

A. Ataýew

**ATOM ÝADROSYNYŇ
WE BÖLEJIKLERIŇ
FIZIKASY**

**Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin
synag okuw kitaby**

**Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi**

Aşgabat – 2010

A.Ataýew. Atom ýadrosynyň we bölejikleriň fizikasy. Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin synag okuw kitaby.- Aşgabat, 2010.

Gynag okuw kitaby atom ýadrosynyň we sada bölejikleriň fizikasyna deňli esasy okuw maglumatlaryny öz içine alýar. Onda atom ýadrosynyň gurluşyna we häsiýetlerine, radioişjeňlige, ýadro täsirleşmelerine, ýadro şöhlenenmesiniň madda bilen özara täsirine, bölejikleri bellige almagyň we tizlendirmegiň usullaryna, sada bölejikleriň fizikasyna degişli soraglar beýan edilýär.

Proton-neýtron ulgamynyň potensial energiýasy başga häsiýete eýedir (8.3-nji b çyzygy). Ulgamyň potensial energiýasy r_0 aralyga çenli nola deňdir. r_0 aralykdan başlap ýadro güýçleriniň täsiri başlaýar we potensial energiýa çalt peselýär.

4.1-nji a çyzygdaky potensial energiýanyň aralyga baglylygynyň görnüşine **potensial böwet** diýilýär. Ýadrodan çykman üçin ýa-da oňa aralaşman üçin proton potensial böwetden geçmeli. Onuň üçin proton potensial energiýanyň iň uly bahasyndan (potensial böwediň beýikliginden) ýokary ätiýaç kinetik energiýa eýe bolmaly.

8.1-nji b çyzygdaky baglanyşygyň görnüşine **potensial çukur** diýilýär. Ýadrodan (potensial çukurdan) çykman üçin neýtronyň ätiýaçlyk kinetik energiýasy bolmaly. **Islendik energiýasy bolan neýtron ýadro aralaşyp biler.**

Ýadro özara täsiri örän güýçlüdir. Mysal üçin, neýtronyň baglanyşyk energiýasy 2,23 MeV deňdir. Bu bolsa wodorod atomynyň elektronynyň elektromagnit gelip çykyşy bolan baglanyşyk energiýasyndan (13,6 eV) 164000 esse uludyr.

1935-nji ýylda ýapon fizigi Hideki Ýukawa (1907-1981) ýadro özara täsirini daşajynyň massasynyň ululygy boýunça elektronlaryň we nuklonlaryň aralyk ýagdaýyny eýeleýän, **mezonlar** diýip atlandyrylýan bölejiklerdigi hakynda çaklamany aýtdy. 1947-nji ýylda Pauell we Okkialini kosmos şöhlemenmesinde ýadro güýçlerini äkidijiler bolan **pionlary** (π - **mezonlary**) açdylar.

Pionlaryň zaryady, massasy we ýaşaýyş wagty bilen tapawutlanýan üç görnüşli bolýar. Zaryadlanan π^+ we π^- pionlar $273 m_e$ (140 MeV) massa eýedir. Olaryň zaryady elektronynyň zaryadyna, ýaşaýyş wagty bolsa $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8}$ sekunda deňdir. Bitarap π^0 pionyň massasy $264 m_e$ (135 MeV),

A. Ataýew

ATOM ÝADROSYNYŇ WE BÖLEJIKLERIŇ FIZIKASY

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin
synag okuw kitaby

Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi

Aşgabat – 2010

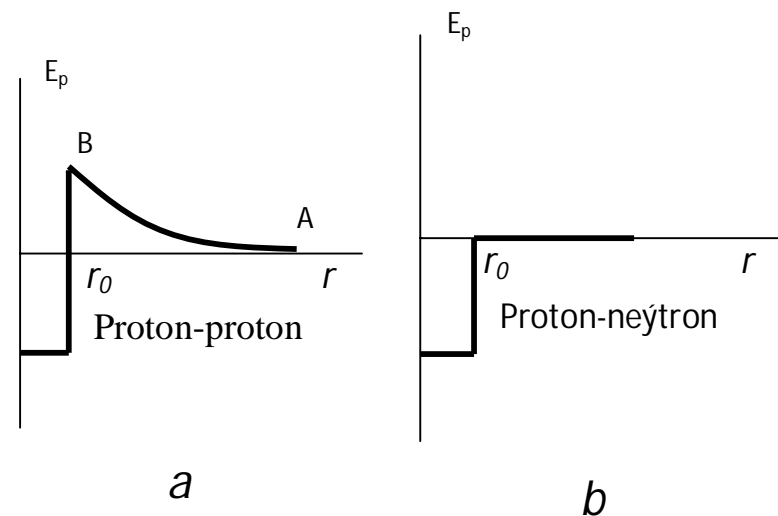
Giriş

Ýadro fizikasy atom ýadrosynyň gurluşyny, düzümini, onuň häsiýetlerini we öwrülişiklerini, radioişjeňligi (radioaktiwligi), ýadrolaryň bölünmegini hem-de ýadro täsirleşmelerini (reaksiýalaryny) öwrenýär.

Ýadro atomyň merkezi bölegidir, ýagny onuň özenidir. Onda atomyň 99,95% - den köpräk massasy ýerleşendir. Ýadronyň çyzykly ölçegi $10^{-15}\text{m} = 1\text{ Fm}$ (Fermi ýa-da femtometr) töweregidir. Onuň dykzlygy ägirt uludyr we takmynan, $2 \cdot 10^{17}\text{ kg/m}^3$ deňdir. Deňşdirmek üçin suwuň dykzlygynyň $1 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$ deňdigini ýatlap geçeliň. Şeýlelikde, ýadronyň dykzlygy suwuň dykzlygyndan, takmynan, 200 trillion esse uludyr.

1896-njy ýylyň mart aýynyň 1-ine fransuz alymy Anri Antuan Bekkerel (1852-1908) uran duzuny derňände tebigy **radioişjeňlik** hadysasyny açdy. Bu açyşdan ýadro fizikasynyň taryhy başlanýar. 1898-nji ýylda Mariýa Sklodowskaýa-Kýuri (1867-1934) öz adamsy Pýer Kýuri (1859-1906) bilen täze, has güýçli radioişjeň elementler bolan poloniýni we radiýni açdylar. Tebigy radioişjeňligi açandygy üçin A. Bekkerel hem-de radioişjeňlik hadysasyny öwrenendikleri üçin M. Sklodowskaýa-Kýuri we P. Kýuri 1903-nji ýylda fizikadan Nobel baýragyna mynasyp boldular. Radiohimiýadan ýerine ýetiren görnükli işleri üçin M. Sklodowskaýa-Kýuri 1911-nji ýylda himiýadan Nobel baýragy berildi. 1899-njy ýylda Ernest Rezerford (1871-1937) radioişjeň maddalaryň şöhlelenmesiniň magnit meýdanynda α - we β -bölejiklere bölünýändigini ýüze çykardy. Soňra, 1900-nji ýylda

seredeniňde aralyga baglylykda örän duýgur üýtgeýändigini aňladýar. Çekişme güýjüniň potensial energiýasyna ters bolany üçin kulon we ýadro güýçleriniň jemleýji energiýasy hem tersdir. Şeýlelikde, ýadronyň içinde protonyň potensial energiýasy tersdir. Bu bolsa ýadrodaky protonyň berk baglanyşygyny aňladýar.



4.1-nji çyzgy.

Güýçli özara täsir nuklonlaryň zaryadyna bagly däldir. Iki protonyň, protonyň we neýtronyň, iki neýtronyň aralaryndaky täsir edýän ýadro güýçleri ululyklary boýunça deňdirler. Bu häsiýete **ýadro güýçleriniň zaryad garaşsyzlygy** diýilýär.

Ýadro güýçleriniň ululygy özara täsir edişýän nuklonlaryň spinleriniň ugruna baglydyr. Mysal üçin, neýtronyň we protonyň spinleri biri birine ýannaş bolanda olar deýtrony ${}^2_1\text{H}$ (deýteriyiň ýadrosyny) emele getirip bile saklanýarlar.

Ýadro güýçleri doýma häsiýetine eýedir, ýagny ýadrodaky her bir nuklon çäkli sanly nuklon bilen täsir edişýär. Bu häsiýet bir nuklona düşýän baglanyşyk energiýanyň geliýden başlap hemme ýadrolar üçin, takmynan, deňdiginden gelip çykýar. Ondan başga-da, ýadronyň göwrüminiň onuň sanyna baglylygy ýadro güýçleriniň doýma häsiýetini görkezýär.

Ýadro güýçleri merkezi däldirler. Olary nuklonlaryň özara täsir merkezlerini birikdirýän gönä ýannaş täsir edýän güýçler ýaly hasap edip bolmaýar.

Biri-birinden daş aralykdaky protonlar kulon özara täsiri başdan geçirýärler. Olaryň arasynda itekleşiş güýji täsir edýär

($F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$). Bu özara täsiriň potensial energiýasy

($E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$) protonlar ozara golaýlaşanda artýar (8.3-nji a

çyzgy) Şeýle artma çekişme ýadro güýçleriniň täsir edip başlaýan r_0 aralyga çenli, protonlar golaýlaşýança dowam edýär (AB egri). r_0 aralykdan başlap, potensial energiýa birden azalýar. Bu bolsa ýadro güýçleriniň kulon güýçlerine

fransuz fizigi Paul Wilard (1860-1934) şöhlelenmäniň üçünji düzüjisini, ýagny γ -şöhlelenmäni açdy. 1902-nji ýylda inlis alymlary E. Rezerford we Frederik Soddi (1877-1956) radioişjeňlik hadysasynyň bir elementiň atomlarynyň başga bir elementiň atomlaryna öwrülmesidigini aýtdylar. Mysal üçin, uran radioişjeň dargama netijesinde toriý we geliý elementlerine öwrülýär. Radioişjeň maddalary barlamakda eden saldamly ylmy işleri üçin E. Rezerford (1908) we F. Soddi (1921) himiýadan Nobel baýragyna mynasyp boldular.

1900-nji ýylda Berlin uniwersitetiniň professory Maks Plank (1858-1947) fiziki ululyklaryň **kwantlaşma çaklamasyny** öňe sürdi. Ol şol ýylyň dekabryň 14-ine Berlinde nemes fizika jemgyýetiniň mejlisinde çykyş edende şeýle ylmy çaklamany aýtdy: ýagtylygyň madda tarapyndan şöhlelenmegi we siňdirilmegi üznüksiz däl-de, bölekleyin, ýagny kesgitli ülüşler (kwantlar) arkaly bolup geçýär. Iň kiçi kesgitli ülüşiň, ýagny kwantyň energiýasy ýagtylygyň ýygylgyna (ν) göni baglydyr:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega,$$

bu ýerde c , λ degişlilikde ýagtylygyň tizligi we tolkun uzynlygy, $\omega = 2\pi\nu$ – aýlaw ýygylgy, $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – Plankyň hemişeligi.

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ululygy inlis fizigi Pol Dirak (1902-1985) girizdi we oňa Plankyň getirilen hemişeligi ýa-da Dirakyň hemişeligi diýilýär.

Plankyň çaklamasyna görä şöhlelenýän jisimiň goýberýän energiýasy şeýle kesgitlenýär:

$$\varepsilon_n = n\varepsilon = n\hbar\omega.$$

Bu ýerde $n = 1, 2, 3, \dots$ bitin sanlar.

Plankyň çaklamasy nusgawy fizikanyň kanunlaryny şöhle goýberiş hadysalaryna ulanyp bolmaýandygyny görkezdi. Ýagtylygyň şöhlelenmeginiň we siňdirilmeginiň üznüklidigi hakyndaky Plankyň ylmy çaklamasy kwant fizikasynyň döremegine uly itergi berdi. Plank kwant nazaryýetiniň düýbünü tutujysy hökmünde ylmyň taryhyna girdi. Ol Nobel baýragynyň eýesidir (1918).

1905-nji ýylda nemes fizigi Albert Eýnşteýn (1879-1955) fotoelektrik hadysasy boýunça düýpli barlaglar geçirende ýagtylygyň kwant nazaryýetini dörettdi. Oňa görä diňe ýagtylygyň şöhlelenmegi we siňdirilmegi däl-de, onuň ýaýramagy hem **ýagtylyk kwantlarynyň (fotonlaryň)** akymy görnüşinde bolup geçýär. Ýagtylygyň siňdirilmegi fotonlaryň özüniň hemme energiýasyny maddanyň atomlaryna we molekulalaryna berýändigini bilen düşündirilýär.

Şeýlelikde, elektromagnit şöhlelenmesi madda bilen öžara täsir edişende v ýygylykly monohromatik elektromagnit şöhlelenme öžüni birmeňzeş bölejikleriň, ýagny fotonlaryň toplumy ýaly alyp barýar. Olar üçin hereket mukdary (impuls)

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

massa

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \text{ deňdir.}$$

Fotonlar mydama (islendik gurşawda) ýagtylyň tizligi bilen hereket edýärler. Olar dynçlyk ýagdaýda

Bu ýerde γ_N - köpeldijä ýadro giromagnit (magnit-mehanik) gatnaşygy diýilýär. Bu köpeldiji berlen ýadrony häsiýetlendirýär. 3.1-nji jedwelde nuklonlaryň we deňeşdirmek üçin elektronyň spini hem-de magnit momenti hakynda maglumat getirilen.

3.1-nji jedwel

<i>Bölejik</i> <i>Fiziki ululyk</i>	<i>Proton</i>	<i>Neýtron</i>	<i>Elektron</i>
Elektrik zarýady, e	+1	0	-1
Spin, \hbar	1/2	1/2	1/2
Magnit momenti	$2,7928\mu_N$	$-1,913\mu_N$	$1,00116\mu_B$

Jedweldäki ýadro magnetony μ_N nuklonlaryň magnit momentleriniň birligi hökmünde ulanylýar.

1.4. Nuklon-nuklon öžara täsir we ýadro güýçleriniň häsiňetleri

Ýadrodaky nuklonlaryň örän uly baglanyşyk energiýasy bardyr. Nuklonlaryň arasyndaky öžara täsir çekişme häsiýete eýedir. Ol nuklonlary biri-birinden $10^{-15}m$ töweregi aralykda saklaýar. **Ýadro öžara täsire güýçli öžara täsir diýilýär.** Ony ýadro güýçleriniň meýdany bilen düşündirmek bolýar. Ýadro güýçleriniň tapawutly aýratynlyklaryna seredeliň.

Ýadro güýçleri gysga täsirli güýçlerdir. $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}m$ uzynlyga ýadro güýçleriniň täsir edýän radiusy diýilýär. Bu çäkden kiçi aralykda nuklonlaryň çekişmesi itekleşme bilen çalşyrylýar.

hususy magnit momenti ($\mu_e = 9,2848 \cdot 10^{-24} \text{ J/Tl}$) 1928-nji ýylda P. Dirakyň nazaryýetinde öňünden aýdylan Boruň magnetonyna örän golaýdyr. Bu ýerde elektronyň kadadan çykýan magnit momenti örän azdyr (takmynan 0,1%). Elektrondan tapawutlylykda, protonyň hususy magnit momenti degişli ýadro magnetonyndan düýpli tapawutlanýar, ýagny $\mu_p = 2,7928 \mu_N$. Şonuň üçin protonyň hususy magnit momenti elektronyň magnit momentinden 1836,15 esse däl-de, 658,21 esse kiçidir.

Elektrik zaryadynyň yoklygyna seretmezden neýtronyň hususy magnit momenti bardyr, ýagny $\mu_{nZ} = -1,913 \mu_N$. Ters alamat spiniň we magnit momentiniň ugurlarynyň garşylyklydygyny görkezýär. **Neýtronyň we protonyň magnit momentleriniň kadadan çykýan uly bahalarynyň bolmagy olaryň çylşyrymly gurluşy bilen düşündirilýär.** Häzürki zaman garayyşa laýyklykda nuklonlar, elektron ýaly hakyky sada bölejik bolman, düzümleri bölejikleri bolup durýarlar.

Neýtronyň we protonyň magnit momentleriniň gatnaşygy μ_n/μ_p ýeterlik uly takyklyk bilen $-2/3$ gatnaşyga deňdir. Köp wagtlap bu ýönekeý gatnaşyga üns berilmedi. $2/3$ gatnaşyk diňe 1964-nji ýylda **kwarklaryň şekilinde** nazary taýdan alnandan soň, uly gyzyklanma dörettdi.

Ýadro mehaniki moment bilen birlikde magnit momentine hem eýedir. Ol nuklonlaryň spin magnit momentleri we protonlaryň orbital hereketi netijesinde döreýän magnit momentleri bilen şertlenendir. **Ýadronyň jemleýji magnit momenti** momentleriniň düzüjileriniň özara gönükmekligi bilen kesgitlenýär:

$$M_I = \gamma_N L_I = \gamma_N \mu_p \sqrt{I(I+1)}$$

bolmaýarlar. Fotonlaryň dynçlyk massasy nola deň diýip hasap edilýär.

Ýokarda getirilen deňlemeler fotonyň bölejik häsiýetnamalary bolan energiýany, impulsy we massany şöhlelenmäniň tolkun häsiýetnamasy bolan ýyglylyk (tolkun uzynlygy) bilen baglanyşdyrýar. Şeýlelikde, ýagtylyk **tolkun-bölejik** iki häsiýetlilige eýedir. Ýagtylygyň tolkun häsiýeti onuň ýaýramagynyň kanunlaýyklyklarynda, interferensiýada, difraksiýada, polýarlanmada, bölejik häsiýeti bolsa ýagtylygyň madda bilen özara täsirinde ýüze çykýar. Fotoelektrik hadysasy boýunça we nazary fizikada beýleki düýpli barlaglary üçin A. Eýnşteýne Nobel baýragy berildi (1921).

1895-1905-nji ýyllar aralygyndaky sanalyp geçilen açyşlary nusgawy fizika düşündirip bilmeýär. Şonuň üçin häzirkiki zaman kwant fizikasy dörebap başlady. Atom we ýadro fizikasynyň hadysalaryny kwant fizikasy düşündirýär. 1895-1905-nji ýyllardaky açyşlar atom we ýadro fizikasynyň döremegine we onuň soňraky ösüşine ägirt uly täsir etdi.

Elektronyň elektrik zaryadynyň ululygyny ilkinji gezek 1909-1913-nji ýyllarda amerikaly fizik Robert Endrus Milliken (1868-1953) takyk ölçedi. Elektrik zaryadlary dürli baha eýe bolup bilerler, emma olaryň mümkin bolan iň kiçisi elektronyň zaryadydyr. Sada elektrik zaryadyny ölçemek we fotoelektrik hadysasy boýunça eden işleri üçin R.E. Milliken Nobel baýragyna eýe boldy (1923).

1911-nji ýylda E. Rezerford atomyň düzüminde oňyn (položitel) zaryadly **ýadronyň** bardygyny anyklady we atomyň **ýadro şekilini** (modelini) dörettdi. 1913-nji ýylda daniýaly fizik Nils Bor (1885-1962) atomyň birinji **kwant şekilini** öňe sürdi. Boruň atom nazaryýeti wodorod

atomynyň spektrlerini düşündirmäge mümkinçilik berdi. Atomyň kwant nazaryýetini döredendigi üçin N. Bor Nobel baýragyna eýe boldy (1922). Atomlaryň ýadrolarynyň elektrik zaryadyny 1913-nji ýylda inlis fizigi Genri Mozli (1887-1915) kesgitledi. Ol dürli himiki elementleriň atomlarynyň ýadrolarynyň zaryadlaryny rentgen şöhlelenmesiniň spektrleri boýunça anyklady. Atom ýadrosynyň zaryady (q) sada elektrik zaryadynyň Dmitriý Iwanowiç Mendeleýewiň (1834-1907) jedwelindäki himiki elementleriň tertip belgisine (Z) köpeldilmegine deňdir ($q=Ze$). E. Rezerford 1919-njy ýylda ýadronyň düzümine girýän **protony** açdy. 1932-nji ýylda inlis alymy Jeýms Çedwik (1891-1974) ýadronyň düzüminde **neýtronyň** bardygyny açdy. Şol ýylda amerikalý fizik Karl Deýwid Anderson kosmos şöhleleriniň düzüminde elektronyň garşybölejigi (antibölejigi) bolan **pozitrony** açdy. Kosmos şöhleleriniň bardygy bolsa 1911-nji ýylda awstrialy fizik Wiktor Frans Gess (1883-1964) tarapyndan açyldy we soňra R. Milliken tarapyndan gutarnykly subut edildi. Eden uly açyşlary üçin 1935-nji ýylda J. Çedwik, hem-de 1936-njy ýylda K. Anderson we W. Gess Nobel baýragyna mynasyp boldular.

1926-njy ýylda awstriýaly fizik Erwin Şredinger (1887-1961) **kwant mehanikasynyň esasy deňlemesini** dörettdi. Bu deňleme öň belli kanunlardan getirilip çykarylmaýar. Şredingeriň deňlemesi sada bölejikleriň düýpli häsiýetleriniň matematiki aňladylmasy hökmünde kabul edilýär. Şredingeriň deňlemesi atom we ýadro fizikasynda giňden ulanylýar. Nazary fizikada netijeli ugurlary işläp taýýarlandyklary üçin E. Şredingere we P. Diraka Nobel baýragy berildi (1933).

Atom we ýadro fizikasynyň gazananlaryna esaslanan öndebaryjy tilsimatlar Türkmenistanyň halk hojalygynda

$$L_{sz} = L_s \cos\theta = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

Bu ýerde θ – Z oky bilen L_s wektoryň arasyndaky burç.

Proton we neýtron ýadroda spin momenti bilen birlikde hereket mukdarynyň orbital momentine hem eýedir. Ýadronyň hereket mukdarynyň doly momenti, ony düzýän nuklonlaryň doly spin we orbital momentleriniň wektor jemine deňdir. Ol şu kanun boýunça kwantlaşýar

$$L_N = \hbar \sqrt{I_N(I_N + 1)}$$

Bu ýerde I_N - doly spin kwant sany ýa-da **ýadronyň spini**. Bu san $0 \div 7$ aralykda bitin ýa-da ýarymbitin sanly bahalary kabul edip bilýär. Jübüt massa sanly (A) ýadrolar bitin sanly spin kwant sana eýedirler we **bozonlara** degişli bolýarlar. A we Z sanlar jübüt bolanlarynda $I_N = 0$ bolýar. Täk A sanly ýadrolar ýarymbitin I_N sana eýedirler we **fermionlara** degişlidirler. Ýadronyň hereket mukdarynyň doly momenti berlen daşky meýdanda giňişlikde **kwantlaşýar**. Onuň daşky magnit meýdanyň induksiýasynyň ugruna göçürimi şeýle kesgitlenýär

$$L_{NZ} = L_N \cos\theta = m_l \hbar$$

Elektron $1,00116$ Bor magnetony ($\mu_B = e \hbar / (2m_e) = 9,2741 \cdot 10^{-24} \text{ J/Tl}$) deň bolan magnit momente eýedir (has takykly $\mu_{eZ} = 1,00116 \mu_B$). Degişlilikde atomyň ýadrosy hem magnit momente eýedir. Ýadrolar üçin magnit momentiniň birligi hökmünde **ýadro magnetony** ulanylýar: $\mu_N = e \hbar / (2m_p) = 5,0508 \cdot 10^{-27} \text{ J/Tl}$.

Ýadro magnetony Boruň (elektronyň) magnetonyndan $1836,15$ esse kiçidir. Bu ýerden atomyň magnit häsiýeti onuň elektronlarynyň magnit häsiýeti bilen kesgitlenýändigini gelip çykýar. Elektronyň tejribede ölçenilen

itekleşmäniň öwezini ýadro çekişmesi bilen dolmak üçin neýtronlaryň sany protonlaryň sanyndan çalt artmalydyr.

1.3. Ýadronyň spini we magnit momenti

Ýokary çözüp bilijilikli abzallary we spektri oýandyrmagyň ýörite çeşmelerini ulanmaklyk spektr çyzyklarynyň **aşa inçe gurluşyny** ýüze çykarmaga mümkinçilik berdi. Bu hadysany 1924-nji ýylda W. Pauli atomlaryň ýadrolarynyň **hereket mukdarynyň hususy momentiniň (spiniň) we magnit momentiniň** bardygy bilen düşündirdi.

Atomlaryň ýadrolaryndaky nuklonlar, elektron ýaly, ýarymbitin spine eýedirler. Şonuň üçin olar fermionlara degişlidirler. Proton ýa-da neýtron elektron ýaly, hereket mukdarynyň içki momentine eýedir. Bu **spin momentini** şu aňlatma bilen hasaplap bolýar

$$L_s = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

bu ýerde I kwant sany, adaty, ýöne spin diýilýär we $1/2$ deňdir. Şeýlelikde, protonyň ýa-da neýtronyň hereket mukdarynyň spin momenti şu görnüşe eýe bolýar:

$$L_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

Daşky magnit meýdany bolan ýagdaýynda hereket mukdarynyň spin momenti giňişlikde kwantlaşýar, ýagny meýdanyň ugruna görä takyk kesgitli ýagdaýda ýerleşýär. Eger Z oky magnit meýdanynyň induksiýasynyň wektorynyň (\vec{B}) ugry bilen ugrukdyrsak, onda protonyň ýa-da neýtronyň hereket mukdarynyň spin momentiniň bu oka göçürimi diňe şu iki bahanyň birine deň bolup biler:

ornaşdyrylýar. Beýik Saparmyrat Türkmenbaşynyň atalyk aladasy we öňdengörüjilikli syýasaty netijesinde lukmançylyk merkezleriniň birnäçesi häzirki zaman ýadro magnit rezonans tomograflary bilen üpjün edildi. Olar kelle we oňurga beýnini, ýüregi we gan damarlaryny derňemekde giňden ulanylýar. Türkmenistanda ýadro magnit rezonans usulyny ulanmagyň uly mümkinçilikleri bar. Olaryň biri bolsa nebitiň düzümindäki uglewodorod birleşmeleriniň gurluşyny we häsiýetlerini öwrenmekdi.

1. ATOM ÝADROSYNYŇ GURLUŞY WE HÄSIÝETLERI

1.1. Atom ýadrosynyň düzümi, zarýady we massasy

Atomyň ýadrosy diýip onuň merkezi bölegine aýdylýar.

E. Rezerford uly energiýaly α -bölejikleriň ýuka metal örtükden geçişini derňäp (1.1-nji bölümçä seret). 1911-nji ýylda atomyň oňyn zarýadly ýadrodan we ony gurşap alýan elektronlardan durýandygyny kesgitledi. Bu tejribeleri seljerip, ol atom ýadrosynyň çyzykly ölçegleriniň $10^{-15} - 10^{-14}$ m töweregidigini hem görkezdi (atomyň ölçegi, takmynan, 10^{-10} m töweregi).

Atom ýadrosynyň fiziki häsiýetleri, esasan, onuň zarýady we massasy bilen kesgitlenýär. 1913-nji ýylda G. Mozli ýadronyň zarýadyny takyk ölçedi. Ol dürli himiki elementleriň atomlarynyň ýadrolarynyň zarýadlaryny rentgen şöhlemenmesiniň spektrleri boýunça kesgitledi. Mass-spektroskopiýanyň häzirki zaman usullary atomlaryň we ýadrolaryň massalaryny ýokary takyklyk bilen kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Ýadronyň düzüminde **protonyň** bardygy 1919-njy ýylda E. Rezerford tarapyndan açyldy. Ol Wilsoneyň kamerasynda azotyň atomynyň ýadrosy α -bölejikler bilen urlanda bölejikleriň yz galdyryandygyna gözegçilik etdi. Ýadro bilen

çaknyşman uçup geçýän α -bölejikleriň gönüçyzykly yzlarynyň arasynda, takmynan, 50000 yzdan biri şahalanyp çarşak görnüşli inçe we gysga ýogyn yza eýe bolýar. Wilsonyň kamerasy magnit meýdanynda ýerleşdirilende ol yzlar egrelýärler. Bu bolsa bölejiklerde elektrik zaryadynyň bardygyny aňladýar. Yzlaryň egrelmeginiň häsiýeti boýunça α -bölejikleriň azotyň atomynyň ýadrosyna urlup, ondan proton diýip atlandyrylýan oňyn zaryadly bölejikleri çykarýandygy anyklanyldy. Şonda azotyň atomynyň ýadrosy kislorodyň izotopynyň ýadrosyna öwürilýär. Bu ýadro Wilsonyň kamerasynda gözegçilik edilýän yzlaryň çarşak görnüşli şahalanmasynda ýogyn yz galdyrýar. Protoneyň massasy elektroneyň massasyndan 1836,15 esse uludyr. 1920-nji ýylda E. Rezerford atomyň ýadrosynda massasy protoneyň massasyna deň we elektrik zaryadsyz bölejigiň bolmalydygyny hem çaklady.

1930-njy ýylyň ahyrynda nemes fizikleri W. Bote we G. Bekker radioişjeň çeşmeden goýberilýän 5,25 MeW energiýaly α -bölejikler bilen berilliýniň ${}^9_4\text{Be}$ ýadrosy urlanda güýçli aralaşygy şöhläni goýberýändigini ýüze çykardylar. Bu näbelli şöhlä ilki başda berilliý şöhleleri diýip at berdiler. Berilliý şöhleleriniň ýadrolardan 0,1 ýagtylygynyň tizligine çenli tizligi bolan protonlary goparmaga ukyplydygy ýüze çykarylady. Bu şöhleler 2 sm galyňlykly gurşun gatlagyndan geçende diňe 13% intensiwligini ýitirýär hem-de magnit we elektrik meýdanlarynda gysarmayarlar. Şonuň üçin Bote we Bekker, soňra bolsa öz tejribeleriniň esasynda fransuz fizikleri Iren Žolio-Kýuri (1897-1956) we Frederik Žolio-Kýuri (1900-1958), bu şöhleleriň ýokary energiýaly γ -bölejiklerdigi hakyndaky ýalňyş çaklamany öňe sürdüler.

1932-nji ýylda ilkinji bolup Rezerfordyň şägirdi J. Çedwik berilliý şöhleleriniň, γ -şöhleler däl-de, zaryadsyz hem-

Eger ýeňil ýadrolary agyr ýadrolara birikdirsek örän uly energiýa bölünip çykýar. Mysal üçin, deýteriýniň (${}^2_1\text{H}$) we triýitiýniň (${}^3_1\text{H}$) ýadrolary geliýniň (${}^4_2\text{He}$) ýadrosyna birikse, onda 17,6 MeW energiýa bölünip çykýar. Bir nuklona düşýän energiýa bolsa 3,52 MeW deň bolýar. Eger uranyň ýadrosy massa sanlary biri-birine golaý iki ýadro bölünse, onda 200 MeW töweregi energiýa bölünýär. Bir nuklona bolsa, takmynan 0,84 MeW energiýa düşýär. Şeýlelikde, **agyr ýadrolar bölünende we ýeňil ýadrolar birleşende örän uly energiýa bölünip çykýar.** Häzirki wagtda bu ýagdaýlaryň ikisi hem bölünme täsirleşmesinde we termoyadro täsirleşmelerinde amala aşyryldy.

Eger ýadro baglanyşyk energiýa deň bolan mümkin bolan in kiçi energiýa eýe bolsa, onda ol **esasy energiýa halynda** bolýar. Eger ýadronyň energiýasy baglanyşyk energiýadan uly bolsa, onda ol **oýandyrylan halynda** bolýar. Ýadronyň energiýasynyň nola deň bolmagy onuň düzüji nuklonlara dargamagyna laýyk gelýär.

Atom ýadrosynyň durnuklylygynyň ölçegi berlen izobar üçin (A hemişelik) berlen ýadroda protonlaryň we neýtronlaryň sanynyň arasyndaky gatnaşyk bolup durýar. Ýadronyň energiýasynyň in kiçilik şerti durnukly zaryad sany (Z) bilen massa sanynyň (A) arasynda şu baglanyşyga getirýär:

$$Z_d = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}$$

Şu deňleme boýunça alnan sanyň bitin bölegi Z_d diýip alynýar. Massa sanynyň kiçi we orta bahalarynda durnukly ýadrolarda protonlaryň we neýtronlaryň sany, takmynan deňdir: $Z \approx A - Z$. Zaryad sanynyň artmagy bilen protonlaryň kulon itekleşmesiniň güýji protonlaryň goşalaýyn özara täsiri netijesinde $Z(Z - 1) \sim Z^2$ görnüşde deňölçegli ulalýar. Bu

egrisi görkezilen. Bu çyzygy dürli ýadrolardaky nuklonlaryň baglanyşygynyň berkliginiň dürlüdigini häsiýetlendirýär. Ýadrolaryň köpüsi üçin baglanyşygyň birlikleýin energiýasy 8 MeW /nuklon töweregidir. Örän ýeňil we örän agyr ýadrolar üçin bu energiýa kiçelýär. Massa sanlary 50-60 aralykda ýerleşýän ýadrolardaky nuklonlar has berk baglanyşyklydyr. Bu ýadrolaryň baglanyşyk energiýasy 8,75 MeW/nuklon ululyga çenli ýetýär. Demriň ($A = 56$) we nikeliň ($A = 59$) ýadrolary has-da berkdirler. Massa sanynyň artmagy bilen baglanyşygyň birlikleýin energiýasy kem-kemden kiçelýär. Iň agyr tebigy element bolan uran üçin bu energiýa 7,6 MeW/nuklon ululyga deňdir. Agyr ýadrolarda protonlaryň sanynyň artmagy bilen olaryň kulon itekleşmesiniň energiýasy hem ulalýar. Şonuň üçin nuklonlaryň arasyndaky baglanyşygyň berkligi peselýär, agyr ýadrolaryň özi bolsa durnuksyz bolýarlar.

Az sanly nuklonlary saklaýan ýeňil ýadrolarda baglanyşygyň birlikleýin energiýasy nuklonlaryň sanynyň azalmagy bilen kiçelýär. Ýeňil ýadrolara 8.2-nji çyzykdaky baglanyşygynyň birden aşak-ýokary üýtgemesi häsiýetlidir. Täk sanly protonlardan we neýtronlardan durýan ýadrolaryň (${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$) ε_b energiýasy kiçidir. Jübüt sanly protonlary we neýtronlary bolan ýadrolaryň (${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$) ε_b energiýasy bolsa uludyr. Bu ýerden birlikleýin baglanyşyk energiýanyň diňe nuklonlaryň umumy sanyna bagly bolman, eýsem, ýadroda olaryň sanynyň jübütligine ýa-da täkligine baglylygy gelip çykýar. Şeýle baglylyk nuklonlaryň jübütleşme häsiýetiniň bardygyny aňladýar.

Ýokarda beýan edilenlerden ýadro energiýasynyň almagyň iki ýolunyň bardygy gelip çykýar: 1) agyr ýadrolaryň bölünmegi; 2) ýeňil ýadrolaryň birleşmegi.

de protonyň massasyna golaý massasy bolan bölejikleriň akymdygyny subut etdi. Ol bu bölejiklere **neýtronlar** diýip at berdi.

Wodorodyň atomynyň iň ýönekeý izotopynyň (${}^1_1\text{H}$) ýadrosy bir protondan durýar. Galan hemme atomlaryň ýadrolary iki görnüşli ýönekeý bölejiklerden, ýagny protonlardan we neýtronlardan durýar. Bu ýadro bölejiklerine **nuklonlar** diýilýär. **Ýadronyň proton-neýtron şekili** 1932-nji ýylda rus fizigi D. D. Iwanenko (1904-1994) we oňa garaşsyz nemes fizigi W. Geýzenberg tarapyndan hödürilenildi. 2.1-nji jedwelde deňeşdirmek üçin, nuklonlaryň hem-de elektronynyň esasy häsiýetnamalary getirilen.

2.1-nji jedwel

Bölejik Fiziki ululyk	Proton	Neýtron	Elektron
Massa, kg	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	$1,6749 \cdot 10^{-27}$	$9,11 \cdot 10^{-31}$
Massa, MeW	938,28	939,57	0,511
Elektrik zarýady, e	+1	0	-1

Neýtronynyň massasy elektronynyň massasyndan 1838,68 esse uludyr, protonynyň massasyndan bolsa 0,14% uludyr, ýagny

$m_n - m_p = 2,5m_e = 1,3\text{MeW}$. **Neýtron erkin halda durnuksyzdyr.** Ol elektrony we garşyneýtrinony goýberip,

protona öwrülip, öz-özünden dargayar: $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$.

Bu dargamada dargamanyň önümleriniň kinetik energiýalary görnüşinde 0,77MeW töweregi energiýa goýberilýär. Erkin neýtronynyň ýaşayyş wagty $\tau_n = 887$ sekundyr. Proton we elektron erkin halda durnuklydyrlar. Olaryň ýaşayyş wagtlary ägirt uludyr, ýagny, takmynan, $\tau_p > (10^{31} - 10^{33})$ we $\tau_e > 4 \cdot 10^{22}$ ýyl töweregidir.

Ýadrodaky nuklonlaryň sanyna massa sany diýilýär:

$$A = Z + N,$$

bu ýerde Z protonlaryň sany, N – ýadrodaky neýtronlaryň sany. **Protonlaryň sany ýadronyň umumy zaryadyny (Ze) kesgitleýär.** Atom elektrik taýdan bitarapdyr. Bu ýerden ýadrodaky protonlaryň sanynyň elektronlaryň sanyna, ýagny $D. I. Mendeleýewiň$ jedwelindäki elementleriň tertip belgisine deň bolmalydygy gelip çykýar. Şonuň üçin Z sana ýadronyň atom belgisi ýa-da zaryad sany diýilýär. Neýtronlaryň sany $N = A - Z$ baglanyşykdan tapylýar. Dürli ýadrolary belgilemek üçin şertleýin ${}_Z^AX$ ýa-da ${}_Z^AX^A$ ýazgy ulanylýar. Bu ýerde X – himiki elementiň nyşany. Köplenç, ýadrolaryň belgilenişinde onuň zaryad sany (Z) hasaba alynman ýazylýar.

Protonlaryň sany (Z) birmeňzeş we dürli massa sanly (A), ýagny neýtronlaryň sany (N) dürli ýadrolara **izotoplar** diýilýär. Bir himiki elementiň hemme izotoplarynyň elektron gatlaklary birmeňzeşdir. Şonuň üçin berlen elementiň izotoplarynyň, esasan, elektron gatlagy bilen şertlenen himiki we fiziki häsiýetleri birmeňzeşdir. Ýöne, ýadronyň gurluşy bilen şertlenen fiziki häsiýetler (massa sany, dykzlyk, radioişjeňlik we başgalar) görnetin tapawutlanýarlar. Bu tapawut ýeňil himiki elementlerde has aýdyň ýüze çykýar. Olara wodorodyň izotoplary mysal bolup bilerler:

${}_1^1H$ – adaty wodorod (protiý) ($Z = 1$, $N = 0$),

${}_1^2H$ – agyr wodorod (deýteriý) ($Z = 1$, $N = 1$),

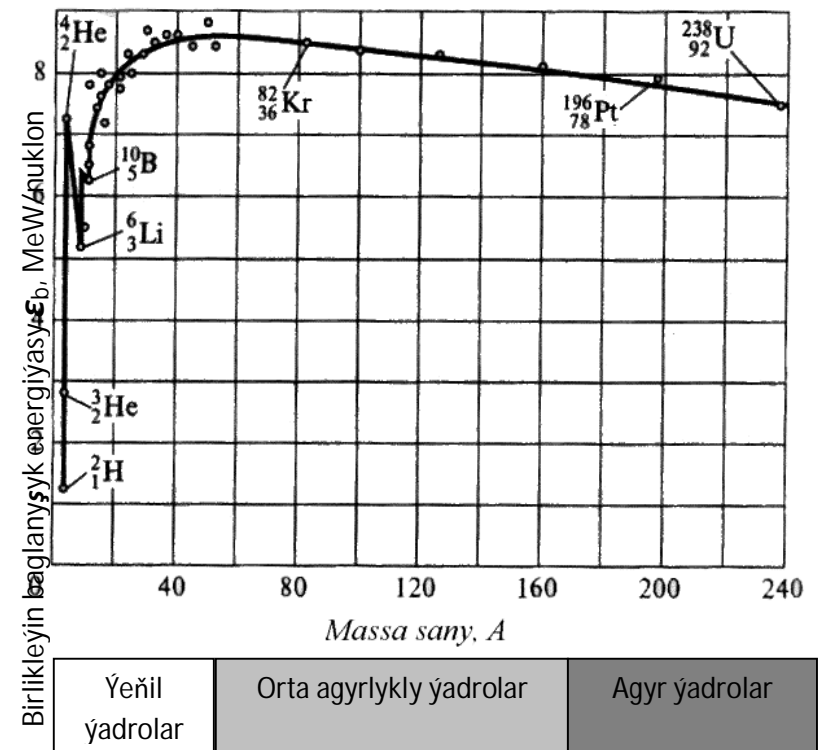
${}_1^3H$ – aşa agyr wodorod (tritiý) ($Z = 1$, $N = 2$).

${}_1^4H$ - dört nuklonly wodorod ($Z=1$, $N=3$).

${}_1^2H$ we ${}_1^3H$ ýadrolara, degişlikde, **deýtron** (D ýa-da d) we **triton** (T ýa-da t) diýilýär. Protiý we deýteriý durnuklydyrlar, tritiý bolsa radioişjeňdir. Tebigatda duş gelýän

$$\varepsilon_b = \frac{E_b}{A}.$$

Bu energiýa atom ýadrosynyň esasy häsiýetnamasy bolup hyzmat edýär. Baglanyşygyň birlikleýin energiýasy näçe uly bolsa, nuklonlar öz aralarynda has güýçli baglanyşyklydyrlar we ýadro şonça-da durnuklydyr.



3.1-nji çyzygy

3.1-nji çyzygyda durnukly ýadrolar üçin baglanyşygyň birlikleýin energiýasynyň (ε_b) massa sanyna (A) baglylygynyň

$$E = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_y]c^2 \quad (3.2)$$

Massa bilen energiýanyň arasyndaky c^2 deňölçeçlilik hemişeligi halkara ulgamynda $c^2 = 8,9876 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ýa-da $8,9876 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$ deňdir.

Ýadro fizikasynda massany **massanyň atom birliginde** (m.a.b.) aňladýarlar. Ol uglerodyň $^{12}_6\text{C}$ izotopynyň 1/12 massasy, ýagny $1 \text{ m.a.b.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ deňdir. Bu massa $E = mc^2 = 931,5 \text{ MeV}$ energiýa degişlidir. Eger baglanyşyk energiýany ulgamda däl birlikleri ulanyp hasaplasak, onda $E_b/\Delta m = c^2 = 931,5 \text{ MeV/m.a.b.}$ bolar.

Ýadronyň massasy $m_y = m_a - Zm_e$ görnüşde ýazyp bileris. Bu ýerde m_a - atomyň massasy, Zm_e - atomyň elektron gabygyny düzýän elektronlaryň doly massasy. Elektronlaryň ýadro bilen baglanyşyk energiýasyny (wodorod üçin 13,6 eV) hasaba almasa bolar. Sebäbi ol ýadrodaky nuklonlaryň megaelektronwoltlarda aňladylýan baglanyşyk energiýasyndan örän kiçidir. Protonyň massasy wodorodyň atomynyň massasyna deň diýip hasap edip bileris: $m_p = m_H - m_e \approx m_H$. Şeýlelikde, baglanyşyk energiýany hasaplamak üçin 3.2-nji deňlemäni şu görnüşde ýazyp bileris:

$$E_b = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2 \quad (3.3)$$

Eger $E_b > 0$ bolsa, onda ýadro durnuklydyr we ýadrony dargatmak üçin oňa daşyndan energiýa bermeli. Eger $E_b < 0$ bolsa, onda ýadro durnuksyzdyr we ol öz-özünden dargaýar. Massalary massanyň atom birliginde aňladyp, baglanyşyk energiýany şu deňlemäni ulanyp hasaplap bileris:

$$E_b = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a] \cdot 931,5$$

MeV

Bir nuklona düşýän baglanyşyk energiýasyna baglanyşygynyň birlikleýin (udel) energiýasy diýilýär:

köp himiki elementler izotoplaryň garyndysy bolup durýar. Mysal üçin, tebigy wodorod 99,985% protiyden we 0,015% deýteriýden durýar. Dört nuklonly wodorod (^4_1H) 1963-nji ýylda italýan fizikleriniň topary (Argan, Pýassoli, Piraçino we başgalar) tarapyndan açyldy we entek ýörite ada eýe bolmady.

Birmeňzeş massa sanly (A), ýöne dürli zaryad sanly (Z)

ýadrolara **izobarlar** diýilýär. Mysal üçin, $^{10}_4\text{Be}$, $^{10}_5\text{B}$, $^{10}_6\text{C}$; $^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$ we başgalar. Neýtronlaryň sany (N) birmeňzeş we dürli massa sanly (A), ýagny protonlaryň sany (Z) dürli ýadrolara **izotonlar** diýilýär. Mysal üçin, $^{13}_6\text{C}$, $^{14}_7\text{N}$.

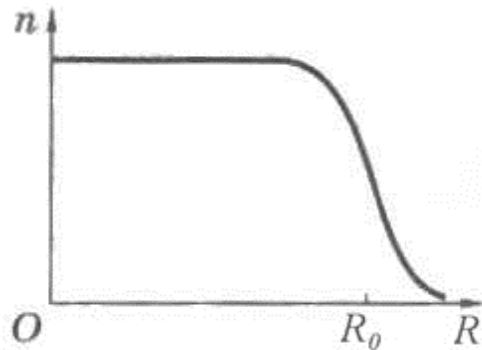
Ýarymdargama döwri bilen tapawutlanýan atom belgisi (Z) we ýadronyň massa sany (A) birmeňzeş radioişjeň ýadrolar hem bolýar. Olara **izomerler** diýilýär. Mysal üçin, $^{80}_{35}\text{Br}$ ýadronyň iki izomeri bar. Olaryň biriniň ýarymdargama döwri 18 minut, beýlekisiniňki bolsa – 4,4 sagat.

Ýeňil ýadrolaryň arasynda biriniň neýtronlarynyň sany beýlekiniň protonlarynyň sanyna deň, massa sanyň bolsa birmeňzeş jübütleri bolýar. Şeýle ýadrolara **ýalpyldawuk** (aýna ýaly) diýip aýdylýar. Mysal üçin, $^3_1\text{H}(1p + 2n)$ we $^3_2\text{He}(1n + 2p)$; $^{13}_6\text{C}(6p + 7n)$ we $^{13}_7\text{N}(6n + 7p)$.

Häzirki wagtda, takmynan, 3000 ýadro bellidir, olardan 300 töweregi durnukly, galanlary bolsa radioişjeňdir. Tebigatda atom belgisi $Z = 1 \div 92$ aralykdaky elementler duşgelyärler (tehniesiden $^{40}_{20}\text{Te}$ we prometiýden $^{61}_{25}\text{Pm}$ başga). $Z \geq 93$ elementlere urandan soňky elementler diýilýär. Olar dürli ýadro öwrülişmeleri netijesinde, emeli ýol bilen alyndylar (10.7-nji bölümçä seret).

Islendik kwant ulgamy ýaly atomyň ýadrosynyň hem anyk kesgitli araçägi ýokdur. Her bir ýadroda onuň

maddasynyň hemişelik dykzlykly içki çäginin we bu dykzlygyň nola çenli peselýän üstki gatynyň bardygy ýadrolarda elektronlaryň we nuklonlaryň pytramagy boýunça geçirilen tejribelerde anyklanyldy. Nuklonlaryň konsentrasiýasynyň ýadronyň merkezine çenli aralyga bagly adaty paýlanyşy 2.1-nji çyzgyda görkezilen. Bu ýerde R_0 – ýadronyň radiusy. Ol ýadronyň merkezinden nuklonlaryň konsentrasiýasynyň iki esse peselýän aralygyna deňdir.



2.1-nji çyzgy

Birinji golaýlaşmada ýadrony togalak görnüşli diýip hasap edip bolar. Ýadronyň radiusy ondaky nuklonlaryň sanyna baglydyr we tejribe aňlatmasy bilen ýeterlik takyklyk bilen aňladylýar:

$$R_y = R_0 A^{1/3}$$

(2.1)

Bu ýerde $R_0 = (1,2 \div 1,4) \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

$V = (4/3)\pi R_y^3 = (4/3)\pi R_0^3 A$ bolany üçin 2.1-nji aňlatmadan massa sany bilen kesgitlenýän ýadronyň massasynyň onuň göwrümine göni baglydygy gelip çykýar. Şonuň üçin ýadro maddasynyň dykzlygy hemme ýadrolar üçin,

takmynan, birmeňzeşdir. Hasaplamlaryň görkeziji ýaly bu dykzlyk ägirt uludyr, ýagny

$$\rho = \frac{m_y A}{V} = \frac{3m_y}{4\pi R_0^3} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ kg / m}^3,$$

bu ýerde m_y – ýadronyň massasy. Deňeşdirmek üçin suwuň dykzlygynyň 10^3 kg/m^3 deňdigini ýatladýarys. Atomyň massasynyň 99,98% ýadronyň massasy bolup durýar (wodorod üçin 99,946%).

1.2. Massanyň ýetmezçiligi we ýadronyň baglanyşyk energiýasy

Ýadronyň massasy onuň düzümine girýän protonlaryň we neýtronlaryň massasy bilen kesgitlenýär. Ýöne, ýadronyň massasy (m_y) oňa girýän bölejikleriň massalarynyň jeminden mydama kiçidir: $m_y < [Zm_p + (A - Z)m_n]$. Onuň esasy sebäbi bolsa ýadrodaky nuklonlaryň güýçli özara täsiridir. Bu özara täsir sebäpli atomyň ýadrosyny aýratyn erkin nuklonlara gutarnykly bölmek üçin iş etmeli. Bu işe ýadronyň baglanyşyk energiýasy (E_b) diýilýär. Tersine, erkin nuklonlardan ýadro emele gelende nuklonlaryň biri-biri bilen baglanyşyk energiýasy bölünip çykýar (mysal üçin, elektromagnit şöhlemenmesi görnüşinde).

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_y$$

(3.1)

ululyga **massanyň ýetmezçiligi** diýilýär. Ol, ýadronyň baglanyşyk energiýasyny (E_b) häsiýetlendirýär.

Belli bolşy ýaly, bölejigiň dynçlyk energiýasy onuň massasy bilen $E = mc^2$ görnüşde baglanyşyklydyr. Onda 3.1-nji deňlemäni hasaba alyp **baglanyşyk energiýany** alarys:

$$N_k(t) = \sum_{i=1}^k c_i^k e^{-\lambda_k t}.$$

Bu ýerde c_i^k hemişelikler elementleriň häsiýetnamalary bilen kesgitlenýärler.

Massa sany 209-dan uly bolan agyr ýadrolar elektrik energiýasynyň ulalmagynyň hasabyna α – dargama sezewar bolýarlar. Eger massa sany 209-dan has uly bolsa, onda radioişjeň ýadro yzygiderli dargamalar netijesinde durnukly ýadro öwrülýär. Ýöne hemme dargamalar α – dargamalar däldirler. Her bir α – dargamada massa sany 4 birlige, protonlaryň sany bolsa diňe 2 birlige azalýar. Şonuň üçin neýtronlaryň göräleyin sany artýar. Netijede, birnäçe α -bölejigini ýitirenden soň, ýadro, β – dargama meýilli bolýar. Bu dargamada ýaronyň içindäki neýtronlaryň biri protona öwrülýär ($n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$). Radioişjeň maşgalada α - we β -dargamalar, adaty, biri-biri bilen gezeleşýärler.

α - dargamada massa sany 4 birlige üýtgeýär, β – dargamada bolsa düýbünden üýtgemeyär. Radioişjeň maşgala üçin massa sanyny şu aňlatma boýunça aňladyp bolar:

$$A = 4n + C.$$

Bu ýerde C – berlen radioişjeň maşgala üçin hemişelik san, n bitin oňyn san.

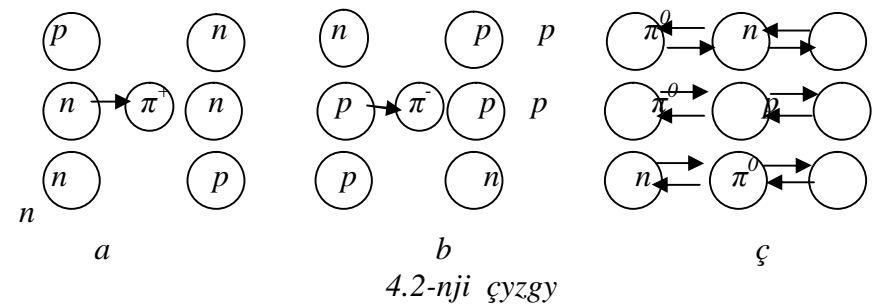
Umuman, diňe 4 dürli radioişjeň maşgala bolup biler.

Olaryň massa sanlaryny şu görnüşde aňladyp bileris:

$$4n; 4n + 1; 4n + 2; 4n + 3.$$

Radioişjeň maşgalalaryň ýarymdargama döwri, adaty, Ýeriň ýaşayş wagtyna barabar bolan izotoplardan başlaýar. 6.2 –nji jedwelde her bir radioişjeň maşgalanyň iň köp ýaşayan izotoplary hakynda maglumat getirilendir.

1. Proton ähtimal π^+ piony goýberip, neýtrona öwrülýär. Neýtron piony siňdirip protona öwrülýär. Soňra şeýle öwrülişik ters ugur boýunça bolup geçýär (8.4-nji a çyzgy). Her bir özara täsir edişýän nuklonlar wagtynyň bir bölegini zaryadlanan, beýleki bölegini bolsa bitarap ýagdaýda geçirýär.



2. Neýtron we proton π^- pionlar bilen alyşýarlar (8.4-nji b çyzgy):

$$n + p \leftrightarrow p + \pi^- + p \leftrightarrow p + n$$

3. Nuklonlar π^0 pionlar bilen alyşýarlar (8.4-nji c çyzgy):

$$p + n \leftrightarrow p + \pi^0 + n \leftrightarrow p + n,$$

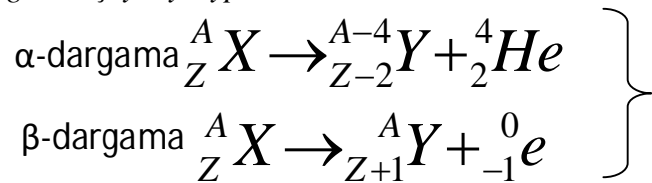
$$p + p \leftrightarrow p + \pi^0 + p \leftrightarrow p + n,$$

$$n + n \leftrightarrow p + \pi^0 + n \leftrightarrow n + n.$$

Beýan edilen üç ýagdaýyň birinjisi tejribede tassyklanyldy. Neýtronlaryň dessesi wodoroddan geçende, bu dessede protonlar döreýär. Olaryň köpüsi düşýän neýtronlaryňky ýaly energiýa we hereketiň ugruna eýe bolýarlar. Köp sanly neýtronlaryň oň dynçlykdaky protonlara maňlaý urgy netijesinde özüniň hereket mukdaryny doly bermegi mümkin däldir. Şonuň üçin neýtronlaryň bir bölegi protonlaryň golaýyndan uçup geçende ähtimal π^+ pionlaryň birini eýeleýär diýip hasap edilýär. Netijede, neýtron protona

Radioişjeň dargamada 6.6-njy we 6.7-nji aňlatmalar köplenç, süýşme düzgüni boýunça bir görnüşe eýe bolýarlar. Bu düzgün berlen başlangyç ýadro darganda haýsy ýadronyň döreýändigini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Eger A_ZX dargaýan başlangyç ýadro bolsa, onda α - we β - dargamalardaky süýşmäni, ýagny Fayansyň we Soddiiniň düzgünini şeýle ýazyp bileris:



Bu ýerde Y – dörän ýadronyň belgisi, 4_2He - geliýniň, ${}^0_{-1}e$ - elektronyň belgilenişi ($A=0$, $Z=-1$).

2.2. Ýadrolaryň radioişjeň maşgalalary

Radioişjeň α - ýa-da β - dargamalar netijesinde radioişjeň elementleriň atomlarynyň ýadrolarynyň başga himiki elementleriň izotoplarynyň ýadrolaryna öwrülýändigini süýşme düzgünlerinden gelip çykýar. Käbir ýagdaýlarda emele gelen ýadro hem radioişjeň bolýar we yzygiderli radioişjeň öwrülişikler döreýär.

Tebigatda ýarymdargama döwri Ýeriň ýaşyna barabar ýa-da ondan hem uly bolan diňe 14 radioişjeň ýadro tapyldy: ${}^{40}_{19}K$, ${}^{50}_{23}V$, ${}^{87}_{37}Rb$, ${}^{115}_{49}In$, ${}^{138}_{57}La$, ${}^{142}_{58}Ce$, ${}^{144}_{60}Nd$, ${}^{147}_{62}Sm$, ${}^{176}_{71}Lu$, ${}^{187}_{75}Re$, ${}^{192}_{78}Pt$, ${}^{232}_{90}Th$, ${}^{235}_{92}U$, ${}^{238}_{92}U$. Olaryň başdaky 11-isi durnukly düzüm ýadrolara dargaýarlar. Soňky 3 ýadrolar radioişjeň düzüm ýadrolara dargaýarlar, olar bolsa öz gezeginde indiki nesliň radioişjeň düzüm ýadrolaryna dargaýarlar we şuna meňzeşler.

ýaşaaýş wagty bolsa $\tau = 0,8 \cdot 10^{-16}$ sekunttdyr. Üç pionyň hemmesiniň spinleri nola deňdirler, ýagny olar bozonlara degişlidirler.

Nuklonlaryň arasynda alyşma özara täsiriň geçişine seredeliň. Eger olaryň golaýynda başga bölejikler ýok bolsa, onda nuklonyň goýberýän hemme pionlary nuklon tarapyndan hem şu mümkin bolan şahalar boýunça siňdirilýär:

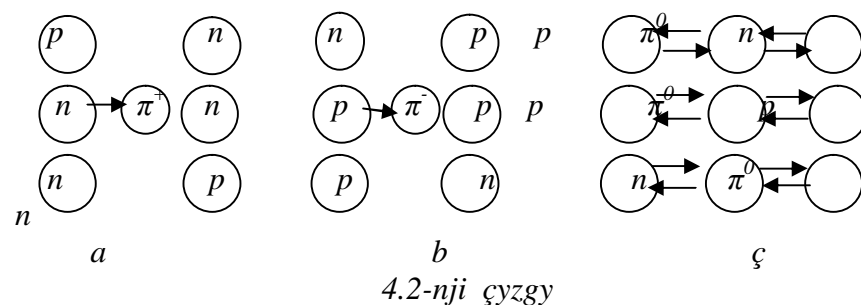
$$(9.8) \quad \left. \begin{array}{l} p \leftrightarrow n + \pi^+, \\ n \leftrightarrow p + \pi^-, \\ p \leftrightarrow p + \pi^0, \quad n \leftrightarrow n + \pi^0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} (4.1) \\ (4.2) \\ (4.3) \end{array}$$

Bu ýerde “ \leftrightarrow ” belgi öwrülişigiň göni (çepden saga) we ters (sagdan çepde) ugurlar boýunça bolmak mümkinçiligini görkezýär. Şeýle ýagdaýlarda başdaky we ahyrky hallar ýerini çalyşýarlar.

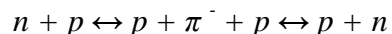
Nuklonlaryň arasyndaky özara täsirler diňe kesgitsizlikler baglanyşygynyň kömegi bilen amala aşyrylyp bilner. Oňa laýyklykda Δt wagtda bolýan ulgamyň halynyň energiýasy diňe $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ baglanyşygy kanagatlandyryýan ΔE kesgitsizlik bilen kesgitlenen bolýar. Bu baglanyşykdan ulgamyň energiýasy, dowamlylygy $\Delta t \approx \hbar / \Delta E$ ululykdan uly bolmadyk, ΔE artma sezewar bolup biljekdigi gelip çykýar. Bu ýagdaýda pion goýberilende energiýanyň saklanmak kanunynyň bozulýandygyny ýüze çykaryp bolmaýar.

Ýekeleýin nuklon ýadro güýçleriniň meýdanyny emele getirýän üznüksiz göýberilýän we siňdirilýän ähtimal (wirtual), ýagny aralyk (gözegçilik edilmeýän) haldaky pionlaryň buludy bilen örtülendir. **Haçanda nuklonlaryň pion bulutlary galtaşanda, nuklonlar pionlar bilen alşyp başlaýarlar.** Netijede, nuklonlaryň arasynda güýçli özara täsir döreýär. Bu özara täsir üç şaha boýunça amala aşyrylyp bilner:

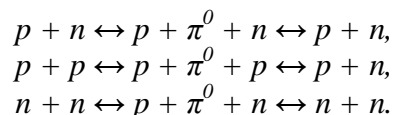
1. Proton ähtimal π^+ piony goýberip, neýtrona öwrülýär. Neýtron piony siňdirip protona öwrülýär. Soňra şeýle öwrülişik ters ugur boýunça bolup geçýär (8.4-nji a çyzgy). Her bir özara täsir edişýän nuklonlar wagtynyň bir bölegini zarýadlanan, beýleki bölegini bolsa bitarap ýagdaýda geçirýär.



2. Neýtron we proton π^- pionlar bilen alyşýarlar (8.4-nji b çyzgy):



3. Nuklonlar π^0 pionlar bilen alyşýarlar (8.4-nji ç çyzgy):



Beýan edilen üç ýagdaýyň birinjisi tejribede tassyklanyldy. Neýtronlaryň dessesi wodoroddan geçende, bu dessede protonlar döreýär. Olaryň köpüsi düşýän neýtronlaryňky ýaly energiýa we hereketiň ugruna eýe bolýarlar. Köp sanly neýtronlaryň öň dynçlykdaky protonlara maňlaý urgy netijesinde özüniň hereket mukdaryny doly bermegi mümkin däldir. Şonuň üçin neýtronlaryň bir bölegi protonlaryň golaýyndan uçup geçende ähtimal π^+ pionlaryň birini eýeleýär diýip hasap edilýär. Netijede, neýtron protona

Kaliý	$^{42}_{19}K$	12,4 sag	Altyn	$^{198}_{79}Au$	2,7 gün
Kalsiý	$^{45}_{20}Ca$	152 gün	Poloniý	$^{210}_{84}Po$	138,4 gün
Wanadiý	$^{48}_{23}V$	16,1 gün	Radon	$^{222}_{86}Rn$	3,82 gün
Demir	$^{59}_{26}Fe$	46,3 gün	Radiý	$^{226}_{88}Ra$	1601 ýyl
Kobalt	$^{60}_{27}Co$	5,26 ýyl	Uran	$^{234}_{92}U$	$2,5 \cdot 10^5$ ýyl
Mis	$^{64}_{29}Cu$	12,8 sag		$^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8$ ýyl
Sink	$^{65}_{30}Zn$	246 gün		$^{238}_{92}U$	$4,5 \cdot 10^9$ ýyl

Bu ýerde $Z_N e$ – başlangyç (ene) ýadronyň zarýady, $Z_i e$ – radioişjeň dargama netijesinde döreýän ýadrolaryň we bölejikleriň zarýady. Bu kanun hemme ýadro täsirleşmeleri derňelende hem ulanylýar.

Tebigy radioişjeň hadysasyndaky **massa sanlarynyň saklanma düzgüni**:

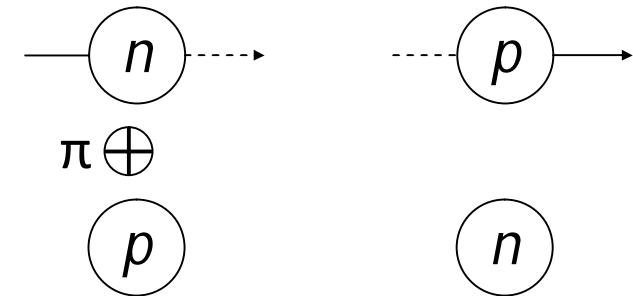
$$A_N = \sum_i A_i$$

Bu ýerde A_N – başlangyç ýadronyň massa sany, A_i – dargama netijesinde alnan ýadrolaryň we bölejikleriň massa sanlary.

6.1-nji jedwel

Radioisjeň izotop		T	Radioisjeň izotop		T
Wodorod	3_1H	12,3 ýyl	Myşýak	${}^{76}_{33}As$	26,8 gün
Uglerod	${}^{14}_6C$	5730 ýyl	Brom	${}^{77}_{35}Br$	38,8 gün
Azot	${}^{13}_7N$	9,9 min		${}^{82}_{35}Br$	35,5 gün
Kislород	${}^{15}_8O$	124 sek	Kripton	${}^{85}_{36}Kr$	10,6 ýyl
Natriý	${}^{22}_{11}Na$	2,6 ýyl	Stronsiý	${}^{89}_{38}Sr$	54 gün
	${}^{24}_{11}Na$	15 sag		${}^{90}_{38}Sr$	29 ýyl
Fosfor	${}^{32}_{15}P$	14,8 gün	Surma	${}^{124}_{51}Sb$	60 gün
Kükürt	${}^{35}_{16}S$	87,1 gün	Ýod	${}^{131}_{53}I$	8 gün
Hlor	${}^{36}_{17}Cl$	$3 \cdot 10^5$ ýyl	Seziý	${}^{137}_{55}Cs$	30 ýyl
	${}^{38}_{17}Cl$	38 min	Wolfram	${}^{185}_{74}W$	74 gün

öwrülýär, öz zaryadyny ýitiren proton bolsa neýtrona öwrülýär (4.3 - nji çyzgy).



4.3-nji çyzgy

Eger nuklona pionyň massasyna deňeçer energiýa berilse, onda ähtimal pion hakyky bolup biler. Gerek bolan energiýany ýeterlik tizlendirilen nuklonlar (ýa-da ýadrolar) çaknyşanlarynda ýa-da nuklonyň γ – kwanty siňdirende berip bolýar. Çaknyşýan bölejikleriň energiýalary has uly bolanda birnäçe hakyky pionlar döräp bilerler.

Ýadro güýçleriniň tebigatynyň **alyşma häsiýeti** neýtronda magnit momentiniň bolmagyny we protonyň magnit momentiniň kadadan çykýan ululygyny düşündirmäge mümkinçilik berdi. Proton wagtyň bir böleginde ($n + \pi^+$) ähtimal halda bolýar (4.3-nji aňlatma seret). π^+ pionyň şol döwürdäki orbital hereketi netijesinde protonyň magnit momenti ýadro magnetonyndan tapawutlanýar ($\mu_p = 2,79\mu_N$). 4.5-nji aňlatmada beýan edilen öwrülişiň bolmagy neýtrona wagtyň bir bölegini ($p + \pi^-$) halda bolmaga mümkinçilik berýär. Bu bolsa neýtronyň π^- pionyň orbital hereketi bilen şertlenen

tersin magnit momentiniň bolmagyny düşündirýär ($\mu_n = -1,913 \mu_N$).

Ýadrolaryň durnuklylygy ýadro güýçleriniň ýüze çykmagynyň häsiýeti bilen baglanyşyklydyr. Eger neýtronlaryň sanynyň protonlara baglylyk diagrammasyny gursak (neýtron-proton diagramasy), onda durnukly ýadrolar ýeterlik kiçi zolagy eýeleýär. Ýeňil, durnukly ýadrolar $N = Z$ çyzygyň golaýynda ýerleşýär. Protonlaryň (Z) sanynyň köpelmegi bilen olaryň arasyndaky kulon itekleşmesiniň hasabyna ýadro güýçleri gowşaýarlar. Bu gowşamanyň öwezini dolmak üçin ýadro protona garanyňda köp neýtron saklamaly bolýar. Şonuň üçin kalsiýden ($^{40}_{20}\text{Ca}$) başlap N/Z gatnaşyk birden uly bolýar ($N/Z > 1$). Durnuklylygyň ýokary çägi bolan wismutyň ($^{209}_{83}\text{Bi}$) ýadrosy üçin $N/Z = 1,52$ deň bolýar. $Z > 83$ bolan ýadrolarda (Poloniýden başlap) kulon itekleşmesiniň öwezini ýadro güýçleri dolduryp bilmeýärler. Şonuň üçin bu ýadrolar **radioişjeňdirler**.

1.5. Atom ýadrosynyň şekilleri

Giňişleýin tejribe maglumatlarynyň esasynda işläp taýýarlanýan atom ýadrosynyň nazaryýeti, ilki bilen, ýadrolaryň gurluşyna we häsiýetlerine degişli hemme soraglara jogap bermelidir. Mysal üçin:

1. Haýsy ýadrolar durnukly, haýsysy radioişjeň? Radioişjeň dargamanyň görnüşleri, yarymdargamanyň döwürleri, uçup çykýan bölejikleriň energiýa we burç boýunça paýlanyşy nähili?

2. Islendik ýadronyň radiusy, massasy, baglanyşyk energiýasy, spini, magnit momenti, jübütligi, elektrik kwadrupol momenti we beýleki häsiýetnamalary nämä deň?

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

Alnan ululyga **radioişjeň maddanyň işjeňligi** (A) diýilýär. Şeýlelikde, işjeňligi şu görnüşde ýazyp bileris:

$$A = \lambda N. \quad (6.5)$$

Işjeňlik wagt birliginde (s^{-1}) radioişjeň maddanyň ýadrolarynyň dargaýan sany bilen ölçenilýär. İşjeňligi halkara ulgamynda bekkerelde (Bk) ölçeýärler, $1Bk = 1$ dargama/s. Köplenç, radioişjeňligi ýörite birlik bolan Kýuride hem-de onuň ülüşlerinde – millikýuride we mikrokýuride ölçeýärler ($1Ki = 3,7 \cdot 10^{10} Bk$).

Radioişjeň maddanyň massa birligine hasaplanan işjeňligine birlikleýin (udel) işjeňlik diýilýär.

Ýadrolaryň radioişjeň dargamagynda **elektrik zarýadynyň saklanma kanuny** şeýle aňladylýar:

$$Z_N e = \sum_i Z_i e$$

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e \text{ elektron dargama}$$

$${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e \text{ pozitron dargama}$$

6.2-nji aňlatma laýyklykda birinji ýarymdargama döwürden soň $N=N_0/2$ bolar. Onda ýazyp bileris: $N_0/2=N_0e^{-\lambda T}$ ýa-da $e^{-\lambda T}=2$. Bu ýerden

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,6931}{\lambda}. \quad (6.3)$$

Tebigy radioişjeň elementleriň ýarymdargama döwürleri sekundyň on million üleşlerinden birnäçe milliard ýyla çenli üýtgeýär. 6.1-nji jedwelde käbir radioişjeň elementler we olaryň ýarymdargama döwürleri görkezilen.

Ýadrolaryň ýaşaýşynyň jemleýji dowamlylygy $t |dN| = \lambda N dt$ deň. Bu aňlatmany hemme mümkin bolan t wagtda (0-dan ∞ -e çenli) integrirläp we ýadrolaryň başlangyç N_0 sanyna bölüp, şeýle hem 6.2-nji aňlatmany hasaba alyp, radioişjeň ýadronyň ortaça ýaşaýş wagtyny alarys:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt \\ &= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Şeýlelikde, radioişjeň ýadronyň ortaça ýaşaýş wagty diýip radioişjeň dargama hemişeligiň ters ululygyna aýdylýar. 6.3-nji we 6.4-nji aňlatmalary deňeşdirmeden T ýarymdargama döwürüň **τ ortaça ýaşaýş wagty** bilen baglanyşygy gelip çykýar:

$$T = \tau \ln 2 = 0,6931 \tau$$

Radioişjeň dargamanyň intensiwligi wagt birliginde dargan ýadrolaryň sany bilen häsiýetlendirilýär. 6.1-nji aňlatmadan bu ululygy alarys:

3. Atomyň ýadrosyndaky derejeleriň energiýa haly nähili paýlanypdyr?

4. Oýandyrylan haldan esasy hala geçmegiň ähtimallygy nämä deň we başgalar?

Ýadronyň yzygiderli nazaryýetini döretmegiň synanyşygy birnäçe kynçylyklara gabat gelýär. Olardan esasyly şulardyr: 1) ýadroaky nuklonlaryň arasyndaky güýçler hakynda biziň düşüňjämiziň ýeterlik däldegi; 2) ýadroaky köp mukdardaky bölejikleriň hereketini beýan edýän kwant deňlemeleriniň aşa çylşyrymlylygy; 3) nuklonlaryň arasyndaky güýçli özara täsir sebäpli, olaryň toparlaýyn hereketini hasaba almagyň zerurlygy. Şu kynçylyklar sebäpli ýadronyň şekillerini gurmagyň zerurlygy ýüze çykýar. Häzirki wagta çenli ýadronyň birnäçe şekili hödürlendi. Olaryň her biri ýadronyň diňe käbir häsiýetlerini kanagatlanarly düşündirýär. **Ýadronyň damja, gabyklaýyn, umumylaşdyrylan, optiki we beýleki şekilleri bar.**

Ýadronyň damja şekili 1936-njy ýylda Nils Bor we oňa garaşsyz Ý.I. Frenkel tarapyndan hödürlenildi. Bu şekile laýyklykda atomyň ýadrosy gysylmaýan ýadro suwuklygynyň oňyn zaryadlanan damjasy bolup durýar. Atom ýadrosynyň häsiýetleriniň we suwuklygyň oňyn zaryadlanan damjasynyň arasyndaky meňzeşlige seredeliň:

1. Nuklonlaryň arasyndaky ýadro güýçleri we suwuklygyň molekulalarynyň arasyndaky özara täsir örän ýakyn aralykda döreýär, ýagny olar **gysga täsirli**dirler.

2. Ýadro güýçleri we molekulalaryň özara täsir güýçleri **doýma häsiýete** eýedir. Her bir nuklon ýadroaky hemme nuklonlar bilen däl-de, diňe çäkli mukdardaky nuklonlar bilen täsir edişýär. Damjadaky her bir molekula hem çäkli mukdardaky molekulalar bilen täsir edişýär.

3. Ýadronyň dykyzlygy, takmynan, hemişelikdir we ýadro girýän nuklonlaryň sanyna bagly däl. Degişlilikde, suwuklygyň dykyzlygy üýtgemeyän temperaturada we basyşda hemişelikdir hem-de bölejikleriň sanyna bagly däl.

4. Ýadro bölejikleri, suwuklygyň molekulalary ýaly, belli bir süýşjeňlige eýedir.

5. Ýadrodaky nuklonlaryň çekişme energiýasy suwuklykdaky damjanyň molekulalarynyň arasyndaky özara täsiriň energiýasyna meňzeşdir. Ýadro girýän protonlaryň sanynyň artmagy bilen kulon güýjüniň täsiriniň hasabyna baglanyşyk energiýasy kiçelýär. Bu bolsa suwuklykdaky damjanyň massasynyň (molekula sanynyň) ulalmagy bilen onuň durnuklylygynyň peselýändigine gabat gelýär.

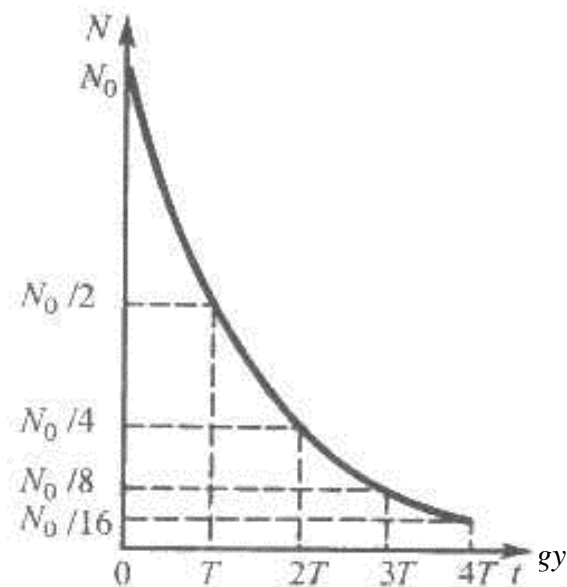
6. Ýadronyň “üstünde” ýerleşýän nuklonlar suwuklygyň ýüzünde ýerleşýän molekula täsir edýän üst dartuw güýjüne meňzeş güýje sezewar bolýarlar. Ýadrony suwuklygyň damjasy ýaly üst energiýasy bilen häsiýetlendirip bolýar.

7. Suwuklyk gyzdýrylanda onuň berýän energiýasynyň paýlanyşyna meňzeşlikde, ýadro oýandýrylanda energiýa nuklonlaryň arasynda ähtimallykly paýlanýar.

Damja şekili ulanylanda nuklonlaryň tolkun häsiýetine eýedigini we kwant kanunlaryna boýun egýändigini ýatda saklamalydyr. “Ýadro damjasy”, suwuklygyň damjasyndan tapawutlylykda, oňyn zarýada eýedir. Onuň dykyzlygy ägirt uludyr we takmynan $2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ deňdir. Ýadrony suwuklygyň damjasy yaly görkezmeklik köp hadysalary, mysal üçin, agyr ýadrolaryň bölünmegini düşündirmäge mümkinçilik berdi. Damja şekili ýadronyň göwrümini saklap, görnüşini üýtgetmegine ýol berýär. Ýadro damjasynyň görnüşiniň ep-esli üýtgemegi onuň böleklere bölünmegine getirip biler.

Damja şekilinde ýadronyň baglanyşyk energiýasy (MeV) we massasy 1935-nji ýylda Waýszekker tarapyndan hödürlenlen ýarymtejribe deňlemesi bilen kesgitlenýär.

kanunyny aňladýar. Oňa laýyklykda dargamadyk ýadrolaryň sany wagtda eksponensial kanun boýunça kemelýär (6.2-nji çyzgy).



6.2-nji çyzgy

Öz-özünden radioişjeň dargama kanuny iki sany çaklama esaslanýar: 1) dargama hemişeligi daşky şertlere bagly däl; 2) wagt birliginde (dt) dargaýan ýadrolaryň sany olaryň bar bolan mukdaryna göni baglydyr. Bu çaklamalar, radioişjeň dargamanyň **statistiki** hadysadygyny, berlen ýadronyň dargamasynyň bolsa kesgitli ähtimallygy bolan **tötänleýin** hadysadygyny aňladýarlar.

Radioişjeň şöhlemenmesiniň intensiwligini radioişjeň ýadronyň ýarymdargama döwri T we ortaça ýaşayyş wagty τ häsiýetlendirýärler. Radioişjeň ýadrolaryň başlangyç sanynyň ortaça iki esse azalýan wagtyna **ýarymdargama döwri** diýilýär.

hem şu esasyda gurulýar. Aýratyn radioişjeň ýadrolaryň biri-birine garaşsyz dargaýandygy üçin ortaça $(t, t+dt)$ wagty aralygynda dargaýan ýadrolaryň sany (dN) dt wagta we t wagty pursadynda dargamadyk ýadrolaryň sanyna göni baglydyr:

$$dN = -\lambda N dt. \quad (6.1)$$

Bu ýerde λ – radioişjeň dargama hemişeligi. Deňlemedäki aýyrmak alamaty dargamada radioişjeň ýadrolaryň umumy sanynyň azalýandygyny aňladýar. 6.1-nji baglanyşykdan dargama hemişeliginin wagty birliginde dargama sezewar bolýan ýadrolaryň sanynyň göräli azalmasydygy gelip çykýar:

$$\lambda = \frac{-dN/N}{dt}.$$

Başga sözler bilen aýdylanda, dargama hemişeligi wagty birliginde dargan ýadrolaryň paýyny häsiýetlendirýär, ýagny radioişjeň dargamanyň tizligini kesgitleýär.

6.1-nji aňlatmany şu görnüşde ýazalyň:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt.$$

Bu deňlemäni integrirläp

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

alarys

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6.2)$$

Bu ýerde N_0 – dargamadyk ýadrolaryň başlangyç sany ($t = 0$ wagty pursadynda), N – t wagty pursadyndaky dargamadyk ýadrolaryň sany. 6.2-nji baglanyşyk **radioişjeň dargama**

$$E_b = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{C_5}{A^{3/4}} \delta \quad (5.1)$$

$$M = Zm_p + (A-Z)m_n - C_1 A + C_2 A^{2/3} + C_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} - \frac{C_5}{A^{3/4}} \delta \quad (5.2)$$

Bu ýerde C_1, C_2, C_3, C_4 we C_5 hemişelikler tejribe maglumatlaryndan tapylýar we hemme ýadrolar üçin birmeňzeşdir. Häzirki wagtda şu bahalar kabul edilýär:

$$C_1 = 14 \text{ MeV}, \quad C_2 = 13 \text{ MeV}, \quad C_3 = 0,584 \text{ MeV}, \quad C_4 = 19,3 \text{ MeV}, \quad C_5 = 33,5 \text{ MeV}$$

5.1-nji aňlatmada birinji agza energiýanyň massa sanyna (A) göni baglydygyny görkezýär. Ikinji agza damjanyň üst dartyş energiýasyny hasaba alýar. Üçünji agza protonlaryň kulon itekleşmesi sebäpli ýüze çykýan elektrostatik energiýany aňladýar. Dördünji agza atom ýadrosynda protonlaryň (Z) we neýtronlaryň (N) sanynyň biri-birine deň dældigini (köplenç, $N > Z$) göz önüne tutýan energiýa. Bäsünji agza nuklonlaryň sanynyň jübütligine bagly energiýa. Onuň bahasy şeýle aňladylýar:

$$\delta = \begin{cases} +1 & A \text{ we } Z \text{ jübüt bolanda} \\ 0 & A \text{ ták bolanda (} Z \text{ islendik)} \\ -1 & A \text{ jübüt we } Z \text{ ták bolanda} \end{cases}$$

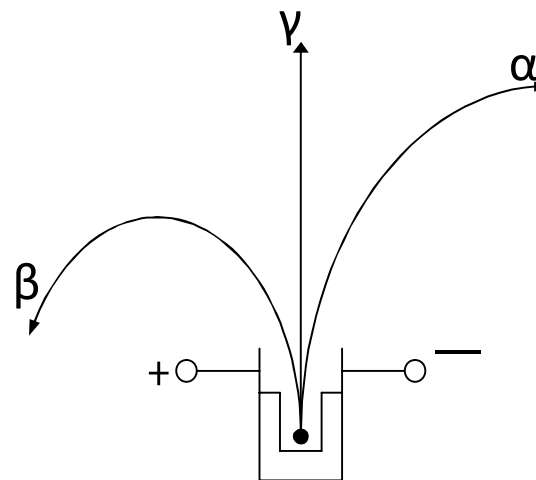
Ýadronyň damja şekilinde ýadronyň massasy, baglanyşyk energiýasy we beýleki görkezijileri (parametrleri) hakynda, takmynan, dogry düşünje berýär. Ol α - we β -dargamanyň energiýa şertlerini tapmaga mümkinçilik berýär. Damja şekiliniň esasynda agyr ýadrolaryň bölünmegini hil taýdan düşündirmek bolýar.

Ýadronyň gabyklaýyn sekili 1949-1950-nji ýyllarda biri-birine garaşsyz amerikan fizigi Mariýa Geppert-Mayer (1906-1972) we nemes fizigi Hans Ýensen (1907-1973) tarapyndan hödürlenildi. Bu şekile laýyklykda ýadronyň nuklonlary biri-birine garaşsyz ýadro güýçleriniň meýdanynda hereket edýärler. Atomdaky elektronlar ýaly, nuklonlar hem energiýanyň kesgitli bahalary bilen häsiýetlendirilýän dürli gabyklary doldurýarlar.

Gabyklaýyn şekilde ýadrodaky protonlar we neýtronlar doldurylan gabyklary emele getirýärler. Protonlar öz (neýtronlar bolsa öz) energiýa derejelerini jübütleyin doldurýarlar. Ýadrodaky nuklonlar Pauliniň kadasyna boýun egýärler. Her bir derejä garşylykly spinleri bolan iki proton we iki neýtron düşýär. Ýadrodaky s-gabykda ($\ell = 0$) iki proton we iki neýtron bolup bilerler. Geliýniň ýadrosynyň (${}^4_2\text{He}$) gabygy tutuşlygyna doldurylandyr. Ýadronyň indiki p – gabygynda ($\ell = 1$) 6 proton we 6 neýtron ýerleşip bilerler. Haçanda hemme s- we p- gabyklar doly doldurylanda kislorodyň ýadrosy ${}^{16}_8\text{O}$ alynýar. Indiki ýadro orbita gabygy bolan d – gabykda ($\ell = 2$) 10 proton we 10 neýtron ýerleşýär. Hemme s-, p- we d-

Radioişjeňlik ýadronyň içki gurluşy bilen baglanyşyklydyr. Şonuň üçin, fiziki usullaryň hiç hilisi oňa täsir etmeýär. Ýöne, radioişjeň şöhlelenmäniň özi magnit meýdanynda üç bölege bölünýär. 1899-njy ýylda E. Rezerford şöhlelenmäniň magnit meýdanynda dürli zarýadly α - we β -bölejiklere bölünýändigini ýüze çykardy.

1900-nji ýylda P. Wilard şöhlelenmäniň üçünji, zarýadsyz bölejigini, ýagny γ -şöhlelenmäni açdy (6.1-nji çyzgy).



6.1-nji çyzgy

Tebigy radioişjen maddalar müňýyllyklaryň dowamynda energiýany üznüksiz söhlendirdirýärler. 1903-nji ýylda P. Kýuri we A. Labord 1 gram radiýniň 1 sagatda 563 Joul töweregi energiýany bölüp çykarýandygyny tejribede ýüze çykardylar.

Radioişjeň dargama statistikanyň kanunlaryna boýun egýän öz-özünden bolup geçýän hadysadyr. Onuň nazaryýeti

berildi. 1911-nji ýylda bolsa M. Kýurä ikinji Nobel baýragy (himiýadan) berildi. 1902-nji ýylda iňlis alymlary E. Rezerford we F. Soddi radioişjeňligiň, radioişjeň maddanyň atomlarynyň öz-özünden dargamagy bilen döreýändigini kesgitlediler. 1911 - nji ýylda Rezerford atomyň gurluşyny aýdyňlaşdyrandan soň, **radioişjeňligiň bir elementiň ýadrosynyň başga bir elementiň ýadrosyna öwürülmesidigi belli boldy.**

Tebigy radioişjeňlik Mendeleýewiň jedwelinde wismutdan ($^{209}_{83}\text{Bi}$) soň ýerleşýän himiki elementleriň atomlarynyň ýadrolarynda hem-de käbir ýeňil we orta agyrlýkly ýadrolarda

(^3_1H , $^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{87}_{37}\text{Rb}$, $^{115}_{49}\text{In}$, $^{138}_{57}\text{La}$,

$^{147}_{62}\text{Sm}$, $^{175}_{71}\text{Lu}$, $^{187}_{75}\text{Re}$) gözegçilik edilýär. Tebigy radioişjeň elementler az mukdarda suwda, howada, toprakda, ösümlikleriň we haýwanlaryň dokumalarynda, iýmit önümlerinde we adam bedeniniň düzüminde bardyr. Neýtronlaryň sanynyň protonlaryň sanyna bolan gatnaşygy (N/Z) massa sanynyň (A) artmagy bilen ulalýar. Ýadrolar neýtronlaryň we protonlaryň sanlarynyň diňe kesgitli gatnaşyklarynda durnuklydyrlar.

Ýadrodaky nuklonlaryň durnukly baglanyşygyna şu gatnaşyk laýyk gelýär:

$$\frac{N}{Z} \approx 1 + 0,015A^{2/3}, A < 250$$

XX asyryň ahyryna çenli, takmynan, 3000 atom ýadrolary açyldy. Olaryň aglaba köpüsi (~90%) radioişjeňdir. Protonlary we neýtronlary jübüt sanly ýadrolar örän durnuklydyrlar. Olar tebigatda köp gabat gelýärler.

gabyklar durşuna doldurylanda kalsiýniň ýadrosy $^{40}_{20}\text{Ca}$ alynýar.

“Jadyly” sanlar diýip atlandyrylýan 2,8,20,28,50,82,126 sanlara deň sanly protony ýa-da neýtrony bolan ýadrolar örän durnuklydyr we olara **jadyly ýadrolar** diýilýär. Protonlaryň we neýtronlaryň jadyly sanyny bilelikde saklaýan ýadrolara ikileýin jadyly ýadrolar diýilýär. Olaryň alty sanysy bellidir: ^4_2He (Z = 2, N = 2); $^{16}_8\text{O}$ (Z = 8, N = 8); $^{40}_{20}\text{Ca}$ (Z = 20, N = 20); $^{48}_{20}\text{Ca}$ (Z = 20, N = 28); $^{132}_{50}\text{Sn}$ (Z = 50, N = 82); $^{208}_{82}\text{Pb}$ (Z = 82, N = 126). Bu ýadrolar ägirt uly baglanyşyk energiýa eýedir we aýratyn durnuklydyrlar.

Jadyly ýadrolaryň ýokary durnuklylygy daşky gabygy doldurylan hem-de togalak simmetrikligi, himiki işjeň dälligi we şonuň bilen baglanyşykly has uly ionlaşma energiýasy bilen häsiýetlendirilýän inert gazlarynyň atomlaryny ýada salýar. Ýöne geliýden (^4_2He) başga inert gazlarynyň atomlarynyň zarýad sanlary (Z = 10, 18, 36, 54, 86) ýadrolar üçin jadyly sanlar bilen gabat gelmeýärler. α-bölejik diýip atlandyrylýan geliýniň ýadrosynyň (^4_2He) aýratyn durnuklylygy agyr ýadrolaryň radioişjeň dargamagynda ýüze çykýar. Geliýniň ýadrosy radioişjeň dargamada goýberilýän ýeke-täk düzüm bölejigidir.

Jadyly sanly protony bolan ýadrolariň zarýadlarynyň oýandyrylmadyk hallardaky paýlanyşy togalak görnüşlidir, ýagny olaryň elektrik kwadtrupol momentleri ýokdur.

Gabyklaýyn şekil ýadrolaryň spinleriniň, magnit momentlerini, atom ýadrolarynyň durnuklylygynyň dürlüligini we olaryň häsiýetleriniň üýtgemeginiň yzygider gaýtalanýandygyny düşündirmäge mümkinçilik berdi. Bu şekil ýeňil we orta agyrlýkly ýadrolaryň hem-de esasy

(oýandyrylmadyk) halda bolan agyr ýadrolaryň ýagdaýyny aýratyn gowy beýan edýär.

Atom ýadrolarynyň häsiýetleri hakynda soňraky tejribe maglumatlaryň toplanmagy bilen beýan edilen şekiller bilen düşündirip bolmaýan mysallar döräp başlady. Şonuň üçin damja we gabyklaýyn şekilleriň artykmaçlyklaryny özünde jemleýän **umumylaşdyrylan** şekil döredildi. Bu şekili daniýly fizikler Oge Bor, B. Motteson we amerikaly fizik J. Reýnuoter hödürlediler. Bu şekil boýunça ýadroda doldurylan gabyklaryň nuklonlaryndan emele gelen ýeterlik durnukly içki bölek bölýär. Bu içki bölege girmän galan daşky nuklonlar bölegiň meýdanynda hereket edýärler. Daşky nuklonlaryň täsiri astynda içki bölek öz görnüşini üýtgedip we hereket edip bilýär. Käbir ýadrolaryň uly elektrik kwadrupol momentleri olaryň daşky nuklonlary tarapyndan döredilýän içki bölegiň görnüşiniň güýçli üýtgemegi bilen düşündirilýär. Netijede, içki bölek özüniň togalak görnüşini ýitirip süýndürilen, ýapbaşyk ýa-da üç okly ellipsoid görnüşe eýe bolýar.

Umumylaşdyrylan şekili ýadro derejelerini bir bölejikli we toparlaýyn derejelere bölmäge hem-de derejeleriň energiýasyny, spini we jübütligini kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Bir bölejikli dereje daşky nuklonlaryň oýandyrylmagy bilen şertlenendir, toparlaýyn dereje bolsa içki bölegiň oýandyrylmagy bilen baglanyşykly aýlanma we yrgyldy hereketleri bilen baglanyşyklydyr. Bu şekil ýadrolaryň dargamagynyň we bölünmeginiň käbir aýratynlyklaryny düşündirmäge hem mümkinçilik berýär.

Atomlar ýaly ýadrolar hem köp oýandyrylan hala eýedirler. Güýçli oýandyrmada, atomdan tapawutlykda, ýadroda oýandyрма energiýasy hemme nuklonlaryň arasynda paýlanýar. Şonuň üçin köp sanly nuklonlary bolan ýadrolar üçin oýandyрма energiýa hallaryny statistik şekil bolan **fermi-gaz** şekili bilen beýan etmek bolar. Bu şekili 1936-1937-nji

ýyllarda rus alymlary Ý.I. Frenkel (1894-1952) we L.D. Landau (1908-1968) hödürlediler. Fermi-gaz şekili gabyklaýyn şekiliň ýönekeýleşdirilen görnüşidir. Onda nuklonlar uly göwrümiň içinde ýerleşýän hyýaly fermi-gaz hasaplanylýar. Fermi-gaz şekili güýçli oýandyrylan ýadrolaryň derejeleriniň arasyndaky geçişde γ -kwantlaryň goýberilmeginiň ähtimallyklarynyň arasyndaky gatnaşygy kanagatlanarly düşündirýär.

Garalyp geçilen şekiller biri-birini doldurýarlar. Olaryň her biri atom ýadrolarynyň başga şekilde ýaramaz düşündirilýän ýa-da düýbünden düşündirilmeýän häsiýetlerini beýan edýär.

2. RADIOIŞJEŇLIK

2.1. Radioişjeň şöhlemenme. Radioişjeň dargama kanuny

Sada bölejikleri goýbermek bilen bir atomy ýadrolarynyň başga atomyň ýadrolaryna öz-özünden öwürilmegine radioişjeňlik diýilýär. Şeýle öwürilişikler diňe durnuksyz ýadrolarda bolýar. Tebigy şertlerde bolýan ýadrolaryň radioişjeňligine **tebigy** radioişjeňlik, ýadro täsirleşmeleri netijesinde alnan ýadrolaryň radioişjeňligine bolsa **emeli** radioişjeňlik diýilýär. Bu iki radioişjeňligiň arasynda düýpli tapawut ýokdur. Olar birmeňzeş kanunlara boýun egýärler.

Tebigy radioişjeňligi 1896-njy ýylda fransuz fizigi Andri Bekkerel uran duzunyň sowuk halda ýagtylanma hadysasyny öwrenende açdy. Radioişjeňligi är-aýal Pýer Kýuri we Mariýa-Sklodowskaýa Kýuri hemme taraplaýyn öwrenip başlaýarlar. Olar uran magdanyndan poloniý (Po) we radiý (Ra) diýip atlandyrylan iki sany täze, has güýçli tebigy radioişjeň elementleri bölüp aldylar. Bu uly açyşlary üçin A. Bekkerele we är-aýal Kýurilere 1903-nji ýylda fizikadan Nobel baýragy

Pozitron golaýdaky atomyň elektrony bilen galtaşanda bu iki bölejik biri-birini ýok edip olaryň massasy 511keW energiýaly biri-birine garşylykly ugrukdyrylan iki sany γ -fotona öwrülýär. Bu fotonlar ýeňillik bilen adamyň bedeninden daşyna çykýarlar we pozitron tomografda bellige alynýarlar. Pozitron tomografiýa derňewinde radioizotoplar keseli anyklanylýan adamyň bedenine gan damaryndan ýa-da agyr boşlulyndangirizilýär. Pozitron dargama netijesinde emele delýän element bolsa radioisjeň dälir.

Radioisjeň maşgalalaryň başlangyç izotoplarynyň ýarymdargama döwrülerini Ýeriň ýaşayyş wagty bilen deňeşdirmeden toriýniň hemmesiniň diýen ýaly saklanandygy, $^{238}_{92}U$ uranyň az, $^{235}_{92}U$ uranyň bolsa köp böleginiň dargandygy görünýär. Şonuň üçin Ýeriň gabygynda toriý köpdür, $^{235}_{92}U$ uran bolsa $^{238}_{92}U$ urandan 140 esse azdyr. Neptuniýniň ýarymdargama döwrüniň Ýeriň ýaşayyş wagtyndan has kiçidigi sebäpli, onuň hemmesi diýen ýaly dargap gutarypdyr. Neptuniýniň maşgalasy nazary taýdan öňünden aýdyldy we izotoplaryň emeli alnyşynyň usullary kämilleşdirilenden soň, tejribe şertlerinde döredildi.

Radioisjeň maşgalalar ýadro fizikasynyň ösüşiniň başlangyç döwründe uly ähmiýete eýe boldy. Ol döwürde öwrenmegiň hemme usuly jedweldäki başdaky üç maşgala girýän izotoplaryň tebigy radioisjeňligi bilen bagly boldy.

6.2-nji jedwel

Radioisjeň maşgalanyň ady	Başlangyç ýadro	Massa sany, A	Başlangyç n san	Ahyrky n san	rymdargama döwrü T	Ahyrky durnukly ýadro	Dargamalaryň sany
Toriý maşgalasy	$^{232}_{90}Th$	$4n$	58	52	$1,4 \cdot 10^{10}$ ýyl	$^{208}_{82}Pb$	6 α -dargama, 4 β^- -dargama
Uran maşgalasy	$^{238}_{92}U$	$4n+2$	59	51	$4,5 \cdot 10^9$ ýyl	$^{206}_{82}Pb$	8 α -dargama, 6 β^- -dargama
Aktiniý maşgalasy	$^{235}_{92}U$	$4n+3$	58	51	$7,1 \cdot 10^8$ ýyl	$^{207}_{82}Pb$	7 α -dargama, 4 β^- -dargama
Neptuniý maşgalasy	$^{237}_{93}Np$	$4n+1$	59	52	$2,2 \cdot 10^6$ ýyl	$^{209}_{83}Bi$	7 α -dargama, 4 β^- -dargama

2.3. Radioisjen öwrülişikleriň görnüşleri

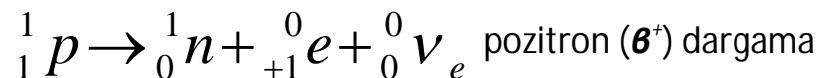
Alfa-dargama diýip, käbir himiki elementleriň ýadrolarynyň α - bölejikleri (geliýniň ýadrolaryny) goýbermegine aýdylýar. Alfa-dargama massa sany $A > 200$ we zaryad sany $Z > 82$ bolan agyr ýadrolara häsiýetlidir.

Ýadrodan α - bölejigiň çykmagy üçin ahtimal güýjüň böwedini ýeňip geçmeli. Dargamanyň hemişeligi (λ) α - bölejek üçin ahtimal güýjüň çukurynyň durulygy (D) bilen baglanyşyklydyr. Gönüburçly ahtimal güýjüň böwedi üçin

$$\lambda = Dn,$$

Bu ýerde $n = \frac{v}{2R}$ – wagt birliginde böwede urulýan α -bölejikleriň sany; R – ýadronyň radiusy, $2R$ – ahtimal güýjüň böwediniň ini, $v = \sqrt{2E / m_\alpha}$ - ýadrodaky α - bölejigiň tizligi, E we m_α - deňşililikde α - bölejigiň energiýasy we massasy.

Beta-dargama adalgasy bilen 3 hili ýadro öwrülişigini belleýärler, ýagny elektron (β^-) we pozitron (β^+) dargamalar hem-de elektron eýeleme (e - ýa-da K - eýeleme). Başdaky iki hili öwrülişikde ýadro elektron (pozitron) we elektron neýtrinosyny (garşyneýtrinosyny) goýberýär. Bu öwrülişik şu görnüşde bolup geçýär:



$${}^{238}_{92}U = ({}^{238}_{92}U + {}^{206}_{82}Pb) e^{-\lambda t}$$

Bu ýerde ${}^{238}_{92}U$ we ${}^{206}_{82}Pb$ bilen tokga mineralda berlen pursatdaky degişli izotoplaryň bar bolan mukdaryny belgileýärler. Bu ululyklary tejribede kesgitlemek bolýar. Uranyň ${}^{238}_{92}U$ izotopy üçin dargamanyň hemişeligi λ bellidir ($\lambda = \ln 2/T$). Bu ýerden mineralyň ýaşyny tapmak bolýar. Uran minerallarynyň iň gadymysynyň (${}^{238}_{92}U$) ýaşynyň $4,5 \cdot 10^9$ ýyla deňdigini hasaplamalar görkezýär. Ýeriň ýaşy hem bu mineralyň ýaşyna deň diýip hasap edilýär.

Rubidiýni özünde saklaýan mineralyň ýaşyny kesgitlemek üçin tebigy ${}^{87}_{37}Rb$ izotopyň β – dargama netijesinde stronsiýniň ${}^{87}_{38}Sr$ izotopynyň emele gelmegi ulanylýar:

$${}^{87}_{37}Rb = ({}^{87}_{37}Rb + {}^{87}_{38}Sr) e^{-\lambda t}$$

Bu ýerde λ – rubidiýniň dargama hemişeligi. Iň gadymy rubidiý mineralynyň ýaşynyň, takmynan, $3,4 \cdot 10^9$ ýyla deňdigi hasaplanylýdy.

Pozitron-emission tomografiýasy radioisjen izotoplar ulanylyp keseli anyklaýjy iň täze usuldyr. Bu usul keseliň irki döwüründe ýüze çykarmaga mümkinçilik berýär. Pozitron tomografiýasy belgilenen radioizotop maddalary adam bedeniniň içki agzalaryny düýpli derňemelikde ulanmaga mümkinçilik berdi. Belgilenen radioizotop hökmünde bölejikleri tizlendiriji enjam bolan siklotronlarda alynýan ${}^{11}C$, ${}^{13}N$, ${}^{15}O$ we ${}^{18}F$ izotoplar ulanylýar. Bu izotoplaryň ýarymdargama döwürleri kiçidir, ýagny deňşililikde 20,4, 10, 2,1 we 109 minuda deňdirler. Pozitron tomografiýasynda ulanylýan hemme radioizotoplar pozitronyň (β^+) goýberilmegi (emissiýasy) bilen dargaýarlar. Bu hadysada ýadronyň protonlarynyň biri pozitrony goýberip neýtrona öwrülýär.

ösmegi üçin kömürturşy gazyny (CO_2) özleşdirýärler. Iýmitlik ösümlik bilen birlikde radioişjeň uglerod ($^{14}_6\text{C}$) haýwanlaryň we adamlaryň bedenlerine düşýärler.

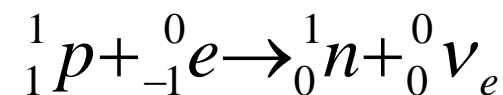
Beden öleninden soňra uglerodyň özleşdirilmesi bes edilýär. Ölen bedenleriň süňklerinde, agaçlaryň galyndylarynda $^{12}_6\text{C}$ we $^{14}_6\text{C}$ izotoplaryň garyndysy bolýar.

Ýöne $^{14}_6\text{C}$ izotopyň bar bolan mukdary radioişjeňligiň hasabyna kem-kemden azalýar, çünki öli galyndylar uglerody özleşdirmeyärler. Janly bedeniň süňklerindäki we gazuw işlerinde tapylyan süňklerdäki $^{12}_6\text{C}$ we $^{14}_6\text{C}$ izotoplaryň mukdarlarynyň gatnaşygyny deňeşdirip olaryň ýaşyny ýeterlik takyklyk bilen kesgitlep bolýar. Şuna meňzeşlikde ösümlik galyndylarynyň, mysal üçin, agajyň bölekleriniň, ondan ýasalan önümleriň we ýakylan agajyň (agaç kömrüniň) ýaşyny hem kesgitleýärler. Bu usul bilen 1000-75000 ýyl aralykdaky organiki galyndylaryň ýaşyny kesgitlemek bolýar. Radiouglerod usuly bilen Ýegipet mumiýalarynyň ýaşyny hem bilýärler. Tebigy radioişjeň maşgalalaryň (toriý, uran, aktiniý) iň soňky önümleriniň gurşunyň dürli izotoplarydygy subut edilenden soň, uran minerallarynyň ýaşyny kesgitlemäge mümkinçilik döredi. Mineral emele gelende onda $^{238}_{92}\text{U}$ uranyň N_0 ýadrosy bar diýip hasap edeliň. Mineralyň ýaşyna deň t wagtda mineralda uranyň N_t ýadrosy galýar. Şeýlelikde, uranyň $(N_0 - N_t)$ ýadrolaryna yzygiderli dargamalar netijesinde gurşunyň durnukly $^{206}_{82}\text{Pb}$ izotopynyň $(N_0 - N_t)$ ýadrolaryna öwürülýärler. Bu ýagdaý üçin radioişjeň dargamanyň aňlatmasyny (9.2) şeýle ýazyp bileris:

Bu ýerde 1_0n we 1_1p - neýtronyň we protonyň belgilenişi, $^0_{-1}e$ we $^0_{+1}e$ - elektronyň hem-de pozitronyň belgilenişi, $^0_0\nu_e$ we $^0_0\tilde{\nu}_e$ - elektron neýtrinosy we garşyneýtrinosy.

Pozitron elektronyň garşybölejigidir. Ol 1932-nji ýylyň ahyrynda Anderson we Milliken tarapyndan kosmos şöhlelerinde açyldy. **Neýtrino** we **garşyneýtrino** massasy nola golaý bolan zarýadsyz bölejiklerdir. Olaryň β - dargamada goýberilýändigini 1931-nji ýylda W. Pauli çaklady. Neýtrino we garşyneýtrino 1953-nji ýylda E. Konopinskiý we J. Mahmud tarapyndan girizilen aýratyn kwant sany bolan **lepton zarýady** (L) bilen tapawutlanýarlar. Neýtrino üçin $L=+1$, garşyneýtrino üçin bolsa $L=-1$.

e - eýelemde protonyň neýtrona öwürülmegi şu görnüşde bolup geçýär.



Bu ýerde proton neýtrona öwürülende atomyň K - gatlagyndaky bir elektrony “eýeleýär”. Bu dargamada ýadrodan bir neýtrino uçup çykýar. Berilliýniň radioişjeň ýadrosynyň (^7_4Be) litiýniň durnukly ýadrosyna öwürülmegi e - eýelemä mysal bolup biler. Elektron eýelemde häsiýetlendiriji rentgen şöhlelenmesi bolup geçýär. β - spektrler, α - spektrlerden tapawutlylykda üzniüksizdirler.

Gysga tolkunly elektromagnit gamma şöhlelenmesi atom ýadrosynyň E_n energiýaly oýandyrylan halyndan E_m energiýaly esasy ýa-da pes oýandyrylan hala geçende bolýar. γ - şöhlelenmesiniň tolkun uzynlygy örän kiçidir ($\lambda \leq 10^{-11}\text{m}$). Şonuň

üçin gamma şöhledenmesi madda we janly bedeniň öýjüklerine güýçli täsir edýär.

Gamma kwantynyň energiýasyny şeýle ýazyp bileris:

$$h\nu = E_n - E_m \approx 0,1MeW$$

Gamma şöhledenmesi gamma-defektoskopiýa we ýadro gamma rezonans (ÝGR) usullarynda giňden ulanylýar.

Radioişjeň α -, β - we γ - şöhleleriniň düzümi olaryň magnit meýdanyndaky gyşarmasy boýunça anyklanyldy. α – şöhleler oňyn zaryadlanan geliýniň ýadrolarynyň akymy bolany üçin magnit meýdanynda bir tarapa gyşarýarlar. β – şöhleler kinetik energiýasy 4-9 MeW ýetýän çalt elektronlaryň akymy bolany üçin beýleki tarapa gyşarýarlar. γ - şöhleler magnit meýdanynda hiç tarapa gyşarmaýarlar.

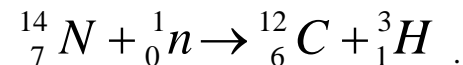
Esasy radioişjeň elementler uran, radiý we poloniý bolup durýarlar.

7.1-nji jedwelde radioişjeň öwürlmeleriniň esasy görnüşleri görkezilen. GÇ, EM we GŞ nyşanlar bilen degişlilikde güýçli, elektromagnit we gowşak özara täsirler belenildi.

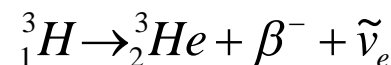
2.4. Gamma şöhledenmesiniň rezonans siňmesi

Ýadrolar hem atomlar ýaly, bölekleyin energiya spektrine eýedirler. Iň kiçi energiýaly hal esasy, galanlary bolsa oýandyrylan hal bolup durýar. Ýöne, diňe durnukly ýadronyň esasy haly energiýanyň takyk kesgitli bahasyna eýedir. Ýadronyň hemme oýandyrylan hallary diňe kesgitsizlikler baglanyşygy bilen kesgitlenýän $\Delta E \approx \hbar / \Delta t$ ululyga çenli takyklykly energiýanyň bahasyna eýedirler. Bu ýerde Δt – ýadronyň oýandyrylan haldaky ýaşayyş wagty. Durnukly ýadronyň esasy haly üçin $\Delta t = \infty$ we $\Delta E = 0$. Δt ululyk näçe kiçi bolsa oýandyrylan halyň energiýasynyň ululygynyň (ΔE) kesgitsizligi şonça uly bolýar.

Howa gurşawynyň kosmos şöhleleri bilen urulmagy netijesinde onda radioişjeň tritiý (3_1H) emele gelýär. Tritiý neýtronlaryň azotyň ýadrolary bilen çaknyşanda şu ýadro täsirleşmesinde döreýär:



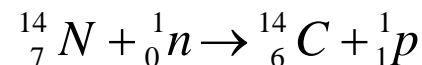
Ýarymdargama döwri 12,4 ýyl bolan tritiý bolsa β -dargama netijesinde geliýniň durnukly izotopyna (3_2He) dargaýar:



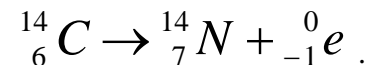
Howa gurşawynda döreýän tritiý kislorod bilen birleşip aşa agyr suwy (T_2O) emele getirýär. Şonuň üçin ýagyş suwunda örän ujypsyz mukdarda (10^{-16} % çemesi) aşa agyr suw gabat gelýär. Şonuň üçin Ýer togalagynyň dürli ýerlerinde barlag üçin alnan suwda radioişjeň 3_1H we durnukly 1_1H izotoplaryň göräleýin mukdaryny ölçäp, bu suwuň haçan ýagyş görnüşinde ýagandygyny kesgitlep bolýar.

Neýtronlaryň täsiri astynda geçýän täsirleşmeleriň biri biologlar, geologlar we arheologlar üçin gyzyklydyr. Ol janly bedenleriň galyndylarynyň ýaşyny ýeterlik takyk kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Kosmos şöhleleriniň täsiri astynda Ýeriň howa gurşawynda şu täsirleşme bolup geçýär:



Alnan uglerodyň izotopy ${}^{14}_6C$ adaty izotop ${}^{12}_6C$ ýaly janly beden tarapyndan özleşdirilýär. Ýöne ${}^{14}_6C$ ýadro durnuksyzdyr ýagny β - radioişjeňdir:



Radioişjeň uglerodyň ýarymdargama döwri 5720 ýyla deňdir. Ösümlikler howadan uglerody siňdirýärler, çünki olar özleriniň

7.1.-nji jedwelde biologiýada we oba hojalygynda ulanylýan käbir emeli alnan radioişjeň izotoplaryň häsiýetnamalary getirilen. Bu belgili atomlar bolup durýan izotoplaryň kömegi bilen oba hojalyk ösümlikleriniň we haýwanlaryň iýmitleniş hadysalarynyň gidişi, mör-möjekleriň göçmegi derňelýär. Ösümlikleriň nesil häsiýetlerini (tiz ýetijiligini, sowuga, kesele jydamllylygyny we şuna meňzeşleri) gowulandyrmak üçin oba hojalyk ekinleriň tohumlaryny we ösümlikleriň özlerini radioişjeň izotoplaryň (adatyça, kiçi ýarymdargama döwürli) kömegi bilen az mukdarda şöhlelendirýärler.

7.1 - nji jedwel

<i>Element</i>	<i>Izotop</i>	<i>Dargamanyň görnüşi</i>	<i>Ýarymdargama döwri</i>
<i>Uglerod</i>	$^{14}_6\text{C}$	β^-	5730 ýyl
<i>Azot</i>	$^{13}_7\text{N}$	β^+	9,9 minut
<i>Kislorod</i>	$^{15}_8\text{O}$	β^+	2,1 minut
<i>Natriý</i>	$^{22}_{11}\text{Na}$	β^-, γ	2,6 ýyl
<i>Fosfor</i>	$^{32}_{15}\text{P}$	β^-	14,3 gün
<i>Kükürt</i>	$^{35}_{16}\text{S}$	β^-	87,1 gün
<i>Kaliý</i>	$^{42}_{19}\text{K}$	β^-, γ	12,4 sagat
<i>Kalsiý</i>	$^{45}_{20}\text{Ca}$	β^-	152 gün
<i>Marganes</i>	$^{56}_{25}\text{Mn}$	β^-, γ	2,6 sagat
<i>Demir</i>	$^{59}_{26}\text{Fe}$	β^-, γ	46,3 gün
<i>Kobalt</i>	$^{60}_{27}\text{Co}$	β^-, γ	5,3 ýyl
<i>Sink</i>	$^{65}_{30}\text{Zn}$	β^+, γ	250 gün
<i>Myşýak</i>	$^{76}_{33}\text{As}$	β^-, γ	26,8 sagat
<i>Ýod</i>	$^{131}_{53}\text{I}$	β^-, γ	8 gün

Mysal üçin, iridiýniň ýadrosy ($^{191}_{77}\text{Ir}$) $E = 129 \text{ keV}$ energiýaly oýandyrylan hala eýedir. Esasy hala geçip, bu ýadro γ – kwanty goýberýär. Eger iridiýniň ýarymdargama döwri $T = 10^{-10} \text{ sek}$ Δt wagta deň diýip kabul etsek, onda kesgitsizlikler baglanyşygyndan ΔE ululygyny, takmynan, $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$ deňdigini alarys. Ýadronyň oýandyrylan energiýa hallarynyň ýaşaaýş wagtynyň çäklidigi, ýadronyň oýandyrylan haldan esasy hala geçip, monohromatik däl γ – şöhlelenmesine getirýär. Bu monohromatik däl γ – şöhlelenmesiniň çyzygynyň tebigy ini diýilýär. Oýandyrylan halyň energiýasynyň ululygynyň nätakyklygyna (ΔE) bolsa energiýa derejesiniň tebigy ini diýilýär we G harpy bilen bellenýär. Ýokardaky mysalda $G = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$, bu bolsa E energiýanyň örän kiçi bölegini düzýär, ýagny $G/E = 5 \cdot 10^{-11}$. Ýadro fizikasynyň örän wajyp meseleleriniň biri energiýanyň örän kiçi (G bilen deňeşdirerli) üýtgemegini ölçemegini usullaryny gözlemek bolup durdy. Bu bolsa ýadrolardaky hallaryň energiýasyny örän uly göräleýin takyklyk (G/E) bilen ölçemäge mümkinçilik bererdi.

7.1-nji jedwel

Radioisjeň öwrülišikleriň görnüşi	Ýadronyň zaryadynyň üýtgemegi	Massa sanynyň üýtgemegi	Radioisjeň öwrülišikleriň häsiýeti
α – dargama	Z-2	A-4	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$
β^- – öwrülišikler:	Z+1	A	—
β^- - dargama	Z-1	A	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e + {}_0^0 \tilde{\nu}_e$
β^+ - dargama	Z+1	A	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu_e$
Elektron eýeleme	Z-1	A	${}_Z^A X + {}_{-1}^0 e \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_0^0 \nu_e$
γ – şöhlenme	0	0	${}_Z^A X^* \rightarrow {}_Z^A X + \gamma$
Öz-özünden bölünme	$Z - \frac{1}{2} Z$	$A - \frac{1}{2} A$	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z'}^{A'} Y + {}_{Z-Z'}^{A-A'} \tilde{Y}$
Proton radioisjeňligi	Z-1	A-1	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^{A-1} Y + {}_1^1 H$
Iki proton radioisjeňligi	Z-2	A-2	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-2} Y + {}_1^1 H + {}_1^1 H$

γ – şöhesiniň ýadrolar tarapyndan rezonans siňdirilmesi energiýanyň örän kiçi üýtgemesini ölçemegiň usuly bolup durýar. Eger ýadro, haýsy hem bolsa bir oýandyrylan we esasy hallaryň energiýalarynyň tapawudyna deň kwantyň energiýasy ($h\nu$) ýaly, ν ýygylkly γ – kwantlar bilen şöhlendirilse, onda γ – şöhleleriniň rezonans siňmesi bolýar. Şonda ýadro, berlen

Belgili atomlaryň kömegi bilen geçirilen has görnükli derňewleriň biri bedenlerdäki madda alşygyny derňemekdir. Uly bolmadyk wagtda bedeniň doly diýen ýaly täzelenmäge sezewar bolýandygy subut edildi. Ony düzýän atomlar täzeleri bilen çalşyrylýarlar. Ganyň izotop barlaglarynyň görkezişine görä diňe demir bu düzgüne boýun egmeýär. Demir gyzyl gan togalajyklarynyň gemoglobiniň düzümine girýär. Iýmite demriň radioisjeň atomlary (${}_{26}^{57} Fe$) girizilende, olaryň gana galapyn barmaýandygy ýüze çykaryldy. Diňe bedende demriň ätiýaçlygy gutaranda beden ony özleşdirip başlaýar.

Käbir maddalar bedeniň kesgitli ýerlerinde seçijilik bilen çökyärler. Mysal üçin, ýod böwreklerde we galkan görnüşli mäsde çökyär. Adamyň ganyna ýarymdargama döwri 8 gün bolan radioisjeň ýoduň ${}_{53}^{131} I$ kesgitli mukdaryny girizip, böwregiň ýa-da galkan görnüşli mäsini işleýşini derňemek bolýar. Gana az mukdarda girizilen ýarymdargama döwri 14,8 sagat bolan radioisjeň natriý ${}_{11}^{24} Na$ gan aýlanyşyny derňemek üçin ulanylýar. Iýmit siňdiriş, dem alyş agzalaryna we derä täsir etmek üçin özünde ýarymdargama döwri 3,8 gün bolan radioisjeň radon ${}_{86}^{222} Rn$ saklaýan mineral suwlar we onuň önümleri ulanylýar. Ýurdumyzyň Arçman şypahanasynda deri kesellerini, iýmit siňdiriş we dem alyş agzalaryny bejermek üçin düzüminde radon we beýleki elementler bolan mineral suw ulanylýar.

Radioisjeň şöhlenmeler howply çiş kesellerini bejermekde hem ulanylýar. Bu maksat üçin kobalt (${}_{27}^{60} Co$) topy diýip atlandyrylýan ýörite gurluşlaryň goýberýän γ – şöhlenmesini ýa-da tizlendirijilerde tizlendirilen protonlaryň ýa-da agyr ýadrolaryň çugdamlanan desselerini ulanýarlar. Häzirki wagtda keseli anyklamak hem-de iç kesellerini öwrenmek we bejermek maksatlary üçin ýörite tizlendirijiler gurulýar.

–fotonlary goýberýärler. Bu bolsa ol ýa-da beýleki ylmy ýa-da amaly meseläni çözmek üçin has amatly radioişjeň maddany saýlap almaga mümkinçilik berýär.

Radioişjeň maddalar tarapyndan goýberilýän her hili şöhlelenmeleri, hem-de tizlendirijileriň kömegi bilen alynýan elektronlaryň, pozitronlaryň, protonlaryň we has agyr ýadrolaryň desselerini peýdalanmaklyk ýadro fizikasyny ulanmagyň möhüm ugry bolup durýar.

Radioişjeň şöhlelenmeler senagatda giň ulanylyşa eýe boldular. Şöhlelenmäniň siňme derejesiniň maddanyň siňdiriji gatlagynyň galyňlygyna we onuň dykzlygyna baglylygyna esaslanan birnäçe abzallar guruldy. Bu esasy galyňlyk, dykzlyk, suwuklygyň derejesini ölçeýji gurallar, önümçilikde şikesleriň ýoklugyny barlaýan enjamlar (defektoskoplar) we başgalar döredildi. Derňelýän maddanyň dykzlygyna we ölçenilýän gatlagyň galyňlygyna bagly γ – şöhlelenme (metalyň galyň gatlagy üçin) ýa-da β – şöhlelenme (ýukajyk madda, boýag, plastmassa we başgalar üçin) ulanylýar. Radioişjeň şöhlelenmeler maddanyň fiziki we himiki häsiýetlerini (gatlygyny, portlugyny we başgalary) üýtgetmek üçin hem ulanylýar. Şeýle-de, bu şöhlelenmeler himiki täsirleşmeleri çaltlandyrmak üçin ulanylýar. Radioişjeň şöhlelenmeler molekulany bozup, maddada himiki has işjeň erkin radikallary döredip bilýär.

Radioişjeň izotoplar **belgili atomlaryň** ornuny tutýar. Özüniň dargama döwründe şöhlelenýändigini üçin olary şol bir maddanyň köp atomlarynyň içinde tapawutlandyryp bolýar. Bu usul ilkinji gezek tebigy radioişjeň izotoplar ulanylyp, 1913-nji ýylda Wenger himigi G. Heweşi nemes fizigi F. Panet bilen bilelikde himiki we biologiki hadysalary derňemek üçin peýdalanyldy. Radioişjeň izotoplar eredilen metal garyndysyny (splawy) derňemek üçin aralaşmanyň we janly bedenlerdäki maddanyň hereketiniň tizligini kesgitlemek üçin ulanylýar.

oýandyrylan energiýa halyndan esasy hala geçende şöhlelenýän γ –kwantyňky ýaly ýygyllykly, γ – kwanty siňdirýär.

Ýöne γ – şöhleleriň ýadrolar tarapyndan rezonans siňdirilmesini amala aşyrmaga şöhlelenme we siňdirme çyzyklarynyň has giňligi kynçylyk döredýär. Bu kynçylyk yzyna gaýtarma hadysasy, ýagny fotony şöhlelendirende we siňdirende ýadronyň gaýtarma kinetik energiýa (E_0) eýe bolmagy bilen baglanyşyklydyr. Şonuň üçin $E_\gamma = E$ deňlik (E - oýandyrylan energiýasy) E_0 ululyga bozulýar. Ýadronyň oýandyrylan haldan energiýasy nola deň diýip kabul edilen esasy hala geçende şöhlelenýän γ – kwantyň energiýasy şeýle kesgitlenýär:

$$E_\gamma = E - E_0$$

Ýadro oýandyrylanda we onuň esasy haldan E energiýaly oýandyrylan hala geçende bolsa γ – kwant şu energiýa eýe bolmalydyr:

$$E'_\gamma = E + E_0,$$

bu ýerde $E_0 = \gamma$ kwantyň siňdirýän ýadro berýän gaýtarma energiýasy.

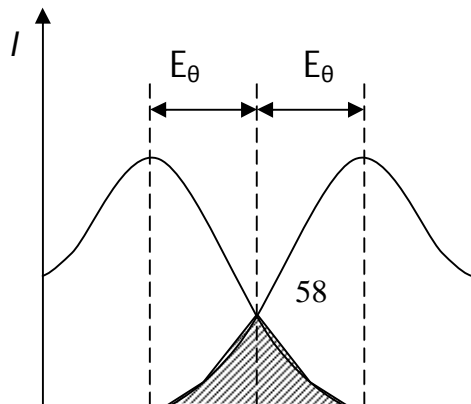
Şeýlelikde, şöhlelenme we siňdirme çyzyklarynyň aňryçäk bahalaryndaky ýygyllyklary biri-birine görä $2E_0$ ululyga süýşendir. Bu süýşmäni $h\Delta\nu=2E_0$ görnüşde aňladyp bolýar. Impulsyň saklanmak kanunyna laýyklykda şöhlelenme we siňme ýagdaýlarynda γ - kwantyň we ýadronyň impulslary deňdirler. Onda

$$E_0 = \frac{P_\theta^2}{2m_\theta} = \frac{P_\gamma^2}{2m_\theta} = \frac{E_\gamma^2}{2m_\theta c^2} \approx \frac{E^2}{2m_\theta c^2}, \quad (7.2)$$

bu ýerde m_θ – ýadronyň massasy.

Rezonans siňme erkin ýadrolarda gözegçilik edilmeyär. Mysal üçin, oýandyrylan halyň energiýasy $E=129$ eW bolan iridiýniň ýadrosy üçin 9.9-njy deňleme boýunça hasaplamalardan $E_0 = 0,5$ eW şöhlelenme we siňdirme

çyzyklarynyň aňryçäk bahalary $\Delta v = 2E_\theta / h$ ululyga süýşendir. Bu ýerden $h\Delta v = 0,1 \text{ eV}$ ululygyň energiýa derejesiniň tebigy ininden ($G = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$) has uludygy gelip çykyar. 9.3-nji çyzgyda $T = 300 \text{ K}$ temperaturada iridiýiniň ýadrosynyň γ – kwantlary şöhlendirmeginiň we siňdirmeginiň çyzyklarynyň görnüşi we göräleýin ýerleşşi şekillendirilen. Çyzgydan görnüşi ýaly, diňe şöhlelenme we siňdirme çyzyklarynyň basyrylýan çäginde az mukdardaky γ – kwantlaryň rezonans siňdirilmesiniň we şöhlelenmesiniň bolmagy mümkindir. Bu ýerden rezonans siňmesiniň amala aşyrylmagy üçin şöhlelenme we siňdirme çyzyklarynyň ýeterlik derejede basyrylmagy zerurdyr, ýagny $G \geq h\Delta v$ şert ýerine ýetmelidir. Optiki rezonans siňme üçin bu şert mydama ýerine ýetýär. Optiki çäkde $h\Delta v$ örän kiçidir, sebäbi atomlaryň elektron gabyklary tarapyndan goýberilýän fotonlaryň energiýasy (atomyň oýandyрма energiýasyna E deň bolan) bir ýa-da birnäçe elektronwoltdyr. Iň ýeňil atom bolan wodorod üçin $h\Delta v \approx 10^{-9} \text{ eV}$ deňdir. Şu sebäpden spektriň optiki çäginde atomlaryň ýagtylyk fotonlarynyň rezonans siňdirmesi ýeňil gözegçilik edilýär.



diýilýär. Bu usul bilen ýadro derejeleriniň aşa inçe zeyýeman bölünmesi ölçenildi, oýandyrylan hallardaky ýadrolaryň radiusy kesgitlenildi we başgalar. Gamma – kwantlaryň rezonans siňmesini derňändigini we öz adyny göterýän hadysany açandygy üçin Mýossbauere 1961-nji ýylda Nobel baýragy berildi.

2.5. Radioişjeň izotoplaryň ulanylyşy

Häzirki wagtda ylymda we önümçilikde dürli himiki elementleriň radioişjeň izotoplary has giňden ulanylyp başlandy.

Ýadro täsirleşmeleriniň kömegi bilen tebigatda diňe durnukly halda gabat gelýän hemme himiki elementleriň radioişjeň izotoplaryny almak bolýar. Tehnesiý ($_{43}\text{Tc}$), prometiý ($_{61}\text{Pm}$), astat ($_{85}\text{At}$) we fransiý ($_{87}\text{Fr}$) elementleriniň düýbünden durnukly izotoplary ýokdur. Şonuň üçin olar ilkinji gezek emeli ýagdaýda alyndylar. Tehnesiýniň ýarymdargama döwri million ýyl töweregidir.

Ýadro fizikasynyň ösüşiniň başlangyç döwründe tebigy radioişjeň maddalar bolan uran, radiý, poloniý we radon ulanyldy. Häzirki wagtda her dürli häsiýetli radioişjeň materiallary öndürmeklik ýola goýuldy. Bu bolsa radioişjeň şöhlelenmäni lukmançylykda, tehnikada we ylymda (himiýada, biologiýada, fizikada) ulanmaklygyň dürli meselelerini çözmäge mümkinçilik berýär.

Radioişjeň materiallary almagyň esasy usuly olary ýokary energiýaly bölejikler bilen urmakdyr. Bu maksat üçin protonlaryň ýa-da elektronlaryň tizlendirijilerde tizlendirilen desseleri, ýa-da atom reaktorlarynda neýtronlaryň desseleri ulanylýar. Şeýlelikde, alynýan radioişjeň maddalar dürli ýarymdargama döwre eýedir we her dürli energiýaly bölejikleri (α – bölejikleri, elektronlary, pozitronlary, neýtronlary) ýa-da γ

aýdylan spektr çyzyklarynyň grawitasiýa süýşmesini ýüze çykarmaga mümkinçilik berdi. Bu nazaryýet boýunça Ýeriň agyrlýk meýdanynda dik ýaýraýan foton h aralygy geçende öz energiýasyny şu ululyga üýtgedýär:

$$\Delta E = \frac{E}{c^2} gh \quad (7.3)$$

Bu bolsa fotonyň ýygylýgynyň üýtgemeginde ýüze çykýar. Aşak gaçanda fotonyň ýygylýgy ulalýar (melewşe süýşme), ýokaryk galanda bolsa kiçelýär (gyzyl süýşme). Paund we Rebke 1959-njy ýylda Garward uniwersitetiniň minarasynda ($h=22,6$ m) degişli tejribäni geçirdiler. Olar şöhlendiriji we siňdiriji hökmünde gelijik temperaturasyna çenli sowadylan demriň izotopyndan ($^{59}_{26}\text{Fe}$) nusgalar ulandylar. Bu izotopyň goýberýän γ -kwantynyň energiýasy $\varepsilon = 14$ keW deňdir. Onda fotonyň energiýasynyň göräleýin we absolýut üýtgemegini 7.3-nji aňlatma laýyklykda hasaplar bileris:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{G}{E} = \frac{gh}{c^2} \approx 2,46 \cdot 10^{-15}$$

$$\Delta E \approx 14000 \cdot 2,46 \cdot 10^{-15} \approx 3,4 \cdot 10^{-11} \text{ eW}$$

ΔE ululyk çyzygyň tebigy ininden, takmynan, 300 esse kiçidir. Doppler süýşmesi esasynda energiýanyň bu üýtgemegini sazlamaklyk üçin tizligi

$v \approx c\Delta E/E \approx 0,75$ mkm/s bolan çeşme gerek bolýar. Grawitasiýa süýşmesini ygtybarly ýüze çykarmak üçin energiýanyň üýtgemegini, takmynan, 10^{-11} eW ýalňyşlyk bilen ölçemeli. Şeýle-de bolsa bu hadysa ynamly ýüze çykaryldy. Bu tejribe 1965-nji ýylda Paund we Snaýder tarapyndan kämilleşdirilip täzeden geçirildi.

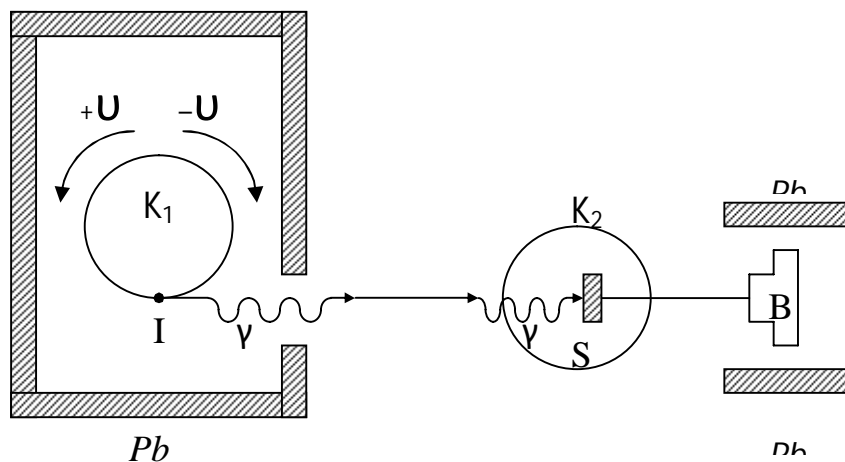
Mýossbaueriň hadysasyna häzirki wagtda **Mýossbauer spektroskopiýasy** ýa-da **ýadro gamma rezonansy** (ÝGR) hem

1958-nji ýylda nemes fizigi Rudolf Lýudwig Mýossbauer kesgitli şertlerde γ – **kwantlaryň rezonans siňdirilmesiniň** mümkindigini tejribede görkezdi. Onuň üçin erkin ýadrolardan kristal gözeneklerde ýerleşýän baglanyşykly ýadrolara geçmeli. Bu ýerde hem köplenç ýagdaýlarda γ – kwantlar, ýokarda beýan edilişi ýaly, aýratyn ýadrolar tarapyndan şöhlendirilýärler we siňdirilýärler. Olar üçin rezonans siňme gözegçilik edilmeyär. Ýöne käbir ýagdaýlarda, ýadrolaryň kristal gözeneklerde biri-biri bilen baglanyşykly bolany üçin, toparlaýyn hadysalar hem bolup geçýär. Bu ýagdaýda yzyna gaýtarma energiýasy we impulsy bir ýadro däl-de, tutuş kristala ýa-da iň bolmanda atomlaryň uly toparyna ($N \sim 10^8$) berilýär. Kristalyň massasynyň aýratyn ýadronyň massasyndan has uly bolany üçin, 9.9-njy aňlatma laýyklykda, onuň yzyna gaýtarma hadysasy sebäpli energiýany ýitirmegi ujypsyz azdyr. Şonuň üçin γ -kwantlaryň şöhlelenmeginde we siňmeginde energiýanyň ýitgisi bolmaýar we $G \geq h\Delta v$ şert ýerine ýetýär.

γ – **kwantlaryň energiýany yzyna gaýtarmasyz rezonans siňmesine (şöhlelenmesine) Mýossbaueriň hadysasy diýilýär.** Bu ýagdaýda γ - şöhlelenmesiniň şöhlelenme we siňdirmе çyzyklary gabat gelýärler we olaryň örän kiçi ini bardyr.

7.2 –nji çyzgyda Mýossbaueriň tejribesiniň çyzgysy şekillendirilen. Bu ýerde I-iridiýniň ($^{191}_{77}\text{Ir}$) çeşmesi, S – iridiýni siňdiriji madda, B – gamma – kwantlary belleýji abzal.

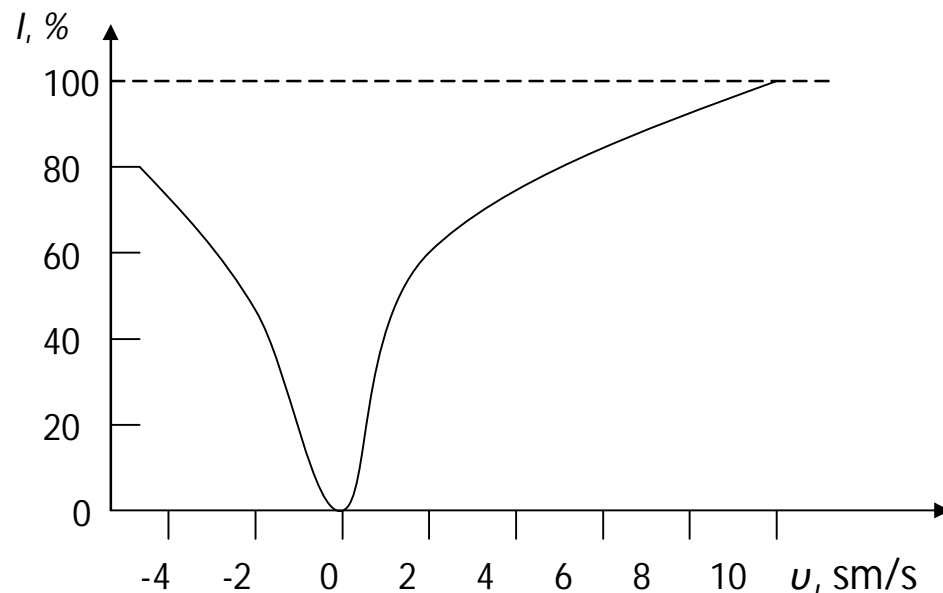
Çeşme (I) we siňdiriji (S) suwuk azotly K_1 we K_2 kriostatda ýerleşdirilen. Olarda 88 K temperatura saklanylýar. Çeşme we siňdiriji sowadylanda Doppleriň şöhlelenme we siňdirme çyzyklarynyň ini we degişlilikde, olaryň basyrylýan çägi kiçelýär. Iridiýli çeşmeli K_1 kriostat bir ýa--da beýleki tarapa aýlanyp bilýär. Netijede, I çeşme käbir v tizlik bilen siňdirijä golaýlaşyp ýa-da ondan daşlaşyp bilýär.



7.2-nji çyzgy

Tejribede sanajy abzalyň sanaw tizliginiň γ -şöhlelenmäniň çeşmesiniň tizligine baglanyşygy ölçenildi. Degişli tejribe egrisi 9.5 –nji çyzgyda görkezilen. Kese okda çeşmäniň siňdirijä görä tizligi (v), dik okda bolsa siňdirijiden geçen γ -şöhlelenmesiniň intensiwligi (I) goýulan. Eger çeşmäniň tizligi ýeterlik uly bolsa, onda şöhlelenme çyzygy Doppleriň hadysasy esasynda süýşýär we **rezonans siňdirilme** bolmaýar. Tizlik kiçelende doppler süýşmesi kiçelýär we şöhlelenme çyzygy siňme çyzygyna golaýlaşyp başlaýar. Haçanda v tizlik nola deň bolanda şöhlelenme we siňdirilme çyzyklary gabat gelýärler we güýçli rezonans siňdirilmä gözegçilik edilýär. Netijede, 7.2 –nji çyzgyda görkezilişi ýaly,

sanaw tizligi duýdansyz pese düşýär. Şeýlelikde, γ – şöhlelenmesiniň siňdirijä görä tizligini endigan üýtgedip, Mýossbaueriň çyzgsynyň ýagdaýyny we ýarymbeýiklikde kesgitlenýän inini ölçäp bolýar.



7.3-nji çyzgy

Mýossbaueriň hadysasy iridiýden başga-da durnukly izotoplar bolan demirde ($^{57}_{26}\text{Fe}$), sinkde ($^{67}_{30}\text{Zn}$), gursunda ($^{119}_{50}\text{Sn}$), tantalda ($^{181}_{73}\text{Ta}$) hem ýüze çykardyldy.

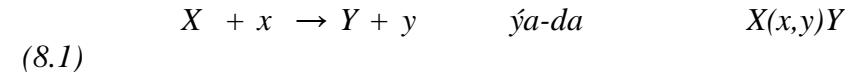
Mýossbaueriň hadysasy energiýanyň ujypsyz üýtgemesini ölçemäge mümkinçilik berýär. Bu usulyň takyklygynyň ölçegi bolup G/E ululyk hyzmat edýär. Seredip geçen mysalymyzda bu ululyk $5 \cdot 10^{-11}$ deňdir. Beýleki ýagdaýlarda göräleýin takyklyk $10^{-15} - 10^{-17}$ çenli baryp ýetýär. Bu bolsa Eýnşteýniň göräleýin nazaryýetinde önünden

3. ÝADRO TÄSIRLEŞMELERI

3.1. Ýadro täsirleşmeleriniň umumy kanunalaýyklyklary

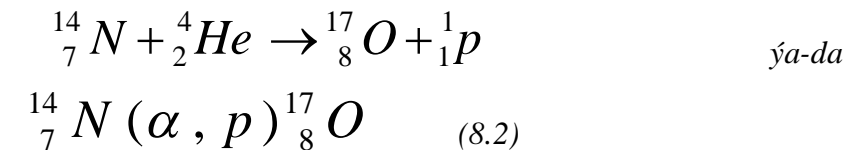
Ýadro täsirleşmeleri diýip ýadrolaryň biri-biri bilen ýa-da sada bölejikler bilen özara täsiri netijesinde bolýan atom ýadrolarynyň öwrülişiklerine aýdylýar.

Köplenç, ýadro täsirleşmelerine iki ýadro we iki bölejik gatnaşýar. Ýadro täsirleşmeleri belgileýin şeýle ýazylýar:



Bu ýerde X we Y täsirleşmedäki başdaky we ahyrky ýadrolar, x we y başdaky we ahyrky bölejikler.

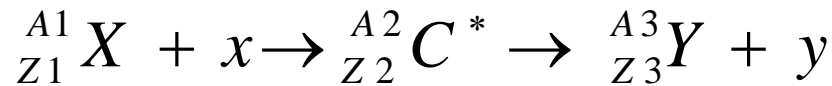
Ilkinji ýadro täsirleşmesini 1919-njy ýylda E. Rezerford amala aşyrdy. Ol azotyň atomynyň ýadrosy ($^{14}_7\text{N}$) α -bölejikler (^4_2He) bilen urlanda kislorodyň $^{17}_8\text{O}$ ýadrosynyň we bir protonyň ^1_1p (^1_1H) alynýandygyna gözegçilik etdi:



Başdaky x bölejigiň X nyşana ýadrosy bilen özara täsiriniň häsiýetine bagly ýadro täsirleşmesi bir we iki tapgyrda geçýär. Ýadro täsirleşmesi iki tapgyrda geçende düzüm ýadrosy döreýär. Birinji tapgyr başdaky ýadronyň (X) x bölejigi siňdirip aralyk düzüm ýadrony emele getirmegidir. Başdaky bölejigiň energiýasy düzüm ýadronyň nuklonlarynyň arasynda täzeden paýlanýar. Netijede, düzüm ýadrosy oýandyrylan halda bolýar. Onuň ýaşayyş wagty 10^{-14} - 10^{-12}

sekunt aralykda bolýar. Ikinji tapgyrda düzüim ýadrosy y bölejigi goýberip, Y ýadro dargaýar.

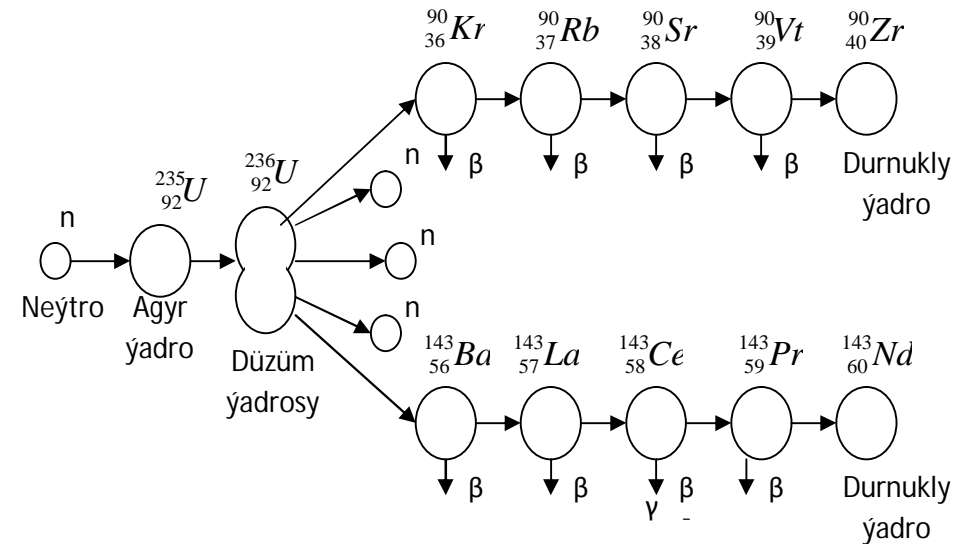
1MeW energiýaly nuklona, takmynan, 10^7 m/s tizlik laýyk gelýär. Şeýle energiýaly nuklonyň ýadroiň diametrine deň bolan aralygy ($\sim 10^{-14}$ m) geçýän wagtyna ýadro wagty ýa-da aralygyň ýadro wagty diýilýär. Bu wag, takmynan, $10^{-14} / 10^7 = 10^{-21}$ sekunda deňdir. Düzüim ýadrosynyň ortaça ýaşayyş wagtynyň ($10^{-14} - 10^{-12}$ s) aralygyň ýadro wagtyndan has uludygy sebäpli, düzüim ýadrosynyň dargamagy ýadro täsirleşmesiniň birinji döwrüne, ýagny başdaky x bölejigiň eýelenmegine bagly däl. Düzüim ýadrosyň emele gelmegi bilen bolýan ýadro täsirleşmesini şeýle ýazyp bileris:



bu ýerde ${}_{Z2}^{A2}C^*$ - oýandyrylan haldaky düzüim ýadrosynyň belgisi.

Şol bir ýadro dürli ýollar bilen dargap biler. Ondan başga-da bu dargamalaryň häsiýeti düzüim ýadrosynyň döremeginiň usulyna bagly däl. Ýadro täsirleşmesiniň geçişiniň mümkin bolan görnüşlerine onuň **kanallary** (ýollary) diýilýär. Täsirleşmäniň başlangyç döwrüne **giriş kanaly**, ahyrky döwrüne bolsa **çykyş kanaly** diýilýär.

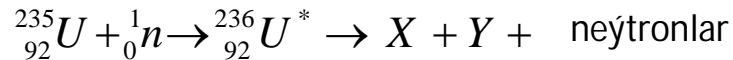
Haçanda ýadro täsirleşmesinde $x = y$ bolsa, onda ýadro tarapyndan böleginiň pytramagy bolup geçýär. Eger x bölejigiň energiýasy y bölejigiň energiýasyna deň bolsa, ýagny $E_x = E_y$, onda pytrama maýyşgak hasaplanýar. $E_x \neq E_y$ bolanda pytrama maýyşgak däl hasaplanýar. Eger x we y



8.2-nji çyzgy

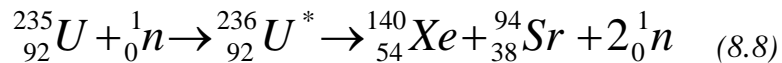
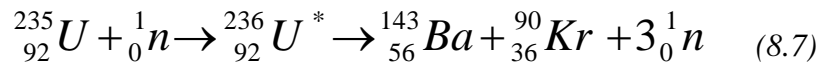
Alnan in soňky önümler bolan sirkoniý ${}_{40}^{90}Zr$ we neodim ${}_{60}^{143}Nd$ durnuklydyrlar. Bu bölünme ýadro täsirleşmesinde we soňraky bolýan radioişjeň dargamada 188MeW energiýa bölünip çykýar. Onuň düzüjileri 8.2-nji jedwelde görkezilýär. Bölünip çykýan energiýanyň 85% töweregi (160MeW) bölünmäniň önümleriniň kinetik energiýasy görnüşinde bölünip çykýar. Energiýanyň galan 15%-i (28MeW) bolsa bölünme önümleriniň radioişjeň şöhlelenmede we bölünmede döreýän neýtronlaryň kinetik energiýasynyň paýyna düşýär.

Uranyň bölünme täsirleşmesini şu deňleme bilen aňlatmak bolar:



Bu ýerde ${}_0^1\text{n}$ - haýal neýtron, ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ - uranyň örän durnuksyz izotopy, ýagny oýandyrylan düzüüm ýadrosy, X we Y – ýadronyň bölekleri.

Uranyň ýadrosyna (${}_{92}^{235}\text{U}$) neýtronlar urlanda dürli radioişjeň ýadro bölekleri döreýär bilerler. Olaryň massalarynyň gatnaşygy 2:3 töweregidir. 235-nji uranyň bölünme täsirleşmelerine mysal getireliň:



Bu täsirleşmelerde neýtronlaryň bölünip çykmagy bölünme netijesinde döreýän böleklere agram salmany doly ýok etmeýär. Şonuň üçin alnan bölekler, köplenç, radioişjeňdirler (durnuksyzdyrlar) we γ – şöhlelenme bilen birlikde yzygider β (elektron) dargama sezewar bolýarlar. 8.7-nji täsirleşme üçin radioişjeň β^- – dargama şu yzygiderlilikde bolýar (9.2-nji çyzgy):

bölejikler birmeňzeş bolmasalar, onda ýadro täsirleşmesi bolýar.

Düzüm ýadrosy oýandyrylan haldan dürli ýollar bilen çykyp biler. Bu ýagdaýda, köplenç, ýadrodan neýtronlaryň uçup çykmagy, γ – kwantlaryň şöhlelenmegi, protonlaryň, α – bölejikleriň we şuna meňzeşleriň goýberilmegi bolýar.

Ýadro täsirleşmelerinde elektrik zarýadynyň, nuklonlaryň sanynyň, energiýanyň, hereket mukdarynyň we hereket mukdarynyň momentiniň saklanmak kanunlary ýerine ýetirilýärler. Eger täsirleşmä gatnaşýan bölejikleriň kinetik energiýasy garşy bölejikleriň döremegine ýeterlik bolsa, onda nuklonlaryň sany üýtgäp bilýär.

Ýadro täsirleşmesinde **elektrik zarýady saklanýar**, ýagny täsirleşmä girýän bölejigiň we ýadronyň zarýadlarynyň jemi ($\sum Z_i$) täsirleşmeden soň döreýän bölejigiň we ýadronyň zarýadlarynyň jemine ($\sum Z_k$) deňdir :

$$\sum Z_i = \sum Z_k .$$

Nuklonlaryň, ýagny **massa sanynyň saklanmak kanuny** şeýle aňladylýar: bölejigiň we ýadronyň täsirleşmeden öňki we soňky massa sanlarynyň jemi biri-birine deňdir, ýagny:

$$\sum A_i = \sum A_k$$

8.1-nji jedwelde elektrik zarýadynyň we massa sanynyň saklanmak kanunlary birnäçe täsirleşmeleriň mysalynda görkezilen:

8.1-nji jedwel

Täsirleşme	Elektrik zaryady	Massa sany
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$	$3+1=4+0$	$7+1=7+1$
${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$	$7+0=6+1$	$14+1=14+1$
${}^{27}_{13}\text{Al} + \gamma \rightarrow {}^{26}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{p}$	$13+0=12+1$	$27+0=26+1$
${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	$1+1=2+0$	$3+2=4+1$

Ýapyk ulgamda doly energiýa we doly hereket mukdary saklanýarlar. Iki sany çaknyşýan ýadro bölejikleriniň ulgamyny ýapyk diýip hasap etmek bolýar. Bu ýerde maddanyň beýleki ýadrolary 10^{-10}m töweregi aralyga daşlaşandyr, ýadrolaryň öz ölçegleri bolsa örän kiçidir ($10^{-15} - 10^{-14}\text{m}$).

10.1 görnüşli täsirleşme üçin doly energiýanyň saklanmak kanuny şeýle aňladylýar:

$$m_X c^2 + m_x c^2 + T_X + T_x = m_Y c^2 + m_y c^2 + T_Y + T_y$$

Bu ýerde $m_i c^2$ – ýadronyň ýa-da bölejigiň dynçlyk energiýalary, T_i – olaryň kinetik energiýalary.

Täsirleşme döwründe ýadrolaryň täzedan gurulmagy olaryň içki energiýasynyň we, degişlilikde, dynçlyk massasynyň üýtgemegi bilen bir wagtda bolýar. Dynçlyk energiýalarynyň tapawudyna **täsirleşmäniň energiýasy** diýilýär:

bölünmegi diýilýär. 238-nji we 235-nji uran üçin Z^2 / A gatnaşyk degişlilikde 35,56 we 36,02 deňdir.

ΔE energiýany ýadro dürli usullar bilen berip bolar. Neýtronlaryň täsiri netijesinde bolýan ýadrolaryň bölünmegi aýratyn ähmiýete eýedir. Neýtron ýadro aralaşyp oňa energiýa berýär we ony **oýandyryýar**. Bu oýandyryjy energiýa neýtronnyň kinetik energiýasyndan we döreýän düzüm ýadrosyndaky neýtronnyň baglanyşyk energiýasyndan durýar. Neýtronnyň baglanyşyk energiýasy uranyň ${}^{235}_{92}\text{U}$ we ${}^{238}_{92}\text{U}$ izotoplary üçin degişlilikde 6,5 MeW we 7,1 MeW deňdir. Bu baglanyşyk energiýasy daşky neýtronlaryň täsiri netijesinde döreýän uranyň ${}^{236}_{92}\text{U}$ we ${}^{239}_{92}\text{U}$ düzümleri üçin degişlilikde 6,8 MeW we 5,5 MeW deňdir. Bu ýerde nuklonlaryň goşalanmagy (protonlaryň hem-de neýtronlaryň sanlarynyň jübüt bolmagy) sebäpli, ${}^{236}_{92}\text{U}$ ýadrodaky baglanyşyk energiýasy köpdür.

Baglanyşyk energiýasynyň hasabyna ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopyň ýadrosy has ýokary energiýa derejesine geçýär we daşky neýtronlaryň kinetik energiýasyna garaşsyz bölünýär. Emma ${}^{238}_{92}\text{U}$ izotopy bölmek üçin neýtronnyň kinetik energiýasy (7,1-5,5) MeW = 1,6 MeW ýetmeli. Bu ýerden ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopyň haýal neýtronlar, ${}^{238}_{92}\text{U}$ izotopyň bolsa çalt neýtronlar tarapyndan bölünýändigini gelip çykýar.

Şeýlelikde, neýtrony eýelemde döreýän düzümleri ýadrosy güýçli oýandyrylandyr. Bu bolsa düzümleri ýadrosynyň bölünmegine mümkinçilik berýär.

ýerleşýän elementlere dargaýandygyny çakladylar. 1939-njy ýylda inlis fizigi O. Friş (1904-1979) we awstriýaly fizik L. Meýtner (1878-1968) Ganyň we Ştrassmanyň tejribeleriniň netijelerini düşündirdiler. Olar uranyň ýadrosynyň neýtrony eýelände massasy boýunça iki deňeşdirerli bölege bölünýändigini aýtdylar. Agyr ýadrolaryň bölünmegi köp energiýanyň goýberilmegi bilen bile bolýar. Uranyň bir ýadrosy $^{235}_{92}\text{U}$ bölünende 2 ýa-da 3 neýtron boşaýar we 200 MeW töweregi energiýa goýberilýär. 1kg 235-nji uranyň ýadrolary bölünende massanyň ýetmezçiligi 1g töweregi bolýar. Bu bolsa, takmynan, $8,4 \cdot 10^{13} \text{ J} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ kWt-sag}$. energiýa gabat gelýär. Şeýle energiýa 2000t benzin ýa-da 2500t daş kömür ýakylandaky ýa-da 25000t trinitrotoluol (trotil) partladylandaky bölünip çykýan energiýa baradardyr.

Agyr ýadrolarda neýtronlaryň göräleýin mukdary orta ýadrolardakydan köpdür. Şonuň üçin ýadro bölünmesinde emele gelýän böleklerde neýtronlar agdyklyk edýär we olar birnäçe neýtronlary goýberýärler. Neýtronlaryň köp bölegi şol bada (10^{-14} s töweregi wagtda) goýberilýär. Neýtronlaryň **gijigen neýtronlar** diýip atlandyrylan az bölegi, ýagny 0,75 % töweregi, (0,05 – 60) s wagt aralygynda goýberilýärler.

Ýadronyň bölünmegi kulon energiýasynyň we ýadronyň üst energiýasynyň gatnaşygy bilen kesgitlenýär.

$Z^2/A > 45$ deňsizlik ýerine ýetýän her bir ýadro durnuksyz bolar we derrew bölünme netijesinde dargar. Bu şert $Z \geq 115$ bolan ýadrolarda ýerine ýetip biler. Şeýle ýadrolaryň energiýasy ähtimal güýjüň böwedniň energiýasyndan köp bolar we ýadrolar şol bada dargar.

Eger $Z^2/A < 45$ bolsa, onda ýadro bölünmeýär. Eger şeýle ýadro ýeterlik ululykly goşmaça ΔE energiýa berilse ýadro şol бага bölünip biler. Bu ýagdaýa **ýadronyň mejbury**

$$Q = [(m_X + m_x) - (m_Y + m_y)]c^2$$

Haçanda $Q > 0$ bolanda täsirleşmede dynçlyk energiýanyň kiçelmeginiň hasabyna kinetik energiýa bölünip çykýar. Şeýle täsirleşmä **ýylylyk goýberiji täsirleşme** diýilýär. Bu täsirleşme urulýan bölejikleriň potensial böwedi ýeňip geçmäge ýeterlik islendik kinetik energiýasynda bolup biler.

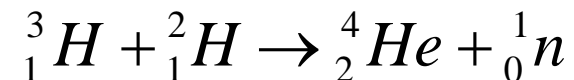
$Q < 0$ bolanda täsirleşme netijesinde kinetik energiýanyň kiçelmeginiň hasabyna dynçlyk energiýa artýar. Şeýle täsirleşmä **ýylylyk siňdiriji täsirleşme** diýilýär. Bu täsirleşme urulýan bölejikleriň kinetik energiýasynyň diňe käbir çäk bahadan uly bolanda amala aşyrylyp bilner.

$$(T_x)_{\text{çäk}} = |Q| \frac{m_X + m_x}{m_X}$$

Gamma kwantlaryň täsiri astynda bolup geçýän ýylylyk siňdiriji täsirleşmeler üçin $(T_\gamma)_{\text{çäk}} = |Q|$.

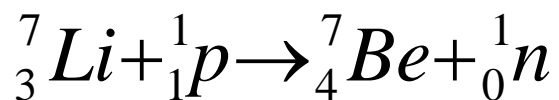
Haçanda $Q = 0$ bolanda maýyşgak pytrama bolýar hem-de kinetik we, degişlilikde, dynçlyk energiýalarynyň saklanmagy bolýar.

Ýylylyk goýberiji täsirleşmä mysal getireliň:



Bu ýerde geliýniň ýadrosynyň we neýtronyň kinetik energiýalary 17,6 MeW deňdir. Bu täsirleşme deýtronyň energiýasy 0,2 megaelektronwolta deň ýa-da ondan uly bolanda ýerine ýetýär.

Ýylylyk siňdiriji täsirleşmä mysal getireliň:



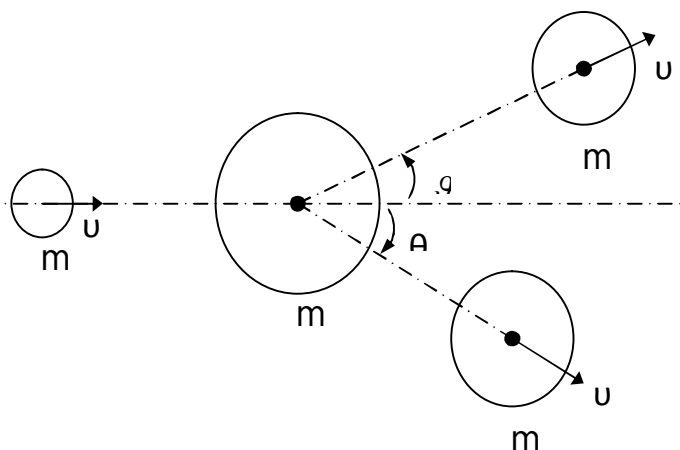
bu ýerde $Q = -1,65 \text{ MeV}$.

Hereket mukdarynyň saklanmak kanunyny şeýle ýazyp bileris:

$$\vec{P}_X + \vec{P}_x = \vec{P}_Y + \vec{P}_y$$

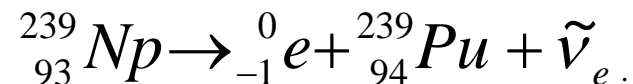
Energiýanyň we hereket mukdarynyň saklanmak kanunlaryny ulanyň täsirleşmäniň önümleriniň burç we energiýa paýlanyşyklarynyň arasyndaky baglanyşygy kesgitläp bolar.

8.1-nji çyzgyda ýadro täsirleşmesiniň çyzgysy görkezilen.

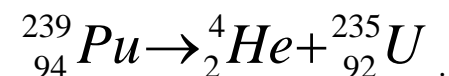


8.1-nji çyzgy.

Ýöne neptuniý β^- - dargama netijesinde plutoniýä öwrülýär:

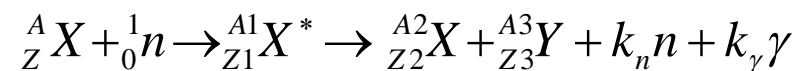


Öz gezeginde plutoniý α - radioişjeňdir we uranyň durnukly ${}^{235}\text{U}$ izotopyna öwrülýär:



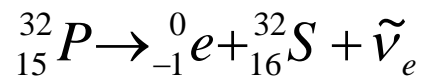
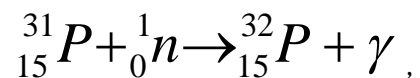
3.3. Agyr ýadrolaryň bölünmegi

Senagat möçberlerinde atom ýadrosynyň energiýasyny almak üçin neýtronlaryň täsiri astynda bolýan agyr ýadrolaryň **bölünme täsirleşmeleri** ulanylýarlar. Bu täsirleşme şeýle bolup geçýär.



Bu ýerde ${}_Z^AX$ - bölünmäge sezewar edilýän ýadro, ${}^1_0\text{n}$ - haýal neýtronlar, ${}_{Z1}^{A1}X^*$ - ýadronyň durnuksyz izotopy; ${}_{Z2}^{A2}X$, ${}_{Z3}^{A3}Y$ - bölünme täsirleşmesi netijesinde emele gelýän ýadro bölekleri, k_n - täsirleşme netijesinde boşaýan neýtronlaryň sany, k_γ - ýadro bölekleri tarapyndan goýberilýän γ - kwantlaryň mukdary.

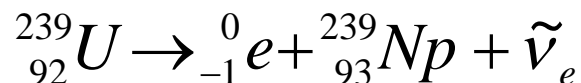
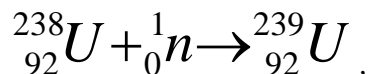
Bölünme täsirleşmäniň iň ähtimaly uranyň ýadrosynyň iki ýadro bölegine bölünmegidir. Nemes himikleri O. Gan (1879-1968) we F. Ştrassman (1902-1980) 1938-nji ýylda tejribeler esasynda 235-nji uranyň ýadrolary neýtronlar bilen urlanda ýadronyň Mendeleyewiň jedweliniň ortasynda



Ýylylyk neýtronlaryň täsiri astynda hem zaryadlanan bölejikleri (protonlary, α – bölejikleri we başgalary) goýberýän eýeleme täsirleşmesine gözegçilik etmek bolýar. Bu täsirleşme nyşana hökmünde ýeňil ýadrolar ulanylanda ýüze çykýar, mysal üçin, ${}_{5}^{10}\text{B}(\text{n},\alpha){}_{3}^{7}\text{Li}$.

Ýadro täsirleşmesini amala aşyrmak üçin haýal neýtronlar ulanylýar. Çalt neýtronlary haýalladyjynyň üstünden geçirip, haýal neýtronlary almak bolýar. Haýalladyjy hökmünde parafin, suw, wodorod, berilliýniň birleşmeleri ulanylýar. Haýalladyjynyň maddasynyň ýadrolarynda pytramagyň hasabyna çalt neýtronlaryň energiýasy haýalladyjynyň maddasynyň atomlarynyň ýylylyk energiýasyna geçip kiçelýär. Neýtronlaryň energiýasy bu ýylylyk energiýa deň bolýança pytrama hadysasy dowam edýär. Otag temperaturasynda ýylylyk energiýa 0,026eW deňdir. Neýtronlaryň we haýalladyjynyň düzümi ýadrosynyň energiýalary gabat gelenlerinde neýtronlaryň **rezonans siňmesi** (rezonans eýelenmesi) bolýar.

Beýan edilen hadysa urandan soňky elementleri almagyň esasynda durýar. Mysal üçin, neptuniý has ýaýran ${}^{238}\text{U}$ izotopdan şeýle alynýar:



8.1-nji çyzgyda görkezilen adaty ýagdaý üçin energiýanyň saklanmak kanunyny şeýle ýazyp bileris

$$\frac{m_x v_x^2}{2} + Q = \frac{m_y v_y^2}{2} + \frac{m_Y v_Y^2}{2} \quad (8.3)$$

Hereket mukdarynyň saklanmak kanunyny hereket miukdarynyň x we y oklara göçürimleri üçin iki deňleme görnüşinde ýazyp bileris. Eger x ok v_a bilen ýannaş bolsa, onda

$$m_x v_x = m_y v_y \cos \vartheta - m_Y v_Y \cos \theta \quad (8.4)$$

$$0 = m_y v_y \sin \vartheta - m_Y v_Y \sin \theta \quad (8.5)$$

Dört ululyk (v_x , v_y , ϑ , θ) üçin 8.3 – 8.5-nji deňlemeleriň ulgamyny çözüp, berlen ϑ we θ uçuş burçlarynda y we Y bölejikleriň tizlikleriniň baglanyşygyny hem--de beýleki baglanyşyklary tapyp bileris.

Ýadro täsirleşmesinde özara täsir edişýän bölejikleriň hereket mukdarynyň jemlenen momenti saklanýar. Onuň saýlanyp alnan ugra göçürimi:

$$I_I = I_x + I_X + L_{xX} = I_y + I_Y + L_{yY} = I_2$$

Bu ýerde I_x , I_X , I_y , I_Y - degişli bölejikleriň we ýadrolaryň spinleri, L_{xX} , L_{yY} - degişli jübüt bölejikleriň göräleýin hereketini häsiýetlendirýän orbital momentleri.

Seredilip geçilen saklanmagyň baş kanuny radioişjeň dargamadaky (α - we β -dargamalar) ýadro öwrülişiklerinde we ýönekeý bölejikleriň arasyndaky islendik özara täsirlerde hem dogrudyr.

Haçanda ýadro täsirleşmesi ýylylyk goýberiji ($Q > 0$) bolanda hem täsirleşme hemme wagt bolup geçmeýär. Bu täsirleşmäniň bolup geçmeginiň ähtimallygy onuň täsir ediji (effektiv) kesigi bilen kesgitlenýär.

Goy, δ galyňlykly ýuka tekiz nyşananyň üstüne dikana N_0 sany bölejikleriň akymy düşýän bolsun. Nyşananyň galyňlygy δ örän kiçi hasaplanylýar. Şonuň üçin atomlaryň ýadrolary bölejikleriň akymynyň ugry boýunça biri-birini basyrmaýarlar. Nyşana ýadrosy σ kese kesikli gaty şarjagaza, oňa düşýän bölejikleri bolsa aşa kiçi kesgitli şarjagaza meňzeş diýip hasap edeliň. Onda düşýän bölejigiň nyşana ýadrosynyň haýsy hem bolsa biri bilen özara täsir edişmeginiň ähtimallygyny şeýle ýazyp bileris: $W = n\sigma\delta$, bu ýerde n – nyşananyň göwrüm birligindäki ýadrolarynyň sany. Nyşana wagt birliginde düşýän bölejikleriň umumy sanýndan (N_0) nyşananyň ýadrolary bilen $\Delta N = N_0 W = N_0 n\sigma\delta$ sanysy täsir edişýär.

Çaknyşma sezewar bolýan bölejikleriň göräleýin sany $\Delta N/N_0 = n\sigma\delta$ deňdir. Bu ýerden alarys:

$$\delta = \frac{\Delta N}{N_0 n \sigma} = \frac{W}{n \sigma}$$

Şeýlelikde, täsirleşmäniň täsir edişi kesigi bölejigiň ýadro bilen özara täsir edişmeginiň ähtimallygyna göni baglydyr.

σ ululyk meýdan ölçegine eýedir. Şonuň üçin **ýadro täsirleşmesiniň täsir edişi kesigi diýip, urulýan bölejigiň täsirleşme döredýän merkezi nyşana ýadroda bolan meýdançanyň ululygyna düşünilýär**. Ýadro täsirleşmesiniň täsir edişi kesigi **barn** diýip atlandyrylýan birlikde aňladylýar: $1b = 10^{-28} m^2$.

Bölejikler ýadrolar bilen täsir edişende, olaryň tolkun häsiýetiniň ýüze çykýandygy sebäpli, ýadro täsirleşmesiniň kesigi ýadronyň geometrik kesigi bilen gabat gelmeýär. Ýöne olar ululygyň tertibi boýunça deňeşdirilidir. Täsir edişi kesik düşýän bölejigiň energiýasyna her bir anyk ýagdaý üçin özüçe baglydyr.

atomlarynyň ýylylyk hereketiniň energiýasy (kT çemesi) bilen deňeşdirip bolýar. Sowuk we has sowuk neýtronlaryň energiýalary degişlilikde $10^{-4} \div 10^{-3} eV$ we $10^{-7} \div 10^{-4} eV$ aralykda bolýar.

Çalt neýtron ýadro bilen çaknyşanda pytraňny görnüşli (n,n) ýa-da zaryadlanan bölejikleriň döremegi bilen (n,α) täsirleşme bolup geçýär. Soňky ýagdaý çalt neýtronlaryň ýadrodan protonlaryň ýa-da α – bölejikleriň uçup çykmagyna päsgel berýän ähtimal güýjüň böwedini ýeňip geçmäge ýeterlik energiýa eýedigini bilen düşündirilýär. Çalt neýtronlar üçin (n,n') görnüşli maýyşgak däl pytrama hem häsiýetlidir, bu ýerde n' – ýadrodan uçup çykýan neýtron. Neýtrony gaýtaryp berýän ýadro, adatyça, oýandyrylan halda bolýar we esasy hala geçende γ – kwanty şöhlendirýär.

Eger neýtronlaryň energiýasy $10MeV$ ululyga ýetse, onda neýtronlaryň ($n,2n$) görnüşli iki esse köpelme täsirleşmeleriniň bolmagy mümkindir, mysal üçin, $^{12}_6C(n,2n) ^{11}_6C$.

Ýadronyň golaýynda göräleýin uzak wagt bolup bilmekligi sebäpli, **haýal neýtronlar** ýadro täsirleşmelerini **oýandyrmak** üçin has amatlydyr. Olaryň ýadro tarapyndan eýelenmeginiň ähtimallygy uludyr. Ýöne haýal neýtronlaryň energiýasynyň kiçiligi sebäpli olar (n,n) görnüşli maýyşgak pytrama (mysal üçin, $^{12}_6C(n,n) ^{12}_6C$) ýa-da (n,γ) görnüşli şöhlelenme eýeleme täsirleşmelerini emele getirip biler. (n,γ) görmüşli täsirleşmeler başdaky maddanyň täze izotopynyň emele gelmegine getirýär, mysal üçin, $^{238}U(n,\gamma) ^{239}U$. Eýeleme täsirleşmesi, köplenç, durnukly ýadrolary emele getirýän β^- - öwrülişikde bolup geçýär, mysal üçin:

- ýokary energiýalarda (ýüzlerçe we müňlerçe MeW) bolup geçýän täsirleşmeler. Bu täsirleşmeleriň kömegi bilen erkin halda bolmaýan ýönekeý bölejikler (mezonlar, deýtronlar we başgalar) alynýar.

4. Ýadro öwrülişikleriniň häsiýeti boýunça şu täsirleşmelere bölýärler:

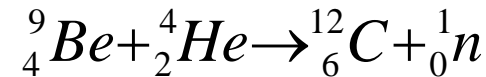
- neýtronlary goýberýän;
- zarýadlanan bölejikleri goýberýän;
- şöhlelenme (radiasiýa) eýeleme täsirleşmeleri. Bu täsirleşmelerde düzüm ýadrosy bir ýa-da birnäçe γ – kwanty goýberip esasy hala geçýär;
- pytrama (maýyşgak ýa-da maýyşgak däl) täsirleşmeleri;
- bölünme täsirleşmeleri;
- birleşme täsirleşmeleri.

Senagat maksatlary üçin neýtronlaryň atomyň ýadrosy bilen özara täsiri netijesinde bolup geçýän ýadro täsirleşmeleri aýratyn ähmiýete eýedir. Zarýadlanan bölejiklerden (d , p , α) tapawutlylykda, neýtronlar kulon itekleşmesine sezewar bolmaýarlar. Şonuň üçin örän kiçi energiýasy bolan neýtronlar hem atomyň ýadrosyna ýeňil aralaşyp we häs täsirli ýadro täsirleşmelerini emele getirip bilýärler.

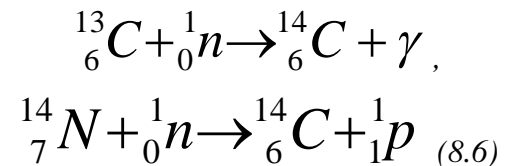
Neýtronlaryň ýadrolar bilen özara täsiriniň häsiýeti çalt we haýal neýtronlar üçin dürlüdür.

Neýtronlar de Broýluň tolkunynyň uzynlygy $\lambda = h/(mv)$ ýadrosyna radiusyndand (R_N) kiçi bolar ýaly tizlige eýe bolsa, ýagny $v > h/(mR_N)$, onda olara çalt neýtronlar diýilýär. Çalt neýtronlaryň energiýasy $10 \div 5 \cdot 10^7$ eW aralykda üýtgeýär. Eger neýtronlar $\lambda > R_N$ şert ýerine ýeter ýaly tizlige eýe bolsalar, olara haýal neýtronlar diýilýär. Bu neýtronlaryň energiýasy $0,5 \div 10^5$ eW aralykda bolýar. Energiýasy $5 \cdot 10^3 \div 0,5$ eW aralykda bolan neýtronlara ýylylyk neýtronlary diýilýär. Bu ýagdaýda neýtronlaryň energiýasyny gurşawyň

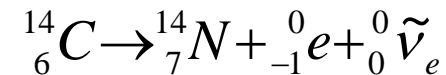
Ilkinji gezek 1932-nji ýylda şu ýadro täsirleşmesinde neýtron alyndy



Neýtronlaryň täsiri astynda emeli radioişjeň izotoplar alynýar, mysal üçin, ýarymdargama döwri 5730 ýyl bolan radioişjeň uglerod şu täsirleşmelerde alynýar:

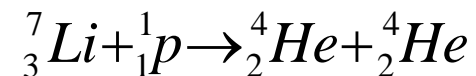


Soňraky dargama şeýle bolup geçýär:



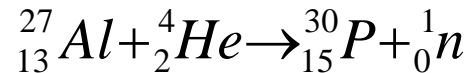
Bu ýerde ${}^0_{-1}e$ we ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ - elektronyň we elektron garşyneýtrinosynyň belgilenişi. Radiouglerodyň ýarymdargama döwüriniň uludygy arheologiýada ölen bedenleriň ýaşyny kesgitlemek üçin ulanylýar. Ölen bedende 8.6-njy täsirleşme boýunça toplanmagyny bes edýän radioişjeň uglerodyň dargamadyk göräleýin mukdaryny kesgitlemek bolýar. Bu bolsa bedeniň asman giňişliginiň neýtronlarynyň täsiri astynda howa gurşawynda azotdan döreyän ${}^{14}_6\text{C}$ izotopy siňdirmegini bes eden wagtyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

1932-nji ýylda Harkowda ilkinji gezek emeli çaltlandyrylan bölejikler (protonlar) ulanylyp, ýadronyň bölünmesi alyndy:

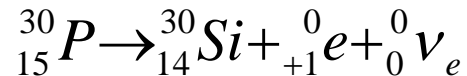


Bu bölünme təsirleşmesinde 17,3MeV enerjiyə bölünip çykýar.

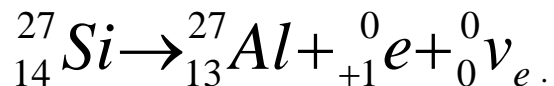
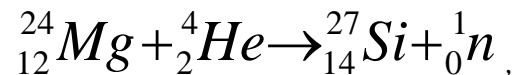
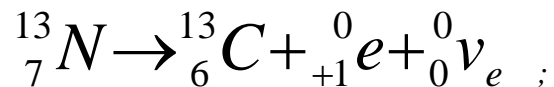
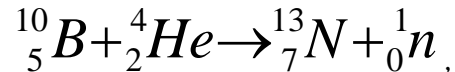
1934-nji ýylda Frederik we Iren Žolio-Kýuriler emeli radioişjeňligi açdylar. Alýuminiýni α – bölejikler bilen şöhlelendirip, olar β^+ – radioişjeň fosfory we neýtrony aldylar:



Ýarymdargama döwri 135,6 sekunda deň bolan fosforyň bu izotopy pozitrony goýberip dargaýar:



Soňra Žolio-Kýuriler bordan radioişjeň azoty ($T = 9,93$ minut), magniýden bolsa radioişjeň kremniýni ($T = 4,92$ sekunda) aldylar:



Žolio-Kýurilerin açyşy örän uly ähmiýete eýe boldy. Olardan ýeňil radioişjeň elementler we pozitron radioişjeň dargama öň belli däldi. Emeli radioişjeňligi açandyklary üçin är-aýal Žolio-Kýuriler 1935-nji ýylda himiýadan Nobel baýragyna mynasyp boldular.

3.2. Ýadro təsirleşmeleriniň toparlara bölünüşü.

Neýtronlardaky ýadro təsirleşmeleri

Ýadro təsirleşmeleri dürli alamatlary boýunça toparlara bölünýärler.

1. Täsirleşmä gatnaşýan bölejiklerin **görnüşine** bagly şu təsirleşmeleri tapawutlandyrýarlar:

- neýtronlaryň täsiri astyndaky təsirleşmeler, mysal üçin, ${}_{238}^{238}\text{U}(n,\gamma){}_{239}^{239}\text{U}$ təsirleşme;
- protonlaryň täsiri astyndaky təsirleşmeler, mysal üçin, ${}_{7}^7\text{Li}(p,\gamma){}_8^8\text{Be}$ təsirleşme;
- deýtronlaryň (d) täsiri astyndaky təsirleşmeler, mysal üçin, ${}_{26}^{26}\text{Mg}(d,p){}_{27}^{27}\text{Mg}$ təsirleşme;
- α – bölejiklerin täsiri astyndaky təsirleşmeler, mysal üçin, ${}_{9}^9\text{Be}(\alpha,n){}_{12}^{12}\text{C}$ təsirleşme;
- γ – kwantyň täsiri astyndaky (fotoýadro) təsirleşmeler, mysal üçin, ${}^2\text{H}(\gamma,n){}_1^1\text{H}$;
- pionlaryň (π – mezonlaryň) gatnaşmagyndaky təsirleşmeler, mysal üçin, $p(\pi^-, \pi^0)n$.

2. Ýadro təsirleşmelerine gatnaşýan ýadrolaryň görnüşi boýunça şu təsirleşmeleri tapawutlandyrýarlar:

- ýeňil ýadrolardaky təsirleşmeler ($A < 50$);
- orta agyrlykly ýadrolardaky təsirleşmeler ($50 < A < 100$);
- agyr ýadrolardaky təsirleşmeler ($A > 100$).

3. Täsirleşmäni emele getirýän bölejiklerin **energiýasy** boýunça şu təsirleşmelere bölýärler:

- adatça, neýtronlaryň gatnaşmagynda kiçi energiýalarda (takmynan 1eV) bolup geçýän təsirleşmeler;
- γ – kwantyň we zarýadlanan bölejiklerin (protonlaryň, α – bölejiklerin, deýtronlaryň) gatnaşmagynda orta energiýalarda (birnäçe MeV – den başlap) bolup geçýän təsirleşmeler;

Olaryň biri, iki protonyň birleşip deýtrony emele getirmeginden hem-de pozitrony (${}_{+1}^0e$) we neýtrinony (${}_{0}^0\nu_e$) goýbermeginden başlaýar (9.3-nji jedwel). Bu täsirleşme gowşak özara täsirler netijesinde döreýär we örän haýal geçýär. Proton-proton çaknyşmanyň diňe takmynan ýüz milliondan bir bölegi täsirleşme bilen tamamlanýar. Çaknyşma wagtynda ($\approx 10^{-21} s$) bir proton pozitrony we neýtrinony goýberip neýtrona (${}_{0}^1n$) öwürmelidir. Pozitron derrew elektron (${}_{-1}^0e$) bilen birleşip γ -şöhlemenme berýär. Neýtronan we protondan döreýän deýtron birnäçe sekundyň dowamynda golaýyndaky bir proton bilen geliýniň ýeňil ýadrosyny emele getirip täsirleşmä girişýär. Artykmaç energiýa bolsa γ -şöhlemenme görnüşinde bölünip çykýar. Soňra ýadro täsirleşmäniň üç şahasynyň bolmagy mümkindir.

9.1-nji jedwel

Proton-proton toplum täsirleşmeleri

Täsirleşme	Bölünip çykýan energiýa, MeW	Täsirleşmäniň ortaça wagty
${}_{1}^1p + {}_{1}^1p \rightarrow {}_{1}^2H + {}_{+1}^0e + {}_{0}^0\nu$	2·0,164+(2·0,257)	$1,4 \cdot 10^{10}$ ýyl
${}_{+1}^0e + {}_{-1}^0e \rightarrow 2\gamma$	2·1,02	-
${}_{1}^2H + {}_{1}^1p \rightarrow {}_{2}^3He + \gamma$	2·5,49	5,7 s
${}_{2}^3He + {}_{2}^3He \rightarrow {}_{2}^4He + 2{}_{1}^1p$	12,85	10^6 ýyl
Jemi $4{}_{1}^1p \rightarrow {}_{2}^4He + 2{}_{+1}^0e + 2{}_{0}^0\nu_e$	26,21+(0,514)	

8.2-nji jedwel

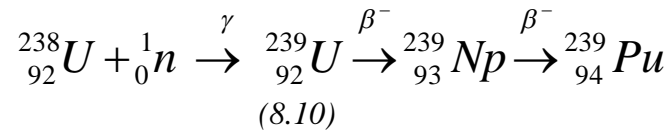
Ýadro bölünmesinde bölünip çykýan energiýa, MeW	Radioisjeň dargamada bölünip çykýan energiýa, MeW
Bölünme önümleriniň kinetik energiýasy	Dargama önümleriniň β^- - şöhlemenmesiniň energiýasy
160	7
Bölünmede döreýän neýtronlaryň kinetik energiýasy	Dargama önümleriniň γ - şöhlemenmesiniň energiýasy
4	5
Bölünmede döreýän γ - şöhlemenmäniň energiýasy	Dargama önümleriniň garşyneýtrinolarynyň energiýasy
5	7

Agyr ýadronyň dynçlyk massasy bölünme netijesinde döreýän bölekleriň dynçlyk massalarynyň jeminden köpdür. Şonuň üçin dynçlyk massasynyň kiçelmegine deň energiýa bölünip çykýar. Bu ýerde doly massa saklanýar, sebäbi uly tizlik bilen hereket edýän bölekleriň massasy olaryň dynçlyk massasyndan uludyr.

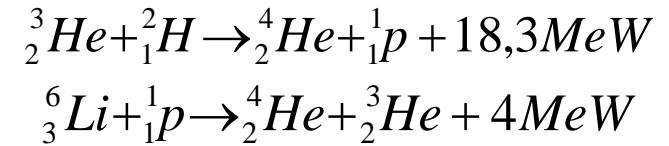
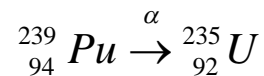
Hil taýdan agyr ýadrolaryň bölünmeginiň mümkinçiligini baglanyşygyň birlikleýin (udel) energiýasynyň massa sana baglylygynyň kömegi bilen düşündirmek bolýar. Agyr elementler ($A \approx 200$) üçin baglanyşygyň birlikleýin energiýasy Mendeleyewiň jedweliniň ortasynda ýerleşýän elementleriniň şeýle energiýasyndan, takmynan, 1MeW azdyr. Şonuň üçin agyr ýadrolaryň bölünmegi energiýa taýdan amatlydyr, çünki bölünmeden soň, ulgam kiçi energiýa hala geçýär.

Neýtronlar bilen urlanda, urandan başga, toriý (${}_{90}^{232}Th$), protaktinidiý (${}_{91}^{231}Pa$) we plutoniý (${}_{94}^{239}Pu$) hem bölünýärler. ${}_{92}^{235}U$ we ${}_{94}^{239}Pu$ ýadrolar esasan haýal neýtronlar bilen urlanda bölünýärler. Emeli ýol bilen alnan

${}^{233}_{92}\text{U}$ we ${}^{230}_{90}\text{Th}$ ýadrolar bolsa ýylylyk neýtronlary bilen urlanda bölünýärler. Uranyň 238-nji ýadrosy diňe energiýasy $1,6\text{MeV}$ töweregi bolan çalt neýtronlar bilen urlanda bölünýär. Ondan kiçi energiýada ${}^{238}_{92}\text{U}$ ýadrolar bölünmän neýtronlary siňdirýärler. Netijede ${}^{239}_{92}\text{U}$ ýadro döreýär, onuň oýandyrylan energiýasy bolsa γ – foton görnüşinde bölünýär. Sonuň üçin bu (n , γ) täsirleşme şöhlemenme eýeleme täsirleşmesidir. Dörän ${}^{239}_{92}\text{U}$ ýadro durnuksyzdyr (ýarymdargama döwri $T = 23$ min). Bu ýadro elektrony, garşyneýtrinony we γ – fotony goýberip neptuniýniň ${}^{239}_{93}\text{Np}$ ýadrosyna öwrülýär. Öz gezeginde neptuniý hem β^- – dargama ($T = 2,3$ gün) netijesinde plutoniýniň ýadrosyna öwrülýär:



Plutoniý α – radioisjeňdir, ýöne onuň ýarymdargama döwri örän uludyr ($T=24400$ ýyl). Plutoniý hem, uranyň ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopy ýaly, haýal neýtronlaryň täsiri astynda bölünýär. Sonuň üçin plutoniýniň kömegi bilen hem örän uly energiýa bölünip çykýan utgaşykly täsirleşmäni amala aşyrmak bolar. Plutoniý α -dargama netijesinde uranyň durnukly ${}^{235}_{92}\text{U}$ izotopyna öwrülýär:



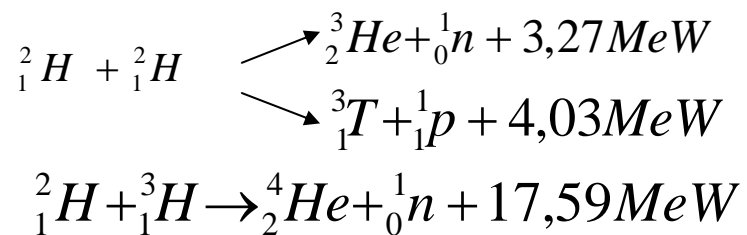
Deýtron-triton täsirleşmesinde bir nuklon üçin hasaplanan goýberilýän energiýa $17,59/5=3,52\text{MeV}$ deňdir. Bu energiýa α - bölekleriň (${}^4_2\text{He}$) paýyna düşýär, galan $14,07\text{MeV}$ energiýa bolsa neýtronlar tarapyndan äkidilýär. Neýtronlaryň energiýasyna seredeninde, zaryadlanan bölekleriň energiýasy elektrik energiýasyna has netijeli özgerdilýär. Uranyň ýadrosy ${}^{238}_{92}\text{U}$ bölünende $200/238 = 0,84\text{MeV}$ energiýa bölünýär. Şeýlelikde, 10.14-nji birleşme täsirleşmesinde uranyň bölünme täsirleşmesine seredeninde, takmynan, 4 esse köp energiýa goýberilýär.

Termoýadro täsirleşmeleri ýyldyzlaryň, şol sanda Güniň jümmüşlerinde bolup geçýär. Adaty orta ýyldyz bolan Güniň massasy, esasan, wodoroddan ($\approx 78\%$) we geliýden ($\approx 20\%$) durýar. Onuň düzüminde az mukdarda ($\approx 2\%$) uglerod, azot, kislorod, neon we beýleki has agyrrak elementler hem bardyr. Ýyldyzlaryň we Güniň merkezlerinde temperatura 10^7 - 10^8 K ýetýär. Şeýle aşa ýokary temperaturada ýeňil elementleriň atomlary doly ionlaşan atomlardan (erkin elektronlardan we “ýalaňaç” ýadrolardan) durýan elektron-ýadro gaz halyna bolýar. Maddanyň bu dördünji halyna **plazma** diýilýär.

Günde termoýadro täsirleşmeleriniň **proton-proton toplum** görnüşinde bolmagynyň mümkindigi 1938-nji ýylda aýdyldy.

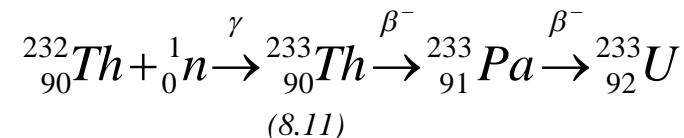
orta kinetik energiýasynyň $\frac{3}{2}kT = 0,35 \text{ MeV}$ bolmagy üçin temperatura, takmynan, $2,8 \cdot 10^9 \text{ K}$ bolmaly. Emma termoyadro täsirleşmesiniň mundan pes temperaturada hem bolup geçýändigini anyk derňewler görkezdi. Bölejikler tizlikler boýunça tötänleýin paýlanýandygy sebäpli, mydama energiýalary orta bahadan ep-esli artykmaç bolan ýadrolaryň belli bir mukdary bardyr. Ondan başga-da, temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ýadrolaryň çaknyşmagynyň depgini güýçlenýär. Bu bolsa, ýadrolaryň potensial böwetden geçip biri-birine aralaşmagyna getirýär. Şeýlelikde, käbir termoyadro täsirleşmeleri 10^7 K töweregi temperaturada hem bolup geçýär.

Deýteriýniň (${}^2_1\text{H}$) we tritiýniň (${}^3_1\text{H}$) ýadrolarynyň (deýtronyň we tritonyň) gatlamaşmagynda amala aşyrylýan birleşme täsirleşmeleri has uly gyzyklanma döredýär:



Başga-da birnäçe termoyadro täsirleşmeleri bolýar, mysal üçin:

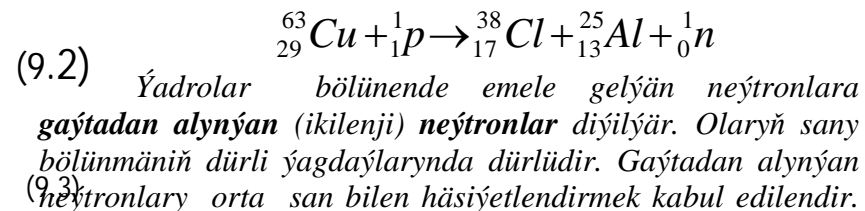
Toriýniň ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ýadrosy tarapyndan neýtronlaryň şöhlelenme eýelenmesi ((n,γ) täsirleşme) uranyň tebigatda ýok izotopynyň ${}^{233}_{92}\text{U}$ döremegine getirýär:



Alnan 233-nji uran α – radioişjeňdir ($T=162000$ ýyl).

Agyr ýadrolaryň bölünmegi diňe neýtronlar tarapyndan amala aşyrylman, protonlar, deýtronlar, α – bölejikler we γ – fotonlar tarapyndan hem amala aşyrylyp bilner. γ – fotonlar bilen şöhlelenendirilip amala aşyrylýan ýadro bölünmesine fotobölünme ýa-da fotoýadro täsirleşmesi hem diýilýär.

Bölünme täsirleşmeleri ýeňil elementlerde hem bolup biler. Mysal üçin, ýörite abzalda 60MeV energiýa çenli tizlendirilen protonlar bilen misiň ýadrosy urlanda ol bölünýär:



Bu san ${}^{235}_{92}\text{U}$ we ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ýadrolar üçin degişlilikde 2,5 we 3,0 deňdir.

Neýtronlaryň täsiri astynda bölünme bilen birlikde agyr ýadrolaryň örän az mukdarda öz-özünden bölünmesi hem bolýar. Mysal üçin, 1g uranda sagatda bary-ýogy 20 töweregi öz-özünden dargama bolýar. Öz-özünden bölünme, α–dargama meňzeşlikde, ötelge (tunnel) hadysasy esasynda

bolup geçýär. Bu hadysany 1940-njy ýylda rus alymlary K. A. Petržak we G. N. Flýorow açdylar. Öz-özünden bölünme üçin ýarymdargama döwri 10^{16} ýyl töweregidir. Bu bolsa ${}_{92}^{238}\text{U}$ uranyň α -dargamadaky ýarymdargama döwriünden ($4,5 \cdot 10^9$ ýyl), takmynan, $2 \cdot 10^6$ ýyl köpdür.

3.4. Bölünmäniň utgaşykly täsirleşmesi. Ýadro partlamalary

Gaýtadan alynýan neýtronlar **utgaşykly ýadro täsirleşmesini** amala aşyrmaga mümkinçilik berýär. Bu täsirleşmede ony döredýän neýtronlar täsirleşmäniň önümi hökmünde emele gelýärler. Bölünmäniň utgaşykly ýadro täsirleşmesiniň bolmagynyň mümkindigini ilkinji gezek 1939-njy ýylda rus alymlary Ýa. B. Zeldowiç we Ýu. B. Hariton görkezdiler. Ilkinji bölünmede döreýän her bir neýtron ýadro tarapyndan eýelenende bölünmäniň täze neýtronlarynyň döremegine getirýär. Öz gezeginde bu neýtronlar hem bölünme täsirleşmesini döretmäge ukyplydyrlar.

Neýtronlaryň her biri goňşy bölünýän ýadrolar tarapyndan eýelenýär diýen çaklama hakykatda amala aşyrylmaýar. Ikilenji neýtronlaryň bir bölegi utgaşykly täsirleşme bolýan ýerde bar bolan başga maddalaryň bölünmeýän ýadrolaryna düşýär. Bu maddalar neýtronlary haýalladyjylar, ýylylyk äkidijiler we başgalar bolup durýarlar. Neýtronlaryň bir bölegi utgaşykly täsirleşme bolýan giňişlikden ýöne-de çykyp biler.

Tebigy uranda $99,274\% \text{ } {}_{92}^{238}\text{U}$, $0,72\% \text{ } {}_{92}^{235}\text{U}$ we $0,006\%$ töweregi ${}_{92}^{234}\text{U}$ izotop bardyr. Şeýlelikde, haýal

3.6. ÝEŇIL ÝADROLARYŇ BIRLEŞME TÄSIRLEŞMELERI. ÝADRONYŇ ÝYLYLYK ENERGIÝASY

Ýadronyň energiýasy diňe agyr ýadrolar bölünende däl-de, ýeňil ýadrolar birleşende hem döreýär. Adaty şertlerde ýadrolaryň birleşmegi mümkin däl. Oňyn zarýadlanan ýadrolar kulon itekleşmesiniň ägirt uly güýjüne sezewar bolýarlar. Ýeňil ýadrolaryň bir ýadro birleşmegi üçin, olary ýadro güýçleriniň çekişmesi kulon güýjüniň itekleşmesinden köp bolar ýaly aralyga çenli ýakynlaşdyrmaly. Onuň üçin temperaturany aşa ýokarlandyryp, ýadrolaryň ýylylyk hereketiniň kinetik energiýasyny artdyrmaly. **Ýeňil ýadrolaryň birleşip has agyr ýadrony emele getirmegine we baglanyşyk energiýasynyň bölünip çykmagyna termoyadro (ýadro ýylylyk) täsirleşmesi diýilýär.**

Zarýad sanlary Z_1 we Z_2 bolan ýadrolar kulon itekleşmesi bilen şertlenen şu potensial energiýany ýeňip geçmeli

$$U = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_N},$$

bu ýerde $r_N \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ – ýadro güýçleriniň täsir ediji radiusy. Iň ýeňil wodorodyň ýadrosy üçin ($Z_1 = Z_2 = 1$) bu energiýany hasaplalyň:

$$U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_N} = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ J} \approx 0,7 \text{ MeV}$$

Her bir çaknyşýan ýadronyň paýyna bu energiýanyň ýarysy ($0,35 \text{ MeV}$) düşýär. Çaknyşýan ýadronyň

köpeldiji reaktor işe başlady. Ol elektrik energiýasyny (150 MWt) öndürmek üçin we Hazar deňziniň suwuny süýji suwa öwürmek üçin (200MWt) ulanylýar (her günde $1,2 \cdot 10^5$ tonna çenli).

Ýadro energiýasyny elektrik energiýasyna göni öwürmek esasy mesele bolup durýar. Degişli desganyň esasyňy ýylylyk elementleri düzýär. Elektrik akymynyň izotop çeşmelerinde radioişjeň dargamadaky bölünip çykýan energiýa ulanylýar. Şeýle çeşmeler kiçi kuwwatlydyr (onlarça we yüzlerçe Wt), ýöne ýokary durnuklylygy we işleýşiniň ygtybarlylygy bilen tapawutlanýarlar. Olar, mysal üçin, emeli hemralarda we awtomatik meteorologiýa beketlerini iýmitlendirmek üçin ulanylýarlar. Ýylylyk özgerdiji reaktorlaryň kuwwaty birneme ýokarydyr. Kuwwaty 500Wt bolan şeýle desga ilkinji gezek 1964-nji ýylda I. W. Kurçatow adyndaky atom energiýasy institutynda (Russiýa) guruldy.

2005-nji ýylyň Türkmenbaşy aýynyň 14-ine 1997-nji ýylyň Garaşsyzlyk aýynyň 15-ine uçurylan Ýewropanyň 350 kilogramlyk kosmos enjamy “Guýgens” 1,2 milliard kilometr ýol geçip amerikanyň “Kassini” planetaara awtomatik gämisinden aýrylyp Gün ulgamynyň Saturn planetasynyň iň uly hemrasy Titanyň üstünde gondy. Gün elektrik çeşmeleriniň gerek bolan energiýa bilen üpjün edip bilmeýändigini sebäpli “Kassini” planetaara gämisi 33 kg plutoniý-238 radioişjeň elementli ýadro reaktory bilen üpjün edilendir. Häzirki wagta çenli ABŞ-da 30-a golan ýadro reaktorly kosmos gämileri uçuryldy.

neýtronlaryň täsiri netijesinde bölünýän her bir ${}_{92}^{235}\text{U}$ ýadro 140 sany ${}_{92}^{238}\text{U}$ ýadro düşýär. Bu ýadrolar bölünmän haýal neýtronlary eýeleýärler. Şonuň üçin tebigy uranda bölünmäniň utgaşykly täsirleşmesi ýüze çykmaýar. Utgaşykly täsirleşmäni almagyň bir ýoly ýeterlik mukdarda ${}_{92}^{235}\text{U}$ izotopy almakdyr. Bu täsirleşmäni almak üçin gerek bolan uranyň iň kiçi massasyna **aygytlaýjy** (kritiki) **massa** diýilýär. Uranyň 235-nji izotopy üçin bu massa 50 kg töweregidir. Uranyň $18,95 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ dykzlygynda onuň 50 kg massasynyň togalagynyň radiusy 8,5 sm töweregidir.

Utgaşykly täsirleşmäni dowam etdirmek üçin gaýtadan alynýan neýtronlaryň ortaça sany wagtyň geçmegi bilen kemelmeli däl. Bir bölünmede döreýän neýtronlaryň sanynyň (N_i) oň ýanyndaky bölünmede döreýän neýtronlaryň sanyna (N_{i-1}) gatnaşygyna **köpelme koeffisiýenti** (köpeldijisi) diýilýär:

$$K = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

$K=1$ bolanda neýtronlaryň sany hemme wagt hemişelik galýar we öz-özünden dowam edýän utgaşykly täsirleşme bolýar. $K>1$ bolanda neýtronlaryň sany wagt birliginde artýar we utgaşykly täsirleşme güýjeýär. Bu ýagdaý atom bombalarynda ulanylýar. $K<1$ bolanda bölünmäniň sany wagt birliginde azalýar we utgaşykly täsirleşme bolmaýar.

Täsirleşmäniň tizliginiň ulalmagy köpelme koeffisiýenti we iki sany yzygider bölünmäniň arasyndaky wagt, ýagny neýtronlaryň bir nesliniň ortaça ýaşayyş wagty (τ) bilen kesgitlenýär.

Bir nesilde neýtronlaryň sanynyň artmagy (ΔN) şeýle kesgitlenýär:

$$\Delta N = N(K-1)$$

Bu deňlemäni wagt birliginde ýazyp bileris:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(K-1)}{\tau} \quad (9.1)$$

10.12-nji deňlemäni çözüp, t wagtdaky neýtronlaryň sany (N) tapyp bileris:

$$N = N_0 e^{\frac{(K-1)t}{\tau}}$$

Bu ýerde N_0 – başlangyç wagt pursatyndaky ($t=0$) neýtronlaryň sany.

Ýadro bölünende çykýan energiýany parahatçylykly maksatlar üçin ulanylyşyna seredeliň. Ýadro reaktorlarynda utgaşykly täsirleşme dolandyrylýar. Ýadro reaktorlarynyň haýal we çalt neýtronlarda işleýän görnüşleri bar.

Haýal neýtronlarda işleýän ýadro reaktorlarynda ýadro ýangyjy hökmünde $^{235}_{92}\text{U}$ izotopy 5% çenli baýlaşdyrylan tebigy uran ulanylýar. Haýal neýtronlaryň eýelenmeginiň we soňra ýadronyň bölünmeginiň ähtimallygy çalt neýtronlaryň eýelenmeginiň ähtimallygyna görä ýüzlerçe esse uludyr. Şonuň üçin neýtronlaryň köpelme koeffisiýentini ýokarlandyrmak üçin neýtrony haýalladyjylar (grafit, agyr ýa-da adaty suw) ulanylýar (10.3-nji çyzgy). Ýadro täsirleşmesiniň tizligini sazlamak üçin reaktoryň işçi giňişligine düzüminde kadmiý ýa-da bor saklaýan maddalar girizýärler. Bu maddalar neýtronlary işjeň siňdirýärler. Neýtronlary haýalladyjy we işçi giňişligi gurşap alýan berilliýden edilen serpinkiriji örtük aýgytlaýjy massany 250g çenli peseltmäge mümkinçilik berýär. Sazlaýjy maddalary işçi giňişlige girizmek we çykarmak arkaly utgaşykly täsirleşme dolandyrylýar.

täsirleşme netijesinde, degişlilikde işjeň $^{239}_{94}\text{Pu}$ plutoniýniň ýa-da $^{233}_{92}\text{U}$ uranyň ýadrolaryna dargaýarlar. Netijede alnan ýadro ýangyjy ($^{239}_{94}\text{Pu}$ ýa-da $^{233}_{92}\text{U}$) bolsa öz gezeginde ýylylyk neýtronlarynyň täsiri netijesinde bölünýär we ýadro energiýasy alynýar. Şeýle reaktorlara köpeldiji reaktorlar diýilýär, sebäbi olar bölünýän ýadro ýangyjyny täzedan işläp çykarýarlar. Onuň üçin gaýtadan işlenýän çig maldan, mysal üçin, 238-nji urandan ýasalan ýörite serpinkirijiler ulanylýar. Şeýle serpinkiriji pytraýan neýtronlaryň bir bölegini işjeň zolaga gaýtaryýar, galan neýtronlary bolsa siňdirip, 10.10-njy täsirleşmä laýyklykda 239-njy plutoniýni emele getirýär. Reaktoryň bu bölegine täzedan öndürilýän zolak diýilýär. Bu ýerde wagtyň geçmegi bilen köp mukdarly plutoniý toplanýar. Eger ilkinji bölünýän material hökmünde hem plutoniý ulanylýan bolsa, onda täzedan işläp çykarmagyň köpeldijisi (täzedan döreýän bölünýän atomlaryň sanyň ýanyp bölünýän atomlaryň sanyna gatnaşygy) 1,5 we ondan hem ýokary bolup biler. Şuna meňzeşlikde köpeldiji reaktorlarda tebigy 232-nji toriý 10.11 –nji täsirleşmä laýyklykda işjeň 233-nji urana gaýtadan işlenip bilner. Hasaplamalaryň görkezişi ýaly, 1 tonna granit köpeldiji reaktorlarda çig mal bolup durýan 3 gramm töweregi 238-nji urany we 12 gramm 232-nji toriýni özünde saklaýar. Granitdäki uranyň we toriýniň gory Ýeriň ýüzünde, takmynan, 10^9 ýyl energiýa öndürmäge ýeterlikdir. Bu bolsa köpeldiji reaktorlary ulanmaklygyň ýadro ýangyjynyň çig mal esasy ep-esli giňeldýändigini görkezýär.

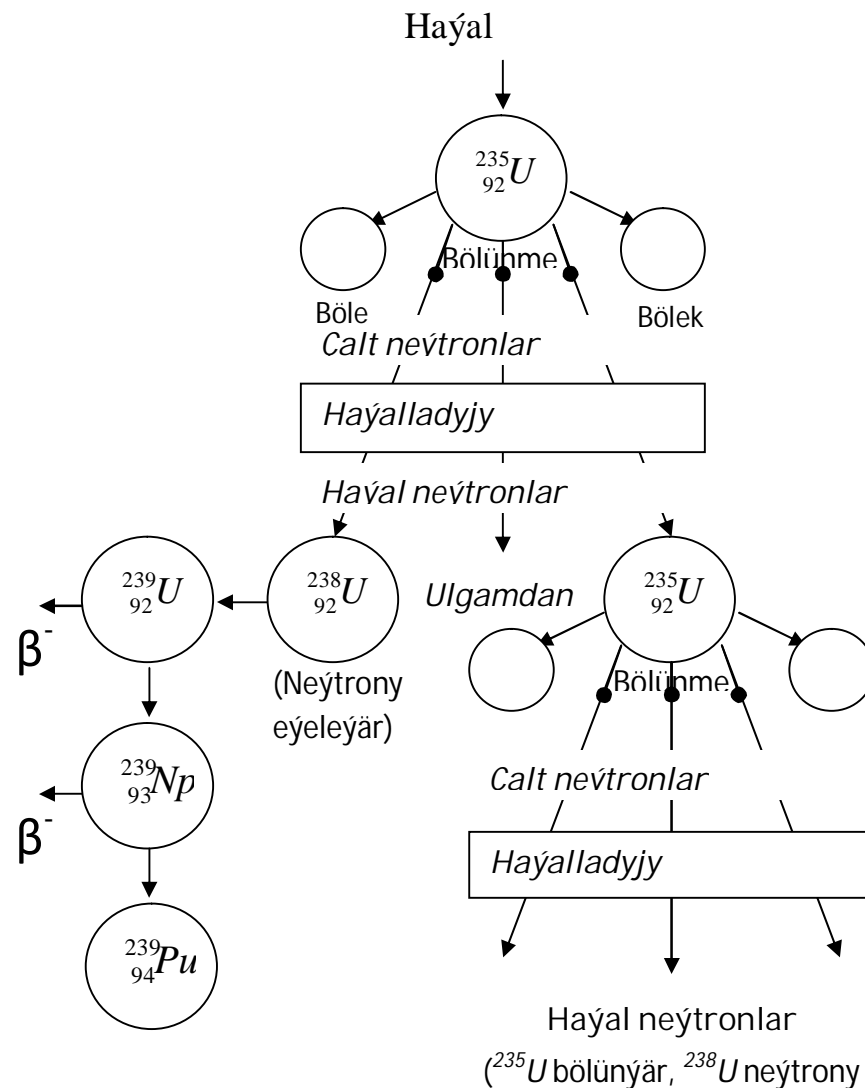
Dünýäde ilkinji çalt neýtronlarda işleýän synag reaktory 1956-njy ýylda Obninsk şäherinde işe girizildi. 1962-nji ýylda ABŞ-da elektrik kuwwaty 60 MWt bolan “Enriko Fermi” atly köpeldiji reaktory işläp başlady. 1973-nji ýylda Şewçenko (Gazagystan) şäherinde ýylylyk kuwwaty 1000MWt bolan

Uran bloklary (1) bir wagtda haýalladyjy we ýylylyk äkidiji bolup durýan suwa (2) çümdürilendirler. Ýylylyk äkidiji (2), birikdiriji turbageçiriji (3) we ýylylyk alşyjynyň (5) egrem-bugram turbasy (zmeýewik) (4) birinji aýlanma konturyny emele getirýärler. Onda suw 100 atmosfera töweregi basyşda aýlanýar. Reaktoryň işjeň zolagyna aşaky böleginden girende suw pes temperatura, mysal üçin, 190°S , işjeň zolagyň ýokarky böleginden çykanda bolsa has ýokary temperatura, mysal üçin, 300°S eýedir. Ýylylyk alşyjyda (5) birinji konturda aýlanýan suwuň ýylylygy ikinji konturda aýlanýan suwa geçýär we ony buga öwürýär. Bug ýokary basyşda (takmynan 12 atmosfera) geçiriji turba (6) boýunça bug turbina (7) baryp ony aýlaýar. Bug turbina bolsa elektrik akymyny işläp çykarýan elektrik öndürijini (8) herekete getirýär.

Işlenen bug sowadyjy enjama (9) baryp suwa öwrülýär. Suw bolsa sorujynyň (10) kömegi bilen ýylylyk alşyjynyň (5) egrem – bugram turbasyna (4) ýygnaýar.

Haýalladyjy reaktorlar ýylylyk neýtronlarda işleýärler. Häzirki wagtda haýalladyjsyz çalt neýtronlarda işleýän reaktorlar guruldy. Çalt neýtronlaryň täsiri netijesinde bölünmegiň ähtimallygy kiçidir. Şonuň üçin bu reaktorlar tebigy uranda işläp bilmeýärler. Täsirleşmäni diňe 15% az bolmadyk bölünýän $^{235}_{92}\text{U}$ izotopy saklaýan baýlaşdyrylan garyndyda amala aşyrmak bolar. Çalt neýtronlardaky reaktorlarda neýtronlaryň bir bölegi $^{238}_{92}\text{U}$ urany $^{239}_{94}\text{Pu}$ plutoniýä ýa-da $^{232}_{90}\text{Th}$ toriýni $^{233}_{92}\text{U}$ urana öwürmek üçin ulanylýar.

Bu reaktorlarda çalt neýtronlar işjeňligi pes $^{238}_{92}\text{U}$ uranyň ýa-da $^{232}_{90}\text{Th}$ toriýniň ýadrolary tarapyndan eýelenýärler. Bu ýadrolar soňra 8.11-nji ýa-da 9.1-nji

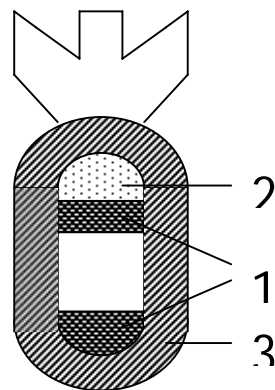


9.2-nji çyzgy

Çalt neýtronlardaky reaktorlarda neýtrony haýalladyjy bolmaýar. Bu ýerde ýadro ýangyjy hökmünde $^{235}_{92}\text{U}$ izotopy 15% - den az bolmadyk baýlaşdyrylan tebigy uran ulanylýar.

Plutoniýniň $^{239}_{94}\text{Pu}$ izotopynda hem utgaşykly ýadro täsirleşmesi bolup biler. Uranyň $^{238}_{92}\text{U}$ izotopyny plutoniýniň $^{239}_{94}\text{Pu}$ izotopyna öwürmek ýörite reaktorlarda amala aşyrylýar.

Gynansak hem utgaşykly täsirleşme ilkinji gezek **atom bombasynda** ulanyldy. Atom bombasynda ýadro täsirleşmesiniň **partlama** häsiýeti ($K>1$) ulanylýar. Şeýle bombanyň ýadro zarýady iki we ondan hem köp arassa diýen ýaly $^{235}_{92}\text{U}$ ýa-da $^{239}_{94}\text{Pu}$ izotopynyň böleklerinden durýar (10.4-nji çyzgyda 1 san bilen görkezilen).



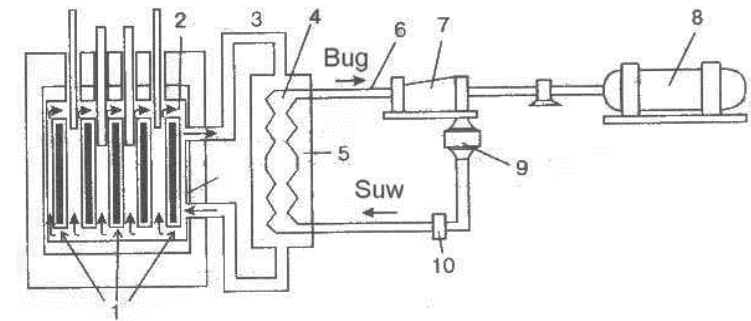
9.3-nji çyzgy

Ýadro täsirleşmesiniň intensiwligini we reaktoryň kuwwatyny peseltmeli bolsa, onda (5) sterženler işjeň zolaga girizilýär. Bu sterženler doly girizilende ýadro täsirleşmesi bolmaýar.

Reaktory gyssagly saklamak üçin goşmaça süýşýän kadmiýli sterženler (6) göz önünde tutulandyr. Howply ýagdaý ýüze çykanda, olar reaktoryň işjeň zolagyna çalt girizilýär. Zerurlyk ýüze çykan ýagdaýynda sterženler el bilen girizilýär. Bu bolsa neýtronlaryň güýçli siňmegine we ýadro täsirleşmesiniň çalt togtamagyna getirýär.

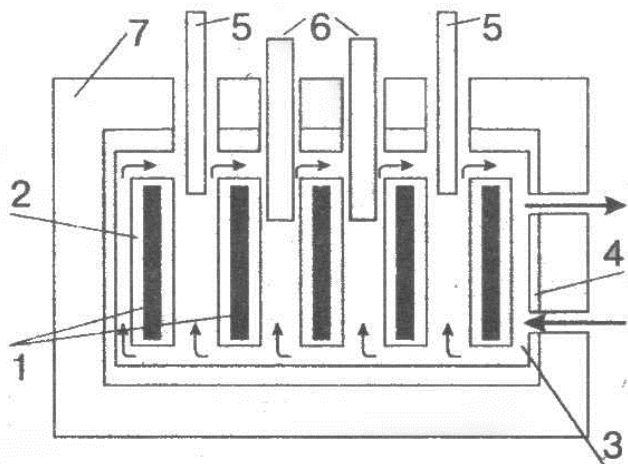
Ýadrolaryň bölünmegi radioisjeň ýadrolaryň emele gelmegi bilen birlikde bolup geçýär. Ondan başga-da, her bir ýadro bölünmesinde neýtronlar boşaýar. Şeýlelikde reaktor dürli görnüşli şöhlelenmäniň çeşmesi bolup durýar. Olardan neýtronlar we γ – şöhlelenme has uly aralaşygy ukyba eýedirler. Sonuň üçin hemme reaktorlaryň biologik goraýyşy bolýar. Onuň üçin galyňlygy, takmynan, 1m bolan suw gatlagy, galyň diwarly beton korpus (7) we serpidirijiniň aňyrsynda ýerleşýän ýörite daşky täsirden gorag ulgamy ulanylýar.

Reaktordan ýylylyk suwuň iki sany ýapyk aýlanma konturlary tarapyndan bug güýç beriji desga geçirilýär (10.6-njy çyzgy).



9.5-nji çyzgy

diňe bir D_2O molekula düşýär. Şonuň üçin haýalladyjy hökmünde, köplenç, grafit ulanylýar.



9.4-nji çyzgy

Ýylylyk bölüp çykarýan elementlerde ýadro ýangyjy ýerleşýär. Bu ýerde ýylylyk bölüp çykarýan bölünme täsirleşmesi bolup geçýär. Elementlerden ýylylygy äkitmeklik olaryň üstüni ýörite awlawly konturda hereket edýän ýylylyk äkidiji (3) bilen ýuwup geçmek arkaly amala aşyrylýar. Ýylylyk äkidiji işjeň zolagy geçip gyzýar we ýylylygy ýörite gurluş arkaly işçi madda, mysal üçin, suwa berýär.

Reaktoryň işjeň zolagy neýtronlaryň ýitgisini peseltýän we onuň göwrümi boýunça ýylylyk bölünip çykmaklygyny deňleşýän neýtronlary serpikdijiler (4) bilen gursalandyr.

Reaktory dolandyrmaklyk özünde kadmiý ýa-da bor saklaýan süýşýän sterženleriň (5,6) kömegi bilen amala aşyrylýar. Olar neýtronlary güýçli siňdirmäge ukyplydyrlar. Sterženleriň hereketi kompýuteriň kömegi bilen dolandyrylýar.

Her bölegiň massasy aýgytlaýjy massadan kiçidir. Şonuň üçin utgaşykly täsirleşme döremeýär. Ýeriň howa gurşawynda kosmos şöhleleriniň täsiri netijesinde emele gelen neýtronlaryň käbir mukdary mydama bardyr. Şoňa görä partlama döretmek üçin massasy aýgytlaýjy massadan köp bolar ýaly ýadro zaryadlarynyň böleklerini örän çalt bir bölege birleşdirmeli. Onuň üçin adaty partlaýjy maddanyň (2) kömegi bilen ýadro zaryadynyň bir bölegi başga bir bölege atylýar. Hemme gurluş uly dykzlykly agyr metal (3) bilen örtülendir. Bu örtük neýtronlary serpikdiriji bolup hyzmat edýär we mümkin bolan köp ýadro öz energiýasyny bölüp çykarýança, onuň zaryadyny pytramadan saklaýar. Atom bombasynda utgaşykly täsirleşme çalt neýtronlarda bolup geçýär.

Atom bombasy partlanda temperatura onlarça million gradusa ýetýär. Şeýle temperaturada basyş birden ýüzlerçe milliard paskala çenli ýokarlanýar we kuwwatly weýran ediji partlama tolkuný döreýär. Partlama intensiw γ -fotonlaryň we neýtronlaryň goýberilmegi bilen bir wagtda bolup geçýär. Ondan başga-da, partlamanyň daş-töweregindäki ýerler ýadrolaryň bölünmeleriniň radioişjeň önümleri bilen zäherlenýär. Soňra janly beden üçin howply bu zäherlenme howa we suw akymlyry bilen örän uly aralyklara ýaýraýar.

Ikinji Jahan urşunyň ahyrynda Amerikanyň Birleşen Şatlary harby zerurlyk bolmasa-da Ýaponiýanyň Hirosima (06.08.1945) we Nagasaki (09.08.1945) şäherlerine atom bombalaryny oklady. Şonda 200 müňden gowrak adam öldi we ýaralandy, şäherleriň, takmynan, üçden biri weýran boldy. Ulanylan gyrgynçylykly atom bombalarynyň partlama güýji 20000 tonna partlaýjy madda bolan trotiliňki ýalydyr. Häzirki

wagtda bütün dünýäde gyrgynçylykly ýaraglary gadagan etmek üçin göreş alyp barýarlar.

Garaşsyz, baky Bitarap Türkmenistan Beýik Saparmyrat Türkmenbaşynyň ýolbaşçylygynda ýadro ýaragy bilen ýaragsyzlanmak we halkara howpsuzlygyny pugtalandyrmak ýoly bilen öňe barýar. Biziň döwletimiz 1996-njy ýylda ýadro synaglaryny hemmetaraplaýyn gadagan etmek baradaky Şertnama goşuldy. Bu Şertnama 1998-nji ýylyň Baýdak aýynda jürdumyzyň Mejlisi tarapyndan kanun esasynda tassyklanyldy. 2005-nji ýylyň Garaşsyzlyk aýynyň 24-ine Türkmenistanyň XVI Halk Maslahaty halkara guramalaryň köpçilikleýin gyryş ýaraglarynyň, şol sanda ýadro ýaragynyň ýaýradylmagyna garşy göreş boýunça başlangyçlaryny goldamak hakynda Beýannama kabul etdi. Türkmenistanyň Mejlisi 2005-nji ýylyň Bitaraplyk aýynyň 7-sine ýadro ýaragynyň ýaýradylmazlygy hakyndaky Şertnama bilen baglanyşykly kepillendirmeleri ulanmak hakynda Türkmenistan bilen Atom energiýasy baradaky Halkara gullugynyň arasyndaky Ylalaşygy hem-de bu Ylalaşyga Goşmaça Teswirnamany tassyklamak hakynda Kararlary kabul etdi. Türkmenistan bu resminamalara 2005-nji ýylyň Magtymguly aýynyň 17-sinde Wena şäherinde gol çekdi. Beýan edilenler Türkmenistanyň ýadro ýaragyny ýaýratmazlyk baradaky şertnamalaýyn herekete gatnaşmagy dowam etdirýändigine hem-de parahatçylyk we ýaragsyzlanmak babatynda giň halkara hyzmatlaşygyny gyşarnyksyz durmuşa geçirýän Bitarap döwlet hökmünde öz üstüne alan halkara borçnamalaryna wepalylygyna şaýatlyk edýär.

3.5. Ýadro reaktorlary

Bölünmegiň utgaşykly täsirleşmesini dolandyrmaklyk ýadro energetikasynda uly ähmiýete eýedir. **Ýadro reaktory** (atom gazany) diýip, bölünmegiň dolandyrylýan utgaşykly täsirleşmesi amala aşyrylýan we goldanylýan gurluşa aýdylýar. Dünýäde ilkinji reaktor (uran-grafitli) 1942-nji ýylyň Bitaraplyk aýynyň 2-sine Çikago uniwersitetinde (ABŞ) italýan alymy Enriko Fermiň (1901-1954) ýolbaşçylygynda işe girizildi. Ýewropada ilkinji reaktor 1946-njy ýylyň Bitaraplyk aýynyň 25-ine Moskwada (Russiýa) rus alymy Igor Wasilýewiç Kurçatowyň (1903-1960) ýolbaşçylygynda ulanylyşa girizildi. Atom ýadrosynyň energiýasyny parahatçylykly maksatlar üçin ulanmaklyk ilkinji gezek I. W. Kurçatowyň ýolbaşçylygynda amala aşyryldy. 1954-nji ýylyň Gorkut aýynyň 27-sine Obninsk şäherinde (Russiýa) kuwwaty 5MWt bolan dünýäde birinji atom elektrik beketi (stansiýasy) işe girizildi. 1957-nji ýylda öňki Sowet Soýuzynda kuwwaty 270MWt bolan dünýäde ilkinji atom buz döwüjisi (ledokoly) suwa goýberildi. 10.5-nji çyzygyda ýadro reaktorynyň umumy çyzygysy görkezilen. Onuň esasy bölekleri işjeň zolak, haýalladyjylar, serpikdirijiler, sowadyjy ulgamy dolandyryjy we goraýjy ulgam, aralykdan dolandyryjy pult bolup durýar.

Reaktoryň merkezi bölegi işjeň zolakdyr. Ol ýylylyk bölüp çykarýan elementleriň toplумы (1) bolup durýar. Olaryň her biri haýalladyjy (2) bilen gurşalandyr. Haýalladyjy hökmünde grafit, agyr suw (D_2O), berilliý ýa-da berilliýniň okisi ulanylýar. Haýalladyjyda neýtronlar öz energiýasyny ýitirýärler we olaryň tizligi daşky gurşawyň temperaturasyna laýyk gelýän ululyga çenli kiçelýärler. Agyr suw has gowy, ýöne gymmat haýalladyjydyr, sebäbi 6000 sany H_2O molekula

Bu ýerde ε megaelektronwoltlarda ölçenilýär, uly harp Z maddanyň atomlarynyň ýadrolarynyň zaryad sanyny aňladýar. 10.12-nji aňlatmadan görnüşi ýaly $\varepsilon > 800/Z$ bolanda şöhlelenme ýitgisi ionlaşma ýitgisinden uly bolýar. Şöhlelenme ýitgisiniň ionlaşma ýitgisine deň bolandaky energiýa **awygtly** (kritiki) **energiýa** ε_a diýilýär. Bu energiýa üçin golaýlaşýan 10.12-nji aňlatma megaelektronwoltlarda $\varepsilon_a \approx 800/Z$ netijäni berýär. Örän ýokary energiýalarda ionlaşma ýitgileri hasaba alynmaýar. Onda bu ýagdaý üçin 10.11-nji aňlatmany integrirläp maddadan geçende, elektronyň energiýasynyň şu kanun boýunça peselýändigini alarys:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-x/l_s}$$

Bu ýerde ε_0 – elektronyň başlangyç energiýasy, x -ýoluň uzynlygy.

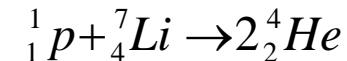
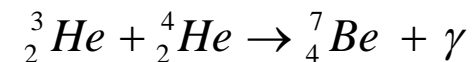
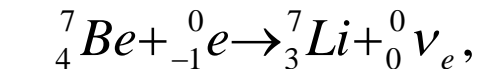
4.3. Gamma şöhlelenmesiniň maddadan geçmegi

Gamma şöhlelenmesine tolkun uzynlygy atomara aralykdan kiçi bolan elektromagnit tolkunlary degişlidir ($\lambda < 10^{-10}$ m). Häzirki zaman tizlendirijilerde energiýasy 20 GeV, ýagny tolkun uzynlygy $6 \cdot 10^{-17}$ m = 0,06 Fm bolan gamma kwantlar hem alynýar.

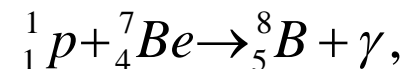
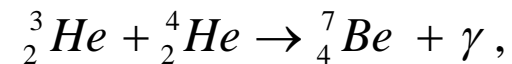
Gamma kwantlar elektromagnit özara täsir netijesinde madda tarapyndan siňdirilýär. Olaryň elektrik zaryady ýokdur. Maddadan geçenlerinde gamma kwantlar elektronlar we atomyň ýadrosy bilen seýrek çaknyşýarlar. Ýöne bu çaknyşmalarda olar birden ugruny üýtgedýärler we desseden çykýarlar. Gamma kwantlar massasyz bölejiklerdir we diňe ýagtylygyň tizligine deň tizlik bilen hereket edýärler. Gamma kwantlar ýuwaşap bilmeýärler. Olar diňe siňdirilip we gapdala

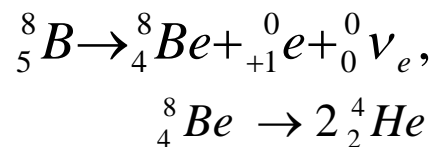
Iň ähtimal täsirleşme - bu geliýniň ${}^3_2\text{He}$ iki ýadrosynyň arasyndaky täsirleşmedir (10.3-nji jedwele seret). Ýöne başdaky üç täsirleşmeleriň netijesinde geliýniň ${}^3_2\text{He}$ ýadrosy diňe bir gezek alynýar. Şonuň üçin bu täsirleşmeler iki gezekden bolmaly. Bu ýagdaý jedweliň ikinji sütüninde 2 san köpeldiji bilen bellenen. Netijede, dört proton geliýniň agyr ýadrosyna (${}^4_2\text{He}$), iki pozitrona we iki neýtrino öwrülýär. Jedwelde degişli täsirleşmelerde bölünip çykyan energiýa hem-de Günüň merkezindäki şert üçin hasaplanan her täsirleşmäniň, takmynan, ortaça wagty görkezilen. Ýaýlaryň içinde neýtrinolarýň äkidýän energiýasy getirilen.

Geliýniň (${}^4_2\text{He}$) köp mukdarynda we $T > (10-15) \cdot 10^6 \text{ K}$ temperaturalarda ikinji şahanyň täsirleşmesi esasy bolýar. Bu ýerde başdaky üç täsirleşme jedwelde görkezilişi ýaly, ýöne iki gezek gaýtalanmaýar. Soňra ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$ täsirleşme aşaky täsirleşmeler bilen çalşyrylýar:



Ýene has ýokary temperaturalarda üçünji şahanyň täsirleşmesi energiýa bölüp çykarmakda esasy bolýar. Bu şahada soňky täsirleşmeler şu görnüşde bolýar:





Ikinji we üçünji şahalarda hem dört proton 4_2He ýadro öwürülýär.

1939-njy ýylda amerikaly fizik Gans Býote **uglerod-azot toplum** täsirleşmesini hödürledi. Bu täsirleşmeler has ýokary temperaturada ($T > 1,5 \cdot 10^7 K$) amala aşyrylýar (10.4-nji jedwel).

9.2-nji jedwel

Uglerod-azot toplum täsirleşmeleri

Täsirleşme	Bölünip çykýan energiýa, MeW	Täsirleşmäniň ortaça wagty
${}^1_1p + {}^{12}_6C \rightarrow {}^{13}_7N + \gamma$	1,95	$1,3 \cdot 10^7$ ýyl
${}^{13}_7N \rightarrow {}^{13}_6C + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu$	1,5+(0,72)	7,0 min
${}^1_1p + {}^{13}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^6$ ýyl
${}^1_1p + {}^{14}_7N \rightarrow {}^{15}_8O + \gamma$	7,35	$3,2 \cdot 10^6$ ýyl
${}^{15}_8O \rightarrow {}^{15}_7N + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e$	1,73+(0,98)	82 s
${}^1_1p + {}^{15}_7N \rightarrow {}^{12}_6C + {}^4_2He$	4,96	$1,1 \cdot 10^5$ ýyl
Jemi		
$4 {}^1_1p \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^0_{+1}e + 2 {}^0_0\nu_e$	25,03+(1,70)	

Protonyň we elektronyň kinetik energiýalary has ýokary, ýagny $\varepsilon = 10 \text{ GeW}$ töweregi bolanda olaryň ikisi hem aşa relýatiwistik bolýar. Şeýle ýagdaý üçin 10.1-nji we 10.10-njy aňlatmalary ulanyp, geçirilen hasaplamalar elektronyň ionlaşma ýitgisiniň protonyňkydan hem, takmynan, 2 esse köpdügini görkezdi. Bu bolsa 10 GeW energiýaly elektronyň elektrik meýdanynyň hereketiň ugry boýunça şol energiýaly protonyň elektrik meýdanyna görä, örän güýçli üýtgeýändigini (ýapbaşýandygy) bilen düşündirilýär.

Hereket edýän elektronyň ionlaşma ýitgisi onuň atomynyň gabyklaryndaky elektronlar bilen çaknyşmagy netijesinde ýüze çykýar. Şöhlemenme ýitgileri bolsa esasan, hereket edýän elektronyň maddanyň atomynyň ýadrolary bilen çaknyşmagy netijesinde bolýar. Çaknyşmada elektron togtayar we şöhle goýberýär. Bu şöhlemenmä togtama şöhlemenmesi diýilýär. Elektronyň energiýasynyň şöhlemenme ýitgisi şu aňlatma bilen kesgitlenýär:

$$\left(-\frac{d\varepsilon}{dx} \right)_s = \frac{\varepsilon}{l_s} \quad (10.11)$$

Bu ýerde l_s hemişeligi **şöhlemenme uzynlygy** diýilýär. Bu uzynlyk maddanyň görnüşine baglydyr. Şöhlemenme uzynlygy adaty şertlerde howa üçin $l_s = 300 \text{ m}$, gurşun üçin bolsa $l_s = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ deňdir.

10.11-nji aňlatma laýyklykda şöhlemenme ýitgisi energiýa bilen çyzykly artýar. Ionlaşma ýitgisi bolsa ýokary energiýalarda energiýa bilen logarifmik üýtgeýär, ýagny hakykatda energiýa bagly däldir. Deňeşdirmek üçin şu golaýlaşýan gatnaşygy ulanyp biliris:

$$\frac{(d\varepsilon / dx)_s}{(d\varepsilon / dx)_i} \approx \frac{Z\varepsilon}{800} \quad (10.12)$$

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{2\pi e^4}{m v^2} \left[\ln \frac{\varepsilon^2}{2\bar{I}^2 \sqrt{1-\beta^2}} + \frac{1}{8} \right] \quad (10.10)$$

Elektronyň massasynyň kiçidigi sebäpli hemme üç aňlatma (10.7-nji, 10.9-njy we 10.10-njy) ulanyşa eýe bolýarlar. Mysal üçin, elektronyň dynçlyk energiýasy $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$ deňdir, şu sebäpli birnäçe megaelektronwolt energiýaly elektronlar eýýäm aşa relýatiwistik ($v \approx c$, $\beta \rightarrow 1$) bolýar.

Agyr we ýeňil bölejikleriň ionlaşma ýitgilerini deňeşdirenimizde 10.1-nji, 10.2-nji hem-de 10.7-nji, 10.9-njy, 10.10-njy aňlatmalara logarifmiň önündäki köpeldiji kesgitleýji bolýar. Hakykatda, köpeldiji bir gezek zarýadlanan bölejikleriň ($Z=1$) hereketi üçin hemme deňlemede deňdirler. Şonuň üçin hereketiň deň tizliklerinde agyr we ýeňil bölejikleriň ionlaşma ýitgileri, takmynan, deňdirler.

Indi energiýalary birmeňzeş bir gezek zarýadlanan ýeňil we agyr bölejikleriň ionlaşma ýitgilerini deňeşdireliň. Relýatiwistik däl ($v \ll c$, $\beta \rightarrow 0$) ýagdaýda 10.3-nji aňlatma laýyklykda energiýanyň ionlaşma ýitgisi bölejigiň massasyna göni baglydyr. Mysal üçin, protonlaryň ionlaşma ýitgisi şol energiýaly elektronyň ýitgisinden, takmynan, 2000 esse uludyr.

Elektron aşa relýatiwistik, proton bolsa relýatiwistik däl ýagdaýa seredeliň. Bu ýagdaýda hereket edýän protonyň elektrik meýdany togalak üst görnüşlidir, elektronda bolsa ol hereketiň ugry boýunça ýapbaşykdyr, kese ugurda bolsa süýnmekdir. Şonuň hasabyna elektronyň ýitgisi güýçli artýar. Kinetik energiýasy $\varepsilon = 5 \text{ MeV}$ bolan protony we elektrony deňeşdireliň. Şeýle energiýada elektrony aşa relýatiwistik diýip hasap edip bolar, emma proton relýatiwistik däl. 10.3-nji we 10.10-njy aňlatmalary ulanyp, geçirilen hasaplamalar protonyň ionlaşma ýitgisiniň elektronyňkydan takmynan 40 esse uludygyny görkezýär.

Uglerod-azot toplum täsirleşmeleri netijesinde, proton-proton toplum täsirleşmeleri ýaly, 4 sany proton geliýniň ýadrosyna (α -bölejige) öwürülýär. Bu öwürülme $26,7 \text{ MeV}$ energiýanyň bölünip çykmagy bilen amala aşyrylýar. Energiýanyň $1,7$ megaelektronwolty neýrinolaryň tarapyndan äkidilýär.

Günüň we ýyldyzlaryň içki temperaturasy $1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ töweregidir. Şonuň üçin ýokarda getirilen toplum täsirleşmeleriň ikisi hem bolup geçýär.

Has yagty (ägirt) ýyldyzlaryň merkezlerinde temperatura $T > 20 \cdot 10^7 \text{ K}$ bolup biler. Olar üçin geliý we neon toplum täsirleşmeleri möhümdir.

Energiýanyň saklamak kanuny tarapyndan termoyadro reaktoryna bildirilýän talaby kesgitleýliň. Bu reaktorda arassa deýteriýniň (dd) ýa-da deýteriýniň we tritiýniň deň düzüjili garyndysynyň (dt) täsirleşmesi bolup geçýär diýip çaklalyň. Eger plazmanyň temperaturasy T ýeterlik ýokary bolsa, onda ionlaryň biri-biri bilen çaknyşmasy, iň bolmanda bölekleyin, termoyadro energiýasynyň bölünme täsirleşmeleri bilen tamamlanar. Şeýle çaknyşmalaryň göwrüm birligindäki sany oňyn ionlaryň 1 sm^3 –daky sanynyň kwadratyna n^2 göni baglydyr. Şonuň üçin reaktoryň işjeň zolagynyň göwrüm birliginden bölünip çykýan ýadro energiýasynyň kuwwaty $P_{\text{öz}} = f_{\text{öz}}(T) n^2$ görnüşde aňladylyar. Bu ýerde $f_{\text{öz}}(T)$ funksiýa ulanylýan ýadro ýangyjyna (dd ýa-da dt) baglydyr.

Termoyadro täsirleşmesinde energiýanyň bölünip çykmagyndan başga-da onuň ýitgisi hem bolup geçýär. Reaktoryň işjeň zolagyndan energiýa plazmanyň elektromagnit şöhlemenmesi we gidýän bölejikleriň akymy bilen äkidilýär. Şöhlemenme, esasan, elektronlaryň ýadrolar bilen çaknyşmalaryndaky togtamalarynda döreýär. Şonuň üçin şöhlemenmäniň göwrüm birligindäki kuwwaty elektronlaryň

$1sm^3$ -daky sanynyň kwadratyna n^2 göni baglydyr we $P_{\text{şöh}} = f_{\text{şöh}}(T) n^2$ görnüşde aňlatmak bolar.

Göwrüm birliginde bölejikleriň akymyndan gidýän energiýasynyň kuwwatyny tapmak üçin işçi göwrümde gyzgyn plazmany saklamagyň ortaça wagty (τ) diýen düşünje girizilýär. τ wagtyň üsti bilen plazmanyň göwrüm birliginden gidýän bölejikleriň akymynyň energiýasynyň kuwwatyny P_b aňlatmak bolýar. Plazmanyň göwrüm birligindäki bölejikleriň kinetik energiýasy $2 \cdot (3/2) nKT = 3nkT$ deňdir. Bu ýerde energiýanyň ýarysy ýadrolaryň, beýleki ýarysy bolsa elektronlaryň paýyna düşýär. Şonuň üçin $P_b = 3nkT/\tau$.

Şeýlelikde, plazmanyň göwrüm birliginde bölejikleriň we şöhlemenmäniň energiýasynyň kuwwaty $3nkT/\tau + f_{\text{şöh}}(T)n^2$ bolar. Bu energiýa goraw tarapyndan siňdirilýär we ýylylyk görnüşinde bölünip çykýar. Şeýle ýylylygyň bir bölegi käbir η peýdaly täsir köpeldijili (koeffisiýentli) işe öwürmek ýoly bilen ulanylyp bilner. Onda plazmanyň göwrüm birliginde peýdasyz ýitirilen energiýanyň kuwwatyny şeýle ýazyp bileris:

$$(1-\eta)[3nkT/\tau + f_{\text{şöh}}(T)n^2].$$

Eger $\eta = 1/3$ diýip alsak, onda

$$2nkT/\tau + (2/3) f_{\text{şöh}}(T)n^2.$$

Öz-özünden gollanylýan termoyadro täsirleşmesiniň geçişi üçin bölünýän energiýa plazmadan äkidilýän elektromagnit şöhlemenmäniň we gidýän bölejikleriň akymynyň energiýasyndan az bolmaly däl. Bu şerti şeýle aňladyp bolar:

$$f_{\text{öz}}(T)n^2 \geq 2nkT/\tau + (2/3) f_{\text{şöh}}(T)n^2. \quad (9.4)$$

Bu aňlatmadaky temperatura bagly $f_{\text{öz}}(T)$ we $f_{\text{şöh}}(T)$ funksiýalaryň görnüşini nazary hasaplamalarda tapmak bolýar. 10.15-nji aňlatmada deňlik bolanda diňe öz-özünden gollanylýan termoyadro täsirleşmesi bolup geçer.

Ýeňil bölejikleriň häsiýetiniň ýene bir aýratynlygy bardyr. Elektron maddada hereket edende ondaky elektronlar bilen çaknyşyp, birmeňzeş bölejikleriň ulgamynda gözegçilik edilýän kwant alyşma hadysasyny ýüze çykarýar. Şeýle hadysalar pozitron maddada hereket edende ýüze çykmaýar, sebäbi elektron we pozitron birmeňzeş bölejikler däl. Ýöne bu ýagdaýda pozitron elektron bilen çaknyşyp başga bir bölejige (fotona) öwrülýär. Kwant alyşma we öwrülme hadysalarynyň ähmiýeti uly däl. Şonuň üçin elektronyň we pozitronyň maddada haýallamagy hakykatda birmeňzeş bolup geçýär.

Amerikan fizigi G. Býote elektronlaryň ionlaşma ýitgileri üçin şu deňlemäni aldy:

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{2\pi e^4}{m^2} \left[\ln \frac{m^2 \varepsilon}{2I^2(1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (10.7)$$

Bu ýerde \bar{I} - siňdirijiniň, ýagny maddanyň atomlarynyň orta ionlaşma energiýasy, ε - elektronyň relýatiwistik ($v < c$) kinetik energiýasy:

$$\varepsilon = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 \quad (10.8)$$

Relýatiwistik däl ýagdaýda ($v \ll c$, $\beta \rightarrow 0$) 10.7-nji aňlatma şu görnüşe eýe bolýar:

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{4\pi n e^4}{m v^2} \ln \frac{m v^2}{2I} \quad (10.9)$$

Aşa relýatiwistik ($v \approx c$, $\beta \rightarrow 1$) ýagdaý üçin $\varepsilon \gg mc^2$, onda 10.7-nji aňlatma şu görnüşe alar:

olaryň hereket edýän maddalary üçin dürlidir. Şeýlelikde, doly ylgaw üçin şu deňlemäni ýazyp bileris:

$$R = \frac{M}{z^2} f(v_0) + C \quad (10.6)$$

Otag temperaturasyndaky we adaty basyşdaky howada protonlar we α – bölejikler üçin tejribede $C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ alyndy. Deňeşdirmek üçin alýuminiýde 5 we 10 MeV energiýaly protonlaryň ylgawy deňşililikde $6 \cdot 10^{-4}$ we $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ deňdir. 10.6-njy aňlatma $R < \lambda_\theta$ şert ýerine ýetende dogrudyr, bu ýerde λ_θ – ýadro çaknyşmasynyň ylgawynyň uzynlygy. Bu şert ýokary energiýaly adronlar üçin ýerine ýetmeýär.

4.2. Ýeňil zaryadlanan bölejikleriň madda bilen özara täsiri

Massalarynyň kiçidigi sebäpli her bir çaknyşanlarynda hereket edýän ýeňil bölejikleriň (elektronlaryň ýa-da pozitronlaryň) hereket mukdarynyň üýtgemegi uludyr. Şonuň üçin ýeňil bölejikleriň maddadaky ýoly gönüçyzykly däl-de egrem-bugramdyr. Eger ýeňil bölejikleriň dessesini birhilli madda gönükdirsek, onda dessäniň intensiwligi onuň hemme uzynlygynda birsydyrdyn we üznüksiz peselýär. Şonuň üçin ýeňil bölejigiň kesgitli ylgawy R hakynda aýtmak bolmaýar. Ýeňil bölejikler üçin **iň uly ylgaw** we **orta ylgaw** diýen düşüňjeler girizilýär. **Iň uly ylgaw diýip hemme bölejikleriň saklanýan maddanyň iň kiçi galyňlygyna aýdylýar.** Orta ylgawy kesgitlemek üçin bölejigiň desseden çykmanka geçen gönüçyzykly ýolunyň uzynlygyny almaly we bu ýoly dessedäki hemme bölejikler boýunça ortalaşdyrmaly.

Ýeňil bölejikleriň häsiýetiniň başga bir aýratynlygy çaknyşma sebäpli hereket mukdarynyň üýtgemegi netijesinde elektron (ýa-da pozitron) fotonlary şöhlelendirýär. Şonuň üçin ionlaşma ýitgiden başga **şöhlelenme ýitgisi** hem döreýär.

Desgany energiýany öndürjä öwürmek üçin 9.3-nji aňlatmada deňsizligiň ($>$) ýerine ýetmegi hökmandyr.

9.4-nji şerti şu görnüşde ýazyp bileris:

$$n\tau \geq L(T). \quad (9.5)$$

Bu ýerde

$$L(T) = \frac{2kT}{f_{\text{öz}}(T) - (2/3)f_{\text{şöh}}(T)}. \quad (9.6)$$

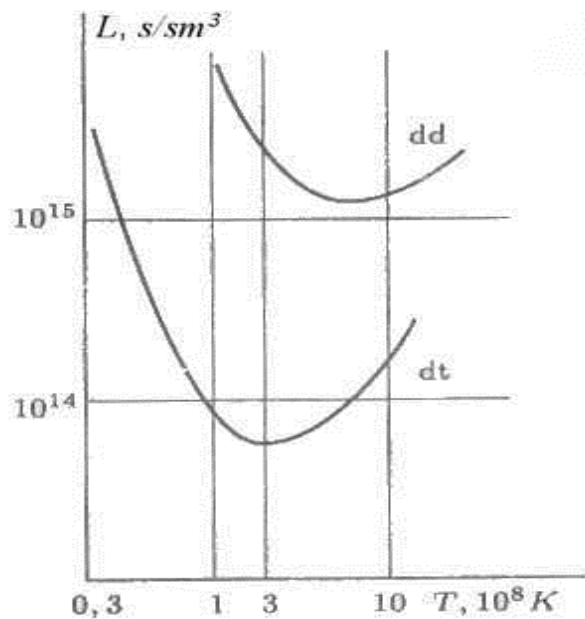
9.5-nji aňlatma öz-özünden gollanylýan termoyadro täsirleşmesiniň döremeginiň şertini aňladýar. Ol 1957-nji inlis alymy Louson tarapyndan alyndy we **Lousonyň şerti** diýip atlandyrylýar. $n\tau$ ululyga plazmanyň saklanma görkezjisi (parametri) diýilýär. Temperaturanyň funksiýasy $L(T)$ ulanylýan termoyadro ýangyjynyň görnüşine (dd ýa-da dt) baglylydyr. $L(T)$ funksiýany tapmaklyk $f_{\text{öz}}(T)$ we $f_{\text{şöh}}(T)$ funksiýalary kesgitlemeklige syrygýar. Olar bolsa nazary hasaplanyp bilner.

Lousonyň şertiniň (9.5) ýerine ýetip başlaýan iň kiçi temperaturasynda öz-özünden gollanylýan termoyadro täsirleşmesiniň iň amatly temperaturasy hökmünde seretmek bolar. Ony $dL/dT=0$ şertden tapmak bolar. 10.7-nji çyzygyda $\eta=1/3$ bolanda dt we dd täsirleşmeler üçin $L(T)$ funksiýalaryň çyzyglary getirilen. Olardan dt täsirleşme üçin amatly temperaturanyň $2 \cdot 10^8 \text{ K}$, dd täsirleşme üçin bolsa 10^9 K töweregidigi görünýär. Çyzyglardan $\eta=1/3$ bolanda Lousonyň şertiniň şu şertleriň ýerine ýetirilmegine syrykýandygy görünýär:

$$\begin{aligned} dt \text{ täsirleşme üçin: } n\tau &\geq 10^{14} \text{ s/sm}^3, & T &\approx 2 \cdot 10^8 \text{ K}; \\ dd \text{ täsirleşme üçin: } n\tau &\geq 10^{15} \text{ s/sm}^3, & T &\approx 10^9 \text{ K}. \end{aligned}$$

Bu ýerden dt termoyadro täsirleşmesini amala aşyrmagyň, dd täsirleşmä seredeniňde ýeňildigi görünýär. Şeýle ýagdaý $10^8 - 10^9 \text{ K}$ temperatura çäginde dt täsirleşmäniň kesiginiň dd

täsirleşmäniň kesiginden, takmynan, iki dereje (10^2) artykmaçdygy bilen baglanyşyklydyr. Bu bolsa, öz gezeginde, temperaturanyň görkezilen çäginde dt täsirleşmäniň rezonans häsiýete eýedigi bilen düşündirilýär. Şonuň üçin häzirki wagtda fizikleriň we inženerleriň tagallalary dt täsirleşmäni amala aşyrmaga ugrukdyrylandyr.



9.6- nji çyzgy

Şeýlelikde, termoyadro täsirleşmesiniň başlanmagy üçin deýteriý-tritiý plazmasyny, takmynan, $2 \cdot 10^8 K$ temperatura, ýagny, takmynan, $10 KeV$ çenli gyzdymaly. Ýylylyk ýadro täsirleşmelerinde bolsa her bir täsirleşme hadysasynda birnäçe megaelektronvolt energiýa bölünip çykýar. Bu energiýa plazmanyň özüni gyzdyrmak üçin gerek bolan energiýadan

$$dx = \frac{dx}{d\varepsilon} d\varepsilon = \frac{dx}{d\varepsilon} M v dv$$

Bu ýerde 10.1-nji aňlatmadan $d\varepsilon/dx$ – iň bahasyny goýup differensial deňlemäni alarys:

$$dx = - \frac{M m v^3 dv}{4 \pi n z^2 e^4 \ln \frac{m v^2}{I(1-\beta^2)}}$$

Bu deňlemäni integrirläp ylgawy alarys:

$$R = \frac{M}{z^2} f(v_0)$$

(10.4)

Bu ýerde v_0 – bölejigiň hereketiniň başlangyç tizligi, $f(v_0)$ funksiýa bolsa şu integral bilen kesgitlenýär:

$$f(v_0) = \int_{v_0}^0 \frac{m v^2}{4 \pi n e^4 \ln \frac{m v^2}{I(1-\beta^2)}} dv \quad (10.5)$$

Bu funksiýa berlen maddada hemme bölejikler üçin birmeňzeşdir. Eger bölejigiň tizliginden gowşak logarifmik baglylygy hasaba almasak, onda ylgawyň takmynan bahasyny alarys:

$$R \approx \frac{M}{z^2} v_0^4$$

Ýöne Boruň deňlemesi (10.1) kiçi tizliklerde agyr bölejikleriň elektrony eýelemesini hasaba almaýar. Şonuň üçin 10.4-nji aňlatma bu ýagdaýy hasaba alýan goşmaça uzynlyk ululygy (C) girizilýär. Bu ululyk başlangyç tizlige v_0 bagly däldir we hemişelikdir. Onuň bahasy dürli bölejikler üçin we

kabul edildi. Howada adaty temperaturada we basyşda 1MeW energiýaly protonlar üçin 10.2-nji aňlatmadaky logarifmik agza, takmynan, dokuza deňdir.

Boruň deňlemesi hil, käbir ýagdaýlarda bolsa mukdar taýdan agyr bölejikleriň maddadaky ionlaşma ýitgisini bölejigiň energiýasynyň giň çäginde düşündirmäge mümkinçilik berýär (1 megaelektronwoltdan onlarça we yüzlerçe gigaelektronwolta çenli). 10.1 we 10.2 aňlatmalardan görnüşi ýaly esasy ýitgiler bölejigiň zarýady we tizligi, maddanyň göwürüm birligindäki elektronlarynyň sany, atomyň ionlaşmasynyň orta energiýasy bilen kesgitlenýärler.

Bölejigiň berlen tizliginde we zarýadynda ýitgi onuň massasy (M) bagly dälär 10.1-nji we 10.2-nji aňlatmalara seret). Bu ýerden deň tizlikli hereket edýän protonlar we pionlar üçin ýitginiň deňligi gelip çyklýar. Eger $v \ll c$, ýagny $\beta \approx 0$ ýagdaý üçin 10.1 aňlatma bölejigiň kinetik energiýasyny $\varepsilon = Mv^2/2$ girizsek, onda alarys:

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{2\pi n z^2 e^4 M}{\varepsilon m} \ln \frac{2\varepsilon m}{M I} \quad (10.3)$$

Bu ýerden görnüşi ýaly $v \ll c$ ýagdaý üçin bölejigiň şol bir zarýadynda we massasynda ionlaşma ýitgisi logarifmik takyklyk bilen bölejigiň massasyna göni baglydyr. Şonuň üçin has agyr bölejigiň ýoly, ýeňile görä, ýogyndyr we gysgadyr. Deňlemedäki z^2 baglanyşyk α – bölejikleriň we köp zarýadly bölejikleriň maddada güýçli haýallanlarynda ýüze çykyar. Bölejigiň maddada doly togtayança, ýagny daş-töwerekdäki gurşaw bilen ýylylyk deňagramlylygyna gelýänçä, geçen ýoluna **ylgaw** (R) diýilýär. Ylgawy hasaplamak üçin dx ýolda $\varepsilon = Mv^2/2$ kinetik energiýany $d\varepsilon$ ululyga çalşyp alarys:

ýüzlerçe esse köpdür. Bu ýagdaý hem termoyadro täsirleşmelerinde peýdaly energiýany almaga ynamly mümkinçilik berýär.

Deýteriý-tritiý plazmasyny, takmynan, 10^8 K temperatura çenli gyzdyrmak üçin şu usullar ulanylyp bilner: 1) plazmanyň üstünden elektrik akymyny goýberip gyzdyrmak (Joul ýylylygy); 2) plazmanyň üstünden elektrik akymy geçende onuň elektrodinamik güýçler tarapyndan gysylmagy; 3) ýokary ýygyllykly elektromagnit meýdany bilen gyzdyrmak; 4) bir ýa-da birnäçe kuwwatly lazerler (takmynan, 50 GWt) bilen şöhlendirmek; 5) ýadrolaryň tizlendirilen bölejikleriň ýa-da atomlaryň desseleri bilen urulmagy; 6) intensiw elektron desseleri bilen gyzdyrmak.

Tejribede ýeňil ýadrolary birikdirmek üçin ilkinji synanyşyk L. A. Arsimow iç we onuň işgärleri tarapyndan edildi. Gyzgyn plazmany reaktoryň kamerasynyň diwaryndan magnit meýdanynyň kömegi bilen süýşürmekligiň mümkindigini I. E. Tamm we A. D. Saharow aýtdylar.

Häzirki wagtda Russiýa, ABŞ, Ýaponiýa we Ýewroatomyň agzalary bolup durýan Ýewropa döwletleri öz güýçlerini birleşdirip, Halkara termoyadro synag reaktoryny döretmegi ylalaşdylar. Onuň esasy maksady termoyadro energiýasyny almagyň we senagat maksatlary üçin ulanmagyň mümkinçiliklerini görkezmekdir.

3.7. Urandan soňraky elementler

Elementleriň periodik (zyygider gaýtalanýan) ulgamynda uran tebigatda bar bolan iň soňky elementdir. Has adyr elementler durnukly bolup bilmezler. Sebäbi ýadrodaky protonlaryň kulon itekleşme güýçlerini dartuw ýadro güýçleri bilen deňleşdirmek mümkin dälär. Şonuň üçin ýadro durnuksyz bolýar. Kulon özara täsiriniň energiýasyna seredeniňde, ýadro

özara täsiriniň energiýasy ýadrodaky nuklonlaryň sanynyna bagly haýal artýar. Ýadroda nuklonlaryň sany az bolanda ýadro özara täsiriň energiýasy kulon özara täsiriň energiýasyndan has köp bolýar. Ýöne nuklonlaryň sanynyň artmagy bilen belli bir pursatdan başlap, dartuw ýadro güýçleri kulon itekleşiş güýçlerinden kiçi bolup başlaýar we ýadro durnuksyz bolýar. Elementleriň periodik ulgamynyň soňunyň bardygy hem şunuň bilen düşündirilýär. Ýöne urandan soň ýerleşýän birnäçe durnuksyz elementleri emeli ýol bilen almak bolýar. Bu elementlere **urandan soňraky elementler** diýilýär. Olar aktinidler hataryna degişlidir. Bu hatardan diňe toriý (${}_{90}\text{Th}$), protaktinidiý (${}_{91}\text{Pa}$) we uran (${}_{92}\text{U}$) tebigatda bardyrlar.

Urandan soňraky elementleriň birinjisi bolan neptuniý (${}_{93}\text{Np}$) 1940-njy ýylda agyr bölejikleriň tizlendirijisinde (siklotrona) tizlendirilen deýtronlar bilen uran şöhlendirilende alyndy. Ilkibaşda deýtronyň düzümine girýän neýtrony ${}^{238}_{92}\text{U}$ uranyň eýelemegi netijesinde uranyň ${}^{239}_{92}\text{U}$ izotopy döredýär. Soňra ýarymdargama döwri 23 minut bolan uranyň bu izotopy elektrony goýberýär we neptuniýa ${}^{239}_{93}\text{Np}$ öwürülýär. Onuň ýarymdargama döwri 2,3 güne deň. Neptuniýniň massa sany 227-den 241-e çenli bolan izotoplary bellidir. Olaryň ýarymdargama döwürleri giň çäklerde üýtgeýär (birnäçe millionlarça ýyla çenli). “Neptuniý” ady Gün ulgamynda Uran planetasyndan soň gelyän Neptun planetasyna meňzeşlikde alyndy.

Indiki urandan soňraky element bolan plutoniý (${}_{94}\text{Pu}$) hem 1940-njy ýylda alyndy. Plutoniý ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ýarymdargama döwri 2,3 gün bolan neptuniýniň ${}^{239}_{93}\text{Np}$ elektrony goýbermegi netijesinde alyndy. Plutoniýniň massa sany 232-den 246-a

töwerekdäki gurşawdaky atomlaryň elektronlaryny alyp ugraýar. Netijede, bölejik iona ýa-da bitarap atoma öwürülýär we daş-töwerek bilen ýylylyk deňagramlylyga eýe bolýar. Çalt tersin zaryadly bölejikleriň ýagdaýy hem şeýle bolýar. Bölejikleriň haýallamagynyň esasy sebäbi ionlaşma we atomyň elektron gabyklarynyň oýandyrylmasy bolýar. Bularyň ikisine hem ionlaşma ýitgisi diýilýär. Kulon güýjüniň daş aralykly täsiri netijesinde agyr bölejik birbada atom gabyklarynyň köp elektronlary bilen özara täsir edişýär. Elektronlar bolsa öz gezeginde bölejige täsir edýärler. Bu täsir tötänleýin, tertipsiz häsiýete eýedir we bölejigiň maddadaky ýoly esasan gönüçyzyklydyr. Ýoluň gönüçyzyklydygy agyr bölejigiň massasynyň elektronyň massasyna göre uludygy bilen hem baglanyşyklydyr. Netijede, bölejik elektron bilen her bir özara täsir edişende örän kiçi ululyga gyşarýar we başlangyç energiýanyň ujypsyz bölegini ýitirýär.

Agyr bölejigiň ýol birligine degişli edilen orta ionlaşma ýitgisini $-d\varepsilon/dx$ hem- $-de$ onuň maddadaky doly ylgawyny (R) kesgitlemek uly gyzyklanma döredýär. $-d\varepsilon/dx$ ululygy Boruň golaýlaşýan deňlemesi bilen kesgitlemek bolar:

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m v^2} \ln \frac{m v^2}{I(1-\beta^2)} \quad (10.1)$$

Boruň deňlemesiniň birnäçe anyklanan görnüşi bar. Olaryň biri şeýle ýazylýar:

$$-\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m v^2} \left[\ln \frac{2m v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (10.2)$$

Bu ýerde n – göwrüm birligindäki elektronlaryň sany, m – elektronyň massasy, z bilen agyr bölejigiň zaryad sany bellenen, I – atomyň ionlaşmasynyň orta energiýasy, $\beta=v/c$ (c ýagtylygyň boşlukdaky tizligi). Hasaplamada agyr bölejik hemişelik v tizlik bilen gönüçyzykly hereket edýär diýip

Häzirki wagta çenli tertip belgisi 119-a çenli hemme elementler alyndy (3-nji belgili goşunda seret).

4. ÝADRO ŞÖHLELENMESINIŇ MADDA BILEN ÖZARA TÄSIRI

Zarýadlanan bölejikleriň, gamma we rentgen şöhlelenmeleriniň maddanyň içinden geçende elektromagnit özara täsiriniň orny uludyr. Olaryň ýokary energiýasy, köplenç, elektronlaryň atomlaryň elektron gabyklaryndaky baglanyşyk energiýasyny hasaba almazlyga we olary erkin diýip hasap etmäge mümkinçilik berýär. Ýadro güýçleriniň gysga täsirliligi sebäpli, köplenç, ýadro özara täsirleriniň orny kiçidir. Neýtronlar diňe atomyň ýadrolary bilen ýadro güýçleri arkaly özara täsir edişýärler.

Madda bilen özara täsiriň häsiýeti boýunça derňelýän bölejikler üç topara bölünýärler: 1) agyr zarýadlanan bölejikler; 2) ýeňil zarýadlanan bölejikler we 3) γ – kwantlar. Ýeňil zarýadly bölejiklere elektron we onuň garşybölejigi pozitron degişlidir. Elektrondan we pozitrondan başga bölejiklere agyr zarýadlanan bölejikler diýilýär. Bir topar bölejiklerden başga topara geçilende madda bilen özara täsiriň häsiýeti hil taýdan üýtgeýär.

4.1. Agyr zarýadlanan bölejikleriň madda bilen özara täsiri

M massaly we ýokary energiýaly agyr zarýadlanan bölejik maddanyň elektronynyň we atom ýadrosynyň elektrik meýdanlary bilen täsir edişýär. Ol bölejik atomlary ionlaşdyrýar ýa-da oýandyrýar. Bölejigiň atomyň ýadrosy bilen ýadro özara täsiri hem amala aşyrylýar. Şeýlelikde, bölejigiň energiýasy kiçelýär we onuň hereketi haýallanýar. Eger bölejik oňyn zarýadlanan bolsa, onda haýallama netijesinde ol daş-

çenli bolan izotoplary belli edildi. Olaryň ýarymdargama döwürleri 20 minutdan $4,9 \cdot 10^{10}$ ýyla çenli aralykda bolýar. “Plutoniý” ady hem Gün ulgamynda Neptun planetasyndan soň, Pluton planetasynyň gelyändigini üçin dakylady. Häzirki wagtda neptuniý $^{239}_{93}\text{Np}$ we plutoniý $^{239}_{94}\text{Pu}$ 10.10-njy täsirleşme netijesinde çalt neýtronlarda işleýän reaktorlarda alynýarlar.

Amerisiý ($Z = 95$) elementi 1941-nji ýylda açyldy. Ýarymdargama döwri 13 ýyl bolan plutoniýniň $^{241}_{94}\text{Pu}$ izotopy elektrony goýbermegi netijesinde amerisiýniň 241-nji izotopyna öwürülýär. Alnan izotopyň ýarymdargama döwri 470 ýyldyr. Amerisiýniň massa sany 237-den 247-ä çenli bolan izotoplary bellidir. Olaryň ýarymdargama döwürleri birnäçe minutlardan, takmynan, 8000 ýyla çenli aralykda bolýar. Amerisiý gram mukdarlarda alyndy.

Kýuriý ($_{96}\text{Cm}$) 1944-nji ýylda 32 MeW energiýaly α – bölejikler bilen plutoniý şöhlelendirilende alynýan önümleriň içinde açyldy. Kýuriýniň massa sany 238-den 252-ä çenli izotoplary belli edildi. Olaryň ýarymdargama döwürleri birnäçe sagatlardan onlarça million ýyla çenli aralykdadyr. Kýuriý milligram mukdarlarda alyndy.

Berkliý ($_{97}\text{Bk}$) 1949-njy ýylda α – bölejikler bilen amerisiýniň 241-nji izotopy şöhlelendirilende alyndy. Berkliýniň massa sany 243-den 251-e çenli bolan izotoplary bellidir. Olaryň ýarymdargama döwürleri, takmynan, 3 sagatdan 7000 ýyla çenli aralykda bolýar. Berkliý mikrogramyň ondan bir bölegi mukdarda alyndy.

Kaliforniý ($_{98}\text{Cf}$) 1950-nji ýylda birnäçe milligram Kýuriýniň 242-nji izotopy 35 MeW energiýaly α –bölejikler bilen şöhlelendirilende ýüze çykarylady. Kaliforniýniň massa sany 240-255 aralykda bolan izotoplary belli edildi. Olaryň

ýarymdargama döwürleri birnäçe minutdan birnäçe ýüz ýyla çenlidir. Kaliforniý mikrogramyň ýüzden bir bölegi mukdarda alyndy.

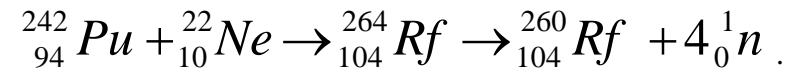
Eýnşteýniý ($_{99}\text{Es}$) we Fermiý ($_{100}\text{Fm}$) birwagtda 1952-nji ýylda Amerikada açyldy. Olar wodorod bombasynyň partlamasyndan soň, agyr elementleri saklaýan nusgalar derňelende ýüze çykaryldy. Eýnşteýniýniň birnäçe minutdan, takmynan, 480 güne çenli ýarymdargama döwürleri bolan massa sany 243-256 aralykdaky izotoplary belli edildi. Fermiýniň bolsa birnäçe sagatdan, takmynan, 80 güne çenli ýarymdargama döwürleri bolan massa sany 242-258 aralykdaky izotoplary bardyr. Eýnşteýniý we fermiý elementleri wodorod bombasynyň partlan ýerinden (Bikini merjen adasy) alnan bir tonna töweregi merjenden juda az mukdarda bölünip alyndy.

Mendelewiý ($_{101}\text{Md}$) 1955-nji ýylda Berkli şäherinde (ABŞ) açyldy. Onuň üçin ýuka altyn barda çaýylan eýnşteýniýniň 253-nji izotopynyň atomlarynyň (baryýogy milliard atom töweregi) ýukajyk gatlagy 41MeW energiýaly α – bölejikler bilen şöhlendirildi. Ilkinji tejribelerde ýarymdargama döwri, takmynan, 3,5 sagat bolan mendelewiniň diňe 17 atomy alyndy. Soňra mendelewiýniň atomynyň birnäçe ýüzüsi ýüze çykaryldy. Mendelewiň massa sanlary 251-261 aralykda bolýar. Olaryň ýarymdargama döwürleri birnäçe sekuntadan birnäçe sagada çenlidir.

Nobeliý ($_{102}\text{No}$) 1958-nji ýylda Stokgolmda $_{96}^{246}\text{Cm}$ Kýuriýni saklaýan nyşana $_{6}^{12}\text{C}$ uglerodyň ionlary bilen şöhlendirilende alyndy. Ýarymdargama döwri 3 sekund töweregi bolan alnan nobeliýniň $_{102}^{254}\text{No}$ izotopy fermiýniň $_{101}^{250}\text{Fm}$ izotopyna öwürülýär. Soňra 1963-nji ýylda Dubna şäherinde bu element başga usul bilen has anyklanyldy.

Lourensiý ($_{103}\text{Lr}$) 1961-nji ýylda Berkli şäherinde açyldy. Soňra bu element 1965-nji ýylda Dubna şäherinde başga usul bilen has ynanarlykly alyndy. Lourensiý elementi bilen aktinidler hatary tamamlanýar.

Urandan soňraky has agyr elementler ($Z > 103$) ýadro täsirleşmeleri netijesinde alynýarlar. Plutoniýden, kýuriýden we kaliforniýden bolan nyşanalar uglerodyň, kislorodyň we neonyň ionlary bilen urlanlarynda güýçli oýandyrylan düzümler ýadrolary emele gelýärler. Olaryň “sowamaklary” üçin birnäçe neýtronlaryň goýberilmegi gerek bolýar. Ýöne şeýle düzümler ýadrolarynyň bölünmeginiň ähtimallygy neýtronlaryň goýberilmeginiň ähtimallygyndan birnäçe esse uly bolýar. Netijede, düzümler ýadrolarynyň ujypsyz bölegi ($10^{-8} - 10^{-10}$) urandan soňraky elementlere öwürülýär. Mysal üçin, plutoniýniň $_{94}^{242}\text{Pu}$ izotopy neonyň $_{10}^{22}\text{Ne}$ tizlendirilen ýadrolarynyň dessesi bilen şöhlendirilende 104-nji element bolan rezerfordiý $_{104}^{260}\text{Rf}$ alyndy. Plutoniý tarapyndan neonyň ýadrosy eýelenende $_{104}^{264}\text{Rf}$ izotopyň düzümler ýadrosy emele geldi. Soňra 10 milliard düzümler ýadrolardan biri dört neýtrony goýberenden soň $_{104}^{260}\text{Rf}$ elementiniň ýadrosy emele geldi:



Neonyň tizlendirilen ýadrolarynyň has kuwwatly desselerinde $_{104}^{264}\text{Rf}$ izotopynyň bir ýadrosy birnäçe sagatda emele gelýär.

Gurşunyň ýadrolaryndan durýan nyşana argonyň, titanyň we hromyň ionlary bilen urlanda hem birnäçe urandan soňraky elementleriň alynýandygy ýüze çykaryldy. Olaryň hemmesiniň ýaşaýyş wagty örän kiçidir we aşa az mukdarlarda alyndy.

ýagtylanyşyň kömegi bilen gözegçilik edip we ony surata düşürip bolýar. Suwuklygyň dykzlygynyň buguň dykzlygyndan 1000 esseden hem uludygy sebäpli, suwuklykda ionlaşdyrmak üçin bölejigiň ýolunyň uzynlyk birligine sarp edilýän energiýa has uludyr. Şonuň üçin bölejikleriň ylgawy ýeterlik gysga bolýar. Bu bolsa uly energiýaly bölejikler bilen birlikde bölejigiň dargamasyny we onuň döredýän täsirleşmesini gözegçilik etmäge mümkinçilik berýär. Köpürjikli kameralaryň kömegi bilen birnäçe sada bölejikler açyldy. Bölejikleriň arasyndaky seýrek täsirleşmeleri ýüze çykarmagyň ähtimallygyny ýokarlandyrmak üçin işçi göwürümi 30m^3 we ondan hem uly bolan köpürjikli kameralar döredildi. Bu kameralary hem güýçli magnit meýdanynynda ýerleşdirýärler.

Bitarap bölejikler yz galdyрмаýarlar. Şeýle-de bolsa olary hem Wilsonyň kamerasynyň ýa-da köpürjikli kameranyň kömegi bilen gaýtadan döreýän hadysalar boýunça ýüze çykarmak bolýar. Eger bitarap bölejik iki ýa-da ondan hem köp dürli ugurlara uçup gidýän zaryadlanan bölejiklere dargayan bolsa, onda olaryň galdyran yzlaryny derňäp başlangyç **bitarap bölejikleriň häsiýetini** kesgitlep bolýar.

Uçgunly kamera. Bu kamera 1957-nji ýylda Kransau we de Bir taraplaryndan oýlanyp tapyldy. Onuň işleýşi gazlarda elektrik deşijiliginiň (proboina) ulanylyşyna esaslanandyr. Kamera biri-birine parallel (ýannaş) tekiz metal elektrodalaryň ulgamyndan durýar. Elektrodlar biraşa birikdirilýärler (11.7-nji çyzgy). Olaryň arasyndaky giňişlik inert gazy (adaty neon) bilen doldurylýar. Elektrodalaryň bir tarapy ýere birikdirilýär, beýlekisine bolsa zygiderli gysga wagty (dowamlylygy 10^{-7}s) ýokary woltly impuls (10-15 kW) berilýär. Eger impuls berlen pursadynda kameradan ionlaşdyryjy bölejik uçup geçse, onda onuň ýoly elektrodalaryň arasyndaky gazdaky elektrik deşijilik

Gamma kwantyň energiýasy 1 megaelektronwoltdan köp bolsa, onda onuň siňdirilmesiniň täze görnüşi esasy bolýar. Bu ýagdaýda (has takygy $h\nu > 1,022\text{MeV}$ bolanda) fotonyň energiýasy elektronyň hususy energiýasyndan iki esseden hem uly bolýar. Atomyň ýadrosynyň elektrik meýdanynynda şeýle foton elektrona we onuň garşylykly bölejigi bolan pozitrona öwürlip biler. Energiýanyň we hereket mukdarynyň saklanmak kanunlaryna görä, fotonyň elektrona we pozitrona öwürilmegi üçin onuň haýsy hem bolsa bir bölejik (ýadro, elektron, foton) bilen çaknyşmagy gerek bolýar. Seredilýän soragda fotonyň ýadro bilen çaknyşmagynyň ähmiýeti uludyr. Gamma kwanty maddanyň ýadrosy bilen çaknyşanda ýadronyň ýanynda elektron-pozitron jübüti döreýär we uçup çykýar. Şol bir wagtda ýadro onuň elektrik meýdany arkaly hereket mukdary berilýär hem-de energiýanyň we hereket mukdarynyň saklanmak kanunlary ýerine ýetirilýär. Fotonlar elektron bilen we öz aralarynda çaknyşanlarynda hem elektron-pozitron jübüti döreýär biler, ýöne olaryň ähtimallyklary örän kiçidir.

Şeýlelikde, $h\nu > 1\text{MeV}$ bolanda, maddada γ – şöhlelenmäniň siňmeginiň doly köpeldijisi μ üç düzüjiden durýar:

$$\mu = \mu_f + \mu_k + \mu_j$$

Bu ýerde μ_f , μ_k we μ_j – degişlilikde atomdaky fotoelektrik, elektrondaky Kompton, we atomyň ýadrosynda elektron-pozitron jübütiniň döremek hadysalaryndaky siňdirilme koeffisiýentleri (köpeldijileri). Koeffisiýentler μ_f we μ_k fotonyň energiýasynyň köpelmegi bilen kiçelýär, μ_j bolsa ulalýar.

Gamma kwantyň täsiri netijesinde elektron-pozitron jübütiniň döremeginden başga ters hadysanyň bolmagy hem mümkindir. Elektron we pozitron biri-biri bilen çaknyşanlarynda olar elektromagnit şöhlelenmä (γ – fotona) öwürülýärler. Şonuň üçin erkin ýagdaýda pozitronyň ortaça

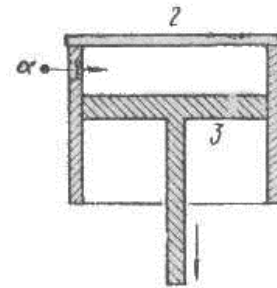
ýaşaýyş wagty örän kiçidir. Mysal üçin, adaty şertlerde bu wagat gursunda 10^{-10} s, howada bolsa 10^{-5} s töweregidir.

4.4. Radioişjeň şöhlelenmäniň janly bedene täsiri we ondan gorumak

Radioişjeň maddalaryň şöhlelenmesi hemme janly bedenlere **güýçli zaýalaýjy täsir** edýär. Bu täsir molekulalar we öýjükler hem-de aýry agzalar ýa-da tutuş beden derejesinde ýüze çykýar. Şöhlelenmäniň ýeterlik uly mukdarynda janly bedenler öljärler. Gowşak şöhlelenmeler öýjüklere düýpli zeper ýetirip we howply keselleri (şöhle keseli) döredip biler. Zaýalanmalar bölejigiň görnüşine we şöhlelenmäniň mukdaryna baglylykda dürli bolýarlar. Ondan başga-da, şöhlelenmäniň täsiri dürli bedenler we agzalar üçin dürli bolup biler.

Bedeniň şöhlelendirmä sezewar bolmagy daşky we içki bolup biler. Ýadro partlamalary, ýadro reaktorlary, tizlendirijiler, rentgen desgalary, şeýle hem radioişjeň maddalar we tebigy çeşmeler (dag jynslary, radioişjeň bejeriş suwlary, kosmos şöhleleri) **daşky şöhlelendirmäniň** çeşmeleri bolup bilerler. **Içki şöhlelendirme** iýmitiň düzümine we bedeniň dokumalaryna girýän radioişjeň elementler ($^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{226}_{88}\text{Ra}$), bedene bejeriş ýa-da barlag üçin girizilýän, şeýle hem içe heläkçilikli ýagdaýlarda düşen (agyz, dem alyş ýollary, ýaralar bilen) radioişjeň maddalar bilen şertlenendir.

Şöhlelenmäniň beloklaryň molekulalaryny, nuklein kislotalaryny we beýleki öýjük gurluşlaryny zaýalamagy baglanyşyklaryň üzülmeginde, birikdirmeleriň emele gelmeginde we başgalarda ýüze çykýar. Şöhlelenmäniň ýokary mukdarlarynda çylşyrymly organiki birleşmeler ownuk bölekler öwürülärler. Giňişlikdäki gurluşynyň şöhlelenme



11.5-nji çyzgy



11.6-njy çyzgy

Aralaşma kamerasy. Bu kamerada hem, Wilsonyň kamerasyndaky ýaly, işçi madda hökmünde gaty doýurylan bug ulanylýar. Ýöne gaty doýurylan hal, adiabatik giňelme däl-de, aralaşma netijesinde döredilýär. Bu ýerde 10^0S töweregi temperaturaly kameranyň gapagynda ýerleşen spirtiň buglarynyň gaty uglekisłota bilen sowadylan (-70^0S çenli) düýbe alaşmasy bolýar. Netijede düýbüň golaýynda galyňlygy takmynan 5 santimetr bolan gaty goýurylan buguň gatlagy emele gelýär. Şu gatlakda hem zaryadlanan bölejikler yz galdyryýarlar. Wilsonyň kamerasyndan tapawutlylykda, **aralaşma kamerasy üznüksiz işleýär.**

Köpürjikli kamera. Ýokary energiýalary (ýüzlerçe megaelektronwolt we ondan hem uly) bolan bölejikler üçin köpürjikli kameralary ulanýarlar. 1952-nji ýylda amerikan fizigi D. Glezer tarapyndan oýlanyp tapylan bu kamerada ýokary basyşda gaty gyzygyn uçujy suwuklyk (wodород, freon, propan we başgalar) ýerleşýär. Basyş çalt kiçeldilende suwuklyk käbir wagtyň dowamynda durnuksyz gaty gyzygyn halda bolýar. Şol döwürde suwuklyga zaryadlanan bölejik düşende onuň ýolunda döreyän ionlarda buguň köpürjikleri emele gelýärler. Dörän buguň köpürjikleriniň zynjyryny ýörite

azalmagy sebäpli adiabatik giňelýär we sowayar. Netijede, bug gaty doýurylan durnuksyz hala geçýär.

*Eger şu pursatda kamera ionlaşdyryjy bölejikler (mysal üçin, α – ýa-da β – bölejikler) uçup düşse, onda bug döreýän ionlarda suwuk hala öwrülýär. Şeýlelikde, bölejigiň hemme geçen ýoly suw damjajyklary bilen örtülen bolýar. Kameranyň işçi göwrümini ýagtylandyryp bu ýoly görmek we surata düşürmek bolýar. Haçanda bölejigiň energiýasy azalyp kamerada ionlaşma bes edilende, onuň geçen ýoly gözegçilik edilmeýär. P. L. Kapisa (1894-1984) we D. W. Skobelsin (1892-1990) güýçli magnit meýdanynnda ýerleşdirilen Wilsoňnyň kamerasyňnyň kömegi bilen bölejikleri derňemegiň usulyny işläp düzdüler. Şeýle ýagdaýda bölejigiň geçen yzy egrelýär. Bu egrelmäniň ugry we radiusy boýunça zaryadyň alamaty hem-de bölejigiň impulsy hakynda maglumat almak bolýar. Ionlaşmanyň häsiýeti we bölejigiň galdyran yzynyň uzynlygy boýunça bolsa bu bölejigiň energiýasyny bahalandyryp bolýar. Mysal üçin, α – bölejikleriň galdyryýan yzy elektronyňka seredeninde has ýogyn, gysga we gönüçzykly bolýar. Bu bolsa α – bölejigiň massasynyň elektronyň massasyndan has uludygy (7350 esse) bilen düşündirilýär. Şeýlelikde, bölejigiň massasy we tizligi kesgitlenýär. 11.6-njy çyzygyda Wilsoňnyň magnit kamerasynda gözegçilik edilýän α - bölejikleriň galdyran yzy şekillendirilen. İşçi göwründäki gazyň dykzlygynyň kiçidigi sebäpli **Wilsoňnyň kamerasynda ýokary energiýaly bölejikleri bellige alyp bolmaýar.** Wilsoňnyň kamerasyňnyň işleýşi hem haýaldyr.*

sebäpli ýoýulmagy netijesinde käbir molekulalar (mysal üçin, fermentleriň molekulalary) özüniň biologik işjeňligini ýitirýärler. Bu ilki bilen oýjukdäki maddalaryň alyşmagynyň tapdan düşmeginde, bozulmagynda ýüze çykyar we onuň heläk bolmagyna getirip biler. Şöhlenenmä iň duýgur öýjügiň ýadrosy bolup durýar. Ol zaýalananda öýjügiň bölünmäge ukyplylygy bozulýar, beloklaryň we nuklein kislotalaryň birleşmegi bulaşýar. Hromosomlaryň inçe gurluşynyň zaýalanmagy has agyr hasaplanylýar. Bu ýagdaýda onuň bir ýa-da bir wagtda iki zynjyrynyň üzülmegi bolup geçýär. Olaryň bölekleri birigip bilerler. Sonda birnäçe bölekler aýrylyp bilner we hromosomlaryň nesil galyndylarynyň (geniň) gurluşy bozulýar. Bu bolsa öýjükleriň ýaşayşa ukyplylygynyň ýitmegine ýa-da birnäçe nesilden soň hem ýüze çykyp biljek güýçli nesil üýtgemesine (mutasiýa) getirip biler.

Radioişjeň şöhlenenmäni kabul etmegiň islendik mukdary hromosomlaryň nesil galyndylaryny öwürülsiksiz üýtgetmäge ukyplydyr we nesil üýtgemelerine getirip biler. Öýjükleriň heläk bolmagyna getirýän sebäpleriň esasasy hromosomlaryň zaýalanmagy we maddalaryň alyşmagynyň bozulmagy netijesinde radiozäherli maddalaryň (radiotoksinleriň) toplanmagy hasaplanylýar.

Radiobiologiýa öýjükleriň radioişjeň şöhlenenme sebäpli zaýalanmagynyň geçişini we şertlerini öwrenmegi dowam edýär.

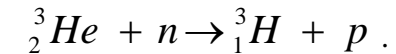
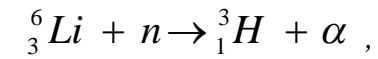
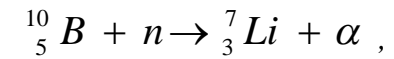
Çalt bölünýän öýjükler şöhlenenmä aýratyn duýgurdyr. Şonuň üçin şöhlenenme gan emele getiriş agzalary (süňk ýiligi, dalak, limfatik mázler), jyns we kekirdewügiň iki gapdalynda ýerleşýän dilim-dilim mázleri, içegeleriň nemli bardalary üçin has howpludyr. Olaryň zaýalanmagy leýkemiýa keseline, ýagny gan emele gelmeginiň bozulmagyna (ak ganlylyga) getirýär. Şöhle kabul edilenden soň, ganda leýkositiň we limfositiň mukdary azalýar. Şöhlelendirme çağa bedenine

(esaslan hem enesiniň göwresinde) uly zyýan ýetirip biler. Başga bir tarapdan, howply çiş (rak) keselleriniň çalt bölünýän öýjükleriniň şöhlelenmä ýokary duýgurlygy bu keseli bejermekde ulanylýar. Nesli haýal çalyşýan öýjükleriň (nerw, süňk we beden etiniň dokumalary) şöhlelenmä duýgurlygy pesdir.

Ýadro reaktorlaryň we radioişjeň maddalar ulanylýan birnäçe abzallaryň döredilmegi janly bedenleri radioişjeň şöhlelenmelerden goramaklygy esasy mesele edip goýdy. Şöhlelenmäniň madda, şol sonda janly bedenlere hem täsiri şöhlelenmäniň siňdirilen mukdary bilen häsiýetlendirilýär.

Şöhlelenmäniň siňdirililen mukdary (D_s) diýip, maddanyň siňdiren energiýasynyň (ΔE_s) bu maddanyň massasyna (m) gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga aýdylýar: $D_s = \Delta E_s / m$. Halkara ulgamynda siňdirilen mukdaryň birligi hökmünde greý (Gr) kabul edildi: $1Gr = 1J/kg$. Bir greý $1kg$ massaly madda $1J$ ionlaşdyryjy şöhlelenmäniň energiýasy berlendäki şöhlelenme mukdaryna deňdir. Öň ulgamda däl birlik bolan rad birligi giňden ulanyldy: $1rad = 10^{-2} J/kg = 0,01Gr$.

Şöhlelenmäniň siňdirilen mukdaryny ölçemek örän kyndyr. Sonuň üçin şöhlelenmäniň howany ionlaşdyryjy täsiri boýunça baha berilýän şöhlendirme (ekspozisiýa) mukdary diýen düşünje ulanylýar. **Şöhlendirme mukdary (D_e) diýip, howa şöhlendirilende boşan elektronlar tarapyndan döredilen hemme birmeňzeş alamatly ionlaryň elektrik zaryadlarynyň (q) bu howanyň massasyna (m) gatnaşygyna deň bolan fiziki ululyga aýdylýar:** $D_e = q/m$. Halkara ulgamynda onuň ölçege birligi $1Kl/kg$ deňdir. Şöhlendirme mukdarynyň ulgamda däl birligi rentgendir (R): $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} Kl/kg$. 1 rentgen şöhlendirme mukdary – bu adaty şertlerde $1sm^3$ gury howada $2,08 \cdot 10^9$ jübüt ionlary döredýän ikilenji elektronlary öz täsiri bilen emele getirýän şöhlendirmäniň mukdarydyr. Eger ony $1 kg$ maddany ionlaşdyrmaga gidýän



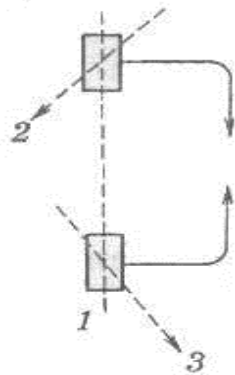
Neýtronlardan alynýan signaly elektronlar ýa-da γ – kwantlar tarapyndan alynýan impulslardan tapawutlandyrmak üçin neýtronuň gatnaşmagyndaky täsirleşmelerde alynýan bölejikleriň has köp ionlaşma döretmek ukyby ulanylýar. Sonuň üçin güýçlendirijiniň girişinde gowşak impulsary goýbermeýän gurluş ulanylýar. Neýtronlaryň energiýasynyň ulalmagy bilen şeýle sanaýjylaryň täsirliligi kiçelýär. Sebäbi neýtronlaryň tizliginiň ulalmagy bilen täsirleşmeleriň ähtimallygy azalýar. Çalt neýtronlary bellige almak üçin olary haýalladýarlar ýa-da protonlar bilen çaknyşdyrýarlar. Bu çaknyşmada çalt neýtron protona öz impulsyny berýär.

5.2. Bölejikleriň geçen ýoluna gozegçilik etmek üçin abzallar

Bölejikleriň yzlaryny gözegçilik etmek üçin Wilsonyň kamerasy, aralaşma (diffuzion) kamerasy, köpürjikli (puzyrkowyý) kamera, uçgunly kamera we ýadro fotoemulsiýa usuly ulanylýar.

Wilsonyň kamerasy. Bu abzal 1912-nji ýylda inlis fizigi Ç. Wilson (1869-1959) tarapyndan oýlanyp tapyldy. Ol uçup gelýän owunjak bölejikleriň döredýän ionlarynyň gaty doýurylan bug üçin suwuk hala geçmek merkezi bolup durýandygyna esaslanandyr. Wilsonyň kamerasy (11.5-nji çyzgy) silindr görnüşli gapdan (1), aýna gapakdan (2) we porşenden (3) durýar. Porşen çalt aşak süýşürilende kameranyň işçi göwrümindäki suwuň ýa-da spirtiň buglary basyşyň

boýunça birikdirilen diýip aýdylýar. Birikdirmegiň dürli shemalaryny ulanyp birnäçe hadysalardan gyzyklanma döredýänini saýlap almak bolýar. Mysal üçin, biri-biriniň yzynda goýlan we gabat gelme shemasy esasynda birikdirilen iki sanaýjy (11.4-nji çyzgy) olaryň bilelikdäki okunyň ugry boýunça uçup baryan bölejigi (1) bellige alýar, (2) we (3) bölejikleri bolsa bellige almaýar. Ýarymgeçirijiniň ulanylyan gatlagy inçedir. Şonuň üçin çalt bölejikler energiýasynyň bir bölegini saklap, bu gatlakdan geçýärler. Ýöne pes energiýa eýe bolan haýal bölejikler üçin ýarymgeçiriji sanaýjylar has amatlydyr.



11.4-nji çyzgy

γ – kwantlaryň sanaýjylarynda fotoelektrik, jübüt bölejikleriň döremek we Komptonýň hadysalary ulanylýar. Bu hadysalaryň hemmesinde çalt elektronlar (pozitronlar) döreýärler. Olary bolsa beýan edilen sanaýjylaryň hemmesi bilen hem bellige almak mümkindir. Ýöne Geýgeriň-Mýulleriň sanaýjysynyň γ -kwantlara görä täsirliligi pesdir. Onuň üçin ýalpyldama ýa-da ýarymgeçirijiligi sanaýjylar ulanylsa has amatly bolar. Neýtronlaryň sanaýjylary gaýtadan döreýän bölejikleri bellige almak esasynda işleýärler. Mysal üçin, eger sanaýjynyň işçi maddasynda bor, litiý ýa-da geliý saklanýan bolsa, onda ýeňil bellige alyp bolýan zaryadlanan çalt bölejikleriň döremegine şu täsirleşmeler alyp baryar:

energiýa üçin hasaplap görsek, onda takmynan $0,88 \cdot 10^{-2}$ J/kg alarys. Şeýlelikde, 1 rentgen 1 rada barabardyr: $1R \approx 1 \text{ rad} = 0,01\text{Gr}$.

Şöhlelenmeleriň janly bedeniň dokumalaryna täsiri diňe şöhlelendirmäniň mukdary bilen däl-de, ionlaşdyryjy bölejikleriň tebigaty bilen hem kesgitlenýär. Agyr bölejikler (α – bölejikler, neýtronlar, protonlar, çalt ionlar) ýeňil bölejiklere (β -, γ - we R – şöhleler) seredeniňde janly bedene uly zyýan ýetirýärler. Neýtronlaryň güýçli aralaşygy akymlary has howpludyr. Şonuň üçin şöhlelenmäniň dürli görnüşleriniň biologik täsirini deňeşdirmek üçin biologik işjeňligiň göräleýin köpeldijisi (BIGK) ulanylýar. 10.1-nji jedwelde şöhlelenmäniň dürli görnüşleri üçin BIGK-nyň takmynan bahalary getirilen.

10.1-nji jedwel

Şöhlelenmäniň görnüşi	BIGK
R-, γ - we β - şöhlelenme	1
Haýal neýtronlar	5
Çalt neýtronlar	10
Protonlar	10
α –bölejikler	20
Ýadro bölünmeleriniň bölekleri	20

Eger bedene bir wagtda şöhlelenmäniň dürli görnüşleri täsir etse, onda jemleýji täsir biologik mukdarlaryň jemi bilen ölçenilýär.

BIGK-ny hasaba alyp, maddanyň kabul edýän mukdaryna deň derejeli (ekwiwalent) diýilýär. Onuň ölçeg birligi bolup rentgeniň biologik deň derejeliligi (rbd) hyzmat edýär. Biologik mukdar (D_b) we şöhlelendirme mukdary (D_e) $D_b = D_e \cdot \text{BIGK}$ gatnaşyk bilen baglanyşyklydyr. 10.1-nji jedwelden görnüşi ýaly, R-, γ - we β – şöhlelenmeler üçin 1rbd, takmynan, 1 rentgene gabat gelýär. Emma α – bölejik olardan 20 esse

howpludyr. Şonuň üçin bu bölejik üçin 1 rentgen eýýäm 20 rbd gabat gelýär. 1 rbd ululyk halkara ulgamynda 10^{-2} Ziwerte (Zw) deňdir.

Şöhlelenmäniň mukdarynyň kuwwaty ýa-da radioişjeň derejesi diýip, maddanyň wagt birliginde kabul eden mukdaryna aýdylýar. Şöhlelenmäniň siňdirilen mukdarynyň kuwwaty $P_s = D_s / \Delta t$ gatnaşyk bilen aňladylýar (Δt – şöhlelendirmäniň dowamlylygy). Onuň ölçege birligi bolup Gr/s ýa-da R/sag hyzmat edýär. Şöhlelendirme mukdarynyň kuwwaty $P_e = D_e / \Delta t$ gatnaşyk bilen aňladylýar. Onuň ölçege birligi halkara ulgamynda A/kg bolup durýar.

Şöhlelendirmäniň derejesini nola çenli azaltmak mümkin däl. Radioişjeň izotoplaryň azrak mukdary hemişe howada, suwda, toprakda, azyk önümlerinde, adamyň öz bedeninde bardyr. Ondan başga-da, biz kosmos şöhleleri tarapyndan üznüksiz şöhlelendirmä sezewar bolýarys. Bularyň hemmesi, takmynan, sagatda 1-20 mikrorentgene (mkR/sag) deň bolan şöhlelendirmäniň tebigy derejesini döredýär. Bir ýylda bu $10 \cdot 365 \cdot 24 = 10 \text{mkR} = 0,1 \text{R}$, ömrüň dowamynda bolsa, takmynan, 10R mukdary berýär. Şöhlelenmegiň şeýle derejesine adam doglandan bäri öwrenişendir. Şonuň üçin şöhlelendirmäniň 0,1R töweregi mukdary howpsuz hasaplanylýar. Takmynan, şeýle mukdary adam bir gezek rentgen barlagyndan geçende alýar.

Ýeriň radioişjeň derejesi, esasan, şu tebigy çeşmeler bilen kesgitlenýär:

$^{220}_{86} \text{Rn}$ we $^{222}_{86} \text{Rn}$	– 50%
$^{40}_{19} \text{K}$	– 15%
kosmos şöhleleri	– 15%
uranyň maşgalasynyň elementleri	– 20%

Bu ýerde göterimde (%) degişli çeşmeleriň umumy radioişjeň derejä goşandy görkezilen.

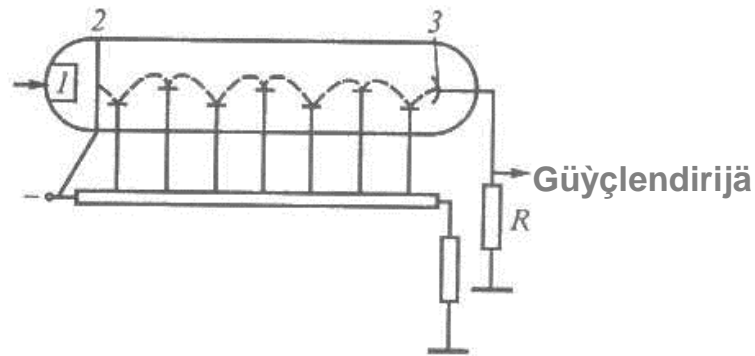
ulanmak bolýar. Bu bölejikleri beýleki bellige alyjy gurluşlar bilen tapawutlandyryp bolmaýar. Çerenkowiň-Wawilowiň hadysasynda ýagtylyk bölejigiň hereketiniň golaýynda şöhlelenýär. Şöhlelenmäniň ýaýramagynyň ugurlarynyň we bölejigiň hereketiniň ugrunyň arasyndaky burç şeýle kesgitlenýär:

$$\theta = \arccos \frac{c}{n v} . \quad (11.1)$$

Bu ýerde c/n – gurşawdaky ýagtylygyň tizligi, v – bölejigiň tizligi. 11.1-nji baglanyşykdan görnüşi ýaly, Çerenkowiň sanaýjysy bir bölejigi beýlekilerden bölüp aýyrmaga mümkinçilik berýär. Mysal üçin, tejribede v_1 we v_2 tizlikleri bolan bölejikler alynýan bolsa, onda ýagtylygyň tizligi $v_1 < c/n < v_2$ deňsizligi kanagatlandyran maddany saýlap alyp **has çalt bölejikleri bellige almak** bolýar. Ondan başga-da, Çerenkowiň sanaýjylary **uçup gelýän bölejikleriň ugruny kesgitlemäge** mümkinçilik berýär.

Ýarymgeçiriji sanaýjy. Häzirki wagtda ýarymgeçiriji sanaýjylar giňden ulanylýarlar. Ol ýarymgeçiriji diod bolup, oňa esasy elektrik akymyny äkidijiler geçiş gatlagyndan çekilerler ýaly alamaty bolan naprýaženiýe berilýär. Şeýlelikde, kadaly halda diod ýapyk bolýar. Geçiş gatlagynda zarýadlanan çalt bölejikler elektronlary we deşijekleri döredýärler. Olar bolsa degişli elektrodlar tarapyndan çekilip alynýar. Netijede, bölejik tarapyndan döredilen elektrik akymyny äkidijileriň mukdaryna göni bagly elektrik impulsy emele gelýär. Ýarymgeçiriji sanaýjylary köplenç toparlara birleşdirýärler we olary hadysalary bir wagtda birnäçe abzallar bilen ýa-da onuň tersine, diňe bir abzal bilen bellige alar ýaly edip birikdirýärler. Birinji ýagdaýda sanaýjylar gabat gelme shemasy, ikinji ýagdaýda bolsa gabat gelmezlik shemasy

ýüzlerçe müň esse güýçlenýär. Bu bolsa energiýasy uly bolmadyk bölejikleri hem bellige almaga mümkinçilik berýär. Signalyň intensiwligi ilkinji bölejigiň energiýasy bilen çyzykly baglanyşyklydyr. Bu bolsa **bölejikleriň sany** bilen birlikde olaryň **energiýalar boýunça paýlanyşyny** hem kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Ýapyldama sanaýjylarynyň tizligi sekuntda 10^5 bölejige ýetýär.



11.3-nji çyzgy

Cerenkownyň sanaýjysy. Bu sanaýjylarda Çerenkownyň-Wawilownyň şöhlelenmesi ulanylýar. Haçanda zaryadlanan bölejik gurşawda ýagtylygyň bu gurşawdaky tizliginden ($v = c/n$, n – döwürleme görkeziji) hem uly tizlik bilen hereket edende şeýle şöhlelenme döreýär. Şeýle ýagdaýda bölejik konus görnüşli ýagtylyk tolkunyny oýandyryýar. Bu ýagtylyk 1934-nji ýylda S. I. Wawilownyň ýolbaş-çylygynda işlän P. A. Çerenkow tarapyndan ýüze çykarylýar. Alnan ýagtylygy ýygnap, ýalpyldama sanaýjydaky ýagtylyk ýaly, elektron köpeldijilere ugrukdyryp bolýar. Şeýlelikde, Çerenkownyň şöhlelenmesi üçin bölejigiň tizligi $v > c/n$ bolmalydyr. Çerenkownyň şöhlelenmesini ýokary energiýaly bölejikleri bellige almak üçin

Adam üçin radioişjeň derejäni döredýän tebigy çeşmelerden şöhlelenendirme mukdarynyň çägi 10.2-nji jedwelde görkezilen (mkR/ýyl).

10.2-nji jedwel

Daşky şöhlelenendirme		Içki şöhlelenendirme	
Kosmos şöhleleri	300	40 19 K	180
40 19 K	120	222 86 Rn	800
238 92 U we 232 90 Th maşgalalary	230	220 86 Rn	130

Şöhlelenirmäniň ahyrky ýol bererlikli mukdary diýip, adamyň ýaşayan tebigy radioişjeň derejesi bilen takmynan gabat gelyän mukdar hasaplanylýar. Şöhlelenmäniň 100 rentgen (has takygy 100 rbd) mukdary agyr şöhle keseline getirýär. 400-700 rentgen mukdary ölüm howpludyr.

Şöhlelenmäniň mukdaryny ýa-da mukdaryň kuwwatyny ölçemek üçin dozimetrler diýip atlandyrylýan ýörite abzallar ulanylýar. Datçikleri ionlaşdyryjy kamera bolup hyzmat edýän dozimetrler has ýaýrandyr. Datçigiň çykyşy ýörite elektron shemalar arkaly şkalasy mukdar ýa-da mukdaryň kuwwatyna sazlanan görkeziji abzala birikdirýärler. Soňky wagtlarda jübi dozimetrleri giň ulanylyşa eýe boldy. Ol işläp başlamazyndan öň, zaryadlandyrylýan kiçijik elektroskop bolup durýar. Ionlaşdyryjy şöhlelenme elektroskopy zaryadsyzlandyrylar. Zaryadsyzlanmak derejesi boýunça kabul eden radioişjeň şöhlelenmesi kesgitleňýär. Jübä goýlan dozimetr adamyň işlän döwründe kabul eden radioişjeň mukdaryny görkezýär.

Radioişjeň şöhlelenmeden goranmak üçin birnäçe çäreler görülyär. Goranmagyň iň ýönekeý usuly şöhlelenmäniň çeşmesinden ýeterlik daş aralyga gitmekdir. Howada siňmäni

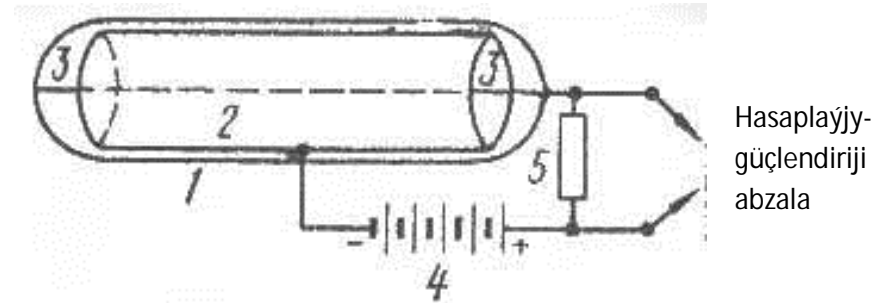
hasaba almanynda hem şöhlendirmäniň intensiwligi çeşmeden aralygyň kwadratyna ters baglanyşykly kemelýär. Şonuň üçin radioişjeň maddany elň bilen almaly däl. Onuň üçin uzyn tutawaçly ýörite atagzylary ulanmaly.

Şöhlennmäniň çeşmesinden ýeterlik uly aralyga gitmegiň mümkinçiligi bolmadyk ýagdaýynda şöhlennmeden goranmak üçin siňdirýän materiallardan päsgelçilik ulanylýar. Daşky α – bölejikleriň şöhlendirmesinden goranmak örän ýönekeýdir. α – bölejikleriň ylgawynyň örän kiçidigi sebäpli, olar maddanyň ýuka gatlagy, mysal üçin, 1 gat kagyz, eşikler, howa tarapyndan siňdirilýärler. Ýöne α - bölejikler howa we ýmit bilen bedeniň içine düşse örän howpludyr.

β – bölejikleriň ylgawy olaryň energiýasyna baglydyr. Energiýasy 3MeV töweregi bolan β – bölejikleriň howadaky ylgawy 3 mm çenli bolýar. Şeýle β – bölejiklerden 3 mm galyňlykly agaç, aýna, plastmassa ýa-da islendik ýeňil metal gorap biler. γ – şöhleleriň we neýtronlaryň aralaşylyk ukybynyň uludygy sebäpli, olardan goranmak örän çylşyrymlydyr.

γ – şöhlelerden goranmak üçin suwuň, betonyň, kerpiç diwaryň galyň (1 metre çenli) gatlagy hem-de 10sm çenli galyňlykly gurşunyň gatlagy ulanylýar. Haýal neýtronlar bor we kadmiý tarapyndan siňdirilýärler. Çalt neýtronlar önünden grafitiň kömegi bilen haýalladylýarlar.

Has uly kuwwatly şöhlennmäniň çeşmelerinden goranmak üçin, köplenç, galyňlygy birnäçe metr bolan beton diwarlary ulanylýar. Ondan başga-da, adatça, şöhlennme Ýer tarapyndan hem siňdiriler ýaly bu çeşmeler çukurda ýerleşdirilýär.



11.2-nji çyzgy

Ýalpyldama sanajyysy. 1903-nji ýylda U. Kruks α - bölejikleriň käbir maddalara düşende gowşak ýalpyldy döredýändigini ýüze çykardy. Rezerford we başgalar hem α - bölejikleri derňänlerinde ýalpyldy beriji sinkiň sulfidi (ZnS) çalnan perdeleri ulandylar. Şeýle madda düşen α – bölejigiň her biri bir ýagtylyk ýalpyldyny döredýändigini ýüze çykaryldy. Bu hadysany α - bölejikleri sanamak üçin ulanmak bolar. Geçen asyryň 40-njy ýyllarynyň ahyrynda ýalpyldama sanajylary döredildi. Şeýle sanajyda ýeterlik uly energiýaly bölejikler düşende ýalpyldy beriji madda (1) bar (11.3-nji çyzgy). Her bir ýalpyldy elektron köpeldijiniň duýgur fotokatodyna (2) täsir edýär we ondan elektronlary urup çykarýar. Emele gelen fotoelektronlar howasy seýreklenendirilen turbajykdaky has ýokary potensially kömekçi elektrodla gönükdirilýärler we ol ýerde has köp gaýtadan elektronlary urup çykarýarlar. Gaýtadan alynýan elektronlar hem bir elektroddan beýlekä uçup, iň soňunda anoda (3) baryp düşýärler. R garşylykda alnan elektrik impulsy güýçlendirijiniň girişine berilýär we haýsy hem bolsa bir sanajyny herekete getirýär. Kömekçi elektrodla urulýan her bir elektronyň 3-den 10-a çenli elektrony goparyp çykarýandygy üçin signal onlarça we

sanyna (N) deňölçeqli baglydyr. Bu ýagdaýda, ionlaşma kamerasyndaky ýaly, impulsyň ululygy boýunça bölejikleri tapawutlandyryp we olaryň energiýasyny kesgitläp bolýar. Şeýle abzala **deňölçeqli sanajyýy** diýilýär.

Geýgeriň – Mýulleriň sanajyýsy. Eger elektrodlara 800-1000 W aralykda naprýaženiýe berilse, onda elektronlaryň we ionlaryň kuwwatly toplumy döreýär. Bu ýagdaýda bolsa ionlaryň umumy sany ilki başdaky ionlaşmanyň ululygyna bagly bolmaýar. Şeýle sanajy Geýgeriň-Mýulleriň (gysgaça Geýgeriň) sanajyýsy diýilýär. Ol 1907-nji ýylda H. Geýger we E. Rezerford tarapyndan oýlanyp tapyldy. 1928-nji ýylda bolsa nemes fizikleri H. Geýger we W. Mýuller tarapyndan kämilleşdirildi. Geýgeriň-Mýulleriň sanajyýsynyň çyzgysy 11.2-nji çyzgyda görkezilen. Basyşy 10^4 Pa töweregi bolan gaz bilen doldurylan aýna gapda (1) silindr görnüşli kondensator ýerleşýär (2). Onuň içki elektrody bolup metal sapak (3) hyzmat edýär. Kondensatora iýmitlendiriş çeşmesinden (4) ýokary (~10 Om) garşylygyň (5) üsti bilen naprýaženiýe berilýär. Eger kondensatora zarýadlanan owunjak bölejik uçup düşse, onda onuň gazy ionlaşdyrmasy gaz zarýadsyzlanmasyny döreder. Şonda kondensatoryň zynjyryndan garşylykdaky (5) naprýaženiýäniň peselmegine getirýän gysga wagtlaýyn tok geçer. Naprýaženiýeniň bu yrgyldysy güýçlendirilýär we bellige alynýar. Şeýlelikde, **Geýgeriň-Mýulleriň sanajyýsy her bir ionlaşdyryjy bölejigi aýratyn bellige alýar.** Şunlukda sanamagyň tizligi sekuntda 10^4 bölejige ýetýär.

5.ÝOKARY ENERGIÝANYŇ FIZIKASYNDAKY TEJRIBE USULLARY

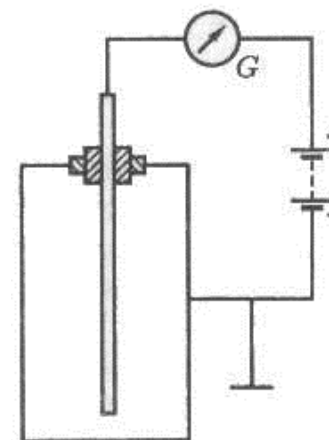
Sada bölejikleri (elektronlary, protonlary, neýtronlary, uly energiýaly fotonlary we başgalary), şeýle hem çylşyrymly owunjak bölejikleri (α – bölejikleri, deýtronlary we şuna meňzeşleri) gözegçilik etmek, bellige almak, tizlendirmek üçin dürli abzallar (detektorlar, tizlendirijiler) we usullar ulanylýar. Ionlaşdyryjy bölejikleri işçi maddadan geçende, olara galdyryňan yzlary boýunça gözegçilik etmek bolýar. Yzlaryň häsiýeti bölejigiň zarýadynyň alamaty, onuň energiýasy, impulsy we şuna meňzeşler hakynda maglumat almaga mümkinçilik berýär. Zarýadlanan bölejikler öz ýolundaky molekulalary ionlaşdyrýarlar. Bitarap bölejikler yz galdyрмаýarlar. Ýöne olar zarýadlanan bölejiklere dargan ýa-da haýsy hem bolsa bir ýadro bilen çaknyşan pursady özlerini ýüze çykaryp bilerler. Mysal üçin, γ – kwantlar atomlardan we molekulalardan ýa-da abzalyň içki diwarlaryndan elektronlary goparyýarlar, neýtronlar bolsa zarýadlanan bölejikleri emele getirip ýadro öwrülişiklerini döredýärler. Şeýlelikde, bitarap bölejikler hem özleriniň döredýän zarýadlanan bölejikleriniň ionlaşdyrmasy boýunça ýüze çykarylýar.

Ionlaşdyryjy bölejikleri bellige alýan abzallar **iki topara** bölünýärler. Birinji topara bölejigiň uçup gelşini bellige alýan, käbir halatlarda bolsa, onuň energiýasyny bilmäge mümkinçilik berýän, gurluşlar degişlidir. Ikinji topara bolsa maddalardaky bölejikleriň yzlaryna (trek) gözegçilik etmäge mümkinçilik berýän abzallar degişlidir.

5.1. Bölejikleri bellige alyjy abzallar

Bellige alyjy abzallara ionlaşma kamerasy, gaz zarýadsyzlanma sanaýjylary, Geýgeriň-Mýulleriň sanaýjylary, ýalpyldama (ssintillýasiýa) sanaýjylary, Çerenkowiň sanaýjylary we ýarymgeçiriji sanaýjylar degişlidirler.

Ionlaşma kamerasy. Bu kamera ýörite saýlanyp alnan gaz bilen doldurylandyr. Ondan uçup geýjän zarýadlanan bölejik jübüt ionlaryň kesgitli mukdaryny döredýär. Bu ionlaryň ýaşayş wagty ýeterlik uludyr. Ionlaşma kamerasynda uly bolmadyk **potensial** berlen birnäçe elektrod bolýar. Olar ionlary ýygnamak üçin gerek bolýar. Bellige alyjy gurluşyň duýgurlygyny ýokarlandyrmak üçin kameradaky gazyň basyşyny azrak ulaldýarlar. 12.1-nji çyzgyda iki elektrodly sada ionlaşma kamerasy görkezilen. Kamera uçup gelýän zarýadlanan bölejikler we fotonlar işçi gazyň molekulasy ionlaşdyrýarlar. Emele gelen jübüt ionlar elektrik meýdanynyň täsiri astynda degişli elektrodlara baryp düşýärler. N sany bir zarýadly ionlar elektrodyň potensialyny $\Delta U = eN/C$ ululyga üýtgedýärler. (C – kameradaky elektrodalaryň elektrik sygymy). Potensialyň bu üýtgemesi (naprýaženiýäniň impulsy) güýçlendirijiniň girişine berilýär. Güýçlendirijiniň çykyşynda ölçeýji abzal goýulýar. Potensialyň üýtgemesi (ΔU) boýunça bölejikleriň ionlaşdyryjylyk ukybyny we, degişlilikde, olaryň energiýasyny kesgitlep bolýar. Bu energiýa bolsa bölejigiň zarýadynyň we tizliginiň ölçegi bolup durýar. Ionlaşma kameralar zarýadlanan bölejikleriň dessesiniň diňe **jemleýji intensiwligini** bellige alýarlar. Olaryň duýgurlygy kiçidir. Şonuň üçin ionlaşma kameralary güýçli ionlaşdyryjy bölejikleri bellige almak üçin ulanylýar.



11.1-nji çyzgy

Gaz zarýadsyzlanma sanaýjysy. Bu sanaýjylar hereketlenýän zarýadlanan owunjak bölejikler tarapyndan işçi gazyň ionlaşmasy netijesinde gaz zarýadsyzlanmasynyň döremegine esaslanandyr. Olar ionlaşma kameralardan elektrodalarynyň görnüşleri boýunça tapawutlanýarlar. Anod inçe demir sapak görnüşinde, katod bolsa silindr görnüşinde ýerine ýetirilýär. Şeýle ýagdaýda elektrik meýdany (E) anodyň golaýynda örän uludyr. Ionlaşma kamerasynda elektrik meýdany diňe ionlary herekete getirmek üçin ulanylýar. Gaz zarýadsyzlanma sanaýjysynda bolsa elektronlar güýçli meýdana düşüp örän uly energiýa eýe bolýarlar we özlari ionlaşma döredýärler. Dörän ionlar hem öz gezeginde uly energiýa çenli tizlenip ionlaşma döredýärler we şuna meňzeşler. Netijede, elektronlaryň we ionlaryň toplumy emele gelýär. Bu ýagdaýa **gaz güýçlenmesi** diýilýär. Ol ionlary ýygnaýan elektrodlara berilýän naprýaženiýäniň (U) ululygyna baglydyr. Bu naprýaženiýe 250-800 W aralygynda bolanda alynýan impulsyň ululygy ilki başdaky ionlaşmanyň

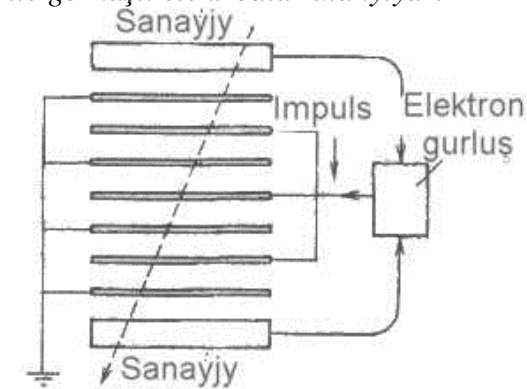
sebäp bolan uly partlamanyň gös-göni yz ýanynda **leptokwarklar** diýip atlandyrylýan bölejikler we olaryň garşybölejikleri bolupdyrlar. Olaryň hemmesi Älemiň öran ýokary başlangyç temperaturasynyň täsiri astynda **kwarklara** we **garşykwarklara**, **leptonlara** we **garşyleptonlara** dargapdyrlar. Bölejikleriň we garşybölejikleriň häsiýetleriniň tapawudy netijesinde bu dargamalar simmetrik däl bolupdyr. Şonuň üçin kwarklar we leptonlar garşykwarklardan we garşyleptonlardan köp emele gelipdir. Bu hem Älemiň geljekki düzümini kesgitleýdi diýip düşündirilýär.

Pozitronyň elektron bilen annigilirlenmegi elektromagnit özara täsiriň netijesinde bolup geçýär. Adronlar bolup durýan has agyr bölejikleriň we garşybölejikleriň annigilirlenmegi güýçli özara täsir tarapyndan döredilýär. Şonuň üçin agyr bölejikler we garşybölejikler annigilirlenende diňe γ -kwant däl-de, başga ýeňil bölejikler hem emele gelýärler. Mysal üçin, proton garşyproton bilen annigilirlenende pionlar we γ -kwantlar emele gelýärler.

6.3. Adronlaryň kwark şekili

Adronlaryň massalarynyň spektrlerini seljerip, amerikaly fizikler M.Gell-Mann we J. Sweýg biri-birine garaşsyz 1964-nji ýylda kwarklar diýip atlandyrylan has sada bölejikleriň bardygyny hakyndaky çaklamany teklipt etdiler. Elektronlaryň nuklonlarda aşy maýyşgak däl pytramasy boýunça tejribeleriň netijeleri nuklonlaryň içki gurluşynyň bardygyny tassykladylar. Bu tejribeler Rezerforduň pytradyyjy metalyň atomlarynda α -bölejikleriň pytramagy boýunça geçiren tejribelerine meňzeşdir. Iki ýagdaýda hem pytrama merkezleri bolup durýan bölejikleriň çyrşyrmly gurluşy ýüze çykaryldy.

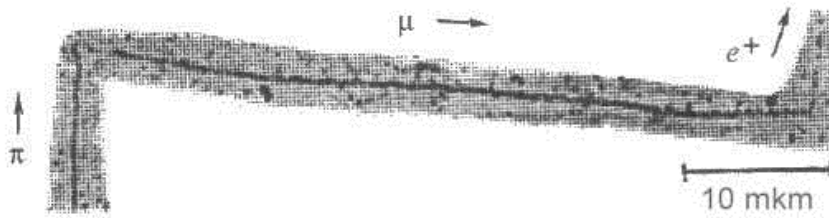
netijesinde döreýän uçgunjyklaryň zynjyry bilen bellenýär. Uçgunly kamera bölejigiň ýoluny elektron hasaplaýyş maşynlaryny ulanyp, bellige almaga mümkinçilik berýär. Onuň üçin ýörite görnüşli elektrodlar ulanylýar.



11.7-nji çyzygy

Ýadro fotoemulsiýa usuly. Bu usul 1926-1929-njy ýyllarda L. W. Mysowskiý we A. P. Ždanow taraplaryndan işläp taýýarlanylady. Fotoemulsiýa (ýagtylyk duýujy gatlak) örän köp mukdarda kümüş bromidiniň (AgBr) owunjak kristallaryny özünde saklaýar. Zaryadlanan çalt bölejikler kristaljagazlara aralaşyp bromyň aýratyn atomlaryndan elektronlary goparýarlar. Şeýle kristaljagazlaryň zynjyry bildirmeýän şekili emele getirýär. Fotoemulsiýadan şekil çykaryllanda bu kristaljagazlarda metal kümüş bölünýär we kümüşüň dänejikleriniň zynjyry bölejigiň galdyran yzyny emele getirýär. Bu yzyň uzynlygy, görnüşü, ýogynlygy (dyklyzlygy) we beýleki häsiýetnamalary boýunça **bölejigiň massasyny, zaryadyny, tizligini we energiýasyny** kesgitleý bolýar. Fotoemulsiýany 0,5-den 1 millimetre çenli galyňlykly gatlak görnüşinde ulanýarlar (adaty fotogatlagyň galyňlygy 10-dan 20 mikrometre çenli bolýar). Bu bolsa ýokary energiýaly

bölejikleriň geçen ýoluny derňemäge mümkinçilik berýär. Mysal üçin, 10 MeW energiýaly bölejik, takmynan, 0,1 mm uzynlykly yz emele getirýär we gatlakdan çykmaýar. Uzyn yz emele getirýän has ýokary energiýaly bölejikleriň galdyran yzyny öwrenmek üçin fotoemulsiýanyň aýratyn gatlaklarynyň köp mukdaryny toplam ulanýarlar. Onuň massasy onlarça kilograma, galyňlygy bolsa onlarça santimetre ýetýär. Petdedäki aýratyn gatlaklaryň özara ýerleşişi öňünden bellige alynýar. Şöhlelenmeden soň, petdäni aýratyn gatlaklara bölýärler. Soňra olaryň her birinden şekil çykarylýar we ol mikroskop bilen öwrenilýär. 11.8-nji çyzgyda ýadro fotoemulsiýa usuly bilen alnan pionyň mýuona we soňra pozitrona öwürülişiniň yzlary görkezilen. Bu usulyň esasy aýratynlygy onuň kömegi bilen bölejigiň ýitip gitmeýän yzynyň alynýandygydyr. Ýadro fotoemulsiýa usulyňy täze sada bölejikleriň häsiýetleri öwrenilende we kosmos şöhleleri derňelende giňden ulanýarlar. Fotoemulsiýa gatlaklaryny emeli hemralarda, raketalarda we kosmos gämilerinde ýerleşdirýärler.



11.8-nji çyzgy

5.3. Zaryadlanan bölejikleri tizlendirijiler

Rezerford ilkinji gezek tebigy radioişjeň dargamada döreýän α – bölejikleri ýadrolary urmak (bombalamak) üçin ulandy we 1919-njy ýylda ilkinji emeli ýadro täsirleşmesine

$$n + \bar{n} \rightarrow 2\gamma, \quad p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma.$$

Garşybölejikler diňe fermionlarda däl-de, bozonlarda hem bardyr. Mysal üçin, π^- pion π^+ piona seredeniňde garşybölejikdir. Öz garşybölejikleri bilen birmeňzeş, ýagny garşybölejikleri bolmadyk bölejikler hem bardyr. Şeýle bölejiklere **absolýut bitarap** diýilýär. Olaryň hataryna γ -foton γ , π^0 pion, η^0 – mezon, J/ψ – mezon we ipsilon-mezon degişlidir. Bu bölejikler annigilirlenmäge, ýagny ýok bolmaga ukypsyzdyrlar. Ýöne bu olaryň düýbünden başga bölejiklere öwürlip bilmeýändigini aňlatmaýar.

Pozitron we garşyproton özlerine degişli bölejikler ýaly durnuklydyrlar. Şonuň üçin, adaty madda bilen birlikde, fizika **garşymaddanyň** hem bolmagyna ýol berýär. Garşymaddanyň atomlarynyň ýadrolary garşyprotonlardan we garşyneýtronlardan gurlandyr. Olaryň gabyklary pozitronlardan durýar. Ilkinji **garşyýadro** bolan **garşydeýtron** 1965-nji ýylda amerikan fizigi Ledermanyň ýolbaşçylygynda tizlendirijide alyndy. 1969-njy ýylda rus alymy Ýu. D. Prokoşkiniň ýolbaşçylygynda Serpuhowdaky tizlendirijide (76GeV) iki garşyprotonlardan we bir garşyneýtrondan durýan **garşygeliýniň** ýadrosy ${}^3_2\overline{He}$ bellige alyndy. Şol ýerde 1974-nji ýylda **garşytritiýniň** ýadrosy hem ${}^3_1\overline{H}$ alyndy. Ol bir garşyprotondan we iki garşyneýtronlardan durýar. 1998-nji ýylda **garşywodorodyň** ilkinji atomlary alyndy. Älemde astrofizikler tarapyndan garşymadda ýüze çykarylmany. Onuň Älemde kosmos möçberinde ýok bolmagy hem mümkindir. Ilkinji kosmos şöhlelerinde bellige alynýan garşyprotonlaryň sany protonlaryň sanyndan $10^3 - 10^4$ esse azdyr. Älemde maddanyň garşymaddadan agdyk bolmagynyň häzirki wagtda nähili düşündirilýändigini görkezeliň. Älemiň emele gelmegine

Häzirki döwre çenli belli sada bölejikleriň aglaba köpüsiniň garşybölejikleri bardyr. Garşybölejik özüne degişli bölejik bilen birmeňzeş massa, spine we ýaşayş wagtyna eýedir. Şeýle hem garşybölejik ululygy boýunça birmeňzeş, ýöne alamaty boýunça garşylykly elektrik, barion we lepton zaryadlara, magnit momente we özara täsirleri häsiýetlendirýän beýleki ululyklara, mysal üçin, spirallyga we geňlige eýedir. Spirallyk hereket mukdarynyň we spiniň ugurlarynyň gatnaşygy bilen kesgitlenýär. Hereket mukdarynyň we spiniň wektorlary birmeňzeş ugrukdyrylanda spirallyk oňyn, garşylykly ugrukdyrylanda bolsa spirallyk tersin hasaplanylýar.

Ýeriň şertlerinde bölejik-garşybölejik jübütiniň döremeginiň esasy sebäbi ýokary energiýaly bölejikleriň çaknyşmaklarydyr. Şeýle çaknyşmalar kosmos şöhleleri Ýeriň howa gurşawyna girende bolup geşýärler (13.7-nji bölümçä seret). Bölejik-garşybölejik jübütleri tizlendirijilerde hem emele getirilýärler. Mysal üçin, **garşyprotonlar** we **garşyneýtronlar**, degişlilikde, 1955-nji we 1956-njy ýyllarda Berkli şäherinde (ABŞ) täze goberilen tizlendirijide gözegçilik edildi. Garşyproton protondan elektrik zaryadynyň we hususy magnit momentiniň alamaty bilen tapawutlanýar. Garşyprotonyň magnit momenti otrisateldir, ýagny mehaniki momente garşylykly ugrukdyrylandyr. Garşyneýtron neýtrondan hususy magnit momentiniň alamaty bilen tapawutlanýar. Garşyneýtronyň magnit momentiniň ugry mehaniki momentiniň ugry bilen gabat gelýär. Garşybölejikleri bölejigiň belliginiň ýokarsynda «~» ýa-da «-» alamatlar bilen belgileýärler. Mysal üçin, pozitron (e^+)

garşyneýtron \bar{n} , garşyproton \bar{p} görnüşde belgilenip bilner we şuňa meňzeşler. Garşybölejigiň esasy alamaty onuň degişli bölejik bilen annigilirlenmegidir, mysal üçin,

gözegçilik edip protony açdy. Ýöne tebigy bölejikler örän azdyr we olaryň energiýasyny geregiňçe sazlamak bolmaýar. Şonuň üçin köp halatlarda tebigy bölejikleri ulanyp bolmaýar.

Ýadrolaryň içki gurluşyny, olaryň oýandyрма derejelerini we bozulmagyny derňemek üçin energiýalary, takmynan, 10 megaelektronwoltdan hem uly bolan bölejikler gerek bolýar. Ýadrolaryň 10^{-15} m töweregi bolan ölçeglerini ölçemek üçin şeýle ululykly päsgelçilikde difraksiýa sezewar bolmaga ukyply bölejikler gerek bolýar. Şeýle bölejikleriň de Broýl tolkunynyň uzynlygy hem 10^{-15} m töweregi bolmalydyr. α – bölejikler üçin bu onlarça megaelektronwolt energiýa laýyk gelýär. Şonuň üçin zaryadlanan bölejikleriň dürli tizlendirijileri ulanylyp başlandy. Olar desseleriň we bölejikleriň energiýasynyň intensiwliginiň ulalmagyny, şeýle hem gerek bolsa bu ululyklary sazlamagyň mümkinçiligini üpjün etmelidir.

1931-32-nji ýyllarda J. Kokroft we E. Uolton, R. Wan-de-Graf, E. Lourens taraplaryndan ilkinji tizlendirijileriň döredilmegi ýadro fizikasynda täze eýýamy açdy. Olarda birnäçe megaelektronwoltdan onlarça megaelektronwoltlara çenli energiýaly, tizlendirilen zaryadlanan bölejikleriň desselerini almak bolýar.

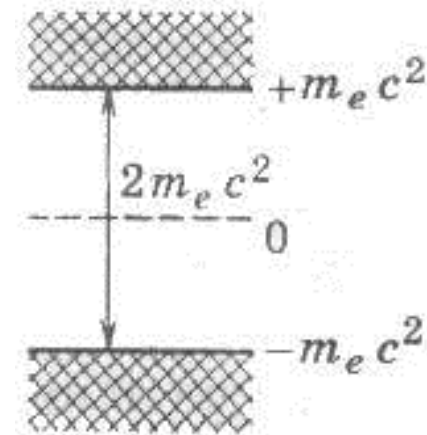
1944-45-nji ýyllarda W. Weksler we oňa garaşsyz E. Makmillan tizlendirilen bölejikleriň örän uly energiýa ýetmäge mümkinçilik berýän faza durnuklylygynyň (awtofazirowka) düzgünini açdylar. Oňa laýyklykda uly energiýaly tizlendirilýän bölejikleriň hereketi bilen tizlendirýän üýtgeýän aşa ýokary ýygyllykly elektrik meýdanynyň arasynda sazlaşyk (rezonans) saklanýar. Faza durnuklylygynyň düzgüniniň açylmagy täze görnüşli tizlendirijiler bolan fazotronlaryň, sinhrotronlaryň we sinhrofazotronlaryň döremegine getirdi. Güýçli çugdanlanma (fokusirlenme) usulynyň işläp taýýarlanylmagy kiçi kese

ölçegleri, ýokary intensiwligi we uly energiýalary bolan desseleri almaga mümkinçilik berdi.

Islendik tizlendiriji tizlendirilýän bölejikleriň görnüşi, bölejiklere berilýän energiýa, bölejikleriň energiýalary boýunça pytraňnylygy we dessäniň intensiwligi bilen häsiýetlendirilýär. **Tizlendirijiler üznüksiz we impuls görnüşinde bolýarlar.** Tizlendirilýän bölejikleriň geçen yzynyň (traýektoriyasynyň) görnüşi boýunça tizlendirijiler **çyzykly, aýlawly** (sikli) we **induksion** bolup bilerler. Çyzykly tizlendirijilerde bölejikleriň geçen yzy göni çyzyga golaýdyr. Aýlawly we induksion tizlendirijilerde bölejikleriň geçen yzlary tegelek ýa-da spiral görnüşde bolýarlar.

Zarýadlanan bölejikleri güýçli elektrik meýdanyny (E) döretmek bilen tizlendirmek bolýar. Şonda bölejige $F = eE$ güýç täsir eder we U potensiallar tapawudyny geçip (11.9-njy a çyzygy), ol eU energiýany alar. 1 MeW energiýany almak üçin elektronlaryň aralarynda 1 million wolt potensiallar tapawudyny döretmeli. Şonuň bilen birlikde ýüzlerçe megaelektronvolt we onlarça gigaelektronvolt energiýalar gerek bolýar. Şeýle energiýalary almak üçin bölejigi birnäçe gezek tizlendirýärler.

11.9-njy b çyzygyda dürli uzynlykly içi boş silindrlerden durýan çyzykly tizlendiriji görkezilen. Bölejik silindrleriň arasynda tizlenýär, silindriň içinde bolsa meýdan nola deňdir. Oňyn zarýadlanan bölejigiň 1-nji we 2-nji silindrleriň arasynda tizlenmegi üçin, 2-nji silindr naprýaženiýäniň çeşmesiniň tersin (“-”), 1-nji silindri bolsa oňyn (“+”) polýusyna birikdirmeli. Entek bölejik 2-nji silindriň içinde uçýarka ony oňyn, 3-nji silindri bolsa tersin polýus bilen birikdirmeli we şuna meňzeşler. Şonuň üçin täk silindrleriň hemmesini bilelikde naprýaženiýäniň bir polýusyna, jübüt silindrleri bolsa bilelikde beýleki polýusa birleşdirýärler.



13.1-nji çyzygy

Ol elektronyň garşybölejigidir. Pozitrony 1932-nji ýylda amerikan fizigi K. Anderson Wilsonyň kamerasyny ulanyp kosmos şöhlemenmesiniň düzüminde açdy. $E > 2m_e c^2$ (1,02 MeW) energiýaly elektromagnit şöhlemenmäniň kwanty öz energiýasynyň hasabyna elektron-pozitron jübütini döredip biler:

$$\gamma = e^- + e^+$$

Ters ýagdaýyň bolmagy hem mümkindir, ýagny elektron we pozitron goşulyşyp iki (ýa-da köp) fotony döredýär:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Şunlukda kesgitli massalary bolan iki bölejik özara ýok bolýarlar. Netijede, diňe elektromagnit şöhlemenmäniň ýalpyldysy ýüze çykýar. Şeýle ýagdaýa **özara ýok bolma (annihilirlenme)** diýip at berilýär.

Geçen asyryň 70-nji ýyllarynda täsin galdyryan we owadan bölejikleriň açylmagy bilen **täsin galdyryjylyk (C) we owadanlyk (b)** diýip atlandyrylýan kwant sanlary girizildi. Bu sanlaryň algebraik jemleri güýçli we elektromagnit özara täsirlerde saklanýarlar.

Şeýlelikde, sada bölejikleriň özara öwrülişiklerinde energiýanyň, massanyň, hereket mukdarynyň, hereket mukdarynyň momentiniň, elektrik zarýadynyň, barion we lepton zarýadlarynyň, geňlik, täsin galdyryjylyk we owadanlyk kwant sanlarynyň saklanmak kanunlary ýerine ýetýärler.

6.2. Bölejikler we garşy bölejikler

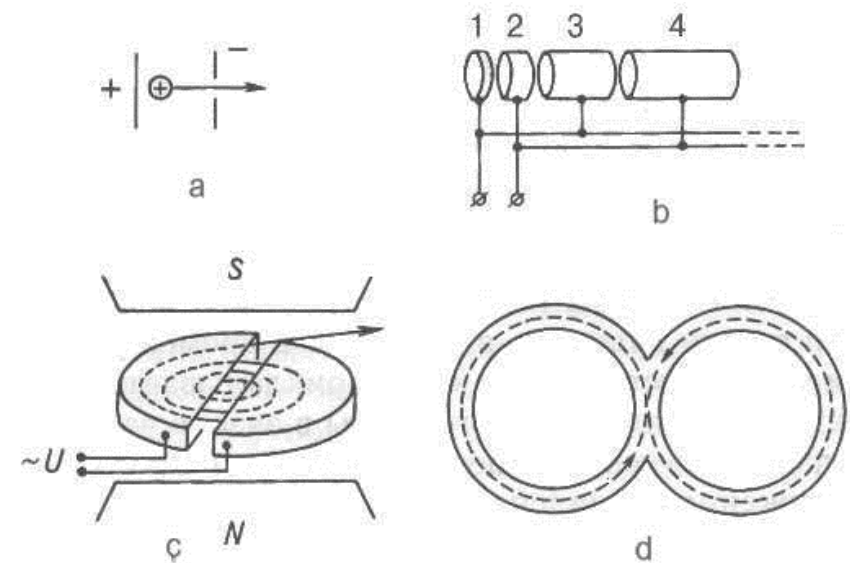
1928-nji ýylda Dirak Şredingeriň deňlemesiniň esasynda tizlikleri ýagtylygyň tizligine golaý bölejikler üçin tolkun deňlemesini ýazdy. Ondan erkin elektronyň energiýasynyň oňyn we otrisatel (tersin) bahalary alyp bilýändigini gelip

çykyar:

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_e^2 c^4}.$$

Iň uly otrisatel energiýanyň ($-m_e c^2$) we iň uly oňyn energiýanyň ($+m_e c^2$) arasynda $2m_e c^2$ giňlikli zolak bar (12.1-nji çyzgy). Şeýlelikde, energiýanyň hususy bahalarynyň iki çägi alynýar. Birinjisi $+m_e c^2$ energiýadan başlap $+\infty$ çenli, beýlekisi bolsa $-m_e c^2$ energiýadan başlap $-\infty$ çenli uzalyp gidýär.

Aşaky zolak bölejigiň otrisatel energiýa-massa halyny aňladýar. Otrisatel massa güýjüň täsiri astynda bölejigiň güýjüň täsiriniň garşysyna tizlenmä eýe boljakdygyny aňladýar. Hakykatda, bu elektrik meýdanynda elektronyň zarýadyna ters zarýadly oňyn massaly bölejigiň hereket etjekdigini aňladýar. Elektronu doly meňzeş, ýöne oňyn zarýadly şeýle bölejige **pozitron** diýip at berildi.



11.9 – nji çyzgy

Elektrik akymynyň çeşmesi, peridy bölejigiň bir aralykdan beýlekä geçiş wagtynda deň bolan, üýtgeýän naprýaženiýe bermelidir. Bölejigiň tizliginiň gitdigiçe artýandygy sebäpli, silindrleriň uzynlygyny hem artdyrmaly bolýar. Haçanda bölejigiň tizligi ýagtylygyň tizligine (c) golaýlaşanda, onuň tizliginiň artmagy bes edilýär. Bu ýagdaýda silindrleri takmynan birmeňzeş uzynlykly etmek bolýar. Ýöne onda-da bölejigiň energiýasy massanyň ulalmagynyň hasabyna artmagyny dowam eder ($E=mc^2$, $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$).

Çyzykly rezonans tizlendirijilerinde zarýadlanan bölejiklere has köp energiýa bermek bolýar. Bu tizlendirijilerde bölejikleriň energiýasy aşa ýokary ýygylýkly üýtgeýän elektrik meýdanyň täsiri astynda artýar. Bu meýdan tizlenýän bölejikleriň hereketi bilen ylalaşykly (rezonans görnüşli) üýtgeýär. 1966-njy ýylda Stenford uniwersitetinde (ABŞ)

diňýäde in uly elektronlaryň çyzykly rezonans tizlendirijisi guruldy. Onda 3,05km uzynlykda elektronlar 22,3GeV energiýa çenli tizlendirilýärler. Elektronlaryň şeýle uly energiýalarynda çyzykly rezonans tizlendirijileri has amatly hasaplanylýar. Bu usul bilen protonlary onlarça megal elektronwolta çenli tizlendirmek bolýar. Stenford uniwersitetiniň çyzykly tizlendirijisinde kwarklaryň bardygynyň ilkinji subutnamasy alyndy.

Protonlaryň we beýleki oňyn zaryadlanan bölejikleriň has kuwwatly tizlendirijileri aýlawly görnüşde gurulýarlar. Bu tizlendirijilerde zaryadlanan bölejik elektrik meýdanyň üstünden köp gezek geçip, her gezek öz energiýasyny birnäçe müňden birnäçe ýüz müň elektronwolta çenli artdyrýar. Bölejikleriň hereketini dolandyrmak we olary tizlendirýän elektrik meýdanly zolaga yzygiderli gaýtarmak üçin güýçli kese magnit meýdany ulanylýar. Aýlawly tizlendirijileriň işleýiş düzgünini E. Lourens tarapyndan ilkinji gezek 1931-nji ýylda gurlan siklotronyň mysalynda düşündireliň. Lourens zaryadlanan bölejigiň hereketini magnit meýdanynda amala aşyrmagy hödürledi. Şonda bölejik $R=mv/(qB)$ radiusly töwerek boýunça hereket eder. Tizlendiriji elektrodlar hemme taraplary ýapyk we dar deşik bilen bölünen silindr gap görnüşinde edilýärler (11.9-njy çyzygy). Gabyň ýarysyny duant diýip atlandyryýarlar. Magnit meýdanynda töwerek boýunça hereket edip, bölejik ol ýa-da beýleki duanta uçup girýär. Duantlar çalt üýtgeýän naprýaženiýä birikdirileni üçin, olaryň aralygynda bölejik tizlenýär. Bu aralykda bölejik diňe tizlendiriji naprýaženiýä gabat geler ýaly naprýaženiýäniň periody bölejigiň töwerek boýunça aýlanma döwrüne deň bolmagy zerurdyr, ýagny

girizilmegi, sada bölejikleri topara birleşdirip, olary käbir tertibe salýar.

Sada bölejikleriň özara öwrülişiklerini beýan etmek üçin bu öwrülişiklerde saklanýan **barion (B)** we **lepton (L)** **zaryadlary** diýip atlandyrylýan iki ululygy girizmek maksada laýyk boldy. Bu ululyklar ölçegsiz sanlarda aňladylýarlar, ýagny +1 bölejik, -1 bolsa garşybölejik üçin. Eger özara öwrülişiklere barionlar we garşybarionlar gatnaşýan bolsalar, onda bu ýagdaýda barion zaryadlarynyň algebraik jemi saklanýar. Bu bolsa barionlaryň we garşybarionlaryň diňe biri-birini ýok edende, başga, barion däl bölejiklere öwürlip bilýändigini aňladýar. Barionlaryň lepton zaryady we leptonlaryň barion zaryady nola deňdirler. Sada bölejikleriň islendik özara täsirinde jemleýji barion we lepton zaryadlary özara täsirden öň we soň üýtgeşsiz galýarlar.

Barionlaryň we mezonlaryň arasynda döreýşi güýçli özara täsirler bilen şertlenen we diňe jübüt-jübütde emele gelýän sada bölejikleriň bardygy geçen asyryň 50-nji ýyllarynda tejribe barlaglarynda kesgitlendi. Ýöne emele gelmeginden tapawutlylykda bu bölejikleriň dargamagy güýçli däl-de, gowşak özara täsiriň hasabyna amala aşyrylýar. Bu bolsa bölejikleriň dargamagyny emele gelmeginden has kiçi ähtimally edýär. Şeýle bölejiklere geň bölejikler diýilýär. Bu bölejikleri nazary beýan etmek üçin **geňlik** diýip atlandyrylýan we 0, ±1, ±2, ±3 bahalary kabul edýän S kwant sany girizildi. Bu kwant sanyň s spin bilen hiç hili umumylygy ýokdur. Geňlik güýçli (we elektromagnit) özara täsirde saklanýar, ýöne gowşak özara täsirde saklanmaýar diýip hasap edilýär. Geň bölejikleriň adaty däl häsiýeti hem şunuň bilen düşündirilýär. Bu bölejikleriň döremegi jübüt-jübütde $\tau \sim 10^{-23}$, dargamagy bolsa ýeke-ýekeden $\tau \sim 10^{-10} - 10^{-8}$ s wagtda bolup geçýär.

($10^{-10} - 10^{-6}$) s aralykda bolýar. Şeýle bölejiklere giperonlaryň we mezonlaryň bir böleji degişlidir. Ýaşayyş wagty erkin halda 887 sekunt bolan neýtron hem durnukla golaý hasaplanylýar. Rezonanslaryň ýaşayyş wagty ($10^{-24} - 10^{-23}$) s aralykda bolýar. Olaryň dargamagy güýçli özara täsirler bilen şertlenendir. Rezonanslaryň bir bölegi mezonlaryň, beýleki bölegi bolsa giperonlaryň düzümine girýär.

Käbir adronlar **izotopik multipletler** diýip atlandyrylýan kiçiräk toparlara birleşip bilerler. Şeýle topary emele getirýän bölejiklere bir bölejigiň dürli kwant hallary hökmünde seretmek bolar. Mysal üçin, protona we neýtrona nuklonyň iki dürli haly hökmünde seretmek mümkin. Güýçli özara täsire olar deň derejede gatnaşýarlar, olaryň spinleri birmeňzeş ($1/2$), massalary bolsa biri-birine örän golaýdyr. Eger elektromagnit özara täsir ýok diýip hasap etsek, onda nuklonyň iki haly gabat geler (protonyň we neýtronyň massalarynyň ujypsyz tapawudy elektromagnit özara täsir bilen şertlenendir). Elektromagnit özara täsir protonyň we neýtronyň arasynda tapawudyň döremegine getirýär. Şeýlelikde, proton we neýtron zaryad multipleti (dublet) bolup durýar. Nuklonyň bu iki halyny beýan etmek üçin ilkinji gezek W. Geýzenberg **izotopik spin (izospin)** diýen kwant sanyny girizdi. Başga bölejikler hem zaryad multipletlerine (singlet, dublet, triplet) birleşýärler. Izospin T bitin we ýarymbitin sanlary ($0, 1, 1/2$) kabul edip bilýär. Zaryad multipletleriniň düzüjileriniň sany $N = 2T + 1$ spin-orbital özara täsirde döreyän spektr multipletleriniňki ýaly (§3.4 seret) hasaplanýar. Aýratyn bölejiklere izospiniň hyýaly izotop giňişliginiň z okuna göçürimi (T_z) degişli edilýär. Mysal üçin, nuklona $T = 1/2$ izospin degişli, onda protona $T_z = +1/2$, neýtrona bolsa $T_z = -1/2$ izospiniň göçürimi laýyk gelýär. Pion üçin $T = 1$, onda π^- , π^0 we π^+ pionlar üçin izospiniň göçürimi degişlilikde $-1, 0$ we $+1$ sanlara deňdir. Izospin düşünjesiniň

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (11.2)$$

Tizligiň ulalmagy bilen R radius hem ulalýar, ýöne period T tizlige-de, bölejigiň aýlanýan töwereginiň radiusyna-da bagly däl. Netijede, kesgitli hemişelik ýygylgy bolan ýokary naprýaženiýäniň çeşmesini ulanyp bolýar. Onuň ýygylgyny şeýle ýazyp bileris:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m} \quad (11.3)$$

Örän uly tizliklerde bölejigiň massasy m tizlige bagly bolup başlaýar we gerek bolan ýygylk 11.3-nji aňlatma laýyklykda kiçelip başlaýar. Şonuň üçin häzirkizaman tizlendirijilerde bölejik batly aýlandyrylanda we tizlendirilende ýygylgy üýtgedýärler. Şeýle tizlendirijiler, üznüksiz däl-de, impulslaýyn işleýärler, ýagny olardan bölejikler bölekleyin uçup çykýarlar. Ondan başga-da, häzirkizaman tizlendirijilerde (sinhrofazotronlarda) magnit meýdanynyň ululygy (B) bölejik hemişe bir radiusly töwerek boýunça hereket eder ýaly edip sazlanýar. Şeýle tizlendirijiler uzboýuna magnitler we tizlendiriji naprýaženiýäniň çeşmeleri ýerleşdirilen içi boş turba bolup durýarlar. Magnit meýdanynyň ululygy we naprýaženiýe kompýutere girizilen ýörite maksatnama boýunça üýtgedilýär. Sinhrofazotron protonlaryň has güýçli aýlawly tizlendirijisi bolup durýar. Onda awlawly elektromagnit ulanylýar. Şweýsariýada 400 gigaelektronwoltlyk proton sinhrofazotrony döredildi. Has kuwwatly (1000 GeV) sinhrofazotron Amerikada guruldy.

Yeňil bölejikler tizlendirilende relýatiwistik hadysalar örän çalt ýüze çykýarlar. Mysal üçin, elektronyň dynçlyk massasy 0,511 megaelektronwolta deň. Elektrona 0,511 MeV

kinetik energiýa berlende onuň massasy iki esse ulalýar. Şoňa görä-de elektronlary tizlendirmek üçin ýörite tizlendirijiler ulanylýar (betatron, sinhrotron we başgalar).

Ýokarda beýan edilen tizlendirijilerde bölejikleriň dessesi üýtgewsiz nyşana ugrukdyrylýar. Ýöne uçup barýan bölejikleriň energiýasynyň ulalyp başlamagy bilen dessäniň energiýasynyň barha köp bölegi emele gelýän ulgamyň massalar merkeziniň hereketine peýdasyz harçlanýar. Eger öz aralarynda iki desse çaknyşýan bolsalar, onda energiýada uly utuş gazanmak bolýar. Sebäbi birmeňzeş massaly we birmeňzeş energiýaly iki dessäniň maýyşgak däl maňlaý çaknyşmasynda massalar merkezi üýtgewsiz galar. Ýöne çaknyşýan desseler önjeýli özara täsir edişer ýaly çaknyşma zolagynda bölejikleriň ýokary dykzlygyny döretmek gerek bolýar. Şeýle görnüşli tizlendirijiler döredildi we olara garşydaş desselerdäki tizlendirijiler ýa-da kollaýderler diýilýär. Bu tizlendirijilerde iki sany çaltlandyryjy tegelekleyin kameralar bardyr. (11.9-njy d çyzgy). Bir kamerada bölejikler sagadyň diliniň ugry boýunça, beýlekide bolsa tersine hereket edýärler. Bellenen energiýa ýetende çep halkadaky bölejigi azajyk gyşartýarlar we sag halkadaky bölejikler bilen çaknyşdyrýarlar. Özara täsir edişýän bölejikleriň akymynyň dykzlygyny ýokarlandyrmak üçin kollaýderlerde toplaýjy halkalary ulanýarlar. Olar tizlendirilen bölejikleri toplaýan tizlendirijiler bolup durýar.

Ilkinji **elektron kollaýderleri** 1965-nji ýylda Nowosibirskiýniň (Russiýa) ýadro fizikasy institutynda we Stenforduň (ABŞ) Milli tejribehanasynda guruldy. 1971-nji ýylda ilkinji proton kollaýderi, 1985-nji ýylda bolsa proton-garşyproton kollaýderi guruldy. 640 GeV özara täsir energiýaly ýadro barlaglarynyň Ýerwropa guramasynyň (SERN) uly elektron-pozitron kollaýderi (LEP-II, 1996) we

relýawistik baglanyşygyndan görüňýär. **Neýtrinonyň we garşyneýtrinonyň** massalary nola golaý diýip hasap edilýär. Şeýle bölejikler diňe ýagtylygyň tizligine deň tizlikde hereketde bolýarlar. Leptonlaryň toparyna örän kiçi we nol massaly bölejikler hem-de massasy 3487 elektron massasyna deň bolan taulepton degişlidir. Adronlar toparyna uly massaly bölejikler degişlidir. **Adronlar barionlara we mezonlara bölünýärler.** Öz gezeginde **barionlar bolsa nuklonlara we giperonlara bölünýärler.**

Häzirki wagta çenli belli bolan sada bölejikleriň köpüsiniň elektrik zaryady bardyr. Olaryň elektrik zaryady ululygy boýunça elektronyň zaryadynyň bitin sanyna deňdir, ýagny $+1$, -1 ýa-da 0 .

Sada bölejikler spiniň ululygy bilen hem häsiýetlendirilýärler. Olar 0 , $1/2$, 1 , $3/2$ we 2 spin sanlaryna eýedirler. Ýarymbitin spin sanly bölejikleriň toparlaýyn häsiýetleri Fermi-Dirakyň kwant statistikasy bilen aňladylýar. Bu **fermionlar** diýip atlandyrylýan bölejikler Pauliň kadasyna boýun egýärler. Bitin spin sanly bölejikler Boze-Eýnşteýniň kwant statistikasy bilen aňladylýarlar we **bozonlar** diýip atlandyrylýarlar. Leptonlar we barionlar $1/2$ spin sana eýedirler. Şeýlelikde, olar fermionlardyr. Mezonlar 0 spin sana eýedirler. Şonuň üçin olar bozonlar bolup durýarlar.

Ýaşayş wagty sada bölejikleriň esasy häsiýetnamasy bolup durýar. Ýaşayş wagtyna baglylykda bölejikler **durnukly, durnukla golaý** (kwazidurnukly) we, adaty, **rezonanslar** diýip atlandyrylýan **durnuksyz** bölejiklere bölünýärler. Öz-özünden dargamaýan we ýaşayş wagty 10 ýyldan uly bolan bölejikler durnukly hasaplanýarlar. Şeýle bölejiklere elektron, proton, foton we neýtrino degişlidir. **Gowşak we elektromagnit özara täsirleriň hasabyna dargaýan bölejiklere durnukla golaý diýilýär.** Olaryň ýaşayş wagtlary

bolsa **uzak täsirli**dirler. Şonuň üçin olaryň täsir aralyklary tükeniksiz hasap edilýär.

Özüne güýçli özara täsir mahsus bolan bölejikler **adronlar toparyny** döredýärler. Adronlar gowşak we grawitasiýa özara täsirlere hem eýedirler. Elektrik zarýady bolan adronlar elektromagnit özara täsirlere-de gatnaşýarlar. Durnuksyz bölejikler hasaba alnanda adronlar toparyna birnäçe ýüz bölejik degişlidir.

Bölejikleriň **leptonlar** diýip atlandyrylýan ikinji toparyna özlerine gowşak özara täsirler mahsus bolan we güýçli özara täsirlere gatnaşmaýan bölejikler degişlidir. Elektrik zarýada eýe bolan leptonlar elektromagnit özara täsirlere hem gatnaşýarlar. Leptonlar topary uly däldir. Garşybölejikler hasaba alnanda oňa 12 görnüşli bölejik degişlidir (2-nji belgili goşunda seret).

Sada bölejikler bölekleyin baha eýe bolan we köplenç **kwant sanlary** diýip atlandyrylýan birnäçe görkezijiler (parametrler) bilen häsiýetlendirýärler. Bölejigiň iki häsiýetnamasy, ýagny onuň **massasy we ýaşayyş wagty, kwantlaşmaýarlar**. Bölejigiň doly energiýasy we onuň massasy

öz aralarynda $E = m_0 c \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ relýatiwistik gatnaşyk bilen baglanyşyklydyr. Foton ýagtylygyň tizligi bilen hereket edýän bölejikdir. Foton üçin $\sqrt{1 - v^2 / c^2} = 0$, ýöne $E = h\nu$ – ahyrky ululyk, şonuň üçin $m_0 = 0$. Bu bolsa foton üçin inertlilik düşünjesiniň manysynyň ýokdugyny aňladýar. Ony daşky güýçler bilen tizlendirip ýa-da haýallandyryp bolmaýar. Ol birden $v = c$ tizlikde döreýär. Şeýle-de bolsa fotonyň impulsy, islendik bölejigiňki ýaly, noldan tapawutlydyr. Bu bolsa energiýanyň we impulsyň $E = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} = cp$

2TeW özara täsir energiýaly E. Fermi adyndaky Milli tizlendiriji tejribehanasynyň (ABŞ) proton - - garşyproton kollaýderi (TEWATRON, 1987) häzirki wagtda dünýäde iň uly kollaýderler hasaplanylýarlar. 1999-njy ýylda Amerikada agyr ionlardaky kollaýder (RHIC) guruldy. Häzirki zaman kollaýderleri birnäçe tizlendirijilerden durýan toplumlardyr. Olaryň ölçegleri we bahasy ägirt uludyr. Kollaýderleriň tegelekleyin kameralarynyň uzynlygy onlarça kilometre ýetýär. Olary ýeriň aşagynda tunnellerde gurnaýarlar.

6.SADA BÖLEJIKLERIŇ FIZIKASY

6.1. Sada bölejikler we özara täsirler

Fizikanyň nukdaýnazaryndan madda **molekulalardan**, ol bolsa öz gezeginde **atomlardan** durýar. Hemme atomlar **ýadrolardan** we **elektron gabyklaryndan** durýar. Ýadrolaryň düzümine bolsa **protonlar** we **neýtronlar** girýär. Bu bölejiklerden Mendeleyewiň jedweliniň hemme elementlerini düzmek bolýar. Elementlerden bolsa himiki birleşme ýoly bilen hemme maddalary almak bolýar. Agzalyp geçilen bölejiklere elektromagnit molekulalarynyň energiýalaryny daşajy sada bölejik bolan **fotony** goşmak bolar.

Häzirki wagtda başga-da birnäçe sada bölejikler bolan **mezonlar, giperonlar, neýtrino** açyldy. Olary protonlardan, neýtronlardan we elektronlardan durýar diýip hasap edip bolmaýar. Şeýle sada bölejikleriň sany (garşybölejikler bilen) 400 töweregidir.

Sada bölejikleri ilkinji toparlara bölmekligiň esasynda olaryň düýpli özara täsirlere gatnaşygy ýatyr. Bize belli bolşy ýaly tebigatda dört görnüşli şeýle özara täsirler bardyr: **güýçli, elektromagnit, gowşak we grawitasiýa**. Özara täsirleriň hemme görnüşi şu özara täsirleriň dört görnüşine syrykýarlar. Şu sebäpli olary **düýpli özara täsirler** diýip atlandyrylar. Her

bir özara təsiriň intensiwligi **özara təsiriň hemişeligi** diýip atlandyrylýan ölçegsiz ululyk bilen häsiýetlendirilýär. **Ýene bir häsiýetnamasy bolsa özara təsiriň amala aşyrylýan iň uly aralygydyr.** Bu aralyga **degişli güýçleriň** təsiriniň **radiusy** diýilýär. Düýpli özara təsir geçiş wagty bilen hem häsiýetlendirilýär.

Protonlaryň we neýtronlaryň täsirli özara çekişmesi görnüşindäki **güýçli özara täsir** atomyň ýadrolardaky nuklonlaryň baglanyşygy we ýadrolaryň durnuklylygyny üpjün edýär. Güýçli özara täsirleriň örän ýokary intensiwligi sebäpli olar bilen uly energiýa baglydyr. Termoyadro täsirleşmesi hem güýçli özara täsir bilen şertlenendir. Günüň we ýyldyzlaryň jümmüşlerinde bolýan şeýle täsirleşmeler olaryň ýagtylanyşyny döredýär.

Elektromagnit özara täsir elektrik zaryadyna we magnit momentine eýe bolan bölejikleriň arasynda bolýar. Bu özara täsir atomdaky elektronlaryň ýadro bilen baglanyşygyny üpjün etmek bilen, atomyň bolmaklygyny şertlendirýär. Atomlaryň arasyndaky elektromagnit özara täsir molekulalaryň we uly jisimleriň bolmaklygyny şertlendirýär. Molekulalaryň we ionlaryň arasyndaky bu özara täsir janly bedeniň öýjükleriniň bolmagynyň we işlemeginiň esasynda ýatyr.

Gowşak özara täsir sada bölejikleriň dargamaklarynda we özara öwrülişiklerinde ýüze çykýar. Belli bölejikleriň köpüsi bu özara täsire gatnaşýarlar. Gowşak özara täsir elektromagnit täsirden çylşyrymlydyr. Elektromagnit özara täsir bölejikleriň tebigatyny üýtgetmeýär. Gowşak özara täsir bolsa özara täsir edişýän bölejikleri başga görnüşli bölejiklere öwürýär. Mysal üçin, neýtron we neýtrino gowşak özara täsir edişende proton we elektron döreýärler. Käwagtlar gowşak özara täsirler kosmos hadysalarynda hem ýüze çykýarlar.

Sada bölejikleriň arasyndaky **grawitasiýa özara täsirler** beýleki özara täsirler bilen deňeşdirilende örän gowşakdyr. Şonuň üçin grawitasiýa özara täsire aşa gowşak özara täsir hem diýilýär. Beýleki özara täsirler bar bolanda sada bölejikler üçin ony hasaba almagyň manysy bolmaýar. Grawitasiýanyň häsiýetli aýratynlygy onuň hemme bölejiklerine degişlidir, ýagny ähliumumylydyr. Şonuň üçin jisimde bölejikleriň sanynyň artmagy bilen bu jisimiň daş-töwerek bilen grawitasiýa özara täsiriniň derejesi hem artýar. Netijede, grawitasiýa özara täsirler kosmos ulgamlarynda kesgitleýji bolýarlar we olaryň ösüşini kesgitleýärler. Häzirki zaman fizikasynda Eýnşteýniň göräýinligiň umumy nazaryýetine laýyklykda grawitasiýa güýç meýdany hökmünde däl-de, dört ölçegli giňişligiň-wagtyň gyşarmasy hökmünde seredilýär. Grawitasiýanyň ählumumylygy hem şunuň bilen düşündirilýär.

12.1 – nji jedwelde düýpli özara täsirleriň häsiýetnamalary getirilen. Ol ýerde güýçli özara täsiriň intensiwligi birlik hökmünde kabul edildi.

12.1-nji jedwel

.Özara täsir	Intensiwlik	Täsir aralygy, <i>m</i>	Geçiş wagty, <i>s</i>
Güýçli	1	10^{-15}	$10^{-23} - 10^{-22}$
Elektromagnit	1/137	∞	$10^{-20} - 10^{-16}$
Gowşak	10^{-14}	10^{-18}	$10^{-10} - 10^{-8}$
Grawitasiýa	10^{-38}	∞	?

Jedwelden görnüşi ýaly güýçli we gowşak özara täsirler **gyşga täsirli**dirler. Elektromagnit we grawitasiýa özara täsirler

Sada bölejikleriň toparlara bölünişi we olaryň özara täsiri bilen baglanyşykly açyşlary üçin M. Gell-Manna 1969-njy ýylda Nobel baýragy berildi.

Hemme kwarklaryň elektrik zaryady elektronyň zaryadynyň $1/3$ ýa-da $2/3$ bölejigine deň, ölçegleri bolsa 10^{-18} metrden hem kiçi diýip hasap edilýär. Kwarklar tejribelerde erkin halda ýüze çykarylmaýdy. Şonuň üçin häzirki wagtda kwarklar diňe adronlaryň içinde bolup, düýbünden erkin halda bolmaýar diýip hasap edilýär.

Kwarklaryň dürli ýakymly ysly (zaryadly) alty görnüşi bar, ýagny u (ýokarky), d (aşaky), s (geň), c (täsin galgyrýan), b (owadan), t (hakyky). Her bir ýakymly ysly kwarky şertleýin reňk diýip atlandyrylýan häsiýeti bilen tapawutlanýan üç dürli hallarda bolup biler, ýagny gyzyl, sary we gök. Kwarkyň reňki, elektron üçin spiniň göçürimine meňzeşlikde, onuň kwant häsiýetidir. Hemme **kwarklar fermionlardyr**, ýagny olar \hbar birlikde ýarymbitin spine eýedirler ($J = 1/2$). Her bir kwarkyň barion zaryady sada zaryad (e) birliginde $1/3$ -e deňdir ($B = 1/3$). Kwarklar ýakymly yslyna, ýagny görnüşine bagly özleriniň kwant sanlary U, D, S, C, b, t bilen häsiýetlendirilýärler. Kwarkyň elektrik zaryady barion zaryady we özleriniň kwant sanlary bilen Gell-Mannýň-Nişijiminiň deňlemesi arkaly baglanyşyklydyr:

$$Q = \frac{B}{2} + \frac{D+U+S+C+b+t}{2} \quad (14.1)$$

u -, c - we t - kwarklar üçin U, C we t kwant sanlarynyň ululygy deňişlilikde 1 -e deň. d -, s - we b – kwarklar üçin D, S we b kwant sanlarynyň ululygy bolsa, deňişlilikde, -1 -e deňdir. 13.1 –nji aňlatmadan u -, c - we t - kwarklaryň elektrik zaryadynyň $+2/3$ -e, d -, s - we b – kwarklaryň elektrik zaryadynyň bolsa $-1/3$ -e deňdigi gelip çykýar. Her bir kwarkyň özüniň deňişli kwant sany bilen tapawutlanýan garşykwarky bolýar. Garşykwarklar üçin reňkler deňişli kwarklaryň reňklerine goşmaça bolup durýarlar,

ýagny kwarkyň we garşykwarkyň reňkleriniň toplumy nolunjy, ýagny ak reňke laýyk gelyär. Şeýle goşmaça reňkler (garşyreňkler) ýaşyl, melewşe we mämişi hasaplanylýar. Kwarklaryň gyzyl, sary we gök reňkleriniň garyndysy hem düzüm bölejigiň ak reňkine getirýär. Hemme adronlar reňksiz, ýagny ak bölejikler hasap edilýär. Elbetde, kwarklaryň we garşykwarklaryň reňkliligi diýip, bu bölejikleriň hallaryny häsiýetlendirýän kwant sanlarynyň biri düşünilýär, reňkleri diýip bolsa bu sanyň mümkin bolan bahalaryna aýdylýar. 14.1-nji jedwelde kwarklaryň we garşykwarklaryň häsiýetnamalary getirilen.

14.1-nji jedwel

Kwarkyň görnüşi (ýakymly ysy)	Spin, J	Elektrik zaryady, Q	Barion zaryady, B	Kwarklaryň kwant sanlary					
				U	D	C	S	t	b
u	$1/2$	$+2/3$	$+1/3$	$+1$	0	0	0	0	0
d	$1/2$	$-1/3$	$+1/3$	0	-1	0	0	0	0
c	$1/2$	$+2/3$	$+1/3$	0	0	$+1$	0	0	0
s	$1/2$	$-1/3$	$+1/3$	0	0	0	-1	0	0
t	$1/2$	$+2/3$	$+1/3$	0	0	0	0	$+1$	0
b	$1/2$	$-1/3$	$+1/3$	0	0	0	0	0	-1
\bar{u}	$1/2$	$-2/3$	$-1/3$	-1	0	0	0	0	0
\bar{d}	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	0	$+1$	0	0	0	0
\bar{c}	$1/2$	$-2/3$	$-1/3$	0	0	-1	0	0	0
\bar{s}	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	0	0	0	$+1$	0	0
\bar{t}	$1/2$	$-2/3$	$-1/3$	0	0	0	0	-1	0
\bar{b}	$1/2$	$+1/3$	$-1/3$	0	0	0	0	0	$+1$

4.4. Radioişjeň şöhlelenmäniň janly bedene täsiri we ondan goranmak.....132

5. Ýokary energiýanyň fizikasyndaky tejribe usullary.....139

5.1. Bölejikleri bellige alyjy abzallar.....140

5.2. Bölejikleriň geçen ýoluna gozegçilik etmek üçin abzallar.....147

5.3. Zaryadlanan bölejikleri tizlendirijiler.....152

6. Sada bölejikleriň fizikasy.....159

6.1. Sada bölejikler we özara täsirler.....159

6.2. Bölejikler we garşy bölejikler.....166

6.3. Adronlaryň kwark şekili.....170

6.4. Leptonlar. Neýtrino.....175

6.5. Düýpli özara täsirleriň kwantlary. Özara täsirleri birleşdirmek.....178

6.6. Sada bölejikler we kosmologiýa.....183

6.7. Kosmos şöhleleri.....187

Peýdalanylan edebiýat194

M A Z M U N Y

Giriş.....	7
1. Atom ýadrosynyň gurluşy we häsiýetleri.....	12
1.1. Atom ýadrosynyň düzümi, zarýady we massasy.....	12.
1.2. Massanyň ýetmezçiligi we ýadronyň baglanyşyk energiýasy.....	18
1.3. Ýadronyň spini we magnit momenti.....	23
1.4. Nuklon-nuklon özara täsir we ýadro güýçleriniň häsiýetleri.....	26
1.5. Atom ýadrosynyň şekilleri.....	33
2. Radioişjeňlik.....	40
2.1. Radioişjeň şöhlelenme. Radioişjeň dargama kanuny.....	40
2.2. Ýadrolaryň radioişjeň maşgalalary.....	49
2.3. Radioişjeň öwrülişikleriniň görnüşleri.....	52
2.4. Gamma - şöhlelenmesiniň rezonans siňmesi.....	54
2.5. Radioişjeň izotoplaryň ulanylyşy.....	63
3. Ýadro täsirleşmeleri.....	71
3.1. Ýadro täsirleşmeleriniň umumy kanunalaýyklyklary.....	70
3.2. Ýadro täsirleşmeleriniň toparlara bölünişi. Neýtronlardaky ýadro täsirleşmeleri.....	81
3.3. Agyr ýadrolaryň bölünmegi.....	85
3.4. Bölünmegiň utgaşykly täsirleşmesi. Ýadro partlamalary.....	93
3.5. Ýadro reaktorlary.....	100
3.6. Ýeňil ýadrolaryň birleşme täsirleşmeleri.	106
3.7. Ugandan soňky elementler.....	116
4. Ýadro şöhlelenmesiniň madda bilen özara täsiri	120
4.1. Agyr zarýadlanan bölejikleriň madda bilen özara täsiri.....	121
4.2. Ýeňil zarýadlanan bölejikleriň madda bilen özara täsiri.....	124
4.3. Gamma şöhlelenmesiniň maddadan geçmegi.....	128

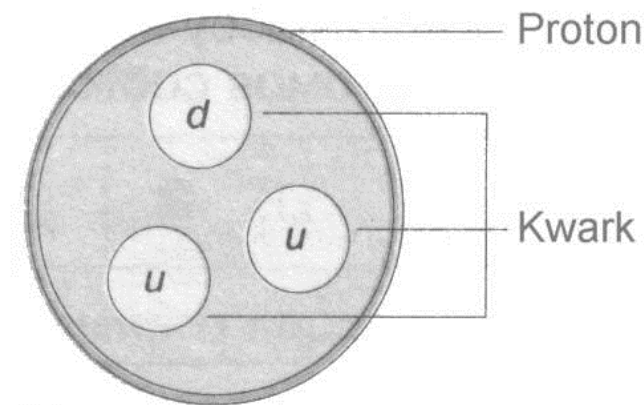
14.2-nji jedwel

Sada bölejik	Düzümi	Elektrik zarýady, Q	Barion zarýady, B	Geňlik, S	Kwarklaryň spinleriniň özara ugurlary	Bölejigiň spini	Kwarklaryň izospininiň “ugurlary”	Bölejigiň izospini, T
π^+	$u \bar{d}$	$+1$	0	0	$\uparrow\downarrow$	0	$\uparrow\uparrow$	1
π^-	$\bar{u} d$	-1	0	0	$\uparrow\downarrow$	0	$\uparrow\uparrow$	1
K^+	$u \bar{s}$	$+1$	0	$+1$	$\uparrow\downarrow$	0	\uparrow	$1/2$
p	uud	$+1$	$+1$	0	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$
n	udd	0	$+1$	0	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$
Σ^+	uus	$+1$	$+1$	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$	$\uparrow\uparrow$	1
Λ	uds	0	$+1$	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$	$\uparrow\uparrow$	0
Δ^{++}	uuu	$+2$	$+1$	0	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$3/2$	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$3/2$
Δ^-	ddd	-1	$+1$	0	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$3/2$	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$3/2$
Ω^-	sss	-1	$+1$	-3	$\uparrow\uparrow\uparrow$	$3/2$	$-$	0

Kwarklar biri-biri bilen diňe üçleýin ýa-da kwark-garşykwark jübütleýin birleşip bilerler (13.3-nji jedwel). Şonuň bilen birlikde birleşmäniň jemleýji reňki ak bolmalydyr. Hemme barionlar üç kwarklardan, hemme mezonlar bolsa kwark-garşykwark jübütlerinden durýarlar. Adronlaryň kwarklary we garşykwarklary öz aralarynda güýçli özara täsirleri bilen baglanyşyklydyrlar. Adronlaryň arasyndaky özara täsirler bu adronlary emele getirýän kwarklaryň arasyndaky özara täsirler bolup durýarlar. Adronlaryň içindäki kwarklar örän uly oýandyryjy energiýaly oýandyrylan

hallarda bolup bilýärler. Bu bolsa $E = mc^2$ relýawistik aňlatma laýyklykda adronlaryň massasynyň ep-esli ulalmagyna getirýär. Kwark şekili döredilmänkä şeýle oýandyrylan adronlar bölejigiň täze görnüşi ýaly kabul edildi. Diňe kwarklar nazaryýetiniň esasynda onuň şol bölejikleriň dürli hallarydygy aýdyňlaşdyryldy.

Kwarklara, güýçli özara täsirden başga-da, gowşak özara täsir hem mahsusdyr. Olaryň hasabyna kwarklaryň ýakymly ysy üýtgäp biler, bu bolsa, adaty, adronlaryň gargamagy bilen bile bolup geçýär. Mysal üçin, neýtronyň kwark düzümi udd, protonyňky bolsa – uud (13.2-nji çyzgy). Gowşak özara täsiriň hasabyna neýtrondaky d – kwark u kwarka öwrülýär. Şonuň bilen birlikde elektron we elektron garşyneýtrinosa döreýärler we goýberilýärler, neýtron bolsa protona öwrülýär.



14.2-nji çyzgy

Kwarklaryň diňe adronlaryň içinde bolup bilýändigini we erkin halda gözegçilik edilmändigini tejribeler görkezdi. Şeýle ýagdaý uçup çykmazlyk ýa-da tussaglyk (konfaýnment) diýen at aldy. Onuň sebäbi kwarklaryň arasyndaky özara täsir güýçleriniň olaryň arasyndaky aralyga örän özboluşly baglanyşygydyr. Örän kiçi aralyklarda bu güýçler has kiçidir we kwarklar erkin diýen ýaly

10. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика.—М.: Наука, 1980.

11. Михайлов В.М., Крафт О.Е. Ядерная физика.—Л.: ЛГУ, 1988.

12. Нерсесов Э.А. Основные законы атомной и ядерной физики. —М.: Высшая школа, 1988.

13. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.— М. Высшая школа, 2001.

14. Трофимова Т.И. Курс физики.—М.: Высшая школа, 2001.

15. Трофимова Т.И. Оптика и атомная физика: законы, проблемы, задачи.— М.: Высшая школа, 1999.

16. Грабовский Р.И. Курс физики. – СПб.: Лань, 2002.

17. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Оптика и атомная физика. —М.: Академия, 2000.

18. Курс физики: Т.2. Под. ред. В.Н.Лозовского.—СПб.: Лань, 2001.

19. Бондарев Б.В. Калашников Н.П., Спирин Г. Курс общей физики. Кн. 2. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика.—М.: Высшая школа, 2003.

20. Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics. Fourth Edition. Raymond A. Serway. USA, 1996.

21. Лаврова И.В. Курс физики.—М.: Просвещение, 1981.

22. Бордовский Г.А., Бурсиан Э.В. Общая физика: Курс лекций с компьютерной поддержкой.Т.2.—М.: Владос, 2001.

PEÝDALANYLAN EDEBIÝAT

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики, Т.5: Атомная и ядерная физика.— М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2002.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц.— М.: АСТ, 2002.
5. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы.— М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
6. Любимов А., Киш Д. Введение в экспериментальную физику частиц.— М.: Физматлит, 2001.
7. Ишханов Б.С., Кэбин Э.И. Физика ядра и частиц. XX век.— М.: МГУ, 2000.
8. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Книги 1,2.— М.: Энергоатомиздат, 1993.
9. Ракобольская И.В. Ядерная физика.— М.: МГУ, 1981.

bolýarlar. Bu hala çaksiz golaýlaşýan (asimptotik) erkinlik diýilýär. Ýöne kwarklaryň arasyndaky aralyklaryň artmagy bilen özara täsir güýçleri örän çalt ulalýarlar we kwarklaryň adronlardan uçup çykmagyna mümkinçilik bermeýär. Bu güýçler pružiniň çekiş güýjüne meňzeşdir. Pružin çekilmedik ýagdaýynda çekiş güýji nola deňdir, ol süýndirilende bolsa bu güýç ulalýar. Güýçli özara täsirlere we kwarklara degişli açyşlary we derňewleri üçin amerikaly alymlar D. Gross, D. Poliser we F. Walçek 2004-nji ýylda Nobel baýragyna eýe boldular.

Kwarklaryň nazaryýetiniň esasynda belli adronlar esaslandyrylyp tertibe salyndy, hem-de täze adronlaryň bardygy öňünden aýdyldy. Mysal üçin, Ω – giperonlaryň bardygy öňünden aýdyldy we soňra tejribede tassyklanyldy.

Adronlaryň kwark gurluşyny gös-göni tassyklaýan tejribe maglumatlary hem bar. Örän ýokary energiýaly ($\approx 2 \cdot 10^4$ MeV) elektronlaryň protonlarda pytramagy protonlaryň içinde $+(2/3)e$, $+(2/3)e$ we $-(1/3)e$ zarýadly üç pytradyjy merkezleriň bardygyny görkezdi (13.2-nji çyzga seret). Bu bolsa protonyň kwark şekiline laýyk gelýär.

Sada bölejikleriň fizikasynda adronlaryň kwark şekilini kämilleşdirmeklige itergi beren täze derňewleri üçin amerikaly alymlar J. Fridman, G. Kendall we R. Teýlor 1990-njy ýylda Nobel baýragyna mynasyp boldular.

6.4. Leptonlar. Neýtrino

*Öň belläp geçilişi ýaly, adronlar bilen birlikde sada bölejikleriň leptonlar diýip atlandyrylýan ikinji topary bardyr. **Leptonlar we kwarklar özara täsire gatnaşýan düýpli bölejiklerdir.** Olar $1/2$ spine eýedirler, şonuň üçin fermionlara degişlidirler. Leptonlaryň sany kwarklaryň sany bilen gabat gelýär we alta deňdir. **Leptonlara elektronlar (e), müonlar (μ), taonlar (τ) we olara mahsus neýtrinolar (ν_e , ν_μ , ν_τ) degişlidirler.***

Leptonlaryň her jübüti (e, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ) özlerniň kwant sany bolan degişli lepton zaryady L_e, L_μ, L_τ bolýar. Lepton zaryady sada bölejikler bilen dürli hadysalarda saklanýarlar. Garşyleptonlar leptonlardan özüniň lepton kwant sanynyň alamaty bilen tapawutlanýarlar. 15.1-nji jedwelde leptonlaryň häsiýetnamalary getirilen. Leptonlaryň jübüti özlerniň fiziki häsiýetleri boýunça başga jübütlerden öz düzümine girýän bölejikleriň massasyndan başga hiç hili dýen ýaly tapawut etmeýär.

15.1-nji jedwel

Leptonlar yň ady	Belgilenişi	Spini, J	Elektrik zaryady, Q	Lepton zaryady			Massasy	
				L_e	L_μ	L_τ	m_e	MeV
Elektron	e^-	1/2	-1	1	0	0	1	0,511
Elektron neýtrinosy	ν_e	1/2	0	1	0	0	$<2 \cdot 10^{-5}$	$<1 \cdot 10^{-5}$
Mýuon	μ^-	1/2	-1	0	1	0	206,7	105,66
Mýuon neýtrinosy	ν_μ	1/2	0	0	1	0	$<0,34$	$<0,17$
Taon	τ^-	1/2	-1	0	0	1	3536,0	1782
Taon neýtrinosy	ν_τ	1/2	0	0	0	1	<36	<18

gigaelektronwolta çenli tizlendirmäge mümkinçilik berýän tizlendirijiler ulanylyp başlandy. Şonuň üçin kosmos şöhlelenmesi sada bölejikleri öwrenmekde özüniň aýratyn manysyny ýitirdi. Ýöne kosmos şöhlelenmesi häzirki wagtda entek emeli ýol bilen alynmadyk aşýa ýokary energiýaly (10^{21} eV çenli) bölejikleriň çüşmesi bolup durýa

10^{14} – 10^{15} GeV we ondan ýokary energiýaly ilkinji bölejigiň döredýän çabgasyna giň howa gurşaw çabgasy diýilýär. Bu çabga deňiz derejesinden 20-25 km beýiklikde döräp başlaýar. Giň howa gurşaw çabgasyndaky bölejikleriň sany millionlarça ýetýär. Deňziň derejesinde bu çabgalar birnäçe inedördül kilometr meýdany örtýär. Çabgadaky bölejikleriň ägirt köp sany olary uly meýdanda ýerleşdirilen birnäçe sanaýjylaryň kömegi bilen ýüze çykarmaga we öwrenmäge mümkinçilik berýär. Şol bir wagtda sanaýjylaryň sanap başlamagy gaýtadan alynýan bölejikleriň döredýän giň howa gurşaw çabgasynyň geçýändigine şaýatlyk edýär. Ýöne olaryň kiçi bölegi sanaýjy tarapyndan bellenýär. Her bir zaryadlanan bölejige (esasan, elektron we pozitron) ilkinji bölejigiň 2-3 GeV energiýasy laýyk gelýär. Çabgadaky zaryadlanan bölejikleriň umumy sanyny hasaplap çabgany emele getiren ilkinji bölejigiň energiýasyny ýeterlik takyklyk bilen kesgitläp bolýar.

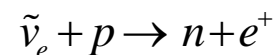
Ýeriň emeli hemralarynda we kosmos raketalarynda oturdylan abzallaryň kömegi bilen Ýeriň golaýynda şöhlenenme guşaklarynyň bardygy açyldy. Olar ionlaşdyryjy şöhlenenmesi güýçli ýokarlanan Ýeri gurşap alýan iki zolak bolup durýarlar. Bu zolaklaryň bolmagy zaryadlanan kosmos bölejikleriniň Ýeriň magnit meýdany tarapyndan eýelenmegi we saklanmagy bilen şertlenendir. Ekwatoryň giňişliginde şöhlenenmäniň içki guşagy 600-den 6000 km, daşky guşak bolsa 20000-den 60000 km çenli uzalyp gidýär. 60-70° giňliklerde iki şöhlenenme guşagy hem Ýere birnäçe ýüz kilometre çenli golaýlaşýarlar.

Kosmos şöhleleriniň Ýeriň howa gurşawyna täsiri netijesinde ol ýerde radioişjeň izotoplaryň, mysal üçin, tritiýniň ${}^3_1\text{H}$, käbir mukdarynyň saklanmagy we örän az mukdarda durnukly izotoplaryň toplanmagy bolýar.

Kosmos şöhlenenmesini derňemeklik sada bölejikleriň fizikasynyň ösüşiniň başlangyç döwründe esasy tejribe maglumatlaryny almaga mümkinçilik berdi. Geçen asyryň 50-nji ýyllaryndan başlap, sada bölejikleri derňemekde olary ýüzlerçe

W. Pauli 1932-nji ýylda β – dargamada elektron bilen birlikde soňra neýtrino (garşyneýtrino) diýip atlandyrylan zaryadsyz, dynçlyk massasyz we 1/2 spinli bölejigiň döreýändigini çaklady. Bu çaklamany tassyklamak üçin neýtrinony tejribede ýüze çykarmaly. Ýöne Pauliniň öňünden aýdan häsiýetli neýtrinosyny ýüze çykarmak adatdan daşary kyn boldy. Sebäbi neýtrino madda bilen örän gowşak özara täsir edişýär. Ol münlerçe kilometri madda bilen özara täsir edişmän, uçup geçip bilýär. Birnäçe MeV energiýaly neýtrinonyň atom ýadrolary bilen özara täsirleriniň täsir ediji kesigi çakdanaşa kiçidir ($\sim 10^{-34} \text{ sm}^2$).

Neýtrino sada bölejikleriň arasynda iň syrlyşydyr. Aýratyn alnan neýtrinony tutmak mümkin däldir. Ol islendik galyňlykly päsgelçilikden hiç zat bilen täsir edişmän geçip bilýär. Neýtrinonyň millionlarçasynydan käbiri bellige alýan gurluşda yz galdyrmaga ukyplydyr. Neýtrinonyň eýelenme hadysasyny bellige almak üçin olaryň akymynyň ägirt uly dykzlygy gerek bolýar. Bu bolsa ýadro reaktorlary döredilenden soň mümkin boldy. Olar neýtrinonyň kuwwatly çeşmesi hökmünde ulanyldy. Neýtrinonyň (garşyneýtrinonyň) bardygy diňe 1953-1956-njy ýyllarda amerikalý fizikler F. Reýnes we K. Kouen gös-göni tejribede subut etdiler. Garşyneýtrino şu täsirleşmäniň kömegi bilen gözegçilik edildi:



Köp ýyllap neýtrinonyň massasy yok diýip hasap edilsede, ol örän ujypsyz massa eýedir. 1999-njy ýylyň Sanjar aýyndan 2001-nji ýylyň Türkmenbaşy aýyna çenli Sadberiniň (Kanada) neýtrino obserweatoriýasynda geçirilen ölçegler netisinde Günde termoyadro täsirleşmesinde döreýän elektron neýtrinolarynyň Ýere diňe takmynan 40 göteriminiň gelýändigini, galan bölejigiň bolsa elektron däl neýtrinosydygy (mýuon we / ýa-da tau-neýtrinosy) ýüze çykaryldy. Bu ölçegler yrgyldylar (ossilýasiýalar) netijesinde

Günden Ýere ýetýänçä elektron neýtrinosynyň başga görnüşli neýtrino öwrülýändigini görkezdi. 1998-nji ýyldan bäri mýuon neýtrinosynyň Ýeriň içinden geçende yrgyldaýandygyny (ossilirlenýändigini) görkezýän maglumatlar toplanyldy. Neýtrinonyň bir görnüşden başga görnüşe öwürilmegi onuň massasynyň bardygyny kesgitli görkezdi. Neýtrinonyň massasy protonyň massasyndan millionlarça esse kiçidir. Neýtrinonyň massasynyň bolmagynyň çuň manysy bardyr. Birinjiden, sada bölejikleriň fizikasynda ulanylýan nazaryýeti soňky gözegçilikleri kanagatlandyrrar ýaly üýtgetmeli. Ikinjiden, elektron neýtrinosynyň Günüň jümmüşinde döreýändigini üçin ol ýerde bolýar hadysalary öwrenmäge mümkinçilik döredi. Uçünjiden, neýtrinonyň ägirt köpdügi sebäpli Älemiň massasynyň ep-esli bölegini onuň tutýandygy belli edildi. Neýtrinolaryň sany elektronlaryň we protonlaryň sanyndan, takmynan, 10^9 esse artykdyr.

Neýtrinonyň massalarynyň häzirkizaman tejribe bahalary şeýledir:

$$m(\nu_e) < 10 \text{ eW}, \quad m(\nu_\mu) < 0,17 \text{ MeW}, \quad m(\nu_\tau) < 18 \text{ MeW}$$

Neýtrinolaryň hemme görnüşiniň jemleýji massasyna kosmologik çäklendirme bolýar

$$m(\nu_e) + m(\nu_\mu) + m(\nu_\tau) < 40 \text{ eW}.$$

Leptonlar gowşak özara täsire gatnaşýarlar we güýçli özara täsire gatnaşmaýarlar. Neýtrinodan beýleki leptonlar elektromagnit özara täsire hem gatnaşýarlar. Leptonlaryň entek içki gurluşynyň bardygyny ýüze çykarylady. Şonuň üçin **leptonlar gurluşsyz, nokatlanç görnüşli, hakyky sada bölejik** hasaplanylýar.

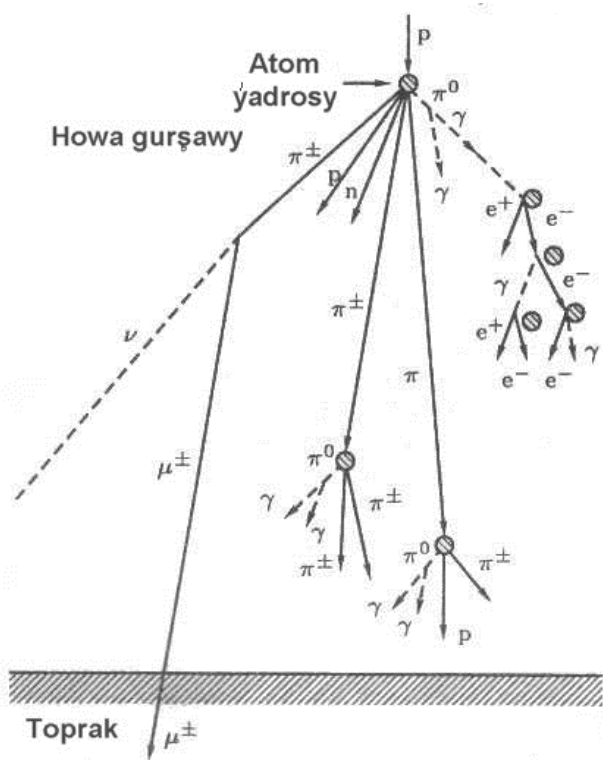
Tau-leptony açandygy üçin M.Perle we neýtrinony tejribede ýüze çykarandygy üçin F. Reýnese 1995-nji ýylda Nobel baýragy berildi.

Mýuonlaryň ýaşayyş wagty $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ töweregidir. Şu wagtda mýuonlaryň diňe az bölegi dargap ýetişýär. Şonuň üçin olar howa gurşawyndan ýeňillik bilen geçýärler we ýeriň aşagyndaky çuňlukda siňdirilýärler. Şeýlelikde, gaýtadan alynýan kosmos şöhlelenmesiniň gaty düzüjisi, esasan, mýuonlardan durýar. Deňiz derejesinde kosmos şöhleleriniň aralaşygy düzüjisiniň aglaba köpüsini mýuonlar düzýärler. Ýeriň üstünde zarýadlanan bölejikleriň akymy ortaça $2 \cdot 10^{-2}$ bölejik / ($\text{sm}^2 \cdot \text{s}$) deňdir.

Bitarap pionyň π^0 ortaça ýaşayyş wagty örän gysgadyr ($1,8 \cdot 10^{-16} \text{ s}$). Şonuň üçin ol örän kiçi aralygy geçip ýetişýär we adaty, howanyň atomlarynyň ýadrolary bilen täsir edişmän, uly energiýaly iki fotona dargaýar: $\pi \rightarrow \gamma + \gamma$. Ýadronyň meýdanynda bu fotonlar elektron-pozitron jübütleri emele getirýärler. γ – fotonyň elektron-pozitron jübüti emele getirmeýden, öňki howadaky ortaça ylgawy $\lambda \approx 35 \text{ g/sm}^2$ töweregidir. Emele gelen elektron we pozitron maddada togtama şöhlelenmesi netijesinde täze fotonlary şöhlelendirýärler. Bu fotonlaryň energiýasy entek täze elektron-pozitron jübütlerini emele getirmäge ýeterlik bolýar. Netijede, ýokary energiýaly bitarap pionyň dargamagy howa gurşawynda **elektron-pozitron-foton çabgasynyň** emele gelmegine getirýär. Bu çabgany emele getirýän ilkinji bölejikler örän uly energiýa eýe bolsalar-da çabga bölejikleri maddanyň uly galyňlygyndan geçip bilmeýär. Şeýlelikde, çabga bölejikleri bolan elektronlar, pozitronlar we γ – fotonlar gaýtadan alynýan kosmos şöhleleriniň ýumşak düzüjileri bolup durýarlar. Haçan-da bir bölejigiň energiýasy 72 megaelektronwoltdan kiçi bolanda elektronlaryň we pozitronlaryň energiýasynyň ionlaşdyrma ýitgisi, fotonlaryň bolsa kompton pytramasy esasy bolup durýar. Şunuň bilen elektron-pozitron-foton çabgasynyň emele gelmegi bes edilýär.

Elektron-pozitron-foton çabgasynyň güýçlenmegine beýleki durnuksyz bölejikler (k – mezonlar we giperonlar) darganda döreýän bitarap pionlar, hem-de mýuonlar darganda döreýän elektronlar käbir goşandyny goşýarlar.

edişmäge ýetişýärler we ilkinji bölejikler ýaly ýadro hadysalaryny döredip biler. Zaryadlanan pionlaryň başga bir bölegi özara täsir edişmäge ýetişmän, uly massaly ($206,8m_e$) myuona (μ^\pm) we neýtrino dargaýar. Neýtrino örän gowşak özara täsir edişýän bölejik bolany üçin, diňe howa gurşawyny däl-de, tütüş Ýer togalagynyň içinden geçip gidýär. Oňyn myuon $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, tersin myuon bolsa $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ görnüşde dargaýarlar. proseslerde pionlar esasy bolup durýarlar.



17.2-nji çyzgy

6.5. Düýpli özara täsirleriň kwantlary. Özara täsirleri birleşdirmek

Biz düýpli bölejikleriň özara täsirlere gatnaşýan toparyna degişli bölejiklere (kwarklara we leptonlara) seredip geçdik. Indi bolsa özara täsirleri daşajy topara degişli düýpli bölejiklere seredeliň. Sada bölejikleriň arasyndaky özara täsirleriň hemme görnüşi özara täsirleri daşajy ähtimal (wirtual) bölejikleriň kömegi bilen amala aşyrylýar. Olaryň spini bitin sanlydyr. Daşajy bölejikler Pauliň gadaganlyk kadasyna boyun egmeýärler. Bu alyşýan bölejikleriň sany üçin çäklendirmäniň ýokdugyny aňladýar. Sebäbi döreýän özara täsiriň güýjüniň uly bolmagy mümkindir. 15.3-nji jedwelde düýpli özara täsirleriň käbir häsiýetnamalary getirilen.

15.2-nji jedwel

Özara täsir	Daşajy bölejik	Zaryad, e	Bölejigiň spini	Kwantiň massasy	
				GeV	m_p
Elektromagnit	Foton	0	1	$<2 \cdot 10^{-16}$	$<2,13 \cdot 10^{-16}$
Grawitasiýa	Grawiton	0	2	0	0
Gowşak	W^+, W^-, Z^0	-1, +1	1	81	86
		0	1	93	99
Güýçli	Glýuon	0	1	0	0

Elektromagnit özara täsirleri daşajylyk **ähtimal fotonlar** bolup durýarlar. Olar ýeňil bellige alyp bolýan hakyky fotonlardan örän kiçi ýaşajy wagty bilen tapawutlanýarlar. Fizikada bölejikleriň arasynda ähtimal fotonlaryň kömegi bilen amala aşyrylýan elektromagnit özara täsirleriň kämil nazaryýeti döredildi. Bu kwant elektrodinamikasy diýip atlandyrylýan nazaryýet kwant fizikasynyň hem-de göräleýinligiň nazaryýetiniň kadalaryny kanagatlandyrýar. Kwant elektrondinamikasy birnäçe tejribe maglumatlary düşündirmek bilen birlikde, ençeme täze hadysalary hem öňünden aýtdy. Olar soňraky tejribelerde doly subut edildi. Öňünden

aýtmalarda ähtimal fotonlaryň täsiri bilen şertlenen wodorod atomynyň derejeleriniň süýşmesi we elektronyň hususy magnit momentine düzediş aýratyn ähmiýete eýedir.

Grawitasiýa güýçleri uzak täsirlidirler we çekişme güýçleri görnüşinde ýüze çykyrlar. Olaryň täsiriniň netijeleri mydama jemlenýärler. Bu ýerden maddada bölejikleriň ýeterlik mukdary bolanda grawitasiýa güýçleriniň beýlekileriň hemmesinden köp bolmagynyň mümkindigi gelip çykyar. Şonuň üçin Älemiň ösüşi grawitasiýa bilen kesgitlenýär. Bölejikleriň arasyndaky grawitasiýa özara täsirleriň daşajýylary **ähtimal grawitonlar** bolup durýarlar. Olaryň massasy nola deňdir, özleri hem diňe ýagtylygyň tizliginde hereketde bolýarlar. Fotonlar ýaly, grawitonlar hem ähtimal we hakyky bolup bilerler. Hakyky grawitonlar grawitasiýa tolkunlarynyň kwantlarydyr. Ollar grawitasiýa tolkunlary görnüşinde ýaýrayarlar diýip hasap edilýär. Ähtimal grawitonlardan tapawutlylykda, olary bellige almak mümkindir. Ýöne grawitasiýa özara täsirleriň çenden aşa gowşakdygy sebäpli, entek grawitonlary bellige almak başardanok.

Ozara täsirleriň ähtimal daşajýylary üçin Geýzenbergiň kesgitsizlikler baglanyşygy $E\tau \geq \hbar$ görnüşe eýedir. Bu ýerde E - daşajýynyň energiýasy, τ - bolsa onuň ýaşayyş wagty. Gowşak özara täsirleriň radiusy örän kiçidir. Şonuň üçin bu özara täsirleriň daşajýylarynyň ýaşayyş wagty hem örän kiçidir ($\sim 10^{-10} - 10^{-8}$ s). Onda olaryň energiýasy we massasy ýeterlik uly bolmalydyr (13.5-nji jedwele seret). Gowşak özara täsirleriň daşajýylary **aralyk wektor bozonlary** diýip atlandyrylýan bölejikleriň topary bolup durýar. Bu topara iki sany zaryadlanan bölejik (W^+ we W^-) we bir bitarap bölejik (Z^0) girýärler. Z^0 - bozon massasyndan başga häsiýetleri boýunça fotona meňzeşdir. Aralyk wektor bozonlarynyň spini bire deňdir.

Kwarklar güýçli özara täsire gatnaşyp, öz aralarynda täsir edişýärler. Güýçli özara täsirleri daşajýy massasyz bölejiklere **glýuonlar** diýilýär. Olar reňki bir kwarkdan başga kwarka

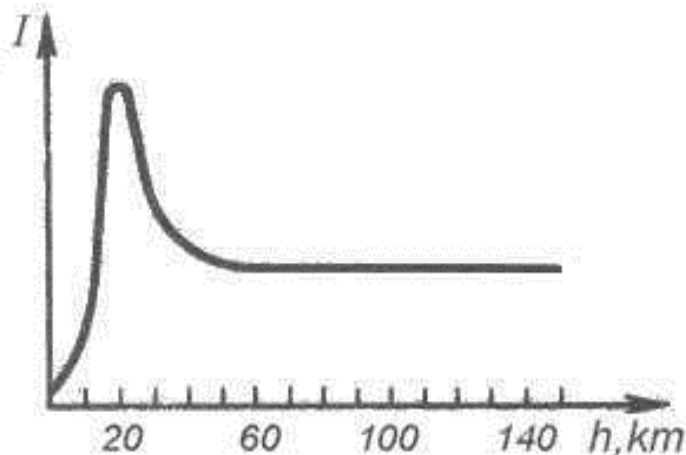
($Z > 20$) ybarat bolýar. Bölejikleriň has ýokary energiýa çenli tizlenmegi käbir asman jisimleriniň daşynda bar bolan elektrik we üýtgeýän magnit meýdanlarynda bolup geçýär diýip çak edilýär. Kosmos bölejikleri Ýeriň howa gursawyna ýetýänçä, Galaktikanyň radiusyndan (10^{21} m) ortaça $10^2 - 10^3$ esse aralygy artykmaç geçýän bolmagy mümkindir. Bu bolsa Galaktikada bölejikleriň gönüçyzykly däl hereket edýändigini aňladyp biler. Sebäbi bölejikleriň tizligi olaryň kosmos elektromagnit meýdanlaryndan geçenlerinde üýtgäp biler. Kiçi energiýaly kosmos bölejikleri Ýere Günden gelýän bolmagy ähtimaldyr. 50 km beýiklikden başlap diňe ilkinji kosmos şöhlenenmesi gözegçilik edilýär. Bu beýiklikde ilkinji kosmos şöhlenenmesiniň intensiwligi, takmynan, 1 bölejik/(1sm² · s) bolup durýar.

Ýere tarap golaýlaşdygyça kosmos şöhlenenmesiniň intensiwligi ulalýar. Bu bolsa gaýtadan alynýan kosmos şöhlenenmesiniň emele gelýändigine şaýatlyk edýär. Ol ilkinji kosmos şöhlenenmesiniň Ýeriň howa gursawynyň atomlarynyň ýadrolary bilen özara täsir edişende döreýär. Howanyň atomynyň ýadrosy bilen çaknyşanda, proton ortaça başlangyç energiýasynyň 30-50 göterimini ýitirýär. 10 GeV ortaça energiýaly ilkinji kosmos şöhleleriniň esasy bölegi ilki ýadrolar bilen çaknyşanlarynda täze bölejikleri emele getirmek üçin energiýany ýitirýär, soňra bolsa energiýa howanyň atomlaryny ionlaşdyrmaga gidýär. Diňe ilki başdaky energiýasy birnäçe ýüz gigaelektronwolt we ondan hem köp bolan protonlar Ýeriň üstüne ýetip biler. Eger ilkinji bölejigiň energiýasy, takmynan, 100 MeV çenli azalsa, onda mundan beýläk täze bölejikleriň emele gelmegi az ähtimally bolýar.

Proton howa atomynyň ýadrosy bilen çaknyşanda zaryadly pionlar π^+ , π^- we bitarap pion π^0 emele gelýärler (17.2-nji çyzgy). Ondan başga-da proton-garşyproton jübüti we durnuksyz bölejikler bolan k - mezonlar we giperonlar hem emele gelýärler. Ýöne soňraky Ortaça $2.6 \cdot 10^{-8}$ s wagtda dargaýan zaryadlanan pionlaryň bir bölegi howanyň başga ýadrolary bilen özara täsir

W.L. Ginzburgyň we I.S. Şklovskiniň iň täze ýyldyzlaryň ýalpyldylary esasynda kosmos şöhleleriniň döreýändiginiň hakyndaky çaklamasy has ýerlikli hasaplanylýar. Kosmos şöhlelerini öwrenmek üçin **ionlaşma esaslanan abzallar** ulanylýar.

Kosmos şöhlelenmesiniň intensiwligi beýiklik boýunça artyp $h \approx 20$ km beýiklikde iň uly baha ýetýär, soňra bolsa kiçelýär we $h \approx 50$ km beýiklikden başlap hemişelik bolýar (16.1-nji çyzgy). Ýeriň magnit meýdanynyň bolmagy kosmos şöhlelenmesiniň intensiwliginiň giňlik bilen úýtgemegine hem getirýär. Muňa giňlik hadysasy diýilýär.



17.1-nji çyzgy

Ilkinji we gaýtadan alynýan kosmos şöhlelerini tapawutlandyryýarlar. **Gös-göni kosmosdan gelýän şöhlelenmäni ilkinji kosmos şöhlelenmesi diýip atlandyryýarlar.** Bu şöhlelenmäniň ýokary energiýaly atom ýadrolarynyň akymydygyny barlaglar görkezdi. Olaryň 90 göterimigen gowragy, takmynan, $10^9 - 10^{13}$ eW energiýaly protonlardan, 7% töweregi α - bölejiklerden we az mukdary (1% töweregi) agyrrak elementleriň ýadrolaryndan

daşaýarlar, netijede kwarklar bile saklanýarlar. Glýuonlar, diňe iki däl-de, üç kwarky hem bitewi durnukly ulgama baglamaga ukyplydyrlar. Adronlaryň düzümine girýän reňkli kwarklaryň arasynda özara täsiri üpjün etmek üçin glýuonlaryň sany sekize deň bolmalydyr.

Şeýlelikde, häzirki wagtda hakyky sada bölejikler diýip kwarklary, leptonlary we düýpli özara täsirleriniň daşajjylaryny hasap etmek bolar.

1996-njy ýylda amerikaly fizikeriň topary özleriniň geçiren tejribe barlaglarynyň esasynda kwarklaryň hem içki gurluşynyň bardygyny we has owunjak bölejiklerden durýandygyny hakynda çaklamany aýtdylar. Ýöne entek bu çaklama ýeterlik ynandarlykly tassyk edilenok.

1967-nji ýylda A. Salam (Päkistan), S. Waýnberg (ABŞ) we soňra olara goşulan Ş. Gleşou (ABŞ) elektromagnit we gowşak özara täsirleri birleşdirýän elektrogowşak özara täsiriň nazaryýetini işläp düzdüler. Bu nazaryýete görä bölejikler pes energiýalarda düýbünden dürlüdürler, ýokary energiýalarda bolsa dürli hallarda ýerleşýän şol bir bölejikdir. Elektrogowşak özara täsiriň nazaryýetinden gowşak özara täsiriň daşajjylarynyň W^+ , W^- we Z^0 aralyk wektor bozonlarydygy gelip çykýar. Bu nazaryýet aralyk bozonlaryň massalarynyň önünden aýtmaga mümkinçilik berdi, ýagny $m(W^+, W^-) \sim 80 \text{ GeV}$, $m(Z^0) \sim 90 \text{ GeV}$. Bu bozonlar 1982-1983-nji ýyllarda Ženewanyň golaýyndaky ýadro barlaglarynyň Ýewropa birleşiginde fizikleriň iki topary tarapyndan ýüze çykarylady. Aralyk bozonlaryň tejribede alnan massalary $m(W^+, W^-) = (81 \pm 2) \text{ GeV}$, $m(Z^0) = (93 \pm 2) \text{ GeV}$ nazary taýdan önünden aýdylan massalar bilen gowy ylalaşýar.

Aralyk bozonlar durnuksyz bölejiklerdir. Olaryň ýaşaaýş wagty bary-ýogy $3 \cdot 10^{-25}$ sekunda deňdir. Muňa seretmezden, olaryň döreýändigini tegigaty we dargamanyň önümleriniň energiýasy boýunça ygtybarly kesgitlenýär.

Aralyk bozonlaryň dargamagynyň häsiýetli görnüşleri:

$$\begin{aligned}
W^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e, & W^- &\rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e, \\
Z^0 &\rightarrow e^+ + e^- \\
W^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & W^- &\rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu, \\
Z^0 &\rightarrow \mu^+ + \mu^-
\end{aligned}$$

β -dargamanyň gowşak özara täsiriň hasabyna bolýandygy üçin oňa aralyk bozonlar gatnaşmalydyr. Muňa laýyklykda, mysal üçin, neýtronuň β -dargamasy ($n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$) hakykatda iki basgançakly hadysa bolup durýar:

$$n \rightarrow p + W^-, \text{ soňra } W^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e.$$

Şeýlelikde, elektrogowşak özara täsir nazaryýeti tejribede örän gowy tassyklandy.

Häzirki wagtda elektrogowşak we güýçli özara täsirleri bir elektroýadro özara täsire birleşdirmek üçin köpsanly şowly synanyşyklar edildi. Bu birleşmä **beýik birleşme** diýip at berildi. Onuň esasynda güýçli gowşak we elektromagnit özara täsirleriň bir ölçegsiz hemişelik bilen häsiýetlendirilýän bir düýpli özara täsiriň dürli ýüze çykmasydygy hakyndaky çaklama ýatyr. Beýik birleşmäniň manysyny düşündireliň. Belli bolşy ýaly, güýçli özara täsirler ýokary energiýalarda, peslere seredeniňde, gowşagrak bolýarlar. Elektromagnit we gowşak güýçler bolsa ýokary energiýalarda artýarlar. Energiýanyň belli bir örän uly bahasynda bu üç güýçler öz aralarynda deňleşip, bir güýjüň dürli görnüşleri bolup bilerler. Şonda 1/2 spinli bölejikler (kwarklar we elektronlar) tapawutlanmany bes ederdiler. 1 GeV töweregi energiýada tejribede gözegçilik edilýän özara täsirleriň hemişelikleri güýçli

Olar, adatça, çalt aýlanýarlar (takmynan, sekuntda 1 aýlaw töweregi tizlik bilen). Neýtron ýyldyzlarynyň kábiri güýçli birhilli däl magnit meýdana eýedir. Olaryň gabap alýan maddalar bilen özara täsiri radiotolkunlaryň şöhlelenmegine getirýär. Bu radiotolkunlary yzygiderli gaýtalanýan impulsar görnüşinde Ýerde radioteleskopyň kömegi bilen kabul edip bolýar. Şeýle neýtron ýyldyzlary 1967-nji ýylda açyldy we olary **pulsarlar** diýip atlandyrýarlar. Neýtron ýyldyzynyň 95-98% töweregi neýtronlardan, galan bölegi bolsa erkin protonlardan we elektronlardan durýar. Neýtron ýyldyzlarynyň mundan beýläk gysylmagy güýçli partlama, ýagny has täze ýyldyzyň ýalpyldysyna getirýär. Şonda onuň maddasynyň köp böleginiň ýyldyzara giňişlige zyňylmagy bolup geçýär. Bu bolsa gaz ümürligi görnüşinde gözegçilik edilýär.

Eger ýyldyzyň massasy Günüň üç massasyndan uly bolsa, onda çalt gysylmany hiç zat saklap bilmez. Ol radiusy grawitasiýa radiusyndan kiçi bolan göwrüme çenli gysylar. Grawitasiýa radiusy örän kiçi ululykdyr. Gün üçin bu radius baryýogy 3 kilometrdir. Grawitasiýa radiusynda ýerleşýän madda we fotonlar çekişme güýjüniň ägirt uludygy sebäpli, onuň çäginde çykyp bilmezler. Älemiň bu çäginde “**gara degişlikler**” diýip atlandyrýarlar. Şeýlelikde, has uly massaly ýyldyzlaryň ösüşiniň ahyrky döwründe “gara deşikler” emele gelýärler.

6.7. Kosmos şöhleleri

Sada bölejikleriň fizikasynyň ösüşi kosmos şöhlelenmesini öwrenmek bilen ysnyşykly baglanyşyklydyr. Bu şöhlelenme Ýere kosmos giňişliginiň hemme ugurlaryndan gelýär. Kosmos şöhleleri 1912-nji ýylda awstriýaly fizik W. Gess (1883-1964) tarapyndan açyldy. Bu şöhleleriň gelip çykyşy entek anyklanmady, ýöne diňe birnäçe çaklamalar bar. Bu çaklamalaryň arasynda rus alymlary

şöhledenme döreyär we ýyldyzyň içindäki maddanyň gyzmagy bolup geçýär. Ondan başga-da, şöhledenmäniň basyşynyň daşyna ugrukdyrylan ulalyan güýçleri grawitasiýa gysylmasyna päsgel berýärler. Protonlar we α – bölejikler kem-kemden birleşip, has agyrrak atomyň ýadrolaryny emele getirýärler. Soňra ýadro ýangyjynyň gutarmagy bilen ýyldyzlaryň jümmüşinde temperaturanyň we şöhledenmäniň basyşynyň peselmegi bolup geçýär. Bu döwürde ýyldyzyň ykbaly bütinleý onuň massasy we şonuň bilen birlikde, onuň maddasyna täsir edýän grawitasiýa güýçleri bilen kesgitlenýär. Bu güýçler maddany ägirt uly dykzlyga çenli gysýarlar, sebäbi olara öň bolşy ýaly, gaz basyşynyň güýji täsir etmeýär. Massasy Güniň massasyndan ($M_g = 1,99 \cdot 10^{30}$ kg) 1,4 esseden uly bolmadyk ýyldyzlar **karlik**, ýagny örän dykz, kiçi ölçegli ak gyzgyn ýyldyz hala geçýärler. Ak karlikleriň massasy Güniň massasyndan az tapawutlanýar, ýöne olar Ýer bilen deňeşdirerli ölçege çenli gysylýarlar. Şonuň üçin olaryň dykzlygy 10^9 – 10^{10} kg/m³ töweregidir. Onda atomlaryň ýadrolary biri-birinden $1 \cdot 10^{-12}$ m töweregi aralyklarda ýerleşýärler. Şu hem ak karligi grawitasiýa güýçleri sebäpli mundan beýläk gysylmaktan saklaýar.

Eger ýyldyzyň massasy $(1,4-2,7)M_g$ aralykda bolsa, onda ýadro ýangyjynyň gory gutarandan soň, dartış güýçleri ýyldyzy gysmagyny dowam edýärler. Netijede, ýyldyzyň grawitasiýa kollapsy, ýagny onuň maddasynyň merkeze çäksiz gysylmasy bolup geçer. Maddanyň dykzlygy örän ýokary derejä ýetende gysylmada atomlaryň elektron gabyklarynyň bozulmagy netijesinde dörän örän dykz erkin elektronlar ýalaňaç ýadrolara basyp girizilýär. Bu elektronlar protonlar bilen birleşip neýtronlara öwrülýärler. Şeýle neýtronlaryň toplumu ägirt uly basyşly neýtron gazyny emele getirýär. Bu basyş merkeze çalt gysylmany (kollapsy) saklaýar. Şeýlelikde, neýtron ýyldyzy diýip atlandyrylýan dykzlygy $2 \cdot 10^{17}$ kg/m³ töweregi bolan durnukly döreme emele gelyär. Neýtron ýyldyzlarynyň ölçegleri örän kiçidir, ýagny 10-20 km töweregi.

tapawutlanýarlar we aralyga baglydyrlar. Takmynan 10^{-30} m aralykda hemişelikler deňleşýärler diýip çak edilýär. Beýik birleşmäniň sada şekiline laýyklykda güýçli, gowşak we elektromagnit özara täsirler 10^{15} GeV töweregi energiýada birleşip bilerler. Şeýle ägirt uly energiýany tejribe şertlerinde almak gümanadyr. Ýöne ony barlamagyň gös-göni däl usuly bardyr. Beýik birleşmäniň sada şekilinde proton ýaşayyş wagty çenden aşa uly bolan durnuksyz bölejik bolmalydyr. Eger güýçli, gowşak we elektromagnit özara täsirler has umumy özara täsiriň dürli ýüze çykmalary bolsa, onda kwarklar we leptonlar şol bir multipletiň düzüjileri bolmalydyrlar. Şeýlelikde, kwarklaryň leptonlara öwürlmek hadysasynyň bolmagy mümkindir. Bu bolsa, kwarklardan durýan protonlaryň absolýut durnukly däl-de, has ýeňil bölejiklere öwürlip, dargap biljekdigini aňladýar. Mysal üçin, şu dargamalaryň bolmagy mümkindir:

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+, \quad p \rightarrow \pi^+ + \tilde{\nu}$$

Protonyň ýaşayyş wagtynyň tejribe çägi $2 \cdot 10^{32}$ ýyldan hem uly diýip hasap edilýär. Häzirki wagtda protonyň durnuksyzdygyny ýüze çykarmak üçin “asyryň tejribesi” diýip atlandyrylýan barlaglar geçirilýär. Ol ýüze çykarylsa, beýik birleşmäniň nazaryýetiniň subuty bolardy.

Ýokarda beýan edilen hemme dört (güýçli, gowşak, elektromagnit we grawitasiýa) özara täsileri birleşdirmek üçin hem synanyşyklar başlandy. Giňeldilen baş grawitasiýa diýip atlandyrylýan nazaryýete laýyklykda grawitasiýa özara täsiriň intensiwligi Plankyň massasyna golaý energiýalarda birleşdirilen özara täsirleriň intensiwligi bilen deňleşmelidir:

$$m_{Pl} \approx (\hbar c / G)^{1/2} \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV} / c^2.$$

Bu ýerde c - ýagtylygynyň tizligi, G – grawitasiýa hemişeligi. Plankynyň massasyna laýyk gelyän häsiýetli ölçegler 10^{-35} metr töweregidir.

6.6.Sada bölejikler we kosmologiýa

Ýadro fizikasynyň kanunlary (güýçli we gowşak özara täsirler) diňe ýadronyň içinde ýüze çykýarlar. Atomyň içinde bolup geçýän we bizi gurşap alýan dünýädäki hadysalar elektromagnit we grawitasiýa özara täsirler bilen düşündirilýärler. Ýöne owunjak dünýädäki hadysalar kosmos möçberindäki hadysalar bilen galtaşýarlar. Muňa birnäçe mysal getirip bolar.

Belli bolsy ýaly, şöhlelenmäniň çeşmesi we kabul ediji biri-birinden daşlaşanlarynda kabul edilýän tolkunynyň uzynlygy kiçelýär (Dopleriň hadysasy, gyzyl süýşme). 1929-njy ýylda amerikan astronomy E. Habbl (1889-1953) galaktikadan daşgary kosmos jisimleriniň spektrinde gyzyl süýşmäniň gözegçilik edilýändigini ýüze çykardy. Gyzyl süýşme galaktikalaryň arasyndaky aralygynyň ulalmagy bilen artýar. Bu ýerden galaktikalaryň haýsy-da bolsa bir umumy merkezden daşlaşýandygy hakynda netije çykarmak bolýar (giňelýän Älem çaklamasy). Älemiň giňelmegi hemme ugurlar boýunça deňdir. Bu häsiýet Galaktikalaryň we galaktikalaryň toplumynyň arasyndaky aralyklara (R) deňölçegli tizlikler (v) bilen biri-birinden daşlaşýandyklarynda ýüze çykýar (Habblyň kanuny):

$$v = HR$$

Bu ýerde $H = 75 \text{ km/(s} \cdot \text{Mpk)}$ Habblyň hemişeligi. Eger aralyk megaparsekde (Mpk) ölçenýän bolsa, onda tizlik km/s birlikde aňladylýar. ($1 \text{ Mpk} \approx 3,1 \cdot 10^{19} \text{ km}$).

1922-1924-nji ýyllarda rus alymy A. A. Fridman (1888-1925) göräýinligiň umumy nazaryýetine esaslanyp, Älemiň durnukly halda bolup bilmejegini hasaplap görkezdi.

“Uly partlama” şekiline görä, takmynan, 10-20 milliard ýyl mundan ozal Älemiň hemme maddasy bir başlangyç nokatda jemlenen we maddanyň dykzlygy, energiýasy, giňişligiň – wagtyň egriligi tükeniksiz bolupdyr diýip hasap edilýär. Bu durnuksyz ýagdaý uly partlama getirýär. Şonda maddanyň gyzgynlygy aýylganç uly bolýar (10^{32} K töweregi). Soňra Älemiň giňelmegi başlaýar. Ýöne çekişme güýçleriniň islendik aralykda täsir edýändikleri sebäpli, olar giňelmäni haýalladyp biler we giňelmäniň gysylma öwrülmegi mümkindir. Geçen asyryň 50-nji ýyllaryna çenli Älemiň massasy aýgytlaýjy massadan kiçi hasap edildi we Älemiň häzirki giňelmegi mydama dowam eder diýip çaklanyldy. Ýöne neýtrinonyň bardygy tejribede subut edilenden we onuň tebigatda giň ýaýrandygy anyklanandan soň, Älemiň massasynyň kesgitlemeklige täzeden seredildi. Eger neýtrinonyň massasy noldan tapawutlanýan bolsa we ýeterlik uly bolsa, onda Älemiň massasy aýgytlaýjy massadan uly bolup, iru-giç giňelmäniň gysylma bilen çalşylmagy mümkindir. Şeýlelikde, ýadro fizikasynyň soraglary kosmologiýanyň wajyp soraglary bilen kesişýärler.

Şol bir wagtda, häzirki galaktikalaryň bolmagy ýyldyzlaryň we beýleki kosmos jisimleriniň tötänleýin dörän ýerli dykzlandyrmada grawitasiýa çekişmesiniň islendik itekleşmäni ýeňip geçende gyzan gazdan (plazmadan) döreýändigini bilen şertlenendir. Bu şerterde maddanyň täze bölejikleriniň gysylmagy we eýelenmegi grawitasiýa gysylmasynyň goşmaça ösmegine we ahyr soňunda örän uly ölçeqli jisimleriň emele gelmegine getirýär. Ýyldyzlaryň toplanýan ýyldyzara gurşawdan döremegi ägirt uly temperaturalarda gazyň örän ýokary dykzlyklara çenli gysylmagy bilen bir wagtda bolup geçýär. Ondan hem başga, ýyldyzlaryň maddasynyň himiki ösüşi, olaryň agyr elementler bilen baýlaşmagy bolup geçýär. Ýyldyzlaryň jümmüşinde bolup geçýän ýylylyk ýadro täsirleşmeleri ýyldyz energiýasynyň çeşmesi bolup durýar. Bu ýerde protonlar birnäçe öwrülişiklerden soň, α – bölejige öwrülýärler (10.6-njy bölümçä seret). Boşayan baglanyşyk energiýanyň hasabyna bolsa γ -