqrt{N} = \frac{A_x}{A_y}$

20. Gamma spektrdagi 511 keV energiyali gamma-chiziqlar qanday jarayon hisobiga vujudga keladi?

- A) Kompton effekti
- B) Ionizatsiya
- C) Pozitronlarning annigilyatsiyasi
- D) Gamma-kvantlar sochilish

TEST SAVOLLARINING JAVOBLARI

I BOB. Radioaktivlik hodisasi

- | | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 1) B | 6) D | 11) A | 16) A |
| 2) A | 7) D | 12) C | 17) B |
| 3) A | 8) A | 13) C | 18) A |
| 4) C | 9) B | 14) A | 19) B |
| 5) A | 10) B | 15) C | 20) D |

II BOB. Yadro reaksiyalari

- | | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 1) A | 6) A | 11) C | 16) D |
| 2) D | 7) B | 12) C | 17) A |
| 3) A | 8) D | 13) A | 18) B |
| 4) B | 9) A | 14) B | 19) A |
| 5) A | 10) A | 15) A | 20) C |

III BOB. Yadro nurlanishlarining modda bilan o'zaro ta'siri

- | | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 1) A | 6) D | 11) B | 16) A |
| 2) A | 7) A | 12) A | 17) C |
| 3) A | 8) A | 13) C | 18) B |
| 4) D | 9) C | 14) A | 19) C |
| 5) B | 10) A | 15) D | 20) A |

IV BOB. Yadro nurlanishlarining tibbiyotda qo'llanilishi

- | | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 1) D | 6) A | 11) A | 16) A |
| 2) D | 7) A | 12) A | 17) D |
| 3) A | 8) A | 13) B | 18) A |
| 4) B | 9) C | 14) A | 19) B |
| 5) D | 10) B | 15) A | 20) A |

V BOB. Aktivatsion tahlil

- | | | | | | | | |
|----|---|-----|---|-----|---|-----|---|
| 1) | A | 6) | A | 11) | D | 16) | D |
| 2) | B | 7) | D | 12) | B | 17) | A |
| 3) | D | 8) | B | 13) | A | 18) | A |
| 4) | A | 9) | A | 14) | A | 19) | B |
| 5) | C | 10) | A | 15) | C | 20) | C |

GLOSSARIY

Absolut metod – modda tarkibini bevosita tahlil qilish metodi.

Aktivatsion tahlil – modda atom yadrolarini aktivatsiya qilish usulida modda kimyoviy tarkibini tahlil qilish metodi.

Atom – musbat zaryadlangan ogʻir yadro va manfiy zaryadlangan elektronlar qobiqlaridan tashkil topgan mikrozarra.

Atom yadrosi – musbat zaryadlangan protonlar va zaryadsiz neytronlardan tashkil topgan mikrozarra.

Aktivlik – radioaktiv moddalarning parchalanish tezligini tavsiflovchi kattalik. Birlik vaqt ichidagi parchalanishlar soni.

Alfa-zarra – geliy atomining yadrosi boʻlib, ikkita proton va ikkita neytronlardan tashkil topgan.

Beta-parchalanish – yadrolarning oʻz-oʻzidan elektron, antineytrino (neytrino) chiqarib parchalanishi.

Beta-zarra – radioaktiv modda yadrolar parchalanishi natijasida chiqayotgan uch xil nurlanishlarning biri, yaʼni elektron.

Betatron – elektronlarni yuqori energiyagacha tezlatuvchi qurilma.

Vodorod atomi – bitta proton va bitta elektrondan tashkil topgan mikrozarra.

Gamma-nurlar – radioaktiv yadrolar parchalanishi natijasida chiqayotgan uch xil nurlanishlarning biri. Gamma-nurlar bu qisqa toʻlqin uzunlikka ega boʻlgan elektromagnit nurlanishlar.

Deyteriy – vodorodning tabiiy turgʻun izotopi boʻlib, u bitta neytron, bitta proton va bitta elektrondan tashkil topgan. «Ogʻir vodorod» ham deyiladi.

Deytron – deyteriy atomining yadrosi boʻlib, u bitta neytron va bitta protondan tashkil topgan.

Ionizatsiya – elektr neytral atomlarni aktiv ionlarga aylanish jarayoni.

Ion – elektronini yoʻqotgan yoki elektron biriktirib olgan atom.

Izotop – protonlar soni bir xil boʻlgan yadrolar. Masalan, vodorodda uchta izotop mavjud.

Izomer yadrolar – protonlar va massa sonlari bir xil boʻlib, radioaktivlik xususiyatlari har xil boʻlgan yadrolar.

Kvant sonlar – kvant sistemalarning (atom, yadro, molekula va h.k.) tavsiflovchi fizik kattaliklarning qabul qiluvchi qiymatlarini aniqlovchi butun yoki kasr sonlar.

Leptonlar – kuchsiz o‘zaro ta’sirda ishtirok etuvchi zarralar bo‘lib, bularga elektron, myuon, taulepton va neytrinolar kiradi.

Massa soni – atom yadrosini tashkil etgan nuklonlar (proton va neytronlar) soni.

Nuklon – proton va neytronlarning umumiy nomlanishi. Yadro zarasi degan ma’noni anglatadi.

Mikrozarralar – elementar zarralar, yadro, atom, molekularlar.

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‘lmaslik prinsipi.

Protiiy – yadrosi bitta protondan iborat bo‘lgan yengil vodorod atomi.

Radioaktivlik – yadroning o‘z-o‘zidan bir yoki bir nechta zarralar chiqarib parchalanish (yemirilish) hodisasi.

Radioaktiv oilalar – bir-biridan radioaktiv parchalanish natijasida hosil bo‘ladigan elementlar zanjiri. Tabiatda to‘rtta radioaktiv oila mavjud.

Tritiiy – vodorodning tabiiy izotopi bo‘lib, u ikkita neytron, bitta proton va bitta elektrondan tashkil topgan «O‘ta og‘ir vodorod» ham deyiladi.

Triton – tritiiy atomining yadrosi bo‘lib, ikkita neytron va bitta protondan iborat.

Rentgen nurlanishlari – juda qisqa to‘lqin uzunlikka ega bo‘lgan elektromagnit nurlanishlar ($0,06 \text{ E} \leq 1 \leq 20 \text{ E}$).

Fermionlar – spin kvant sonlari butun yarim qiymatlar qabul qiladigan zarralar.

Foton – elementar zarra, elektromagnit nurlanishlarning kvanti.

Yadro reaksiyasi – yuqori energiyali mikrozarralar yoki yengil 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.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. T.M. Muminov, A.B. Xoliqov. Sh.X. Xolmurodov. Atom yadrosi va zarralar fizikasi. T.: O'zbekiston faylasuflar jamiyati, 2009.
2. Kadilin V.V., Miloserdin V.Yu., Samosadny V.T. Prikladnaya yadernaya fizika. Uchebnoe posobiye. 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., Karaxodjayev A., Ruzimov Sh.M. Yadro fizikasidan masalalar to'plami. O'quv qo'llanma. Toshkent, O'zMU, 2006.
5. Kayumov M.A. Dozimetriya asoslari va ionlashtiruvchi nurlanishlardan himoyalanih. T.: Davr, 2013.
6. Fizicheskiye velichini. 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'qituvchi, 1994.
9. Irodov I. Ye. Sbornik zadach po atomnoy i yadernoy fizike. uch. pos. Atomizdat. M. 1971.
10. Teshaboyev Q.T. Yadro va elementar zarralar fizikasi. O'qituvchi, Toshkent, 1992.
11. Irodov, I. Ye. Zadachi po kvantovoy fizike. – M.: Visshaya shkola, 1991.
12. Xoll E.Dj. – Radiatsiya i jizn – M., Meditsina, 1989.
13. Yarmonenko S.P. – Radiobiologiya cheloveka i jivotnix- M., Visshaya shkola, 1988.
14. Praktikum po yadernoy fizike – M., Izd-vo MGU, 1980. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. – Yadernaya fizika – M., NAUKA, 1980.
15. Morey A.N., Barxudarov R.M., Novikov N.Ya. Globalniye vipadeniya tseziya-137 i chelovek. M.: Atomizdat, 1974.
16. Mosieyev A.A. Seziy-137. Okrujayushaya sreda. Chelovek. M., Energoatomizdat, 1985.
17. Shukolyukov Yu.A. Deleniye yader urana v prirode. M.: Atomizdat, 1970.

18. Vasilenko I.Ya. – Radiatsionniye porajeniya produktami yadernogo deleniya – Zdravooxraneniye Belorussii. 1986, N12.
19. Informatsiya ob avarii na Chernobilskoy AES i yeyo posledstviyax, podgotovlennaya dlya MAGATE – Atomnaya energiya, 1986. t. 61, vip. 5., s. 301-320.
20. Normi radiatsionnoy bezopasnosti (nrb-2006) i osnovniye sanitarniye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (osporb-2006). www.lex.uz
21. Biologicheskoye deystviye produktov yadernogo deleniya. Metabolizm i ostriye porajeniya – Radiobiologiya, 1992, t.32, v.1, s.69-78.
22. Biologicheskoye deystviye produktov yadernogo deleniya. Otdalenniye posledstviya porajeniya – Radiobiologiya, 1993, t.ZZ, v.Z, s. 442-452.
23. Ivanov, V. I. Kurs dozimetrii / V. I. Ivanov. – M.: Atomizdat, 1978. – S. 12–36.
24. 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.
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 JETF. 1984 t.40 s152
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 (BB) Decay Values. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory, 2010. Brookhaven National Laboratory Report BNL-91299-2010.

37. Ajabov A.K., Muxamedov A.K., Poteshkin G.V., Mamatqulov O.B., Muminov I.T., Rashidova D.Sh. «Vertikalnaya migratsiya ^{137}Cs v nektorix pochvax Uzbekistana». *Atomnaya energiya*, t.87, vip.4, 1999, s. 311-314.

38. Alimov G.R., Rashidova D.Sh., Xolbayev I., Mamatqulov O.B., Muminov I.T., Xudayberdiyev A.T., Begimkulov X.X., Muxamedov A.K., Poteshkin G.V., Xazratov T. Gamma-spektrometricheskoye opredeleniye sodержaniya radionuklidov v pochvax. *Uzbekskiy fizicheskiy 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>

MUNDARIJA

SO'ZBOSHI	3
KIRISH	5

I BOB. RADIOAKTIVLIK HODISASI

1.1-§. Radioaktivlik hodisasining umumiy tavsifi	6
1.2-§. Radioaktiv parchalanishning asosiy qonunlari	9
1.3-§. Alfa-parchalanish	14
1.4-§. Beta-parchalanish	18
1.5-§. Gamma-nurlanish	23
1.6-§. Ichki konversiya hodisasi	27
1.7-§. Myossbauer effekti va uning qo'llanilishi	30
1.8-§. Klaster radioaktivlik	37
1.9-§. Qo'shaloq beta-parchalanishlar	47
1.10-§. Neytron radioaktivlik	48
1.11-§. Radioaktiv parchalanish jarayonlarining sinflarga bo'linishi	53
1.12-§. Radioaktiv fon	54
1.13-§. Tabiiy radioaktiv aerzollar	60
1.14-§. Sun'iy radioaktiv fon	63
1.15-§. Seziy-137 radionuklidining tuproqdagi migratsiyasi	66
1.16-§. Radiatsion ekologiya	67
Masalalar yechish uchun namunalar	70
Mustaqil yechish uchun masalalar	75
Nazorat savollari	76
Test savollari	76

II BOB YADRO REAKSIYALARI

2.1-§. Yadro reaksiyalarining ta'rifi. Asosiy tushunchalar	79
2.2-§. Yadro reaksiyalarining kesimi va chiqishi	81
2.3-§. Yadro reaksiyalarning yuz berish mexanizmlari	84
2.4-§. Fotoyadro reaksiyalari	87
2.5-§. Neytronlar ishtirokidagi yadro reaksiyalari	88
2.6-§. Aktivatsiya tenglamasi	92
2.7-§. Yadro xususiyati va yadro reaksiyalar bo'yicha ma'lumotlar markazlari	94
Masalalar yechish uchun namunalar	96
Mustaqil yechish uchun masalalar	101
Nazorat savollari	102
Test savollari	102

III BOB. YADRO NURLANISHLARINING MODDA BILAN O‘ZARO TA’SIRI

3.1-§. Zaryadlangan og‘ir zarralarning modda orqali o‘tishi.....	108
3.2-§. Zaryadlangan yengil zarralarning modda orqali o‘tishi	112
3.3-§. Vavilov-Cherenkov nurlanishi	115
3.4-§. Sinxrotron nurlanishlar	117
3.5-§. Zaryadlangan zarralarning kanallashishi. Kanallashish sharti. Lindxard burchagi.....	121
3.6-§. Gamma-nurlarning modda bilan o‘zaro ta’siri	125
Masalalar yechish uchun namunalar	135
Mustaqil yechish uchun masalalar	139
Nazorat savollari	140
Test savollari	140

IV BOB. YADRO NURLANISHLARINING TIBBIYOTDA QO‘LLANILISHI

4.1-§. Dozimetriya asoslari.....	144
4.2-§. Ionlashtiruvchi radiatsiyaning biologik ta’sir mexanizmi	150
4.3-§. Tashxis qo‘yishda qo‘llaniladigan radionuklidlar	154
4.4-§. Radioizotoplarni olish va ularning tibbiyotda qo‘llanilishi.....	157
4.5-§. Yadro tibbiyotida qo‘llanilayotgan radionuklidlarning sinflarga bo‘linishi	158
4.6-§. Yod-123 radioizotopining tibbiyotda qo‘llanilishi.....	160
4.7-§. Yadro reaktorlarida olinadigan radionuklidlar	165
4.8-§. Siklotronda radionuklidlar ishlab chiqarish.....	167
4.9-§. Elektron tezlatkichlarda radionuklidlar chiqishlarini aniqlash.....	171
4.10-§. Pozitron emission tomografiya.....	173
4.11-§. Pozitron emission tomografiyaning ishlash tamoyili	176
Masalalar yechish uchun namunalar	182
Mustaqil yechish uchun masalalar	186
Nazorat savollari	187
Test savollari	187

V BOB. AKTIVATSION TAHLIL

5.1-§. Aktivatsion tahlil metodi	191
5.2-§. Miqdoriy natijalarni olish usullari	194
5.3-§. Aktivatsion tahlil sezgirligi. Aniqlanish va sezgirlik chegarasi	196
5.4-§. Aktivatsion tahlilning umumiy yo‘nalishi.....	197

5.5-§. Neytron-aktivatsion tahlil	201
5.6-§. Gamma-aktivatsion tahlil	207
5.7-§. Zaryadlangan zarralar yordamida aktivatsion tahlil	214
5.8-§. Instrumental aktivatsion tahlilning spektrometrik metodlari.....	218
5.9-§. Gamma spektrometr	220
5.10-§. Aktivatsion tahlil o'tkazish uchun zarur bo'lgan apparaturalar uyushmasi	229
Masalalar yechish uchun namunalari	235
Mustaqil yechish uchun masalalar	240
Nazorat savollari	241
Test savollari	241
TEST SAVOLLARINING JAVOBLARI	245
GLOSSARIY	247
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR	249

B.S. YULDASHEV,
S.R. POLVONOV, E.X. BOZOROV

AMALIY YADRO FIZIKASI

derslik

Mas'ul muharrir: O'zR FA akademigi **B.S. Yuldashev**

Muharrir *J. Matyoqubov*
Texnik muharrir *R. Ahmedov*
Badiiy muharrir *D. Mulla-Oxunov*
Kompyuterda sahifalovchi *F. Hasanova*

Nash.lits. № AA 0049. 18.03.2020.
Bosishga 21.12.2020-yilda ruxsat etildi. Bichimi: 60×84 ¹/₁₆.
Ofset bosma. «Times New Roman» garniturası.
Bosma tabog'i 16 b.t. Shartli b.t. 14,88.
Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 8.

«Donishmand ziyosi» nashriyoti.
100011, Toshkent shahri, Navoiy ko'chasi, 30-uy.

«Kamalak-PRESS» MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
100011, Toshkent shahri, Navoiy ko'chasi, 30-uy.
Telefon: (71) 244-40-91.

Amaliy yadro fizikasi [Matn]: darslik / Yuldashev B.,
Yu 31 Polvonov S., Bozorov E. – Toshkent, «Donishmand ziyosi»
MChJ, 2020. – 256 bet.

ISBN 978-9943-6445-8-8

UO•K 530(075)
KBK 22.3

«DONISHMAND ZIYOSI»

ISBN 978-9943-6445-8-8



9 789943 644588