

## Ефект на Мьосбауер

### 1) Уводни бележки

Явлението безоткатно излъчване и поглъщане на гама-лъчи, известно като ефект на Мьосбауер, е открито през 1958 г. при опити да се наблюдава ядрен гама-резонанс.

Аналогия с оптичен резонанс – но ядреният резонанс не е бил наблюдаван до 1958 г. поради високата енергия на  $\gamma$ -лъчите и съответно висока енергия на откат на ядрото (вж ф-ла [IV.1]) достатъчно голяма, за да не може да се извърши резонансно поглъщане. Енергията на излъчвания  $\gamma$ -квант се намалява с енергията на откат. При поглъщането си от ядро част от енергията на  $\gamma$ -кванта (също от съображения за запазване на импулса), също отива за откат.

$$E_i = E_f + E_\gamma + T_R \quad (33E)$$

$$0 = \dot{p}_R + \dot{p}_\gamma \quad (33И)$$

(ядро с маса  $M$  от покой излъчва  $\gamma$ -квант с енергия  $E_\gamma$  при начално състояние с енергия  $E_i$  и крайно състояние с енергия  $E_f$ . Ядрото в крайното състояние получава кинетична енергия  $T_R$  и импулс  $p_R$  ( $R$  – Recoil=откат)).

От  $\left| \dot{p}_R \right| = \left| \dot{p}_\gamma \right|$  и  $p_\gamma = E_\gamma/c$

$$T_R = \frac{p_R^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

$T_R$  е много ниска, напр.  $^{191}\text{Ir}$  излъчва  $\gamma$ -квант 129 keV

$$T_R = \frac{(1,29 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 191 \cdot 931 \cdot 10^6} \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ eV.}$$

В резултат линията на поглъщане е отместена спрямо линията на излъчване с величината  $2T_R$ . Естествената ширина на ядрените нива  $\Gamma \sim \hbar/\tau$ , е твърде малка в сравнение с енергията на откат и линиите на излъчване и поглъщане нямат никакво припокриване.



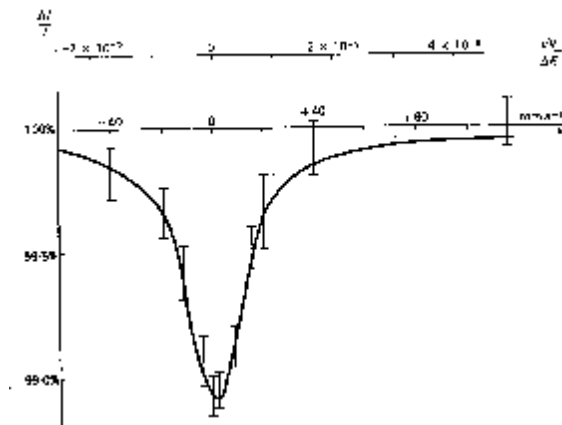
Пример:  $^{191}\text{Ir}$  с енергия 129 keV  $T_R = 5 \cdot 10^{-2}$  eV, а  $\Gamma \sim \hbar/\tau = 1,05 \cdot 10^{-34} / 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ s} \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$ . Времето на живот на първо възбудено ниво, от което се определя естествената ширина, е  $1,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ .  $\Gamma$  е с четири порядъка по-малка от разстоянието между линиите на излъчване и поглъщане!

Опити да се компенсира отката на ядрото чрез доплеров ефект:

$$E_\gamma = E_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right).$$

$\theta$  - ъгъл между скоростта на движение на ядрото и посоката на наблюдение на  $\gamma$ -кванта. За да се компенсира  $T_R$  са необходими скорости от порядъка на  $10^4 \text{ cm/s}$ .

Възможно с ултрацентрифуга, чрез нагряване на източника до високи температури или след ядрени реакции. Но топлинното движение на атомите е хаотично и линиите силно се разширяват с частично припокриване на линията на поглъщане с линията на излъчване - наблюдава се слаб по интензитет резонанс. За ядрото на  $^{191}\text{Ir}$  линиите трябва да станат 10 000 пъти по-широки, за да се наблюдава резонанс.



Резултатът от оригиналния експеримент на Мьосбауер

Мьосбауер случайно открива че когато източникът и поглътителят са охладени до температура на течния азот, се появява резонансен пик на

мястото на неотместената  $\gamma$ -линия с интензитет, *превъзхождащ с няколко порядъка* очаквания от припокриването на линиите при разширение.

Измерената ширина на тази линия се оказва  $2\Gamma$  и резонансът се нарушава много лесно с придаване на скорост от около  $20 \text{ mm/s}$  на източника (доплеровото отместване става равно на ширината на линията  $\Gamma$ ). Пълно излизане от резонанса става при скорости около  $100 \text{ mm/s}$ . Обяснението на явлението е безоткатно излъчване и поглъщане на  $\gamma$ -квантите поради това, че излъчващите  $\gamma$ -кванти ядра са вградени в кристална решетка. Енергията на откат става нула, ако за  $M$  се вземе масата на кристала.

Квантово-механичното обяснение се дава с фононния спектър на кристала: ако енергията на откат е по-малка от минималната енергия за възбуждане на фононните колебания на кристала, откат няма да има и  $\gamma$ -квантът ще отнесе цялата енергия на прехода без загуби.

Безоткатният ядрен  $\gamma$ -резонанс представлява може би най-точният метод във физиката.

За точността му може да се съди по отношението  $\Gamma/E_0$ . В случая на  $^{191}\text{Ir}$  това отношение е  $3 \cdot 10^{-11}$ , а за прехода с енергия  $93 \text{ keV}$  в  $^{65}\text{Zn}$ , където  $\Gamma = 5 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$  отношението  $\Gamma/E_0 = 5 \cdot 10^{-16}$ ! Ширината на измерената резонансна линия в случая на  $^{65}\text{Zn}$  е  $3 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$  - минимални вибрации на лабораторната маса, върху която се намират източникът и поглътителят, биха предизвикали излизане от резонанса.

Ефектът на Мьосбауер е наблюдаван в около 90 нуклида като около 60 от тези преходи са подходящи за *Мьосбауерова спектроскопия*.

Приложение на ефекта на Мьосбауер:

\* в ядрената физика:

за най-точно определяне на естествените ширини на  $\gamma$ -линиите и от там - времето на живот на възбудените нива;

за определяне на квадруполния момент на ядрата; за наблюдаване на ядрения ефект на Зеeman;  
за определяне радиусите на ядрата и т.н.

Значението обаче на Мьосбауеровата спектроскопия е в нейните приложения в други области на физиката, преди всичко във физиката на твърдото тяло, в химията, даже в биологията. За своето откритие Мьосбауер получава Нобеловата награда по физика за 1961 г.

## 2) Геометрия при Мьосбауеровия експеримент

Безоткатен  $\gamma$ -резонанс се наблюдава при вграждане на ядрото на източника (и погълтителя) в подходяща кристална решетка или в някоя много голяма молекула, напр. в тази на хемоглобина. Понякога резонансът може да се наблюдава само при ниска температура, но често и при стайна температура.

*Геометрия на преминаване.* За да се наблюдава ефекта на Мьосбауер източникът трябва да движи с постоянна и регулируема скорост - електромагнитен двигател в режим на постоянна скорост или на постоянно ускорение.

Резонансната крива е брой регистрирани от детектора  $\gamma$ -кванти в зависимост от скоростта на движение на източника, а скоростта е свързана с енергията чрез

$$E_{\gamma} = E_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

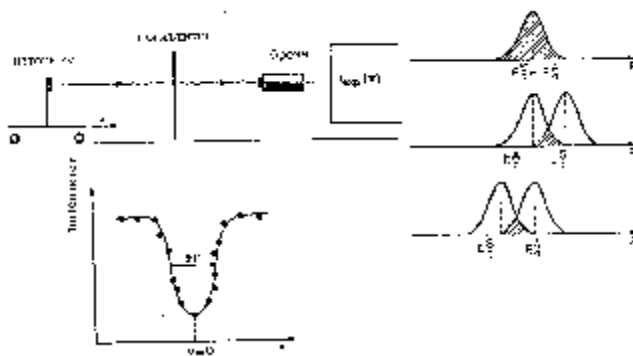
за всеки мьосбауеров преход скоростната скала има свой енергетичен еквивалент. „Безкрайна скорост” се нарича скоростта извън резонанса. При резонанс има минимален брой регистрирани гама-кванти.

За количествено описание на безоткатния резонанс се дефинира величината

*ефект*

$$\varepsilon \% = \frac{N_{\infty} - N_0}{N_{\infty}} 100\%$$

- относителна дълбочина на резонансния минимум. Ефектът обикновено е не повече от няколко процента, но се увеличава с понижаване на



температурата до тази на течния азот (77 K). При някои ядра ефектът може да се наблюдава само при температура на течния хелий (4 K).

*Геометрия на разсейване* - резонансното поглъщане се наблюдава като се регистрират произлъчените след резонансното поглъщане  $\gamma$ -кванти - при резонанс се регистрират максимален брой разсеяни  $\gamma$ -лъчи. Ако се регистрират конверсионни електрони, излъчени от погълтителя след резонансно безоткатно поглъщане ефектът може силно да се увеличи – до 400 %!

### 1.3. Свърхфини взаимодействия

Най-важните приложения са в изучаване взаимодействието на ядрата с тяхното физическо и химическо обкръжение.

Взаимодействието на ядрените електромагнитни моменти с външни полета е известно като *свърхфини взаимодействия*. Ефектите са толкова малки в сравнение с енергията на  $\gamma$ -квантите, че наблюдаването им е невъзможно без използване на резонансен ефект.

#### *Изомерно (химическо) отместване*

Източникът и погълтителят са в различни кристални решетки - резонансният ефект може да се получи при различна от нула скорост.

*Изомерното (химическо отместване)* се дължи на влияние на електронната обвивка върху енергията на ядрените нива с особено силен ефект от  $s$ -електроните.

Допълнителна енергия  $\delta W_Q$  от взаимодействието на квадруполния момент на ядрото с електричното поле на електронната обвивка - отместване на всички ядрени нива с  $\delta E$ . Причината за неговото възникване е в крайния размер на ядрото. Този ефект е известен като *изотопно отместване*. Това отместване е от порядъка на  $(R/a_0)^2 = (10^{-15}/10^{-10})^2 \sim 10^{-10}$ , от порядъка на естествената ширина на линията  $\Gamma$ .  $R$  е радиусът на ядрото, а  $a_0$  – първи радиус на Бор. Ако средноквадратичният радиус на ядрото е различен в основно и във възбудено състояние на ядрото

$$\Delta E = \delta E_{\text{възб}} - \delta E_{\text{осн}} = \frac{Ze^2}{10\epsilon_0} |\psi(0)|^2 \left[ \langle R_{\text{възб}}^2 \rangle - \langle R_{\text{осн}}^2 \rangle \right]$$

\* Определяне на разликата в средноквадратичните радиуси на ядрата в основно и във възбудено състояние (ако електронната плътност в областта на ядрото е известна).

Пример: в ядрото  $^{57}\text{Fe}$  (14,4 keV)  $\langle R_{\text{възб}}^2 \rangle < \langle R_{\text{осн}}^2 \rangle$  (0,1%)

в ядрото  $^{119\text{m}}\text{Sn}$  (23,8 keV)  $\langle R_{\text{възб}}^2 \rangle > \langle R_{\text{осн}}^2 \rangle$  (0,01%)

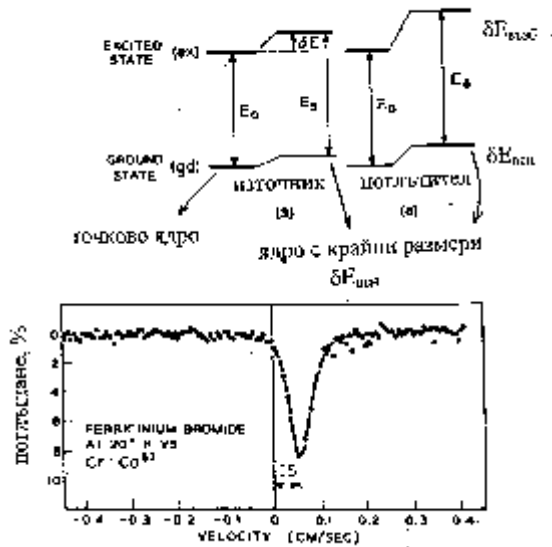
\* Различно химично обкръжение на източника и погълтителя (различна електронна плътност в областта на ядрото)

$$|\psi(0)|_{\text{изт}}^2 \neq |\psi(0)|_{\text{погл}}^2$$

и разместването на линиите на основно и възбудено състояние в източника и погълтителя.

$$IS = \Delta E_{\text{погл}} - \Delta E_{\text{изт}} = \frac{Ze^2}{10\epsilon_0} \left[ |\psi(0)|_{\text{изт}}^2 - |\psi(0)|_{\text{погл}}^2 \right] \left[ \langle R_{\text{възб}}^2 \rangle - \langle R_{\text{осн}}^2 \rangle \right]$$

Това отместване се нарича *химическо* или *изомерно* (IS = Isomeric Shift) и е от порядъка на  $10^{-12}$  eV.



Разместване на нивата поради допълнителната енергия, възникваща от крайния размер на ядрото (горе) и измерване на изомерното отместване (долу).

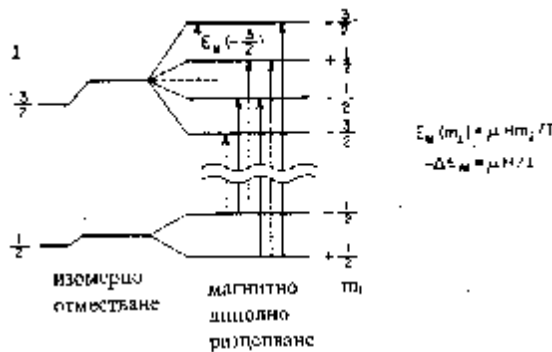
Резонансът се наблюдава при някаква скорост  $v \neq 0$  ( $v = IS$ ). Изследването на изомерното отместване в различни съединения дава информация за плътността на  $s$ -електроните в областта на ядрото, която може да се влияе от състоянието на валентните електрони. При известна разлика между размерите на ядрото в основно и възбудено състояние

$$IS = \Delta E_{\text{погл}} - \Delta E_{\text{изт}} = \frac{Ze^2}{10\epsilon_0} \Delta \langle R^2 \rangle [ |\psi(0)|^2_{\text{погл}} - |\psi(0)|^2_{\text{изт}} ]$$

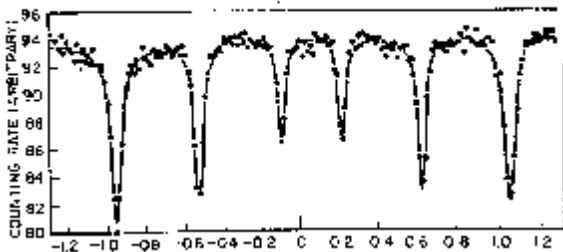
Чрез измерване на изомерното отместване може да се определя разликата в електронната плътност в областта на ядрото на различни химични съединения.

*Магнитно разцепване на ядрените нива (ефект на Зееман)*

Аналогично на ефекта на Зееман в атомите, ако ядрото се намира в магнитно поле  $\vec{B}$ , става разцепване на ядрените нива в магнитно поле. Полето  $\vec{B}$  може да се създава от несдвоени електрони в атомната обвивка, а ядрените нива ще се разцепят. Допълнителна енергия от взаимодействието



Мьосбауеров спектър на съединението  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



$$W_B = -(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}) = -|\boldsymbol{\mu}| |B| \cos(\mu, B) = -\mu B \frac{\mu_z}{\mu} = -\mu B \frac{I_z}{I} = -\frac{\mu}{I} m_I \mathbf{h} B = -m_I B M_{\text{я}}.$$

$M_{\text{я}}$  - ядрен магнетон,  $m_I$  е магнитното квантово число,  $(2I+1)$  стойности.  $B$  е осредненото магнитно поле на електронната обвивка в областта на ядрото. Електронната обвивка на феромагнетик може да създаде в областта на ядрото полета от порядъка на 30 Т (300 000 Gs)!

$$\Delta E/E_{\gamma} \sim 10^{-12} - 10^{-10}$$

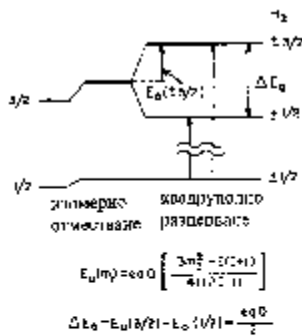
От разстоянието между линиите с най-ниска и с най-висока енергия се определя магнитното поле в молекулата на  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - B = 33$  Т. Ако поглътителят има сложен спектър, източникът трябва да има единична линия, за да не се усложнява интерпретацията на мьосбауеровия спектър. В този пример радиоактивният източник  $^{57}\text{Co}$  е вграден в неръждаема стомана с нулево магнитно поле (линията на излъчване е неразцепена).

### Квадруполно разцепване

За ядра с ненулев квадруполен момент, поставени във външно поле с градиент по оста  $z$  (фактически оста  $z$  се задава от градиента на полето) възниква енергия на взаимодействие

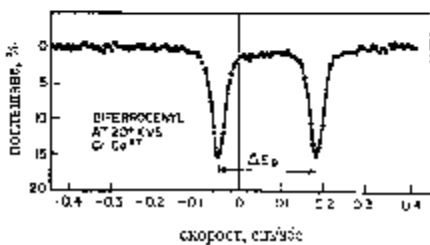
$$W_Q = \frac{1}{4} \Phi_{zz} eQ,$$

$\Phi_{zz} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$  е градиент на полето по избраното направление – оста  $z$ , а  $Q$  е спектроскопичния квадруполен момент). В зависимост от  $m_I$  енергията на взаимодействие е



$$W_Q = \frac{1}{4} \Phi_{zz} eQ_0 \frac{3m_I^2 - I(I+1)}{I(2I-1)},$$

Квадруполно разцепване в присъствие на външно електрично поле с градиент по оста  $z$  и измереният Мьосбауеров спектър.



Нивата с  $\pm m_I$  ще имат еднаква енергия - вместо на 4 нива нивото със спин  $3/2$  ще се разцепи само на две.

Разликата в енергиите на двете линии - *квадруполно разцепване* и се използва за определяне на собствения квадруполен момент на ядрото  $Q_0$ .

При известно  $Q_0$  измерването на квадруполното разцепване носи информация за градиента на електричното поле в съединението на погълтителя.

#### 1.4. Наблюдаване на гравитационното отместване

През 1960 г. Паунд и Ребка показват експериментално изключителната точност на ефекта на Мьосбауер. Те доказват, че гравитационното поле на Земята предизвиква промяна в енергията на  $\gamma$ -квантите, т.нар. *червено гравитационно отместване*.

Постулат на общата теория на относителността - принцип на еквивалентност: ефектът от локално гравитационно поле е еквивалентен на ефекта от движеща се с постоянно ускорение координатна система.

Ако наблюдаваме излъчване и поглъщане на светлина в такава координатна система, времето за изминаване на разстоянието между източника и погълтителя е  $H/c$  и фотоните биха придобили скорост в дадената среда (не вакуум!)  $v = gH/c$ , където  $H$  е разстоянието, а  $g$  – земното ускорение. Доплеровият ефект ще предизвика промяна в енергията на фотоните

$$\Delta E = \frac{v}{c} E_\gamma = \frac{E_\gamma}{c^2} gH,$$

която ще бъде положителна при падане и отрицателна при качване, т.е. по земното ускорение и срещу него. При височина  $H = 1$  m относителната промяна на енергията на фотоните е

$$\frac{\Delta E}{E_\gamma} = \frac{gH}{c^2} \sim 10^{-16}.$$

Използват прехода  $14,4$  keV в  $^{57}\text{Fe}$  ( $\Gamma/E_\gamma \sim 3 \cdot 10^{-13}$ ),  $H = 22,5$  m (височината на кулата на Физическия факултет на Харвардския университет). Очакваната промяна на резонанса е от порядъка на  $1/100$  от ширината на резонансната линия. Постоянна температура в тръбата пълна с хелий (газ) и се измерва разликата в резонанса при източник на върха на кулата и в подземие. Полученият резултат

$$\frac{\Delta E}{E_\gamma} = (4,902 \pm 0,041) \cdot 10^{-15}$$

Очакваната стойност е  $4,905 \cdot 10^{-15}$  за изминаване на двойното разстояние  $45$  m. Този експеримент дава най-точното доказателство на общата теория на относителността. Измереният ефект е  $10$  пъти по-малък от ефекта от изкривяване на светлината при преминаване покрай Слънцето и измерен през 1919 г. в Аржентина по време на слънчево затъмнение.