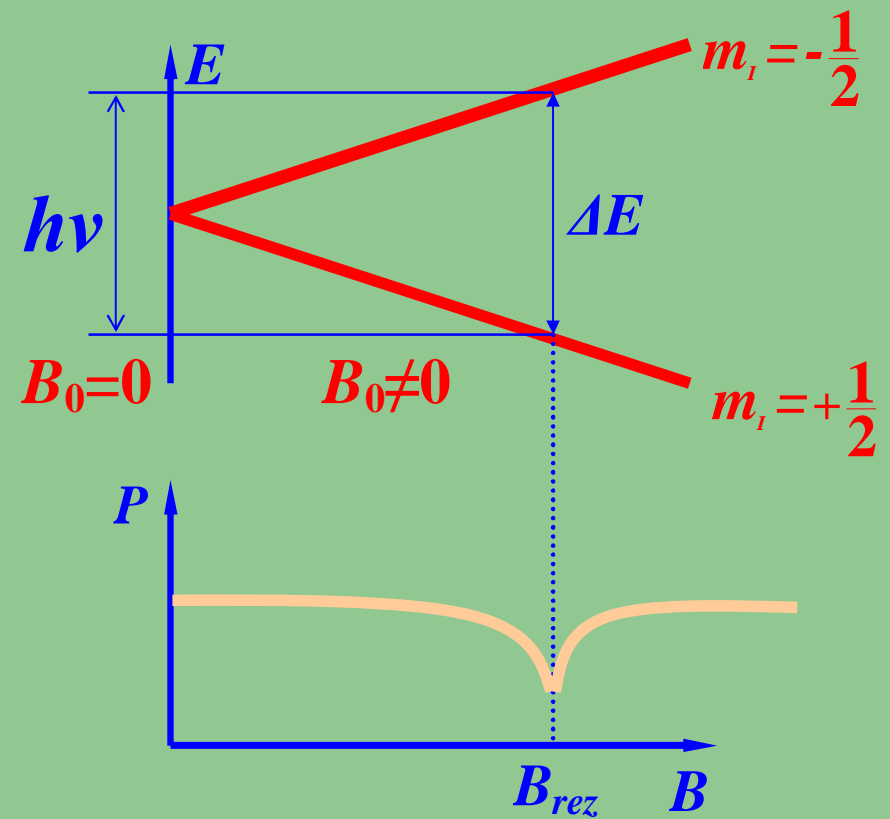


KWANT RADIOFIZIKASY



A. Ataýew

KWANT RADIOFIZIKASY

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

**Türkmebistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi**

Aşgabat 2010

A. Ataýew. Kwant radiofizikasy. Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin synag okuw kitaby. –A. , 2010.

Synag okuw kitaby awtor tarapyndan Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniň “Radiofizika we elektronika” hünäriniň talyplary üçin okalýan umumy okuwlarynyň ýazgylary esasynda ýazyldy. Onda kwant radiofizikasynyň usullary bolan ýadro magnit rezonansynyň, elektron paramagnit rezonansynyň, ýadro kwadrupol rezonansynyň, ikileýin rezonanslaryň, kwant radioelektronikasynyň we kwant magnitometriýasynyň fiziki esaslary beýan edilýär.

GIRIŞ

Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedow ylym-bilim ulgamyna döwlet derejesinde uly ähmiýet berýär. Ýurt baştutanymyz dürli okuw mekdeplerini döwrebap okuw kitaplary we gollanmalary bilen doly üpjün edilmelidigini nygtaýar.

Bu synag okuw kitaby Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniň “Radiofizika we elektronika” hünäri üçin nieýetlenen okuw meýilnamasyna laýyklykda okadylýan umumy okuwlaryň ýazgylarynyň esasynda taýýarlanylady.

Kwant radiofizikasy ylmyň pudagy hökmünde 1960-njy ýyllaryň başynda ýüze çykdy. Fizikanyň bu bölümi kwant ulgamlarynyň (ýadrolaryň, elektronlaryň, atomlaryň, molekulalaryň we ş.m.) radioýygylykly elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelendirmegi we siňdirmegi bilen bolup geçýän hadysalary öwrenýär. Bu hadysalar jisimiň gurluşyny radiospektroskopiki usullar bilen öwrenmegiň esasy bolup durýar. Olar kwant generatorlaryny, güýçlendirijileri we magnitometrleri döretmek üçin hem ulanylýar.

Ilkinji gezek elektron gatlaklaryň magnit häsiýetleriniň täsiri netijesinde radiotolkunlaryň seçijilik bilen siňmesine 1913-nji ýylda Moskwa uniwersitetiniň professory W.K. Arkadyew gözegçilik etdi. 1934-njy ýylda K. Kliton we N. Wilýams radioýygylyk diapazonynda gaz görnüşli ammiagyň inwersiýa spektrlerini aldylar. Şeýlelikde olar mikrotolkun gaz radiospektroskopiýasynyň başlangyjyny goýdular. 1937-nji

ýylda B.G. Lazarew we L.W. Şubnikow gaty wodorodda statiki ýadro siňdirijiligini tejribede kesgitlediler we protonyň magnit momentini ölçediler. 1938-nji ýylda Izidor Rabi atom desselerinde ilkinji gezek ýadro magnit rezonansynyň spektrni aldy. Şu usul bilen birnäçe ýadrolaryň magnit momentleri ýokary takyklyk bilen kesgitlendi. Bu açyş üçin I. Rabi 1944-nji ýylda Nobel baýragyna eýe boldy.

Radiospektroskopiýanyň ösüşine fizikleriň Kazan mekdebiniň alymlary uly goşant goşdy. 1944-nji ýylyň ahyrynda Kazan uniwersitetinde Y.K. Zawoýskiý elektron paramagnit rezonansy (EPR) hadysasyny açdy. Bu açyş kondensirlenen gurşawyň radiospektroskopiýasynyň başlangyjy boldy. B.M. Kozyrewiň, S.A. Altşuleriň, K.A. Waliýewiň düýpli barlaglary EPR-iň we beýleki kwant radiofizikasynyň usullarynyň ösmegine ýardam etdi.

1945-nji ýylyň ahyrynda Bloh we Parsel tarapyndan ýolbaşçylyk edilýän Stenford we Garward uniwersitetleriniň iki topar amerikan fizikleri kondensirlenen gyrşawda ýadro magnit rezonansy (ÝMR) hadysasyny açdylar. Bloh suwuň protonlarynda, Parsel bolsa parafiniň protonlarynda ÝMR-iň signalaryna gözegçilik etdiler. Bu açyş üçin Bloh we Parsel 1952-nji ýylda Nobel baýragyna eýe boldular.

1950-nji ýylda G. Demelt we G. Krýuger ýadro kwadrupol rezonansynyň (ÝKR) spektrini aldylar. Basym düýpli ikileýin rezonanslary hem işläp taýýarladylar. Bu meşhur açyşlar radiospektroskopiýanyň güýçli ösmegine itergi berdi.

Kwant radiofizikasynyň ösüşiniň indiki ädimi 1954-1955-nji ýyllarda amerikan (J. Gordon, G. Saýger, Ç. Tauns) we sowet (N. G. Basow, A. M. Prohorow) fiziklarynyň makalalary bilen baglanyşyklydyr. Olar biri-birine garaşsyz ammiakyň molekularynyň dessesinde ilkinji kwant generatorlaryny

Tegegiň garşylygynyň bu üýtgemesi ÝMR signalyň ν düzüjisini gözegçilik etmäge mümkinçilik berýär.

$$\left(\chi'' = \frac{\nu}{2B_1} \right).$$

Wektor diagrammadan peýdalanyp ÝMR wagtynda nusgaly tegekdäki üýtgeýän naprýaženiýanyň fazasynyň üýtgemegini kesgitläp bileris:

$$tg \varphi \approx \Delta \varphi = -4\pi Q \chi'$$

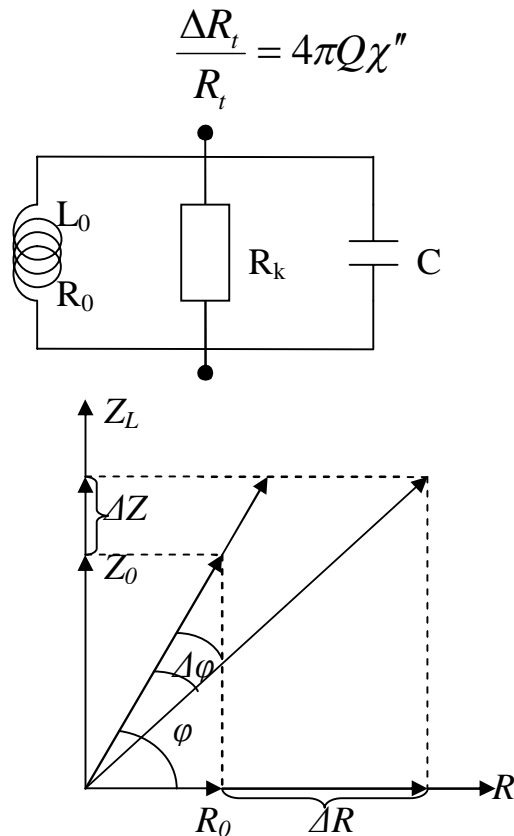
Şeýlelik bilen radioýygylykly gurluş üýtgeýän naprýaženiýanyň fazasynyň üýtgemegini belleýän bolsa, onda dispersiýa signaly gözegçilik edilýär $\chi' = \frac{U}{2B_1}$.

Bu seredip geçen ýönekeý spin detektorymyzyň saýlap alyp bilijilik ukyby hem-de ÝMR signallarynyň güýçliligi pes bolýar. Eger barlanylýan madda ýerleşdirilen yrgyldyly tegek radioýygylykly köprü birikdirilse, onda agzalan kemçilikleri aradan aýyrmak bolýar.

jisimiň $M=\chi B_0$ ýadro magnitiligi tegegiň parametrlerine täsir edýär. Bu ýerde χ - ýadro magnit kabul edijilik:

$$\chi = \chi' - i\chi'', \quad \chi' = \frac{U}{2B_1}, \quad \chi'' = \frac{\nu}{2B_1}$$

Nusgaly tegegiň garşylygynyň rezonans sebäpli görälik üýtgemesi şeýle bolýar:



dörediler. Atomlaryň we molekulalaryň desselerinde döredilen kwant generatorlary özuniň ajaýyp häsiýetleri bilen derrew alymlaryň ünsini özüne çekdi. Ilkinji kwant generatorlary generirlenen ýygylgyň 10^{-8} otnositel durnuksyzlygyny üpjün etdiler. Soňra bu görkeziji $10^{-12} - 10^{-13}$ ýetdi. Häzirki wagtda wodorod atomlarynyň dessesindeki generator bir günde $2 \cdot 10^{-14}$ durnuksyzlyk bilen häsiýetlendirilýär. Kwant generatorlarynyň ýygylgynyň ýokary durnuklylygy olary wagtyň we ýygylgyň nusgasy hökmünde ulanmaga mümkinçilik berdi.

Kwant generatorlary bilen bir wagtda kwant güýçlendirijileri hem döredildi. Olaryň esasy artykmaçlygy hususy gohunyň derejesiniň örän kiçiligidir. Olaryň arasynda has geljegi ulusy gaty jisimlerdeki EPR-iň esasynda döredilen abzallardyr. Kwant generatorlary ylymda we tehnikada täze mümkinçilikleri açdy. Olaryň kömegi bilen taryhda ilkinji telewizion şekiller Ýeriň emeli hemrasyny ulanmak arkaly Amerikadan Ýewropa geçirildi.

Kwant radioelektronikasynyň abzallarynyň esasynda aşa ýokary duýdurlyga we magnit meýdany ölçemegiň uly takyklygyna eýe bolan magnitometrler döredildi. Kwant geomagnitometrleriň kömegi bilen Ýeriň magnit meýdanynyň ululygynyň $10^{-7} - 10^{-8}$ böleginiň üýtgemesini bellige alyp bolýar.

Optiki kwant generatorlaryň döredilmegi kwant radiofizikasynyň ösüşinde uly ädim boldy. 1958-nji ýylda amerikaly radiospektroskopistler A. Şawlow we Ç. Tauns tarapyndan ýagtylygyň kwant generatorynyň gurluşy hödürlendi we optiki çäkdäki elektromagnit tolkunlaryny generirmegiň u güýçlendirilmegiň fiziki esaslary beýan edildi. 1960-njy ýylda ilkinji impuls, 1961-nji bolsa ilkinji üznüksiz täsirli optiki generator döredildi. Bu bolsa ýagtylygyň

şöhlelenmesiniň kogorentligi bilen tapawutlanýan hil taýdan täze çeşmäniň döredilendigini aňladýar.

Kwant radioelektronikasynda öwrenilýän hadysalaryň aglaba köpüsi şöhlelenmäniň indusirlenmegi bilen baglanyşyklydyr. Onuň bolmalydygyny 1916-njy ýylda nazary taýdan A. Eýnştreýn tarapyndan öňünden aýdyldy. Adaty tejribelerde indusirlenen şöhlelenme ýüze çykarylmaýar, sebäbi aşaky energiýa derejelerde bölejikleriň sany ýokarka seredeninde köpdür. Şonuň üçin elektromagnit tolkunlarynyň siňdirilme hadysasy agdyklyk edýär. Ýöne indusirlenen şöhlelenmäniň bardygynyň çaklamasy bölejikleriň energiýa derejeleri boýunça termodinamik paýlanyşy bozulanda onuň ýüze çykmagynyň mümkindigi hakyndaky pikire getirdi. Undusirlenen şöhlelenmäni tejribede ýüze çykarmagyň şertleri 1928-nji ýylda G. Kopferman we R. Ladenburg tarapyndan aýdyldy. Olar ilkinji gezek derejelerdäki bölejikleriň sanynyň inwersiýasynyň hökmandygyny bellediler we onuň üçin molekulýar ulgamy ýörite seçijilikli oýandymagyň gerekdigini görkezdiler. Şeýle netijä 1940-njy ýylda sowet fizigi W.A. Fabrikant hem geldi. Ol elektromagnit tolkunlarynyň kwant güýçlendirmesiniň ideýasyna golaý bardyr. Ýöne bu işler alymlary ýeterlik özüne çekmedi. Diňe 1950-nji ýylda tejribede derejelerde bölejikleriň sanynyň inwersiýasyny amala aşyrmaklygyň ilkinji synanyşyklary edildi. Şol ýyl A. Kastler atomlaryň optiki oýandrylmasynyň kömegi bilen zeýeman derejeleriň inwersiýasyny aldy. 1951-nji ýylda E. Persel we R. Paund LiF kristalda ^7Li ýadrolaryň magnit rezonansyny bellige alanlarynda ilkinji gezek indusirlenen şöhlelenmä gözegçilik etdiler. Şöhlelenmäniň kogerentliginden başgada, elektromagnit tolkunlarynyň hemme diapazonynyň kwant generatorlaryny güýçlendirme we generasiýa hadysalaryny almagyň umumy prinspleri birikdirýär. Şonuň üçin

L-tegegiň üstünden üýtgeýän tok geçirip üýtgeýän radioýgylykly meýdan döredilýär B_1 .

Içinde derňelýän nusga bolan L-tegek magnit polýusynyň aralygynda ýerleşdirilýär. Tegek \vec{B}_1 meýdanyň ugry bilen \vec{B}_0 meýdanyň ugry biri-birine dikana bolar ýaly ýerleşdirilýär.

Spektrometriň esasy bölegi bolup spin detektory hyzmat edýär. Bu ýerde kwant geçişleriň energiýasy radioýgylykly signala özgerdilýär. Spin detektory hökmünde yrgyldyly kontur, radioýgylykly köpri, gowşak yrgyldyly generator we başgalar ulanylýar.

Spin detektorynda bölünip alnan radioýgylykly signal soň güýçlendirilýär, detektirlenýär we bize amatly gözegçilik eder ýaly özgerdilýär.

Rezonansyň üstünden geçer ýaly şert döretmek üçin magnitiň polýuslarynda ýörite modulýasiýa tegekler (L_m) ýerleşdirilýär. Bu tegekler modulýasiýa generatoryna birikdirilýär.

1.10. ÝMR hadysasyny gözegçilik etmek üçin spin detektorlary. Datçikler

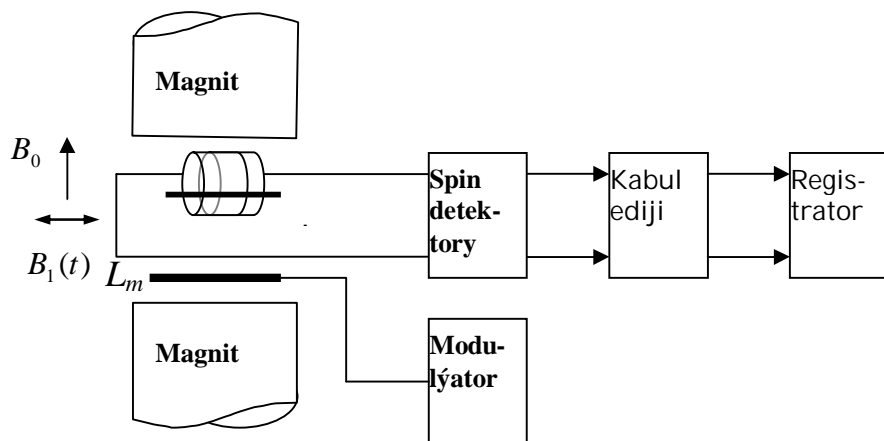
ÝMR hadysasynyň döremegi üçin şert döredilende jisimde M ýadro magnitliliği döreyär. Derňelýän nusga induktiwlik tegegiň içinde ýerleşýär. Şonuň üçin tegegiň doly garşylygynyň işjeň we reaktiw düzüjileri üýtgeýär. Bu ýagdaý bolsa ÝMR signalyny gözegçilik etmäge mümkinçilik berýär.

Goý L_0 hususy induktiwligi we R_0 garşylygy bolan tegek \vec{B}_1 magnit meýdanynda ýerleşdirilen bolsun ($\vec{B}_1 \perp \vec{B}_0$). Eger B_1 – meýdanyň ýgylygy (ω) $\omega_0 = \gamma B_0$ ýgylyga golaý bolsa, onda

Desselerdäki ÝMR usuly özara täsir edişmeýän aýratyn atomlaryň we molekulalaryň magnit häsiýetlerini öwrenmäge mümkinçilik berýär. Şonuň üçin bu usul bilen suwuk we gaty haldaky jisimiň gurluşyny öwrenip bolmaýar. Bu jisimlerde magnit ýadro dipollary diňe daşky magnit meýdany bilen täsir edişmän, biri-biri bilen hem täsir edişýärler. Ondan başgada ýadronyň spinler bilen gyadroeginiň arasynda hem energiýa çalşygy bolup geçýär.

Alymlar kondensirlenen gurşawda (suwuklyklarda we gaty jisimlerde) ÝMR-i gözegçilik etmegiň usulyňy we ýokary duýgurlygy bolan abzallary döredtiler. ÝMR-i gözegçilik etmek üçin şu esasy abzallar gerek: hemişelik we üýtgeýän magnit meýdanlaryň (B_0, B_1) çeşmeleri, kwant geçişleriň energiýasyny signala öwürýän gurluş, bu signaly güýçlendirýän we registrasiýa edýän abzallar.

ÝMR-i gözegçilik etmek üçin synag desganyň umumy çyzgysy



elektromagnit yrgyldylary kwant güýçlendirmegi işläp taýýarlamak bilen meşgullanýan aýratyn ylmy ugur bolan kwant elektronikasyny bölmek bolar. Bu ugur elektromagnit yrgyldylaryny kwant güýçlendirmesiniň prinsiplerini işläp taýýarlamak bilen meşgul bolýar.

1974 ýyldan başlap iki ölçegli (2M) ÝMR spektroskopiýa hem ulanylyp başlandy. Onuň esasyňy 1971 ýylda Jiner hödürledi. Bu usul barlanýan ulgam hakynda has anyk maglumat berýär. Ilkinji gezek ÝMR usuly bilen makroskopiki şekilleri gözegçilik etmegiň mümkinçiliklerini 1972-nji Lauterbur hödürledi. Adam bedenini öwrenmek üçin ÝMR usulyňy ulanmagy ilkinji gezek Damadýan amala aşyrdy.

Häzirki wagtda radiospektroskopiýada has täze ylmy-tehniki gazananlar, şol sanda hasaplaýyş we kriogen tehnika ulanylýar. Bu üstünlikleriň esasynda döredilen abzallar aşa ýokary duýgurlyga we saýgarjylyk ukybyna eýedir. Mysal üçin, ÝMR usuly bilen energiýasy 10^{-31} - 10^{-32} Joul bolan kwant geçişler gözegçilik edilýär we biri-birine 0,1 Gersden hem golaý ýerleşýän iki goňşy spektr signallaryny tapawutlandyryp bolýar.

Şeýlelik bilen, radiospektroskopiýa atomlaryň we molekulalaryň elektron gurluşynyň örän azajyk üýtgemesine getirýän ýagdaýy barlamaga mümkinçilik berýär. Radiospektroskopiýa usullary molekulýar hereketleriň tizligini we häsiýetlerini öwrenmek üçin hem ulanylýar (aralaşma, molekulýar alyş-çalyş we başgalar). Bu usullar molekulýar fizikada, himiýada, biologiyada, saglygy saklaýyşda we beýleki ylmlarda giňden ulanylýar. Soňky ýyllarda kwant radiofizikasynyň usullary tehnika we senagatda giňden ulanylyp başlandy.

Radiospektroskopiýa usullary bolan ÝMR, EPR we ÝKR halk hojalygynda giňden ulanylýar. Türkmenstanda birnäçe

ÝMR tomografy bar. Olar adamyň kelle we oňurga beýnisini, gan damarlaryny öwrenmekde saglygy goraýyşda giňden ulanylýar. Bu usul adam üçin zyýansyzdyr. Onda ulanylýan energiýanyň kuwwaty rentgen we radioizotop usullaryndaky energiýa seredeniňde milliardlarça esse azdyr.

Çyzgyda kwant radiofizikasynyň we kwant elektronikasynyň dürli bölünleriniň arabaglanyşygy görkezilen.

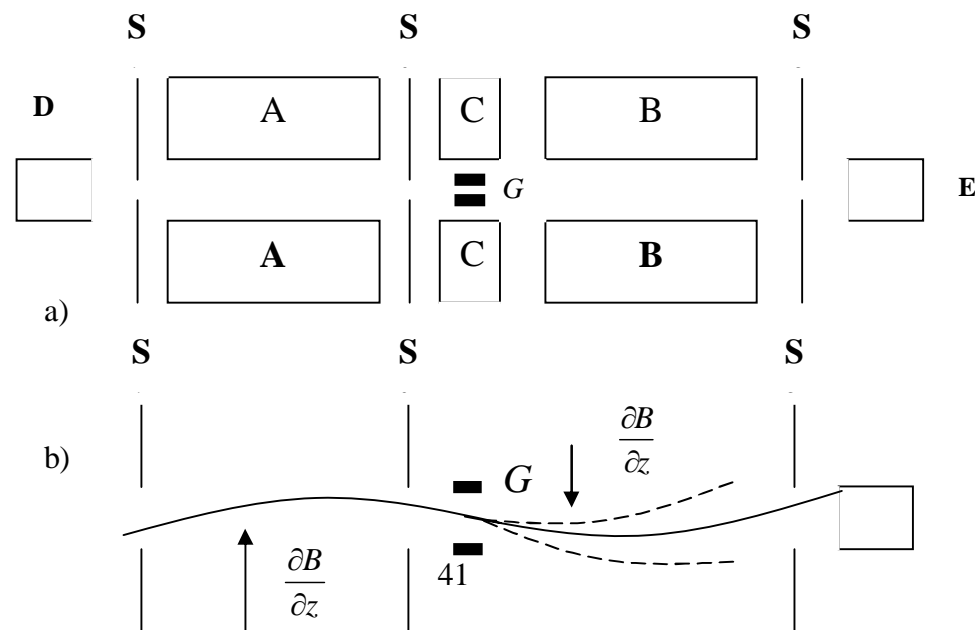
Hödürlenilýän synag okuw kitaby kwant radiofizikasynyň fiziki esaslaryny yzygider beýan edilmegine, şeýle hem olaryň kwant elektronikasynnda we kwant magnitometriýasynda ulanylmagyna bagyşlanýar. Kitapda kwant radiofizikasynyň esasy usullary bolan ÝMR-iň, EPR-iň, ÝKR-iň, ikileýin rezonansyň fiziki esaslary, olaryň tejribe gurluşy, şeýle-de kwant radioelektronikasynyň fiziki esaslary beýan edilýär. Maglumatlar beýan edilende hadysalaryň fiziki manysyna ýeterlik derejede üns berildi, matematiki amaly hasaplar bolsa gysgarak görnüşde getirildi.

Bu ýerde A – abzalyň geometriki parametrlerine bagly hemişelik. Formuladan görnüşi ýaly $\frac{\partial B}{\partial Z}$, A we E ululyklary

bilip dz gyşarmanyň ululygy boýunça μ_z magnit momentini kesgitläp bolýar, ýöne bu usul boýunça magnit momenti kesgitlemegiň takyklygy pes bolýar.

Magnit momenti kesgitlemegiň bar bolan usullaryny kämilleşdirmek üçin Rabi bölejikleriň ýolunyň belli bir böleginde ýadro magnit rezonansynyň şertini döredýär. Magnit bölejikleriň (atomlaryň we molekulalaryň) desseleriniň ÝMR-nyň kömegi bilen birnäçe ýadrolaryň giromagnit gatnaşyklary we magnit momentleri has ýokary takyklyk bilen ölçenildi. Ilkinji gezek protonyň magnit momentiniň ululygy kesgitlendi. Onuň ululygy ýadronyň magnetonyndan 2,79 esse uly bolup çykdy.

ÝMR usuly bilen ýadronyň magnit momentini kesgitleýän desganyň shemasy



ýagdaýynyň ýaşaýyş wagtynyň gysgalmagy bilen baglanyşykdyr.

Signalnyň orta beýikliginde giňligini ölçäp spin-spin relaksasiýa wagtyny (T_2) kesgitlemek bolýar. Bu bolsa derňelýän maddanyň gurluşyny öwrenmäge mümkinçilik berýär.

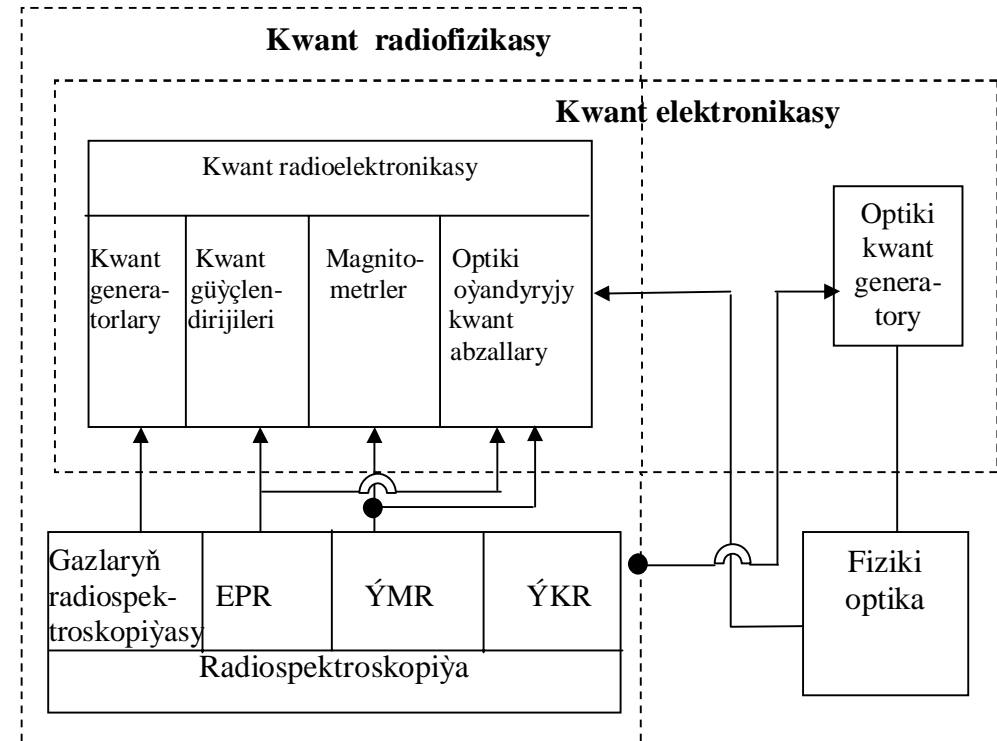
1.9. Atom desselerindäki we kondensirlenen gurşawyndaky ýadro magnit rezonansy

Ilkinji gezek molekularyň desselerde ÝMR-i 1938-nji ýylda Rabi öz işgärleri bilen gözegçilik etdi. Bu wagta çenli atomyň we protonyň magnit momentlerini kesgitlemek boýunça işler bardy. Bu işlerde bir hilli däl magnit meýdanymda μ magnit momenti bolan bölejige f_m güýç täsir edýänligi ulanylýar.

$$f_m = \mu_z \frac{\partial B}{\partial Z} \quad (1.2)$$

Bu ýerde $\frac{\partial B}{\partial Z}$ Z okynyň ugry boýunça magnit meýdanynyň gradiýenti. f_m güýjüň täsiri astynda bölejik Z okdan gyşarar. Bu gyşarmanyň (dz) ululygy bölejigiň kinetik energiýasy (E), onuň magnit momentini (μ_z) we magnit meýdanynyň bir hilli dældigi ($\frac{\partial B}{\partial Z}$) bilen kesgitlenýär.

$$dz = f_m \frac{A}{E} = \mu_z \frac{\partial B}{\partial Z} \cdot \frac{A}{E} \quad (1.3)$$



KWANT RADIOFIZIKASYNYŇ USULLARY

1.1 Ýadro we elektron magnit momentleri hakynda esasy maglumat

Zarýad we massa bilen bir hatarda ýadro we elektron şu häsiýetnamalara eýedir:

1. Hereket mukdarynyň hususy momenti – spin.
2. Ýadronyň we elektronyň magnit dipol momenti.
3. Ýadronyň elektrik kwadrapol moment

Protonlar, neýtronlar, elektronlar öz okunyň daşynda aýlanýarlar we $\frac{1}{2}$ spina eýedir. Ýadronyň spini 0-dan 7-ä çenli üýtgäp bilýär. Ol protonlaryň we neýtronlaryň sanyna bagly, ýagny ýadronyň zarýady (elementiň tertip nomeri ýa-da protonyň zarýadlarynyň jemi) we massa sany (protonyň we neýtronyň massalarynyň jemi) bilen baglanyşykly. Şeýle baglanyşyk bar:

1. Zarýadyň we massa sanynyň bahalary jübüt

bolsa, onda spin nula deň bolýar. Mysal üçin $^{12}_{6}\overset{(massa}{C}_{(zarýad)}$,

$^{16}_8O$, $^{32}_{16}S$ we başgalar. Bu ýagdaý üçin magnit momenti hem nola deňdir.

2. Täk massa sany we islendik tertip (atom) belgisi bolan hemme elementleriň ýadrolary ýarymbütün spini bolýar: I

$= 1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$, Mysal üçin, 1_1H , $^{11}_5B$, $^{13}_6C$, $^{17}_8O$,

$^{19}_9F$, $^{27}_{13}Al$, $^{31}_{15}P$, $^{15}_7N$ we başgalar.

signallaryň giňliginiň kiçelmegi goňşy paramagnit merkezleriniň goşalanmadyk elektronlarynyň çalşyk özara täsiri netijesinde bolup geçýänligidir. Elektronlaryň elektron gatlaklary gowşak garyşýarlar. Şonuň üçin himiki baglanyşyk döremeýär. Ýöne bu gowşak elekton gatlaklaryň garyşmasy EPR signallarynyň giňişliginiň kiçelmegi üçin ýeterlik bolýar.

Aýdylyp geçilenlerden başga hem signalyň giňligini kesgitleýän sebäpler bardyr. Olaryň käbiri signallaryň birhilli, beýlekileri bolsa birhilli däl giňelmegine getirýär. Birhilli we birhilli däl giňelmeler spin ulgamynda radioýygylykly kuwwatyň paýlanmagynyň häsiýeti bilen baglanyşykly bolýar. Eger bu kuwwat hemme spinlere içki özara täsir netijesinde geçýän bolsa, onda signala birhilli giňelen diýilýär. Eger radioýygylykly kuwwat diňe spinleriň toparyna täsir edýän bolsa onda signal birhilli däl giňelýär. Bu aratapawut magnit rezonansynyň doýgunlaşma hadysasy gözegçilik edilende has açyk ýüze çykýar. Signalyň birhilli däl giňelme ýagdaýynda doýgunlaşmanyň täsiri onuň intensiwliginiň kiçelmegine diňe doýrujy meýdanyň ýygylygynda getirip biler. Şol bir wagtda birhilli giňelen signal mydama hemme giňliginde doýýar.

Birhilli däl giňelmäniň sebäpleriniň biri hemişlik magnit meýdanynyň birhilli däl bolmagydyr ($\delta B \neq 0$) (abzal giňelmesi). Bu ýagdaýda nusganyň magnit meýdanynyň ululygynyň rezonansynyň şertini ýerine ýetirýän ýerindäki spinler rezonans berer. Birmeňzeş bölekleriň toplumyndaky dipol-dipol özara täsir netijesindeki giňelme birhilli häsiýete eýedir.

Çalşyk özara täsir, spinleriň diffuziýasy, şöhlelenýän meýdan bilen özara täsir netijesindeki signalyň giňelmesi hem birhillidir. Bu ýerde sugnalyň giňelmesi spin

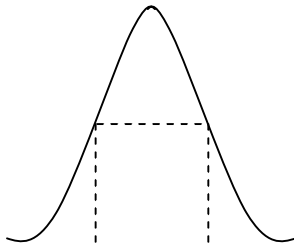
Signalyň görnüşini tejribede almak bolýar. Ol form-faktor bilen aňladylýar:

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu = 1$$

Suwuklyklardaky ýeke signallar üçin:

$$g(\nu) = \frac{2T_2}{1 + 4\pi^2(\nu_0 - \nu)^2 T_2^2}$$

Bu deňleme Lorensiň görnüşini (şekilini) aňladýar.



Hemme magnit rezonanslarda signalyň giňelmeginiň esasy sebäbi dipol-dipol özara täsir bolup durýar. Munuň netijesinde magnit dipollar dürli lokal meýdanlaryň täsiri astynda bolýar we dürli ýygýlyklarda aýlanýarlar. Bu bolsa gaty jisimleriň ÝMR signallarynyň giňelmeginiň esasy sebäbi bolup durýar.

Elektronlaryň magnit momentleriniň ýadrodaky seredeninde 658 esse uly bolany üçin uly konsentrasiýaly paramagnit nusgalarda EPR-iň signallary has giň bolýajak ýaly. Emma beýle ýagdaý bolmaýar. Bu nusgalarda käwagtlar has inçe signallar hem gözegçilik edilýär. EPR-iň

3. Jübüt massa sany we tak zaryady bolanda ýadro bütin

sanly spine eýe bolýar: $I = 1, 2, 3 \dots$, mysal üçin 2_1D , $^{10}_5B$, $^{14}_7N$, $^{30}_{15}P$ we başgalar.

Elektrik zaryadlanan bölejik käbir okuň daşynda aýlananda magnit meýdany döreýär. Onuň ugry aýlanma okuň ugry bilen gabat gelýär. Şeýle ulgam magnit momenti bilen häsiýetlendirilýär we hereket mukdarynyň burç momentine proporsionaldyr.

Protonyň magnit momenti (ýadro magnetony) we elektronyň spini üçin Boruň magnetony şeýle kesgitlenýär:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} [A \cdot M^2], \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} [A \cdot M^2],$$

bu ýerde e – zaryad, m_p – protonyň massasy, m_e – elektronyň massasy, $\hbar = h/2\pi$ – Plankyň getirilen hemişeligi.

Ýadronyň we elektronyň magnit momentleri şeýle kesgitlenýär:

$$\mu_n = g_n \mu_N I, \quad \mu_n = \gamma_n P = \gamma_n \hbar I$$

$$\left(\gamma_n = \frac{\mu_n}{P} \right)$$

$$\mu_e = g_e \mu_B S$$

I , S , γ_n , g_n , g_e bahalary ýadronyň we elektronyň tebigaty bilen düşündirilýär.

I – ýadronyň spini, S – elektronyň spini, γ_n – ýadronyň giromagnit ýa-da magnitomehanika gatnaşygy, g_n – ýadro g -

faktory ýagny spektroskopiki bölünme faktory (ölçeşsiz hemişelik) ýadro üçin $g_n = 5,585$, neýtron üçin $-3,8$, g_e - elektron g-faktor ($g \approx 2$).

1.2 Ýadronyň magnit momenti bilen magnit meýdanynyň özara täsiri

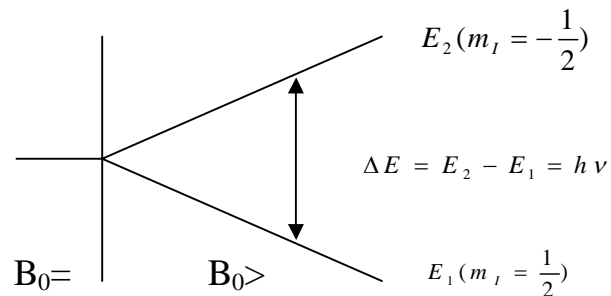
Daşky magnit meýdany ýok wagtynda ýadro magnit momentiniň wektorynyň ginişlikdäki ugry deňähtimallydyr, ýagny islendik ugur üçin deňdir. Hemişelik daşky magnit meýdany döredilende ($\vec{B}_0 = \mu\mu_0 \vec{H}_0$) ýadronyň magnit momenti (μ_n) bilen bu meýdanyň arasynda özara täsir döreýär.

Spini $I = \frac{1}{2}$ deň bolan bölejikde kwant sanynyň 2 bahasy bolup biler, ýagny $m_I = +1/2$ we $m_I = -1/2$. Bu spin hallarynyň energiýasy şeýle aňladylýar.

$$E_1 = \vec{\mu}_n \vec{B}_0 = \frac{1}{2} \gamma_n \hbar B_0 = \frac{1}{2} g_n \mu_N B_0$$

$$E_2 = -\vec{\mu}_n \vec{B}_0 = -\frac{1}{2} \gamma_n \hbar B_0 = -\frac{1}{2} g_n \mu_N B_0$$

Magnit meýdanynda protonyň (^1H) energiýa derejeleriniň shemasy şeýle aňladylýar.



ulamlmagy bilen V_{\max} kiçelmegi bolup geçýär. Bu köpeldiji doýgunlaşma faktory giýilýär.

$$S = \frac{1}{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

ÝMR signalynyň doýgunlaşmagynyň fiziki sebäbi energetiki derejelerdäki spinleriň sanynyň deňleşmegidir. ÝMR signalyň giňligi diýip onuň ýarym beýikligindäki giňligine ($\Delta\omega = \omega - \omega_0$) düşünilýär: $b = 2\Delta W_{1/2}$

Signalynyň ýarymgiňligi şeýle kesgitlenýär:

$$\Delta w_{1/2} = \frac{1\sqrt{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}}{T_2^*}$$

ÝMR signalyň giňligi diýip dispersiýa signalynyň 2 sany maksimumynyň aralygyna hem düşünilýär. Soňky formulada 2 sany köpeldiji bar ($\frac{1}{T_2^*}, \sqrt{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$). Onuň birinjisi signalyň giňliginiň T_2^* wagtda ters baglydygyny aňladýar $\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{\gamma \delta B}{\pi}$. Ikinji köpeldiji uly amplitudaly B_1 radioýygylykly meýdanyň täsiri netijesinde signalyň ginelmegini häsiýetlendirýär.

1.8. Magnit rezonansynyň signalynyň görnüşi.

Signalynyň giňligi.

Magnit rezonansynyň signalynyň görnüşi jisimiň gurluşy hakynda degerli maglumat almaga mümkinçilik berýär.

V_{\max} we U_{\max} formulalaryndan görnüşi ýaly signallaryň intensiwlikleriniň B_0 meýdana baglylygy çyzykly häsiýete eýedir ($M_0 \sim B_0$).

Ýuwdulma signalyň in uly intensiwligi şu B_1 optimal radioýygylykly meýdanda alynýar.

$$B_{\text{ionm}} = \frac{1}{|\gamma| \sqrt{T_1 T_2}}$$

Bu ýagdaýda

$$v'_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} M_0$$

Dispersiýa signalynyň predel bahasy $B_1 \rightarrow \infty$ bolanda alynýar:

$$U'_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} M_0$$

Şeýlelik bilen ýuwdulma we dispersiýa signallarynyň in uly bahasy deňdirler, ýöne olar B_1 meýdanyň dürli bahalarynda alynýar. Praktikada dispersiýa signalynyň aňry çäk bahasyny almak mümkin däl. Sebäbi ∞ uly B_1 meýdany döretmek mümkin däl.

Ýuwdulma signalyň intensiwliginiň B_1 meýdan ulaldylanda kiçilmegine doýgunlaşmak hadysasy diýilýär. Bu hadysa V_{\max} we U_{\max} aňlatmalardaky $(1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2)^{-1}$ köpeldijiniň bolmagy bilen düşündirilýär. B_1 meýdanyň

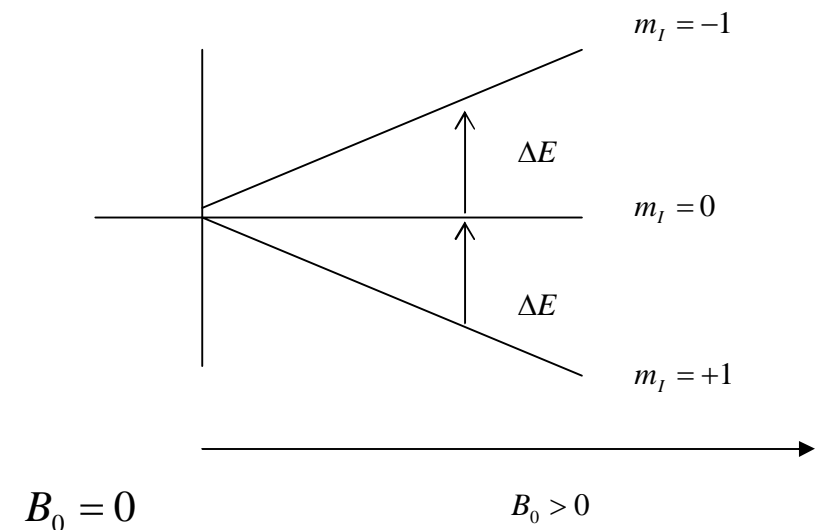
Energiýa derejede bölejigiň bolmagynyň ähtimallygy Bolsmanyň kanuny bilen kesgitlenýär.

$$N_i = \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

bu ýerde E_i – derejäniň energiýasy, k – Bolsmanyň hemişeligi, T – absolýut temperatura.

Aşakdaky energiýa ulgamyndaky spinleriň sany ýokarka seredeninde köpräk. (10^{-5} - 10^{-6} töweregi tapawut edýär). Otag temperaturasynda proton üçin $B_0 \approx 1,25$ T bolanda $N_1/N_2 = 1,000007$

Käbir ýadrolaryň spini $1/2$ -den uly hem bolup biler. Mysal üçin, deýtronyň (2H) spini $I=1$ -e deň. Bu ýagdaý üçin magnit meýdanynda ($B_0 > 0$) energiýa derejeleriň diagrammasy şu görnüşde bolar:

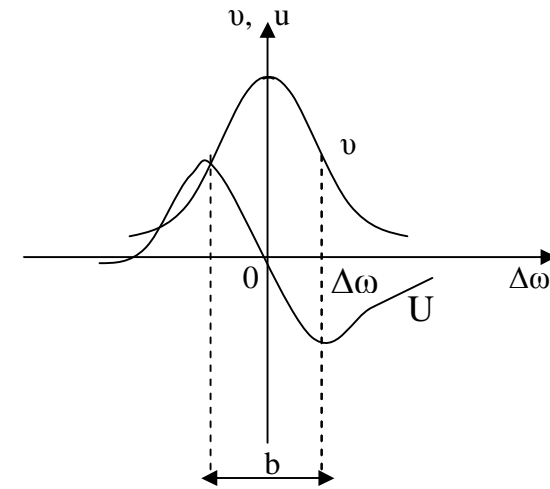


Bu ýerde $\Delta m_i = \pm 1$ şerti ýerine ýetirýän energiýa derejeleriniň arasynda iki sany geçiş bolýar.

Spinleri $I \geq 1$ bolan ýadrolarda zaryadyň paýlanylyşy togalak üst görnüşli däl. Şonuň üçin bu ýadrolar ýadro kwadropol momentine eýedirler. Olar daşky elektrik meýdanynyň gradiýenti bilen, esasan hem ýadronyň ýerleşýän molekulasynyň electron gatlagynyň meýdanynyň gradiýenti bilen özara täsir edişýärler. Bu özara täsir relaksasiýa hadysalarynda uly ähmiýete eýe bolýar. Ondan başga-da ýadronyň bu özara täsiri netijesinde, daşky hemişelik magnit meýdany ýok wagtynda hem ($B_0=0$), dürli energiýaly spin ýagdaýlary döreýär. Bu energiýa derejeleriň arasyndaky geçiş ýadro kwadropol rezonansynda gözegçilik edilýär.

Kwadropol momenti bolan ýadrolarda ÝMR hadysasy gözegçilik edilende spektrdäki signallar giňelýärler.

ÝMR spektroskopiyasy üçin wajyp bolan ýadrolaryň magnit häsiýetleri 1.1. tablisada görkezilen.



Ýuwdulma signaly üçin V_{\max} baha $V(t)$ funksiýanyň $\Delta\omega=0$ ($\omega_0=\omega$) ýagdaýyndaky bahasyna deňdir:

$$V_{\max} = -|\gamma| B_1 T_2 M_0 \frac{1}{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

$\Delta\omega=0$ bolanda $U(t)=0$ (surata seret)

U funksiýanyň iň uly bahasy $\Delta\omega \neq 0$ bolanda alynýar, ýagny

$$\Delta\omega = \pm \frac{1}{T_2} \sqrt{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

Bu ýagdaýda

$$U_{\max} = \pm \frac{1}{2} |\gamma| B_1 T_1 M_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}}$$

$$\frac{U}{T_2} + \Delta\omega v = 0$$

$$\frac{v}{T_2} + \Delta\omega U + |\gamma| B_1 M_z = 0 \quad (v - \text{ýuwdulma signaly})$$

$$\frac{M_z}{T_1} - |\gamma| B_1 v - \frac{M_0}{T_1} = 0 \quad (U - \text{dispersiýa signaly})$$

Bu deňlemelerin çözüdi şeýle görnüşi alar:

$$U = |\gamma| B_1 T_2 M_0 \frac{\Delta\omega T_2}{1 + (\Delta\omega T_2)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2},$$

$$v = -|\gamma| B_1 T_2 M_0 \frac{1}{1 + (\Delta\omega T_2)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2},$$

$$M_z = M_0 \frac{1 + (\Delta\omega T_2)^2}{1 + (\Delta\omega T_2)^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2}$$

Blohyň deňlemeleriniň çözüdini analiz edip rezonans signallaryň intensiwligi, formasy we giňligi hakynda netije çykarmak bolar.

Signallaryň intensiwligi köplenç $V(t)$ we $U(t)$ funksiýalaryň maksimal bahasy boýunça kesgitlenýär.

1.1. tablisa. Käbir ýadrolaryň magnit häsiýetleri

Izotop	Tebigy düzümi, %	Protonyň sany	Neýtronyň sany	Spin, I , \hbar birliginde	γ_n $\text{radC}^{-1}\text{A}^{-1}\text{M}$	g_n	μ_n , ýadro magnetonyň birliginde
^1H	99.984	1	0	$\frac{1}{2}$	336.19	5.585	2.792
^2H	0.015	1	1	1	51.61	0.857	0.857
^{13}C	1.108	6	7	$\frac{1}{2}$	84.55	1.405	0.702
^{14}N	99.635	7	7	1	24.30	0.403	0.404
^{15}N	0.365	7	8	$\frac{1}{2}$	—34.08	—0.56	—0.283
^{17}O	0.037	8	9	$\frac{5}{2}$	—45.59	—0.757	—1.893
^{19}F	100	9	10	$\frac{1}{2}$	316.41	5.25	2.627
^{29}Si	4.70	14	15	$\frac{1}{2}$	—66.84	—1.111	—0.555
^{31}P	100	15	16	$\frac{1}{2}$	136.22	2.26	1.131
^{35}Cl	75.4	17	18	$\frac{3}{2}$	32.87	0.54	0.822
^{37}Cl	24.6	17	20	$\frac{3}{2}$	27.44	0.45	0.683

1.3. Magnit rezonansynyň şertleri

Hemişelik magnit meýdanynda ýerleşdirilen atomda energiýa derejeleriň arasyndaky öz-özünden geçişleriň ähtimallygy azdyr. Emma beýle geçişler daşky üýtgeýän elektromagnit meýdanyň täsiri astynda mejbury amala aşyrylýar. Bu ýerde elektromagnit meýdanynyň ýygylgynyň bölünen energiýa derejeleriniň energiýalarynyň tapawudyna deň bolan fotonyň ýygylgyna deň bolmagy hökmandyr. ($\nu = \Delta E/h$). bu ýagdaýda üýtgeýän radioýygylgylly elektromagnit meýdanynyň energiýasynyň bölejikler tarapyndan ýuwdulmagy bolup geçýär. Şeýle hadysa magnit rezonansy diýip at berilýär.

Magnit momentli bölejigiň görnüşine baglylykda 2 hili magnit rezonansy bolýar, ýagny ÝMR we EPR.

EPR hadysasy paramagnit bölejigi (molekulalar, atomlar, ionlar, radikallar) özünde saklaýan jisimlerde bolýar. EPR köplenç arassa spin magnit momentli bölejiklerde bolýar (EPR≈ESR) energiýanyň rezonans ýuwdulmasynyň şerti (EPR, ÝMR)

$$h\nu = \Delta E = g_e \mu_B B_0 \quad (1.1)$$

$$h\nu = \Delta E = g_n \mu_N B_0$$

Haçanda bölejige bir wagtda B_0 induksiýaly hemişelik magnit meýdany we ν ýygylgylly üýtgeýän elektromagnit meýdany (B_1) täsir edende magnit rezonansy döräp bilýär.

$$\vec{B}_0 \perp \vec{B}_1$$

tejribe kanun boýunça bolup geçýär. T_1 hemişelik wagta boýýa-da spin gýadroek relaksasiýasynyň wagty diýilýär. Sebäbi bu wagtda \vec{M}_z -iň deňagramlylyk ýagdaýyna gelmek ýagdaýyny aňladýar.

Ýadro magnitliligiň wektorynyň kese düzüjisiniň deňagramlylyk ýagdaýy T_2 wagtda bolup geçýär. Bu wagtda kese relaksasiýasynyň wagty diýilýär. Sebäbi T_2 wagtda \vec{M}_\perp kese düzüjiniň togtamagyny aňladýar.

1.7. Ýuwdulma we dispersiýa signallarynyň esasy parametrleri. Doýgunlaşmak hadysasy

Blohyň deňlemelerini rezonansdan hýal geçiş ýagdaýy üçin çözmek bolýar. Haýal geçiş praktikada ýoýulmaýan rezonans signalyny almak üçin ulanylýar.

Haýal geçişniň kriteriýasy bolup ýygylgylly üýtgemeginiň kiçi tizligi ($d\omega/dt$) ýa-da rezonans signaldan geçiş wagtynyň (τ) spin-spin relaksasiýa wagtyna görä ululygy bolup hyzmat edýär.

$$\frac{d\omega}{dt} \ll \frac{1}{T_2^2} \text{ ýa-da } \tau \gg T_2$$

(1)

Şu şertler ýerine ýetende magnitliligiň U we ν düzüjileri wagtda boýunça ýeterlik haýal üýtgeýärwe her bir pursatda du/dt , $d\nu/dt$ we dM_z/dt ululyklar nula deň bolar, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ bolsa hemişelik bolar. Onda aýlanýan koordinat ulgamynda Blohyň deňlemeleri şeýle görnüşli alar.

$\vec{M} = \sum_i \mu_i$ formula laýyklykda $\mu_{\perp} = 0$ bolýar. Magnit momentiniň boý düzüjileri (μ_z) jemlenende nola deň bolmaýar. Sebäbi termodinamiki deňagramlylykda spinler energetiki derejelerde deňölçegsiz ýerleşendir ($n_1 > n_2 > \dots$) we aşaky energetiki derejede ýokarky bilen deňeşdirilende az-owlak artykmaç ýadro bolýar. Bu artykmaçlyk hem statiki ýadro magnitliligi döredýär (M_0). Eger \vec{B}_0 magnit meýdany Oz ok boýunça ugrukdyrylan bolsa onda

$$M_0 = \sum_i \mu_{zi}$$

Bu formula boýunça hasaplamak üçin $2I+1$ energetiki derejelerde ýerleşýän hemme ýadrolaryň magnit momentleriniň μ_z düzüjisi boýunça jemlemeli.

$$M_0 = \sum_{m=-I}^I n_m \mu_{zm}$$

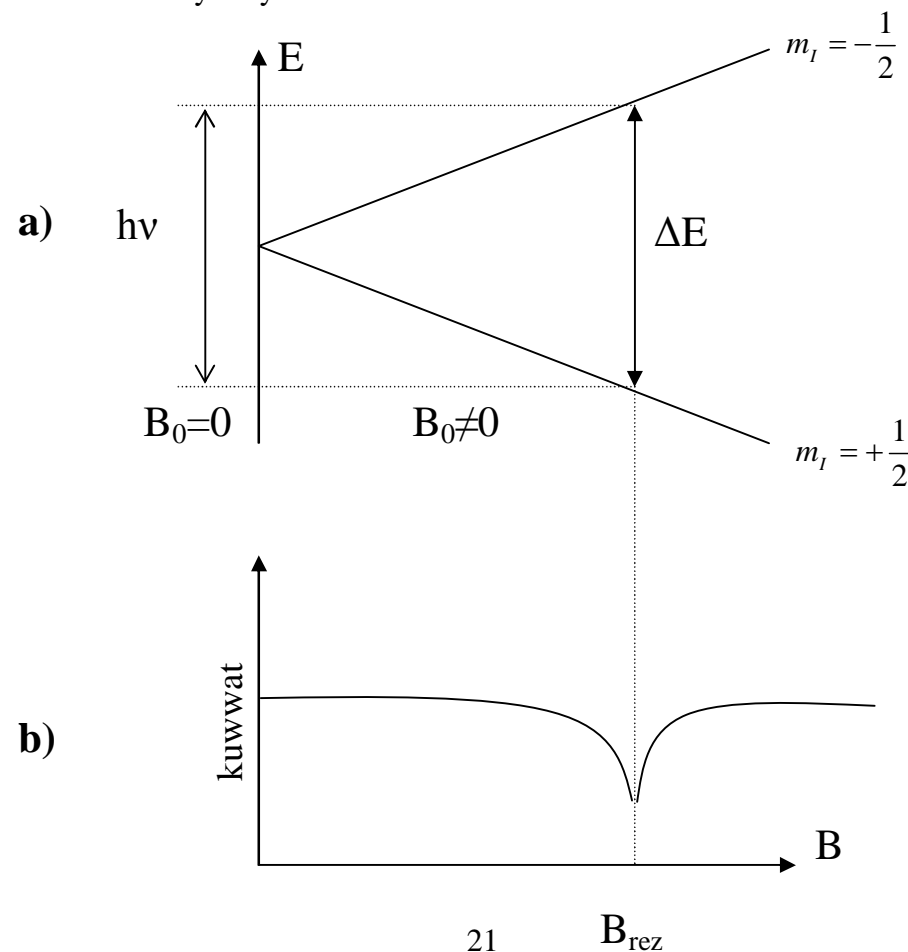
bu ýerde n_m – m kwant sana degişli energetiki derejedäki ýadrolaryň sany, μ_{zm} – şeýle ýadrolaryň magnit momentleriniň z-düzüjisi.

ÝMR we EPR tejribelerinde gözegçilik edilende käbir ýagdaýlarda daşky magnit meýdanynyň induksiýasynyň (B_0) çalt üýtgemesi ýa-da \vec{M} wektorynyň B_0 görälik üýtgemesi bolup geçýär. Bu üýtgeşmelerden soň \vec{M} wektoryň täze deňagramlylyk ýagdaýy döreýär.

Ýadro magnitliligiň wektorynyň boý düzüjisiniň deňagramlylyk ýagdaýynyň döremegi T_1 hemişelik wagtly

$$\omega = 2\pi\nu = \gamma_n B_0$$

Ýokarky ýazan formulamyndan görnüşi ýaly rezonans ýuwdulmany 2 hili ýol bilen alyp bolýar: 1) ýygylgyň üýtgeşsiz ýagdaýynda magnit induksiýany ýuwaşlyk bilen üýtgetmeli; 2) magnit induksiýasynyň üýtgeşsiz ýagdaýynda ýygylgy ýuwaşlyk bilen üýtgetmeli. Tehniki taýdan 1-njy usul has amatly bolýar.



Çyzgylarda magnit meýdanynyň induksiýasyna baglylykda Ýadronyň energiýa derejeleriniň bölünmegi (a) we elektromagnit tolkunynyň kuwwatynyň üýtgemegi (b) görkezilýär. $h\nu = \gamma_n \hbar B_0 = g_n \mu_n B_0$ şert ýerine ýetende ÝMR hadysasy bolýar. Çyzgydan görnüşi ýaly rezonans 2 sany energiýa derejeleriň arasynda bolup geçýär. Olaryň arasyndaky uzaklyk ýadronyň magnit momentine baglydyr.

Aýry-aýry bölejikleriň ýadro magnit momentleriniň arasyndaky täsir olaryň daşky magnit meýdany bilen özara täsirden has gowşakdyr. Umuman EPR termini özara gowşak magnit täsirli ulgamlar üçin ulanylýar. Özara güýçli magnit täsirli ulgamlarda EPR terminiň ýerine ýagdaýa görä ferromagnit ýa-da antiferromagnit rezonansy diýen terminler ulanylýar (FMR, AFMR). Bu ulgamda bölejigiň elektron magnit momenti elektronyň spin we orbital magnit momentlerinden durýar.

Umuman haçanda atomlar we ionlar kristalyň ýa-da molekulanyň düzümine girýän bolsa onda elektronlar öz daş töweregi bilen her hili özara täsire gatnaşýar. Bu özara täsirler birnäçe rezonans ýygylklaryň, ýagny EPR spektriň inçe gurluşynyň bolmagyna getirýär.

Ýygylk bilen hemişelik meýdanyň induksiýasynyň şeýle baglanyşygy bar.

$$\nu = \frac{\gamma_n B_0}{2\pi}$$

Käbir ýagdaýlarda burç rezonans ýygylgyny ulanmak amatly bolýar

ω – nyň ölçeg birligi radian/s

özara täsir ediji spinleriň ulgamyny takyk beýan etmek üçin kwant nazaryeti ulanylýar.

Bu meseläni çözmek üçin F. Bloh başga usul tekliptdi. Onuň nazaryetinde owunjak bölejikleriň ulgamy üçin makroskopiki häsiýetlendirijiler girizilýär. Bular üçin nusgawy mehanikanyň kanunlaryny ulanyp bolýar. Özara täsir edişýän spin ulgamy üçin bolsa nusgawy nazaryeti ulanyp bolýar.

Ýadro spinler ulgamynyň makroskopiki häsiýetlendirijisi hökmünde Bloh ýadro magnitliliginiň wektoryny ulanmagy tekliptdi (\vec{M}). Ol jisimiň göwrüm birligindäki magnit momentiniň jemine deňdir.

$$\vec{M} = \sum_i \mu_i$$

Bu ýerde μ_i - berlen ulganyň ýadronyň magnit momentleri.

Blohyň nusgawy nazaryeti ýadro magnitliligiň wektorynyň hemişelik we üýtgeýän magnit meýdanlaryndaky häsiýeti seredilýär. Bu ýerde spinleriň öz aralaryndaky we gyadroek bilen täsiri göz önünde tutulýar.

\vec{M} wektoryň \vec{B}_0 magnit meýdanynda deňagramlylyga eýe bolan statiki ýagdaýyna seredeliň. Fazalary tertibe getiriji faktorlaryň, mysal üçin üýtgeýän \vec{B}_1 meýdanyň, ýok ýagdaýynda aýry-aýry ýadro magnit dipollaryň (μ_i) aýlanmasy (prosessiýasy) üýtgeşik fazada bolup geçer. Şonuň üçin nusganyň göwrümi boýunça jemlenende magnit momentiň kese düzüjileri ($\mu_{\perp i}$) biri-birini özara ýok edilýär we

$N_1 W_{12} = N_2 W_{21}$, bu ýerde N_1 we N_2 derejelerdäki ýadrolaryň sany.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu / KT} = e^{-\frac{g_n \mu_N B_0}{KT}} \approx 1 - \frac{g_n \mu_N B_0}{KT}$$

iki deňlemäni deňeşdirip alarys:

$$W_{12} = W_{21} e^{-h\nu / KT}$$

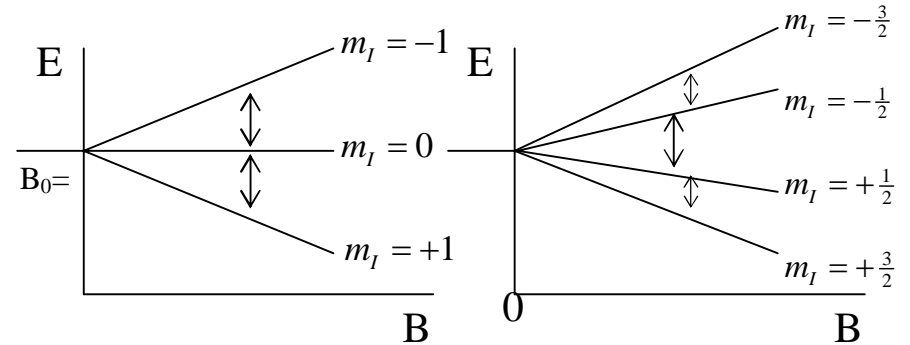
$$\frac{h\nu}{KT} = \frac{g_n \mu_N B_0}{KT} \approx 7 \cdot 10^{-6}$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, ýokardan aşak geçişin ähtimallygy (W_{21}) aşakdan ýokaryk geçişin ähtimallygyndan köpdür.

1.6. Ýadro magnitlilik. Blohyň deňlemesi

Kwant radiofizikasynda radioýygylykly meýdanyň täsiri astynda bolup geçýän mejbury geçiş ulanylýar. Spontan (öz-özünden) geçişden tapawutlylykda mejbury geçiş kogerentdir. (ylalaşyklydyr). Sebäbi mejbury geçiş monohromatik (sinfazaly, birlfazaly) radioýygylykly meýdanyň täsiri netijesinde bolup geçýär. Bu meýdan hemme spinlere sinfazaly (birlfazada) täsir edýär. Magnit dipollaryň daşky meýdan bilen özara täsiriniň kogerent häsiýetliligi sebäpli hemme spinler biri-biri bilen bagly bolýar we bütewi ulgamy döredýär. Bu

spini $I=1$ we $I=3/2$ bolan ýadrolaryň energiýa derejelerine seredeliň.



Bu ýerde energiýa derejeleriň arasyndaky geçişler $\Delta m_I = \pm 1$ bolanda amala aşyrylýar.

Aşakdaky tablisada käbir magnit izotoplaryň dürli magnit meýdanlardaky ÝMR-iň ýygylyklary görkezilen

Käbir magnit izotoplaryň ÝMR ýygylyklary

Ýadro	Magnit meýdanlardaky ÝMR ýygylyklary (MGs)		
	1.41 T	2.35 T	7.05 T
^1H	60.00	100.00	300.00
^2H	9.21	15.35	46.05
^{13}C	15.08	25.14	75.42
^{14}N	4.33	7.22	21.66
^{15}N	6.08	10.13	30.39
^{17}O	8.14	13.56	40.68
^{19}F	56.44	94.07	282.21

1.4. Göni magnit dipol-dipol özara təsir

Real şərtlərdə, əsasən həm gəti jisimlərdə, həmşə spinlərin daş tőwerek bilən özara təsiri bar. Bu özara təsirin dűrli gőrnüşləri bar. Olaryn biri həm gőni dipol-dipol özara təsirdir.

Biri-birindən r_{12} aralykda ýerleşýän 2 sany μ_1 we μ_2 magnit momentlərin özara təsirine seredeliň. Bu dipollaryn her-biri giňişlikde magnit meýdanyny dőredýär. Bu magnit meýdany $\vec{\mu}$ dipoldan \vec{r} aralykda şu formula bilən kesgitlenýär

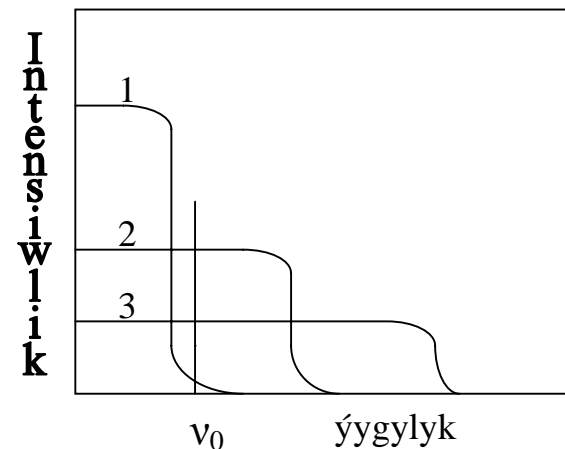
$$\vec{B} = \frac{3(\vec{\mu} \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\mu}{r^3}$$

Eger $\vec{\mu}_1$ we $\vec{\mu}_2$ dipollar daşky \vec{B}_0 magnit meýdanynda ýerleşýän bolsa, onda olar bu magnit meýdanynyň ugrunyň daşynda ω_1 we ω_2 ýygylyk boýunça aýlanýar (wolçok ýaly).

$\vec{\mu}_1$ dipolyň $\vec{\mu}_2$ dipola edýän təsirine seredeliň. \vec{B}_0 meýdan Oz ok boýunça ugrukdyrylan diýip hasap edeliň we $\vec{\mu}_1$ magnit momentini 2 düzüjilere dargadalyň, ýagny üýtgemeyän μ_{1z} we \vec{B}_0 meýdana dikana bolan aýlanýan $\mu_{1\perp}$ düzüjilere.

energiýa derejeleriniň arasyndaky geçişə goňşy bölejiklərin islendigi təsir edip biler.

Şeýlelik bilən real şərtlərdə spin ulgamy bilən gyadroegin, ýagny daş tőwerekdäki bölejiklərin toplumynyň arasynda energiýa çalşygy bolup geçýär.



Ýokary (1), orta (2) we őrən kiçi (3) şepbeşikdäki ýygylyk spektri.

Çyzgyda ýokary (1), orta (2) we őrən kiçi (3) şepbeşikli ýagdaý üçin ýygylyk spektri görkezilendir. Orta şepbeşikli suwuklyklarda v_0 ýygylykly düzüji in uly baha eýe bolýar. Bu ýagdaýda spinlərin ýylylyk relaksasiýasy has amatly bolýar.

Spin-gyadroek özara təsiri şöhlelenmeyän ýa-da relaksasiýa geçişi hökmünde bolup geçýär. Umumy bu geçişler mejbury bolup geçýär. Ýöne ýokaryk (W_{12}) we aşak (W_{21}) geçişleriniň ähtimallyklary biri-birine deň dälendir.

Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýynda 2 energiýa derejeleriniň arasyndaky ýokardan aşak we aşakdan ýokary geçişleriniň intensiwlikleri deňdir.

Umuman dipol-dipol özara täsiriň netijesinde döreýän hemişelik $B_{\text{лок}}$ we üýtgeýän $B(t)$ meýdanlaryň ikisi hem rezonans signallary giňeldýärler.

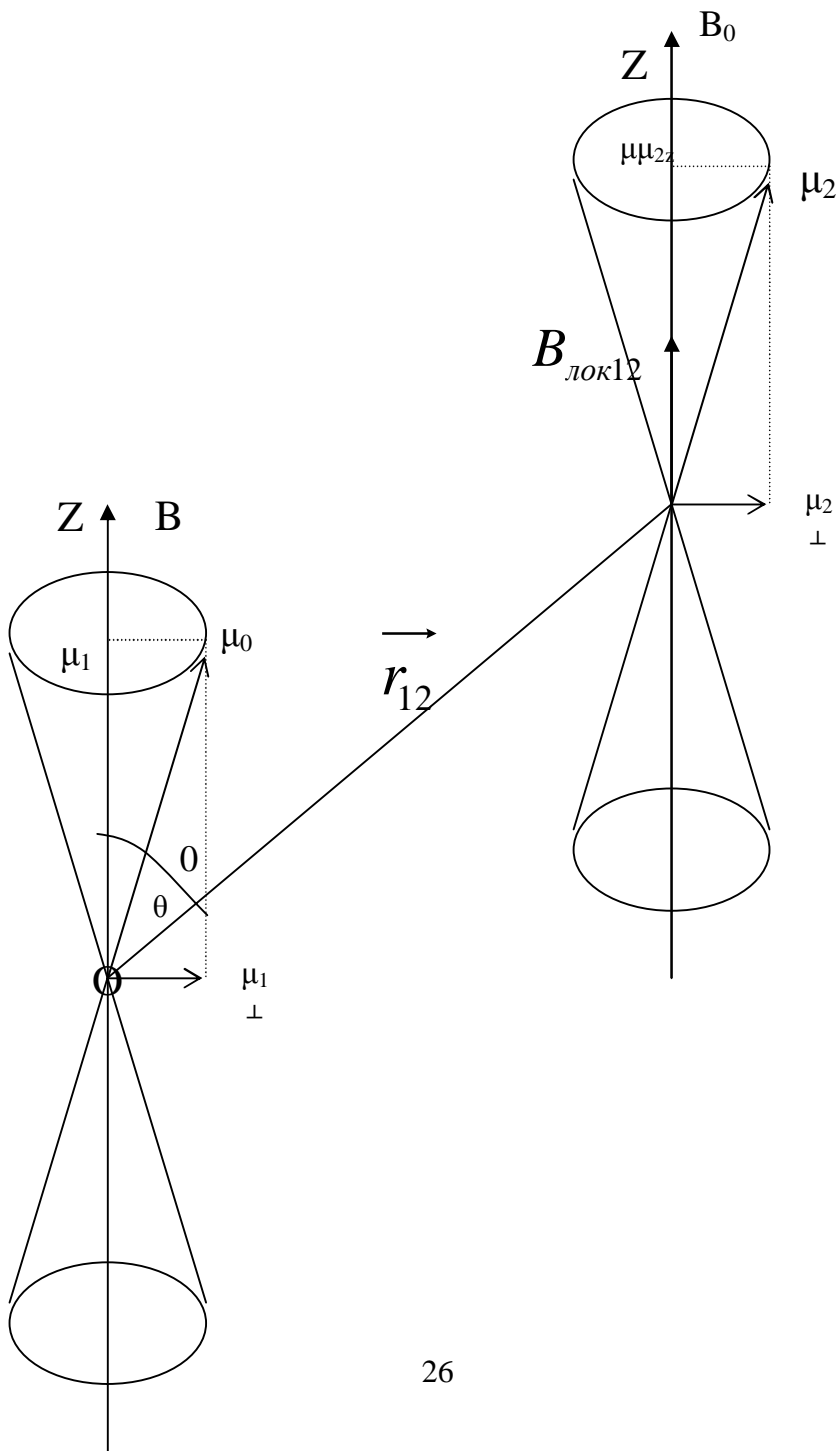
Göni dipol-dipol özara täsirler suwuklyklarda we gazlarda köplenç bolmaýarlar. Sebäbi suwuklyklardaky we gazlardaky intensiw ýylylyk hereketler lokal magnit meýdanlaryny nola çenli azaldýarlar. Dipol-dipol özara täsiri netijesinde gaty jisimleriň ÝMR spektrleriniň signallary giňelýärler. Şonuň üçin signallaryň aşa inçe gurluşy görünmeýärler. Gaty jisimlerde dipol-dipol özara täsiri aýyrmak üçin nusgaly ampulany $\theta=54,7^\circ$ burç bilen gaty uly tizlik bilen aýlaýarlar. Şonda ýokarky formula laýyklykda local magnit meýdany nola deň bolýar ($B_{\text{лок}} = 0$).

1.5. Ýadro spinleriniň gýadroek bilen özara täsiri

Köp jisimlerde elektronlar we ýadrolar goňşy owunjak bölejikleriň çylşyrymly gabawynda ýerleşýärler. Bu bölejiklerde magnit momentleri, elektrik kwadrupol momentleri bolmagy we olaryň seredilýän ulgamyň spinleri bilen özara täsir edişmegi mümkin. Köplenç bu bölejikler çylşyrymly ýylylyk hereketlerine gatnaşýar. Şonuň üçin ýylylyk hereketiniň magnit meýdanyndaky spinleriň özüni alyp barşyna edýän täsirini göz önüne tutmaly. Spinleriň daş töweregindäki bölejikleriň döredýän lokal meýdanyna üýtgeýän tötänleýin funksiýa hökmünde garamak mümkin. Bölejikleriň ýylylyk hereketiniň tertipsiz (haotik) häsiýeti sebäpli bu tötänleýin funksiýanyň spektral dykzlygy giň ýygylýan aralykda ýerleşýändir. Bu aralygyň içine seredilýän spin ulgamynyň rezonans ýygylýan hem girýär. Şonuň üçin spin sistemasynyň

μ_{1z} düzüji giňişlikde hemişelik magnit meýdanyny döredýär. Şeýlelikde, $\vec{\mu}_2$ dipola \vec{B}_0 daşky meýdanyň we $\vec{B}_{\text{лок}12}$ lokal (ýerli) magnit meýdanyň jemine deň bolan magnit meýdany täsir edýär. Lokal magnit meýdany μ_1 dipolyň μ_2 dipolyň ýerleşýän ýerinde döredýän hemişelik magnit meýdanydyr. Spini $\frac{1}{2}$ deň bolan bölejik üçin lokal meýdan şeýle formula bilen aňladylýar.

$$B_{\text{лок}12} = \pm \frac{|\mu_z|}{r_{12}^3} (3 \cos^2 \theta - 1)$$



Bu ýerde $\theta - \vec{r}_{12}$ we \vec{B}_0 wektorlaryň arasyndaky burç. Eger magnit dipollar spini $\frac{1}{2}$ deň bölejigiň spin momentine gabat gelýän bolsa onda alamaty boýunça tapawutlanýan we B_0 oka spiniň mümkin bolan iki ýagdaýyna gabat gelýän $|B_{\text{лок}}|$ -yň iki mümkin bolan bahasy bardyr.

Magnit dipolyň tekizlikde aýlanýan $\mu_1 \perp$ düzüjisi 2-nji dipolyň ýerleşýän ýerinde üýtgeýän $B_1^{(2)}(t)$ magnit meýdanyny döredýär.

Şeýle magnit meýdanlary μ_2 dipol tarapyndan μ_1 dipola hem täsir eder.

Lokal $\vec{B}_{\text{лок}}$ magnit meýdanynyň bolmagy μ magnit momentiniň aýlanmasynyň ýygylgynyň üýtgemegine getirýär ($\omega = \gamma(B_0 \pm |B_{\text{лок}}|)$).

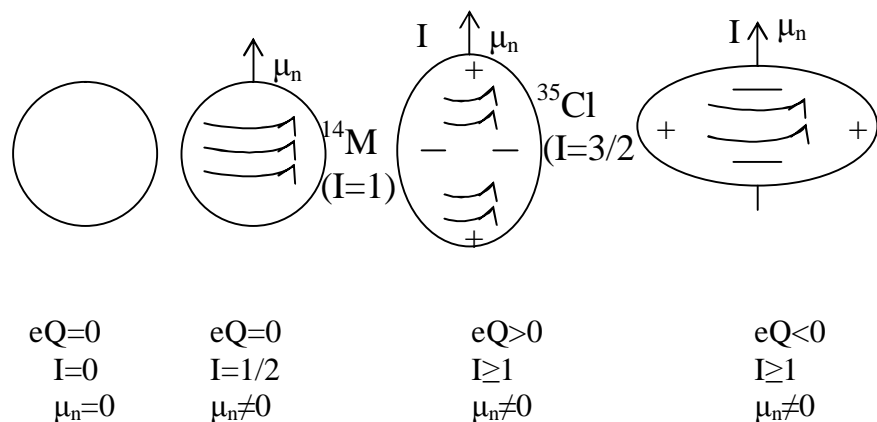
Eger köp sanly magnit dipollar özara täsir edişýän bolsa, onda $\vec{B}_{\text{лок}}$ köp dürli bahalary alýar. Bu bolsa rezonans signallaryň giňemegine getirýär.

$\vec{B}_1(t)$ üýtgeýän magnit meýdany seredilýän dipolyň kwant ýagdaýlarynyň arasyndaky geçişe mejbur ediji täsir edýär. Üýtgeýän meýdanyň täsiri astynda magnit dipollaryň ugrunyň üýtgemegi (pereoriýentasiýa) bolup geçýär. Netijede spinlerde energiýa derejedäki ýaşaýyş wagty (Δt) kemelýär. Bu derejedäki energiýanyň (ΔE), we geçiş ýygylgynyň ($\Delta \nu$), köpeltmegine getirýär. Şeýlelikde rezonans signaly giňelýär.

OI ÝKR signallaryň sönmeği bilen ölçenip bilner. Şonuň üçin ÝKR-iň spektrleri krastallaryň molekulýar gurluşy, kristalyň içindäki elektrik meýdany we irki hereket bazasyndaky maglumatlary berýär.

Ýadro elektrik kwadropol momenti eQ ýadrodaky elektrik zarýadynyň paýlanyşynyň sferiki simmetriýadan gysarmasynyň ölçegi bolup durýar.

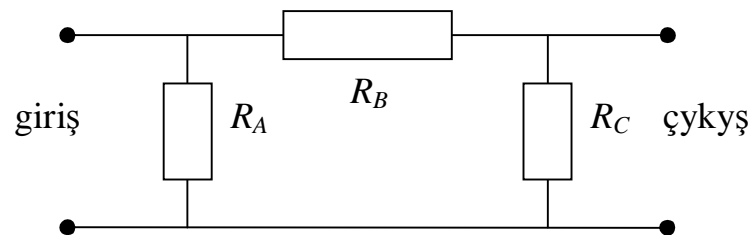
Hil taýdan ýadronyň mümkin bolan 4 gögnüşini göz önüne getirmek bolar (1 surat).



Köpri görnüşli spin detektorlarynda generatoryň hemme diýen ýaly ýokary ýygyllykly naprýaženiýasy detektoryň öz içinde ýok edilýär. Şonuň üçin çykyşda diňe peýdaly ÝMR signaly alynýar. Bu ýagdaýyň alynmagynyň esasy sebäbi hem rezonansyň ýok wagtynda spin detektorynyň geçiş garşylygyny tükeniksiz edip bolýanlygydyr.

2 sany T görnüşli bölekler gapdaldas birikdirilse, onda dörtpolýusniň geçiş garşylygy şeýle kesgitlenýär:

$$Z_n = \frac{Z_{geç} \cdot Z'_{geç}}{Z_{geç} + Z'_{geç}}$$



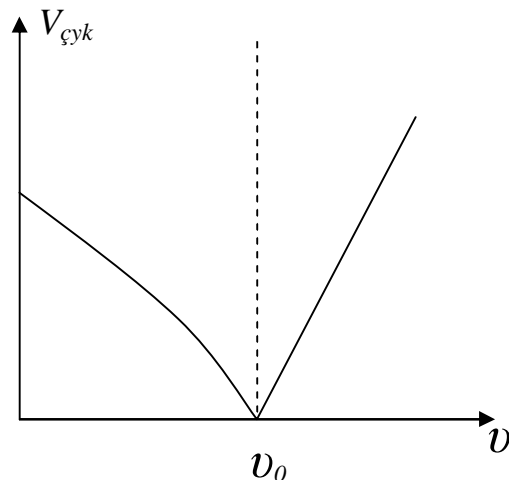
Bu ýerde $Z_{geç}$ we $Z'_{geç}$ – iki bölegiň geçiş garşylyklary.

Eger garşylyklaryň elementlerini $Z_{geç} = -Z'_{geç}$ bolar ýaly saýlanyp alynsa, onda tutuş köprüň geçiş garşylygy Z_d tükeniksiz bolar

$Z_{geç} = -Z'_{geç}$ şert radioýygyllykly mostyň doly deňagramlylygynyň şerti bolup durýar.

ÝMR spektrometrlerinde bir yrgyldyly tegegi bolan ikileýin T görnüşli köprüler hem ulanylýar. Bu detector beýleki radioýygyllykly gurluşlar bilen gowy sazlaşýar. Çykyş garşylygyň kiçi bolmagy signalyň galmagala görä gatnaşygynyň gowulanmagy üçin amatly bolýar. Bu detektoryň ýygyllyk häsiýetnamasy rezonansyň töwereginde ýiti minimuma

eýe bolýar. Şonuň üçin bu detektor has ýokary saýlap ilijilik ykyby eýedir.



Köpri detektoryň bir görnüşi hem Blohyň özara dikana tegekleridir. Bu tegekleri Bloh ilkinji gezek 1945-nji ýylda ulandy.

Blohyň usuly bilen giromagnit gatnaşygynyň alamatlaryny kesgitlemek bolýar. Sebäbi tegekde döreýän elektrik hereketlendiriji güýjiň alamaty giromagnit gatnaşygyň alamatyna bagly bolýar.

1944-nji ýylda Zawoýskiý EPR signaly gözegçilik edende yrgyldylaryň generatoryny (awtodin spin detektorlaryny) ulandy. Bu ýerde generirlenýän ýygylýk ýokary derejede durnukly däl. Şonuň üçin bu detektory gaty jisimleri öwrenmek üçin ulanmak bolýar.

Häzirki wagtda ÝMR signaly gözegçilik etmek üçin göwrümi kiçi köp dürli ýadro niýetlenen datçikler ulanylýar. Datçik nusgany aýlamak üçin howa trubkadan, kabul ediji tegekden, magnit meýdany modularleýji tegekden we ilkinji güýçlendirijiden durýar.

1.18. Ýadro kwadrupol rezonansy

Şu sapagyň esasy maksady ýadro kwadrupol rezonansynyň fiziki esaslaryny we onuň amaly ähmiýetini öwrenmek bolup durýar.

Sapakda şu soragara seredip geçeri:

1. ÝKR hakynda umumy düşünje;
2. Kristalyň birhilli däl elektrik meýdany we energiýanyň kwadrupol derejeleri;
3. ÝKR-I gözegçilik etmegiň usuly we ÝKR-iň ulanylyşy;
4. Kwadrupol relaksasiýa.

1. ÝMR we EPR ýaly ÝKR hem radiospektroskopiýanyň esasy usuly bolup durýar.

ÝKR-iň spektrlerini iklinji gezek 1950-nji ýylda Demelt we Kryuger aldylar.

Ýadronyň kwadrupol momenti bilen gaty jisimiň (köplenç kristalyň) bir hilli däl irki elektrik meýdany özara täsir edişinde bir ýa-da birnäçe derejelere bölünýär.

Bu derejeleriň arasynda radioýygylýkly elektrimagnit energiýasynyň ýuwdulmagy bolanda ÝKR hadysasy ýüze çykýar.

Kwadrupol energiýa derejeleri we ÝKR-iň ýygylýgy ýadronyň ýerleşýän ýerinde elektrik meýdanyň güýjemesiniň gradiýentine proporsionaldyr.

Şeýlelikde ÝKR-iň spektrleri kristallardaky kwadrupol ýadrolaryň elektron gabawy hakynda maglumat berýär.

Kwadrupol özara täsiriň intensiwligi gaty jisimdäki molekulýar herekete baglydyr we kwadrupol relaksasiýanyň wagtny kesgitleýär.

täsiriň konstantasy diýilýär. Onuň ululygy ýadronyň elektron dykzlygyna baglydyr.

Wodorod atomyň energetiki derejelerine seredeliň.

A – magnit meýdany ýok wagtyndaky erkin elektronyň ýagdaýy.

B – magnit meýdany bar wagtyndaky elektronyň energetiki derejeleri

C – ýadro magnit momenti bilen magnit meýdanyň täsiri netijesinde 4 energetiki dereje alynýar.

$$E_3 = -\frac{1}{2} g \mu_\beta B_0 - \frac{1}{2} g_n \mu_n B_n$$

$$E_4 = -\frac{1}{2} g \mu_\beta B_0 + \frac{1}{2} g_n \mu_n B_n$$

$$E_1 = +\frac{1}{2} g \mu_\beta B_0 - \frac{1}{2} g_n \mu_n B_n$$

$$E_2 = +\frac{1}{2} g \mu_\beta B_0 + \frac{1}{2} g_n \mu_n B_n$$

EPR spektrometriň ýönekeý shemasyna seredeliň

1 – Güýçli magnit meýdanyny döredýän elektromagnit.

2 – Elektromagnit meýdanyny şöhlelendirýän aşa ýokary ýygylgyň generatory.

3 – Ýörite ýaçeýka, ýagny göwrüm generatory.

4 – Elektron shema.

5 – Nusga.

6 – Registrator.

1.11. Rezonans şertleriniň üstünden geçmek

Ýeke-täk signalyň ýa-da tutuş ÝMR spektriň görnüşi ýazmak üçin B_0 meýdanyň hemişelik ýagdaýynda B_1 üýtgeýän meýdanyň ω ýygylgyny üýtgetmeli ýa-da ω ýygylgyň hemişeli ýagdaýynda B_0 üýtgemeli. Bu üýgemeler ýygylgyň $\omega_0 = \gamma B_0$ ýygylgyň ýa-da $B_0 = \omega_0 / \gamma$ meýdanyň rezonans bahalarynyň golaýynda amala aşyrylýar. Iki ýagdaýda hem wagt birliginde ýygylgyň tapawudynyň $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ üýtgemegi bolup geçýär. Bu ýagdaý stasionar metodlar bilen ÝMR signaly registrasiýa edilende rezonans şertiniň üstünden geçmek üçin gerekdir. Köplenç B_0 hemişelik magnit meýdanyň ululygyny üýtgedýärler. Ýygylgy (ω) bolsa stabilizirlenen kwars generatorlaryny ulanyp hemişelik saklaýarlar.

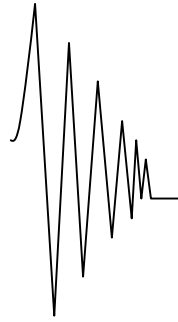
Amplitudanyň we ýygylgyň razwýortkasyny saýlap almak esasy mesele bolup durýar.

Rezonans signaldan geçiş wagty τ spin-spin relaksasiýa wagtyndan T_2^* has uly bolmalydyr.

$$\tau \gg T_2^* \quad (1.4)$$

Bu rezonansyň üstünden haýal geçmek şertidir. Eger (1.4) şert ýerine ýetýän bolsa, onda ÝMR signalyň ýoýulmagy we onuň maksimumynyň reezonans ($\omega_0 = \gamma B_0$) ýagdaýdan süýşmegi bolup geçýär.

Signalyň soňundan döreyän inçejik ossilýasiýa signaljyklara wiggler diýilýär. Wigleriň kem-kemden kiçelmegi T_2^* hemişelik wagtly eksponensial kanun boýunça bolyar. Şonuň üçin wigler hemişelik meýdanyň birhilliligini sazlamak üçin ulanylýar. Sazlamak üçin σB_0 nula çenli kiçeltmeli.



Wigleriň döremeginiň sebäbi nusgada 2 sany aýlanýan meýdanyň bolmagydyr. Bu meýdanlaryň ýygylklary biri-birinden az tapawutlanýarlar. Meýdanlaryň biri rezonans wagtynda ω_0 ýygylk bilen prosessirlenýän ýadro magnitliligiň M_{\perp} kese düzüjisi tarapyndan döredilýär. Beýlekisi ýygylgy $\omega(t)=\omega_0+\Delta\omega(t)$ bolan B_1 radioýygylkly meýdan tarapyndan döredilýär. Bu ýygylklary boýunça biri-birine golaý üýtgeýän meýdanlar goşulýsyp wigleri döredýär.

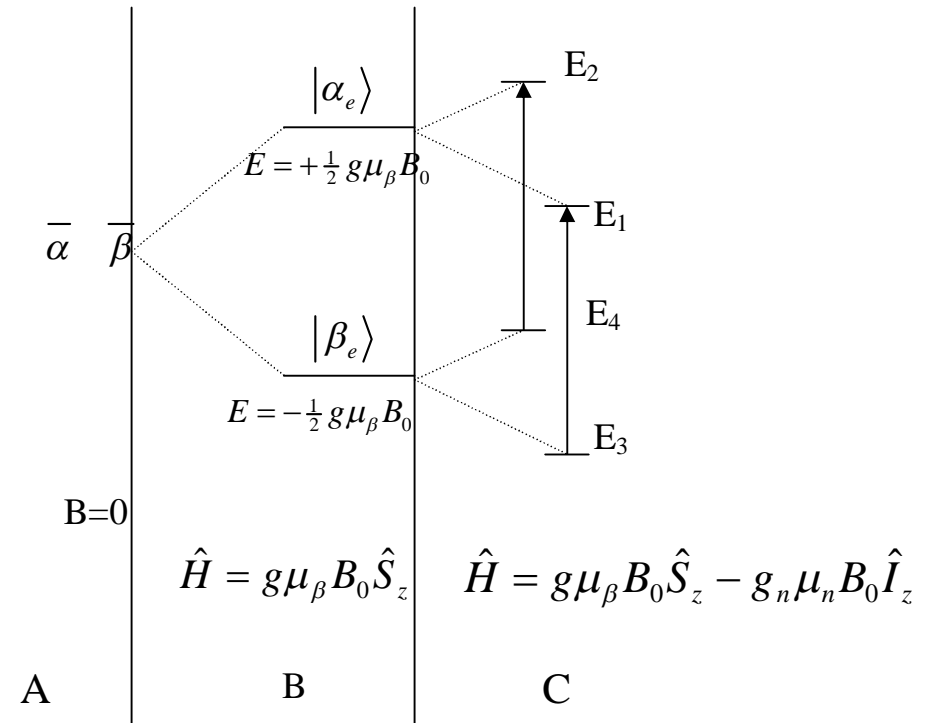
Wigleriň amplitudasy, ýygylgy we dowamlylygy ÝMR signalynyň giňliligine (ýa-da T_2^*) we rezonansyň üstünden geçiş tizligine baglydyr. Wigleriň kiçelmegi T_2^* hemişelik wagty eksponensial kanun boýunça bolup geçýär. Şonuň üçin olar magnitiň arasyndaky meýdanyň birhilliligini (σB_0) sazlamak üçin ulanylýar. Sebäbi T_2^* esasan magnit meýdanyň birhilli dældigi bilen kesgitlenýär.

Eger haýal geçiş şerti ($\tau \gg T_2^*$) ýerine ýetirilmese we spin ulgamyna güýçli radioýygylkly meýdan täsir etse ($B_1 \gg 1/(\gamma^2 T_1 T_2)$) onda ÝMR signaly has güýçli ýoýulýar. Bu ýagdaýda ýuwdulma signaly gözegçilik edilmeýär ($\nu=0$), dispersiýa signaly bolsa ýuwdulma signaly ýaly alynýar.

Şeýlelik bilen, inçe ÝMR signallary ýoýulmaz ýaly aljak bolsak, onda amplitudanyň we ýygylgyň razwýoprkasyny $\tau \gg T_2^*$ şert ýerine ýeter ýaly edip almaly.

elektron magnetony, \hat{S}_z - elektron spiniň operatory, B_0 – magnit meýdanyň induksiýasy.

2-nji çlen wodorod atomynyň ýadro momentiniň magnit meýdany bilen özara täsirini aňladýar; \hat{I}_z - ýadro spininiň operatory, g_n - ýadro g-factory. Bu çlen birinji çlenden kiçidir we alamaty boýunça biri-birine tersdir.



3-nji çlen elektron we ýadro spin momentleriň özara täsirini aňladýar. a – parametr özara täsiriň ululygyny aňladýar we energiýanyň ölçegine eýedir. a – parametre kontakt özara

Erkin elektron üçin g-factoryň arassa spin bahasy $g \approx 2$ deň bolýar ($L=0$, $S=1/2$, $J=1/2$).

g-factoryň arassa spin bahasyndan gyşarmagy (Δg) spin orbital özara täsir bilen düşündirilýär. Δg -niň bahasy otrisatel we položitel bolup biler.

Daşky B_0 magnit meýdany goşmaça orbital momenti indusirleýär (döredýär). Öz gezeginde elektronyň orbital hereketi B_0 garşy ugrukdyrylan B' magnit meýdany döredýär. Şeýlelik bilen elektron spini $B_{\text{lok}} = B_0 - B'$ magnit meýdanynda ýerleşýär. Bu bolsa spin orbital baglanyşygy aňladýar.

B' näçe kiçi bolsa spin sistemada B_{lok} we g-faktor kiçi bolýar. Bu ýagdaýda rezonans almak üçin B_0 uly gerek bolýar. Şeýle ýagdaý arassa spin bahadan otrisatel tarapa gyşarmany aňladýar ($-\Delta g$).

Erkin atomyň energetiki derejeleri. Erkin giňişlikde wodorodyň atomy ýeterlik yönekeý sistema bolup durýar. Onuň simmetriýasy sferikdir we anizotropiki effekti ýokdur. EPR hadysasyny öwrenimizde Gamiltonyň operatoryny, ýagny effektiv spin-gamiltoniýany

ulanýarys. Ol mukdar taýdan gözegçilik edilýän heme effektləri aňladýan we EPR spektrlere doly düşünmäge mümkinçilik berýär.

Wodorodyň atomy üçin spin-gamiltoniýany şeýle ýazyp bolar:

$$\hat{H} = g_e \mu_\beta B_0 \hat{S}_z - g_n \mu_n B_0 \hat{I}_z = a \hat{I} \cdot \hat{S} \quad (1.12)$$

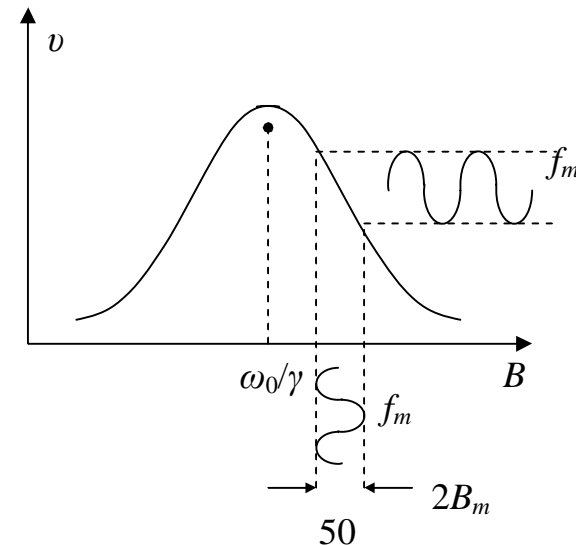
bu ýerde 1-nji çlen elektronyň magnit meýdany bilen özara täsirini aňladýar. (Zeyeman gamiltoniýany): g – elektron g –

faktor (erkin elektron üçin $g=2,0023193$, $\mu_\beta = \frac{e\hbar}{2m_e c}$ –

Gaty jisimleriniň ÝMR signaly giňliginiň ululygy bilen we amplitudasynyň kiçiligi bilen häsiýetlendirilýär. Şonuň üçin gaty jisimde ÝMR hadysasy gözegçilik edilende abzallaryň duýgurlygyny ýokarlandyrmak üçin ÝMR signalyň differensial geçişi ulanylýar. Bu ýagdaýda meýdanyň haýal geçişinden başga rezonans şertiniň üstünden geçiş wagtynda üýtgeýän magnit meýdanyň modulýasiýasy ulanylýar (B_M). B_M induksiýasynyň amplitudasy kiçi we ýyggylygy pes bolýar ($f_m \approx 20 \div 100 \text{ Gs}$).

Differensial geçiş ulanylanda radioýyggylykly güýçlendiriji abzalyň göýberiş zolagy kiçelýär ($0,05 \div 0,01 \text{ Gs}$ çenli). Sebäbi spin detektory modulýasiýa ýyggylygy f_M bolan sinusynda bilen modulirlenen ýokary ýyggylykly signal döredýär. Şeýle signaly dar zolakly güýçlendirijilerde f_M ýyggylykda güýçlendirip bolýar.

Rezonans signalyň önümi egriniň formasynyň üýtgemegine has duýgur bolýar. Şonuň üçin differensial geçiş ÝMR-iň giň signallaryny has takyk öwrenmäge mümkinçilik berýär.



1.12. Impuls we furýe-spektroskopiýasy

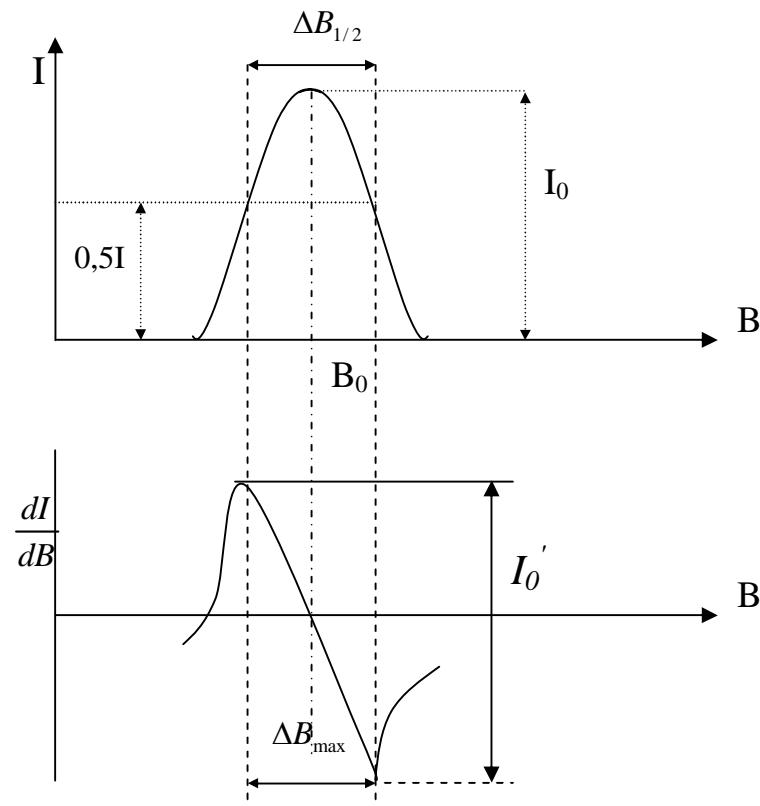
ÝMR hadysasyny üznüksiz (stasionar) we impuls usullary bilen gözegçilik etmek bolýar. Üznüksiz usulda nusga ÝMR spektriň gözegçilik edilýän hemme dowamynda ýokary ýygylkly meýdanyň üznüksiz täsiri astynda bolýar. Impuls usulynda belli bir ýygylgy bolan ýokary ýygylkly yrgyldynyň gysga impulsy ulanylýar. Ýadro spinleriniň ulgamynyň üýtgeýşine gözegçilik impuls gutarandan soň edilýär.

Impuls tejribeleri we soňraky matematiki özgertmek üznüksiz usuldaky ýaly spektral maglumaty almaga mümkinçilik berýär. Ýöne impuls usullary has ýokary derejede durýar. Impuls usulynda ölçeg geçirmegiň wagty gysgalýar we signalyň galmagala bolan gatnaşygy ýokarlanýar.

Impuls usullaryny ulanmak relaksasiýanyň geçişini we tebigatyny öwrenmäge mümkinçilik berýär.

Köp tejribelerde çylşyrymly yrgyldyda bar bolan ýygylklary bölüşdirmek gerek bolýar. Mysal üçin, adaty prizmanyň kömegi bilen çylşyrymly yrgyldy, ýagny “ak ýagtylyk” onuň düzüjilerinme ýa-da spektre bölünýär. Yrgyldynyň spektri dürli yrgyldylaryň intensiwliginden we ýygylgyndan durýar. Ony garmoniki seljermek ýa-da Furýeniň hataryna dargatmak arkaly almak bolýar. Bu çylşyrymly yrgyldyny onuň spektral düzüjilerine dargadýan matematiki usuldyr. Çylşyrymly yrgyldyny wagtyň funksiýasy hökmünde köplenç wagt zolagyndaky funksiýa, deňşililikdäki spektri bolsa ýygylk zolagyndaky funksiýa diýip atlandyryrlar. Garmoniki spektral seljermäniň usullary bilen maglumatlary bir görnüşden başga görnüşe özgertmek bolýar.

Belli bolşy ýaly, $f(t)$ funksiýany Furýeniň hatary, ýagny tükeniksiz sinuslaryň we kosinuslaryň hatary görnüşinde görkezmek bolýar:



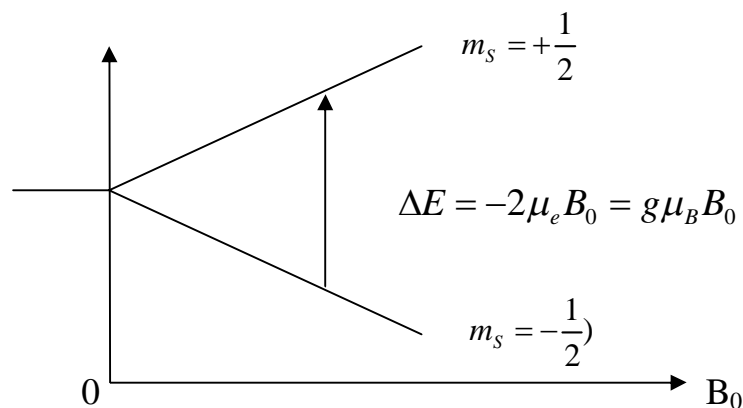
Rezonans signalyň ýagdaýy we g-faktor. EPR-de rezonans signalyň ýagdaýyny kesgitleýän parametr g-faktor bolup durýar. Ol elektron magnit momentiniň doly burç momentine deňdir. Erkin atomlar üçin, ýagny gaz fazasynda, şeýle aňlatma alyndy.

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) + L(L+1)}{2J(J+1)}$$

Bu ýerde S – jemleýji spin, L – jemleýji orbital moment, J – doly burç moment.

Energetiki derejeleriň arasyndaky geçiş üýtgeýän radioýygylykly meýdany arkaly amala aşyrylyp biliner. Derejeleriň energiýasynyň tapawudynyň elektromagnit şöhlelenmesiniň kwantyna deň bolmagy EPR-iň şerti bolýar $\Delta E = h \nu$. Bir elektron üçin:

$$\Delta E = -2 \mu_e B_0 = g \mu_B B_0 = h \nu$$

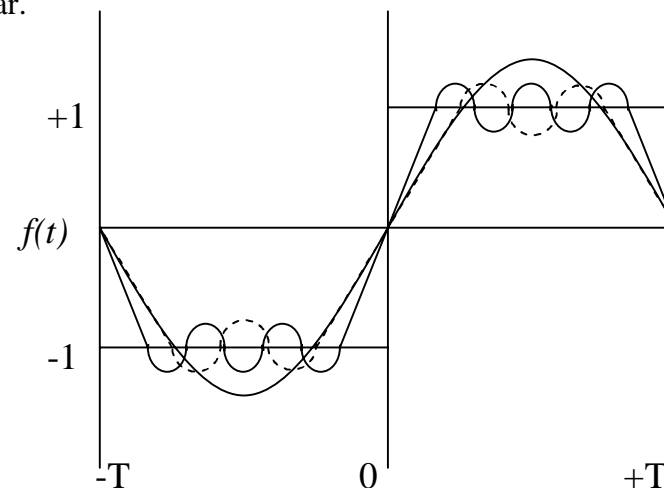


Bu şertiň ýerine ýetirilmegi üçin köplenç şöhlelenmegiň hemişelik ýygylygynda B_0 üýtgetýärler.

EPR-iň spektrinde rezonans signal intensiwligiň birinji önümi görnüşinde alynýar. Bu has amatly hasaplanýar.

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi}{T}t\right) + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right)$$

Bu ýerde A_n we B_n – koeffisiýentler. Bu aňlatma $-T \leq t \leq T$ zolakda hakykydyr. Eger $f(t)$ simmetrik ýa-da jübüt funksiýa bolsa [ýagny $f(-t)=f(t)$], onda hemme B_n nola deň we formulada diňe kosinuslar galýar. Eger $f(t)$ simmetrik däl ýa-da jübüt däl funksiýa bolsa [ýagny $f(-t)=-f(t)$], onda diňe sinuslar hatary galýar.

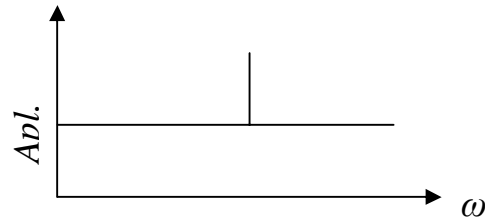


Suratda ýönekeý gönüburçly funksiýa sinus boýunca Furýeniň hatary görnüşinde görkezilen. Bu ýerde hataryň 1, 2 we 3 agzalary göz önünde tutulan. Eger hataryň agzalaryny köpeltsek onda berlen funksiýa has golaýlaşýars.

Gönüburçly yrgyldy iumpuls usuly bilen göni baglanyşyklydyr. Ýokary ýygylykly generatory çalt birikdirmek we söndürmek netijesinde Furýe düzüjiler generirlenýär. Bu düzüjiler essy ýygylyga goşulýar ýa-da ondan aýrylýar. We nusga takmynan $\nu_0 \pm 1/t_\omega$ aralykda ýerleşýän

ýygylyk zolagy täsir edýär. Bu ýerde t_ω – impulsyň dowamlylygy.

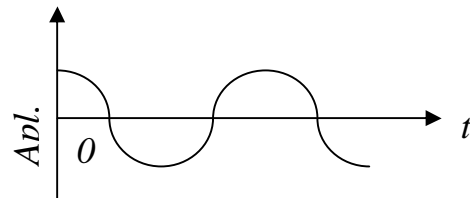
Spektral seljermelerde Futýeniň hataryny ulanman, degişli integrallary ulanmak amatly bolýar. Bu ýagdaýda $f(t)$



funksiýadan Furýeniň özgertmesini şeýle kesgitlemek amatly:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) (e^{-i\omega t}) dt \quad (1.5)$$

Bu ýerde $\omega = 2\pi\nu$ burç ýygylygy, $i = \sqrt{-1}$



Ters baglanyşygy şeýle ýazyp bileris:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) (e^{-i\omega t}) d\omega \quad (1.6)$$

\vec{B}_0 daşky magnit meýdany döredilende onuň bilen özara täsiriniň gamiltoniýany şeýle ýazylýar:

$$H = - \mu_e \vec{B}_0 = g \mu_B B_0 S_z$$

z – oky meýdanyň ugry bilen gabat gelýär.

Proýeksiýa S_z şeýle ýazylýar: $S_z = \hbar m_s$

m_s kwant sany -S-den +S-e çenli bahany, ýagny umumy $2S+1$ bahany alyp bilýär.

Bir elektron üçin $S = \frac{1}{2}$ we spin wektorynyň diňe 2 oriýentasiýasy bolup biler, ýagny meýdanyň ugry we oňa garşylykly ugur $m_s = -\frac{1}{2}$ we $m_s = +\frac{1}{2}$

Degişlilikdäki energetiki ýagdaýlar (состояние) şeýle ýazylyp bilner:

$$E = g \mu_B B_0 m_s$$

Elektronyň we ýadronyň magnit momentleriniň dürli alamaty bolany üçin elektronyň pes energiýaly ýagdaýy

$m_s = -\frac{1}{2}$ bolýar. Ýokary energiýaly ýagdaý $m_s = +\frac{1}{2}$ bolýar.

EPR we ÝMR hadysalary magnit rezonansynyň şol bir prinsiplerine esaslanandyrlar. Olaryň arasyndaky tapawut magnit momentleriniň ululygy, alamaty we özara täsiri bilen kesgitlenýär ($|\mu_e| = 658|\mu_p|$). Bu bolsa nazaryetde we tejribede uly tapawudyň bolmagyna getirýär.

we onuň bilen baglanyşykly μ_e magnit momentiň bolmagy daşky magnit meýdanynyň täsiri astynda energiýa derejelere bölünmegine we olaryň arasyndaky geçişiniň bolmagyna getirýär. Bu geçişler aşa ýokary ýygylýk çäginde elektromagnit şöhlenenmäniň ýuwdulmagy netijesinde bolup geçýär. ($\nu=9-35$ GGs, $B_0=0,34-1,25$ Tl) we oňa elektron paramagnit rezonansy diýilýär.

EPR usulynda spin orbital aragatnaşyk sebäpli ýagdaý arassa spinli däldir. Böljejiň magnit momentiniň orbital goşandy rezonansyň şertini Elektron spininiň üýtgedýär. Bu g – faktoryň bahasynda ýüze çykýar. g – faktor EPR spektriniň birinji häsiýetlendirijisidir. EPR spektriniň ikinji häsiýetlendirijisi aşainçe gurluş bolup durýar. Ol elektron ýadro spin-spin özara täsir esasynda döreýär.

Spini $S \geq 1$ bolan paramagnit merkezi özünde saklaýan anizotrop nusgalarda hem inçe gurluş gözegçilik edilýär. Bu daşky magnit meýdany ýok wagtynda spinleriň energiýa derejeleriniň bölünmegi netijesinde bolýar.

EPR-iň şerti. Elektronyň spini bolýar (hususy hereket mukdarynyň momenti) we ol elektrik zaryady bolan böljejkdir. Şonuň üçi elektronyň magnit momenti bolýar:

$$\mu_e = -g\mu_B \vec{S}$$

Bu ýerde \vec{S} - spin burç momentiniň wektory ($h/2\pi$ birliginde), μ_B - Boruň magnetony. Erkin elektron üçin $g=2,00232$.

(1.5) we (1.6) formulalarydakı hyýaly argumentiň eksponensial funksiýasyny sinus we kosinus düzüjilewr girýär.

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$$

Aýrylykda Furýeniň sinus we kosinus özgertmesini girizmek bolýar:

$$s(\omega) = 2 \int_0^{\infty} f(t) \sin \omega t dt \quad \text{hyýaly bölek}$$

$$c(\omega) = 2 \int_0^{\infty} f(t) \cos \omega t dt \quad \text{hakyky bölek}$$

Adaty ÝMR spektrinde (B_1 üznüksiz berlende) ýadro spinleriň ulgamy bir lorens signalyny berýär. Emma 90° -lyk impulsdan soň bu ulgam erkin induksiýanyň eksponensial peselmesini berýär. Wagty zolagyndaky eksponenta we ýygylýk zolagyndaky signalyň lorens şekili Furýe özgertmesi bilen baglanyşyklydyr. Ýagny biri-biriniň “Furýe şekillendirmesi” bolup durýar. Matematiki muny şeýle görnüşde ýazyp bileris:



$$\frac{T_2}{1 + T_2^2 (\omega - \omega_0)^2} = \int_0^{\infty} \exp(-t/T_2) \cos(\omega - \omega_0)t dt$$

Bu formulanyň çep bölegindäki Lorens funksiýasy Blohyň deňlemesiniň çözüdinden alynýan ýuwdulma signaly aňladýar. Şeýlelikde, 90° -lyk impulsdan soň alynýan indusirlenen signalyň peselmesiniň egrisi Furýe özgertmesi hakyky ÝMR spektrini berýär.

Impuls spektrometriň blok-shemasyna serdeliň:

μ kesgitlemegiň takyklygy Plankyň hemişeliginiň takyklygy bilen çäklenendir. Magnit momenti has takyk başga metodlar bilen kesgitlenýär.

B_0 magnit meýdanyny kesgitlemegiň mümkinçiligi hem (1) formuladan gelip çykýar. B_0 ölçemegiň takyklygy giromagnit gatnaşygyň (γ_p) takyklygy bilen we magnitometriň apparat mümkinçiligi bilen çäklenendir.

Häzirki wagtda ÝMR güýçli ($0.1 \div 10$ Tl) we gowşak ($10^5 \div 10^{-3}$ Tl) magnit meýdanlary ölçemek üçin ulanylýar, esasan hem geomagnitometrler we optiki nakaçkaly kwant ÝMR magnitometrleri has köp ulanylýarlar.

Gözegçilik edilyän ÝMR signallaryň intensiwligi boýunça jisimde ol ýa-da beýleki birleşmeleriň mukdaryny kesgitlemek bolýar. Sebäbi ýadro magnitliliğiň kese komponentleri U we V (χ'' we χ') nusgadaky rezonirleýji ýadro dipollarynyň sanyna (N) baglydyr ($V_{\max} \sim M_0$, $U_{\max} \sim M_0$, $M_0 \sim N$). Has takyk mukdar analizinde barllanylýan we etalon jisimleriň ÝMR signallarynyň integral intensiwlikleri deňeşdirilýär.

Häzirki wagtda ÝMR dänäniň çyglygyny ölçemek üçin, topragyň çyglyk derejesini kesgitlemek üçin, biologiki obýektlerde we başga maksatlar üçin ulanylýar.

1.17. Elektron paramagnit rezonansy

EPR metodyň teoretiki esaslary. EPR usuly gurluş we kinetiki barlaglarda köp ulanylýan radiofiziki usullaryň biridir. Bu usuly diňe paramagnit nusgalar üçin ulanmak bolýar. Şeýle nusgalara goşalanmadyk elektronlary bolan bölekler degişlidir, ýagny erkin radikallar, geçiş metallaryň kompleksi we başga paramagnit merkezleri degişlidir.

Türkmenistanda hem saglygy goraýyşda ulanmak üçin 2 sany ÝMR tomograf işe girizildi.

ÝMR ulanylanda şu aşakdaky gatnaşyklar peýdalanylýar:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

ýa-da

$$\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \quad (1.11)$$

Bu Larmor ýygylgynyň formulasy, ýagny goňşy energetiki derejeleriň arasyndaky geçişleriň ýygylgy.

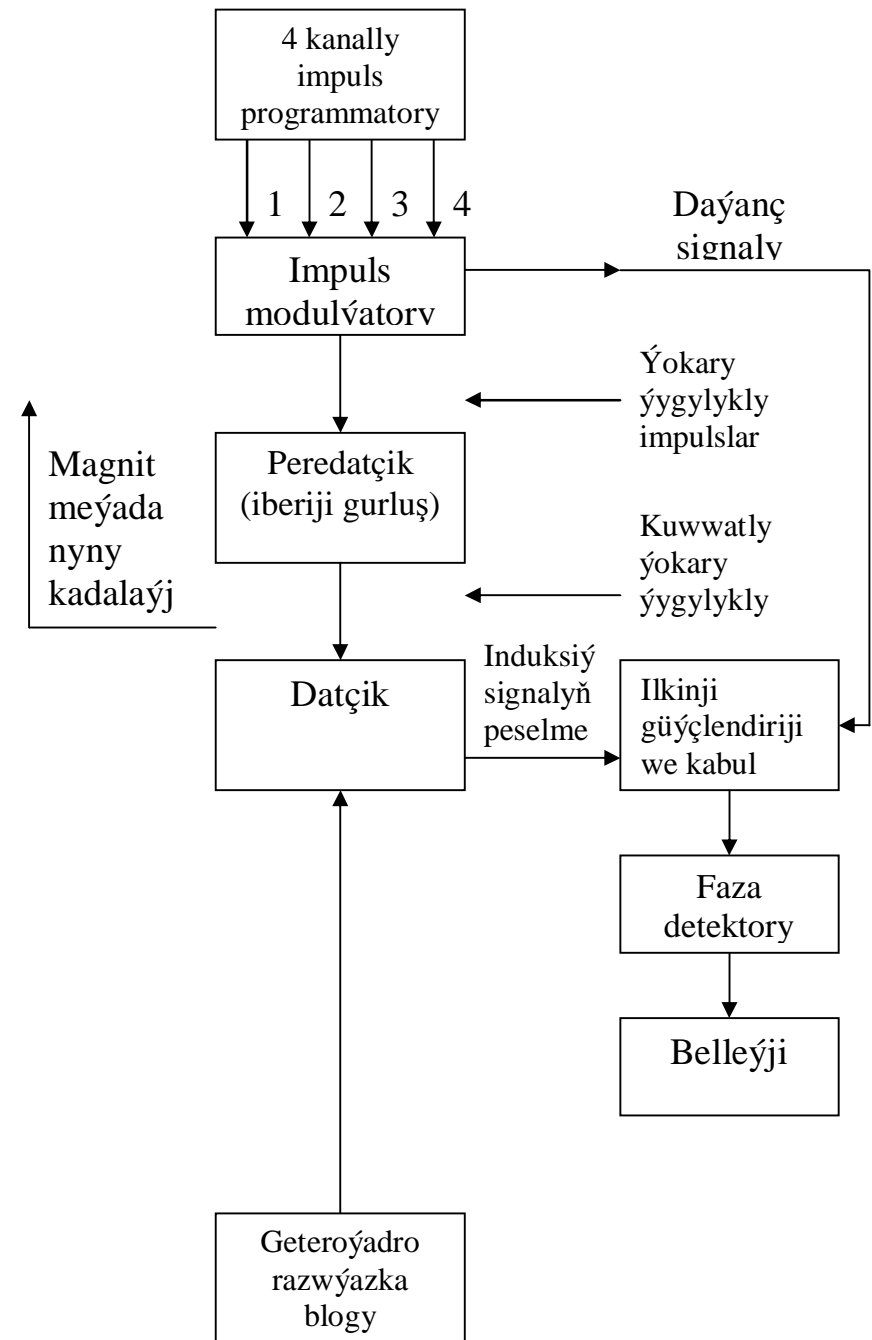
Köp izotoplaryň giromagnit gatnaşygyny (γ) we ýadronyň magnit momentini (μ) ω_0 we B_0 takyk ölçemek netijesinde ýokarky formula arkaly kesgitlenildi. Ýygylgy ölçemek kynçylyk döretmeýär. Ýöne magnit meýdanynyň güýjemesiniň takyk bahasyny ýörüte tejribelerinde almak bolýar. B_0 takyk kesgitlemek netijesinde protonyň giromagnit gatnaşygynyň (γ_p) takyk bahasy alyndy (b bellige çenli). Protonyň giromagnit gatnaşygyny bilip beýleki izotoplaryň giromgnit gatnaşyklaryny kesgitläp bolýar.

$$\gamma = \gamma_p \frac{\nu_0}{\nu_{op}}$$

Bu ýerde ν_0 we ν_{op} şol bir B_0 meýdanyndaky derňelýän ýadronyň we protonyň ÝMR ýygylgy.

Ýadronyň magnit momentini bu ýadronyň giromagnit gatnaşygy arkaly kesgitlemek bolýar.

$$\mu = \frac{\gamma h I}{2\pi}$$



Datçik nusganyň peredatçik bilen kabul edijiniň baglanyşygyny üpjün edýär.

Impuls modulýatory peredatçigi dolandyrmak üçin ulanylýar. Oňa ýokary ýygylgyň kwars generatory we ýokary ýygylgyň pereklyuçateli girýär.

Impuls programmatory impuls modulýatoryň klapanyň haçan, näçe wagt we haýsy kanal (0, 90, 180 we 270° fazaly) üçin açylmalydygyny görkezýär.

Ýokary ýygylgyň peredatçygy impuls modulýatoryndan gelýän signallary güýçlendirýär. Şeýlelikde, kuwwatly ýokary ýygylkly impuls alynýar (100 Wt ÷ 10 KWt)

Ilkinji güýçlendiriji we nusganyň tegegi spektrometriň signal/galmagal gatnaşygyny kesgitleýän elementler bolup durýar.

$\theta = \gamma B_1 t$ (rod) formulanyň kömegi bilen impulsyň täsiri astynda \vec{M} ýadro magnitliligiň wektoryň öwrülme burçuny tapmak bolýar. 90°-lyk impulsdan soň bolýan indusirlenen signalyň peselmegi spektral maglumaty saklaýar. Bu maglumat bolsa Furýe spektroskopiýada ýüze çykarylyar.

Iki we ondan köp yzygiderli impulslardan (180°, τ , 90° we ş.m.) soň gözegçilik edilýän indusirlenen signalyň peselmegi relaksasiýa wagtalaryny kesgitlemek üçin ulanylýar.

1.13. Ýadro magnit relaksasiýasynyň geçişleri

Rezonirleýji ýadrolaryň relaksasiýasyny häsiýetlendirilýän iki hili wagt bolýar. Spin-gözenek relaksasiýa wagty T_1 spin ulgamynyň doýgunlaşma derejesini kesgitleýär. Spin-spin relaksasiýa wagty T_2 signalyň giňligini kesgitleýär (doýgunlaşma ýok wagty). Relaksasiýalaryň ikisiniň hem tertipsiz ýylylyk hereket netijesinde ýadrolarda

Spin-spin özara täsiriň hemişeligini köplenç spektrdäki sugnalyň şekilinden kesgitlep bolýar. Çylşyrymly spektrlerdäki signallary seljermek üçin kwant mehanikasynyň usuly we kompýuter ulanylýar.

1.16. Radiospektroskopiki usullary ulanmagyň amaly ähmiýeti

Ilkinji gezek ÝMR-iň kömegi bilen makroskopiki şekili gözegçilik etmegiň mümkinçiliklerini ilkinji gezek 1972-nji ýylda Lauterbur aýtdy. Adamyň bedenini öwrenmek üçin ÝMR-i ulanmagy ilkinji gezek Damadýan amala aşyrdy. Lauterbur hemişelik birhilli magnit meýdanynyň üstüne gowşak gradiýent magnit meýdanyny bermegi hödürleýär. Gradiýent meýdan ýygylgy bedeniň içindäki islendik nokadyň giňişlik koordinatasy bilen baglanyşdyrýar. Bu bolsa ÝMR signallaryň kömegi bilen adam organizminiň şekilini görmäge mümkinçilik berýär.

ÝMR tomografiýasy üçin şu aşakdakylar talap edilýär:

1. Güýçli hemişelik magnit meýdany B_0 ;
2. Nusganyň içinde bir nokatdan başga nokada üýtgeýän gowşak magnit meýdany;
3. Radioiberiji we kabul ediji;
4. Şekli hasaplamak üçin kuwwatly kompýuter.

Rentgen we radioizotop usullary bilen deňeşdirilende, ÝMR tomografiýa howpsyzdyr. Onuň energiýasy agzalan usullara seredeninde takmynan milliard esse azdyr.

Häzirki zaman ÝMR tomografiýasy janly organizmde 1 mm we ondan hem kiçi şekili almaga mümkinçilik berýär. Saparmyrat Türkmenbaşynyň atalyk aladasy bilen

6. Multipletler onuň merkezine görä simmetriýa eýedir.

7. Multipletleriň signallarynyň intensiwligi belli bir kanun boýunça kesgitlenýär.

8. Spin-spin özara täsiriň hemişeliginiň bahasy ÝMR gözegçilik edilýän ýadronyň tertip belgisiniň artmagy bilen ulalýar. Mysal üçin, ^1H üçin $J_{AB} \approx 10 \text{ Gs}$, $^{19}\text{F} \approx 300 \text{ Gs}$).

9. J hemişeliginiň bahasy temperatura bagly däl.

10. Eger özara täsir edişýän ýadrolar himiki ekwiwalent däl ýagdaýlaryň arasyndaky çalt alyş-çalyşa ýa-da intensiw kwadropol özara täsire gatnaşýan bolsa onda multiplet ýitip gidýär.

11. Täsir edýän ýadrolar himiki baglanyşyk boýunça daşlaşanda spin-spin özara täsir we hemişelik J kiçelýärler.

Göni däl spin-spin özara täsir spinleriň ýa-da walent elektronlaryň orbital hereketiniň ujypsyz polýarlanmasy amala aşyrylýar. Eger spini $\frac{1}{2}$ iki ýadro şeýle özara täsir bilen baglanyşykly bolsa onda her ýadro beýleki ýadronyň signalyny iki bölek edýär.

Magnit ekwiwalent ýadrolaryň arasynda spin-spin özara täsir ýüze çykmaýar. Magnit ekwiwalent ýadro diýip birmeňzeş rezonans ýygylgy we spin-spin özara täsiriň hemişeligi bolan ýadrolere aýdylýar.

Signallaryň intensiwligini Paskalyň üçburçlygynyň kömegi bilen tapyp bolar:

						1
						11
					12	1
				13	3	1
		14	6	4	1	
	15	10	10	5	1	
16	15	20	15	6	1	

döredýän wagta garaşly magnit we elektrik meýdanlary şertlendirýär.

Relaksasiýanyň geçiş netijeli bolar ýaly gös-göni spine täsir edýän we wagta bagly käbir özara baglanyşyk bolmaly. Islendik hereketsiz özara baglanyşyk spectral signallary giňeltmän olaryň ýagdaýyna we intensiwligine täsir edýär.

Relaksasiýanyň geçişleri esasan şu sebäpler bilen şertlenendir:

- magnit ýadrolaryň öz aralaryndaky dipol-dipol özara täsir;

- tertipsiz hereket edýän molekulalaryň güýçli anizotrop himiki süýşmesi tarapyndan şertlendirilen ýerli meýdanyň üýtgemegi;

- ýadrolaryň kwadropol momentleriniň elektrik meýdanlarynyň gradiýenti bilen özara täsiri;

- derňelýän birleşmelerdäki paramagnit garyndylaryň goşalanmadyk elektronlarynyň spinleriniň döredýän magnit meýdany.

Spin-gözenek relaksasiýa wagty esasan seredilýän molekulanyň düzümine girýän ýadrolaryň özara gatnaşygy bilen kesgitlenýär.

Suwuklykdaky goşa proton üçin relaksasiýanyň tizligini şeýle ýazyp bileris:

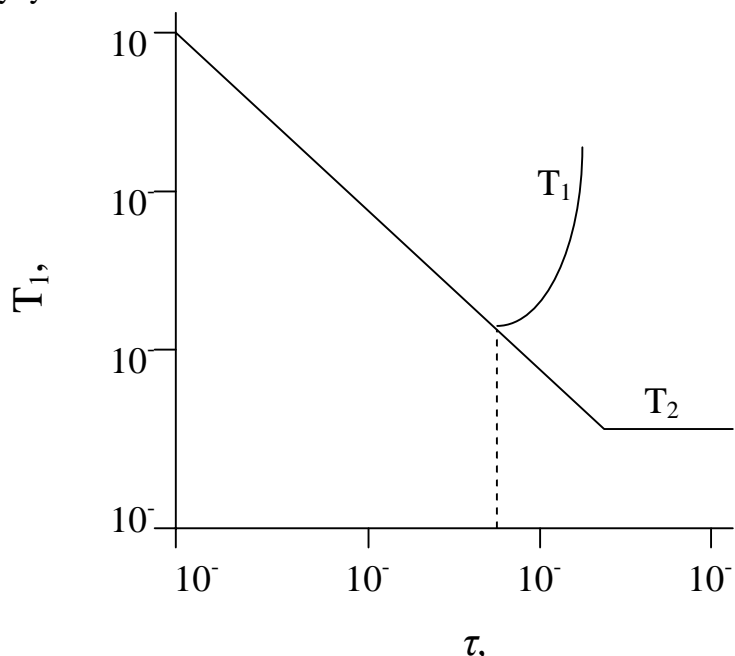
$$R_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{96 \cdot \mu^4 \cdot \tau \pi^2}{r^6 \eta^2} \quad (1.7)$$

Bu ýerde μ – seredilýän protonyň magnit momenti, r – iki goňşy protonyň aralygy; $\tau = 4\pi\eta v^0 / (3KT)$, η – suwuklygynyň şepbeşikligi, v – molekulanyň göwrümi.

Korrelyasiýa wagty τ 1. deňlemede ýerinde goýup alarys:

$$R_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{128\pi^3}{\eta^2} \cdot \mu^4 \cdot \frac{\nu}{r^6} \cdot \frac{\eta}{KT} = C \cdot \frac{\mu^4}{r^6} \cdot \nu \cdot \frac{\eta}{KT}$$

Bu deňlemeden üç sany t amaly ähmiýetli netije gelip çykýar.

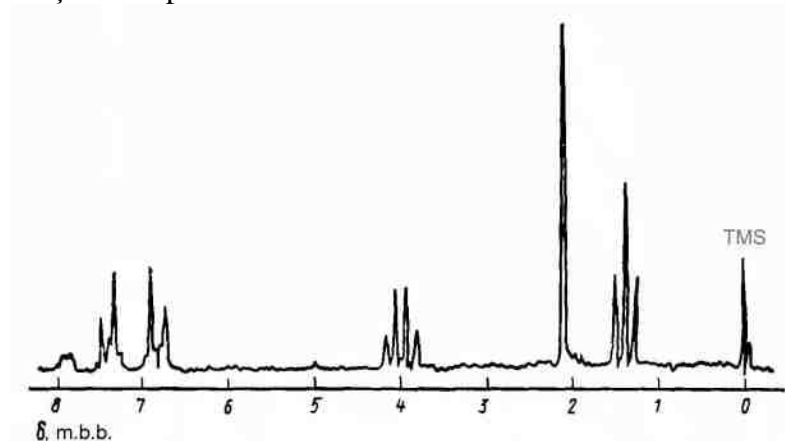


1. ÝMR üçin adaty temperatura aralygynda relaksasiýa wagty T_1 berlen suwuklyk üçin η/T ululyga ters proporsional. Işlendik ergin üçin temperatura belli bir aralykda ýokarlananda signalyň giňligi kiçelýär.

2. T_1 molýar göwrüme ters proporsionaldyr.

3. Magnit ýadrolary biri-birinden daşlaşan ýa-da kiçi magnit momentleri bolan maddalar uly relaksasiýa wagtyna eýe

multipletler görnüşinde bolýar. Mysal üçin $C_{10}H_{13}NO_2$ birleşmäniň spektri.



Bu multipletler himiki ekwiwalent däl ýagdaýda ýerleşýän goňşy magnit ýadrolaryň göni däl spin-spin özara täsiri netijesinde döreýär.

Spin-spin özara täsir şeýle häsiýetlere eýedir:

1. Signallaryň bölünmesi haçanda özara täsir edişýän ýadrolar topary himiki ekwiwalent däl ýagdaýda bolanda döreýär.

2. Multipletlerdäki sugnallaryň sany özara täsir edişýän goňşy ýadronyň spini I ýa-da n ekwiwalent ýadrolardan durýan özara täsir edişýän goňşy toparyň jemleýji spini $I_{\Sigma}=nI$ bilen kesgitlenýär, ýagny $2I+1$ ýa-da $2I_{\Sigma}+1$.

3. Multipletiň hemme goňşy signallarynyň arasyndaky aralyk birmeňzeşdir. Bu aralyga spin-spin özara täsiriniň hemişeligi J diýilýär.

4. Özara täsir edişýän A we B ýadrolaryň gersde aňladylýan hemişeligi deňdirler (J_A+J_B).

5. Spin-spin özara täsiriň hemişeligi J magnit meýdanyň güýjemesine B_0 bagly däldir.

$$\nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi}(1-\sigma)B_0$$

ýa-da
$$\omega_0 = \gamma(1-\sigma)B_0$$

Himiki süýşmäni absolýut şkalada ölçäp bolmaýar. Şonuň üçin şertli nul hökmünde etalon birleşmäniň signaly ulanylýar. Köplenç islendik ýadro üçin himiki süýşmäniň bahasy ölçegsiz parametr σ görnüşinde getirilýär. σ şeýle kesgirlenýär.

$$\sigma = \frac{B_d - B_e}{B_d} \approx \sigma_d - \sigma_e$$

Himiki süýşmäniň ölçeg birligi hökmünde $1 \cdot 10^{-6}$ ululyk ulanylýar, ýagny milliondan bir bölek:
$$\sigma = \frac{B_d - B_e}{B_d} \cdot 10^6$$

Himiki süýşmäni ölçemek üçin şu etalon maddalar ulanylýar: tetrametilsilan (TMS) $Si(CH_3)_4$, geksametildisiloksan (GMDS) $Si(CH_3)_3-Si(CH_3)_3$, siklogeksan C_6H_{12} , benzol C_6H_6 , suw we başgalar.

ÝMR signalyň himiki süýşmesiniň diapazony proton (1H) üçin 10 m.d., uglerod-13 (^{13}C) üçin 200 m.d., azot-14 (^{14}N) üçin 500 m.d., fluor-19 üçin bolsa 700 m.d. gowrak bolýar.

1.15. Spin-spin özara täsir

Spektrometrleriň çözüp bilijilik ukyby ýokarlananda ÝMR spektrinde käbir signallar çylşyrymly simmetriki

bolmalydyr. Sebäbi T_1 wagt magnit momentine we aralyga güýçli baglydyr (μ^4, r^6) güýçli baglydyr.

Çyzgyda relaksasiýa wagtlarynyň (T_1 we T_2) korrelýasiýa wagta baglylygy görkezilen (ikileýin logarifm ölçeginde). Şepbeşikligi kiçi suwuklyklarda T_1 we T_2 wagtlar τ wagta görä deň üýtgeýärler.

Spin-spin relaksasiýany μ ýadro magnitliligiň xy tekizlikde peselmegi şertlendirýär. Spin-gözenek relaksasiýa bolsa μ ýadro magnitliligiň Z oky boýunça peselmegi bilen baglanyşyklydyr. Muňa garamazdan T_1 we T_2 relaksasiýa wagtlary özara berk baglanyşyklydyr. Şonuň üçin T_1 we T_2 wagtlaryň ikisini hem rezonans signallaryň görnüşi we intensiwligi beýan edilende hasaba almalydyr.

Paramagnit garyndyly birleşmelerde paramagnit ionyň relaksasiýasynyň tizligine goşandyny şu formula bilen kesgitläp bolar:

$$\left(\frac{1}{T_1} \right)_{ion} = \frac{12 \pi^2 \gamma^2 \eta N_{ion} \mu^2}{5 KT}$$

Bu ýerde $N_{ion}=1 \text{ sm}^3$ – daky paramagnit ionlaryň sany, μ_{ef} - olaryň täsir ediji momenti. Bu formuladan görnüşi ýaly, hemişelik temperaturada $1/T_1=f(N_{ion})$ göni baglanyşyk bar. Şonuň üçin ÝMR usulyny ergindäki paramagnit garyndylaryň konsentrasiýasyny kesgitlemek üçin ulanmak bolar.

1.14. Magnit goragy we himiki süýşme

Dürli birleşmelerde molekula toparlara girýän birhilli ýadrolaryň (γ =hemişelik) ÝMR ýygylgy B_0 üýtgeşsiz bolanda hemişelik däl. Rezonans ýygylgynyň bu üýtgemeleri rezonans beriji ýadrolaryň ýerleşişiniň himiki birmeňzeş dälligi bilen baglanyşyklydyr. Şonuň üçin rezonans ýygylgynyň üýtgemegine ÝMR signalynyň himiki süýşmesi diýilýär.

Diamagnit maddalarda B_0 magnit meýdanynyň täsiri astynda ýadronyň daşynda aýlanýan elektronlaryň “diamagnit” toklary döreýär. Olar ýadronyň ýerleşýän ýerinde \vec{B}_0 meýdanyň garşysyna ugrukdyrylan \vec{B}' magnit meýdanyny döredýärler.

Bu \vec{B}' meýdanyň güýjenmesi daşky B_0 meýdanyň güýjenmesine baglydyr, ýagny $B' = \sigma B_0$. Şonuň üçin ýadro şu magnit meýdanynda ýerleşýändir.

$$B = B_0 - B' = (1 - \sigma)B_0 \quad (1.8)$$

Bu ýerde σ – ýadronyň elektron gabykdan gorag hemişeligi. Bu ululyk elektron gabygyň konfigurasiýasyna baglydyr. Konfigurasiýa himiki birleşmäniň aýratynlygy, himiki baglanyşygyň häsiýeti, goňşy atomlaryň elektrootrisatelligi, hem-de dürli molekulýar özara täsir bilen kesgitlenýär.

Atomda σ hemişeligiň bahasy Limbiň formulasy bilen kesgitlenip bilner:

$$\sigma = \frac{Ze^2}{3m_e c^2} \left\langle \frac{1}{r_i} \right\rangle \quad (1.9)$$

Bu ýerde Z – ýadronyň zarýady, e we m_e – elektronyň zarýady we massasy, r_i – i -nji elektrondan ýadro çenli aralyk. Skobka kwant mehaniki ortalaşmany aňladýar.

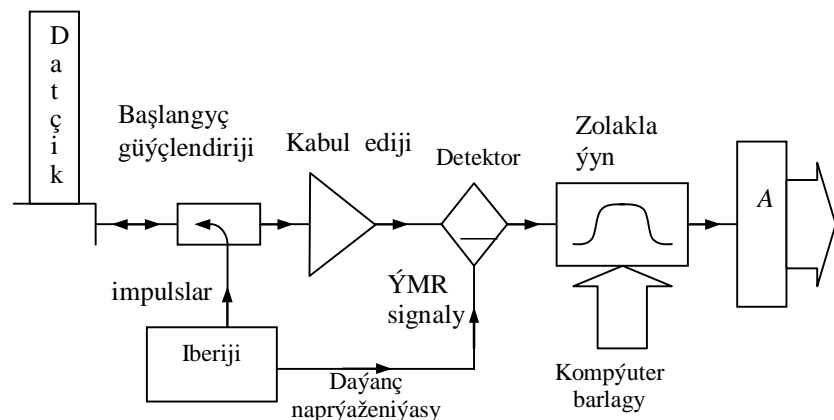
Molekulada atom bilen deňeşdirilende diamagnit toklara goşmaça päsgelçilik döreýär. Olar başga atomlaryň barlygy we elektron gabyklaryň ýoýulmasy bilen baglanyşyklydyr. Goý molekulanyň elektron buludyny dürli atomlara degişli bölekler bölüp bolýar diýeliň. Onda atomlaryň diamagnit toklaryna päsgelçilik ýüzleý seredeniňde paramagnit toklaryň döremegi bilen düşündirilýär. Olar diamagnit toklaryň garşysyna ugrukdyrylandyr. Şu sebäpli molekuladaky atomlaryň goraw hemişeligi iki düzüji görnüşinde görkezmek bolar: σ_{dia} we σ_{para} . Olar ýadronyň ýanyndaky daşky B_0 meýdanyň paramagnit we diamagnit toklarynyň hasabyna üýtgeýändigini häsiýetlendirýär.

$$\sigma = \sigma_{dia} + \sigma_{para} \quad (1.10)$$

σ_{dia} we σ_{para} hemişelikler ýadronyň gorawy bilen üýtgeşik baglanyşyklydyr. Agyr atomlar (ftor, fosfor we başgalar) üçin molekulanyň dürli gurluş üýtgemelerinde σ_{dia} düzüjiniň ululygynyň bahasy takmynan hemişelik bolýar. σ_{para} ululygyň bahasy himiki baglanyşygynyň häsiýetiniň üýtgemelerine duýgurdyr.

Wodorodyň ýeňil atomlarynda ýadronyň ýanyndaky elektron dykzlygy azdyr. Şonuň üçin olar dürli daşky täsirlerden ýaramaz goralandyr.

Molekuladaky ýadrolaryň himiki birmeňzeş dældigini hasaba alýan ÝMR-iň ýylylygy üçin formula şu görnüşde ýazylýar:



2.2-nji çyzgy

Tejribede signallary toplamak we ortalaşdyrmak ýoly bilen gowy signal/galmagal gatnaşygy alynýar. Ondan soň sanlaýyn maglumatlar ýygylýk aňlatmasyna özgerdilýär.

(2)-nji deňlemede $f(t)$ kompleks funksiýa bolmagy mümkin. Ýöne tejribeleriň görkezişine görä ol hakykydyr we ÝMR signalynyň amplitudasynyň wagta baglydygyny aňladýar. Muňa seretmezden, integralyň belgisiniň aşagynda kompleks eksponenta bolany üçin $F(\omega)$ funksiýa kompleks bolmagy mümkin. Başda bu ýagdaý düşnüksiz ýaly görünýär, ýöne ony ýeňil düşündirmek bolýar

Ekspontany onuň aýrybaşga mümkinçiligi görnüşinde, ýagny trigonometrik funksiýalaryň utgaşmasy hökmünde görkezeliň:

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

Bu ýagdaýda Furýeniň özgertmesiniň hakyky we hyýaly bölekleri bolýar:

$$\text{Re} [F(\omega)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (2.5)$$

Suratda 1a we 1b ýagdaýlarda zaryadyň paýlanyşy sferik bolýar. Şonuň üçin $eQ=0$ bolýar.

$eQ>0$ ýagdaý (1ç) zaryadyň paýlanyşynyň spin oky boýunça süýndirilendigine gabat gelýär. Mysal üçin, ^{14}N ýadro üçin ($I=1$) $eQ=0,0019$ barn ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$).

$eQ<0$ ýagdaý (1d) zaryadyň paýlanyşynyň spin okuna perpendikulýardygyna gabat gelýär. Mysal üçin ^{35}Cl ýadro üçin ($I=3/2$) $eQ=-0,082$ barn.

Ýadro kwadrupol momentleriň hemme belli ululyklary – $2 < eQ < 10$ barn aralykda ýerleşýär.

ÝKR hadysasyny spini $I \geq 1$ bolan ýadrolarda gözegçilik edip bolýar. Olardan B (bor), N (azot), Cl (hlor), Br (brom), I (iod), Al (alýuminium), Cu (mis), As (myşýak), Sb (surma), we başgalar.

Köplenç ÝKR usuly bilen özünde galogen saklaýan birleşmeler hem-de azotyň käbir birleşmeleri öwrenilýär.

ÝKR-iň signallaryny derňelýän birleşmelerde gözegçilik etmek çylşyrymly meseledir.

Molekuladaky kwadrupol ýadronyň ($I \geq 1$) electron gurşawy bir hilli däl elektrik meýdanyny döredýär. Ol bolsa ýadroda elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň gradiýentini döredýär (eq).

Ýadronyň elektrik kwadrupol momenti (eQ) bilen elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň gradiýenti (eq) özara täsir edişýärler. Bu ýerde energiýasynyň ölçegi bolup kwadrupol özara täsiriň hemişeligi $e^2 qQ$ hyzmat edýär.

Kwadrupol özara täsiriň energiýasy kwantlaşýar we energiýanyň kwadrupol derejeleri döredýär.

Energiýanyň tapawudy kçidir hem-de eQ we eq garaşlydyr.

Kwadrupol geçişler 10^4 - 10^9 Gs radioýygylýk aralygyna gabat gelýär. Esasan 2-1000 MGs aralykda rezonans alynýar.

ÝKR-iň signallaryny diňe gaty jisimlerde gözegçilik etmek bolýar.

Gazlarda we suwuklyklarda molekulalaryň tertipsiz hereketi netijesinde elektrik meýdanyň gradiýenti nola çenli azalýar ($eQ \approx 0$) we enrgiýanyň kwadrupol derejeleri döremeýär.

Ýadrolaryň kwadrupol momentleri köplenç belli bolýar. Şonuň üçin ÝKR usulyny gurluş maglumatlary almak üçin, zarýadyň paýlanyşyny we himiki baglanyşygyň häsiýetini bilmek üçin ulanylýar.

Mysal üçin, baglanyşygyň ion häsiýeti uly bolsa, onda meýdanyň gradiýenti eq we e^2qQ hemişelik kiçi bolýar.

Himiki baglanyşygyň kowalent häsiýeti uly bolsa, onda e^2qQ kwadrupol hemişelik uly bolýar.

Kwadrupol momenti (eQ) bolan ýadro kristallyň içindäki birhilli däl meýdana bolup we onuň bilen täsir edişip biler.

Bir hilli däl meýdan 2-nji derejeli tenzor bilen häsiýetlendirilýär.

Eger elektrik meýdany aksial simmetriýa eýe bolsa, onda 2 tenzoryň sany diagonal düzüjiler biri-birine deň bolýar

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}, \text{ bu ýerde } V \text{ elektrik meýdanynyň}$$

potensialy.

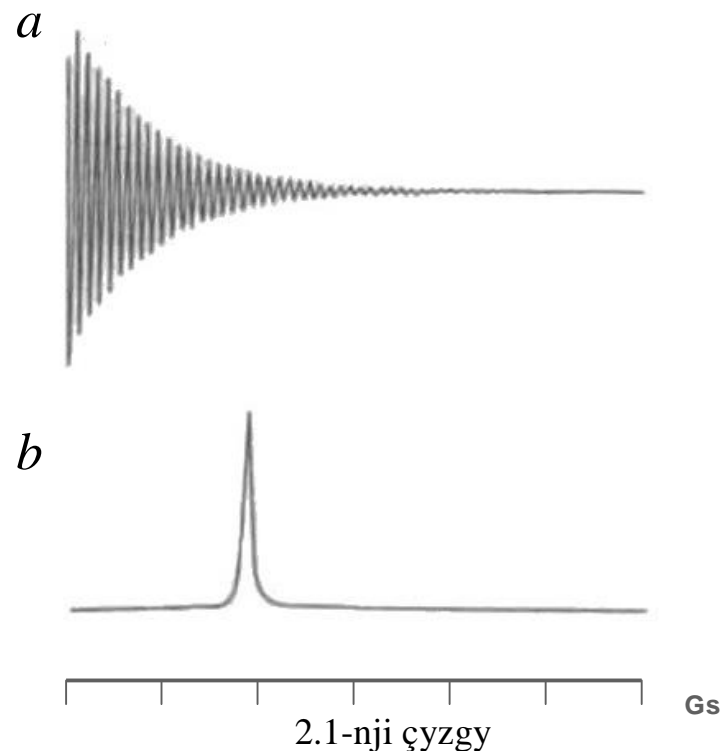
Eger sferik sommetriýaly meýdan bolsa, onda tenzoryň hemme üç düzüjisi biri-birine deňdir.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial z^2},$$

ýa-da

$$q_{xx} = q_{yy} = q_{zz}$$

Bu ýagdaýda kwadrupol moment nola deň bolýar ($eQ=0$).



boýunça peselip gidýär. Bu seslenme spektrinde bir signaly bolan H_2O/D_2O garyndy üçin 2.1-nji çyzgyda (a) görkezilen. Furýeniň özgertmesi wagtda aňladylan signaly degişli ýygylýk spektrine öwürýär (b). Bu özgertmäni amala aşyrmak üçin impuls furýe-spektrometrleri ulanylýar. Onuň ýönekeý shemasy 2.2-nji çyzgyda görkezilen.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt \quad (2.2)$$

Bu ýerde $f(t)$ maglumatlaryň wagtda aňladylyşyny görkezýär, $F(\omega)$ bolsa talap edilýän ýygylýk spektri. (2)-nji deňlemä integral girýär, onuň aşagyndaky aňlatmada bolsa kompleks san bar. Alnan ÝMR-iň signallaryny sanlaýyn görnüşe özgerdip bolýar. Onuň üçin integrally jem bilen approksimirlmeli. $f(t) \rightarrow F(\omega)$ özgertme nokatlar boýunça şu gatnaşygyň kömegi bilen amala aşyrylýar:

$$F_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} T_k e^{\left(\frac{-2\pi i j k}{N}\right)} \quad (2.3)$$

Bu ýerde F_j – ýygylýk ýaýlasyndaky j -nji nokat, T_k – wagt ýaýlasyndaky k -njy nokat, N – nokatlaryň umumy sany. (2)-nji jemi Kuliň we Týukiň önjeýli çalt furýe-özügertmesiniň algoritmini ulanyp kompýuteriň kömegi bilen hasaplap bolýar.

2.2. Furýeriň özügertmesiniň ÝMR spektr derňewinde ulanylyşy

(2)-nji aňlatmany dogry diýip hasap edip onuň amaly maksatlar üçin ulanylyşyna seredeliň. ÝMR usulynda derňelýän madda kuwwatly radioýygylýkly gysga impuls berilýär. Soňra ÝMR-iň seslenmesi eksponensial kanun

Elektrik meýdanyň aksial simmetriýadan gyşarmasyny häsiýetlendirmek üçin asimmetriýa parametric girizilýär.

$$\eta = \left| \frac{q_{xx} - q_{yy}}{q_{zz}} \right|$$

η bahasy 0÷1 aralykda üýtgeýär. Aksial simmetriýa bolanda $\eta=0$ ($q_{xx} = q_{yy}$). $H=1$ bolanda asimmetriýa maksimal bolýar.

Kristalyň içindäki bir hilli däl meýdan esasan kwadrupol ýadroly molekula tarapyndan döredilýär.

Aksial simmetriýaly ($\eta=0$) bir hilli däl elektrik meýdanyndaky ýadronyň energiýasynyň kwadrupol derejesi şu formula bilen kesgitlenýär:

$$E_{|m_I|} = \frac{e^2 Q q}{4 I (2 I - 1)} \left[3 m_I^2 - I (I + 1) \right],$$

m_I – ýadro spininiň proyeksiýasynyň kwant sany.

Bu ýerden görnüşü ýaly energiýa derejeleri m_I boýunça ikileýin bolýar, ýagny m_I alamatyna bagly dälir.

Mysal üçin $I=3/2$ bolanda (^{11}B , $^{35,34}\text{Cl}$, $^{79,81}\text{Br}$ we başgalar) $m_I=\pm 1/2$ we $m_I=\pm 3/2$ ikileýin derejeler bolup biler. Bu derejeleriň energiýasyny ýokarky formuladan hasaplap bileris:

$$E_{\pm 1/2} = -\frac{e^2 Q q}{4} = -K, \quad E_{\pm 3/2} = \frac{e^2 Q q}{4} = K$$

olaryň tapawudy $\Delta E = E_{\pm 3/2} - E_{\pm 1/2} = \frac{e^2 Q q}{2}$

Energetiki derejeleriň arasyndaky geçiş

$$h\nu = E = \frac{e^2 Qq}{2} \text{ rezonans şerti ýerine ýetende bolýar.}$$

Geçişiň ýygylklary şeýle gatnaşykda bolýar:

$$\nu_2 = 2\nu_1, \nu_3 = \frac{3}{2}\nu_2, \nu_4 = \frac{4}{3}\nu_3, \text{ ýagny } \nu_1 : \nu_2 : \nu_3 : \nu_4 \\ 1 : 2 : 3 : 4$$

Spini $I=1$ we $I=3/2$ bolan ýadrolarüçin simmetriki däl (asimmetriki) meýdanda energiýanyň hususy bahalary takyk çözüldi.

$I=1$ ýagdaý üçin (^{14}N , ^{32}S we başgalar) 3 sany kwadrupol derejeler alynýar. Olar şu formulalar bilen aňladylýar:

$$E_{\pm 1} = \frac{e^2 Qq (1 \pm \eta)}{4I(2I - 1)} = K(1 \pm \eta)$$

$$E_0 = \frac{e^2 Qq}{2I(2I - 1)} = -2K$$

Suratda aksial (3a) we aksial däl (3b) simmetriýa meýdanyndaky energetiki derejeleri görkezilen.

Bu ýerde 3b suratda şu geçişler bolýar:

$$\Delta E = E_+ - E_0 = h\nu = K(3 + \eta),$$

$$\nu_+ = \frac{K(3 + \eta)}{h}$$

2. ÝADRO MAGNIT REZONANS USULYND A FÜRÝENIŇ ÖZGERTMESINI ULANMAK

Ýadro (ýadro) magnit rezonansy (ÝMR) käbir atom ýadroleriniň magnit häsiýetine esaslanan hadysadyr. ÝMR molekulalaryň gurluşyny we häsiýetlerini derňemekde ýokary takykly, galtaşyksyz we zyýansyz usuldyr. ÝMR-yň signallary radiotolkunlaryň atom ýadroiniň magnit momentleri bilen özara täsiri netijesinde döreýär. Olar atom ýadroleriniň fiziki we himiki gurşawy hakynda maglumat berýär. Bu bolsa ÝMR usulyny fizikada, himiýada, biologiýada, saglygy goraýyşda we halk hojalygynyň beýleki pudaklarynda giňden ulanmaga mümkinçilik berýär. Häzirki wagtda ÝMR spektroskopiýasyna tomografiýasyna ygtybarly aşa geçirijili elektromagnit bilen bilelikde impuls usullary we Furýe özgertmesi ornaşdyryldy. Netijede fizikler, himikler, biologlar we lukmanlar üçin dürli maddalary we janly bedenleriň gurluşyny derňänlerinde örän giňişleýin maglumat almaga mümkinçilik döredi. Şu işde Furýe özgertmesiniň ýokary hilli ÝMR signallaryny almakda ulanylyşy seljerilýär.

2.1. Furýeniň özgertmesi

Furýeniň özgertmesi amplitudanyň wagtda aňladylyşyndan ýygylkda aňladylyşyna geçmäge mümkinçilik berýär. Bu bolsa impuls spektrometrinde geçirilýän tejribelerde alynýan maglumatlary seljermäge mümkinçilik berýär. Maglumatlaryň aňladylyşynyň iki görnüşini baglanyşdyrýan deňlemäni şeýle ýazyp bileris: wagt ýaýlasy üçin

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.1)$$

ýygylk ýaýlasy üçin

düzüjilerden durýar. Bu iki birleşmeleri bilelikde seljerip kobalt birleşmesi üçin dipol düzüjini kesgitläp bolýar.

Gowşak paramagnit birleşmelerde ÝMR signallaryny gözegçilik etmek bolýar. ÝMR gözegçilik edip bolmaýan birleşmelerde EPR signaly gözegçilik edilýär.

Diamagnit birleşmeleriň çylşyrymly spektrlerini ýönekeýleşdirmek üçin olara paramagnit süýşüriji reaktiwler goşulýarlar. Şonda spektrdäki signallar dürli hili süýşýärler we giňeýärler. Şeýlelikde çylşyrymly spektr ýönekeýleşýär. Paramagnit süýşüriji reaktiw hökmünde ýewropiniň, itterbiniň, prazeogimiň ionlarynyň kompleksleri ulanylýar. Ondan başgada kobaltyň we nikeliň asetilasetonatlary ulanylýar. Ýöne bular spetrdäki signallary güýçli giňeldýärler. Şonuň üçin signallardaky inçe gurluş ýitip gidýär.

$$\Delta E = E_- - E_0 = h \nu = K (3 - \eta) ,$$

$$\nu_- = \frac{K (3 - \eta)}{h}$$

Bu geçişlerden göni kwadrupol täsiriň hemişeligini $e^2qQ=4K$ we η asimmetriýa parametrini kesgitläp bolýar.

1.19. Ikileýin rezonans

Seredip geçen ÝMR, EPR we ÝKR metodlarda derňelýän madda bir üýtgeýän elektromagnit meýdany bilen täsir edilýär. (B_1). Meýdanyň ýygylgy energetiki derejeleriň arasyndaky kwant geçişiniň ýygylgyna deňdir. Şeýlelikde bu ýygylkda degişli rezonans signallary alynýar. Emma häzirli wagtda köpçülikleýin, esasan hem ikileýin rezonanslar giň ulanylyşa eýe boldy. Bu ýerde birnäçe üýtgeýän elektromagnit meýdany ulanylýar.

Esasan W_A we W_B rezonans ýygylgy bolan 2 sany A we B spin ulgamlary ulanylýar. Bu spin ulgamlaryň arasynda energiýa çalşygy bolýar. Bu ýagdaýda bir spin ulgamdaky geçiş doýrup beýleki spin ulgamlaryň magnit rezonansynyň giňligini, inçe gurluşyny üýtgedip bolýar. A we B spin ulgamlary hökmünde dürli rezonans ýygylgy ($W_A \neq W_B$) bolan 2 sany ýadro sistemalary ýa-da ýygylklary güýçli tapawutlanýan ýadro we elektron spin ulgamlary ulanylýar. Bular esasan hem ikileýin ýadro-ýadro we elektron-ýadro rezonanslary. Häzirki wagtda ikileýin ÝMR-ÝKR rezonansy hem ulanylýar.

Ilkinji gezek ikileýin spin rezonans 1950-nji ýylda NaNO_3 kristalda ^{23}Na ýadroda R. Paund tarapyndan eksperimental alyndy. Bu kristalda spini $I=3/2$ deň bolan birhilli däl elektrik meýdanynda ýerleşýär. Kwadrupol özara täsir netijesinde ^{23}Na ýadronyň ÝMR signaly 3 sany komponente bölünýär. Olar şu kwant geçişlere gabat gelýär:

$$3/2 \rightarrow 1/2, \quad 1/2 \rightarrow -1/2, \quad -1/2 \rightarrow -3/2$$

Güýçli radioýgylykly meýdan bilen bu geçişleriň islendigi doýurlanda beýleki spin ýagdaýlaryň üýtgemegi bolup geçýär. netijede hemme rezonans signallaryň intensiwlikleriniň üýtgemegi bolup geçýär.

1953 ýylda Karwer elektron we ýadro spin ulgamlaryň arasyndaky ikileýin rezonansy gözegçilik etdi. Şeýle elektron-ýadro rezonansyny almagyň mümkinçiligini Owerhauzer öňünden aýtdy. Elektron derejeleriň arasyndaky geçişi doýuryp ýadro signallaryň polýarlanmagy alynýar. Şeýle polýarizasiýa ýadronyň dinamiki polýarizasiýasy (ýa-da oriýentirlenmegi) diýilýär. Bu Owerhauzeriň effekti ÝMR signallaryň intensiwligini ýokarlandyrmak üçin ulanylýar. ÝMR signallaryň intensiwliginiň ýokarlandyrmagyny şeýle formula boýunça kesgitläp bolar (ideal ýagdaýda):

$$f = \frac{\Delta n^*}{\Delta n_0} = 1 + \frac{g_e \mu_B}{g_n \mu_n}$$

bu ýerde Δn^* - elektron rezonansyň geçişiniň doly doýurlynan ýagdaýyndaky bölejikleriň tapawudy, Δn_0 - termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýyndaky tapawut. Bu formula laýyklykda proton üçin $f=659$. real ýagdaýlarda şu formula ulanylýar:

täsir noldan tapawutly bolanda dipol süýşme döreýär. Dipol süýşme üçin aňlatma şu görnüşde bolýar:

$$\delta_d = K \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^3}$$

Bu ýerde K – hemişelik ululyk, r – elektrondan ýadro çenli aralyk, θ - \vec{r} wektoryň we paramagnit molekulanyň magnit okynyň arasyndaky burç.

Dipol süýşme paramagnit molekulanyň giňişlik gurluşyny häsiýetlendirýär. Şonuň üçin olar dürli gurluş meselelerini çözmek üçin ulanylýar.

Goşalanmadyk elektronlar tarapyndan döredilýän güýçli lokal meýdanlaryň täsiri netijesinde paramagnit maddalarda ýadro spinleriň T_1 we T_2 relaksasiýa wagtlary kiçelýärler. Bu bolsa signallaryň giňelmegine getirýär.

Birleşmelerde paramagnit süýşme diňe süýşmeden ybarat bolsa, onda signallaryň giňligi şeýle kesgitlenýär:

$$\frac{1}{T_2} = B \frac{1}{r^6}$$

Bu ýerde B –berlen temperaturada derňelýän nusga üçin hemişelik.

Iki walentli kobaltyň birleşmelerinde paramagnit süýşme galtaşma we dipol düzüjilerden durýar. Iki walentli nikelin birleşmelerinde paramagnit süýşme esasan galtaşma

boýunça signallaryň dürli görnüşli giňelmeleri we relaksasiýa effektleri bolýar.

Goşalanmadyk elektronlaryň ÝMR spektrlerinde döredýän effektleri örän güýçli lokal (ýerli) magnit meýdanlary bilen döredilýär. Lokal meýdanlar elektron-ýadro ýa-da goşalanmadyk elektronlaryň ýa-da rezonirleýşi ýadrolaryň spinleriniň arasyndaky aşa inçe özara täsir netijesinde döreýär.

Galtaşma özara täsir netijesinde ÝMR spektrdäki signalyň süýşmesine galtaşma paramagnit sýşme diýilýär. Galtaşma süýşme, haçanda goşalanmadyk elektronyň rezonirleýji ýadronyň ýerleşýän ýerinde bolmak ähtimallygy noldan tapawutly bolana, gözegçilik edilýär.

Galtaşma süýşmesi paramagnit metal-birleşme baglanyşygyň häsiýeti we birleşmäniň elektron gurluşy hakynda maglumat berýär. Galtaşma süýşmesi üçin aňlatma şu görnüşde bolýar:

$$\delta_g = - \frac{8\pi}{3N} \chi \rho (N)$$

Bu ýerde N – goşalanmadyk elektronlaryň sany, χ – elektronlaryň magnit kabul edijiligi, $\rho(N)$ – elektronyň ýadronyň ýanyndaky spin dykzlygy.

Umuman paramagnit süýşme galtaşma we dipol düzüjilerden durýar. Haçanda goşalanmadyk elektronyň we ýadronyň magnit momentleriniň arasyndaky dipol-dipol özara

$$f = 1 + S \xi \frac{g_e \mu_B}{g_n \mu_n}$$

bu ýerde ξ – relaksasion prosese bagly köpeldiji, S – elektrtron rezonansyň doýurylma derejesi.

Elektron ýadro spin sistemadaky relaksasiýanyň tebigatyna bagly ξ köpeldiji otrisatel we položitel bolup biler. $\xi < 0$ bolanda dipol-dipol özara täsiri bolýar, $\xi > 0$ bolanda relaksasiýa kontakt özara täsir bilen kesgitlenýär. Şeýlelik bilen köpeldijiniň alamaty Owehauzeriň effektiniň otrisatel ýa-da položiteldigini kesgitleýär. ξ –niň ululygyny we alamatyny kesgitläp maddalarda magnit özara täsiri öwrenmek bolýar.

1954-nji ýylda Bloh çylşyrymly spektrleri ýönekeýleşdirýän goşalaýyn ýadro rezonans usulyny hödürledi. Ýönekeýleşdirmе kăbir spin-spin özara täsiri aýyrmagyň hasabyna amala aşyrylýar. Munuň üçin adaty spektrleri almak üçin ulanylýan başga, goşmaça radioýygylykly magnit meýdany (B_2) berilýär.

Ikileýin rezonansda ýadrolaryň bir toparyna rezonans ýygylyga golaý güýçli B_2 radioýygylykly meýdan bilen täsir edilýär. Bu bolsa ýadronyň signalyny doýgunlaşdyrýar we olaryň ýadrolaryň başga bir topary bilen özara täsirini aýyrýar.

Giromagnit gatnaşyklary γ_1 we γ_2 bolan iki topar ýadrolardan durýan ulgama seredeliň.

$\gamma_2 B_2$ golaý W_2 burç ýygylygy bilen XY tekizlikde aýlanýan güýçli radioýygylykly B_2 meýdan bilen ýadrolaryň bir toparyna täsir edeliň. Bir wagtda ýygylygy $\gamma_1 B_0$ golaý bolan geçişi B_1 gowşak radioýygylykly meýdan bilen amala aşyrylýar. ÝMR-iň spektrinde bu ýagdaý γ_1 giromagnit gatnaşykly ýadrolaryň signallarynyň düzüjileriniň birikmegine getirýär.

Asetildegidiň metil protonlaryna güýçli B_2 meýdan bilen täsir edilende aldegid protonlarynyň ÝMR-nyň dört signaly birikýär bu bolsa ikileýin rezonansyň usulydyr. (surat)



Impuls spektrometrleriniň döredilmegi bilen goşalaýyn rezonans we beýleki tejribeleri geçirmek mümkin boldy. Bu bolsa ÝMR spektrlerdäki çylşyrymly signallary yönekeýleşdirýär. We olary seljermegi ýeňilleşdirýär.

1.20. Gaty jisimlerde ýadro spinleriniň esasy özara täsirleri

Gowy çözüp bilijilikli ÝMR-iň spektrleri derňelýän obýekt hakynda köp maglumat berýär. Signallaryň giňelmeginiň belli bir bölegi abzallar bilen baglanyşykly, galanlary bolsa nusganyň fiziki häsiýetleri bilen baglanyşykly.

Gaty jisimlerde signallaryň giňelmeginiň esasy çeşmesi ýadro spinleriň dipol özara täsiri bolup durýar.

Ýadro spinlerine ýadro magnit momentleri tarapyndan döredilýän goşmaça dipol magnit meýdanlary täsir edýär. Bu magnit meýdanlaryň berlen ýadrolaryň ýanyndaky wektor jisimiň ululygy ÝMR spektriň görnüşini kesgitleýär.

Eger kristallogidratda kristallizasiýa suwuň iki molekulasy bar bolsa, onda ÝMR-iň signaly dört bolýar (1.3- nji b surat).

Üç spinli ulgamda, mysal üçin metil CH_3 toparly organik kristalda ÝMR signaly has çylşyrymly bolýar (1.3-nji ç surat).

1.21. Paramagnit molekulalardaky ýadro magnit rezonansy

Ýadrolaryň we elektronlaryň arasyndaky magnit özara täsir şu iki sebäp bilen düşündirilýär:

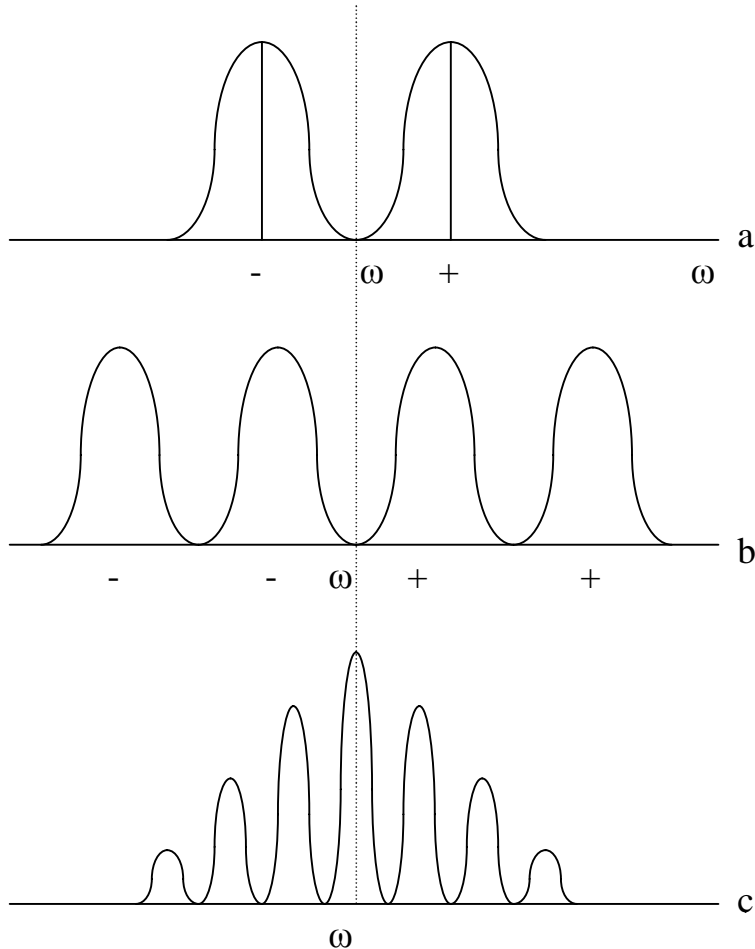
1. Elektrik zaryadlaryň hereketleri netijesinde ýüze çykýan magnit meýdanlaryň bolmagy;

2. Goşalanmadyk elektronlaryň spinleri bilen baglanyşykly magnit momentleriň bolmagy.

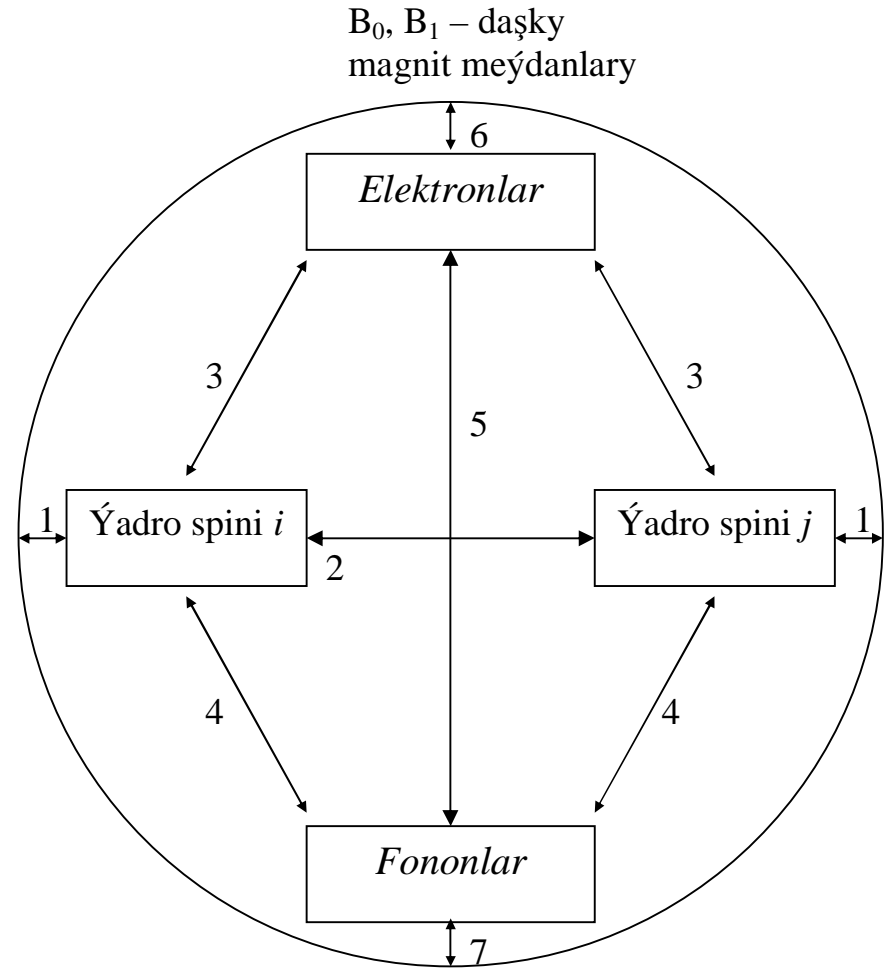
Birinji sebäp himiki süýşmäniň döremegine, ikinji bolsa paramagnit süýşmäniň döremegine getirýär.

Paramagnit ulgamlardaky ÝMR molekulalaryň gurluşy hakynda maglumat almaga mümkinçilik berýär.. paramagnit molekulalarda goşalanmadyk elektronlar diamagnit molekulalardaky bilen deňeşdirilende bir näçe esse uly himiki süýşmäni döredýär. Bu süýşmelere temperatura baglylyk häsiýetlidir. Paramagnit maddalar üçin tebigaty

$B'_{ef} = B_0 + B_{lok}$ meýdanda, beýleki ýarysy bolsa $B''_{ef} = B_0 - B_{lok}$ meýdanda presessirlenerler (aýlanarlar). Şeýle kristallogidratyň ÝMR signaly iki signaldan ybarat bolar. Olaryň ýygylgy ω_0 -dan $\pm\Delta\omega = \pm\gamma B_{lok}$ ululyk tapawut eder (1.3-nji a surat) .



Giňişlikdäki ugra bagly bolany üçin dipol magnit meýdanyna molekulýar hereket täsir edýär. Gaty jisimlerde bolup geçýän esasy özara täsirlere seredeliň (1.1-nji surat) .



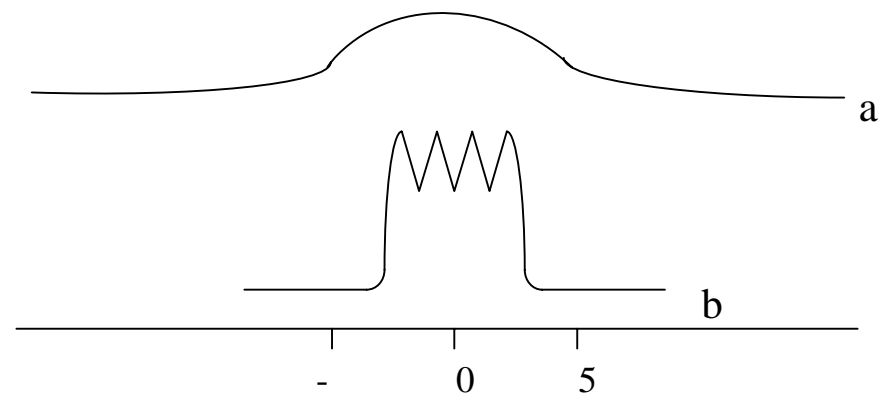
Ýadro spinleri öz daş töweregi bilen täsir edişip biljek ýedi sany drli ýol bar:

1. Spinleriň Zeýeman özara täsiri;
2. Göni spin-spin özara täsir;
3. Ýadro spiniň elektronyň we göni däl spin-spin özara täsir;
4. Göni spin gýadroek özara täsir;
5. Elektronlar arkaly göni däl spin-gýadroek özara täsir. ($3 \leftrightarrow 5$);
6. Ýadro spinleriň elektronlar tarapyndan ekranlaşmasy we polýarlanmasy;
7. Ýadro spinleriň akustiki meýdanlar bilen baglanyşygy ($4 \leftrightarrow 7$) we ş.m.

Suwuklyklarda üznüksiz molekulýar hereket netijesinde dipol magnit meýdany nola çenli azalýar we ýokary çözüp bilijilikli ÝMR spektrleri alynýar.

Gaty jisimlerde suwuklyklardan tapawutlylykda hemme anizotrop özara täsirler saklanýarlar. Köplenç dipol-dipol özara täsir esasy bolup durýar. Şonuň üçin signallar giňleýärler we olaryň inçe gurluşy bolmaýar. Gaty jisimlerde ýokary çözüp bilijilikli ÝMR spektrlerini almak üçin dipol-dipol özara täsiri aýyrmaly. Munuň üçin esasan nusgany B_0 okuň ugruna görä $54^{\circ}44'8''$ ($54,7^{\circ}$) burça gysardyp güýçli aýlamaly. Şeýlelikde ortaça dipol özara täsir nola deň bolýar we aşa inçe gurluşy bolan ÝMR spektri alynýar.

Mysal hökmünde KA_sF_6 polikristal nusgadaky ÝMR ^{19}F spektre seredeliň (1.2- nji surat).

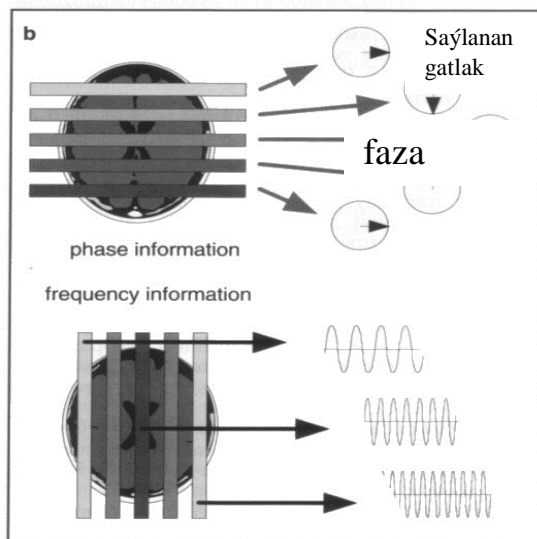
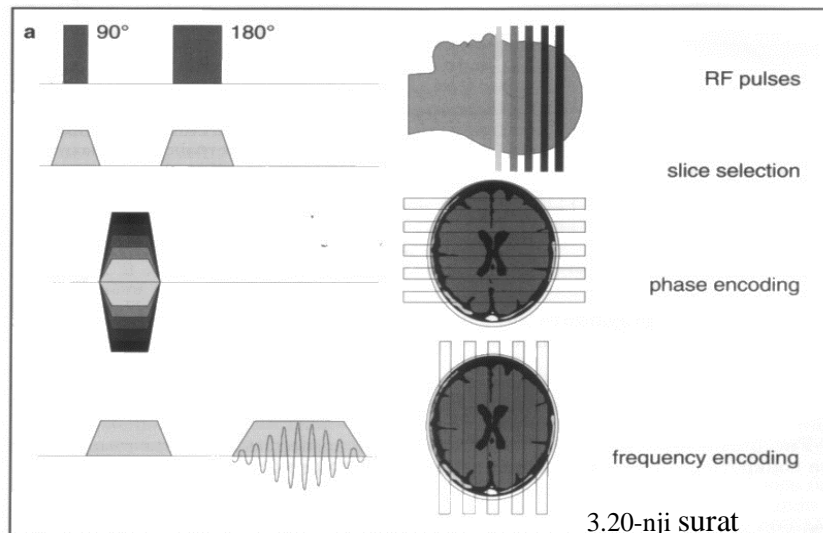


Bu ýerde a - nusganyň aýlanmasy ýok wagtyndaky ÝMR-iň adaty signaly; b – nusgany 5,5 KGs ýygyllykly “jadyly” burç ($54,7^{\circ}$) bilen aýlananda alynýan signal.

^{19}F we ^{75}As ($I=3/2$) ýadrolaryň arasyndaky göni däl baglanyşyk netijende signal dört düzüjä bölünýär ($2I+1$ düzgüne laýyklykda).

Monokristallarda ýadrolar kristalliki gýadroekde belli bir tertip boýunça ýerleşýär. Şonuň üçin monokristallarda hemme derňelýän ýadrolara birmeňzeş B_0 magnit meýdany täsir edýär.

Haçanda bir molekulaly suwuň kristallogidratyndan ÝMR signaly gözegçilik edilende bu molekulanyň protonlarynyň hemme jübüti üçin deň dipol magnit meýdany (B_{lok}) döräp biler. Iki kwant ýagdaýyň deňähtimallygy sebäpli protonlaryň ýarysy



Kesigi berýän gradiýentsiz goşmaça radioýgylykly impuls bilen tutuş nusga oýandyrylyp iki ölçegli spin-çekiji yzygiderligi üç ölçegli yzygiderlige özgertmek mümkin. Öňki

$$\text{Im} [F(\omega)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin(\omega t) dt \quad (2.6)$$

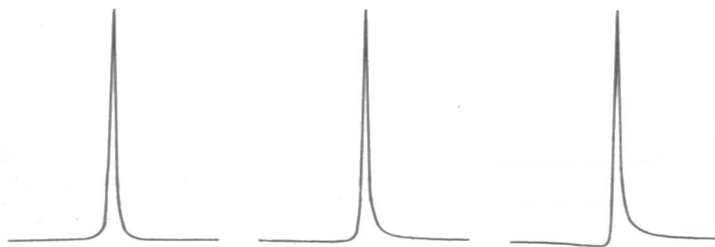
Bu bölekleriň her biri Lorens çyzygynyň dürli görnüşli spektr düşünjesini saklaýar. Eger belli bir tejribe şertleri ýerine ýetýän bolsa, onda furýe-özürtmäniň hakyky bölegi siňme signala, hyýaly bölegi bolsa ýaýratma signala laýyk gelýär (2.3-nji, surat, a we b). ÝMR-iň spektrleri siňme signaly görnüşinde ýazylýar, ýagny spektriň hakyky bölegi ulanylýar.



2. 3-nji surat

Furýe özürtmeden soň spektriň iki görnüşiniň döremegi wagtda aňladylýan ýene bir üýtgeýjiniň bardygyny görkezýär. ÝMR-iň her bir signalynyň özüniň häsiýetli amplitudasy we ýygylgy bardyr. Ýöne, olardan başga, yrgyldynyň fazasy hem bardyr. Bu faza tolkunynyň başyna degişli wagt pursadyny görkezýär. Hemme signallar noldan tapawutly birmeňzeş faza ýa-da dürli ýygylyklarda dürli fazalara eýe bolup bilerler. Bu bolsa Furýe özürtmäniň hakyky we hyýaly bölekleriniň gatnaşygynda ýüze çykýar. Wagtda aňladylyşda faza üýtgände ýygylgy spektrinde siňme signalyna ýaýratma signaly garyşýar we signalynyň görnüşü üýtgeýär (2.4-nji çyzgy).

Furýe özgertmeden soň spektriň iki görnüşiniň döremegi wagtda aňladylýan ýene bir üýtgeýjiniň bardygyny görkezýär. ÝMR-ıň her bir signalynyň özüniň häsiýetli amplitudasy we ýygylygy bardyr. Ýöne, olardan başga, yrgyldynyň fazasy hem bardyr. Bu faza tolkunynyň başyna degişli wagtda pursadyny görkezýär. Hemme signallar noldan tapawutly birmeňzeş faza ýa-da dürli ýygylyklarda dürli fazalara eýe bolup bilerler. Bu bolsa Furýe özgertmäniň hakyky we hyýaly bölekleriniň gatnaşygynda ýüze çykýar. Wagtda aňladylyşda faza üýtgände ýygylyk spektrinde siňme signalyna ýaýratma signaly garyşýar we signalynyň görnüşü üýtgeýär (2.4-nji surat).



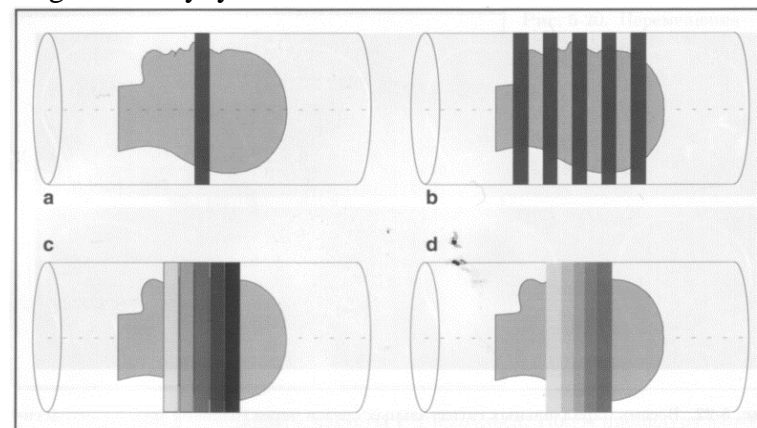
2. 4-nji surat

Impuls ýadro magnet rezonansynda signallar olardan daýanç ýygylygyny aýyrmak arkaly ýazylýar. Daýanç signaly ýadronyň rezonans ýygylygyna golaý edilip alynýar. Netijede hemme signallar ses ýygylygynyň çäğine düşýär. Soňra signal sanlaýyn görnüşe geçirilýär we ýygylyk spektrine özgerdilýär. Furýeniň özgermesiniň häsiýetleri daýanç ýygylygy saýlanyp alnanda goşmaça päsgelçilik döredýärler. Daýanç nokady spektral çägiň ortasynda ýerleşdirilýär. Şonlukda signal çyzyklaryň ýarysy daýanç ýygylygyndan (ν_0) köp, beýleki ýarysy bolsa az ýygylyga eýe bolýar. Ýöne Furýe özgertmesi üçin signalynyň diňe bir düzüjisi ulanylanda alynýan ýygylyk

ýüzleý duýulýar. Bu häsiýet ikileýin Furýe özgertmesiniň esasy artykmaçlygynyň biridir. Tejribede alnan ikileýin matrisa iki ölçegli Furýeniň özgertmesiniň algoritmi boýunça işlenilýär. Ol hem öz gezeginde tomogrammany döredýär. 3.20-nji suratda doly spin-ýaň tomografiýasynyň tejribesi görkezilen.

a) ýokarda-ol saýlanyp alnan iki jübüt 90° we 180° impulslaryndan ybaratdyr. Beýniň kese-kesiginden (z-ugur), faza kodirlemesinden (y-ugur) we ýygylyk kodirlemesinden (x-ugur) ybaratdyr.

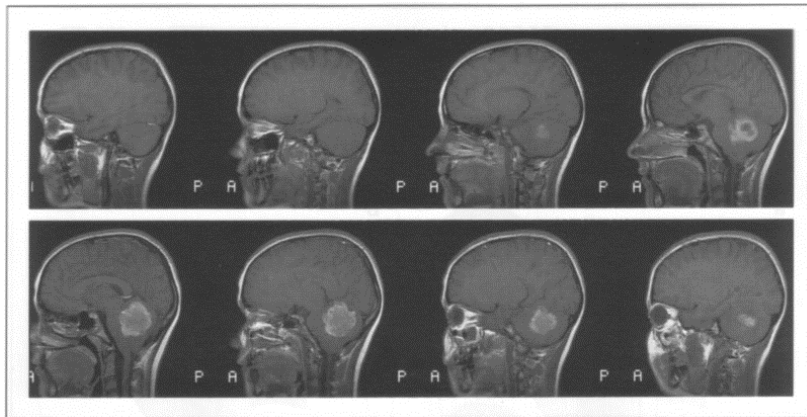
b) çepde-agzalan faza kodirleýji gradientler kese-kesigiň setirinden setirine fazasyny üýtgedýär. Her sütüne goşmaça kesgitli ýygylyklar ýygylyk kodirleýji gradientler ýazylýar. Ýygylyk we faza maglumatlary birleşdirip, tor almak mümkinçiligi döreýär. Onda her piksel ýygylyk we faza kodlarynyň bir belgisi utgaşmasyna eýedir. Şony almak üçin 256 gezek işi gaýtalaýarlar. Her gezek fazakodirleýji gradientiň bahasy üýtgedilýär. Netijede $256 \cdot 256$ ululykda tomogramma alynýar.



3.19-niv surat

suratda görkezilen usul bilen ýygylýk spektrleriniň esasynda şekil gurylýar.

Furýeniň ikileýin özgertme usuly Bu usulda faza we ýygylýk detektirlenmesi utgaşdyrylýar. Ol ÝMR- tomografiýasynyň

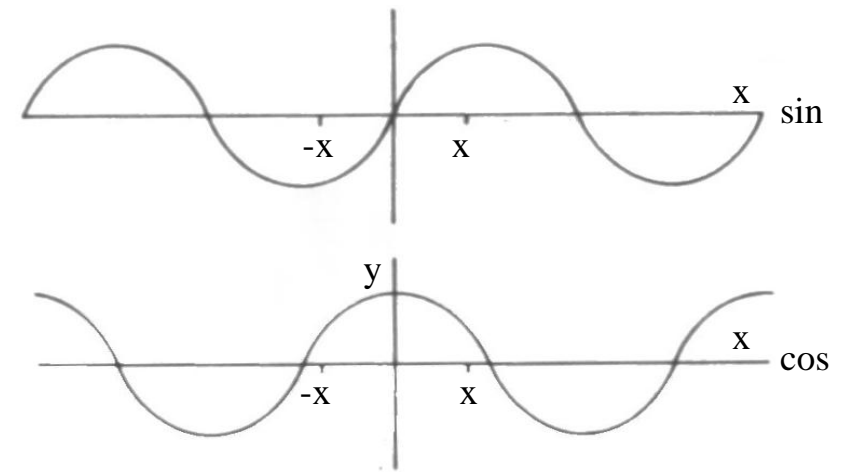


3.18-nji surat

adaty usullarynyň biri bolup durýar. Haýsy-da bir gradiýent, mysal üçin, y-gardiýent utgaşýar hem-de şu gradiýentiň ululygy boýunça spinlere fazasyny ýitirmäge mümkinçilik berilýär. Käbir wagtdan soň y-gradiýent ýazdyryýar we x-gradiýentiň bar ýagdaýynda FJD (erkin induksiýanyň peselmesi) ýa-da spin-ýaňy ýazylýar.

Şeýlelik bilen y-gradiýent faza kodirleýji bolup hyzmat edýär, x- gradiýent bolsa ýygylýk maglumaty kodirleýär. Y-gradiýentiň dowamlylygynyň ýa-da ululygynyň üýtgemegi bilen ulgam täzeden oýanýar. Y-ugurda n-pikselli almak üçin bu n gezek gaýtalanýar. Olaryň her birini oýandyrmak üçin öz fazakodirleýji gradiýenti berilýär. Her gaýtalanma üçin meýdanyň bir hilli dældiginiň täsiriniň deň bolany üçin ol şekiliň hiline täsir etmeýär. Onuň täsiri nolunjy suratda

spektrinde oňyn we tersin ýygylýklary tapawutlandyryp bolmaýar. Eger wagtda aňladylyşda ÝMR-iň seslenmesi $\nu_0 + \delta$

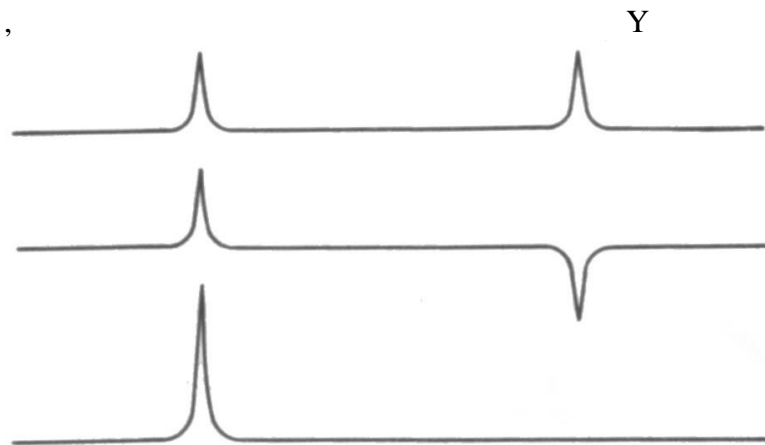


2.5-nji çyzgy

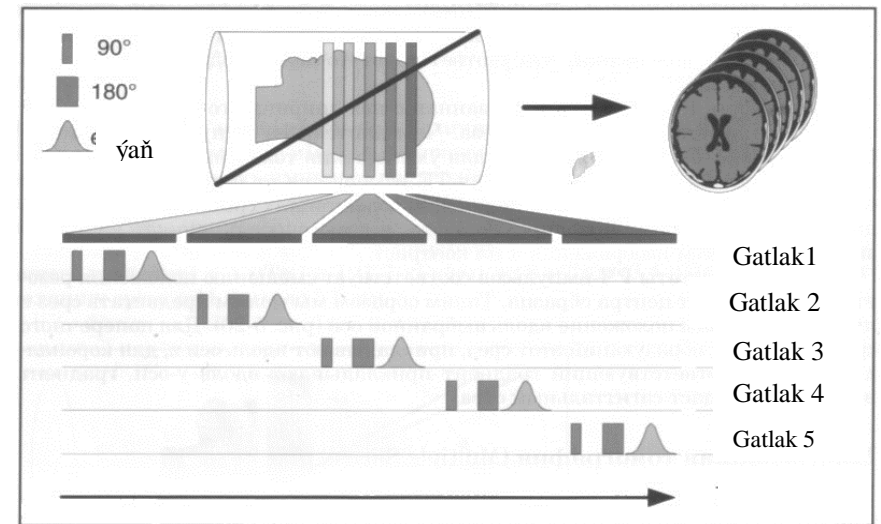
(bu ýerde δ – signaldan daýanç ýygylýgyna çenli aralyk) ýygylýkly signal saklaýan bolsa, onda ýygylýk spektrinde oňa $\pm\delta$ bolan iki signal degişli bolar. Bu ýerde oňyn we tersin ýygylýklary tapawutlandyryp bolmaýar. Olary diňe iki fazaly detektirlemegi ulanyp tapawutlandyryp bolar. Onuň üçin birmeňzeş daýanç ýygylýkly, ýöne fazasy 90° tapawutlanýan iki faza duýgur detektor ulanylýar. Ýönekeýlik üçin detektorlaryň birinjisi magnitliligiň kosinus düzüjisini, ikinji bolsa sinus düzüjisini bellemäge sazlanan bolsun. Signallaryň ikisi hem biri-birinden aýratynlykda sanlaýyn görnüşde öwrülýär we kompleks spektriň hakyky we hyýaly bölegi bolýar. Furýeniň kompleks özgertmesi ýerine ýetirilenden soň biz dogry paýlanan oňyn we tersin ýygylýklary alarys. Bu ýagdaýa hil taýdan düşünmek üçin Furýeniň özgertmesiniň

häsiyetleriniň biri bolan funksiýanyň simmetriýasynyň saklanmak häsiýetine seredeliň.

Funksiýanyň simmetriýasy diýip üýtgeýjiniň alamaty üýtgänindäki häsiýetine düşünilýär. Iki ýagdaýy tapawutlandyralyň: eger $f(-x)=f(x)$ bolsa, onda f funksiýa jübüt, eger $f(-x)=-f(x)$ bolsa onda täk diýip atlandyrylýar. Onda biz sinusa täk, kosinusa bolsa jübüt funksiýa diýip düşüňäris (2.5 –nji surat). Funksiýanyň wagt ýaýlasyndaky jübütligi we täkligi, ýagny kosinus we sinus düzüjileriniň bolmagy, ýygylyk ýaýlasynda hem saklanýar. Bu bolsa $+\delta$ we $-\delta$ ýygylyklarda sinmäniň kompleks spektriniň iki düzüjisiniň amplitudasynyň alamatlarynyň gabat gelmeginde ýa-da tapawutlanmagynda ýüze çykýar. Şeýlelikde, iki fazaly detektirlemegiň maglumatlaryny kompleks özgerdip biz ýygylyk spektrinde bir signaly güýçlendireris, ikinji signaly bolsa ýok ederis (2.6-njy çyzgy).



2.6-njy surat

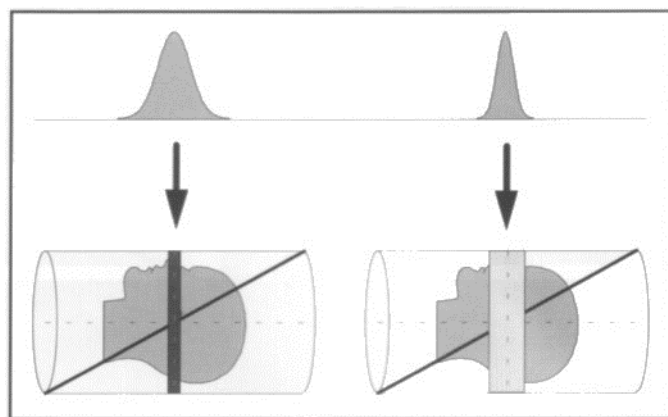


3.17-nji surat

barlananda kese tekizlikde 15-16-sany ugurdaş kesikler alynýar. (3.17-nji surat). Kesikleriň birnäçe görnüşleri 3.18-nji suratda görkezilen.

Doly tomografiki tejribe. Iki ölçegli ÝMR-jübüt düzüjisi grafiýasynda z -gradiýente saýlama radioýygylykly impulsy goşmak bilen kesik oýandyrylýar. (x,y) tekizlikde giňişleýin maglumaty almak üçin iki sany dürli: yönekey täk düzüjiler boýunça kodirleme we iki ölçegli Furýe özgertme usullary ulanylýar..

Ýygylyk boýunça kodirleme. x we y gradiýentleri utgaşdyryp, kesgitli ululykly we ugurly netijeýji gradiýent alynýar. Şeýle gradiýentiň üsti bilen (S,Y) spin-ýaňy ýazylýar. Soň gradiýenti yzky burça öwürýärler we şu hadysany ýeterlik göwrümleýin maglumat toplanýança gaýtalaýarlar. 3.18-nji jemi



3.16-njy surat

3.5. Köpgatlaklaýyn tomografiýa

Örän köp impuls yzygiderliklerde her bir kesgitli kesigiň oýanmasynyň arasynda örän dowamly saklanma (GP-gaýtalanma peridy) emele gelýär. Dokumalaryň T1 boý gysylma wagtyňyň örän uly bolany sebäpli gaýtalanýan tolgunmalaryň arasyndaky saklanma 3 sekunda ýetip biler. Şu wagty täsirli ulanmak üçin şol wagt aralygynda birnäçe parallel kesikleri oýandyryp bolýar. Muny radioýygylykly impulsyň ýygylgyny üýtgedip alyp bolýar. Ony gaýtalap kesikleriň toplumyny alyp bolýar. (3.18 we 3.17 nji suratlar). Gaýtalanma peridyň (wagtyňyň) ÝW- wagty-400 ms, ÝW-50 ms bolsa, onda mümkin bolan kesikleriň sany 8-e deňdir. (tejribede 7-ä deň, sebäbi ÝW-y her kesige bir az köpräk gerek. Eger gaýtalanma wagty örän uly bolsa, onda diňe bir näçe kesik alyp bolman, eýsem her kesige artýan ÝW-ly birnäçe şekilleri hem almak mümkin. Şeýle usula multi-ýaň-multi-kesik-zygyderlik diýip at berilýär. Adatda kelle beýnisi

2.3. Furýeniň özgertmesiniň ÝMR tomografiýasynda ulanylyşy

Ýadro magnit rezonansynyň spektrometrleri we tomograflary önde baryjy tilsimatlar hasaplanylýar. Olarda Furýeniň çalt özgertmesi ulanylýar. ÝMR signallarynyň kömegi bilen janly bedeniň, mysal üçin adam bedeniniň, şekilini almak bolýar. Munuň üçin ÝMR tomografy ulanylýar. Onda güýçli hemişelik magnit meýdany, nusganyň içinde bir nokatdan beýleki nokada çenli üýtgeýän gowşak magnit meýdany, radioberiji we kabul ediji, hem-de şekili hasaplamak üçin kuwwatly kompýuter ulanylýar. ÝMR signallarynyň radiotolkunlaryň atom ýadroleriniň magnit momentleri bilen özara täsiri netijesinde döreýändigini sebäpli ulanylýan energiýa $E=h\nu$ (ν – radiotolkunyň ýygylgy, h – Plankyň hemişeligi) örän kiçidir. Bu energiýa rentgen we radioizotop usullarynda ulanylýan energiýadan takmynan milliard esse kiçidir. Şonuň üçin özen magnit rezonans tomograflary biologik taýdan zyýansyz hasaplanýar. Ýadro magnit rezonans tomograflaryň aýdyňlygy beýleki tomograflara, mysal üçin, rentgen tomografyna, görä has ýokarydyr.

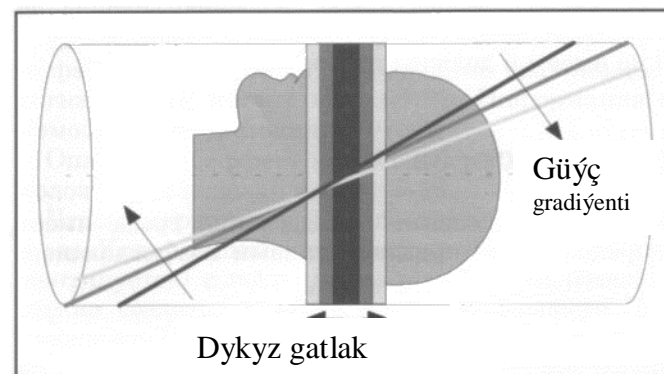
ÝMR tomografiýasy üçin dürli magnit häsiýetleri bolan wodorodyň (^1H), uglerodyň (^{13}C), ftoryň (^{19}F), natriýniň (^{23}Na), fosforyň (^{31}P) we kaliýniň (^{39}K) ýadroleri has möhümdir. Olaryň hemmesi adamyň bedeninde bardyr. Bu ýadrolaryň dürli ýygylklarda berýän rezonans signallaryny seljerip adam bedenini öwrenip bolýar.

Häzirki wagtda ÝMR tomografy rentgen we ultrases tomograflary ýaly saglygy goraýyşda esasy keseli anyklaýyş enjamy bolup hyzmat edýär.

Garaşsyzlyk ýyllarynda Türkmenistanyň Hormatly Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň öňden görüjilikli syýasaty netijesinde S.A. Nyýazow adyndaky Halkara

lukmançylyk we Bejeriş-maslahat beriş merkezleri häzirki zaman ÝMR tomograflary bilen üpjün edildi. Olar kelle we oňurga beýnini, ýüregi we gan damarlaryny derňemekde giňden ulanylýar. Türkmenistanyň raýatlarynyň münlerçesi ÝMR tomograflarynda öz saglyklaryny barlatdylar.

öýtgetmeli (3.14-nji surat) Şu maksat üçin gaus we sinc impulslary giňden ulanylýar.



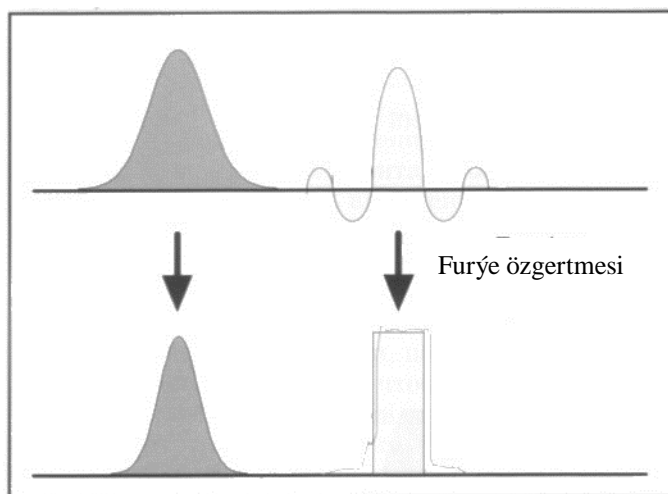
3.15-nji surat

Kesigi saýlamak - Gradiýentiň ululygyny mTl/m –de ýa-da Gs/m -birliklerde aňladyp bolýar. Impulsyň zolagynyň kesgitli ini bolany üçin gradiýentiň ululygynyň kiçeldilmesi Gs/m -i kiçeldýär, bu hem kesigiň galyňlygyny artdyrýar. (3.15-nji çyzgy). Mysal üçin, zolagynyň ini 2 kGs bolsa sine –impuls üçin kesýän gradiýenti 4 mTl/m den 8 mTl/m -ä artdyrmak kesigiň galyňlygyny $11,8 \text{ mm}$ -den $5,9 \text{ mm}$ -e çenli kiçeldýär. Impulsyň dowamlylygy uly bolsa kesigiň ini inçe bolýar. Impulsyň dowamlylygy gysga bolsa kesik galyň bolýar (3.16-njy surat).

şol bir ýgylykdaky ÝMR signalyň fazasy bilen faza kodirlenmesi deňeşdirýär. Furýeniň özgertmesiniň üsti bilen maglumat dikeldilýär. Nusganyň dürli ýagdaýlarynda dürli gradiýentleri goýmak täsiri 2.13-njy suratda görkezilen.

3.4 Kesigiň kesgitlenişi we bölünip alnyşy

Tomografiki tejribede kesigi kesgitlemegiň we bölüp almagyň uly ähmiýeti bardyr. Olar oýandyryýan impulsyň häsiýetnamalary bilen kesgitlenýär.



3.14-nji surat

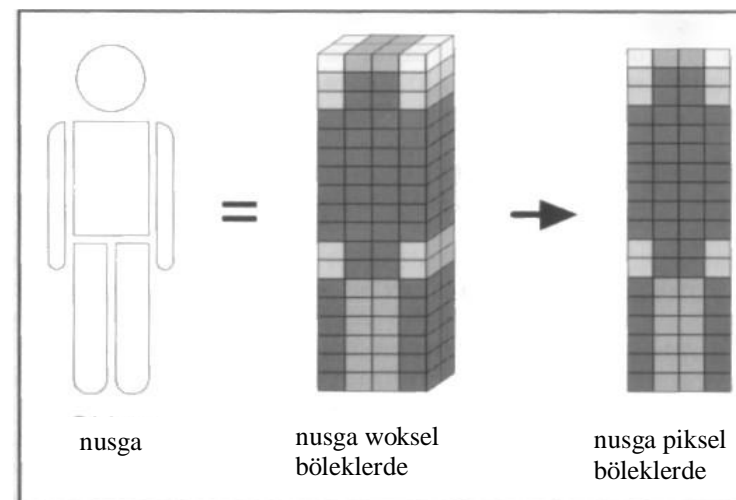
Kesigi kesgitlemek - adaty radioýgylyly impulsyň zolagynyň ininiň aýdyňlygy ýok. Şonuň üçin ol kesigi kesgitlemäge mümkinçilik bermeýär. Radioýgylykly impulsyň zolagynyň ininiň aýdyňlygyny gowulandyrmak üçin impulsa kesgitli bir görnüş bermeli, ýagny amplitudasyny wagta görä

3. ÝMR TOMOGRAFIÝASYNYŇ FIZIKI ESASLARY

3.1.Şekiliň häsiýetnamalary

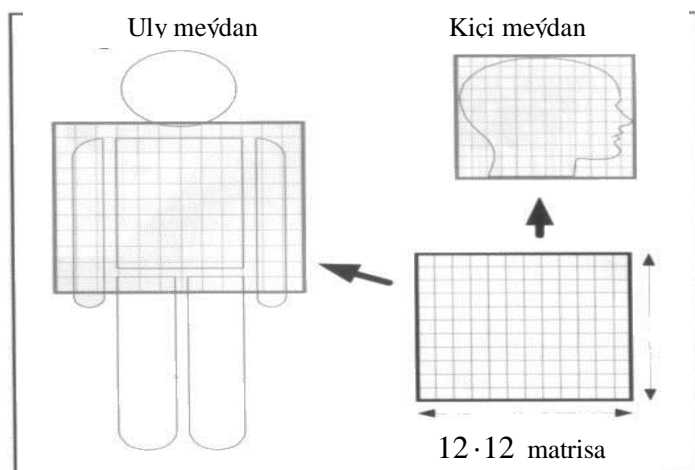
ÝMR- tomografiýasynda şekil piksel diýip atlandyrylýan (sanlaýyn şekiliň bölegi) böleklerden (elementlerden) düzülýär. Olaryň hem düzüminde woksel bölekleri durýar (3.1 –nji surat).

Wokselleriň ölçegleri öýjükleriň ölçeglerine çenli kiçi bolmagy mümkin, emma hakykatda wokselleriň ölçegleri birnäçe sebäplere görä çaklidir. Ony çaklandyryýan esasy sebäpleriň biri hem, kompýuteriň ýadynyň göwrümi



3.1-nji surat

we her wokselden alynýan signalyň ululygydyr. Şonuň üçin



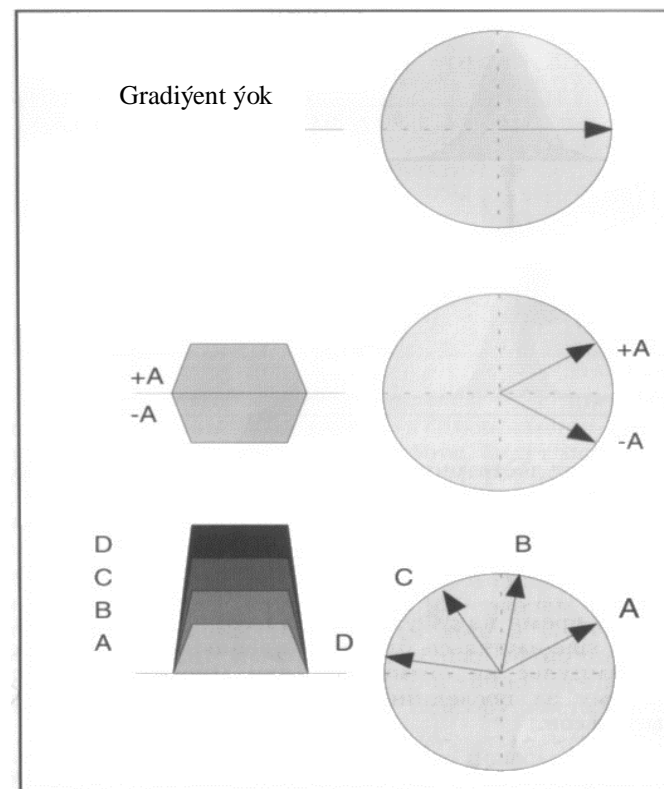
3.2- nji surat

her kesige $256 \cdot 256 \cdot 1$ vokseli döretmek bilen çäklenilýär. Şolar hem piksellere özgerdilýär. Şekiliň $256 \cdot 256$ bölegine şekiliň matrisasy diýilýär. Şu matrisa gözyetim meýdanyny (GM) emele getirýär. Eger GM $25,6$ sm ölçegli bütün kelläni gurşap alýan bolsa, onda $256 \cdot 256$ matrisanyň her pikseli 1 mm^2 –dyr. Eger GM kiçi ýagny $12,8$ sm bolsa, onda şol matrisada piksel $0,5 \text{ mm}$ –e deň bolar (3.2 –nji surat).

Pikselden ybarat bolan şekili çyzygyň nokadyndan nokadyna, gatlaklardan ýa-da bütün göwrümden toplanan hasaplamalardan gurup bolar (3.2- nji surat). Häzirki wagtda ÝMR-tomografiýasynda şekili gatlaklar boýunça ýa-da göwrümleýin gurmak usuly ulanylýar.

Näsagyň şeklini döretmek üçin ÝMR signaly näsagyň bedenindäki deňişli atom ýadroiniň ýerleşýän ýeri baradaky maglumaty saklamalydyr. ÝMR spektroskopiýasynda nusga mümkin bolan bir hilli magnit meýdanynda ýerleşdirilýär. Şonda nusganyň islendik nokadaky molekula şol bir ýygylkda signal berer. Bu signalyň çalt Furýe özürtmesinden soňky syn edilýän islendik ýygylgyň

Oýandyrylandan soňky pursatda hemme spinler kogerentdir we (ylalaşyklydyr) faza süýşmeleri ýüze çykmaýar. Emma bir az wagt geçenden soň tebigy T2 hadysa we bir hilli däl meýdan nusga täsir edip başlarlar, ýagny faza dargamasy

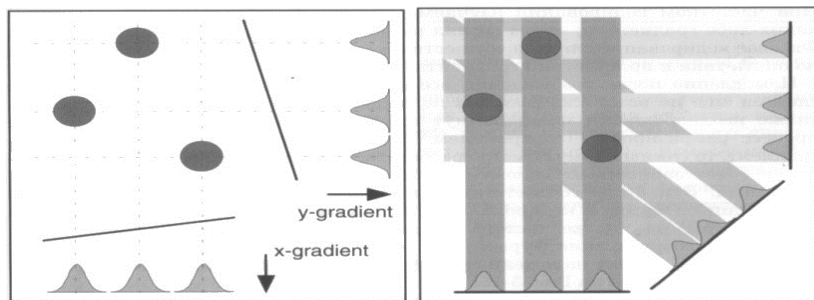


3.13-njy surat

peýda bolar. Emma tötänleýin gradiýent goşulsa spinler fazasy boýunça derrew ýaýrap başlarlar. Munuň tizligi spiniň ýagdaýyna we magnit gradiýentiň ululygyna baglydyr. Her bir spiniň fazasy giňişlik baradaky maglumaty saklarlar. Şu fazaly

3.3. Giňişleýin kodirleme

Giňişleýin kodirleme 2 topara bölünýär, ýagny, ýygylyk we faza kodirlenmesi. Ýygylyk kodirlenmesi iň ýönekeý usuldyr. Nusga birhilli magnit meýdanynda ýerleşen wagtynda magnit rezonansyň signaly giňişleýin paýlanyş barada hiç hili maglumat bermeýär. Sebäbi nusganyň hemme ýeriniň şol bir Larmor ýygylygy bar. Eger nusga gradiýent magnit meýdany goşulsa, onda MR-yň signalynda rezonilleýän spinleriň giňişleýin ýerleşiş barada maglumat saklanar. Eger magnit gradiýenti yzygiderlikde 3 ok boýunça ugrukdyrylsa, onda 3 ölçegli giňişlikde nusganyň ýerleşýän ýeri barada gözegçilik etmek bolýar. Şol öňki suwly nusgalara garalyň. Goý olar diňe x-ugur däl-de y-ugur boýunça hem süýşen bolsun. Onda gradiýent meýdanyň täsiri bilen 2 ugur boýunça hem nusgalaryň ýerleşiş barada maglumat alyp bolar. 3 ugur boýunça gradiýent goşulsa 3 ugurda nusgalaryň ýerleşiş barada maglumat alyp bolar (3.11 we 3.12-nji suratlar).



3.11-nji surat

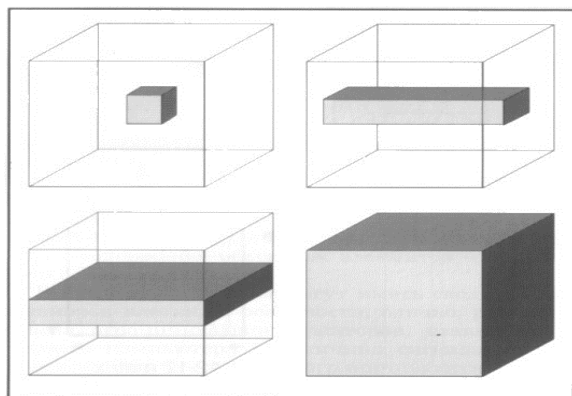
3.12-nji surat

Ýygylyk kodirlemde öwrenilýän ulgam magnit gradiýentsiz oýandyrylýar, soň magnit gradiýenti goýlup signal ýazylýar. Faza kodirleme signal ýazylmaka ýerine ýetirilýär, ýöne ýene-de gradiýent goýulansoň amala aşyrylýar.

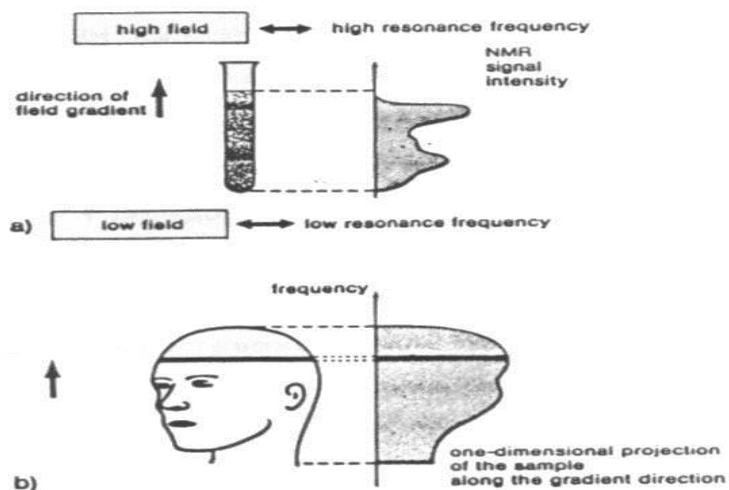
üýtgemesi nusganyň içindäki himiki üýtgeşme özgertmäni aňladýar. Olary hem analitiki spektrleri döretmek üçin ulanyp bolýar. Wizuallaşdyrma tejribelerinde (görmegi amatly bolar ýaly) himiki özgertmeler baradaky maglumat däl-de spinleriň ýerleşýän ýeri barada maglumat gerek.

Häzirki zaman tomograflarynda ýörite tegekleriň kömegi bilen nusganyň bütün göwrümi boýunça bir-birine perpendikulýar ugurlara täsir edýän gradiýent magnit meýdanlary döredilýär. 3.2-njy suratda ýekeölçegli nusga şonuň ýaly magnit meýdanynda ýerleşen. Nusga protonlardan (wodorodyň atomlarynyň ýadroinden) ybaratdyr. Magnit meýdanynyň täsiri bilen nusganyň bir ýerinde beýlekilere görä (meselem probirkanyň düýbünde) pes ω ýygylykda rezonans berýär. Eger ÝMR-signalyň intensiwliginiň ýygylyga baglylyk funksiýasy registrirlense, onda nusganyň boýy boýunça protonlaryň dykzlygynyň gapdal görnüşi görner. Şeýle tejribe 1951-nji ýylda R. Gabiýar tarapyndan geçirilen. Real üç ölçegli nusgada magnit gradiýente dik ugurlarda spektral-çözülmän galýar we netijede ýene-de ýekeölçegli şekiller alynýar.

Öň bellänip geçilişi ýaly Larmor ýygylygy magnit meýdanynyň güýjenmesine baglydyr. Eger nusganyň keseligine magnit meýdanynyň güýjenmesini çyzykly üýtgedip, signalyň ýygylygyna täsir edilse, onda giňişlik degişli ýygylyk koordinatasyna çyzykly bagly bolar. Muňa üstüne gradiýent magnit meýdanyny goýma usuly diýilýär. Häzirki wagtda hemme ÝMR ulgamlarynda şeýle gradiýent magnit meýdanlar giňişleýin kodirlemek üçin ulanylýar.



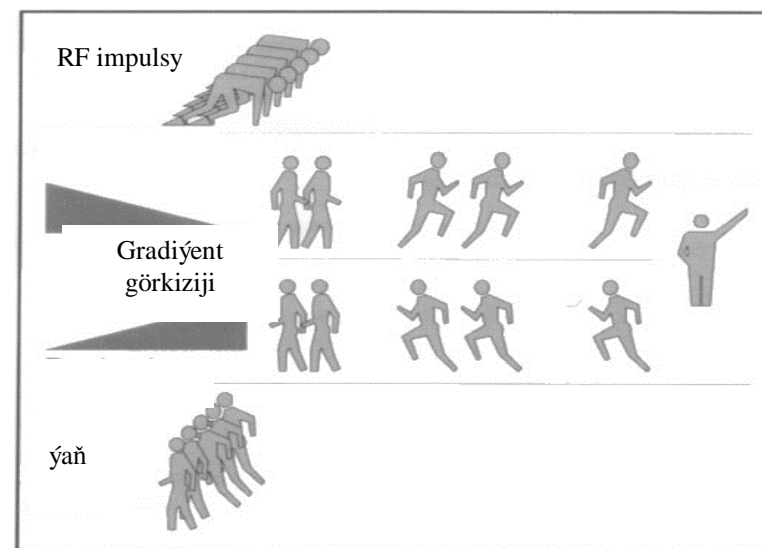
3.3-nji surat



3.4-nji surat

- b) Bu spinler fazasy boýunça ýaýrap başlaýar. Meýdanyň goşulmagy bilen bu hadysa tizlenýär.
- c) Gardiýentiň polýarlygyny üýtgedenlerinde spinler ters ugra öwrülýärler.
- d) Ýañ gradiýenti emele gelýär.

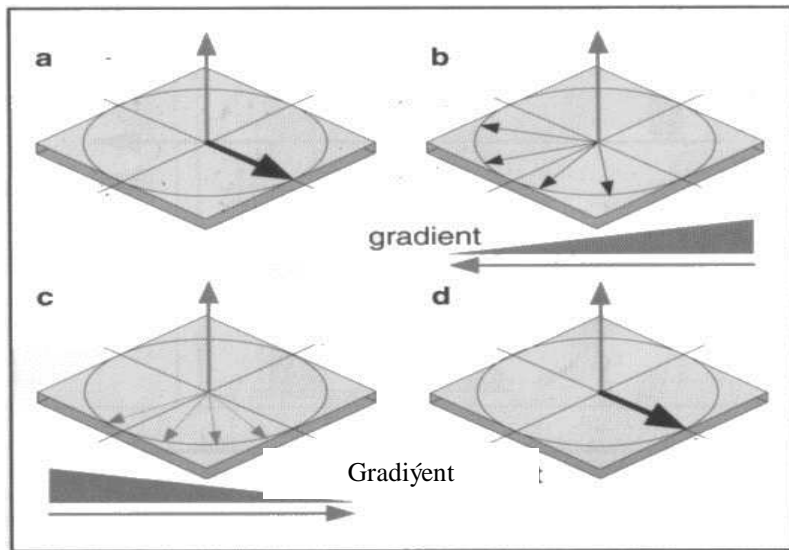
3.10-njy çyzgyda gradiýent ýaňňy emele gelmegi ylgawçylar bilen deňeşdirilýär. RY-impulsyň berlen pursatynda hemme ylgawçylar bir çzykda durlar. Ylgap başlanlarynda olar bütin ýol boýunça dargaýar. Bu dargamany gradiýent meýdan tizlendirýär. Gradiýentiň polýarlygyny üýtgedilse, “yzyňyza öwrüliň” diýen ýaly hemmesi yzyna öwrülýärler. Hemme ylgawçylar şol bir ýol bilen gaýdyp gelýärler we öňki



3.10-nji surat

suratda ýygnanýarlar.

zygiderliginde gradiýent ýaň zygiderlikleri ulanylýar. T_2 wagtyň pese düşmesiniň we meýdanyň ýerli bir hilli dälliginiň ylaşykly täsiri bilen radioýgylykly impulsdan soň signal pese düşýär. Bu utgaşdyrylan täsir T_2^* wagt bilen häsiýetlendirilýär. Gradiýentiň polýarlygyny üýtgedip, presessiýanyň indusirlenen ugruny üýtgetmek bolýar. Spinleriň çugdamlanmasy dikelýär we (ÝW)-ýaň-wagtdan soň gradiýent ýaň signaly emele gelýär. Şeýle ýaňy almak üçin dürli polýarly impuls gradiýentleriň meýdanlary deňleşdirmelidir.

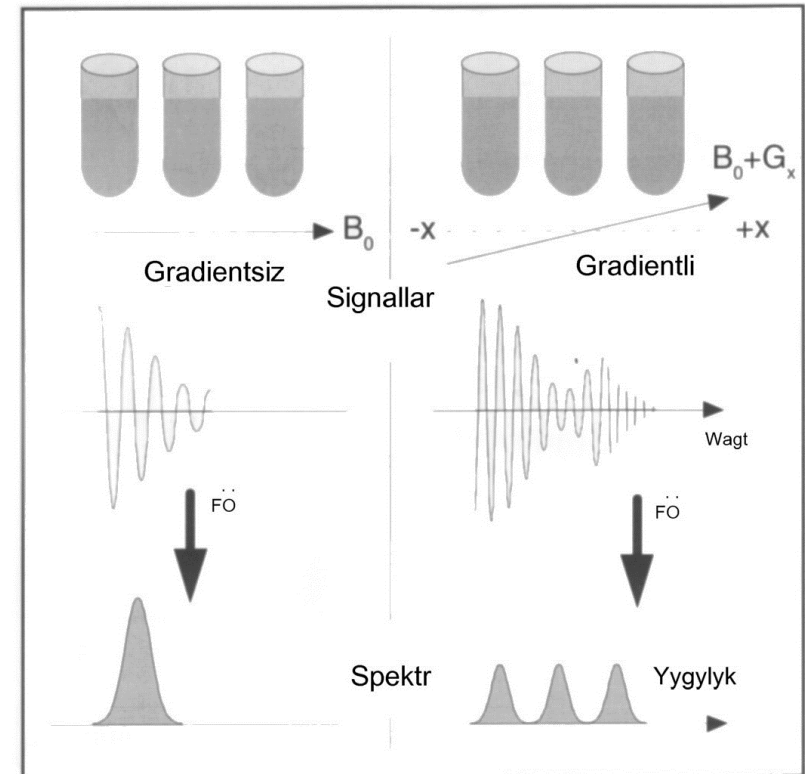


3.9-njy surat

3.9-njy çyzygyda bir hilli magnit meýdanyň ýok wagtynda gradiýent ýaň signalynyň emele gelşi görkeyilen.

- a) Radioýgylykly impulsdan soň kese magnitlenme uly, sebäbi spinler deň fazada.

3.5-nji çyzygyda x-ugur boýunça dürli ýagdaýda ýerleşen suwly kiçi nusgalar görkezilen. Magnit meýdany ýok wagtynda

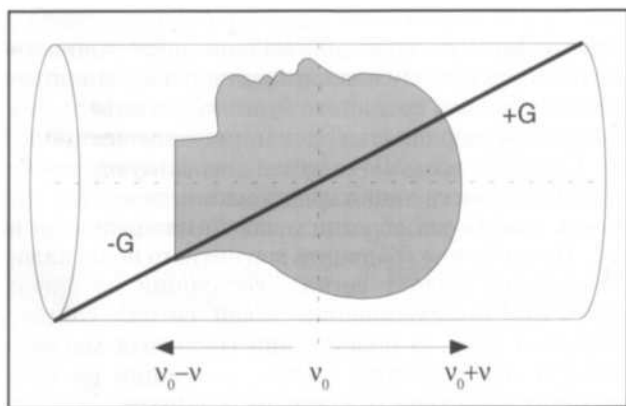


3.5-nji surat

radioýgylykly impuls ýeke-täk ýygylykdan ybarat bolan signal berýär. Furýe özgertmeden soň bu signal ýeke signaldan düzülen spektr berýär. Magnit gradiýenti döredip, ölçeg geçirilse dürli ýagdaýlara degişli 3 sany dürli ýygylyklarda seslenme alynar. Bu signalyň Furýe özgertmesi 3 signaldan ybarat spektr berýär. Bu signallaryň ýygylyklarynyň

tapawudy nusgalaryň arasyndaky uzaklyga we gradiýent meýdanyň ululygyna baglydyr. Magnitiň merkezinde rezonans ýygylýk V_0 üýtgemeyär, sebäbi ol ýerde magnit gradiýenti täsir etmeýär. Merkeziň 2 tarapynda magnit gradiýentiniň polýarlygyna baglylykda rezonans ýygylýk uly ($\nu_0 + \nu$) ýa-da ($\nu_0 - \nu$) kiçi bolar(3.6 -nji surat).

3.7-nji suratda impuls yzygiderlikleriniň kömegi bilen magnit



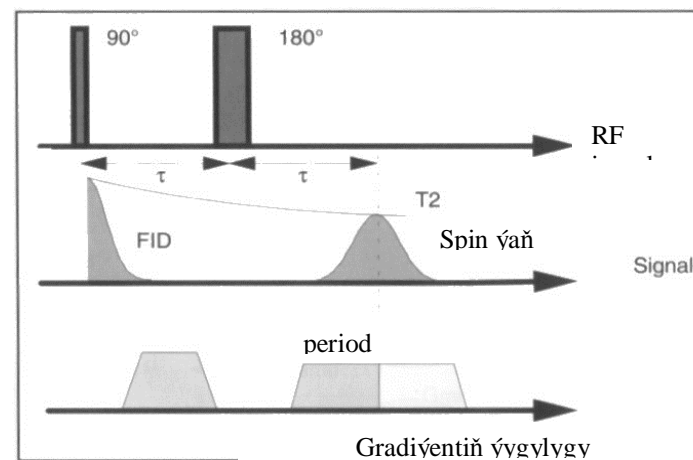
3.6-njy surat

meýdanynyň gradiýentiniň şekillendirilişi görkezilen

3.2. Spin -ýaň tomografiýa usuly

90° impulsdan τ wagat geçenden soň 180° impulsy goşmak bilen spin--ýaň emele gelýär. 90° impulsyň yzy bilen bir hilli däl magnit meýdanynyň döredýän rezonans ýygylýgynyň üýtgemesi netijesinde magnitlenme wektorlary dargaýar. 180° impulsyň goşulmagy faza süýşmäni tersine

üýtgedip, 2τ wagtdan soň ýaň signaly döreýär(2.14-nji çyzgy). 90° impulsyň merkezi bilen ýaň signalyň merkeziniň arasyndaky 2τ deň bolan wagat aralyga (ÝW) ýaň wagty diýilýär. T2 spin-spin relaksasiýa pese düşme wagty ýaň signalyň intensiwligini peseldýär. Täzeden doly çygdanlanma spin-ýaňyň merkezinde ýerine ýetirilýär. Şu merkezden daşlaşdygyňça aralyk artdygyça bir-hilli däl meýdanyň täsiri artýar. Şeýle hem, spin- ýaň yzygiderligi ýaň signalyň merkezinde himiki süýşmeleriň täsiriniň çygdanmasyny täzeden dikeldýär. Şonuň üçin şol pursatda suwuň we ýagyň



3.8-nji surat

signallary bir fazada bolar.

1.3. Ýaň gradiýentiniň signaly boýunça tomografiýa

Ýaňy döretmek üçin 180° impulsyň bolmagy hökman däl. Soňky wagtlarda ÝMR tomografiýasynyň çalt

3. ÝMR tomografiýasynyň fiziki esaslary.....	104
3.1. Şekiliň häsiýetnamalary.....	104
3.2. Spin -ýaň tomografiýa usuly.....	109
3.3. Ýan gradiýentiniň signaly boýunça tomografiýa	110
3.4. Giňişleýin kodirleme.....	113
3.5. Kesigiň kesgitlenişi we bölünip alnyşy.....	115
3.6. Köpgatlaklaýyn tomografiýa.....	117
4. Kwant radioelektronikasynyň fiziki esaslary.....	122
4.1. Kwant radioelektronikasynyň esasy düşüňjeleri.....	122
4.2. Kwant magnitometriýasy.....	129
Peýdalanylan edebiýat.....	133

z-gradiýentiň kodirlenýän giňişleýin maglumaty almak üçin 2-nji faza kodirleýji gradiýent ulanmaly.

Saýlanyp alnan göwrümde doly giňişleýin kodirlemäni döretmek üçin birinji faza kodirleýji gradiýentiň her ädimi bilen ýapylan ululyklarynyň üsti ikinji gradiýent bilen ädimme-ädim ýapylmaly. Üç ölçegli tomografiýanyň esasy kemçiligi örän uly skanirleme wagtyň bolmagydyr. Artykmaçlygy bolsa, kesigi örän ýuka we dürli ugurda ugrukdyryp bolýanlygydyr. Üç ölçegli we iki ölçegli tomografiýalaryň arasyndaky sazlaşyk aşakdakydan ybaratdyr. Ýagny, ýogyn kesik oýandyrylyp, soň ol üçölçegli yzygiderlikleri ulanyp kesikler subkodirlenýär. Bu bolsa takyk üç ölçegli derňewiň zolagyny almaga mümkinçilik berýär.

1. KWANT RADIOELEKTRONIKASYNYŇ FIZIKI ESASLARY

1.1. Kwant radioelektronikasynyň düşüňjeleri

$E_1 < E_2$ enerfiýa iki hala eýe bolan bölejige seredeliň. Bir haldan ikinji hala geçiş $\nu = (E_2 - E_1)/h$ ýygyllykly elektromagnit energiýasynyň şöhlelenmesi we siňdirilmegi bilen bolup geçýär. Eger bölejik ýokary energiýa halyna bolsa, onda onuň energiýasynyň kwantyny göýberip aşaky hala öz-özünden geçmeginiň käbir ähtimallygy bolýar. dt wagt çäginde öz-özünden geçişi amala aşyrýar bölejikleriň dn_2 mukdary üçin aňlatmany ýazalyň:

$$dn_2 = -A_{21}n_2dt.$$

Bu ýerde A_{21} - wagt birliginde öz-özünden geçişiň ähtimallygy, n_2 - E_2 derejedäki bölejikleriň sany. Bölejigiň E_2 haldan E_1 hala geçişi amala aşyrmagyň ikinji ýoly mejbury şöhlelenmegir, ýagny daşky täsiriň astyndaky geçişdir. Bu geçişiň häsiýetli

aýratynlygy şöhlelenmäniň daşky şöhlelenme bilen ylalaşykly bolup geçmegidir. Aşaky halda ýerleşen bölejikler ýokarky hala geçişi diňe daşky elektromagnit meýdanynyň energiýasynyň siňdirilmegi bilen bolup geçýär. Ikinji we üçünji prosesler mejbury şöhlelenme we siňdirmе diýip atlandyrylýar we olaryň intensiwligi duşýaň şöhlelenmäniň spektral dykzlygyna ρ_v göni baglydyr. Bu ýagdaýlar üçin ýazyp bileris:

$$dn_2 = -B_{21} \rho_v n_2 dt, \quad dn_1 = -B_{12} \rho_v n_1 dt.$$

Bu ýerde $B_{21}\rho_v$ we $B_{12}\rho_v$ - wagт birliginde mejbury geçişleriň ähtimallyklary. A_{21} , B_{21} we B_{12} ähtimallyklara Eýnşteýnyň koeffisiýentleri diýilýär.

Mejbury geçişlerde siňdirilýän kuwwat $P_1 = B_{21}\rho_v n_1 h\nu$, şöhlelenýän kuwwat bolsa $P_2 = B_{12}\rho_v n_2 h\nu$. Onda jemleýji kuwwat şeýle aňladylýar:

$$P = P_2 - P_1 = (n_2 - n_1) B_{21} \rho_v h\nu. \quad (1)$$

Bu formuladan görnüşі ýaly, bölejikleriň şöhlelenmesiniň hasabyna elektromagnit meýdanynyň kuwwatyny artdyrmak üçin $n_2 > n_1$ şertiň ýerine ýermegi hökmandyr, ýagny ýokarky derejedäki bölejikleriň sany aşakydan köp bolmalydyr. Bu ýagdaýda $n_2 - n_1 = N_e$ tapawuda işjeň bölejikleriň sany diýilýär. Energiýa derejeleriň şeýle ýagdaýyny almak üçin termodinamiki deňagramlykdan görnetin gyşarmaly bolýar. Onuň üçin E_i derejedäki bölejikleriň sany n_i^0 şeýle aňladylýar:

$$n_i^0 = A e^{-E_i/(kT)}, \quad \frac{n_2^0}{n_1^0} = e^{-(E_2 - E_1)/(kT)}. \quad (2)$$

Bu ýerde A - käbir hemişelik. (2)-nji formula laýyklykda termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda uly energiýa

1.11. Rezonans şertleriniň üstünden geçmek.....	48
1.12. Impuls we furýe-spektroskopiýasy.....	51
1.13. Ýadro magnit relaksasiýasynyň geçişleri.....	57
1.14. Magnit goragy we himiki süýşme.....	61
1.15. Spin-spin özara täsir.....	63
1.16. Radiospektroskopiki usullary ulanmagyň amaly ähmiýeti.....	66
1.17. Elektron paramagnit rezonansy.....	68
1.18. Ýadro kwadrupol rezonansy.....	76
1.19. Ikileýin rezonans.....	82
1.20. Gaty jisimlerde ýadro spinleriniň esasy özara täsirleri.....	85
1.21. Paramagnit molekulalardaky ýadro magnit rezonansy.....	90
2. Ýadro magnit rezonans usulynda furýeniň özgertmesiniň ulanmak.....	94
2.1. Furýeniň özgertmes.....	94
2.2. Furýeriň özgertmesiniň ÝMR spektr derňewinde ulanylyşy.....	95
2.3. Furýeniň özgertmesiniň ÝMR tomografiýasynda ulanylyşy.....	102

M A Z M U N Y

Giriş.....	7
1. Kwant radiofizikasynyň usullary.....	14
1.1. Ýadro we elektron magnit momentleri hakynda esasy maglumat.....	14
1.2. Ýadronyň magnit momenti bilen magnit meýdanynyň özara täsiri.....	16
1.3. Magnit rezonansynyň şertler.....	20
1.4. Göni magnit dipol-dipol özara täsir.....	24
1.5. Ýadro spinleriniň gýadroek bilen özara täsiri.....	28
1.6. Ýadro magnitlilik. Blohyň deňlemesi.....	30
1.7. Ýuwdulma we dispersiýa signallarynyň esasy parametrleri. Doýgunlaşmak hadysasy.....	33
1.8. Magnit rezonansynyň signalynyň görnüşi. Signalyň giňligi.....	37
1.9. Atom desselerindäki we kondensirlenen gurşawyndaky ýadro magnit rezonansy.....	40
1.10. ÝMR hadysasyny gözegçilik etmek üçin spin detektorlary. Datçikler.....	43

halyndaky bölejikleriň sany elmydama azdyr. Termodinamiki deňagramlylyk ýok ýagdaýynda energiýa derejeleri boýunça bölejikleriň paýlanyşy erkin bolýar. Ýöne bu erkin paýlanyş täsir ediji temperaturalary (2)-nji formula bilen beýan edilip bilner:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2 - E_1)/(kT_{te})}$$

Bizi $n_2 > n_1$ ýagdaý gyzyklandyrýar. Onuň üçin $T_{te} < 0$ bolýar. Bu ýagdaýa “otrisatel temperatura” ýagdaýy diýilýär

(1)-nji formuladan görnüşi ýaly, bölejikler toplumynyň şöhlelenmesiniň kuwwaty işjeň bölejikleriň sanyna ($n_2 - n_1$) göni baglydyr. Şöhlelenýän kuwwat geçişin ýygylgyna (ν) hem göni baglydyr. Şonuň üçin mejbury şöhlelenmäniň kömegi bilen elektromagnit yrgyldylary güýçlendirmekligi ýokary ýygylklarda almak amatlydyr. Ýöne radioteknikada millimetr ýa-da submillimetr diapazona geçilende eksperimental kynçylyklar artýar.

(1)-nji aňlatma iki mümkin bolan halyň energiýalary takyk kesgitlenen diýip hasap edilip ýazyldy. Ýöne, hakykatda mydama takyk kesgitlenmedik eneriýa derejeleri bolýar. Olar elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelenmesiniň bir ýygylkda däl-de, käbir $\Delta\nu$ aralykda bolup geçmegine getirýär. Bu effekti beýan etmek üçin spektral çyzygyň görnüşiniň funksiýasy $g(\nu)$ girizilýär. Aýdylanlary hasaba alyp (1)-nji formulany şeýle görnüşde ýazyp bileris:

$$P = (n_2 - n_1) B_{21} \rho_\nu h\nu g(\nu). \quad (3)$$

Bu formuladaky P we ρ_ν ululyklar öz aralarynda çyzykly baglanyşyklydyr. ρ_ν ululygyň düşýän şöhlelenmäniň kuwwatyna goni baglydygy sebäpli (3)-nji formula

elektromagnit yrgyldylaryň kwant güýçlendirme prosesini beýan edýan deňleme bolup durýar. Eýnşteýniň koeffisiýenti B_{21} güçlendirmäniň ululygyny kesgitleýär.

Kwant ulgamynyň şöhlelenmesi haýsy hem bolsa bir daşky signaly güýçlendirmek üçin ulanylýar diýip hasap edildi. Ýone, bölejikleriň şöhlelenme kuwwaty (3)-nji formula laýyklykda radio kabulediş gurluşdaky ýitginiň kuwwatyndan köp bolsa, onda bu ýagdaýda ulgam elektromagnit tolkunlarynyň kwant generatory bolar.

Molekulýar ulgamyň şöhlelenmesini beýan edýän (3)-nji for,uladaky $g(\nu)$ köpeldiji şöhlelenmaniň ýygylak boýunça paýlanyşygy, ýagny spectral çyzygyň görnüşini hasiýetlendirýär. Adatça spectral çyzygyň görnüşiniň funksiýasyny şu baglanyşyk bilen kadalaşdyrylýar:

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu = 1 \quad (4)$$

Bu paýlanyşy mukdar taýdan bahalandyrmak üçin spektral çyzygyň ini $\Delta\nu_e$ diýen düşünje girizilýär. Ol $g(\nu)$ funksiýasynyň maksimal bahasynyň iki esse kiçelen ýetindaki nokatlaryň arasyndaky ýygylak interbaly ýaly kesgitlenýär.

$\Delta E = h\Delta\nu_e$ formulany göz önünde tutup we kesgitsizlikler baglanyşygyny hasaba alyp ýazyp bileris:

$$\Delta\nu_e \approx \frac{1}{2\pi\tau}. \quad (5)$$

Bu ýerden görnüşi ýaly, energiýa derejesindäki bölejikleriň ýaşaýuş wagty τ näçe kiçi bolsa, bu derejeleri baglaşdyýan spektral geçişleriň ini şonçada uludyr. (5)-nji baglanyşyk boýunça spektral çyzyklaryň inini bahalandyrmak derejeleriň derejeleriň geçişini amala aşyryýan islendik proses üçin dogrydyr.

Spektral çyzyklaryň giňelmegine getirýän käbir sebäplere seredeliň.

6. Воронов В.К., Сагдеев Р.З. Основы магнитного резонанса.- Новосибирск: Наука, 1996.
7. Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса.- М.,1981.
8. Хеберлен У., Меринг ЯМР высокого разрешения в твердых телах.-М.,1980.
9. Альтшулер С.А., Козырев Б.М. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп.-М.,1972.
- 10.Гречишкин В.С. Ядерный квадрупольный резонанс.- М.,1972.
- 11.Лундин А.Г., Федин Э.И. ЯМР – спектроскопия.- Наука. Гл.ред.физ-мат. лит.,1986.
- 12.Туманов В.С. Введение в теорию спектров ЯМР.-М.: МГУ, 1988.
- 13.Сергеев Н.М. Спектроскопия ЯМР.-М.,Изд-во Моск.ун-та,1981.
- 14.Гюнтер Х. Введение в спектроскопию ЯМР. – М.: Мир, 1984.
- 15.Эрнест Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и двух измерениях: пер с англ.-М.,Мир 1990.
- 16.Вилков Л.В., Пентин Ю.А. Физические методы исследования в химии. Резонансные и электрооптические методы.-М.: Высш.Шк.,1989.
- 17.Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований:- М.: Мир, 1992.
- 18.Магнитный резонанс в медицине. Основной учебник Европейского Форума по магнитному резонансу (изд. Третье, переработанное). Под.ред.П.Р.Ринка. Перевод с англ. Э.И.Федина, под ред. У.Айххова и В.Е.Синицина.Спонсор русского перевода и издания: Брукер Медицинтехник ГмбХ, 1997.

takmynan perpendikulýar ugrukdyrylýar (4.3-nji *a* surat). Şunlukda ***M*** ýadro magnitliliginiň jemleýji wektorynyň ***B*₀** meýdanyň daşynda erkin presessesiýasy bolup geçýär (4.3-nji *b* surat) we kabul ediji tegekde erkin ýadro induksiýasynyň (EÝI) signaly döreýär. Signalyň başlangyç amplitudasy ***B*^{*}** güýçli magnit meýdanyna proporsional, *v*₀ ýygylýk bolsa ölçeliniň ***B*₀** gowşak meýdan bilen kesgitlenýär.

$$v_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$$

formuladaky γ koeffisiýentiň ululygy daşky şertlere bagly bolmadyk düýpli fiziki hemişelikdir. Şonuň üçin EÝI usuly magnit ölçegleriniň ýokary takyklygyny üpjün edýär.

PEÝDALANYLAN EDEBIÝAT

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
3. Чирик В.И. Квантовая радиофизика.-Л.: Изд-во Ленингр.ун-та, 2004.
4. Физические основы квантовой радиофизики: учеб. пособие (Бородин П.Н., Фролов В.В., Чирик В.И., Мельников А.В.) под ред. П.М.Бородина, Л.Н.Лабзовского.-Л.: Изд-во Ленингр.ун-та, 1985.
5. Ядерный магнитный резонанс: учеб. пособие (Бородин П.Н., Володичева В.И., Москалев В.В., Морозов А.А. и др.), под ред. П.М.Бородина.-Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982.

Spektral çyzyklaryň tebygy ini. Her bir spektral çyzygyň tebygy ini baradadyr. Ol goýberilýän şöhlemenäniň fotony goýberilen bölejige reaksiýa güji bilen düşündirilýän. Kwant ulgamynyň kesgitli oýandyrylan halda pes energiýa hallara öz-özinden geçmeginiň mümkinçiligi oýandyrylan hallaryň takyk durnukly daldigini aňladýar. Eger has pes hala geçiş ahtimallygy az bolsa, onda şeýle haly kwazidunukly diýip atlandyrylýar. Bu haly şu dargama kanuny bilen häsiýetlendirilýär.

$$\exp(-A_{21}t). \quad (6)$$

Bu ýerde $A_{21} = B_{21} 8\pi h \nu^3 / c^3$ ýokarky E_2 haldan aşaky E_1 hala öz-özinden geçmegine ahtimallygy, $\tau = 1/A_{21}$ oýandyrylan (ýokarky) haldaky bölejigiň orta ýaşayyş wagty. (4)-nji kadalaşdyryjy $g(\nu)$ funksiýany hasaba alyp intensiwligiň paýlanyşyny şeýle ýazyp bileris:

$$g(\nu) = \frac{A_{21}}{(w - w_{12})^2 + A_{21}^2 / 4} \quad (7)$$

Şeýle ýygylýk paýlanyşy spektral çyzygyň lones formasy (görnüşü) diýilýär. Onun ini şeýle kesgitlenýär:

$$\Delta \nu_l = \frac{A_{21}}{2\pi} \quad (8)$$

Spektral çyzyklaryň tebygy ini ýygylýga güçli baglanşykdyr ($A_{21} \approx \nu^3$). radiodiapazon üçin spektral çyzygyň tebygy ini giňelmegiň giňelmegiň beýleki mehanizimleri bilen doly basyrlandy. Mysal üçin, sanmtimetr diapazonynda elektrik dipollary üçin $\Delta \nu_l \approx 10^{-8}$ Gs we $\Delta \nu_l \approx 10^{-13}$ Gs magnit depollary üçin.

Elektromagnit meýdanlary bilen özara tasirleşende spektral çyzyklarynyň giňelmesi. Ekejtromagnit meýdanlary energiýa derejeleriň arasynda geçiş döredýär. Şonuň üçin bu prose ol ýa-da beýleki energiýa halynda bölekleriň orta

ýaşaýyş wagtyň kiçelmegine getirýär. Daşky şöhlelenmanyň bolan ýagdaýy üçin $g(\nu)$ baglanyşyk şeýle aňladylýär:

$$g(\nu) = \frac{\sqrt{1/(4\tau^2) + (\mu A_1 / \hbar)^2}}{((w - w_{12})/2)^2 + 1/(4\tau^2) + (\mu A_1 / \hbar)^2} \cdot \quad (9)$$

Bu ýerden şöhlelenme meýdany täsir edende spektral çyzygyň ini şeýle kesgitlernýär:

$$\Delta \nu_l = \frac{\sqrt{1/(4\tau^2) + (\mu A_1 / \hbar)^2}}{2\pi} \cdot \quad (10)$$

Täsir edýan meýdanyň amplitudasy A_1 ulalanda spektral çyzygyň ini islendik uly bolup biler. Şol bir wagtda öz aralarynda geçişler bolýan hallardaky bölekleriň sany deňleşýär ($n_1 = n_2$). Şeýle prosese spektral çyzyklaryň doýmaklygy diýilýär.

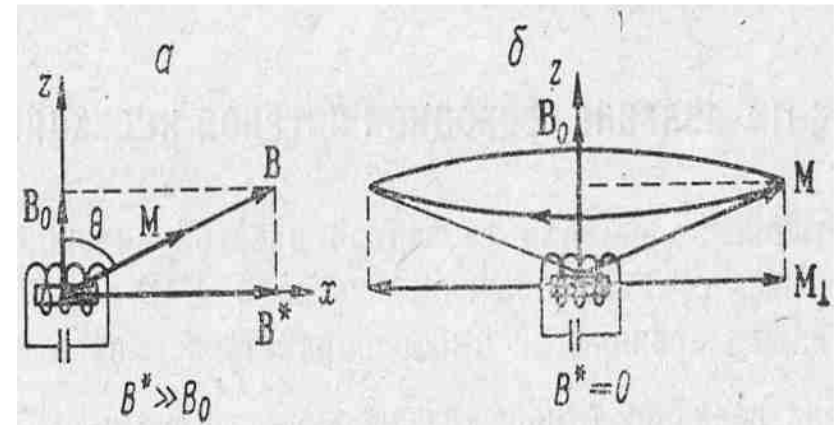
Spektral çyzylary dar dodakly filtr hökminde ulanmak bolýar. $2B_1$ amplitudaly ütkeýan magnit meýdanynyň nusga täsir edende magnit rezonansynyň spektral çyzyklarynyň görnüşini şeýle aňlatmak bolýar:

$$K(\Delta w) = \frac{A\sqrt{1 + \Delta w^2 T_2^2}}{1 + \Delta w^2 T_2^2 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2} \cdot \quad (11)$$

Bu ýerde $\Delta w = w_0 - w$ (w_0 - rezonans ýygylygy), A – hemişelik koeffisiýent. Kiçi giriş signallarda ($\gamma^2 B_1^2 T_1 T_2 \ll 1$) bu egriniň görnüşi T_2 hemişelik wagtyly ýekeleşýän yrgyldy konturyň amplituda-ýygylyk häsiýetnemasyna meňzeşdir. Bu ýerden ÝMR-e we ERR-e esaslanan kwant dar zolokly ulgamlary dürli fiziki enjamlarda ulanmagyň mümkinçiligi geip çykýar. Spin filtrleýji ulgamlary ulanmagyň birnäçe artykmaçlylary bardyr. Mysal üçin, olar ýokary duýgurlykly şygalyk seçijilikli çäklendirijileri gurmaga mümkinçilik berýär.

Spin çäklendirijiniň duýgurlygy birhilli magnit meýdanynda ÝMR-iň spektral çyzygynyň ini bilen

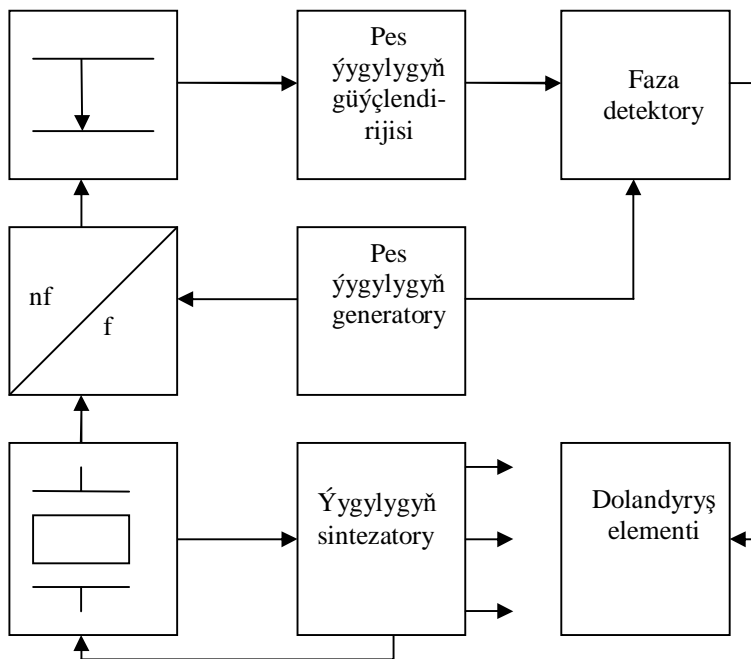
kiçirmelidigini görkezmek bolýar, ýagny signal gözegçilik edilmeýän bolýar. Bu problemany çözmek üçin Pakkarzyň we Warianyň erkin ýadro induksiýasy usuly ulanulýar. Onda nusga yrgyldy konturyň düzgün bölegi bolan, rezonans ýygylyga sazlanan kabul ediji tegekde ýerleşdirilýär. Has güýçli B^* ugry ýeňil magnit meýdanynyň ugruna takmynan perpendikulýar bolmaly



4.3-nji surat

4.3-nji suratda B^* meýdan bilen iki tegekli ulgam üçin kabul ediji tegegiň okunyň arasyndaky burç islendik bolup biler, ýöne gurluş amatlylygy sebäpli adaty ony 90° diýip alýarlar.

$B = B_0 + B^*$ wektoryň ugry boýunça ugrukdyrylan M magnitlilik döredilenden soň B^* meýdany aýyrmagyň wagty örän çalt bolmadyr. Bu wagty aralygynda M wektor ululygy we ugry boýunça duýarlykly üýtgäp etişmeli däl. Netijede durnukly däl ýagdaý döreýär. Bu ýagdaýda nusgadaky ýadrolaryň jemleýji magnit momenti galan B_0 meýdana



bolsa radioelektronikanyň ýokary takyklygy serişdeleriniň kömegi bilen ýerne ýetirilip biliner. ÝMR-ň larmor ýygylgynyň $\nu_0 = \gamma B_0 / (2\pi)$ formulasynda ν_0 ýygylk boýunça B_0 magnit meýdanyny ölçemegiň mümkinçiligi gelip çykýar. Ýöne güýçli magnit meýdanynda ýeňil magnit meýdanyna geçirmekde ÝMR-ň ýygylgy dört dereje we ondan hem köp kemelýär, kabul ediji konturyň gowy hilligi bir dereje kiçelýär. Şu sebäplere görä, başga geň şertlerde siňdirilme signallaryň goha bolan gatnaşygy bir näçe million gezek

kesgirlenýär. Onuň göýberiş zologynyň ini bolsa hemişelik magnit meýdanynyň birhilli dälligi bilen kesgitlenýär. Spin çäklendirijileriň çäklendiriş täsiri diňe rezonansynyň birhilli däl giňelen spectral çyzygyň inçe merkezi böleginde maksema bolýar. Ol (11)-nji aňlatmanyň sanawjysynyň (bölüjisiniň) ikinji goşulyjysynda Δw köneldijiniň bardygy bilen baglanyşyklydyr. Bu ýetmezçiligi aýyrmak üçin reaktiwligi sazlaýan ýygrylyk seçijilikli çäklendirijiler işläp taýýarlandy.

Kwant genetatorynyň kömegi bilen ýygylgy durnaşdyrmak bolýar. Häzirki zaman ýygylgyň standartlarynyň esaslarynda kwant generatorlary ýa-da radiotolkunlaryň aşa ýokary diapazonyna düşýän spektral çyzyklary ulanýan iltrler durýar. Ýöne tejribeleriň aglaba köpisinde pes ýygylkly yrgyldylary ulanmak gerek bolýar. Oňa radionawigasiýa, wagtyň gullygy, takyk faza we ýygylk ölçegleriniň ulgamy we başgalar degişlidir. Köplenç kesgitli ýygylklaryndaky signallar gerek bolýar. Şonuň üçin ýygylk standartyna genetoryň daýanç ýygylgyny standart ýygylklar hataryny öwürýän sintizator goşulýar. Kwant generatorlarynyň çykyş kuwwatynyň kiçidigi sebäpli olary ölçeyji ulgamlarda gös-göni ulanyp bolmaýar. Şonuň üçin kwars genetorynyň ýygylgynyň faza awtosazlamasy ulanylýar.

4.1-nji çyzgyda kwant generatorly ýygylgyň standarynyň umumy shemasy görkezilen.

Kwant generatorynyň ýokary ýygylgynda (24GGs ammiýak generatry üçin ýa-da ýokary) aralyk ýygylgyň güçlendirijisiniň (AÝG) kadaly işlemegi ýeterlik signal almak kyn bolýar. Bu ýagdaýda aşa ýokary ýygylgydaký könekçi generator ulanylýar.

Ol faza awtosazlaýjynyň (FAS) goşmaça halkasynyň kömegi bilen kwars generatory tarapyndan sinhronlaşdyrylýar. FAS-yň esasy bölegi faza detektory (FS) bolup durýar. Onuň çykyşynda mollekulýar genereatorynyň we komekçi kwars

generatorynyň signallarynyň fazalarynyň tapawudyna proporsional naprýaženiýe işläp çykarylýär. Bu naprýaženiýa kwars generatoryň ýygylgynda dolandyryjy elemente (DE) berilýär.

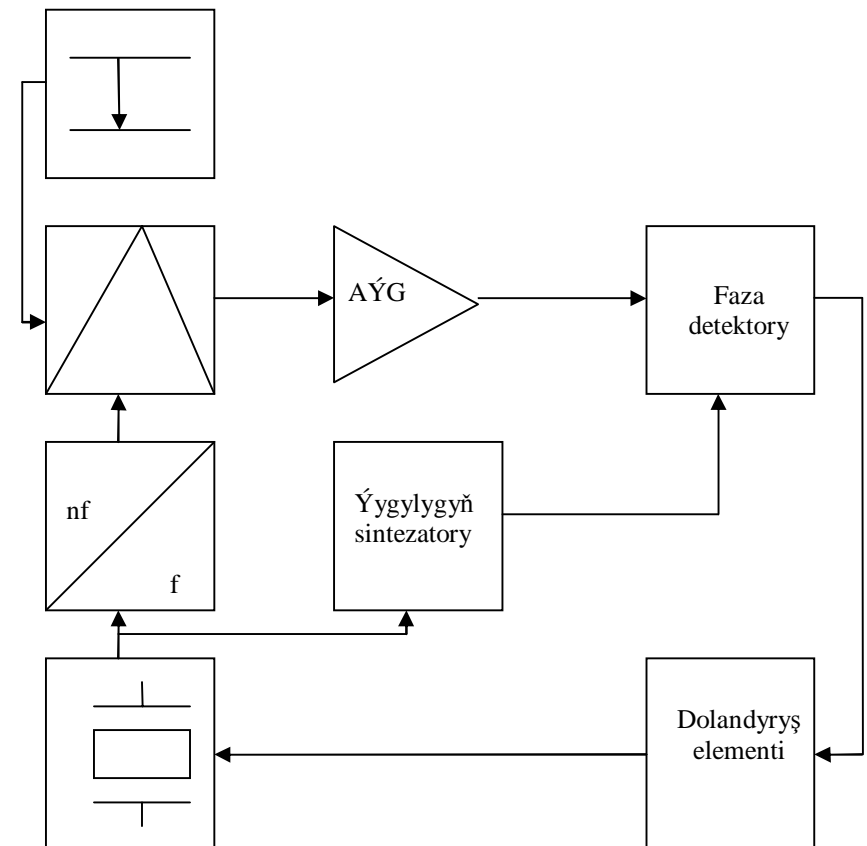
Eger kwars generatoryň ýygylgynyň köpeme koeffisienti dogry saýlanyp alnan bolsa, onda häzirki zaman radiotehniki gurluşlar standartyň çykyşynda islendik bütin ýygylgylary almaga mümkinçilik berýär.

Ýygylgyň aktiw kwant mehaniki standartlarynda generasiýa atomlaryň ýa-da molekulalaryň oýandyrylan dessesini rezonator bilen özara täsirinde ýüze çykýar. Bu ýerde energiýa molekulýar ulgamda toplanýar. Ýygylgyň passiw kwant mehaniki standartlary, ýagny kwant diskriminatorly ýygylgy standartlary döredildi. Olarda molekulýar ulgam energiýanyň çeşmesi bolmaýar. Bu abzallarda spektral çyzyk dar zolakly filtr hökmünde ulanylýar. Filtriň ýygylgy häsiýetnamasy kömekçi kwars generatorynyň ýygylgyny durnuklaşdyrmagyň hilini kesgitleýär. Passiw kwant diskriminatorly ýygylgy standartynda kwars generatorynyň ýygylgy f sintizatoryň ýa-da köpeldijiniň kömegi bilen diskriminatorly işçi maddasynyň spektral geçişine laýyk gelýän ýygylgyna (4.1-nji çyzygy). Kwant diskriminatorlynyň çykyşyndaky signal kwars generatorynyň özgerdilen signalynyň ýygylgynyň saýlanyp alnan spektral geçişini ýygylgyndan gysyrmasy hakyndaky maglumaty saklaýar.

1.2. Kwant magnitometriýasy

Kwant radiofizikasynyň bölümleriniň biri kwant magnitometriýadyr. Ol ÝMR hem-de adom we ýadto momentiniň optiki oriýentasiýasy hadysasyna esaslanýar. Magnit ölçegleriniň zerurlygy bilen fizikanyň we tehnikanyň köp bölümleriniň hünärmenleri iş salyşýarlar. Ýöne ön belli

nusgawy usullar ölçegleriň takyklygyny we ygtybarlylygyny üpjün edip bilýärler. Kwant magnitometriýasynda bolsa magnit meýdanyny ölçemeklik spin ulgamynyň kiçi energiýa derejeleriniň arasyndaky geçişini ýygylgy boýunça amala aşyrylýär. Bu



4.1-nji surat