

# МЁССБАУЭРА ЭФФЕКТ

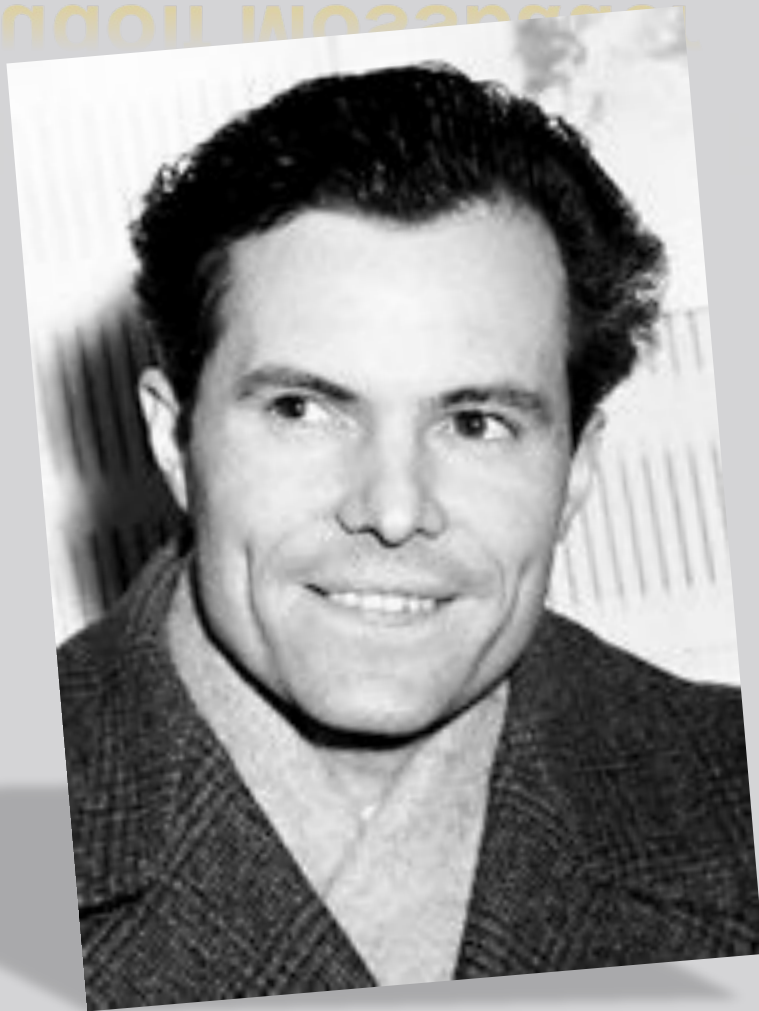
МЁССБАУЭРА ЭФФЕКТ

Презентация по ядерной физике



# The Nobel Prize in Physics 1961

## Rudolf Mössbauer



Рудольф Людвиг Мёссбауэр — немецкий физик, специалист в физике атомного ядра и элементарных частиц. В 1961 году за открытие и теоретическое обоснование явления ядерного гамма-резонанса Р. Л. Мёссбауэру была присуждена Нобелевская премия по физике.

# Предыстория



- Около 1852 Дж. Г. Стокс впервые наблюдал флуоресценцию — поглощение флюоритом падающего света с последующим испусканием света поглотителем. Впоследствии аналогичные исследования проводились с различными материалами.



- В 1900 П. Виллард обнаружил гамма-лучи — испускаемое радием монохроматическое электромагнитное излучение с высокой энергией фотонов.



- В 1904 Р. Вуд продемонстрировал резонансную оптическую флуоресценцию, которая характеризуется испусканием поглощённой световой энергии в виде излучения той же частоты. Особенно широко известна именно исследованная им резонансная флуоресценция жёлтого дублета натрия.

# Рудольф Людвиг Мёссбауэр. Биография.



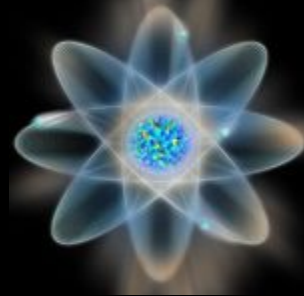
Окончил гимназию в Мюнхен-Пазинг в 1948. Сдал экзамены на учёную степень в 1952. В 1953—1954 работал над кандидатской диссертацией в лаборатории прикладной физики в Мюнхенском техническом университете (TUM) и работал ассистентом лектора в математическом институте того же университета. В 1955—1957 работал над докторской диссертацией и проводил исследования на физическом отделении Медицинского исследовательского института им. Макса Планка в Гейдельберге, где впервые наблюдал явление резонансного поглощения  $\gamma$ -лучей без отдачи — ядерный гамма-резонанс. В январе 1958 он защитил докторскую диссертацию. Проработав научным сотрудником в TUM в 1959, он принял приглашение Ричарда Фейнмана продолжить исследования поглощения  $\gamma$ -лучей в Калифорнийском технологическом институте в Пасадене (США) в качестве научного сотрудника, а затем старшего научного сотрудника. В 1961 Мёссбауэр получил должность профессора физики в Калифорнийском технологическом институте. С 1965 работал на должности профессора в TUM. В 1972—1977 занимал должность директора гренобльского института им. Макса фон Лауэ и Поля Ланжевена и международного реактора с высокой мощностью потока частиц. В 1977 вернулся в Мюнхен, где продолжил работать над «загадкой нейтрино», в том числе принимая участие в некоторых экспериментах по обнаружению нейтринных осцилляций в Гёсгене и экспериментах по изучению солнечных нейтрино в подземной лаборатории Гран Сассо в Италии.

# История открытия



В 1953 Г. Майер-Лейбниц назначил Р. Мёссбауэру тему магистерской диссертационной работы: продолжение исследований температурно зависимого поглощения гамма-излучения, начатых Мальмфурсом с использованием Os-191. После защиты Мёссбауэр продолжил работу по этой теме, готовя диссертацию доктора философии. Несмотря на настойчивые указания научного руководителя следовать методу Мальмфурса и искать перекрытия линий испускания и поглощения в области высоких температур, Мёссбауэр решил, что удобнее, напротив, сконструировать криостат для охлаждения образцов. При этом он ожидал наблюдать такую температурную зависимость поглощения, при которой перекрытие линий становится слабее, а частота отсчётов квантов прошедшего через поглотитель излучения должна возрасти. **Получив обратный результат, то есть усиление резонансной ядерной гамма-флуоресценции, он преодолел чрезмерный скепсис и тщательно обдумал результат.** В результате Мёссбауэр понял, что использовавшаяся полуклассическая концепция излучающих и поглощающих ядер как свободных частиц для твёрдых тел не подходит: в кристаллах атомы сильно связаны друг с другом и характеризуются существенно квантовым поведением.

# МЁССБАУЭРА ЭФФЕКТ



Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс, открытый в 1957 или 1958 году Рудольфом Мёссбауэром в Институте им. М. Планка в Гейдельберге (ФРГ), состоит в резонансном испускании или поглощении гамма-фотонов без изменения фононного спектра излучателя или поглотителя излучения соответственно. Иными словами, **эффект Мёссбауэра — это резонансное испускание и поглощение гамма-лучей без отдачи.** Имеет существенно квантовую природу и наблюдается при изучении кристаллических, аморфных и порошковых образцов, содержащих один из 87 изотопов 46 элементов.

# Природа эффекта



При испускании или поглощении гамма-кванта, согласно закону сохранения импульса, свободное ядро массы  $M$  получает импульс отдачи  $p = E_0 / c$  и соответствующую этому импульсу энергию отдачи. На эту же величину оказывается меньше по сравнению с разностью энергий между ядерными уровнями  $E_0$  энергия испущенного гамма-кванта, а резонансное поглощение наблюдается для фотонов с энергией, равной  $E_0 + R$ . В итоге, для одинаковых ядер линии испускания и поглощения разнесены на величину  $2R$  и условие резонанса может быть выполнено только в случае совмещения этих линий, либо их частичного перекрытия. В газах энергию отдачи получает одно излучающее ядро массы  $M$ , тогда как *в твёрдых телах помимо процессов, когда за счёт энергии отдачи возбуждаются фононы, при определённых условиях смещение только одного атома или небольшой группы атомов становится невозможным, и отдачу может испытать лишь весь кристалл целиком.* Масса кристалла на много порядков больше массы ядра, а значит и величина  $R$  становится пренебрежимо малой. В процессах испускания и поглощения гамма-квантов без отдачи энергии фотонов равны с точностью до естественной ширины спектральной линии.

# Таблица всех известных Мёссбауэровских изотопов



NUMBER OF ISOTOPES IN WHICH THE MOSSBAUER EFFECT HAS BEEN OBSERVED

NUMBER OF OBSERVED MOSSBAUER TRANSITIONS

1	IA H	IIA											III A	IV A	V A	VI A	VII A	0 He																												
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																												
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIB	VII	IB	IB	Al	Si	P	S	Cl	Ar																													
4	<sup>1</sup> <sub>1</sub> K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Fe	Co	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Ni	Cu	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Zn	Ga	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Ge	As	Se	Br	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Kr																												
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Tc	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Ru	Rh	Pd	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Ag	Cd	In	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Sn	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Sb	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Te	<sup>2</sup> <sub>2</sub> I	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Xe																												
6	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Cs	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Ba	<sup>1</sup> <sub>1</sub> La	<sup>4</sup> <sub>4</sub> Hf	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Ta	<sup>7</sup> <sub>4</sub> W	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Re	<sup>6</sup> <sub>4</sub> Os	<sup>4</sup> <sub>2</sub> Ir	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Pt	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Au	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																												
7	Fr	Ra	Ac	<table border="1"> <tr> <td>Ce</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Pr</td> <td><sup>2</sup><sub>1</sub>Nd</td> <td><sup>2</sup><sub>2</sub>Pm</td> <td><sup>6</sup><sub>6</sub>Sm</td> <td><sup>4</sup><sub>2</sub>Eu</td> <td><sup>9</sup><sub>6</sub>Gd</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Tb</td> <td><sup>6</sup><sub>4</sub>Dy</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Ho</td> <td><sup>5</sup><sub>5</sub>Er</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Tm</td> <td><sup>6</sup><sub>5</sub>Yb</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Lu</td> </tr> <tr> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Th</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Pa</td> <td><sup>3</sup><sub>3</sub>U</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Np</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Pu</td> <td><sup>1</sup><sub>1</sub>Am</td> <td>Cm</td> <td>Bk</td> <td>Cf</td> <td>Es</td> <td>Fm</td> <td>Md</td> <td>No</td> <td>Lr</td> </tr> </table>															Ce	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pr	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Nd	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Pm	<sup>6</sup> <sub>6</sub> Sm	<sup>4</sup> <sub>2</sub> Eu	<sup>9</sup> <sub>6</sub> Gd	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Tb	<sup>6</sup> <sub>4</sub> Dy	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Ho	<sup>5</sup> <sub>5</sub> Er	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Tm	<sup>6</sup> <sub>5</sub> Yb	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Lu	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Th	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pa	<sup>3</sup> <sub>3</sub> U	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Np	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pu	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pr	<sup>2</sup> <sub>1</sub> Nd	<sup>2</sup> <sub>2</sub> Pm	<sup>6</sup> <sub>6</sub> Sm	<sup>4</sup> <sub>2</sub> Eu	<sup>9</sup> <sub>6</sub> Gd	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Tb	<sup>6</sup> <sub>4</sub> Dy	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Ho	<sup>5</sup> <sub>5</sub> Er	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Tm	<sup>6</sup> <sub>5</sub> Yb	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Lu																																	
<sup>1</sup> <sub>1</sub> Th	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pa	<sup>3</sup> <sub>3</sub> U	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Np	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Pu	<sup>1</sup> <sub>1</sub> Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																	



# Интерпретация эффекта

**В 2000 в журнале *Hyperfine Interactions* Мёссбауэр дал наглядную интерпретацию эффекта:**

*Ситуация ... напоминает человека, прицельно бросающего камень из лодки. Большую часть энергии согласно закону сохранения импульса получает лёгкий камень, но небольшая часть энергии броска переходит в кинетическую энергию получающей отдачу лодки. Летом лодка просто приобретёт некоторое количество движения, соответствующее отдаче, и отплывёт в направлении, противоположном направлению броска. Однако зимой, когда озеро замерзнет, лодку будет удерживать лёд, и практически вся энергия броска будет передана камню, лодке (вместе с замерзшим озером и его берегами) достанется ничтожная доля энергии броска. Таким образом, отдача будет передаваться не одной только лодке, а целому озеру, и бросок будет производиться «без отдачи».*

# Эффект Мёссбауэра

Резонансное поглощение может иметь место только в том случае, когда энергия отдачи ядра  $R$  меньше ширины ядерного уровня [Г. Мессбауэр](#) исследуя явление резонансного поглощения гамма-квантов понизил температуру источника и обнаружил, что число поглощенных фотонов существенно увеличилось, то есть наблюдалось резонансное поглощение -квантов. Качественно это можно объяснить тем, что в этом случае импульс отдачи получало не отдельное ядро, а весь кристалл, в котором находились ядра, испускающие -кванты. При переходе от свободных атомов к атомам связанных в кристаллической решетке ситуация меняется. С уменьшением температуры источника увеличивается относительное число ядерных переходов с передачей импульса отдачи всему кристаллу. Условия для этого тем благоприятнее, чем ниже температура кристалла и энергия перехода

# Эффект Мёссбауэра

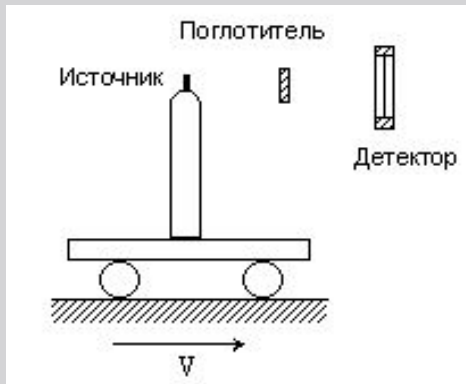


Рис.1. Схема опыта по измерению ширины линии

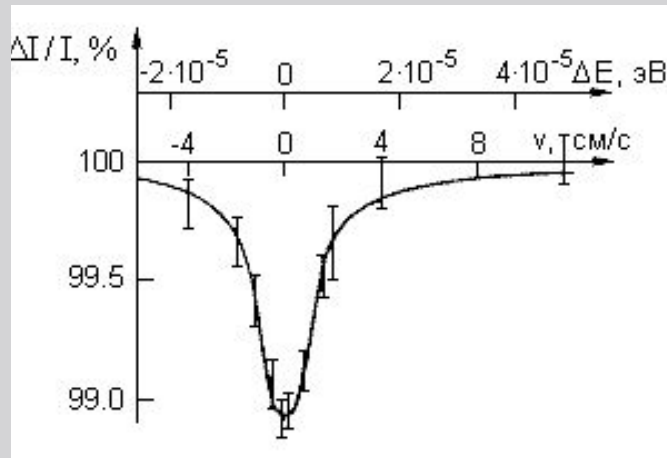
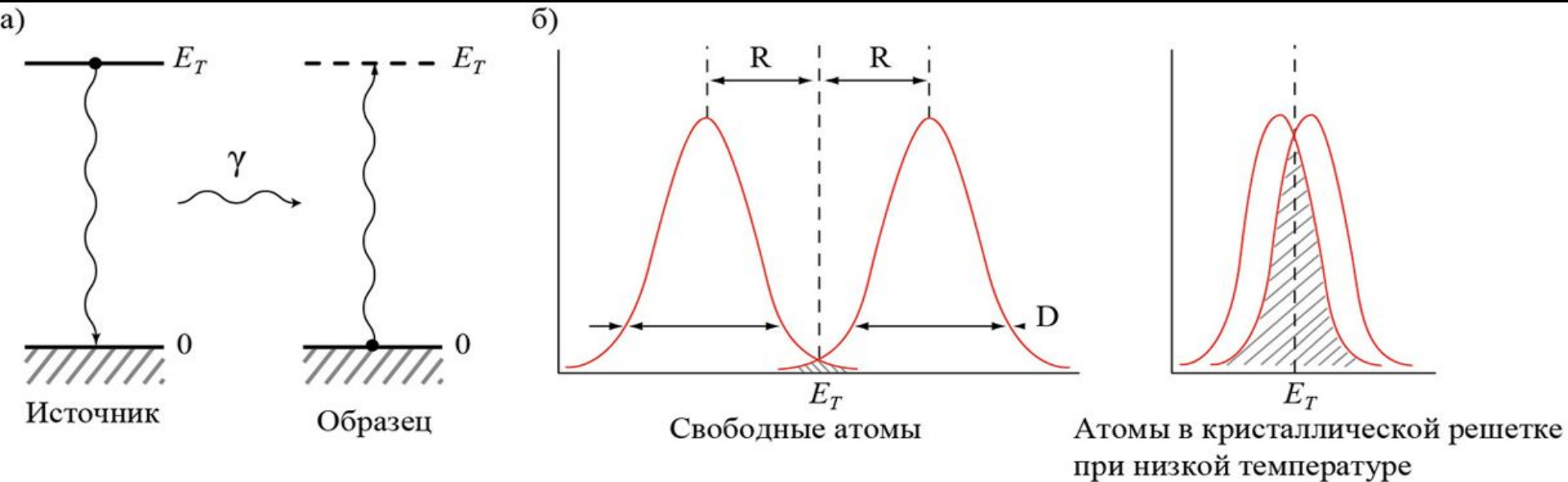


Рис.2. Измерение ширины линии испускания гамма-квантов  $\Gamma$  с помощью эффекта Мессбауэра

Чтобы наблюдать резонансное поглощение мишенью из  $^{57}\text{Fe}$   $\gamma$ -квантов, испускаемых источником из  $^{57}\text{Fe}$ , нужно скомпенсировать энергию отдачи ядра, которая в сумме составляет  $2T_R$ . Если пренебречь естественной шириной уровня, то энергия испускаемых фотонов равна  $E\gamma = E - T_R$ , тогда как для того, чтобы наблюдался резонанс, они должны иметь энергию  $E\gamma = E + T_R$ . Один из способов такой компенсации состоит в том, что рассматриваемый радиоактивный источник закрепляют на движущемся устройстве и подбирают скорость так, чтобы разница  $2T_R$  компенсировалась за счет **эффекта Доплера**. Для этого достаточно укрепить исследуемый источник на подвижной каретке и изменять ее скорость  $v$  так, чтобы за счет эффекта Доплера сдвинуть линию резонансного поглощения в нужную сторону. Между детектором и источником помещают поглотитель того же изотопического состава, что и источник, как показано на рис.1. В отсутствие отдачи резонансное поглощение должно происходить при  $v=0$ . В этом случае число фотонов, регистрируемое детектором, будет минимально, так как фотоны, претерпевшие резонансное поглощение в поглотителе, затем повторно испускаются в разных направлениях и выбывают из прошедшего пучка. При изменении скорости  $v$  изменяется доплеровское смещение линии испускания относительно линии поглощения и в результате записывается контур линии, как показано на рис.2. Ширина ядерных уровней столь мала, что источник нужно перемещать со скоростью, составляющей всего лишь десятые доли сантиметра в секунду.

# Описание эффекта



- *a* — Схема резонансного поглощения гамма-кванта;
- *б* — Распределение испускаемых и поглощаемых гамма-квантов по энергиям.

Переход ядра из одного состояния в другое сопровождается либо поглощением, либо испусканием гамма-кванта коротковолнового рентгеновского излучения (рис. *a*).

Энергия гамма-кванта определяется разностью энергий между основным и возбужденным состояниями ядра атома ( $E_T$ ), энергией отдачи ядра ( $R \sim 10^{-1}$  эВ для свободных атомов) и доплеровским сдвигом ( $D$ ), вызванным поступательным движением ядра:

$$E_{\text{испускания}} = E_T - R \pm D \text{ (энергия гамма-квантов, испускаемых источником),}$$

$$E_{\text{поглощения}} = E_T + R \pm D \text{ (энергия гамма-квантов, поглощаемых образцом).}$$

Условие резонанса достигается тогда, когда испускаемый возбужденным ядром гамма-квант будет поглощен ядром, находящимся в основном состоянии:  $E_{\text{испускания}} \approx E_{\text{поглощения}}$ .

Графически такое условие может быть представлено в виде области перекрывания площадей кривых распределения по энергиям испускаемых и поглощаемых квантов (рис. *б*)

# Характеристики фотона

ЯРФ позволяет, зная мультипольность и тип поглощенного (излученного) фотона, спин и четность одного уровня, судить о том какой будет спин и четность другого уровня. Для этого используются хорошо известные правила отбора по спину и четности для электромагнитных переходов. Если речь идет о переходах между основным состоянием и возбужденным, то

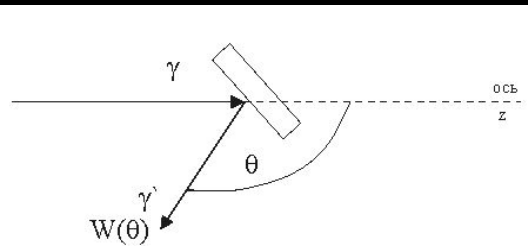
$$\begin{aligned} |I_0 - I_r| &<< I_0 + I_r \\ |I_0 - I_r| &< I_r < I_0 + I_r \end{aligned}$$

Для четностей:  $P_0 P_r = P_\gamma$  или  $P_0 P_\gamma = P_r$

Спин фотона  $s_\gamma = 1$ , внутренняя четность фотона  $P_\gamma = -1$ . У фотона с определенным  $I_\gamma$  может быть как положительная так и отрицательная четность. Для фотонов электрического типа,  $P(EI) = (-1)^I$   
для фотонов магнитного типа:  $P(MI) = (-1)^{I+1}$   
Длина волны фотона  $\lambda = 2c/6.28 \cdot 200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм} / E_\gamma$ .

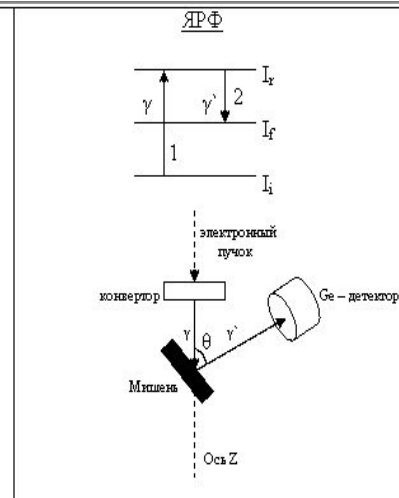
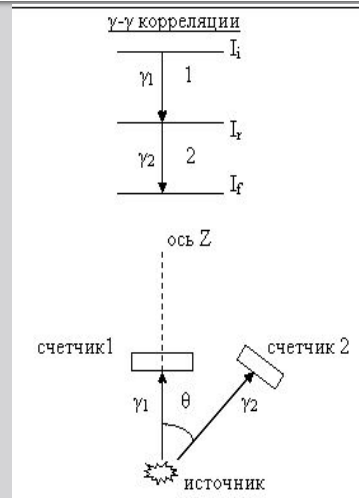
Очевидно, что для ЯРФ выполняется условие длинноволнового приближения  $\lambda \gg R$ , так для  $E_\gamma = 10 \text{ МэВ}$ ,  $\lambda = 124 \text{ Фм}$ . В то время как для ядра с полным числом нуклонов  $A = 200$  имеем  $R = 7 \text{ Фм}$ . Как мы знаем, в длинноволновом приближении ( $\lambda \gg R$ ,  $kR \ll 1$ , т.к.  $\lambda = 2\pi/k$ )

$w(MI) \sim (R)^{2I} \sim (kR)^{2I} \sim (R)^{2(I-1)}$ ;  $w(EI) \sim (R)^{2(I-1)} \sim (kR)^{2(I-1)} \sim (R)^{2(I-1)}$  и  $w(MI)/w(EI) \sim (kR)^2 \ll 1$ ;  
 $w(MI+1)/w(MI) \approx w(EI+1)/w(EI) \sim (kR)^2 \ll 1$  т. е. вероятность гамма-переходов убывает в следующем порядке:  $E1, E2, M1, E3, M2, \dots$



# Мультипольность гамма-переходах в ЯРФ - эксперименте

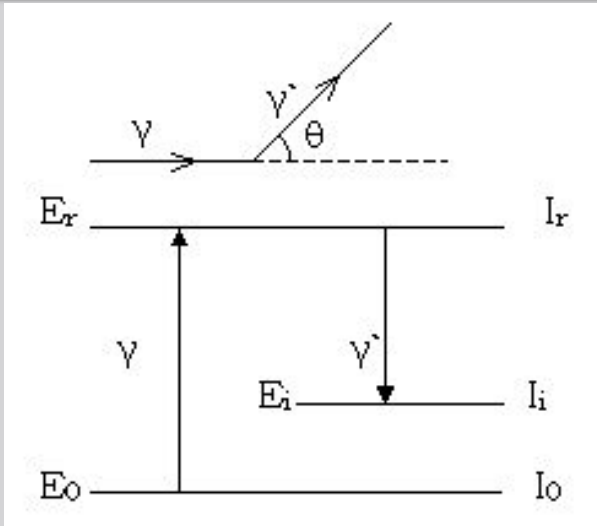
Для нахождения мультипольности  $\gamma$ -перехода достаточно определить функцию  $W(\theta)$ , являющуюся угловой частью сечения рассеяния, и обычно называемую "нормализованным угловым распределением". Для теоретического описания  $W(\theta)$  можно целиком использовать формализм угловых  $\gamma$ - $\gamma$  корреляций:  $\gamma$ - $\gamma$  коррелиции и ЯРФ - это два варианта одного и того же физического процесса



В таблице даны примеры рассчитанных в рамках формализма  $\gamma$ - $\gamma$ корреляций функций  $W(\theta)$  для разных вариантов сочетания спинов начального ( $I_i$ ) и конечного ( $I_f$ ) состояний. Указаны также мультипольности  $I$  и  $\Gamma$  соответственно упавшего на мишень ( $\gamma$ ) и рассеянного ( $\gamma'$ ) фотона.

$I_i$	$I$	$I_r$	$\Gamma$	$I_f$	$W(\theta)$
1/2	1	1/2	1	1/2	Постоянная
1/2	1	3/2	1	1/2	$1 + 3/7 \cos^2\theta$
0	1	1	1	0	$1 + \cos^2\theta$
1	1	1	1	0	$1 - 1/3 \cos^2\theta$
2	1	1	1	0	$1 + 1/13 \cos^2\theta$
1	2	1	1	0	$1 - 1/3 \cos^2\theta$
2	2	1	1	0	$1 + 3/7 \cos^2\theta$
0	2	2	2	0	$1 - 3 \cos^2\theta + 4 \cos^4\theta$

# Эффективное сечение



Эффективное сечение резонансного рассеяния (ЯРФ) неполяризованных фотонов на неполяризованной мишени можно записать в виде:  $\sigma(\gamma, \gamma') = \sigma_i(E)\sigma(\theta)$ .

Для чистой ЯРФ (когда ядро возвращается в основное состояние)  $\Gamma_i = \Gamma_0$  и

$$\sigma_0(E) = \pi \lambda^2 \frac{1}{2} \cdot \frac{2I_r + 1}{2I_0 + 1} \cdot \frac{\Gamma_0^2}{(E - E_r)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

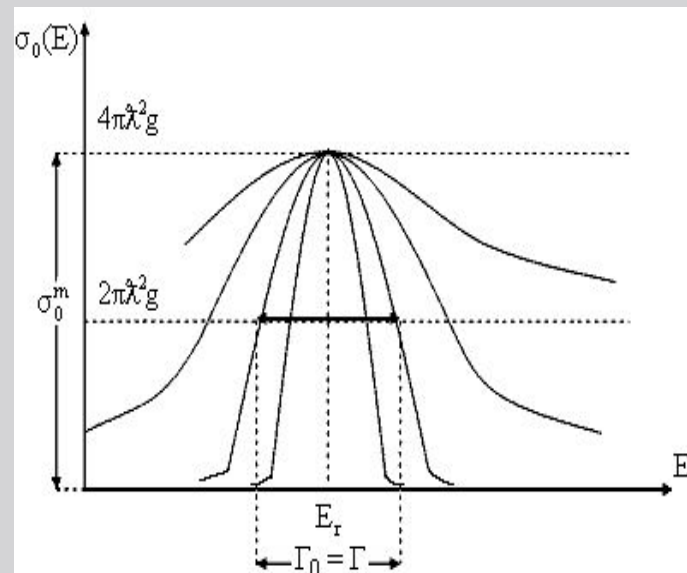
Рассмотрим брейт-вигнеровскую резонансную кривую, хорошо известную из оптики и атомной физики (такую же форму имеют и резонансы электрических цепей):

$$\sigma_0(E) = \pi \lambda^2 \cdot g \cdot \frac{\Gamma_0^2}{(E - E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

Сечение в максимуме резонанса имеет значение:

$$\sigma_0^m(E_r) = 4\pi \lambda^2 \cdot g \cdot \frac{\Gamma_0^2}{\Gamma^2}$$

В зависимости от величины  $\Gamma_0 = \Gamma$  имеем резонансные кривые разной ширины (рис. слева)



# Роль эффекта Допплера



Если для ядра в покое -квант имеет энергию  $E$ , то, двигаясь в направлении -источника, ядро встречает -квант с энергией  $E'$ :

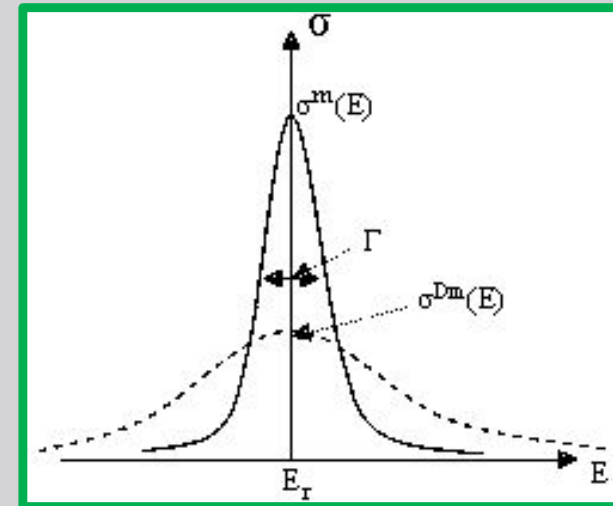
$$E' = E(1 + v/c) \cdot [1 - (v/c)^2]^{-1/2} = E(1 + v/c) \gamma$$

Аналогично источник, двигаясь со скоростью  $v$  в направлении неподвижного ядра, испускает не гамма-квант с энергией  $E$ , а гамма-квант с энергией  $E'$ .

С учетом распределения Максвелла для распределения эффективных энергий  $E'$  получаем:

$$w(E') dE' = \frac{1}{\Delta \sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{E'-E}{\Delta}\right)^2} dE' \quad , \text{ где } \Delta = \frac{E}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M}} \quad \text{так}$$

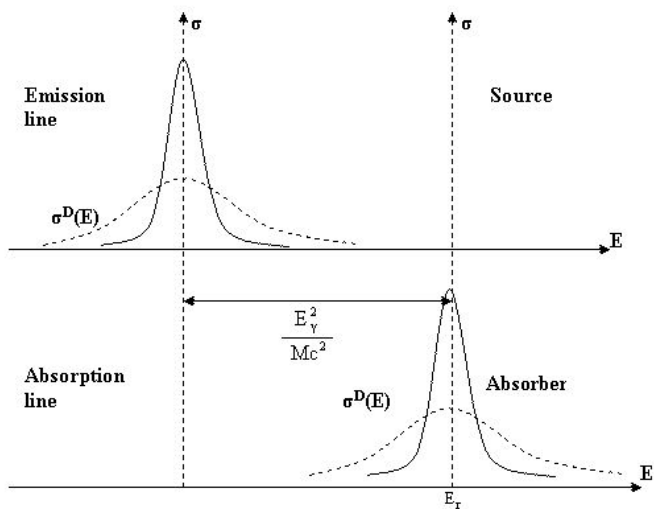
называемая доплеровская ширина.



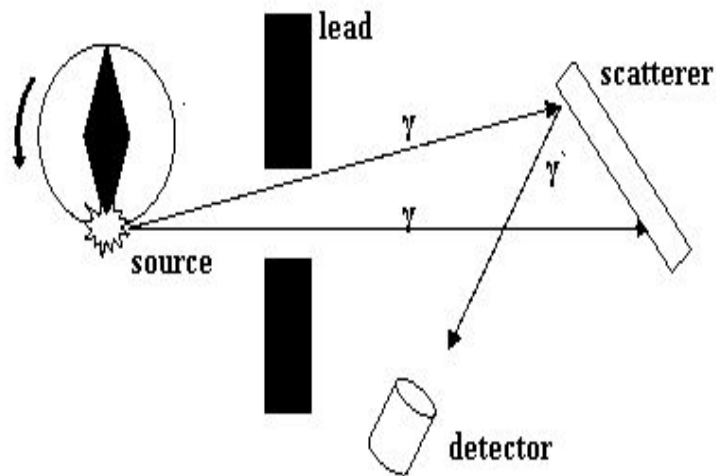
Сплошная линия — без уширения, пунктир — с учетом эффекта Допплера



# Доплеровское уширение

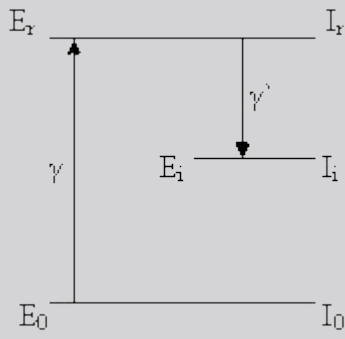


Доплеровское уширение позволяет для некоторой части ядер-источника компенсировать отдачу путем нагревания источника (обычно нагревается источник (source), а рассеиватель (absorber) поддерживается при комнатной температуре). При этом линии испускания и поглощения начинают перекрываться. Это было осуществлено Малмфорсом в 1953 при нагревании источника до 1000 градусов.



Есть другой метод компенсации отдачи ядра - метод центрифуги. Компенсация потери для квантов с энергией  $< 500$  кэВ в тяжелых ядрах требует скоростей в десятки тысяч см/сек. Это следует из доплеровской скорости  $v = E/Mc$ , которую нужно иметь (см. соотношение (3.1)). Эти скорости порядка скорости звука в газах и требуют быстрых механических движений, реализуемых в ультрацентрифугах.

# Связь ширины гамма-перехода с волновыми функциями начального и конечного состояний



Определим экспериментально площадь под -линией, получим значение интеграла

$$\int_{\text{резонанс}} \sigma_0(E) dE = (\pi\lambda)^2 \cdot \frac{2I_r + 1}{2I_0 + 1} \cdot \frac{\Gamma_0^2}{\Gamma} = (\pi\lambda)^2 \cdot \frac{2I_r + 1}{2I_0 + 1} \cdot \Gamma_0.$$

т.к.  $\Gamma = \Gamma_0$ .

Таким образом вся вероятность -перехода заключается в ширине  $\Gamma_0$ . Матричный элемент перехода  $\langle r|V|g.s.\rangle$ , где  $|r\rangle$ , и  $|g.s.\rangle$ -волновые функции резонансного и основного состояния, а  $V$ -оператор электромагнитного перехода. В отсутствии спинов у частиц вид операторов был следующий:

$$V_{JM}^E = -\frac{1}{c} \sum_{a=1}^A \frac{e_a}{m_a} \cdot \vec{A}_{JM}^E \cdot \vec{p}_a, \quad \text{или} \quad V_{JM}^M = -\frac{1}{c} \sum_{a=1}^A \frac{e_a}{m_a} \cdot \vec{A}_{JM}^M \cdot \vec{p}_a.$$

где -  $\vec{A}_{JM}^M$  или  $\vec{A}_{JM}^E$  векторный мультипольный потенциал соответствующего фотона.

$V_{JM}^M \sim \hat{\Omega}_{JM}^M$  Для  $\Gamma_0$  имеет место слудующее выражение:

$$\Gamma_0 = 8\pi \sum_{J=1}^{\infty} \sum_{M=-J}^J \frac{(J+1)}{J[(2J+1)!!]^2} \left( \frac{E_r}{\hbar c} \right)^{2J+1} [|\langle r | \hat{\Omega}_{JM}^E | 0 \rangle|^2 + |\langle r | \hat{\Omega}_{JM}^M | 0 \rangle|^2].$$

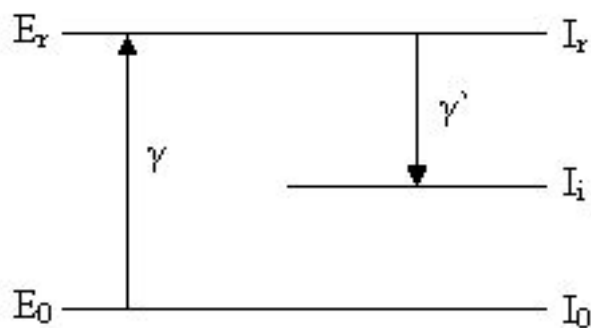
где в квадратных скобках стоят квадраты матричных элементов EJ-перехода и MJ-перехода.

Вообще говоря ,  $\hat{\Omega}_{JM}^M$  содержат не только орбитальную, но и спиновую части, т.е. содержат зависимости от спина частиц мишени. Если один из ядерных спинов ( $I_0$  или  $I_r$ ) равен нулю, то в выражении остается вклад только от фотона одного типа и мультипольности. Таким образом, если известна волновая функция начального состояния (а она часто известна с хорошей точностью) то мы, по - существу, получаем сведение о волновой функции конечного состояния.

# Эффект Мёссбауэра

ЯРФ - процесс возбуждения ядерного состояния фотоном с энергией, соответствующей энергии возбуждения данного состояния, и последующим распадом с испусканием другого фотона  $\gamma'$  (в том числе и в основное состояние - так наз. чистая ЯРФ).

Резонансное поглощение может иметь место только в том случае, когда энергия отдачи ядра  $R$  меньше ширины ядерного уровня.



ЯРФ - исключительно мощный метод изучения ядерной структуры. В нем поглощаемой и излучаемой частицей является фотон. Взаимодействие носит чисто электромагнитный характер, что позволяет получать модельно независимую информацию о ядерных состояниях.

# Область энергий ЯРФ



Это область - ниже и в районе порога отделения нуклона из ядра, то есть там, где вероятность -распада возбужденного уровня достаточно велика. Область ЯРФ обычно не простирается выше  $15$  МэВ (чаще всего до  $10$  - $12$  МэВ). Эта область показана на схематическом рисунке зависимости сечения поглощения фотонов ядром от энергии для типичного ядра.

# Применение эффекта Мёссбауэра

Эффект резонанса, как правило, наблюдается только в твердом теле для ядер стабильных изотопов (их насчитывается около 80), наиболее широкое применение среди которых нашли  $\text{Fe}^{57}$  и  $\text{Sn}^{119}$ . Измерения вероятности эффекта Мёссбауэра и ее зависимости от температуры позволяют получить сведения об особенностях взаимодействия атомов в твердых телах и колебаниях кристаллической решетки. *Благодаря этому мессбауровский эффект широко применяется как метод исследования твердых тел.*

# Применение эффекта Мёссбауэра

Коробки

Есть

Излучение

и поглощение

в твердых

телах и

фотоны

или

особенно

острой

резонансности

структуры.

Вывод

фотона

(т.е.

резонансности

фазовых

в переходных

*С помощью него можно изучать:*

# Мессбауэровский спектрометрия

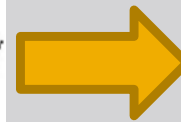
ЯРФ не удавалось долго осуществить. для ядерных уровней в силу большой отдачи ядра (ее надо учитывать дважды - при испускании фотона и при последующем его поглощении ядром) энергия фотона оказывается недостаточной, чтобы (даже с учетом ширины уровня) вновь его возбудить.

Получим формулу для оценки отдачи ядра при испускании фотона.

При  $\alpha$ -переходе энергия перехода  $E$  делится между  $\gamma$ -квантом и ядром отдачи (с массой  $M_{\alpha} = M$ ).

$$E = E_{\gamma} + E_{\alpha} = p_{\gamma}c + \frac{p_{\alpha}^2}{2M_{\alpha}} = pc + \frac{p^2c^2}{2Mc^2} = E_{\gamma}\left(1 + \frac{E_{\gamma}}{2Mc^2}\right) \approx E_{\gamma}$$

$p_{\gamma} = p_{\alpha} = p, \quad pc = E_{\gamma}$

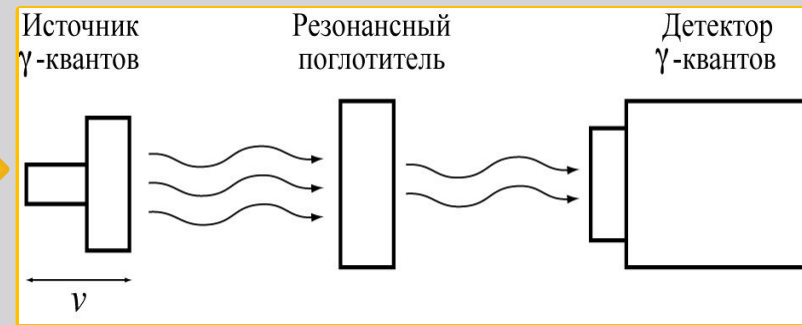


$$E_{\alpha} = \frac{E_{\gamma}^2}{2Mc^2} \approx \frac{E^2}{2Mc^2}$$

Схема



спектрометра:

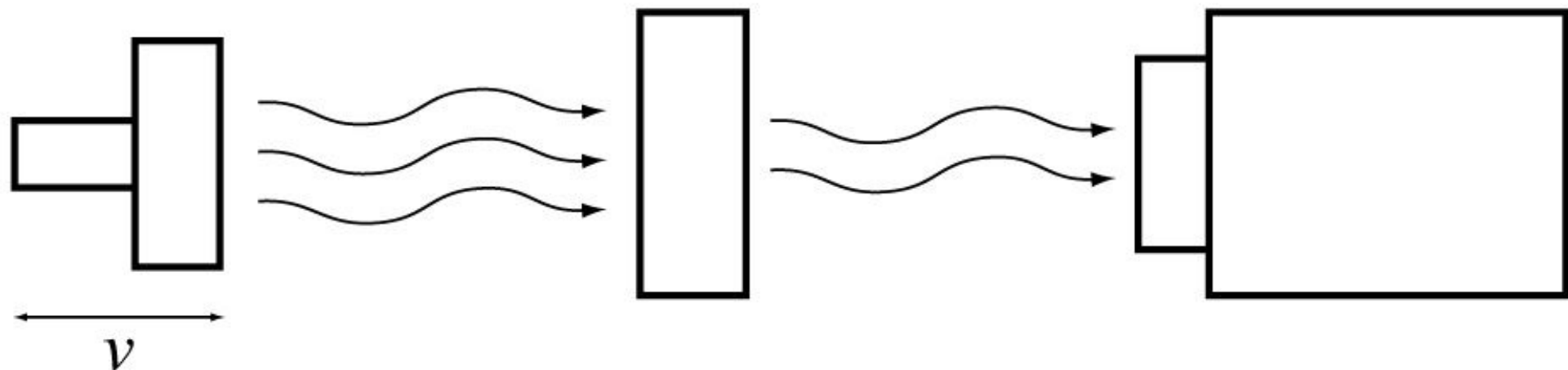


# Упрощенная схема мёссбауэровского спектрометра

Источник  
 $\gamma$ -квантов

Резонансный  
поглотитель

Детектор  
 $\gamma$ -квантов



Источник гамма-квантов с помощью механического или электродинамического устройства приводится в возвратно-поступательное движение со скоростью относительно поглотителя. С помощью детектора измеряется зависимость интенсивности потока  $\gamma$ -квантов, прошедшего через поглотитель, от скорости.



# Мёссбауэровская спектроскопия

- Мёссбауэровская спектроскопия

- абсорбционная

- ЭМИССИОННАЯ

- исследуемый материал является поглотителем гамма-квантов, и для получения мёссбауэровского спектра необходимо, чтобы содержание мёссбауэровских атомов в исследуемом образце составляло несколько процентов от общего числа атомов.
    - объектом исследования являются вещества, в которые введены радиоактивные ядра, образующиеся в результате ядерных превращений и последующего распада гамма-переходов в возбужденное ядро, испускающее резонансные гамма-кванты.

# Мёссбауэровская спектроскопия

- Метод мёссбауэровской спектроскопии является одним из основных методов изучения структуры железосодержащих наночастиц. Легирование железом позволяет изучать многие другие наноструктурированные материалы и некоторые процессы, происходящие на наноуровне (например, процесс выхода примесей на поверхность наночастиц, кинетику процессов образования наночастиц и т. д.

**СПАСИБО**

**ЗА**

**ВНИМАНИЕ!**