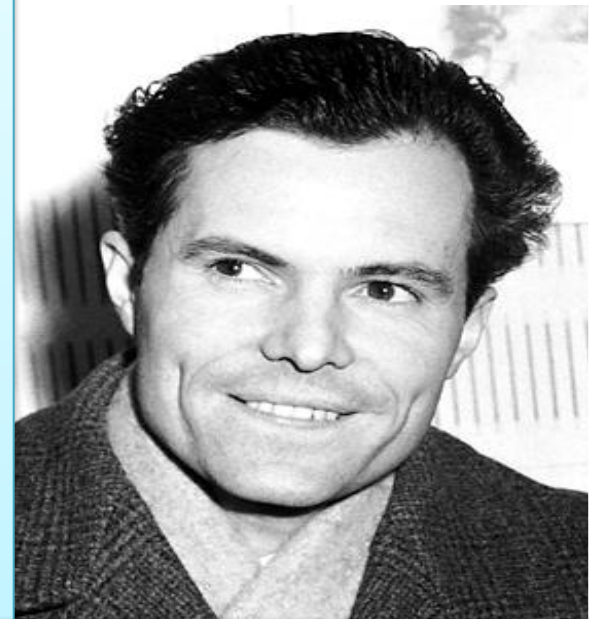




Ядролық гамма  
резонанс. Мессбауэр  
эффектісі

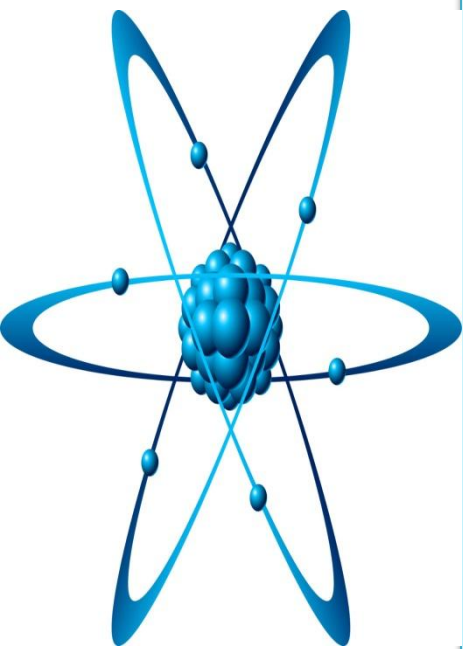
**Рудольф Людвиг Мёссбауэр** (нем. *Rudolf Ludwig Mößbauer*) — 1929 жылдың 31 қаңтарында Мюнхен қаласында дүниеге келген) — неміс физигі, атомдық ядро физикасы және элементар бөлшектер физикасының негізгі маманы, 1961 жылы Нобель сыйлығының иегері атанды.

Рудольф Мёссбауэр Рудольф Мёссбауэр Мюнхенде дүниеге келген және фототехник Людвиг Мёссбауэрдің және Эрн Мёссбауэрдің жалғыз ұлы болып табылады. Өзі туылған өңірдегі мектепті аяқтағаннан кейін ол Мюнхен – Пазинг гимназиясына оқуға түседі, және ол гимназияны 1948 бітіріп шығады. Бірқатар уақытта Мёссбауэр оптикалық фирмада жұмыс істейді, және өзінің музыкалық талантына қарамастан, Рудольф физика ғылымына қызығушылық танытады, сол үшін Мюнхендегі Техникалық институтке оқуға тапсырады.

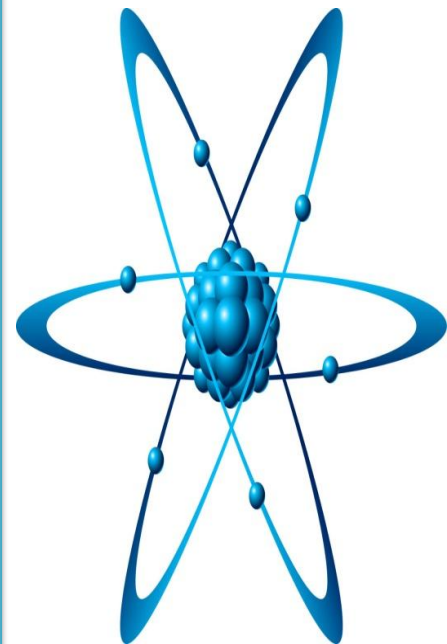
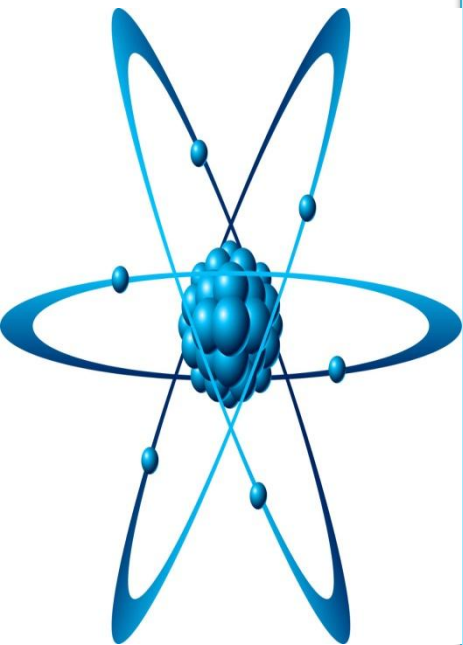
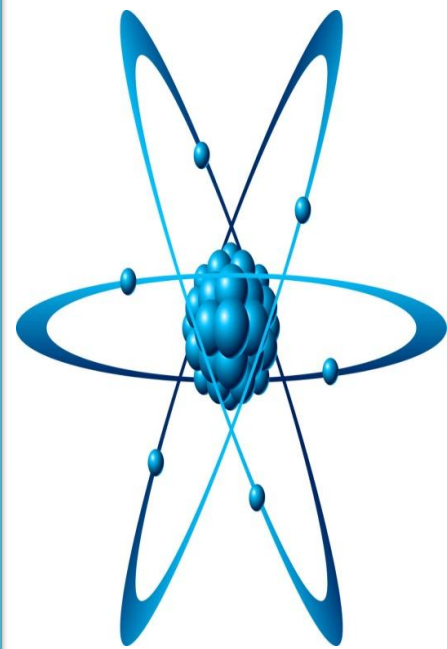




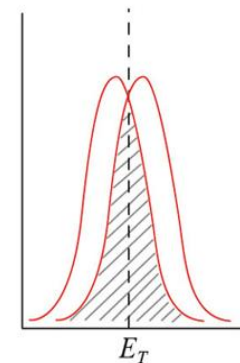
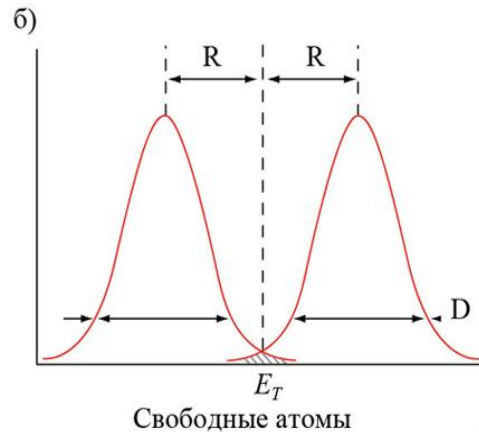
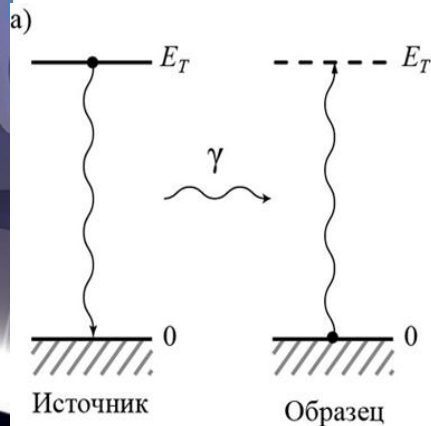
1995 – 1957 жылдар арасында Гейдельбергтегі Макс Планктың Медициналық зерттеулер институтының физикалық бөлімінде гамма-нұрдың жұтылу құбылысын зерттей отырып диссертациялық жұмыспен айналысты. Осы жылдары ең алғаш  $\gamma$ -нұрдың қайтарымсыз резонанстық жұтылу құбылысын – ядролық гамма резонанс құбылысын бақылады. 1958 жылдың қаңтар айында Мюнхендегі Техникалық университеттің (TUM) степендиант – зерттеушісі атанды, және де профессор Хайнц Майер-Лейбництің басшылығымен өзінің докторлық диссертациясын қорғап шықты. Дәл осы жылдары Макс Планктың Медициналық зерттеулер институтында ядролық гамма резонансты айқын дәлелдеп көрсеткен тәжірибені іске асыруға мүмкіндік алды.



Мессбауэр спектроскопиясының дамуы 1958 жылы жас неміс физигі Рудольф Мессбауэрмен «ядролық гамма-резонанс құбылысы» атауымен ашылған. 1961 жылы осы ашылымның авторы Нобель сыйлығына ие болды. Мессбауэр эффектісінің ашылғанына 40 жылдан асты, сонымен қатар әлі күнге дейін бұл ғылым әдісі тереңірек дамып, кең қолданылуда. Мессбауэр эффектісі ғылым мен техниканың әр облысында пайдаланылады. - Ядролық физикада қозған күйдегі ядроның қасиетін, өмір сүру уақытын, дипольдік магниттік және электр квадрупольдік моменттерін зерттеу үшін пайдаланылады. - Қатты дене физикасында – металлдардың, қорытпалардың және жартылай өткізгіштердің кейбір микроскопиялық қасиеттерін зерттеп, қарастыру үшін және т.б. пайдаланылады. - Химияда – қосылыстардағы атомдардың валенттік күйін бақылау үшін, және химиялық байланыстардың табиғатын, құрылымын, катализаторлардың қасиетін, химиялық реакциялардың кинетикасын, және т.б. қасиеттерін бақылап, зерттеуі үшін пайдаланылады. - Геологияда, минералогияда, биологияда, медицинада және т.б. ғылымдарда пайдаланылады.



Төбілу әсерінен гамма-нұрлану кезінде шығарылған фотонның энергиясының нұрлану энергиясынан  $T_{\gamma} = E/2M_{\gamma}c^2$  ядроның кинетикалық энергиясына кем болатыны белгілі. Төбілу тек қана нұр шығаруға ғана емес оны жұту кезінде де орын алады. Сондықта негізгі күйдегі гамма ядроны қоздыру үшін гамма-кванттың энергиясы қозу энергиясынан дәл сондай энергияға артық болуы тиіс. Демек, ядроны қоздыруға керек гамма-кванттың энергиясы, дәл сол ядро дәл солкүйден негізгі күйге көшкенде шығаратын гамма-кванттың энергиясынан  $2T_{\gamma} = E/M_{\gamma}c^2$  атық болуы тиіс. Мұндай жағдай барлық радиациялық көшулерге тән. Осыдан ешқандай фотон үшін резонанстық жұтылу мүмкін емес сияқты. Бірақ ол олай емес. Резонанстық жұтылу деп жүйені дәл сондай жүйе қозған күйден негізгі күйге көшкенде шығаратын нұрдың көмегімен, қоздыруды айтады.



Кез-келген тұрақсыз күй үшін анықталмайтындық теңсіздігі орындалады. Ондай күй моноэнергиялық емес, оның энергиясы

$\Gamma = \hbar/\tau$  дәлдікпен ғана анықталады.  $\Gamma$ -шамасын осы деңгейдің  $\tau$  абиғи ені деп атайды. Егер  $\Gamma > T_T$  шарты орындалса, шығару спектрі мен жұтылу спектрі қабаттасады да, резонанстық жұтылу бақыланады. Мұндағы  $T_T$  - тебілу энергиясы. Бұл шарт оптикалық нұрлану үшін жақсы орындалады. Бірақ ядролық гамма-нұрлану үшін бұл шарт орындалмайды. Тебілу энергиясы қозу энергиясының шаршысына пропорционал және ядролық  $\gamma$ -кванттық энергиясынан онның бірнеше дәрежесі есе артық болғандықтан, бұл шарт қатты бұзылады.

Тебілу энергиясын теңгеру үшін Доплер эффектісін қолдануға болады. Бірақ ол үшін өте жоғары жылдамдықтар қажет болады.

Көбінесе, гамма-нұрдың резонанстық жұтылуы ядролардың жылулық қозғалысының арқасында іске асады. Бұл жағдайда шығару сызығы мен жұтылу сызығының ені табиғи  $\Gamma$  енімен емес, доплерлік кеңею енімен анықталады:

$$D = 2\sqrt{RkT}$$

Ол бөлмелік температура ( $T=300\text{К}$ ,  $kT=0.025\text{эВ}$ ) үшін

$$D(300\text{К}) = 2\sqrt{10^{-3} * 2,5 * 10^{-3}} \approx 10^{-2}\text{эВ}$$

Мұндағы  $R = T_{\text{я}}$  - ядроның тебілу энергиясы,  $T$ -температура. Доплерлік кеңею  $D$  мен  $R$  шамалас болғандықтан, шығару сызығы мен жұтылу сызығы ішінара қабаттасады. Осы қабаттасу нәтижесінде резонанстық жұтылм мүмкін болады.

Резонанстық жұтылуды резонанстық гамма-нұрдың дәл осы заттан жасалған табақша арқылы бақылайды. Фонның энергиясы өту энергиясымен бірдей болса, жұтылу күрт өсіп, табақша арқылы өткен квант саны күрт төмендейі.

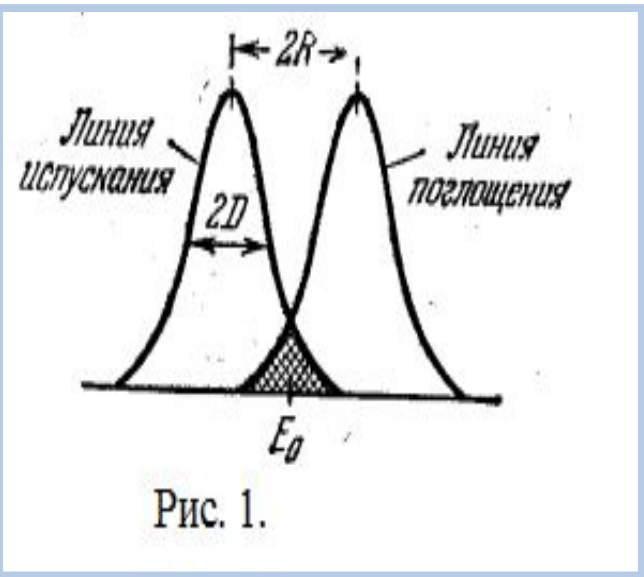
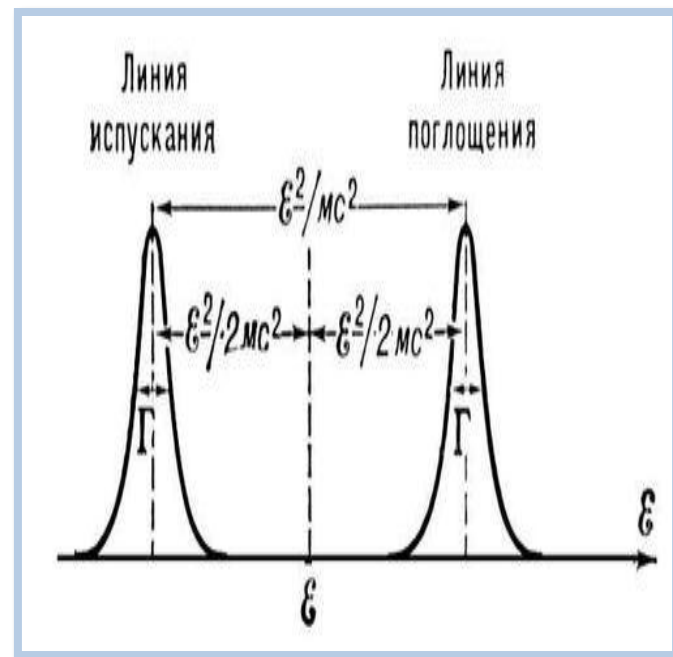


Рис. 1.



1957 жылы Р. Мессбауэр, резонанстық жұтылудың температураға тәуелділігін зерттеу барысында, резонанстық жұтылудың температура төмендегенде кемудің орнына, керісінше артатындығын байқады. Оны түсіндіру үшін, ол белгілі жағдайларда (төмен өту энергиясы мен төменгі температура кезінде) гамма кванттарының тебіліссіз шығалуы мен жұтылуы мүмкін деп пайымдады. Бұл кезде тебілу энергиясы атомды кристалдық тордың түйінінен жұлуға да, кристалдың энергиялық күйін өзгертуге де жұмсалмай, кристалға тұтас беріледі. Кристалдың массасының өте зорлығынан тебілу энергиясы

$$R = \frac{P_v^2}{2} * 10^8 M_n = \frac{T_n}{10^8} \approx 5 * 10^{-10} \text{эВ} \ll \Gamma$$

болады да, шығару сызығы мен жұтылу сызығының айырмашылығы жоғалады:

$$E_{\text{шығ}} = E_{\text{жұту}}$$

Сонымен бірге, өте төмен температуралар үшін Доплерлік кеңею де жойылады. Ол енді:

$$D(88\text{K}) = 2\sqrt{RkT} = 2\sqrt{5 * 10^{-10} * 0.0075} \approx 4 * 10^{-6} \text{эВ} < \Gamma$$

табиғи енінен кіші болады.



Басқаша айтқанда, бұл жағдайда өте сүйір, ені сызықтың табиғи еніне тең, резонанстық жұтылу байқалуы керек. Өзінің бұл пайымын Мессбауэр екіні тәжірибесінде дәлелдеді.

Ол температурасы  $T=88\text{K}$  криостатта орналастырылған  $^{77}_{192}\text{Ir}$  көз шығаратын нұрдың басқа криостаттағы  $^{77}_{192}\text{Ir}$  ядролармен жұтылуының қарқынының көздің қозғалу жылдамдығына тәуелділігін зерттеді. Зерттеу нәтижесі 2 – суретте көрсетілген. Мұнда абциссалар өсі бойымен көздің қозғалу жылдамдығы мен платина жұтқыштар арқылы өткен гамма-кванттардың қарқындарының айырмасы салынған. Суреттен, резонанстық жұтылудың секундына бірнеше саниметр жылдамдық үшін-ақ бұзылатыны көрінеді. Бұған  $\gamma$ -кванттың энергиясының доплерлік өрісінің  $10^{-5}$  эВ-тан аз мәні сәйкес келеді.

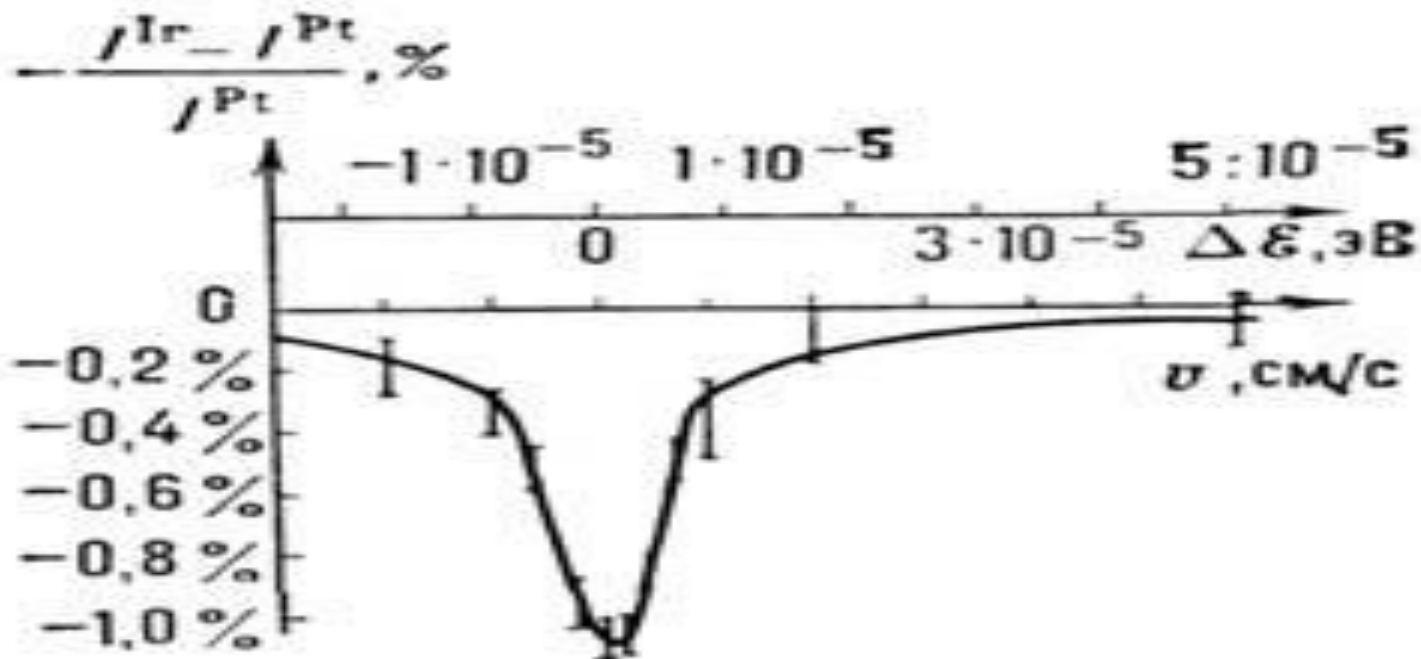
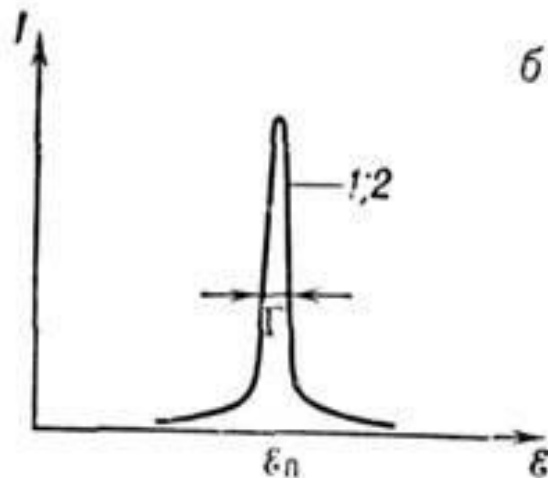


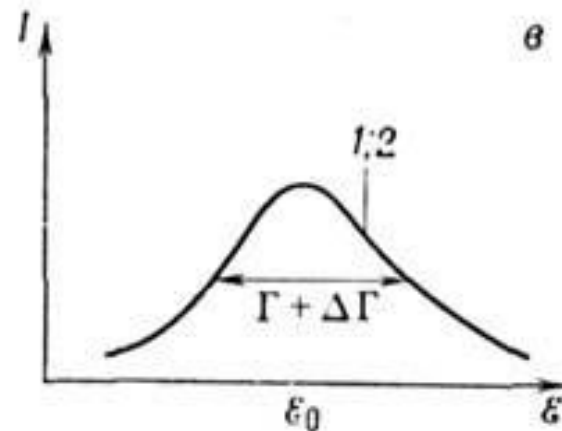
Рис. 1. Линии испускания (1) и поглощения (2)  $\gamma$ -квантов атомными ядрами в газах (а), в твёрдых телах (б), в жидкостях (в):  $\mathcal{E}_0$  — энергия ядерного перехода;  $R = \mathcal{E}_0^2/2Mc^2$  — энергия отдачи;  $\Delta = 2\sqrt{RkT}$  — доплеровская ширина;  $\Gamma$  — естественная ширина линии;  $\Delta\Gamma = 2\hbar D/\lambda^2$ ;  $D$  — коэффициент диффузии;  $\lambda$  — приведённая длина волны  $\gamma$ -излучения.



а



б



в

Жоғарыда айтқанымыздай гамма-кванттардың резонанстық жұтылу әдiсiмен энергияның өзгерiсiн аса жоғары дәлдікпен өлшеуге болады. Ол оны одан бұрын басқа әдiстермен байқауы мүмкін болмаған, аса нәзік құбылыстары бақылау және зерттеу үшін қолдануға мүмкіндік береді. Енді олардың кейбіреулерін қарастырайық:

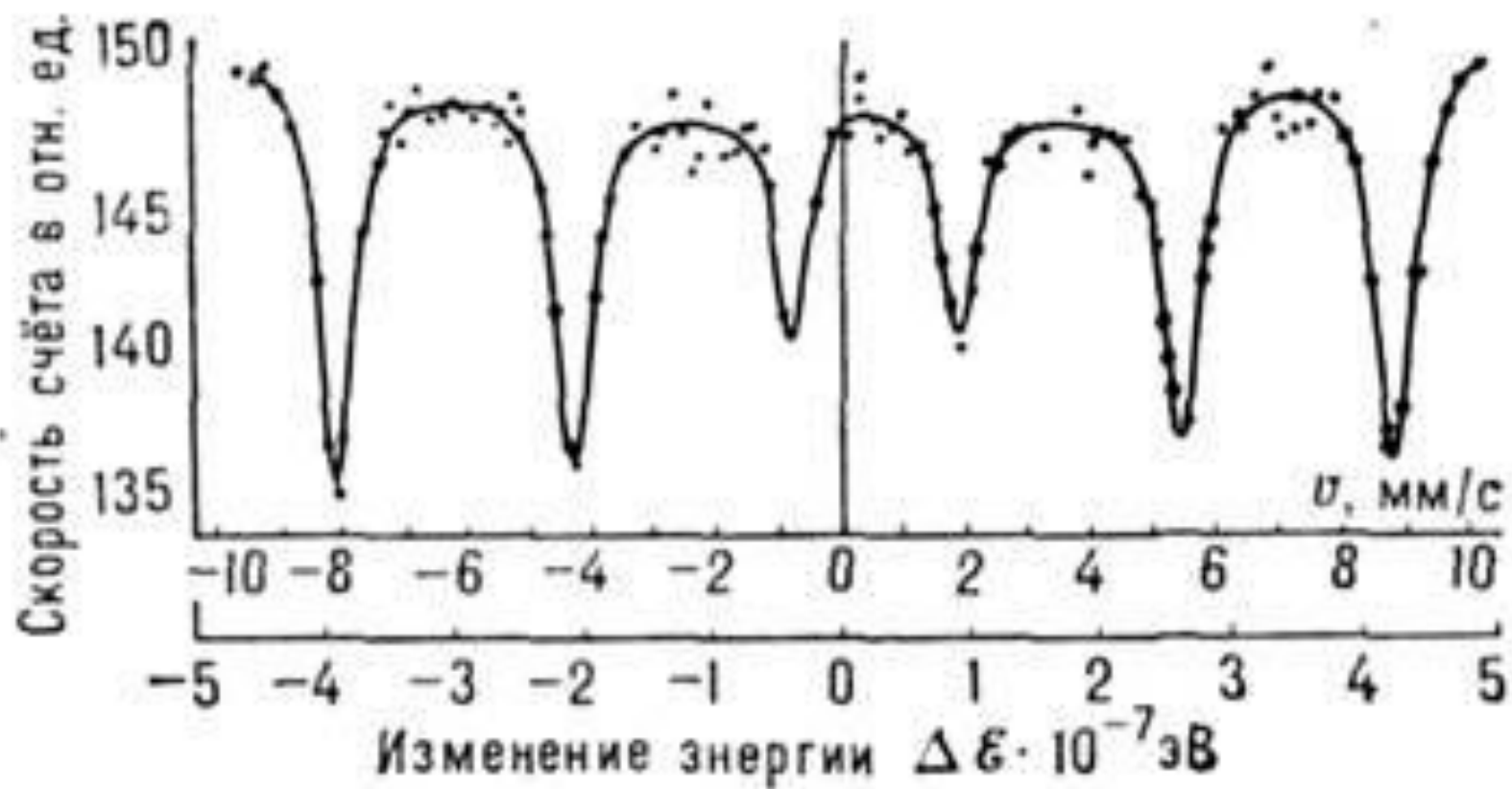
1. Ядролық деңгейлердiң аса нәзік түзілісі. Бұрын атағанымыздай ядроның магниттік моментінің оны қоршаған электрондардың орташа магнит өрісімен әсерлесу энергиясы:

$$\Delta E = \mu_{\text{я}} * B \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ эВ} \quad \bar{B} = 10 \text{ Тл}$$

мұндағы  $\mu_{\text{я}} = 5,051 * 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$  ядролық магетон, - атомның электрондық қабығының ядро өңірінде туғызатын магнит өрісінің орташа индукциясы. Осыдан, энергиялық деңгейлердiң салыстырмалы ығысулары:

Ауысу энергияларының бірнеше эВ атомдық электрондар үшін  $\Delta E/E_{\gamma} \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ эВ}$  . Спектрлік сызықтардың мұндай ығысулары оптикалық спектроскопиялық әдiстермен жақсы өлшенеді. Энергияның  $10^4 \div 10^5 \text{ эВ}$  мәндері тән ядролық деңгейлер үшін бұл шама

$$\Delta E/E_{\gamma} \approx (10^{-7} \div 10^{-6}) / (10^{-5} \div 10^{-4}) \text{ эВ} \approx 10^{-12} \div 10^{-10}$$



2. Қызыл ығысу. Жалпы салыстырмалық теориясы бойынша энергиясы  $E_\gamma$  гамма-квант гравитациялық өрісте өзін массасы бөлшек сияқты көрсетеді. Гравитациялық өрістің күш сызықтарының бойымен шу кезінде  $\frac{E_\gamma}{c^2}$  ол үдетулі, оның энергиясы

$\Delta E = mgh = \frac{E_\gamma}{c^2} * gH$  -қа өсу керек. Мұндағы  $H$  - құлау биіктігі,  $g$  - еркін түсу үдеуі. Бұл кезде оның жиілігі:  $\Delta \nu = \frac{E_\gamma}{2\pi c^2} * gH$  -қа өседі.

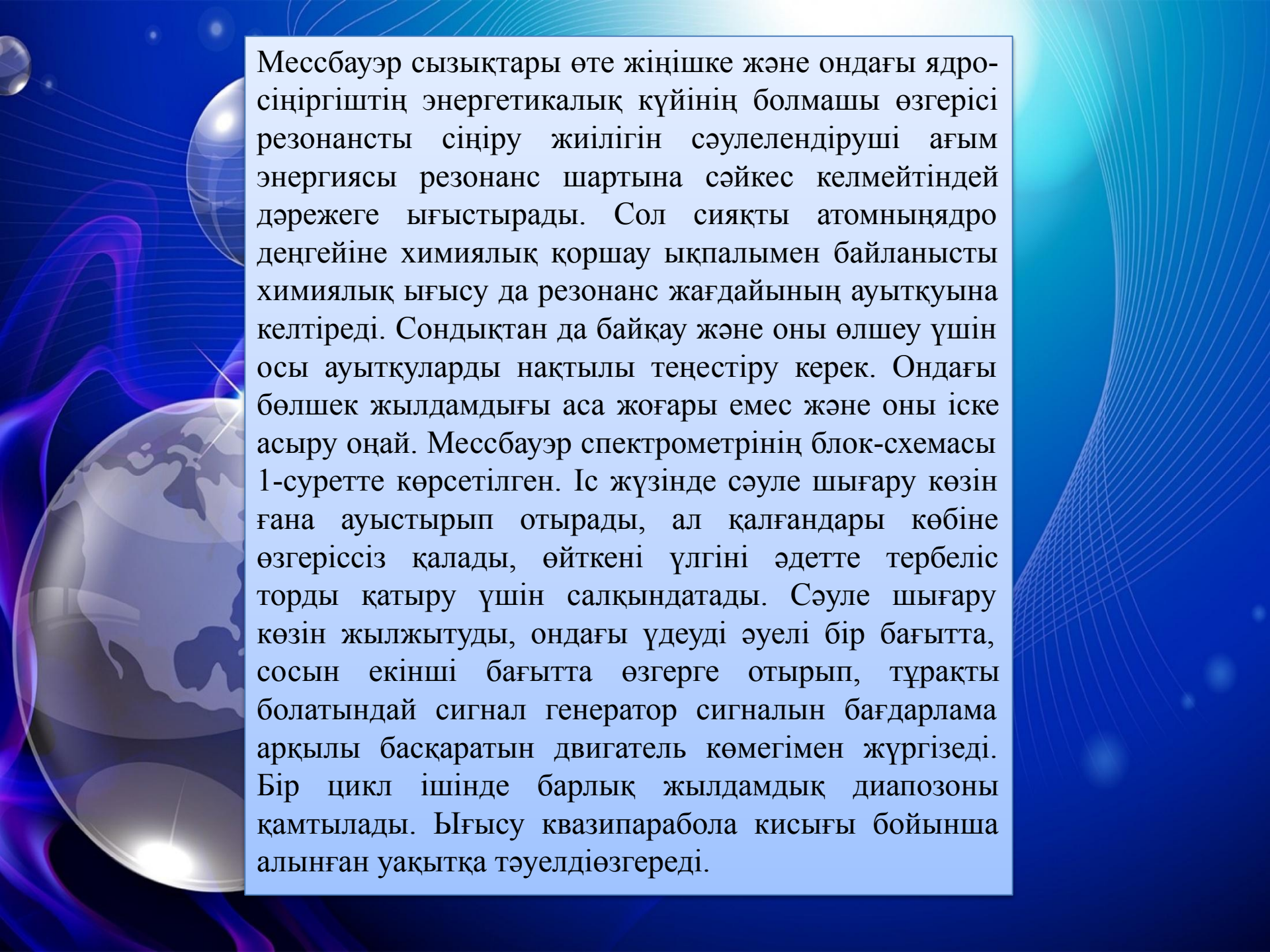
Керісінше гравитациялық өріс бағытына қарсы ұшқан гамма-кванттың энергиясы, сол шамаға азаю керек. Сәйкес жиілі де кемиді. Энергияның салыстырмалы өзгерісі өте аз. Мұндай ығысуды теңгеру үшін керек жылдамдық  $0,75$  мкм/с, және энергиясы

$5 * 10^{-12} = 10^{-3} \Gamma$  дәлдікпен өлшеу керек болады.

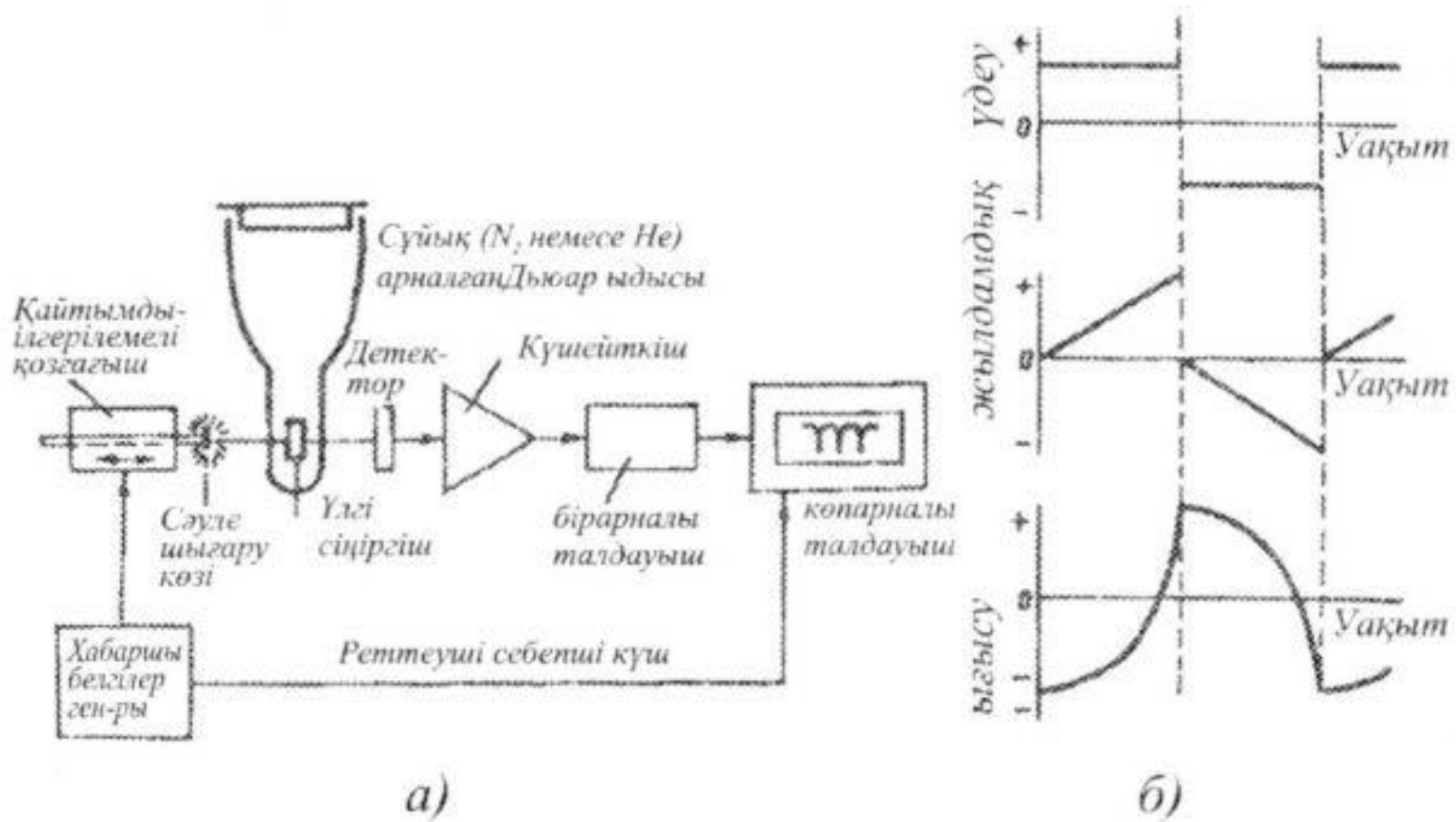
Мұндай өлшеулерді 1959 жылы Паунд пен Ребка, 1965 жылы Паунд пен снайдер жүргізді. Олардың нәтижелері ЖСТ-ның пайымдауларымен келіседі.

$\gamma$ -Кванттарды шығарғанда атом ядросы қалыпты күйіне келеді. Сәуле шығару энергиясы тек қоздырылған және қалыпты күйдегі энергетикалық күйлердің айырмашылығымен ғана анықталмайды. Сәуле шығару кезінде ядроқатты күйде тұрған атом үшін елеусіз болып саналатын берілісті (отдача) басынан өткереді, ал мұндай жағдайда  $\gamma$ -кванттар беріліссіз сәуле шығарады, олар сол элементтің қоздырылмаған атомдарымен сіңіріле алады. Ядро-сәуле шығарғыш пен ядро-сіңіргіш арасындағы әр түрлі химиялық қоршауда ядроның энергетикалық күйлері,  $\gamma$ -кванттардың резонансты сіңірілуін болдырмауға жеткілікті ядроның энергетикалық күйінің қайсыбір айырмашылығын туындатады. Энергиялар арасындағы мұндай айырмашылықты Допплер эффектісінің көмегімен теңестіреді, ол  $\gamma$ -квант сәуле шығару энергиясымен сәйкес салыстырмалық қозғалыс жылдамдығына

тәуелді. Қайсыбір қозғалыс жылдамдығы кезінде резонансты сіңіруі басталады.  $\gamma$ -кванттардың сіңірілу интенсивтігінің қозғалу жылдамдығына тәуелділігі Мессбауэр спектрі деп аталады. Мессбауэр спектроскопия көмегімен ядролық энергетикалық деңгейлері ұтымды орналасқан  $^{57}\text{Fe}$  изотопын жиі пайдаланып, темір қосылыстарын зерттейді. Бұл изотоптың негізгі деңгейден 14,4 кэВ жоғары жатқан метотұрақты деңгейі бар, әрі осы деңгейлер арасындағы өзара ауысу негізгі күйде тұрған  $^{57}\text{Fe}$  ядроларымен оңай сіңіретін  $\gamma$ -сәуле шығаруды береді.

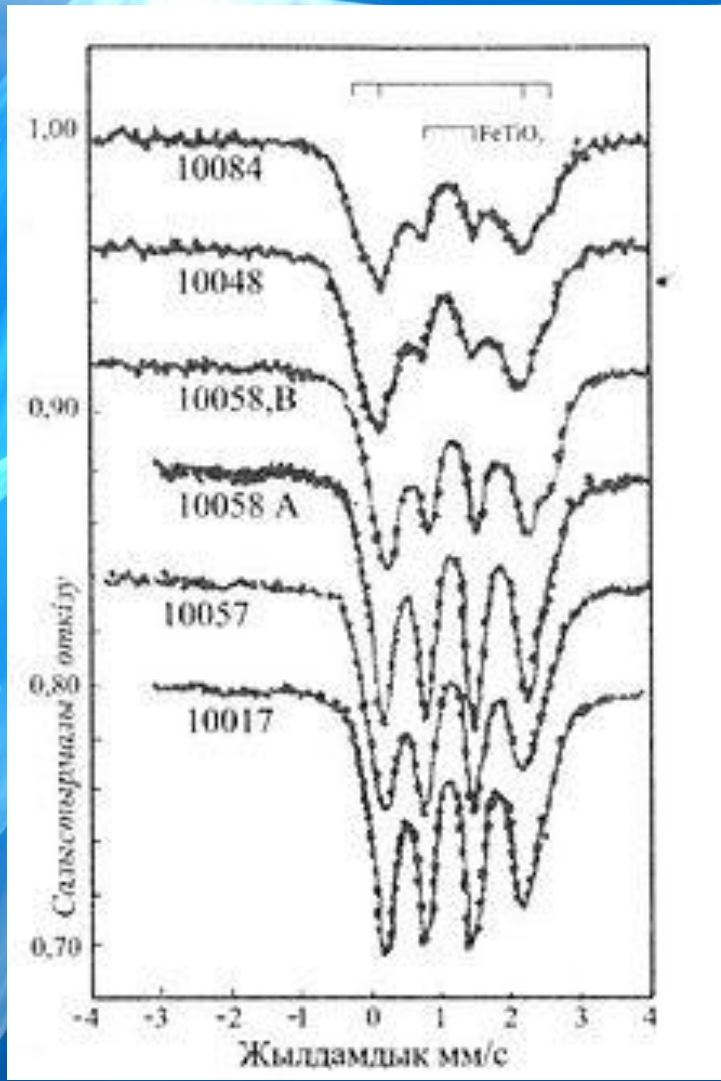


Мессбауэр сызықтары өте жіңішке және ондағы ядро-сіңіргіштің энергетикалық күйінің болмашы өзгерісі резонансты сіңіру жиілігін сәулелендіруші ағым энергиясы резонанс шартына сәйкес келмейтіндей дәрежеге ығыстырады. Сол сияқты атомның ядро деңгейіне химиялық қоршау ықпалымен байланысты химиялық ығысу да резонанс жағдайының ауытқуына келтіреді. Сондықтан да байқау және оны өлшеу үшін осы ауытқуларды нақтылы теңестіру керек. Ондағы бөлшек жылдамдығы аса жоғары емес және оны іске асыру оңай. Мессбауэр спектрометрінің блок-схемасы 1-суретте көрсетілген. Іс жүзінде сәуле шығару көзін ғана ауыстырып отырады, ал қалғандары көбіне өзгеріссіз қалады, өйткені үлгіні әдетте тербеліс торды қатыру үшін салқындатады. Сәуле шығару көзін жылжытуды, ондағы үдеуді әуелі бір бағытта, сосын екінші бағытта өзгерге отырып, тұрақты болатындай сигнал генератор сигналын бағдарлама арқылы басқаратын двигатель көмегімен жүргізеді. Бір цикл ішінде барлық жылдамдық диапазоны қамтылады. Ығысу квазипарабола кисығы бойынша алынған уақытқа тәуелді өзгереді.



1-сурет. Мессбауэр спектрометрі: а - торап жүйе; б - өлшемдердің өзгеру реті





2-сурет. Ай қыртысы мен шаңының алты үлгісінің Мессбауэр спектрі, онда әр түрлі қатынастағы пироксен (құрамында темірі бар силикатты минералы) көрсетілген.

Детектордан шыққан сигнал бір каналды анализаторға түседі, одан бұйрық беретін басқару двигателімен байланысқан, генератормен синхронды көп арналы анализаторға беріледі. Бұл канал мен жылдамдықтардың жіңішке аралығына сәйкес. Ондағы осциллографта дыбыс берудің жылжу жылдамдығына тәуелділігі кескінделеді. 2-суретте Ай бетінің қыртысы үлгілерінің Мессбауэр спектрлері көрсетілген. Қосылыс ұқсастығы белгілі жыныс спектрлерімен салыстыру арқылы жүргізген.

Мессбауэр спектрі валенттілік күйі мен кристалдық құрылымы жайлы мәлімет береді. Бірақ құрамында осы әдіс сезімтал элеменгтер енетін кейбір қосылыстар үшін ғана береді. Сондай зерттелінген элементтер қатарына темір-57, никель-61, қалайы-119 сияқтылар енеді. Жалпы Мессбауэр эффектісі байқалатын отыздай элемент бар.

1-сурет. Мессбауэр спектрометрі: а - торап жүйе; б-өлшемдердің өзгеру реті

2-сурет. Ай қыртысы мен шаңының алты үлгісінің Мессбауэр спектрі, онда әр түрлі қатынастағы пироксен (құрамында темірі бар силикатты минералы) көрсетілген. Цифрмен жекеленген үлгілер белгіленген. Атом ядросы атом және ион тәріздес төменгі энергиялы негізгі деңгейде және жоғары энергиялы қозған деңгейде бола алады. Бұл жағдайлар диаграммада горизонталь сызықпен бейнеленген. Бұл жағдайда негізгі деңгейдегі энергия нөлге тең. Ал бірінші деңгейдегі энергия оншақты килоэлектрон вольт бола алады. ( $1\text{эВ}=1,6\cdot 10^{-19}$ ).



Назарларыңызға рақмет!!!