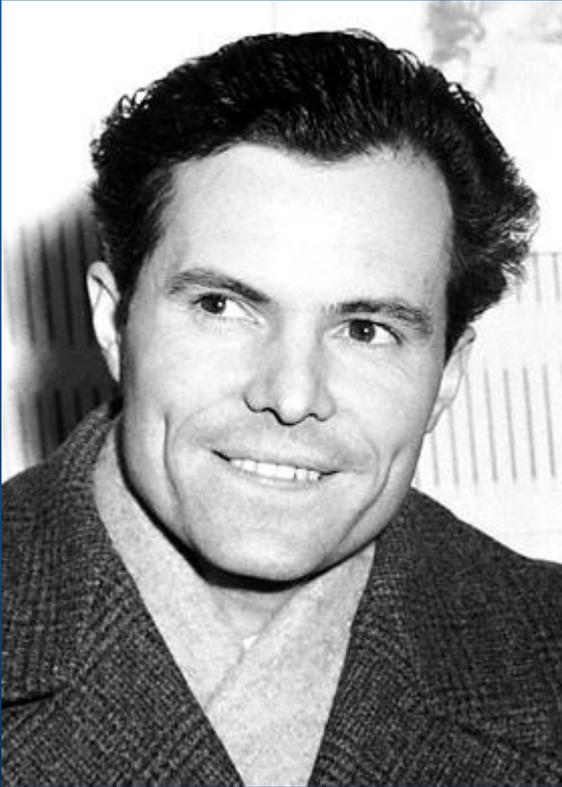


МЕССБАУЭРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ – ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ФИЗИКИ

Чистякова Н.И., Селиверстов А.В.
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

Рудольф Людвиг Мёссбауэр



- Рудольф Людвиг Мёссбауэр (нем. Rudolf Ludwig Mößbauer; 31 января 1929 года, Мюнхен — 14 сентября 2011 года, Грюнвальд) — немецкий физик, специалист в физике атомного ядра и элементарных частиц, лауреат Нобелевской премии по физике за 1961 год «за исследование резонансного поглощения гамма-излучения и открытие в этой связи эффекта, носящего его имя».

Рудольф Людвиг Мёссбауэр



Рудольф Мёссбауэр родился в Мюнхене, получив начальное образование в местных школах, он поступил затем в гимназию, которую закончил в 1948 г. Некоторое время Мёссбауэр работал в оптической фирме и несмотря на несомненный талант пианиста, Рудольф решил заниматься физикой, для чего поступил в Технический институт Мюнхена. В 1952 г. — стал бакалавром, в 1955 г. — магистром. В течение академического 1953/54 года работал преподавателем математики в том же университете.

В 1955—1957 работал над докторской диссертацией, исследуя поглощение гамма-лучей на физическом отделении Института медицинских исследований Общества Макса Планка в Гейдельберге, где впервые наблюдал явление резонансного поглощения γ -лучей без отдачи — ядерный гамма-резонанс. В январе 1958 года Мёссбауэр стал стипендиатом-исследователем в Мюнхенском техническом университете (TUM), где под руководством профессора Хайнца Майера-Лейбница защитил докторскую диссертацию.

Рудольф Людвиг Мёссбауэр

- В 1959 году принял приглашение Ричарда Фейнмана продолжить исследования поглощения γ -лучей в Калифорнийском технологическом институте (Caltech) в Пасадене (США) в качестве научного сотрудника, а затем старшего научного сотрудника. В 1961 году Мёссбауэр получил должность профессора физики.
- В 1961 году Мёссбауэр получил Нобелевскую премию по физике «за исследование резонансного поглощения гамма-излучения и открытие в этой связи эффекта, носящего его имя».
- В 1965 году Рудольф вернулся в Мюнхен, на должность профессора в TUM, где его заинтересовала нейтринная физика. Возвращение выдающегося учёного произвело впечатляющий эффект на развитие физики в Германии. Ряд учёных немецкого происхождения вслед за Мёссбауэром вернулись в Германию. Это возвращение впоследствии в шутку назвали «вторичным эффектом Мёссбауэра».

СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА

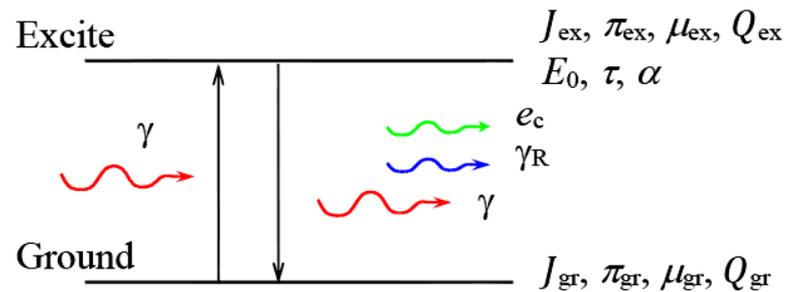
Эффект Мессбауэра – явление резонансного испускания, поглощения или рассеяния γ -квантов ядрами в твердом теле без потери энергии на отдачу.

Ядерный энергетический переход и спонтанное излучение ядра

${}^A_Z\text{B} : {}^{57}_{26}\text{Fe}, {}^{119}_{50}\text{Sn}, N, Z, A=N+Z, eZ$

$w - \text{const}(t), \tau = 1/w, \Gamma = \hbar/\tau = \hbar w$

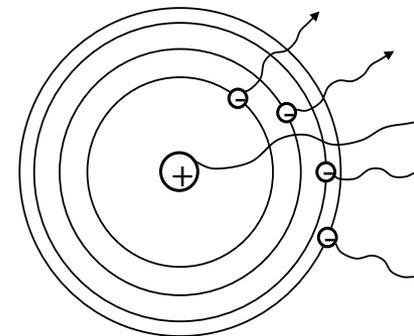
$w = w_\gamma + w_e, \alpha \equiv \frac{w_e}{w_\gamma}, \alpha({}^{57}\text{Fe}) = 9.1$

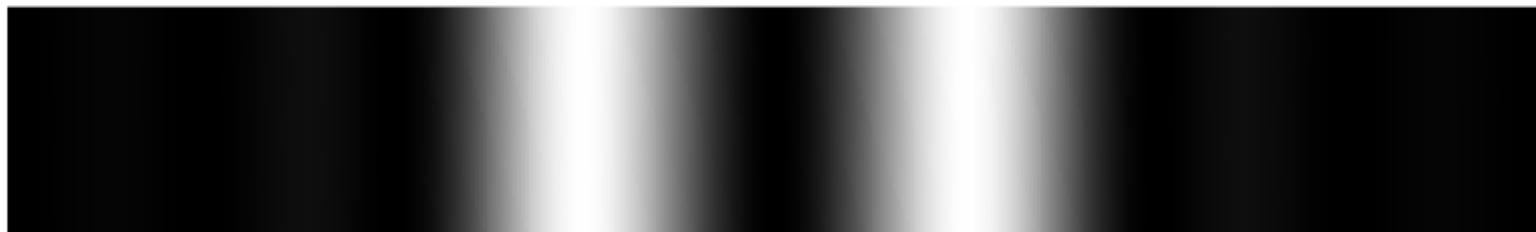
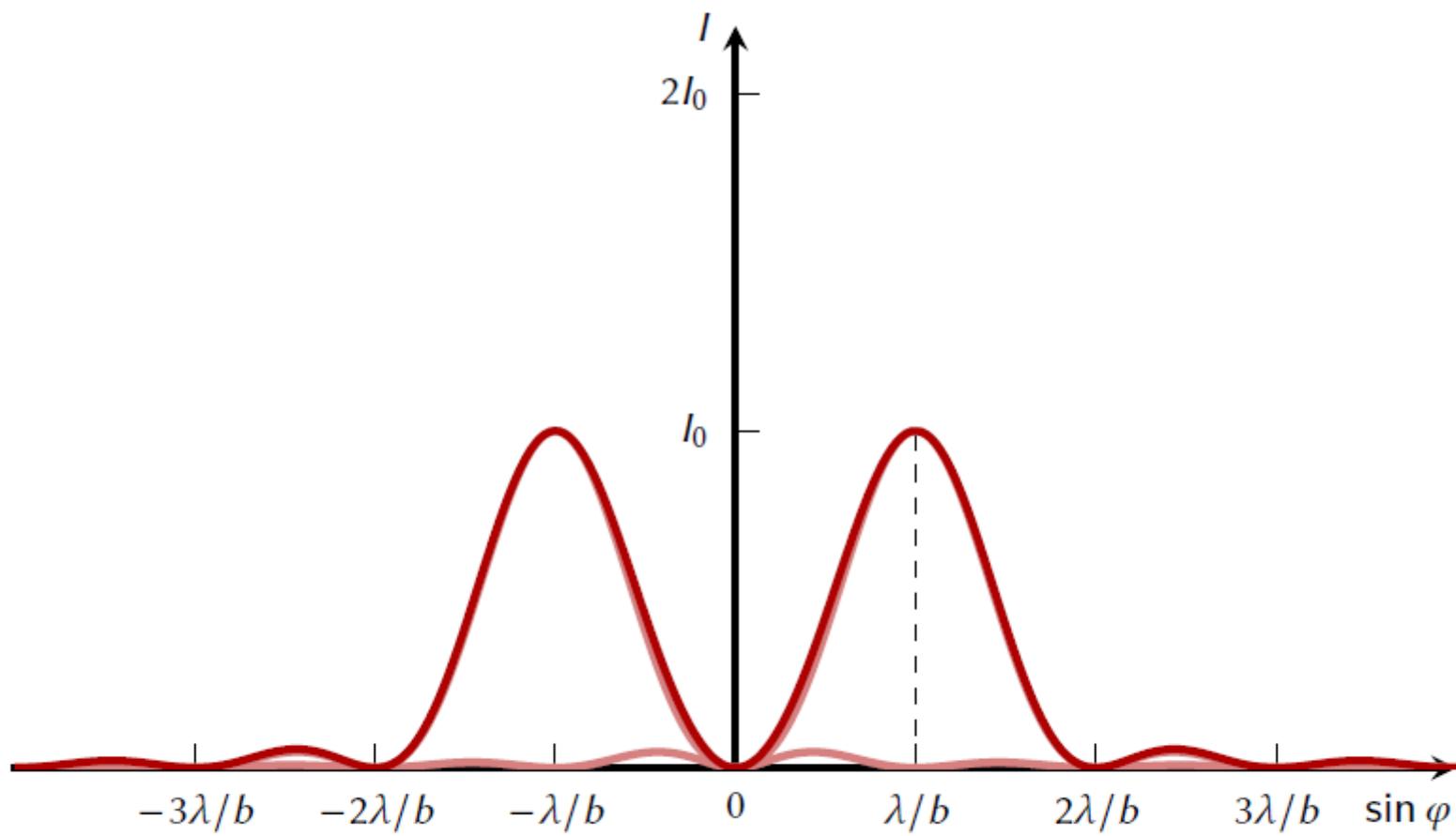


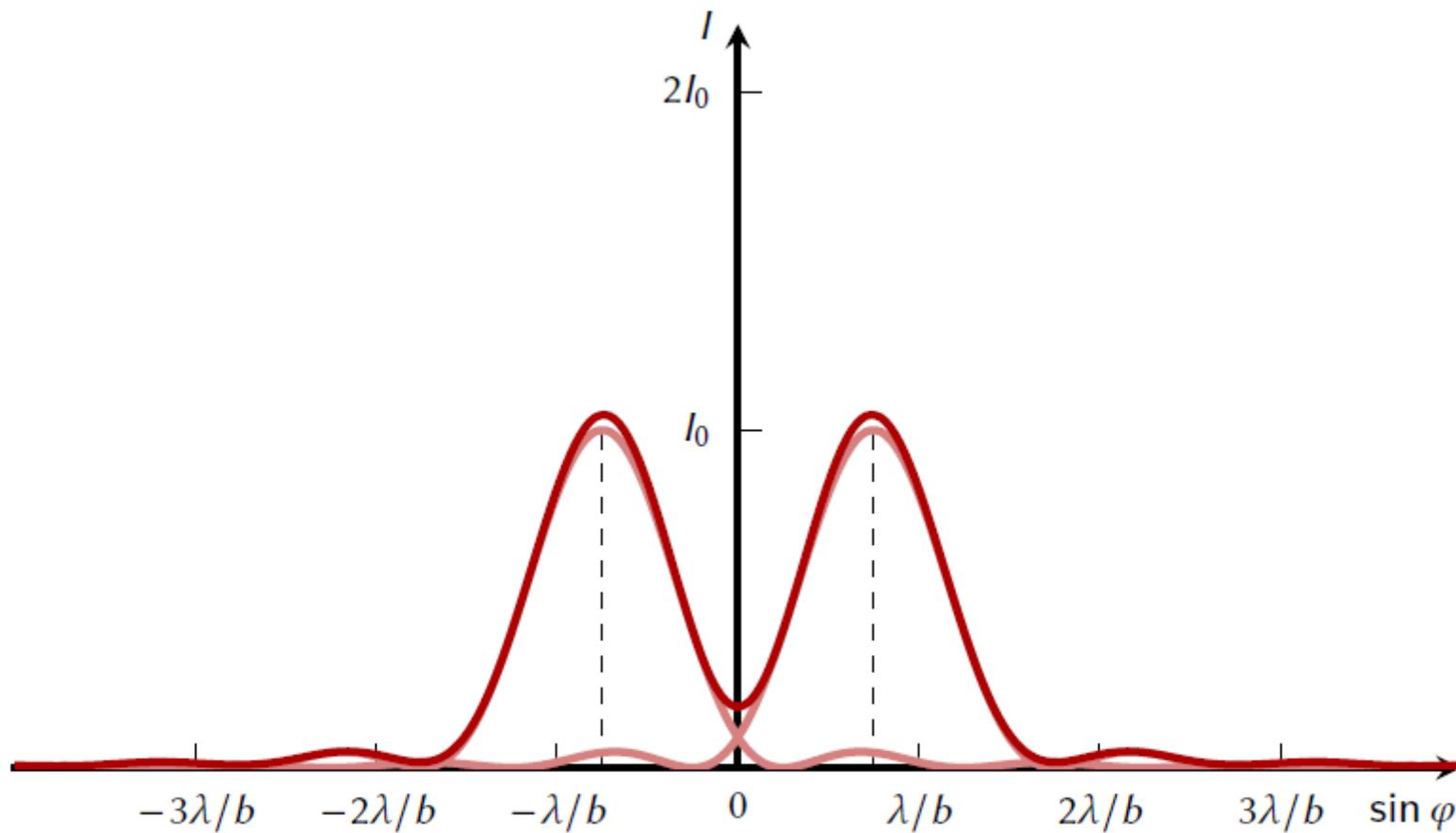
Закрепленное ядро –
$$W_L(E - E_0) = \frac{2}{\pi\Gamma} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{E - E_0}{\Gamma/2}\right)^2}$$

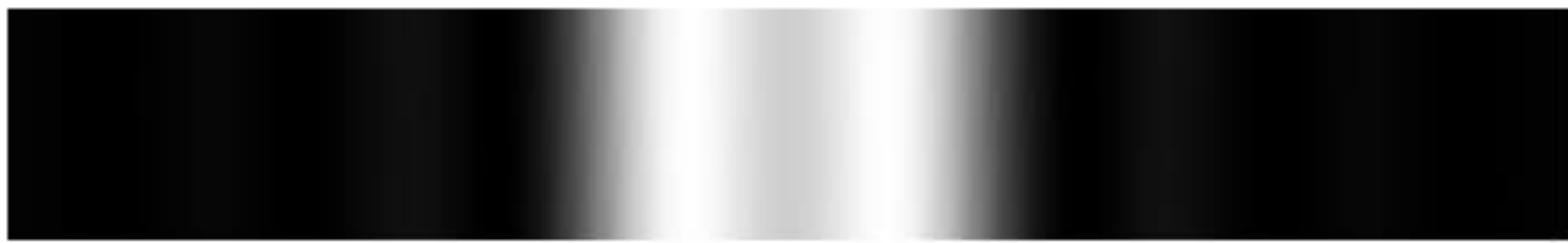
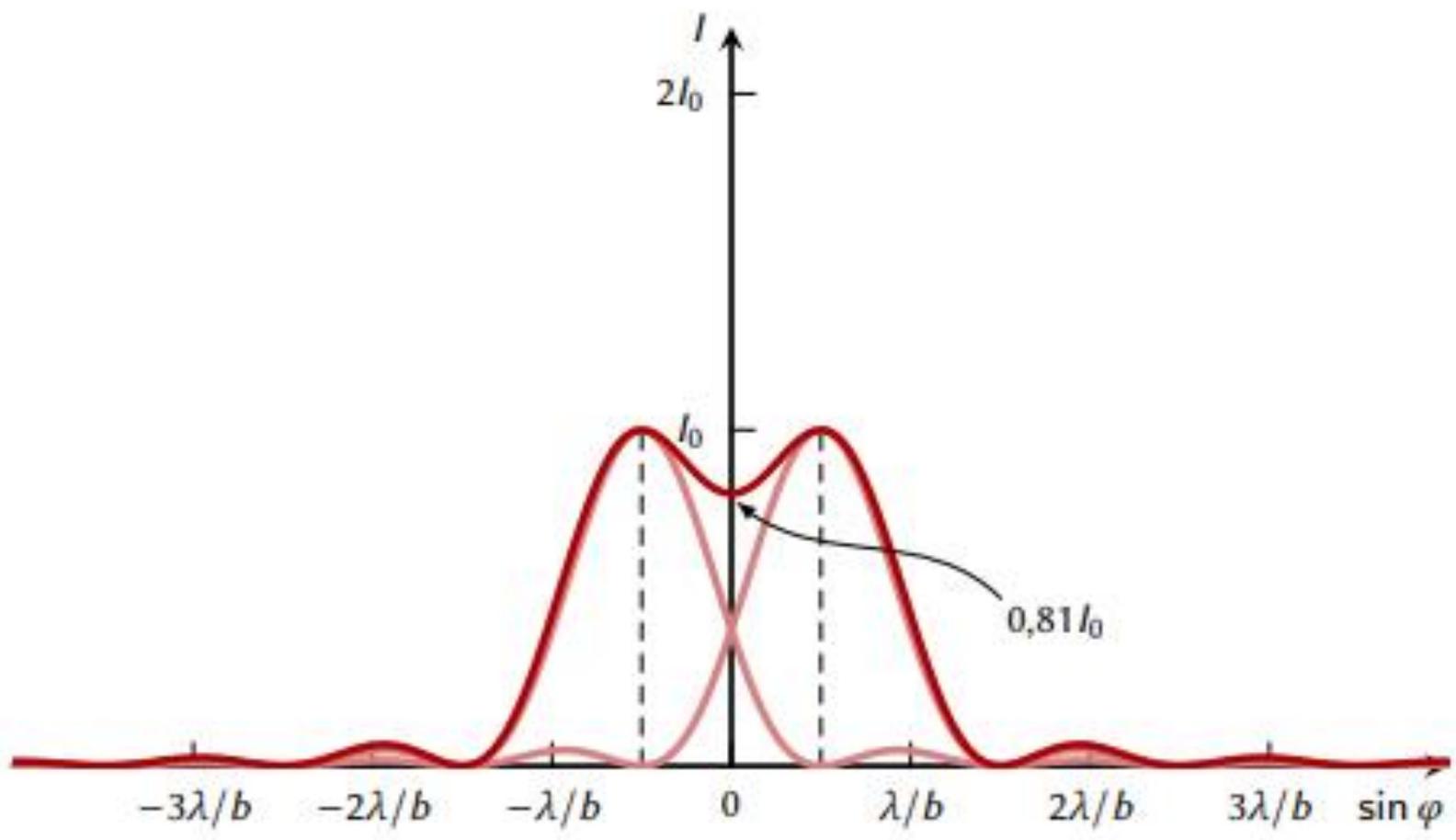
${}^{57}\text{Fe}: E_0 \cong 14,4 \text{ кэВ}, \tau = 1,10^{-7} \text{ с}, \Gamma \cong 5 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}$

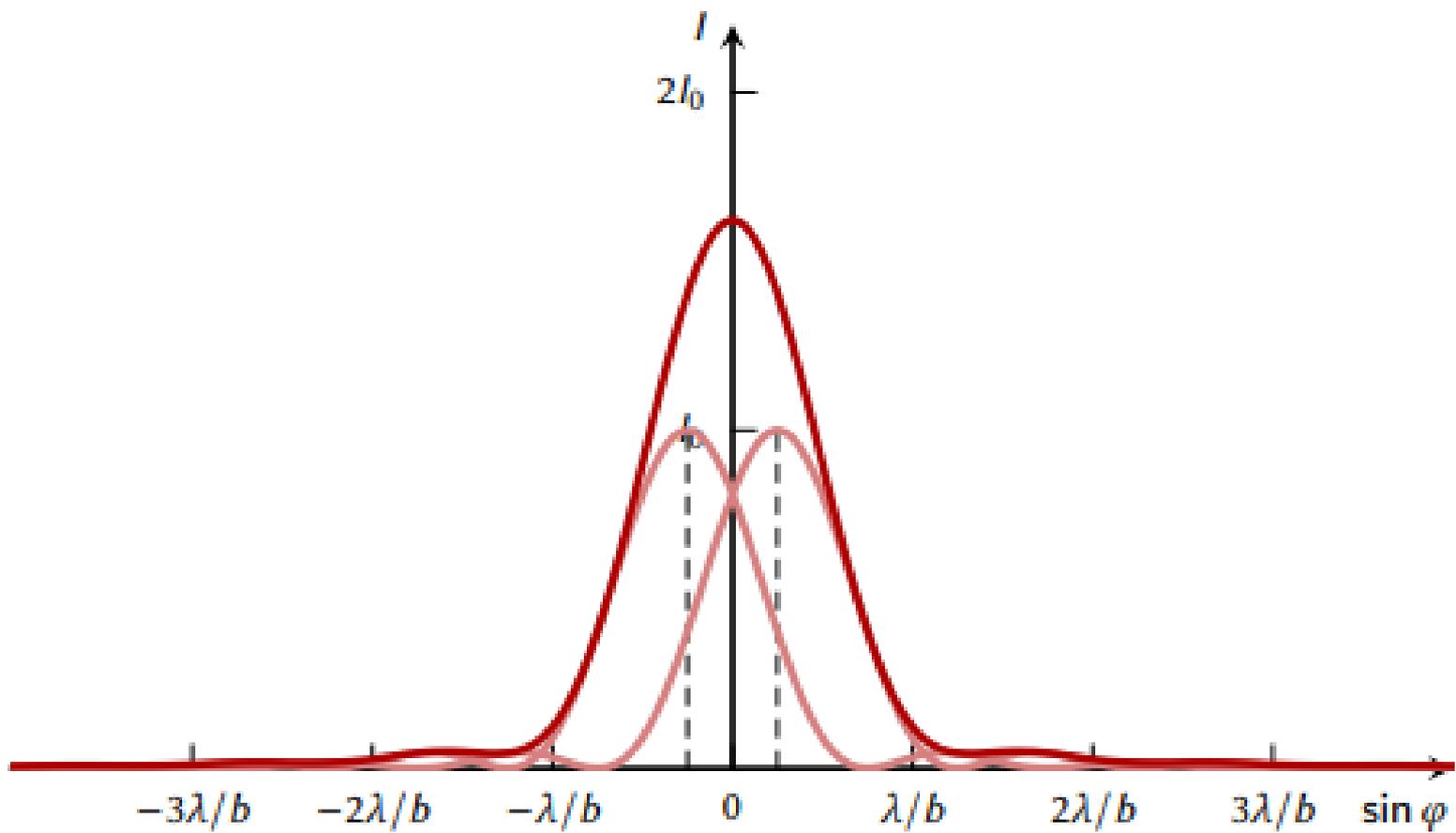
$E_0/\Gamma \cong 3 \cdot 10^{12} - !!!$











СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА

Свободное покоящееся ядро

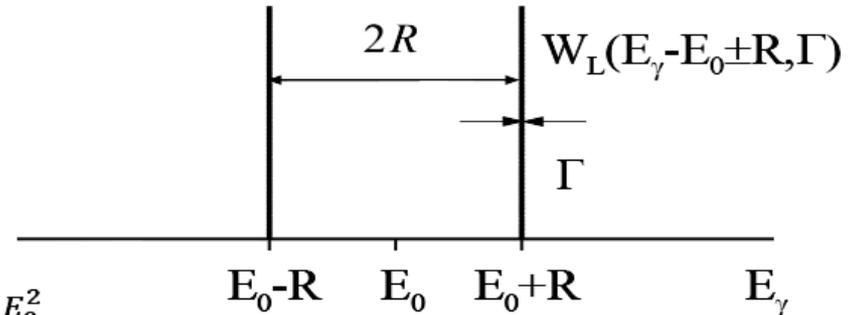


Законы сохранения импульса и энергии:

$$0 = -P + p_\gamma, \quad E_0 = \frac{P^2}{2m} + E_\gamma,$$

$$P = p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c}.$$

Линия испускания Линия поглощения



Энергия отдачи R :

$$R \equiv E_0 - E_\gamma = \frac{P^2}{2m} = \frac{p_\gamma^2}{2m} = \frac{E_\gamma^2}{2mc^2} = \frac{(E_0 - R)^2}{2mc^2} \cong \frac{E_0^2}{2mc^2};$$

$$E_\gamma = E_0 - R, \quad R \cong \frac{E_0^2}{2mc^2}; \quad \underline{E_0 \gg R \gg \Gamma_\tau}.$$

$$^{57}\text{Fe}: E_0 = 14.4 \text{ кэВ}, \quad R \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}, \quad \Gamma_\tau \cong 5 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}, \quad \underline{R/E_0 \sim 1.4 \cdot 10^{-7}}, \quad \underline{R/\Gamma_\tau \sim 4 \cdot 10^5}.$$

СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА

Свободное покоящееся ядро

Потеря энергии на отдачу

Доплеровское уширение линии

Форма линии Гаусса:

$$W_G(E_\gamma) = \text{const} \cdot e^{-\left(\frac{E_\gamma - (E_0 - R)}{D}\right)^2},$$

$$D = 2\sqrt{k_B T R}.$$

Ширина на половине высоты:

$$\Gamma_G = 2\sqrt{\ln 2} \cdot D \cong 1.67 \cdot D.$$

$$E_0 \gg \Gamma_G \gg \Gamma_\tau.$$

^{57}Fe : $E_0 = 14.4$ кэВ, $\Gamma_\tau \cong 5 \cdot 10^{-9}$ эВ, $R \cong 2 \cdot 10^{-3}$ эВ;

при $T = 4\text{K}$: $D \cong 1.6 \cdot 10^{-3}$ эВ, $D/\Gamma_\tau \sim 3 \cdot 10^6$, $D \sim R$;

при $T = 300\text{K}$: $D \cong 1.4 \cdot 10^{-2}$ эВ, $D/\Gamma_\tau \sim 3 \cdot 10^5$; $D > R$.

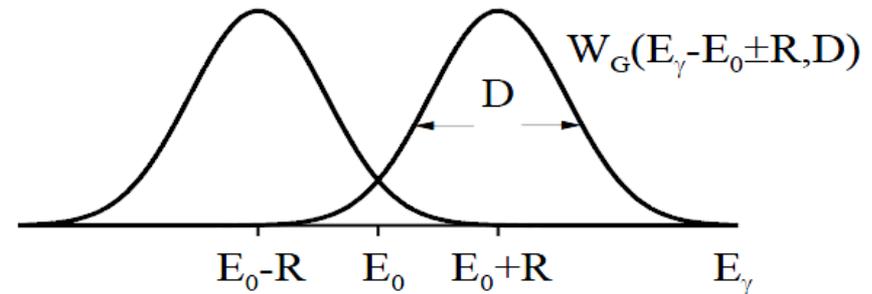
Филипп Б. Мун (Англия), 1951 г. – γ -резонанс за счет движения источника относительно поглотителя

$$\left(v = \frac{c}{E_0} \cdot R \sim 100 \text{ м/с}\right).$$

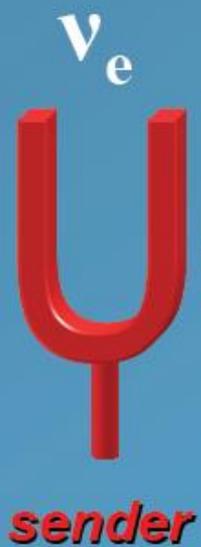
Карл Малфорс (Швеция), 1952 г. – γ -резонанс за счет перекрытия линий испускания и поглощения.

$$S: {}^{198}\text{Au}; A: {}^{198}\text{Hg}, E_0 = 411 \text{ кэВ}; T \uparrow \downarrow \Rightarrow D \uparrow \downarrow \Rightarrow \sigma \uparrow \downarrow \Rightarrow I_{\text{пр}} \downarrow \uparrow.$$

Линия испускания Линия поглощения



СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА



$$\nu_e = \nu_a$$

Nucleus 1

Nucleus 2

Excited state

E_e

Z,N

Ground state

E_g

Z,N

γ -rays

E_e

E_g

Sender

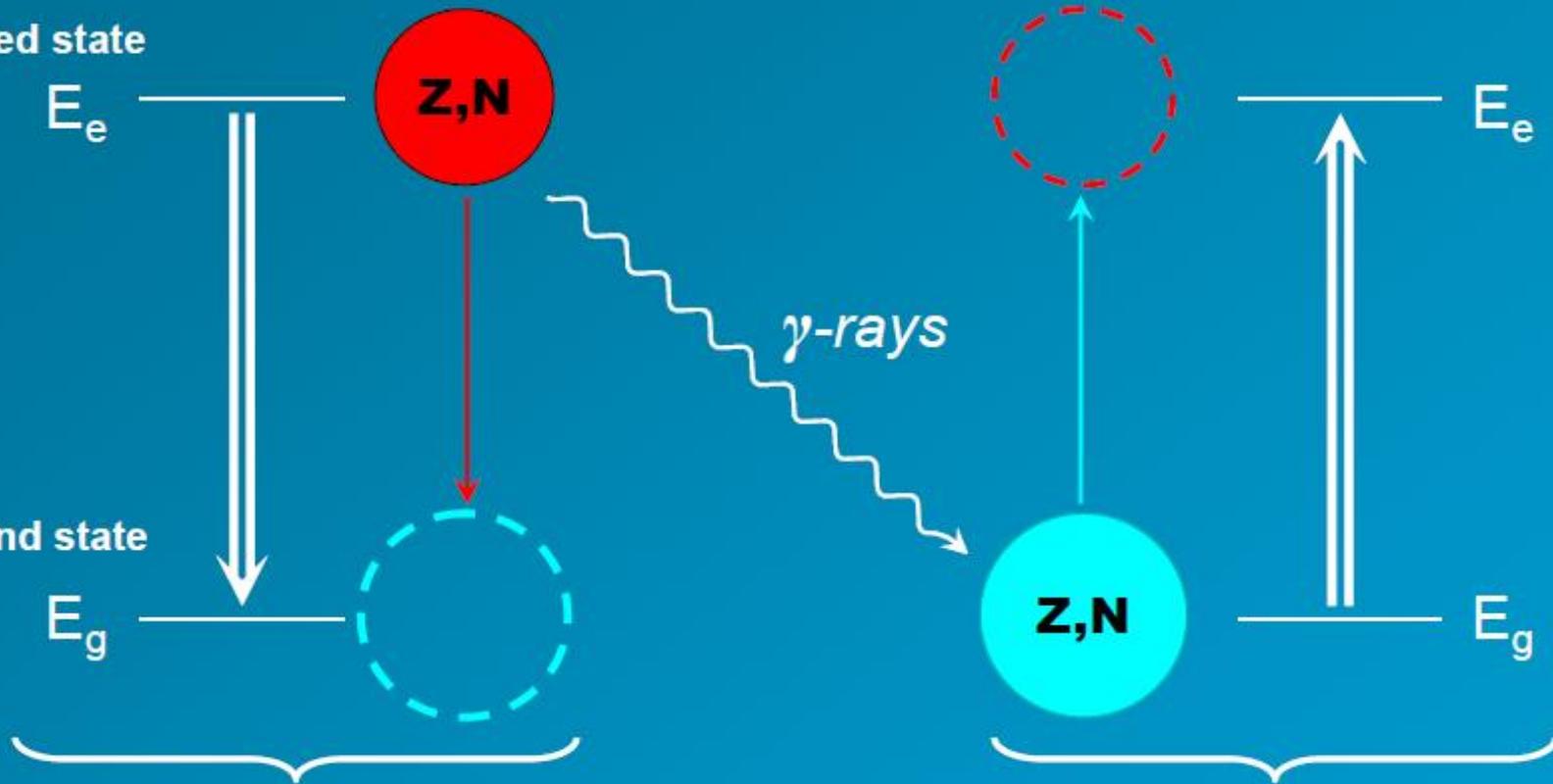
(Mössbauer Source)

Transmitted γ -rays

$$E_0 = E_a - E_g$$

Receiver

(Mössbauer Absorber)

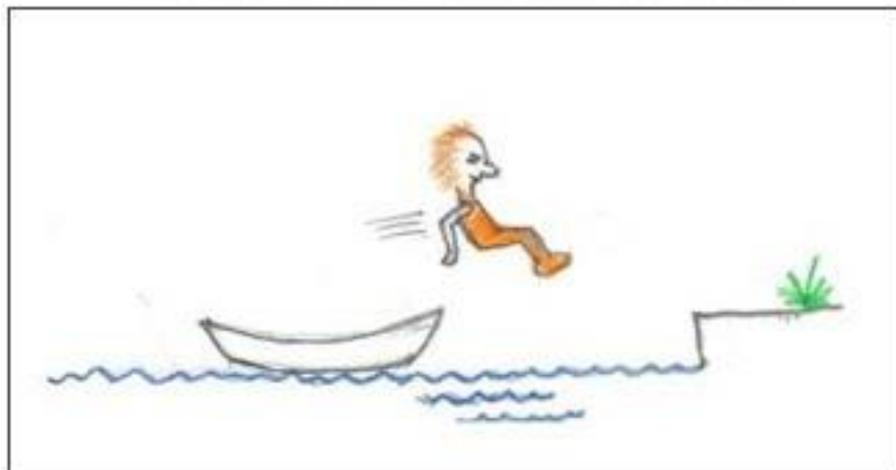


Рудольф Людвиг Мёссбауэр

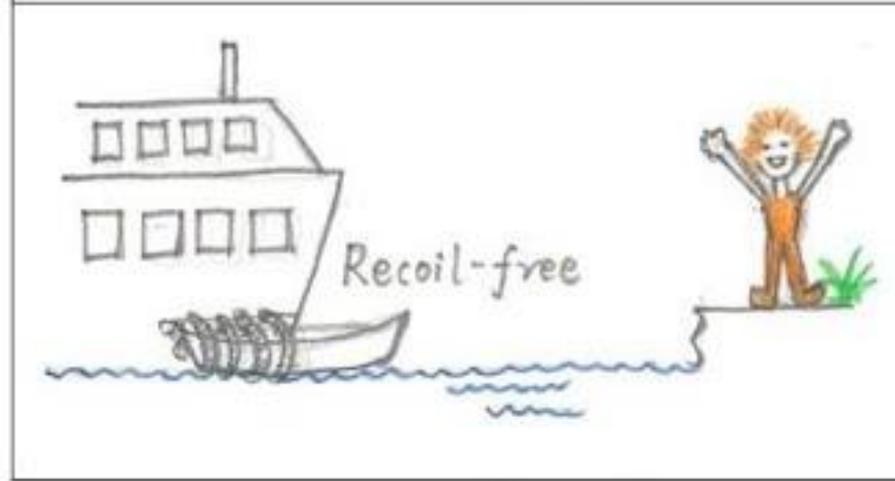
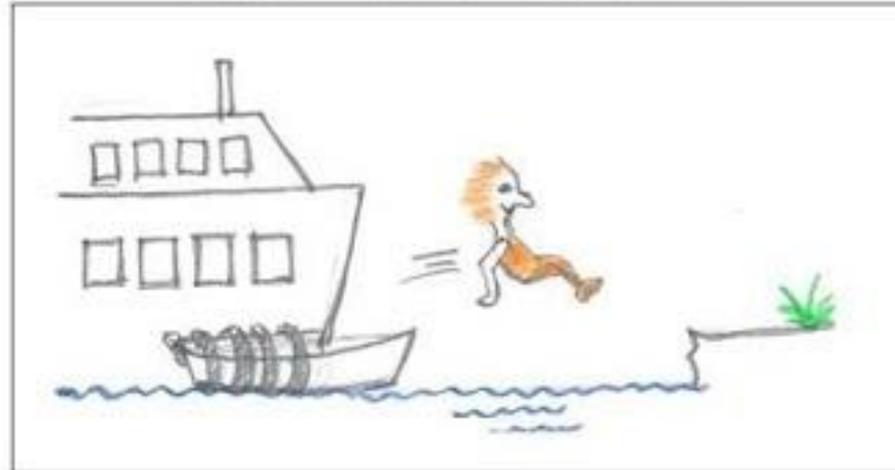
- «Ситуация напоминает человека, прицельно бросающего камень из лодки. Большую часть энергии согласно закону сохранения импульса получает легкий камень, но небольшая часть энергии броска переходит в кинетическую энергию получающей отдачу лодки. Летом лодка просто приобретет некоторое количество движения, соответствующее отдаче, и отплывет в направлении, противоположном направлению броска. Однако зимой, когда озеро замерзнет, лодку будет удерживать лед, 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».

СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА

No Mössbauer Resonance

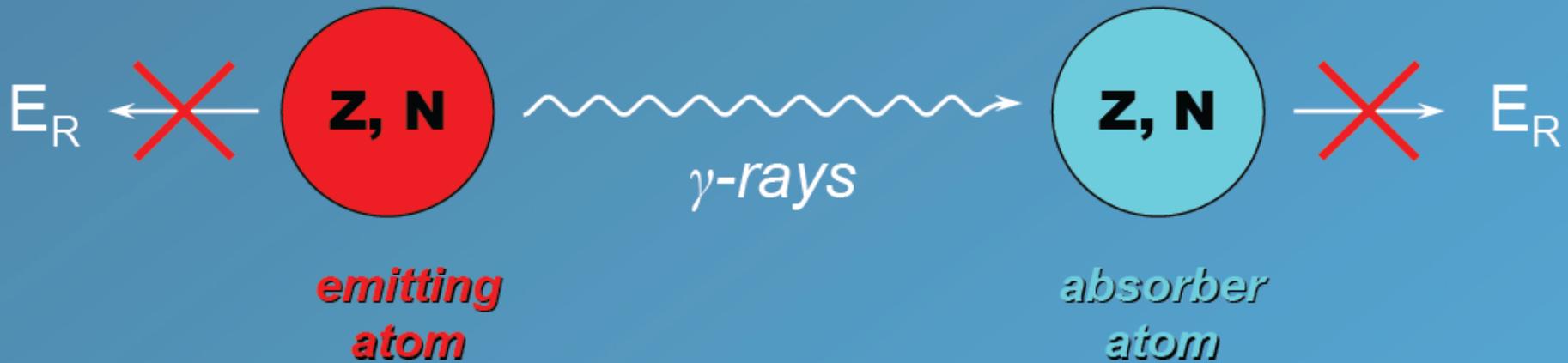


Yes! Mössbauer Effect



Lili Grao 2010

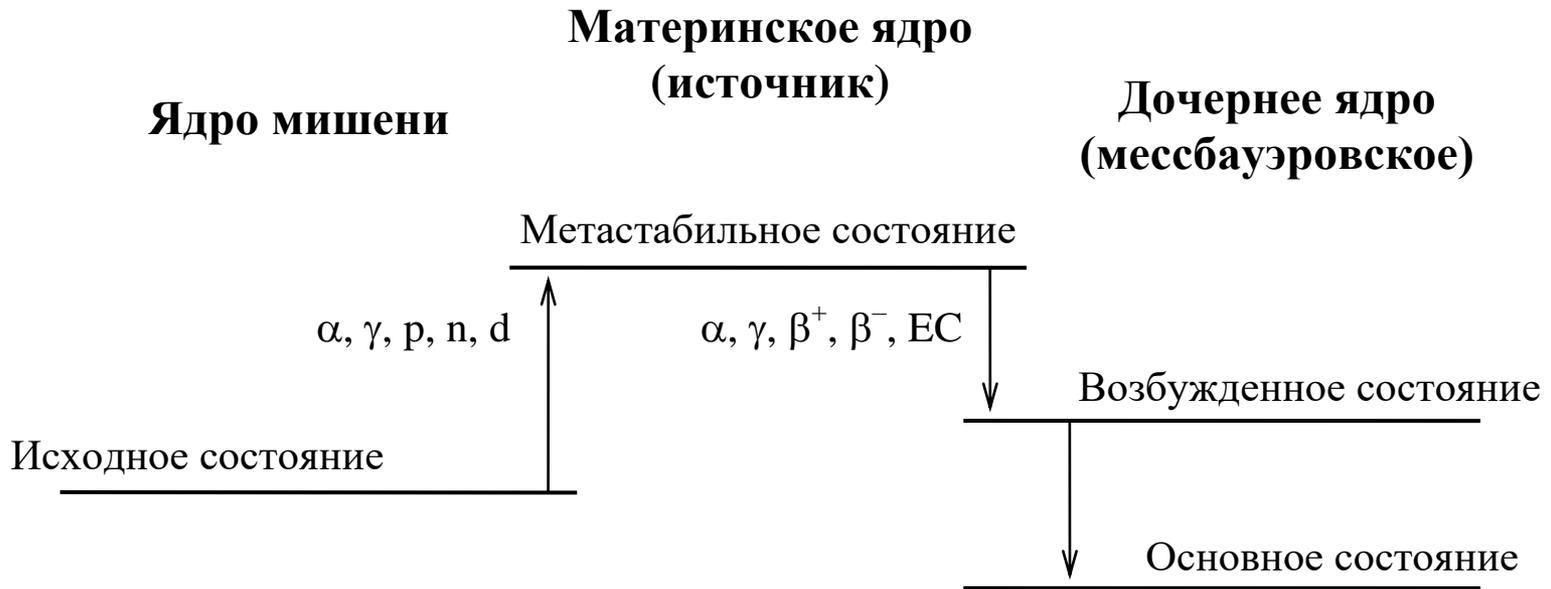
СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА



$$E_R = E_\gamma^2 / 2mc^2$$

СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА

Общая схема ядерных превращений в эффекте Мессбауэра



α, γ – облучение или испускание α -частиц и γ -квантов;

p, n – облучение протонами и нейтронами;

d – (disintegrate) деление ядра;

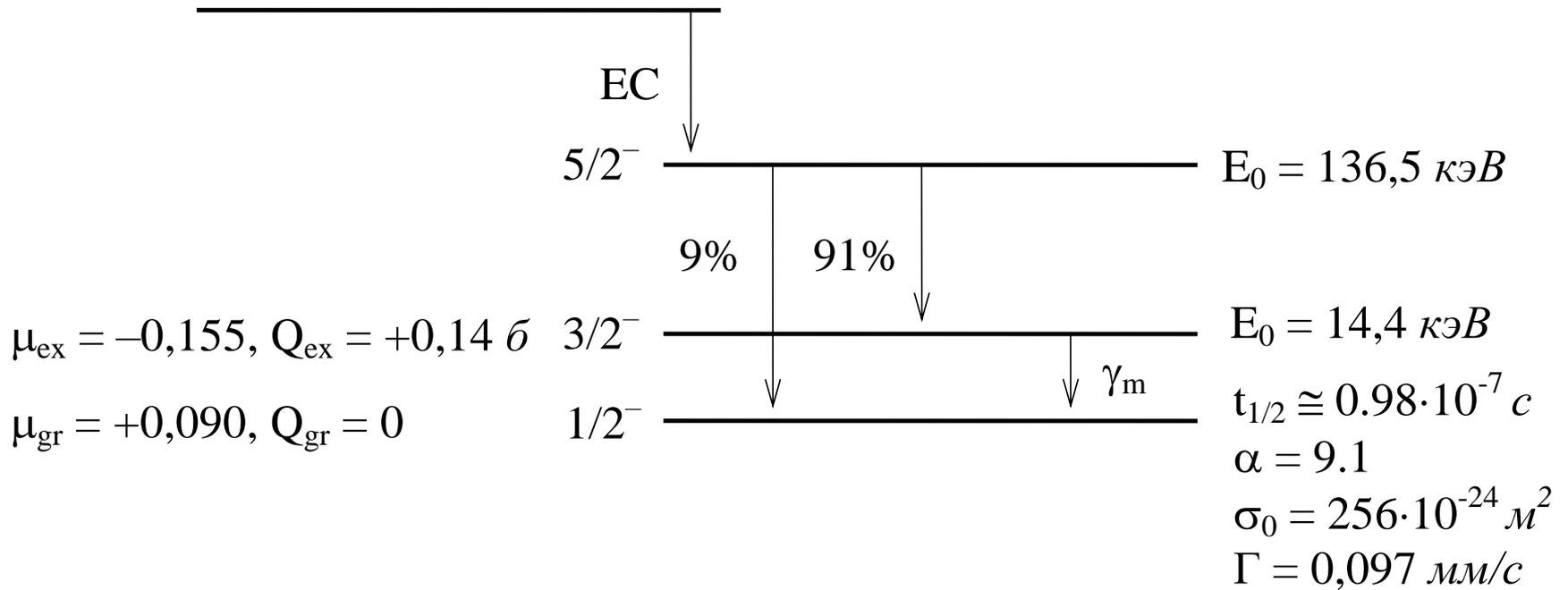
β^+, β^- – испускание позитронов и электронов;

EC – (electron capture) электронный захват.

Схема ядерных превращений для изотопа ^{57}Fe

массовое число $\rightarrow 57$
 атомный номер $\rightarrow 26$ Fe (2,14%)

$^{57}_{27}\text{Co}$ ($T_{1/2} = 270$ дн.)



ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА



Скорости движения источника S и приемника D звуковых колебаний.

$$v = \frac{v}{v - v_S} v_S$$

$$v_D = \frac{v - v_D}{v} v = \frac{v - v_D}{v - v_S} v_S$$

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА



$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \alpha} \quad \text{или} \quad \nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta},$$

где угол θ – угол между направлениями движения источника и вылета γ -кванта. В случае нерелятивистских скоростей движения источника $v \ll c$:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \cong \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right).$$

Продольный эффект Доплера (красное смещение) – $\theta = 0$ ($\alpha = \pi$):

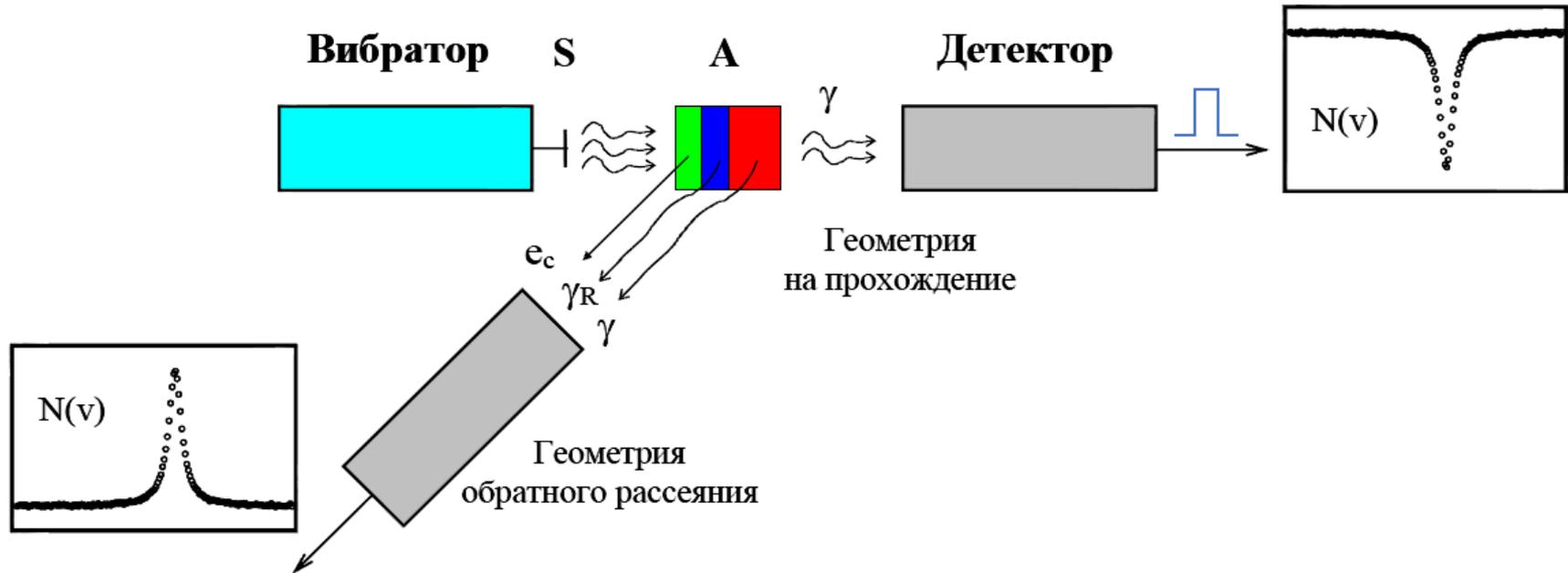
$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - v/c} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \cong \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right).$$

Поперечный эффект Доплера – $\theta = \pi/2$ ($\alpha = \pi/2$):

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - (v/c)^2} \cong \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right).$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР

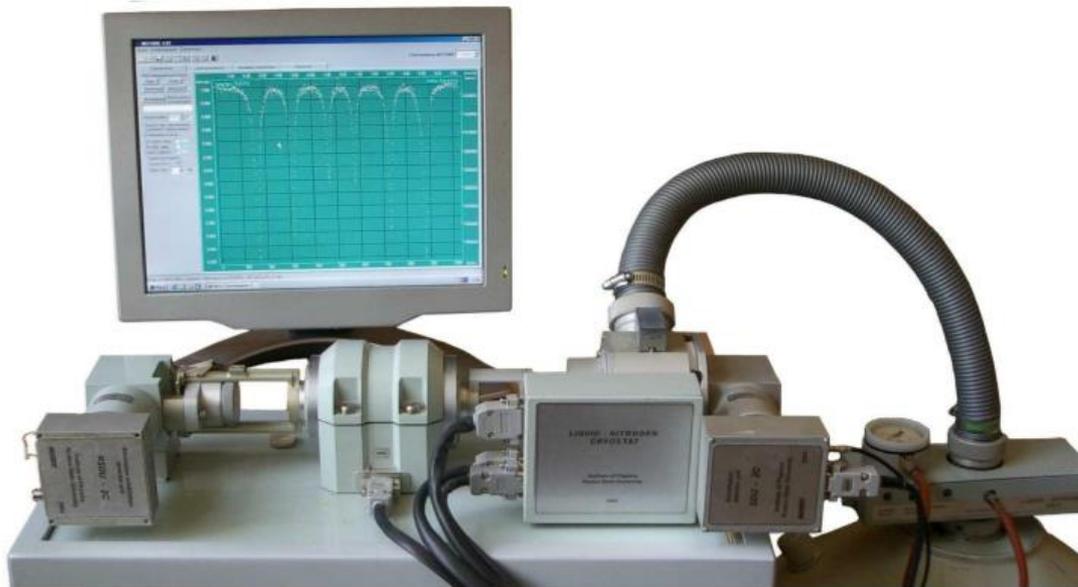
Схема регистрации спектра



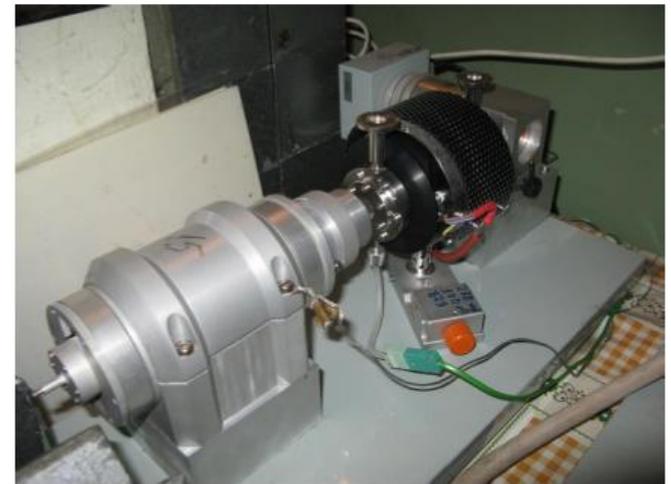
Объект регистрации (d – глубина проникновения или выхода из образца):

- e_c – электроны конверсии ($d < \sim 0.3$ мкм),
- γ_R – кванты рентгеновского вторичного излучения ($d \sim 20$ мкм),
- γ – γ -кванты ($d \sim 100$ мкм).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР



Мессбауэровский спектрометр
MS-1104Em
(НИИ физики Южного федерального университета)



Мессбауэровская печь
MBF-1100 (300 – 1100 K)
(Wissenschaftliche Electronic GmbH)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР



Азотный криостат
(78 – 300 К)

(ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений)



Гелиевый криостат замкнутого цикла SHI-
850-5 (4.2 – 500 К)
(JANIS RESEARCH)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР

Режимы работы спектрометра:

- **регистрация амплитудного спектра** – регистрация интенсивности счета электрических импульсов (γ -квантов) в зависимости от их амплитуды (энергии γ -квантов);

- **регистрация мессбауэровского (скоростного, энергетического) спектра** – регистрация интенсивности счета электрических импульсов (γ -квантов) в зависимости от доплеровской скорости движения источника относительно поглотителя $v(t)$ (энергии γ -квантов).

Законы периодического ($T \sim 0.1$ с)
изменения $v(t)$ (рис.):

а – постоянных ускорений пилообразной формы;

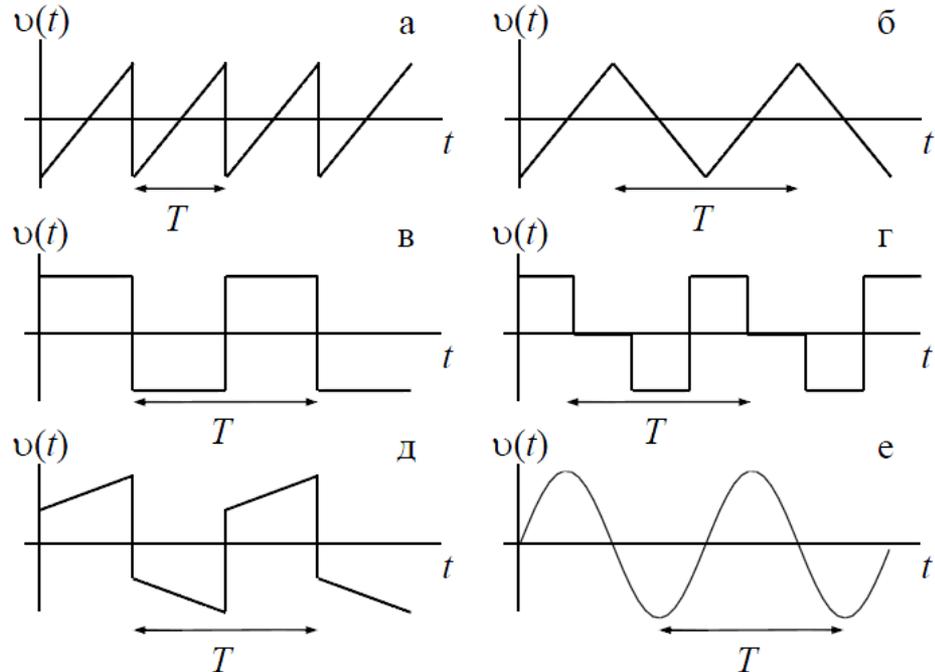
б – постоянных ускорений треугольной формы;

в – постоянных скоростей;

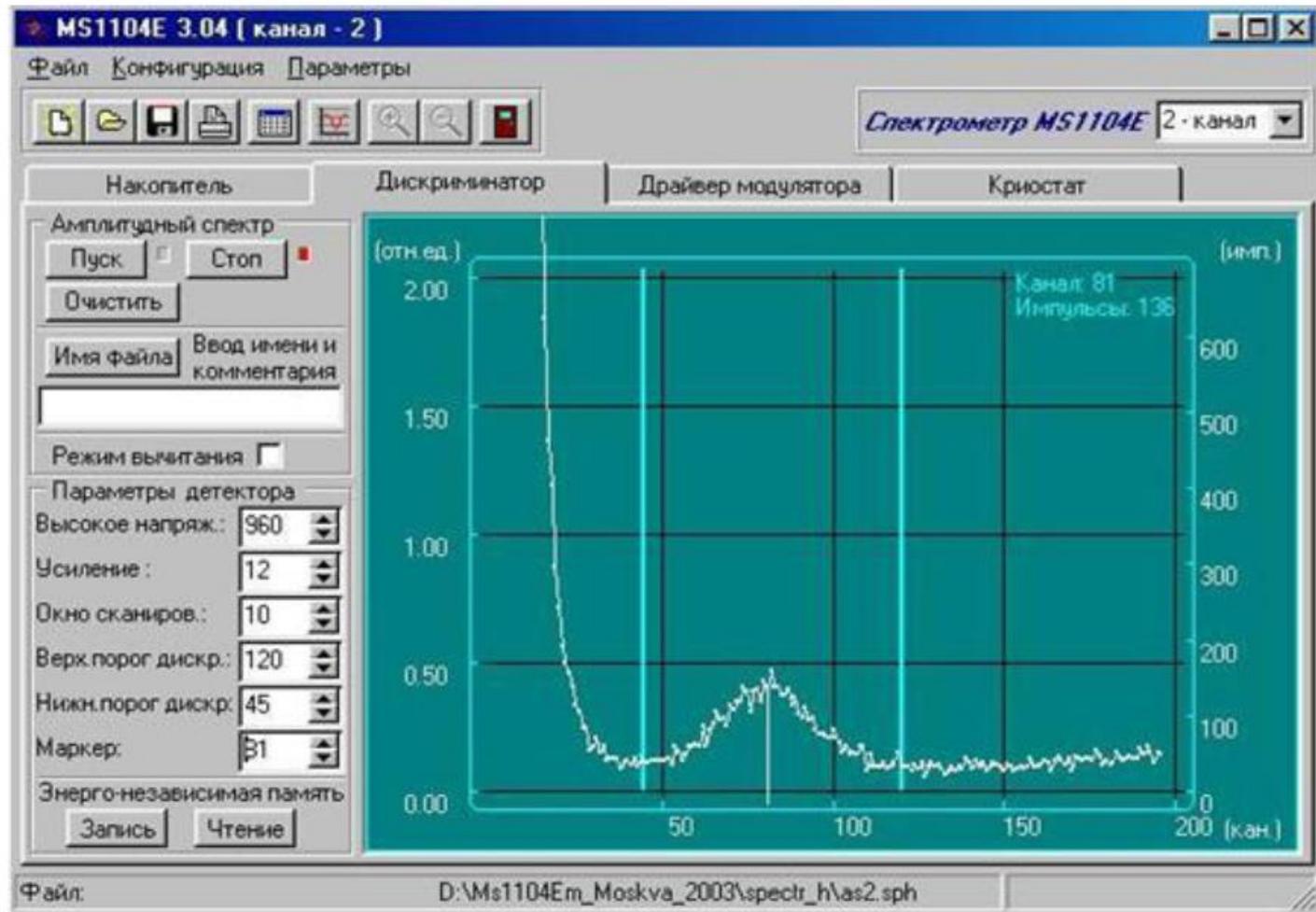
г – постоянных скоростей с фиксацией счета в "нулевом" канале;

д – трапецеидальный закон;

е – гармонический закон.

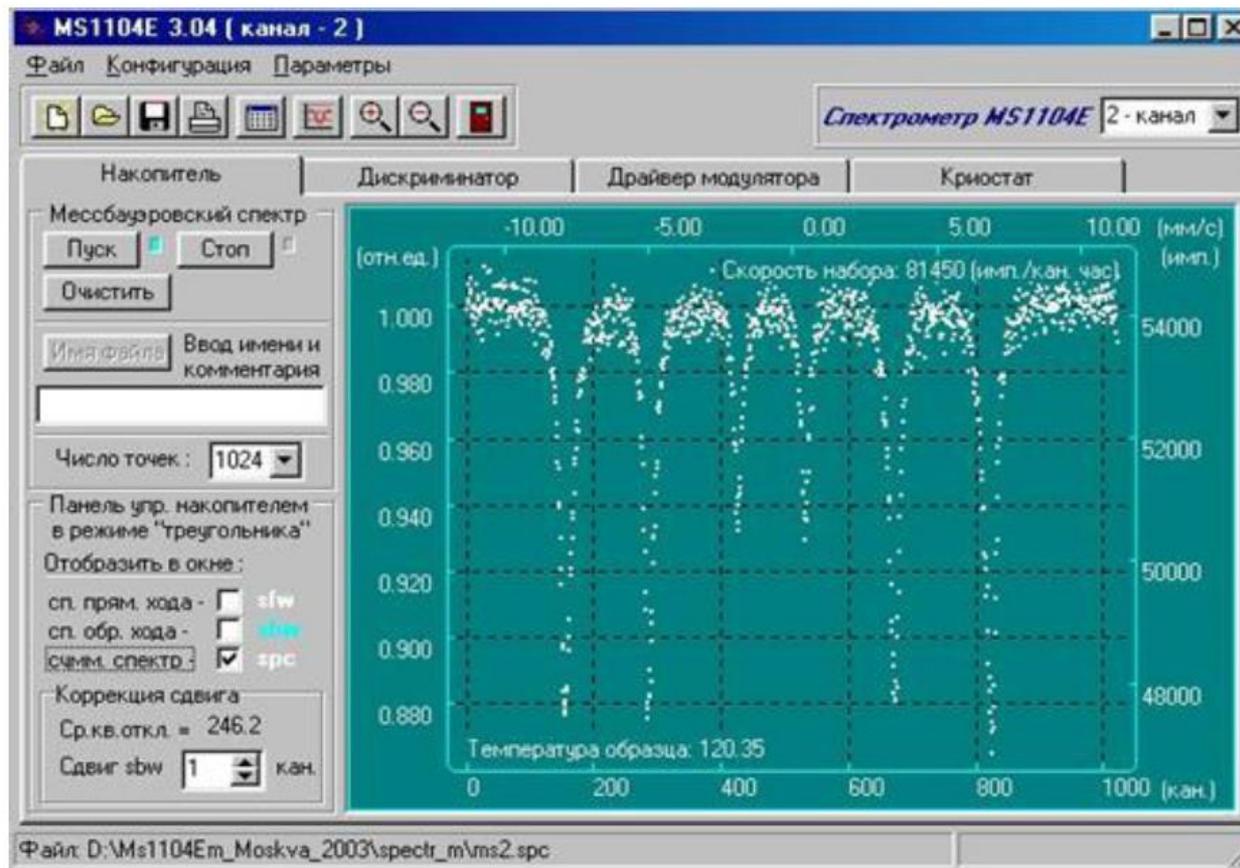


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР

Мессбауэровский (скоростной, энергетический) спектр $N(v_i) \equiv N_i$.



Мессбауэровский спектр в окне накопителя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР

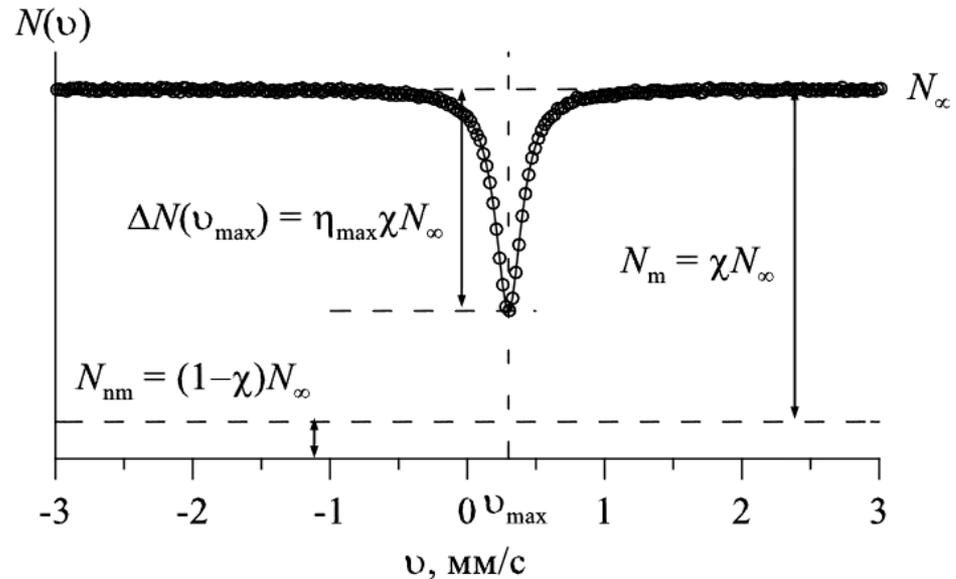
Мессбауэровский (скоростной, энергетический) спектр $N(v_i) \equiv N_i$ – зависимость интенсивности счета γ -квантов, квантов рентгеновского вторичного излучения или электронов конверсии (фактически числа электрических импульсов, сформированных детектором и зарегистрированных анализатором в течение строго задаваемого интервала времени) от доплеровской скорости v_i (i – номер канала) движения источника относительно поглотителя.

N_∞ – интенсивность счета импульсов в отсутствие резонанса;

χ – доля γ -квантов с энергией мессбауэровского перехода.

Величины эффекта:

$$\Delta N(v) \equiv N_\infty - N(v) - \text{"видимая"},$$
$$\eta = \frac{\Delta N}{N_m} = \frac{\Delta N}{\chi N_\infty} - \text{относительная.}$$

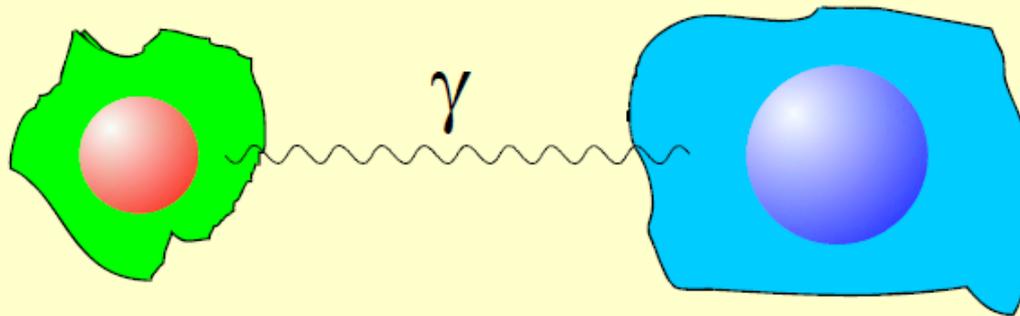


Мессбауэровский спектр в отсутствие сверхтонких расщеплений ядерных уровней.

СВЕРХТОНКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ И СПЕКТРА

Source (S)

Absorber (A)



Nuclear radius

$$R_e \neq R_g$$

Electron density

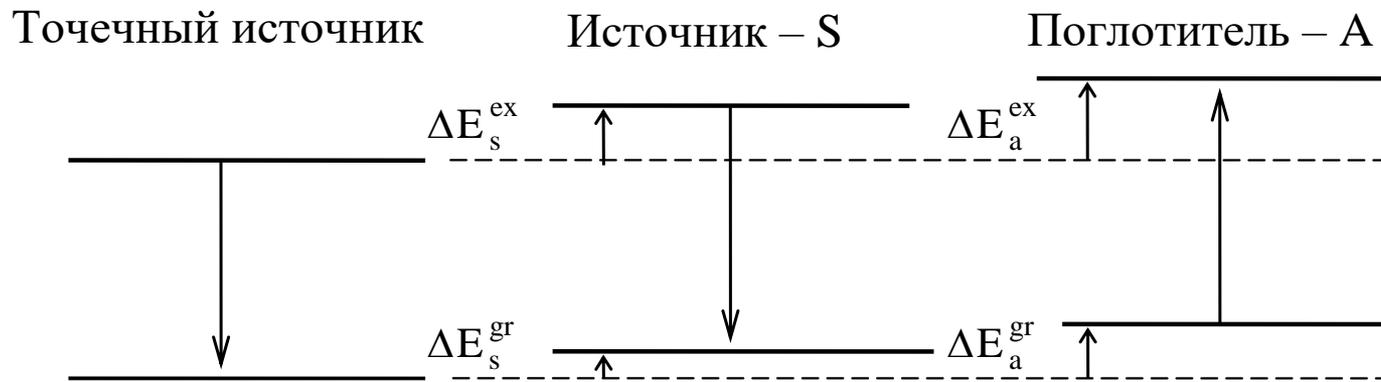
$$\rho_S \neq \rho_A$$

СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

Электрическое монопольное СТВ и сдвиг линии

Из-за конечных размеров ядра его энергетические уровни сдвигаются:

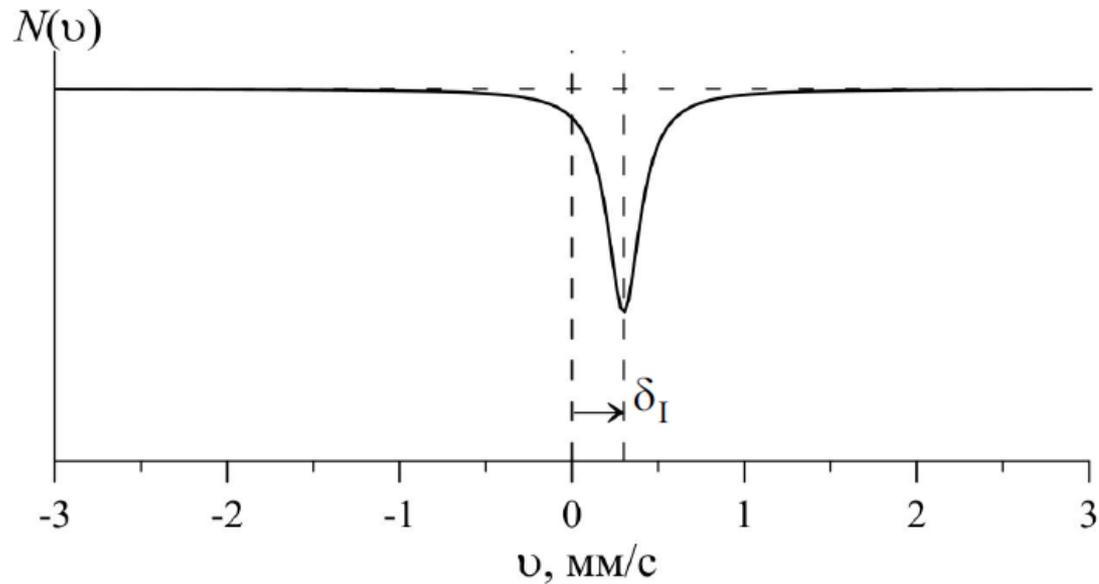
$$\Delta E = \frac{2}{3} \pi e Z \langle r^2 \rangle \rho(0).$$



**Изомерный (химический) сдвиг
мессбауэровской линии:**

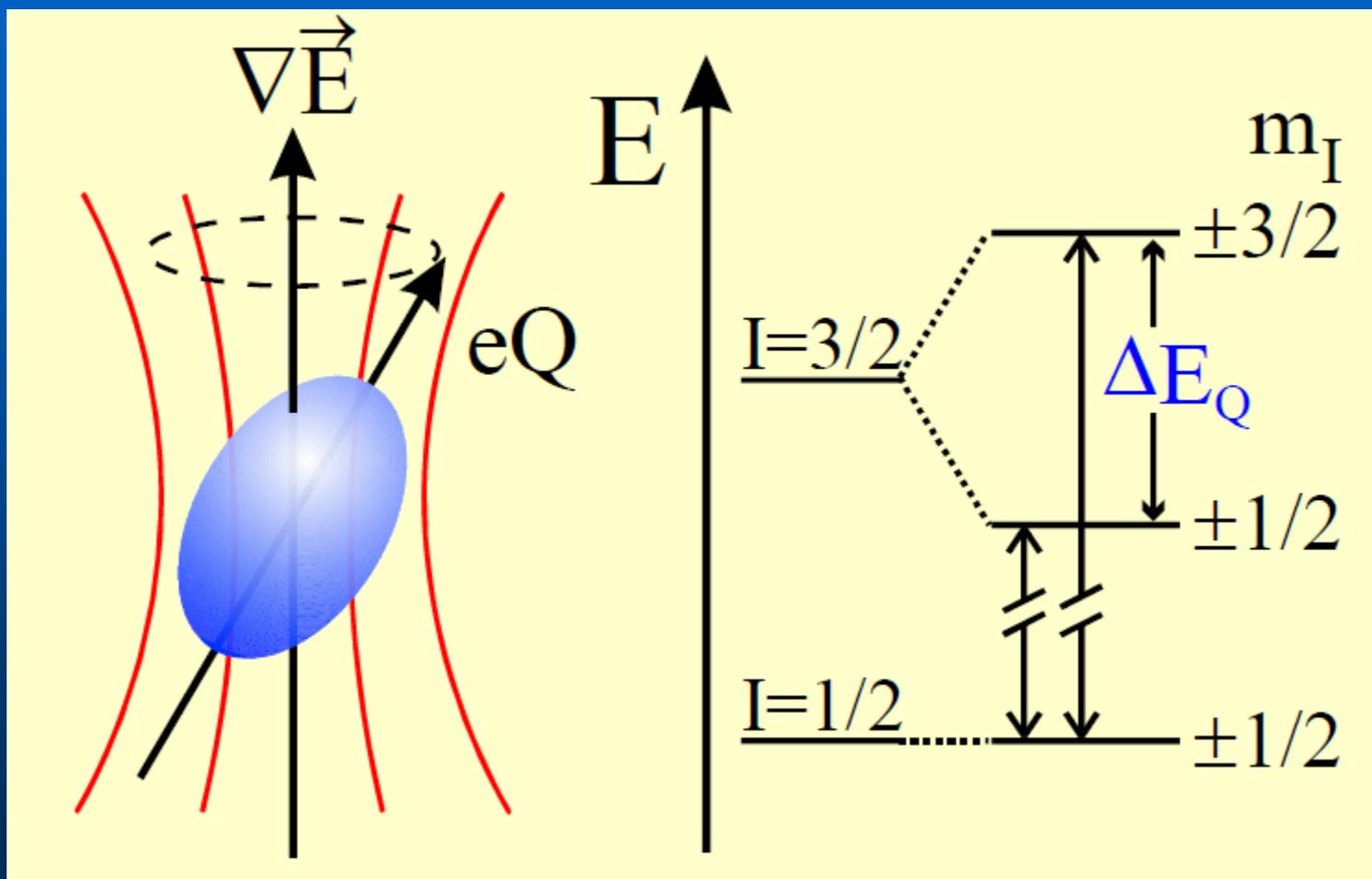
$$\delta_I = \frac{c}{E_0} \cdot \frac{2}{3} \pi Z e \left(\langle r_{\text{ex}}^2 \rangle - \langle r_{\text{gr}}^2 \rangle \right) \left(\rho_a(0) - \rho_s(0) \right).$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТР



Изомерный (химический) сдвиг мессбауэровского спектра δ_I вдоль шкалы доплеровских скоростей в случае сверхтонкого электростатического монополярного взаимодействия.

СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

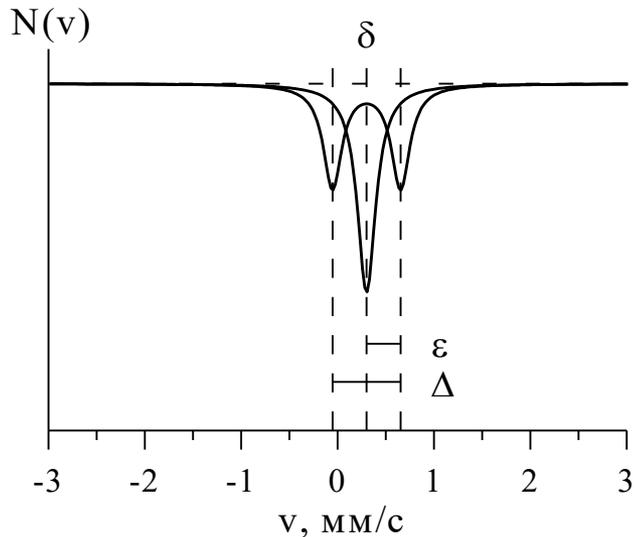


СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

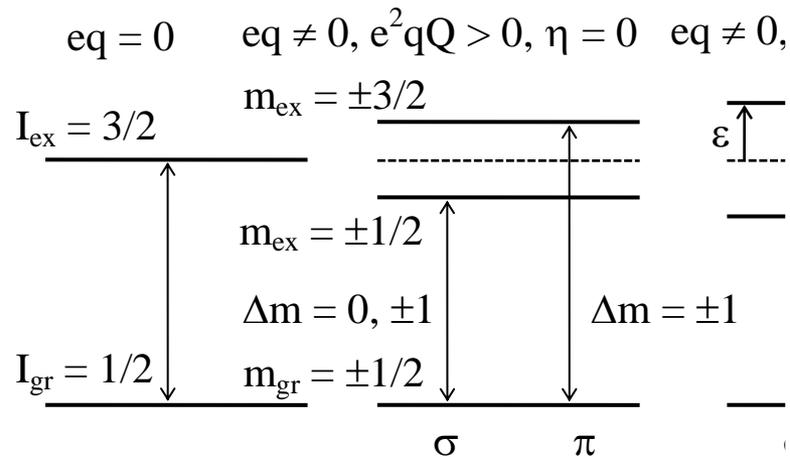
Электрическое квадрупольное СТВ и квадрупольное смещение

Закон сохранения проекции момента импульса – **правило отбора**:

$$M = \Delta m \equiv m_{\text{ex}} - m_{\text{gr}} = 0, \pm 1, \dots, \pm L.$$



Мессбауэровский спектр ядер ^{57}Fe и ^{119}Sn при наличии электрического СТВ.



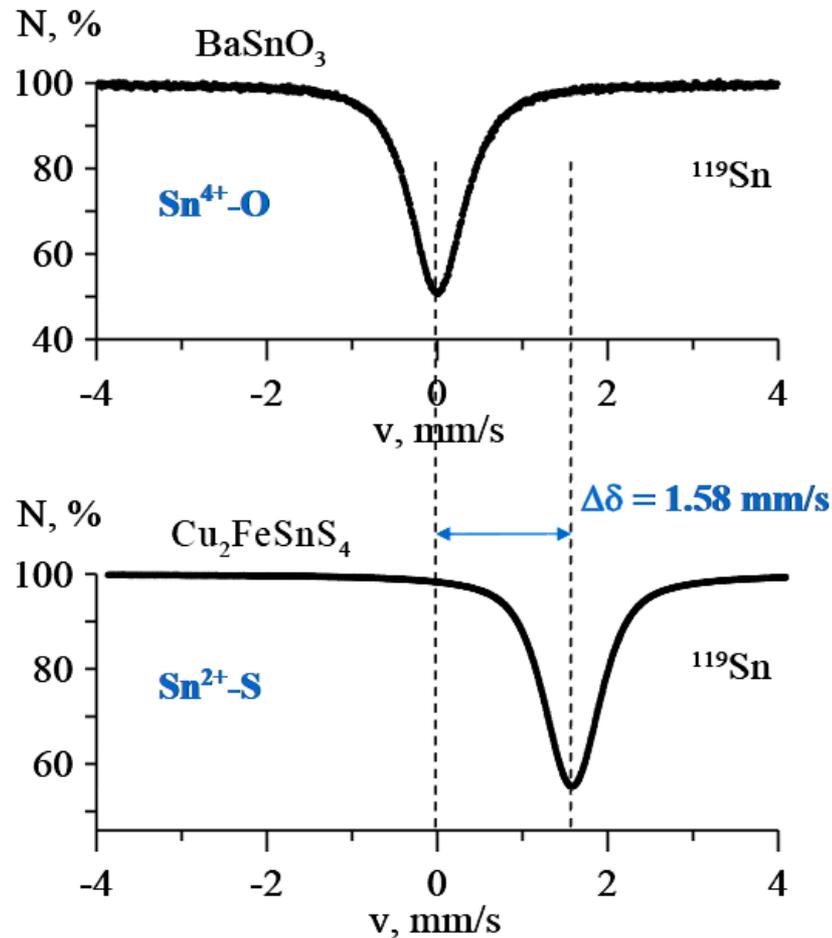
Электрическое расщепление ядерны межуровневые переходы для ядер ⁵

Квадрупольное смещение компонент:

$$\epsilon = \frac{e^2qQ}{4} \left(1 + \frac{\eta^2}{3} \right)^{1/2}$$

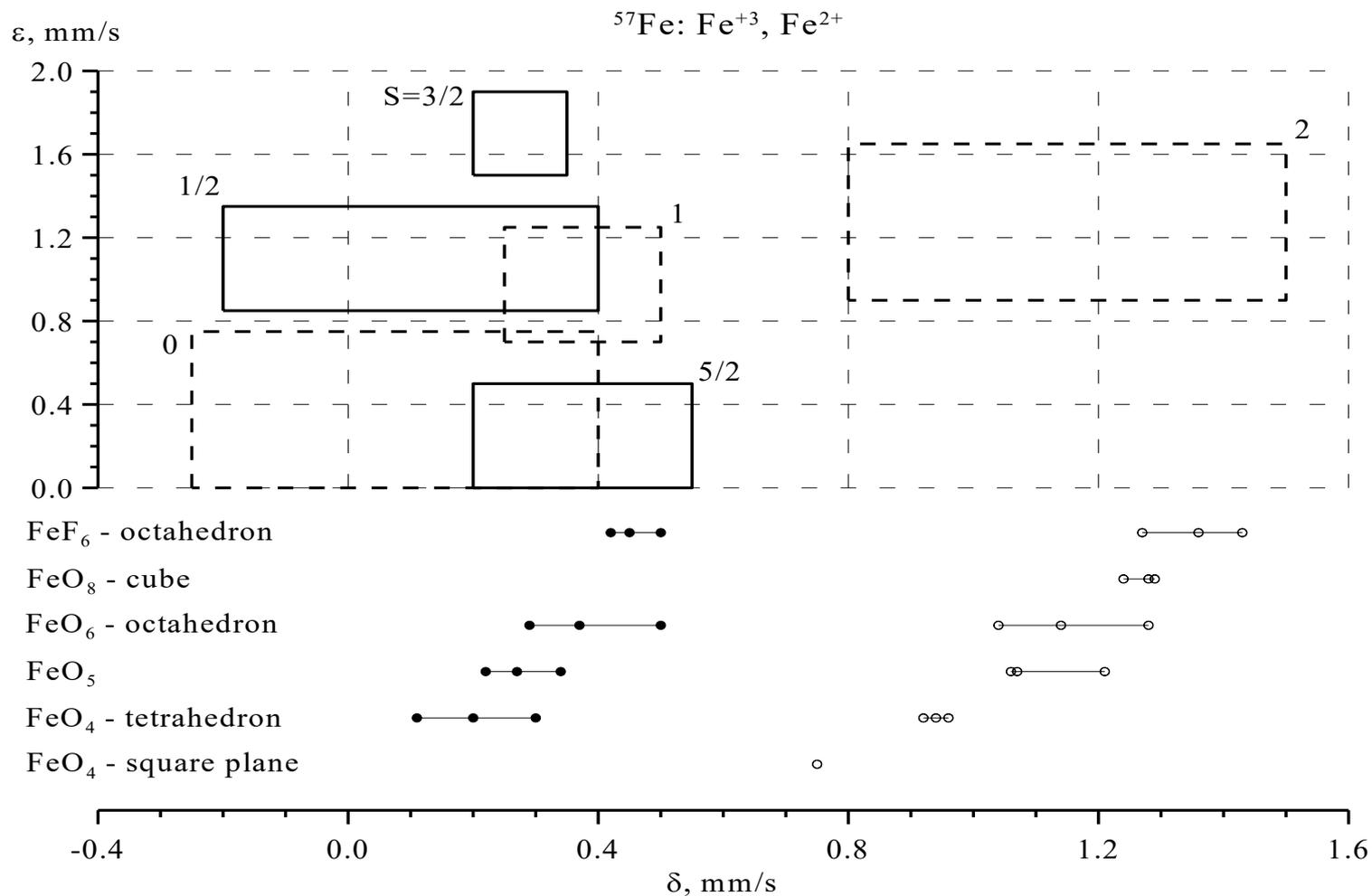
СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

Примеры реальных экспериментальных спектров

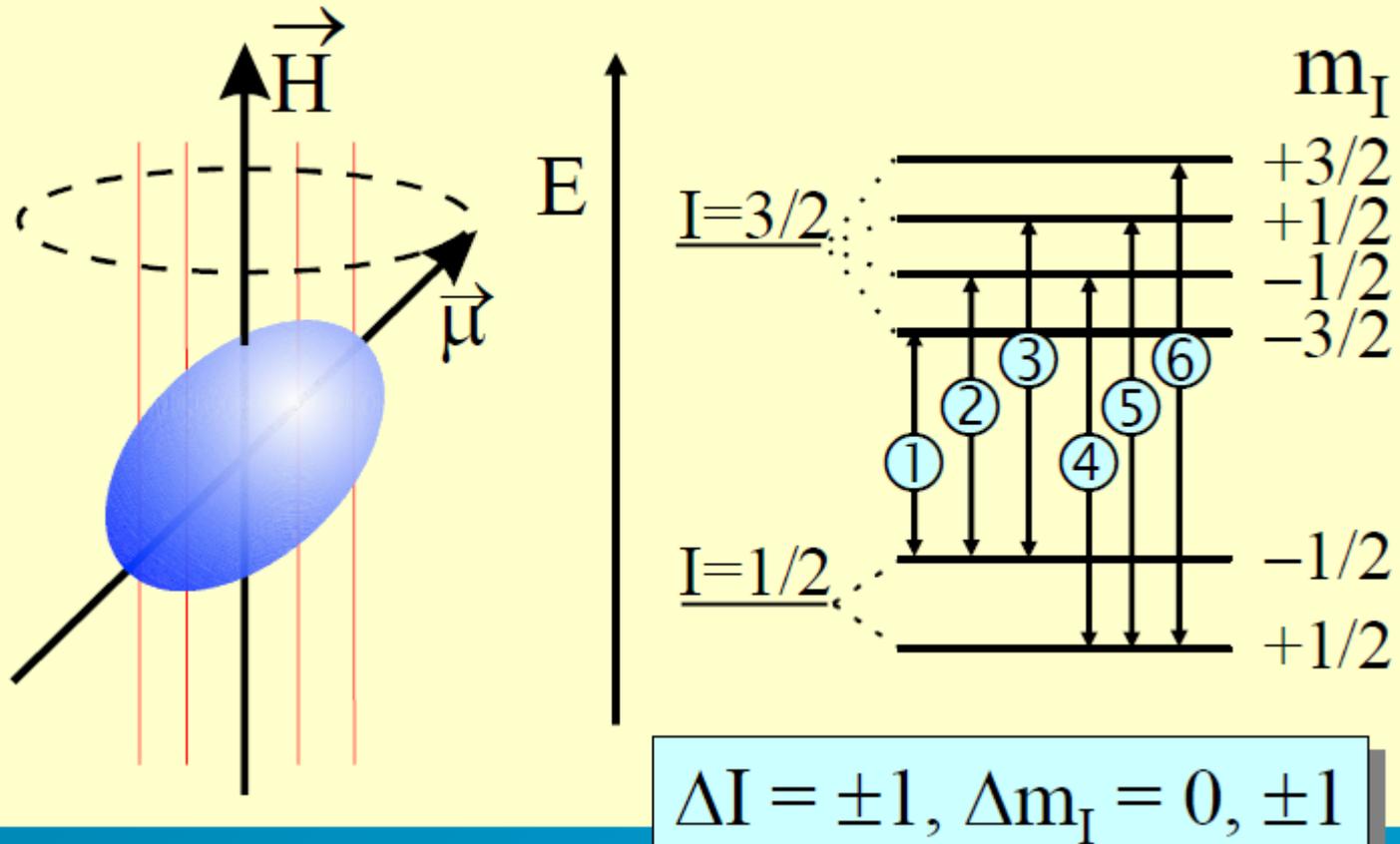


СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

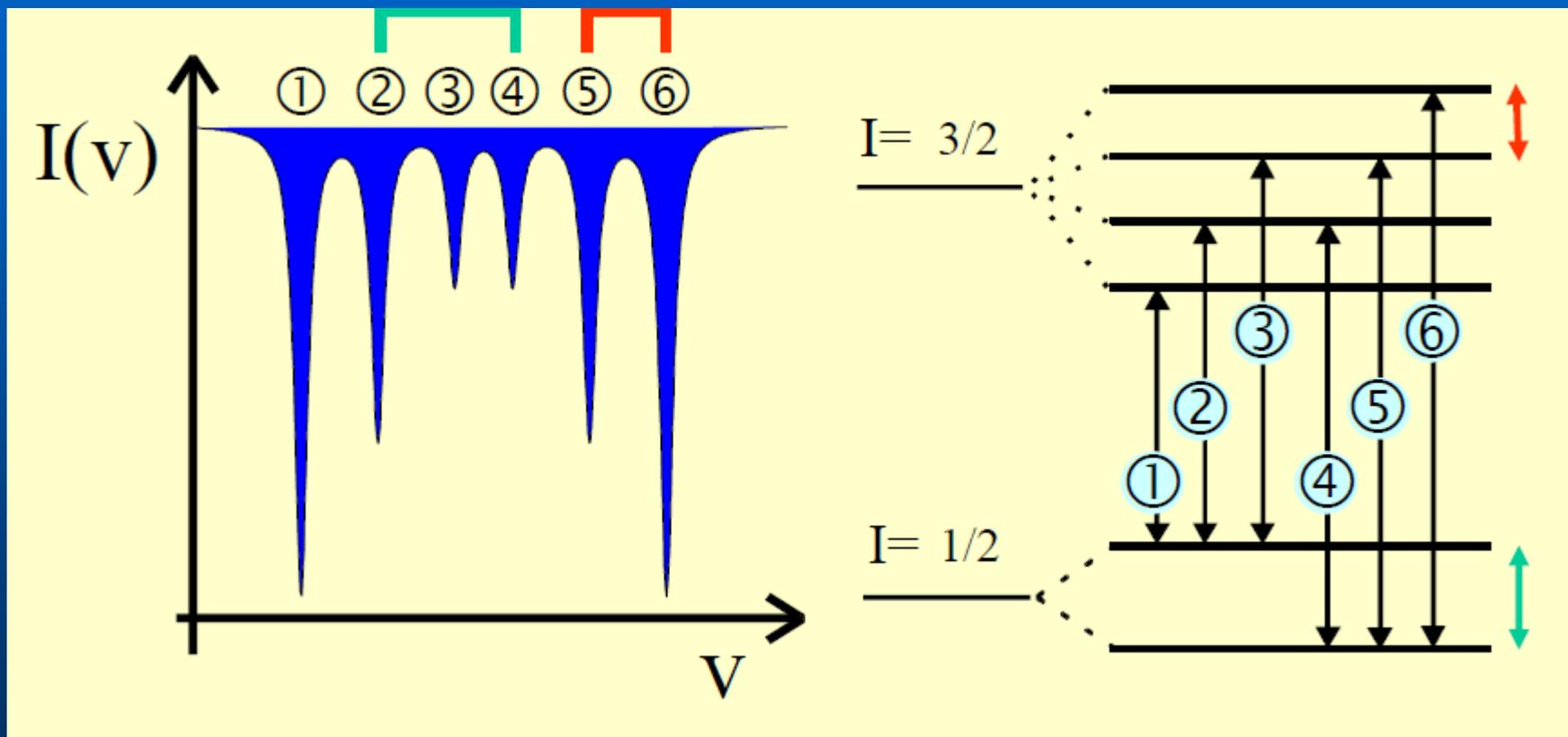
Области характерных значений δ и ε для ядер ^{57}Fe



Магнитное дипольное СТВ и мессбауэровский спектр



Магнитное дипольное СТВ и мессбауэровский спектр



Магнитное дипольное СТВ и мессбауэровский спектр

СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

Дополнительная энергия ядра в эффективном магнитном поле:

$$E_m = -g\mu_n mH_n.$$

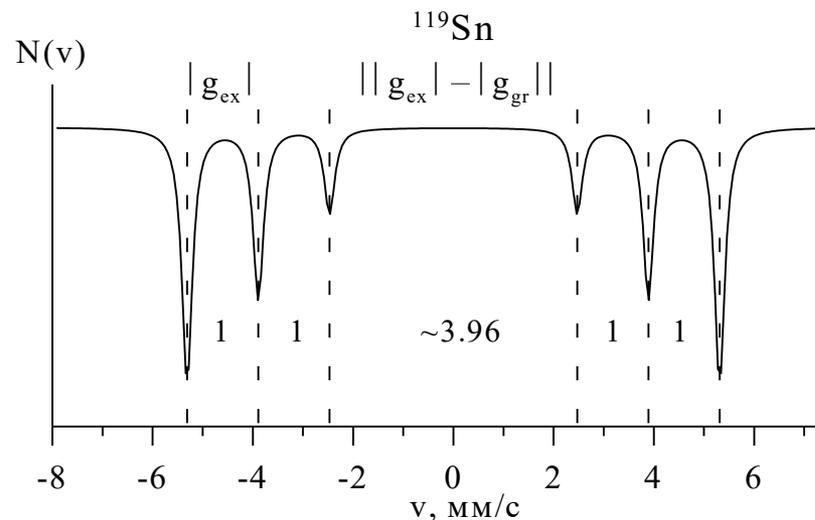
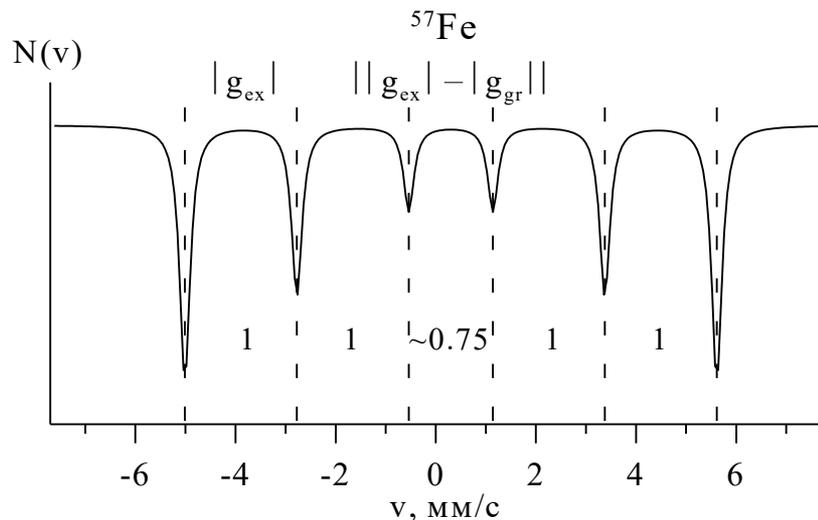
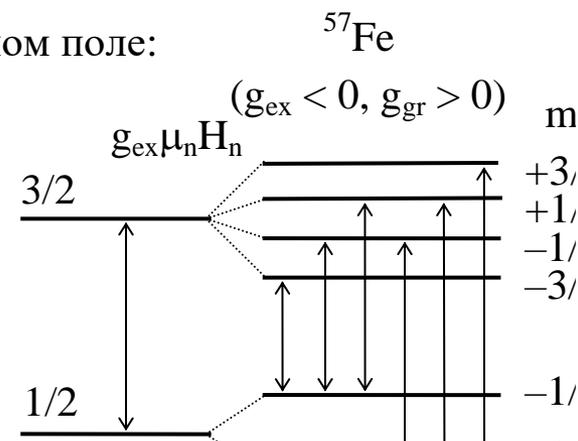
Константа магнитного дипольного СТВ – $g\mu_n H_n$.

Правила отбора: $M = \Delta m = 0, \pm 1, \dots, \pm L$;

для $I_{gr} = 1/2$ и $I_{ex} = 3/2$ – 6 переходов.

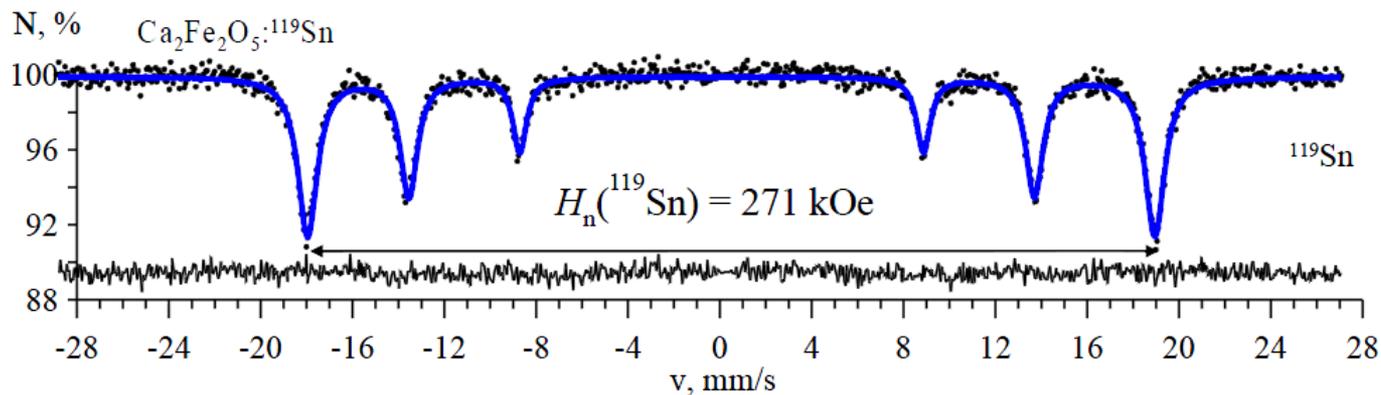
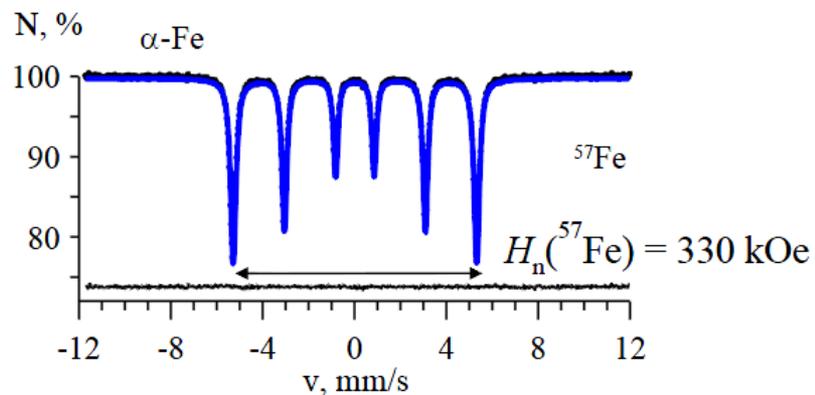
Зеемановский секстет:

$$\Delta v_{12} = \Delta v_{23} = \Delta v_{45} = \Delta v_{56}.$$



СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРА

Примеры реальных экспериментальных спектров



ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

1. "Изотопная" ограниченность – 110 мессб. переходов в 90 изотопах для 45 элементов
(⁵⁷Fe, ¹¹⁹Sn, ¹⁵¹Eu, ¹⁶¹Dy, ¹²¹Sb, ¹²⁵Te, ...)

Mössbauer Spectroscopy Periodic Table

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

	N > 1000
	100 < N < 1000
	10 < N < 100
	1 < N < 10
	N = 0

Mössbauer Effect Data Center

2. Ограниченность по агрегатному состоянию объекта – твердое тело.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

- 1. Рекордная разрешающая способность** (относительная по энергии) – Γ_{τ}/E_0 от $2 \cdot 10^{-12}$ (^{151}Eu) до $5 \cdot 10^{-16}$ (^{61}Zn); для ^{119}Sn – 10^{-12} , для ^{57}Fe – $3 \cdot 10^{-13}$.
- 2. Сочетание информации локального характера с данными о кооперативных явлениях** – зарядовая и спиновая электронные плотности, тензор ГЭП, $\mu_{\text{at}} \Leftrightarrow$ магнитное состояние, T_C , ϑ_D , фазовый состав вещества.
- 3. Не воздействующий на исследуемый объект метод** – не влияет на физическое состояние исследуемого объекта и на процессы его взаимодействия.
- 4. Многообразие экспериментальных методик:**
 - **методы регистрации:** γ -кванты, электроны конверсии и рентгеновское излучение; сцинтилляционное и резонансное детектирования, резонансная фильтрация;
 - **источники:** радиоактивные изотопы, синхротронное излучение;
 - **геометрия опыта:** излучение, поглощение, рассеяние – малоугловое и брэгговское;
 - **формы воздействия:** T , H , P , ионная имплантация, лазерное излучение.
- 5. Развитые методы обработки и анализа данных:** повышение разрешения и шумоподавление, модельная расшифровка, восстановление функций распределения, использование спектров образцов-эталонов.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

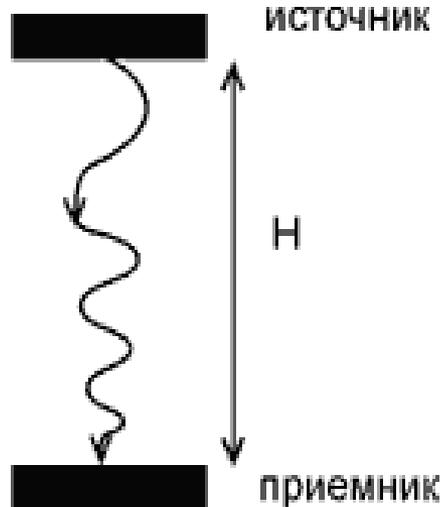
6. Разнообразие и богатство получаемой информации по вопросам:

- качественный и количественный фазовый анализ вещества ($S, \delta, \varepsilon, H_n$);
- фазовые переходы (δ, ε, H_n);
- магнитные, сегнетоэлектрические и структурные превращения ($S, \delta, \varepsilon, H_n$);
- кинетика физико-химических процессов (S);
- число неэквивалентных позиций (δ, ε, H_n) и катионное распределение (S);
- динамические свойства атомов (S при $T \sim \Theta_D$ и δ при $T < \Theta_D$);
- симметрия ближайшего окружения (ε);
- валентное, спиновое и структурное состояния, кристаллохим. идентификация (δ, ε);
- электронная конфигурация, химическая связь, степень ковалентности (δ, ε, H_n);
- механизмы сверхтонких и обменных взаимодействий, электронного обмена (δ, ε, H_n);
- особенности магнитной (H_n), электронной и кристаллической структуры (δ, ε);
- направление ОЛН и спиновая переориентация (S, ε, H_n);
- релаксационные явления ($H_n, \Gamma; \Omega_p, \tau_p, E_{an}, V$);
- дефектность структуры, неоднородность состава, стехиометрии ($\delta, \varepsilon, H_n, \Gamma$).

7. **Широта использования** – физика твердого тела и магнитных явлений, ядерная и химическая физика, биофизика, микроэлектроника, геология, почвоведение, медицина, экология и т.д.

Эксперимент Паунда и Рэбки

Башня
в Гарвардском
университете
 $H=22,5$ м.



Проверка замедления хода времени в поле тяготения (экспериментальное подтверждение существования гравитационного красного смещения), предложенная в 1959 и осуществлённая в 1959—1960 годах сотрудником Гарвардского университета Робертом Паундом и его аспирантом Гленом Рэбкой в лабораторном контролируемом эксперименте.

Релятивистский эффект Доплера при разности температур источника и поглотителя в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ даёт относительный сдвиг частот около $2,20 \cdot 10^{-15}$, почти равный ожидаемому общерелятивистскому эффекту. После учета разности температур был получен окончательный результат для гравитационного смещения частоты $-(2,57 \pm 0,26) \times 10^{-15}$ в пределах ошибок измерения совпадавший с теоретическим предсказанием ОТО.

Эксперимент Паунда и Рэбки

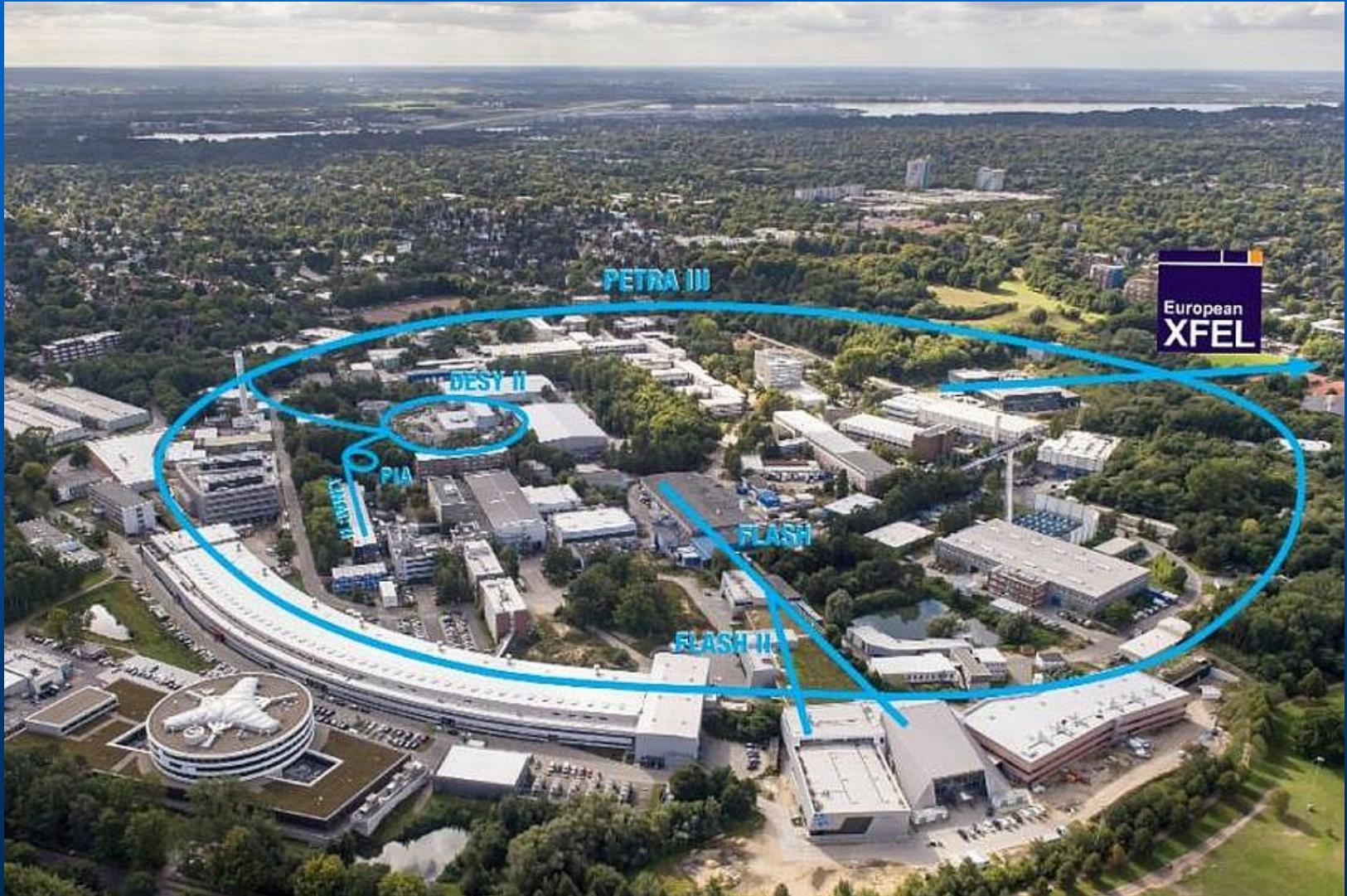


Лаборатория Джефферсона в Гарвардском университете. Эксперимент проводился в левой «башне». Чердак был расширен в 2004 году. Лаборатория Джефферсона в Гарвардском университете. Эксперимент проводился в левой «башне». Чердак был расширен в 2004 году.

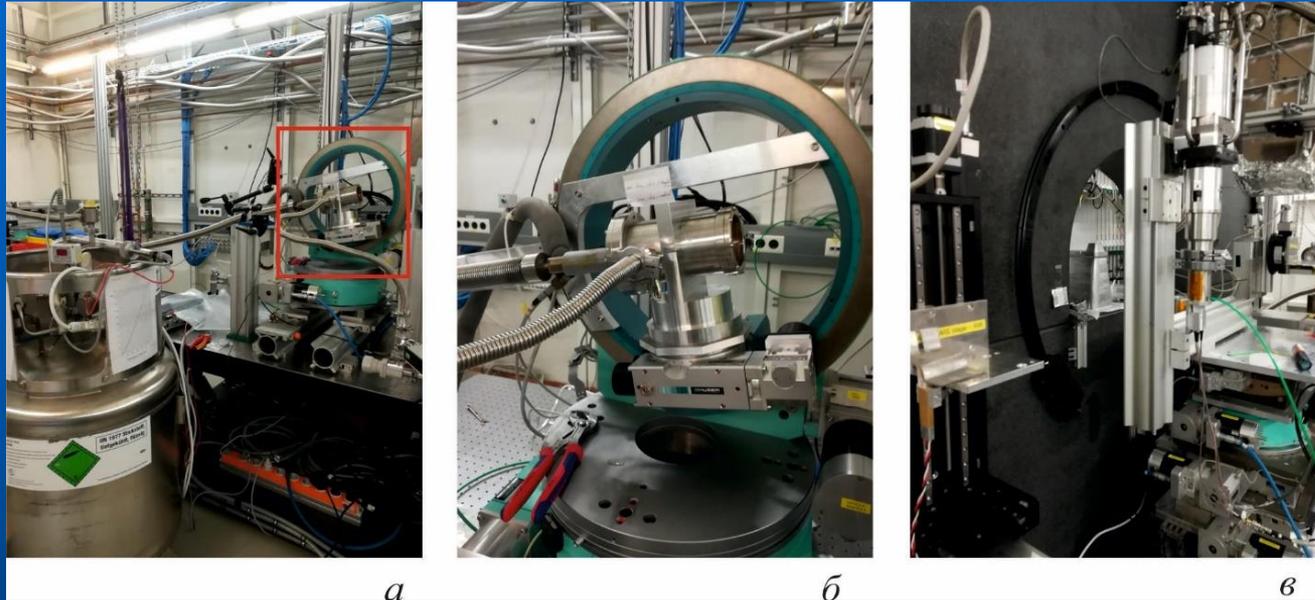
DESY



DESY

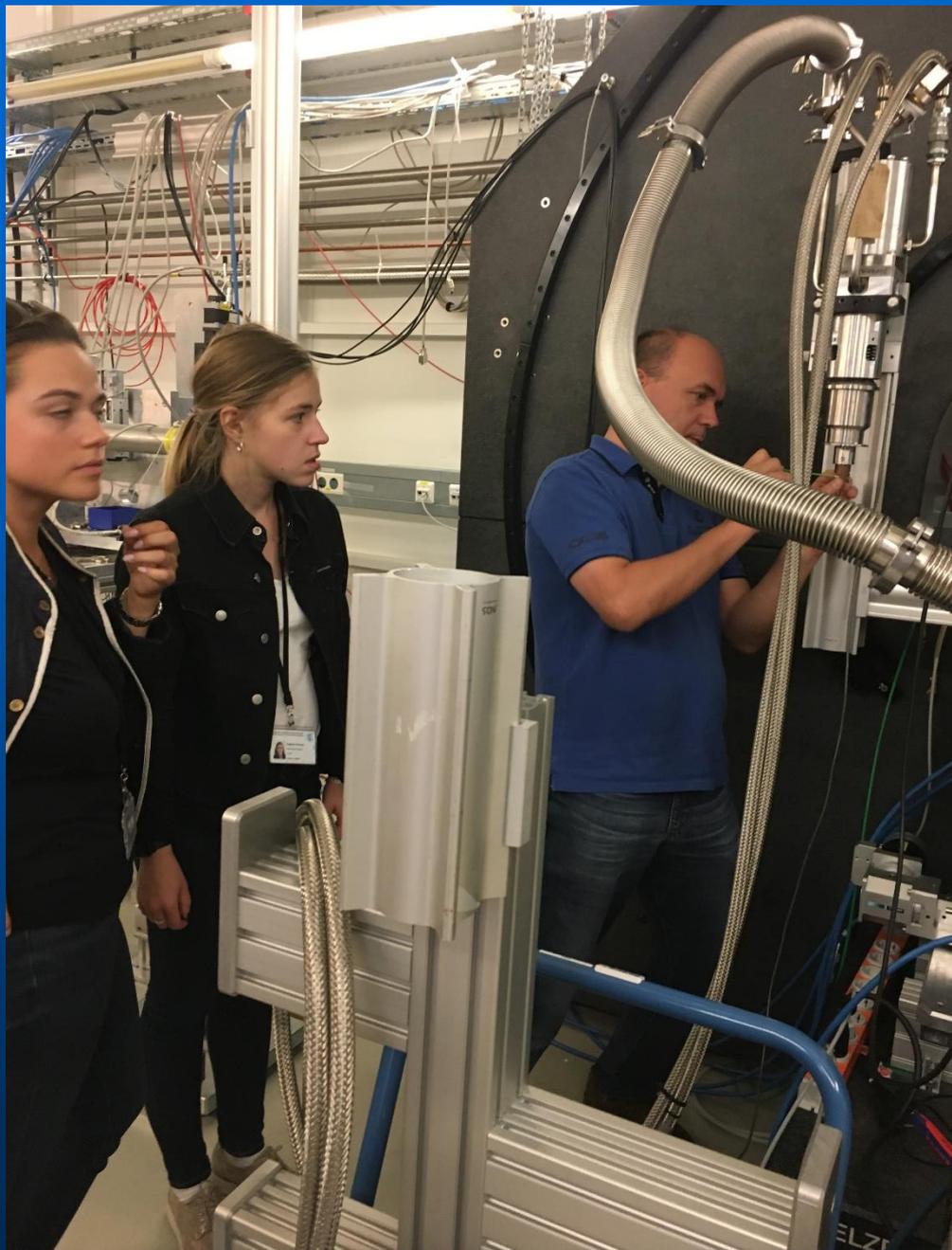


DESY



Станция P01 DESY, а) вид на монохроматор обратного рассеяния на монокристалле сапфира (выделен красным прямоугольником, б) монохроматор обратного рассеяния, в) гелиевый криостат.

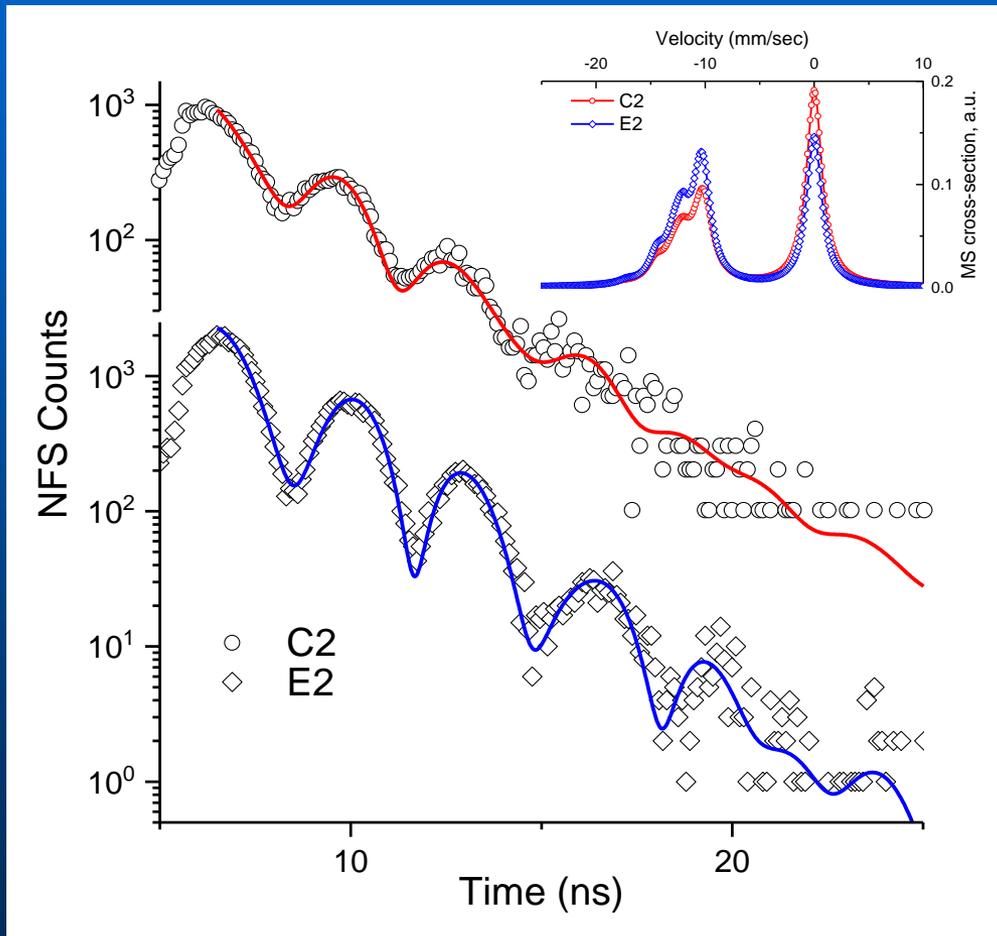
DESY



DESY



Исследование преобразований синтезированного смешанновалентного (III/V) оксида сурьмы гипертермофильной археей *Pyrobaculum sp*



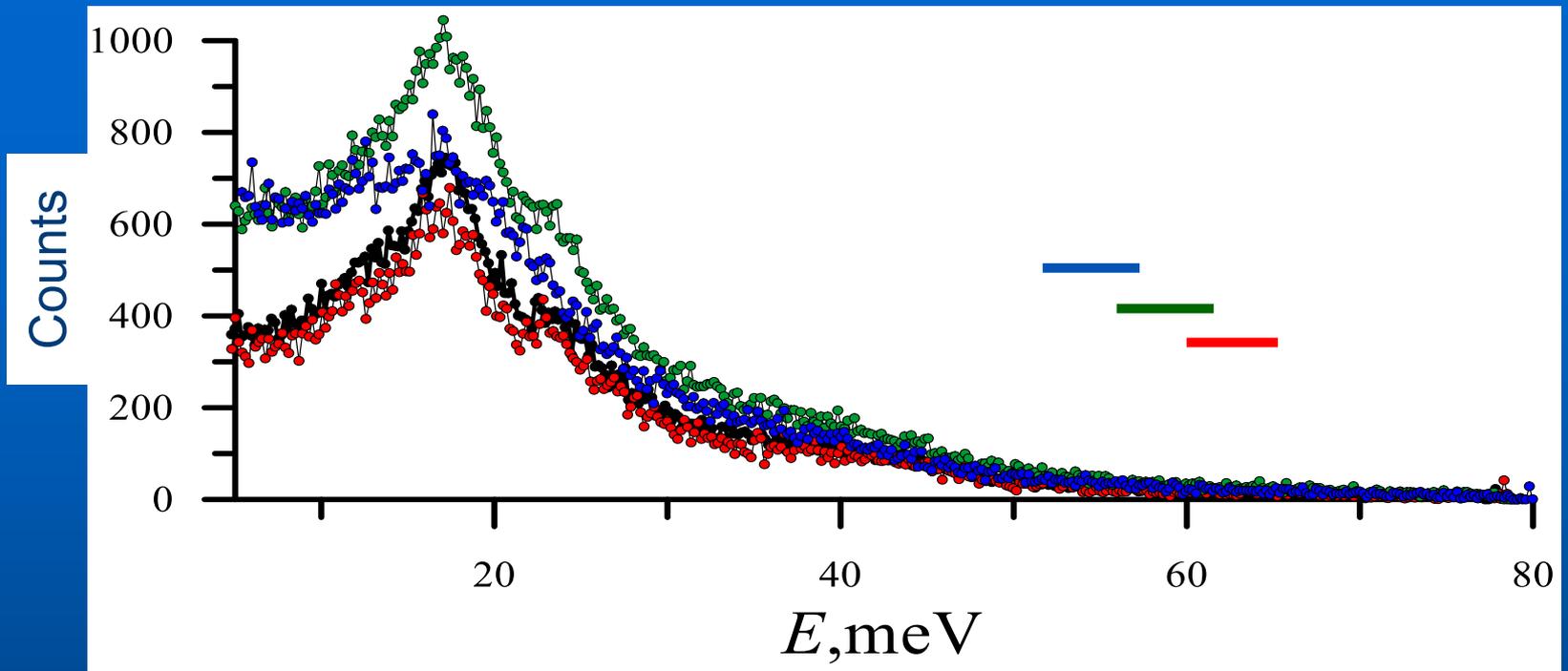
Спектры ядерного резонансного рассеяния контрольного образца (C₂) и экспериментального образца (E₂). На вставке показаны результаты моделирования мёссбауэровского спектра в соответствии с параметрами, полученными при обработке.

European Synchrotron Radiation Facility (Grenoble, France)



European Synchrotron Radiation Facility (Grenoble, France)

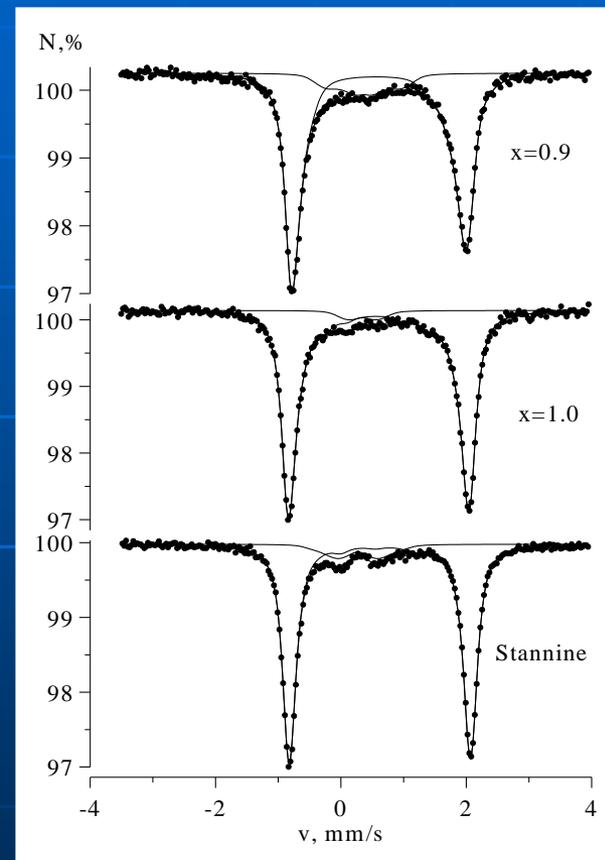
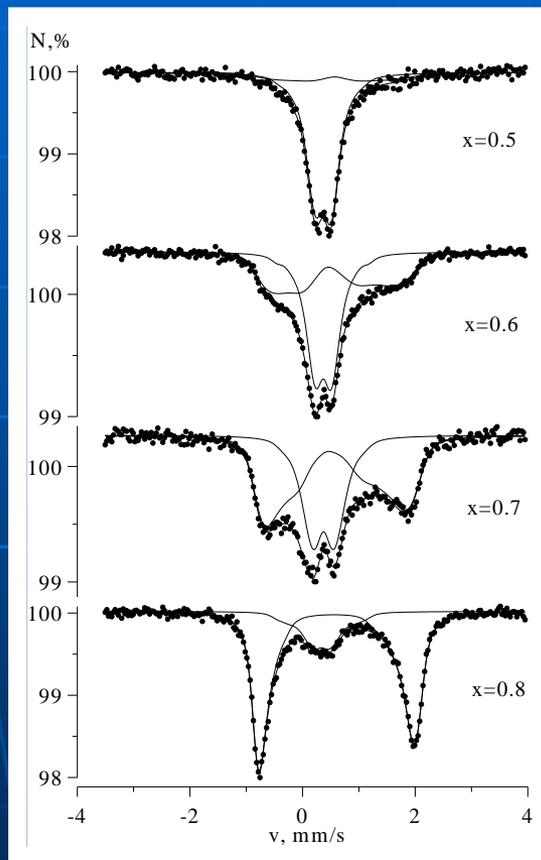
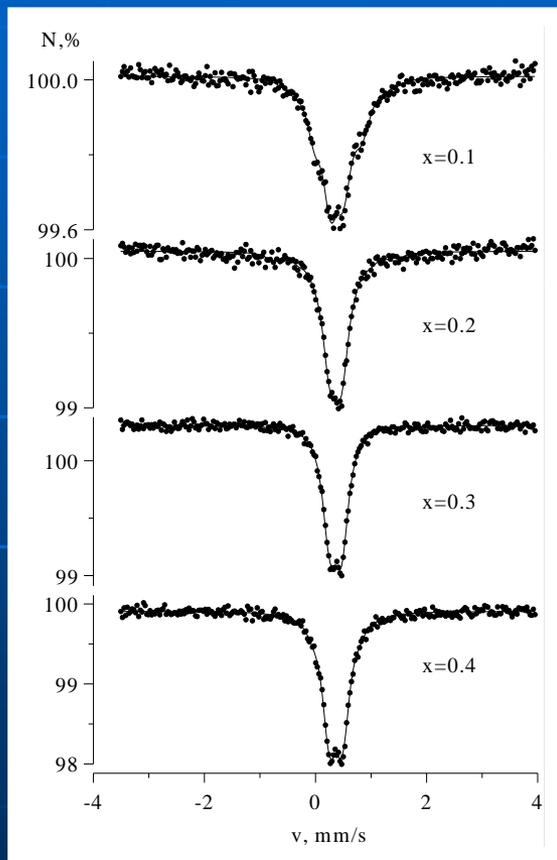




Sample	Relative content, %			Relative intensity of Fe ²⁺ atoms, %	
	Siderite	Ferrihydrite	Magnetite	NIS	Chem. method
N1	Siderite	Ferrihydrite	Magnetite	NIS	Chem. method
N2	—	80.3±2.2	19.7±2.2	~ 6.6	6.2
N3	14.6±1.5	70.3±2.4	15.±2.1	~ 19.6	25.9
N4	32.2±3.1	41.3±5	26.6±4	~ 41	28.9

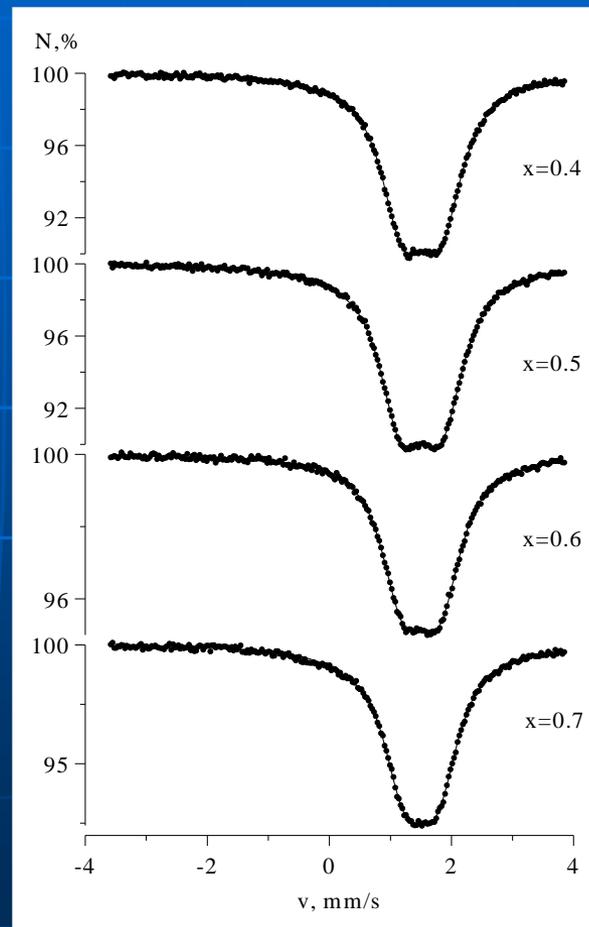
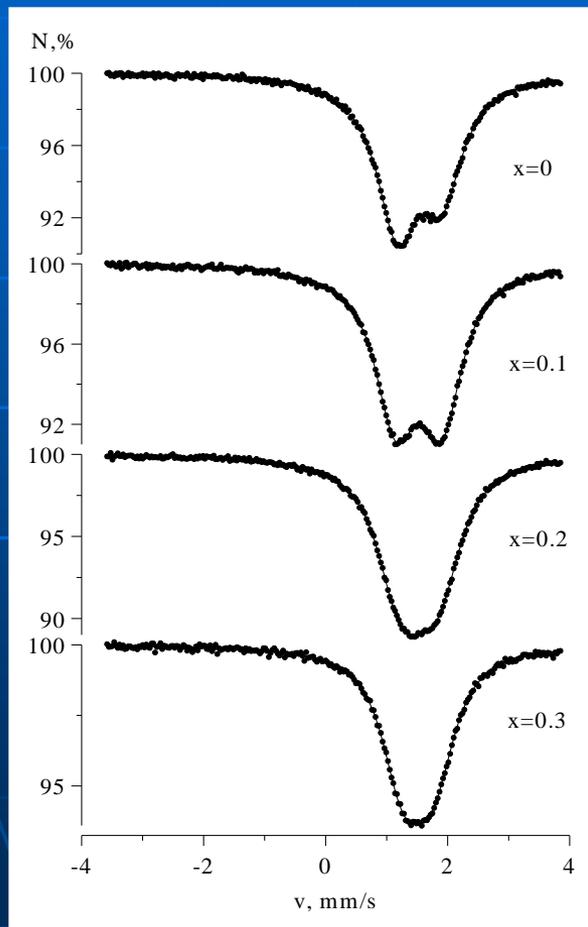
ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

Мёссбауэровские спектры на ядрах ^{57}Fe
соединений системы $\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{SnS}_4$



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

Мёссбауэровские спектры на ядрах ^{119}Sn
соединений системы $\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{SnS}_4$

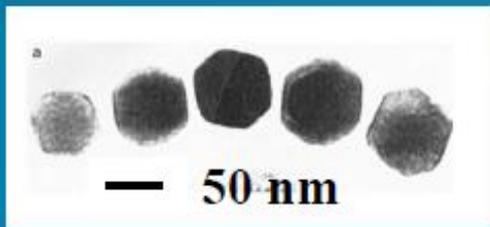


Fe_3O_4 in Magnetotactic Bacteria

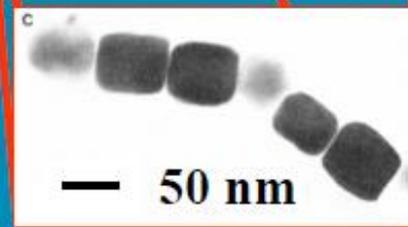
Aquaspirillum Magnetotacticum



Biomagnetic compass:
Microorganisms follow geomagnetic field due to magnetic particles (40 – 120 nm)



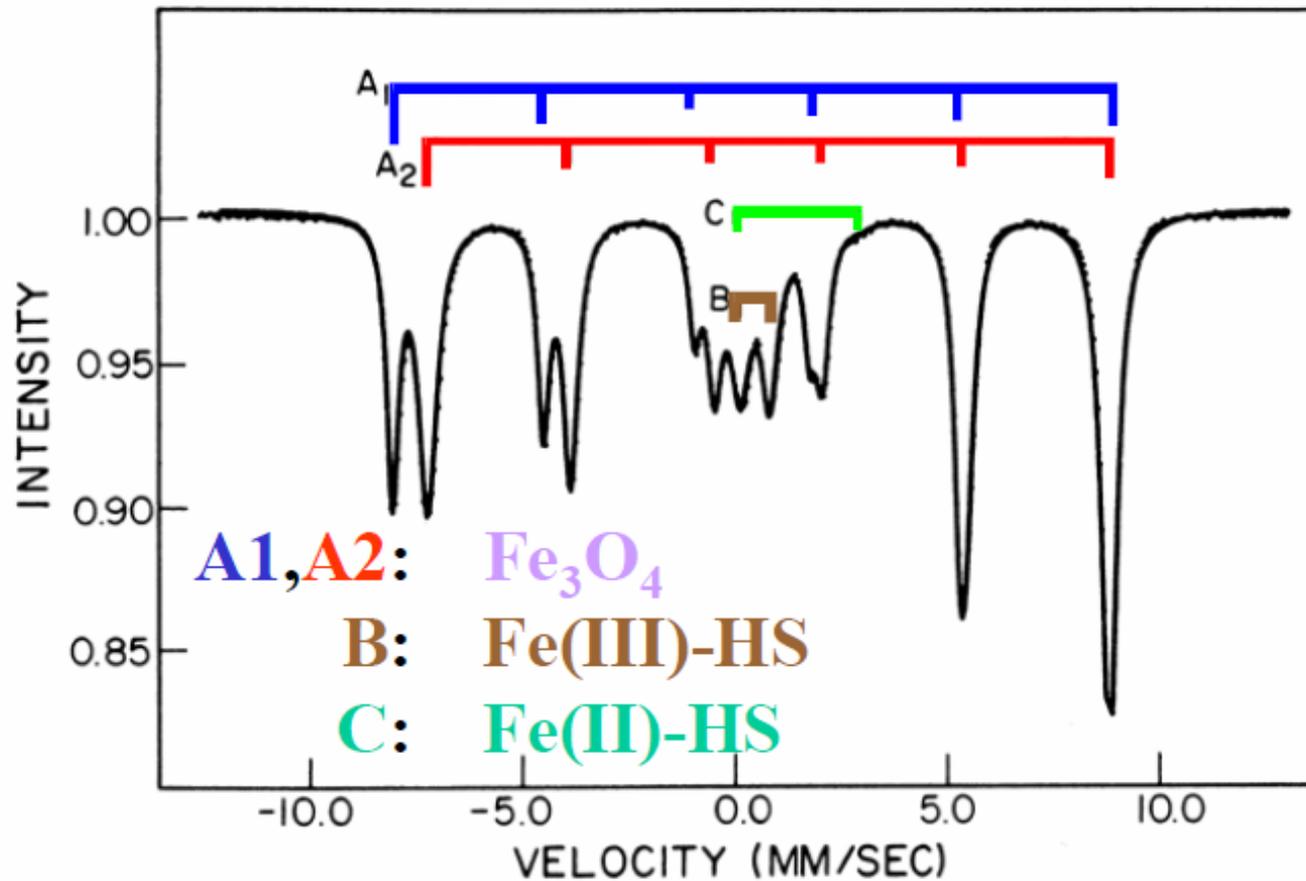
Hexagonal



Cubic

^{57}Fe Mössbauer Spectrum of Magnetic Particles in Magnetotactic Bacteria

Frankel, Papaefthymiou, 1983:



Механизм железоредукции

Железо-
содержащие
вещества



Органические и
неорганические
соединения



e

Бактерия

Актуальность

Биология

- Найти подтверждение гипотезе



«Алкалофилы и термофилы – первые обитатели Земли»

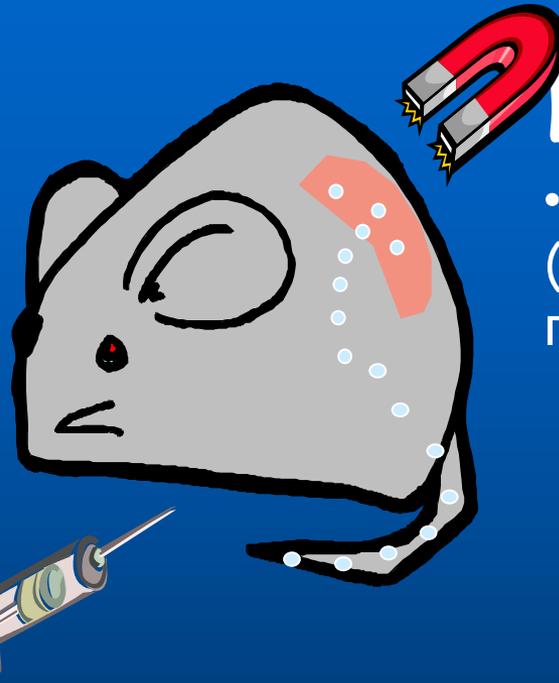
Геология

- Как формировались минералы на Земле?



Экология

- Методы очистки окружающей среды



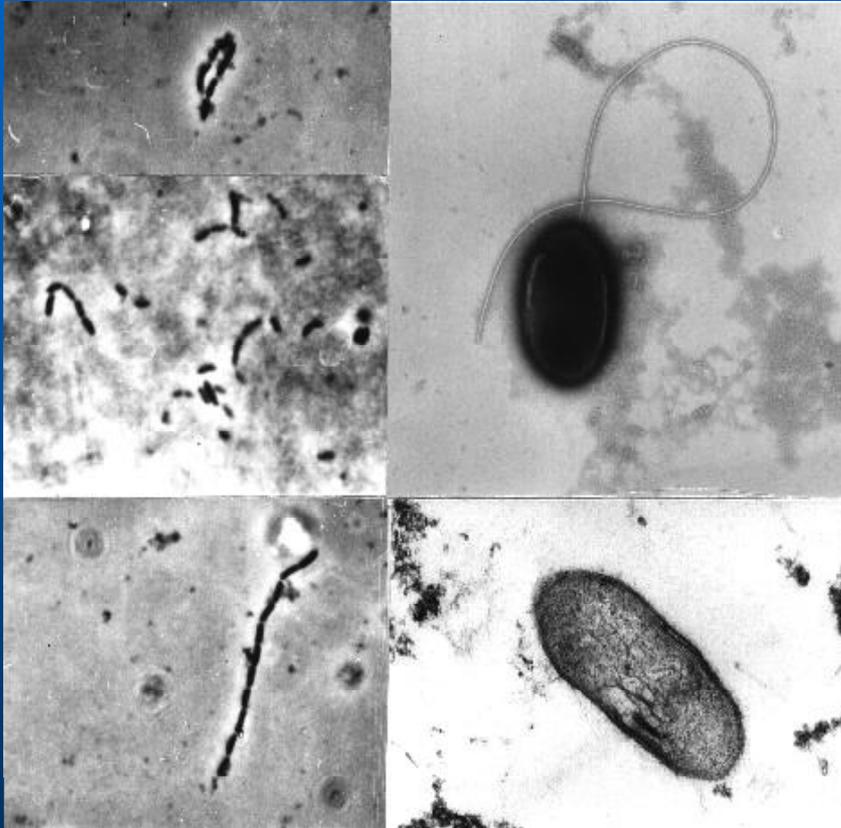
Биотехнологии

- Ферменты (ПЦР, стиральные порошки)

Биомедицина

- Целевая доставка лекарств
- Контрастное вещество для МРТ
- Магнитный нагрев (гипертермия)

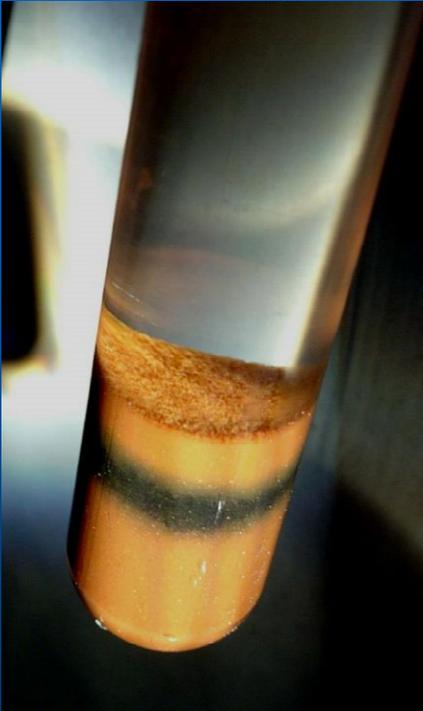
Thermincola ferriacetica
(штамм Z-0001)



■ *Thermincola ferriacetica* (штамм Z-0001) выделен из железистых отложений горячих источников Столбовские с острова Кунашир. Этот микроорганизм использует ферригидрит в качестве акцептора электронов и ацетат CH_3COO^- в качестве донора электронов.

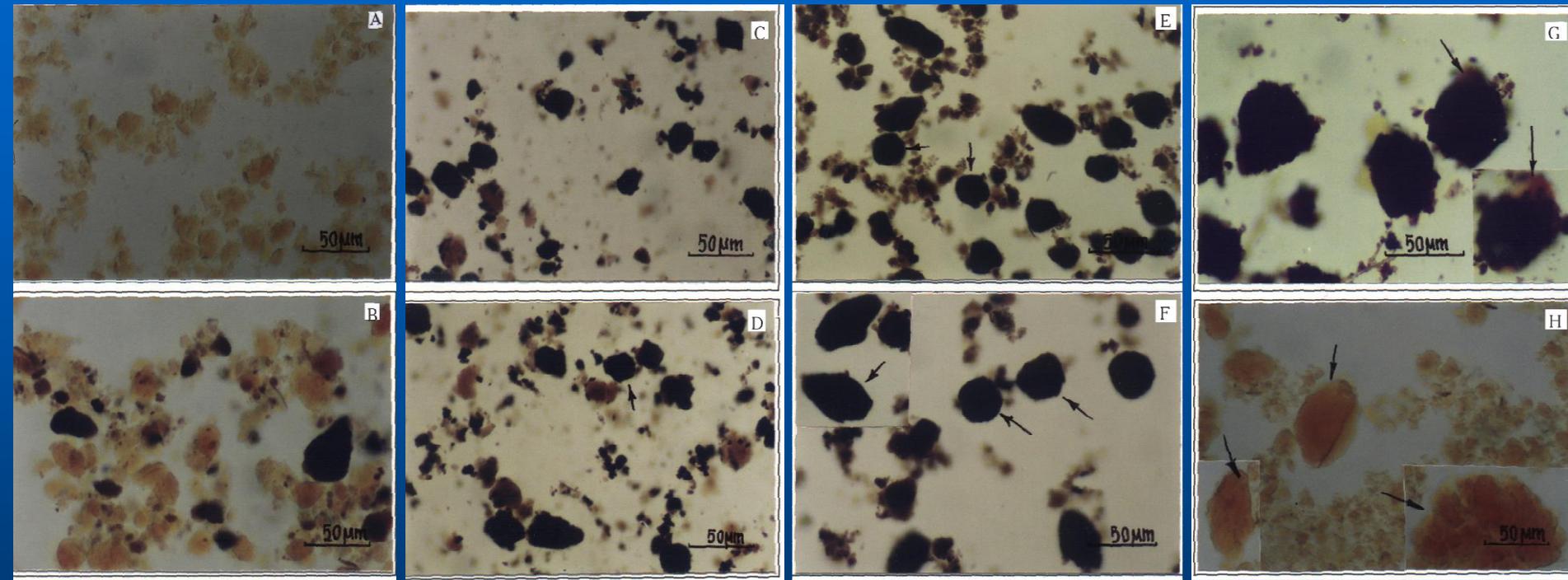
Образцы и контрольные пробы

Стерильная среда (SM) и среда, засеянная штаммом Z-0001, а затем стерилизованная при 1200°C (IM), использовали в качестве контролей.



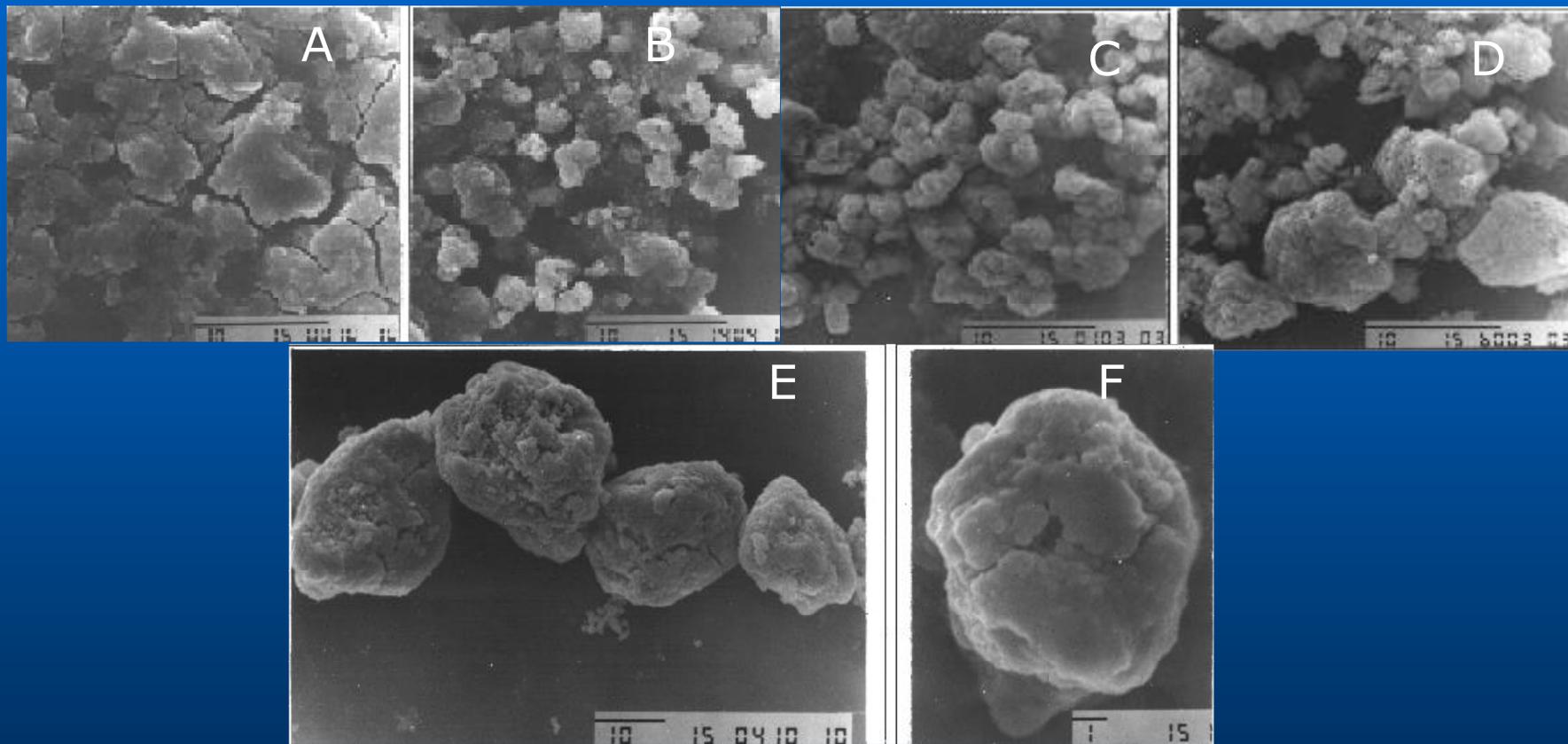
Полученный образец и контрольная проба с магнитом между ними.

Восстановление гидроксида Fe(III) штаммом Z-0001



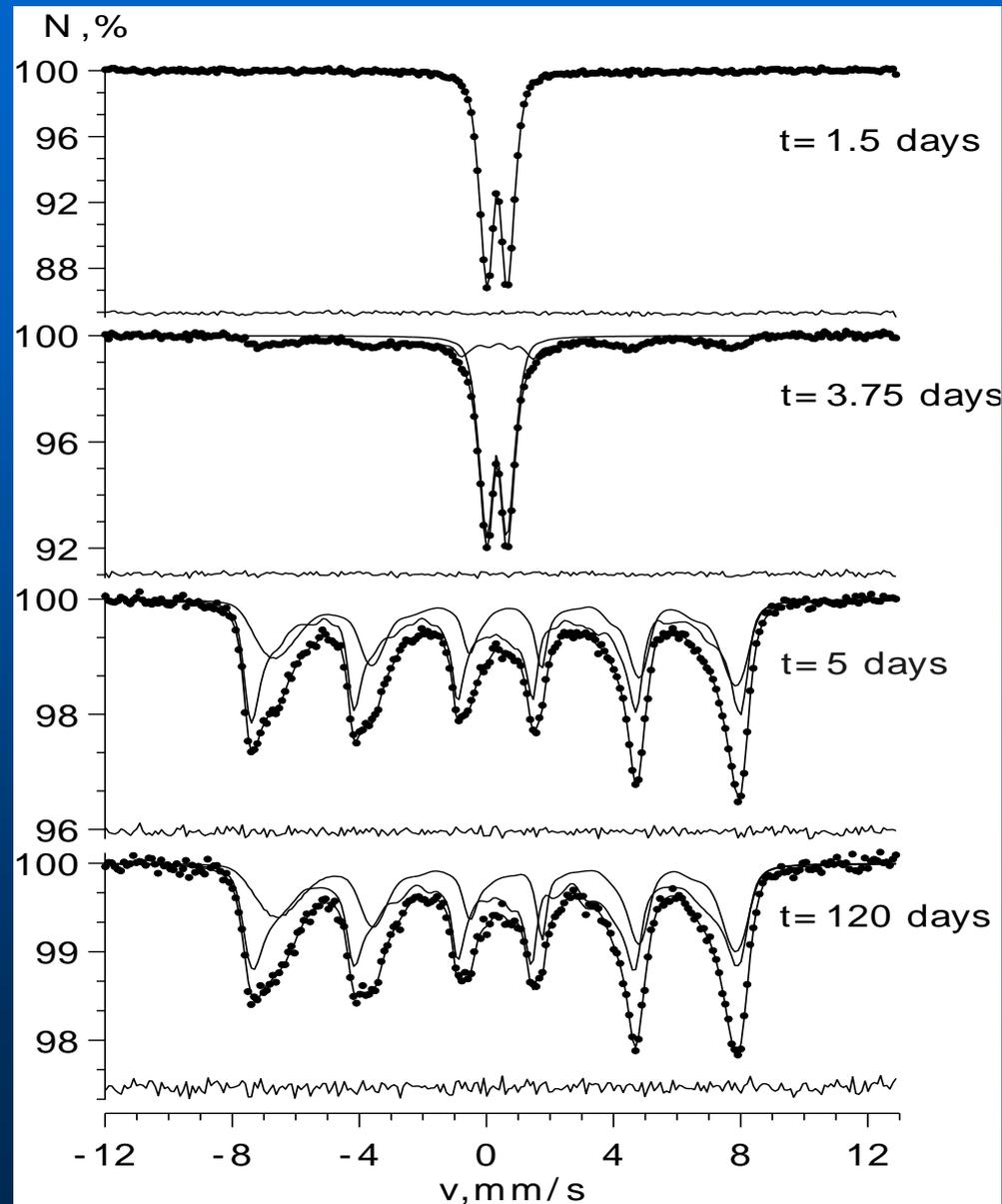
А - исходный образец; В - через 3,33 дня роста бактерии; С - через 4,25 дней роста; D - 5 дней; E - 14 дней, F - 21 день; G - 120 дней; H - контрольная проба.

Восстановление гидроксида Fe(III) штаммом Z-0001

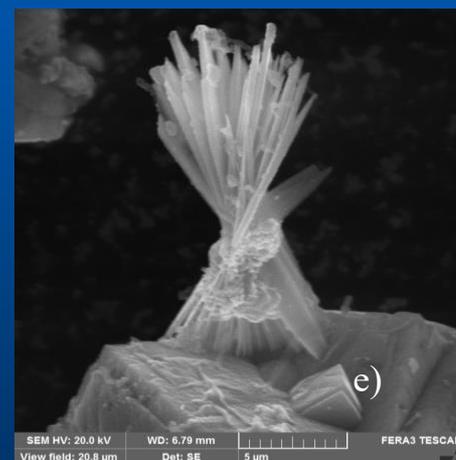
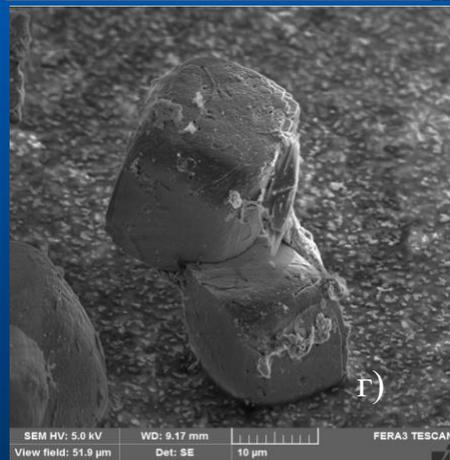
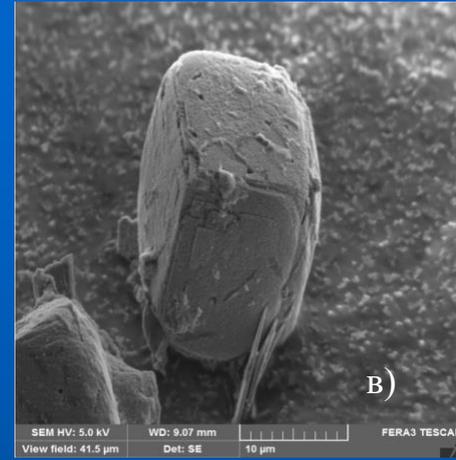
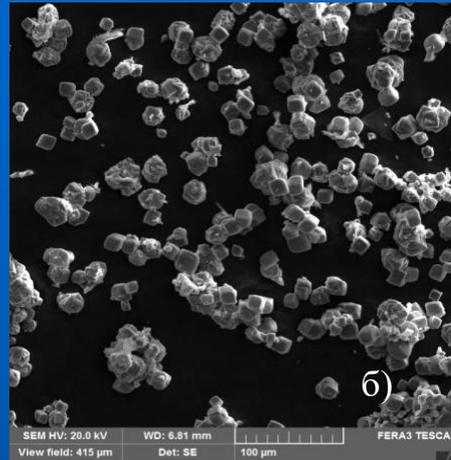
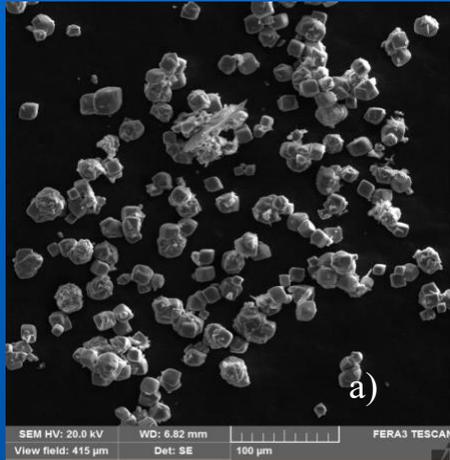


А - исходный образец; В - через 3,33 дня роста бактерии; С - через 14 дней роста; D - 60 дней; Е, F - кристаллы магнетита, образованные на 4,25 день роста бактерии.

Восстановление гидроксида Fe(III) штаммом Z-0001

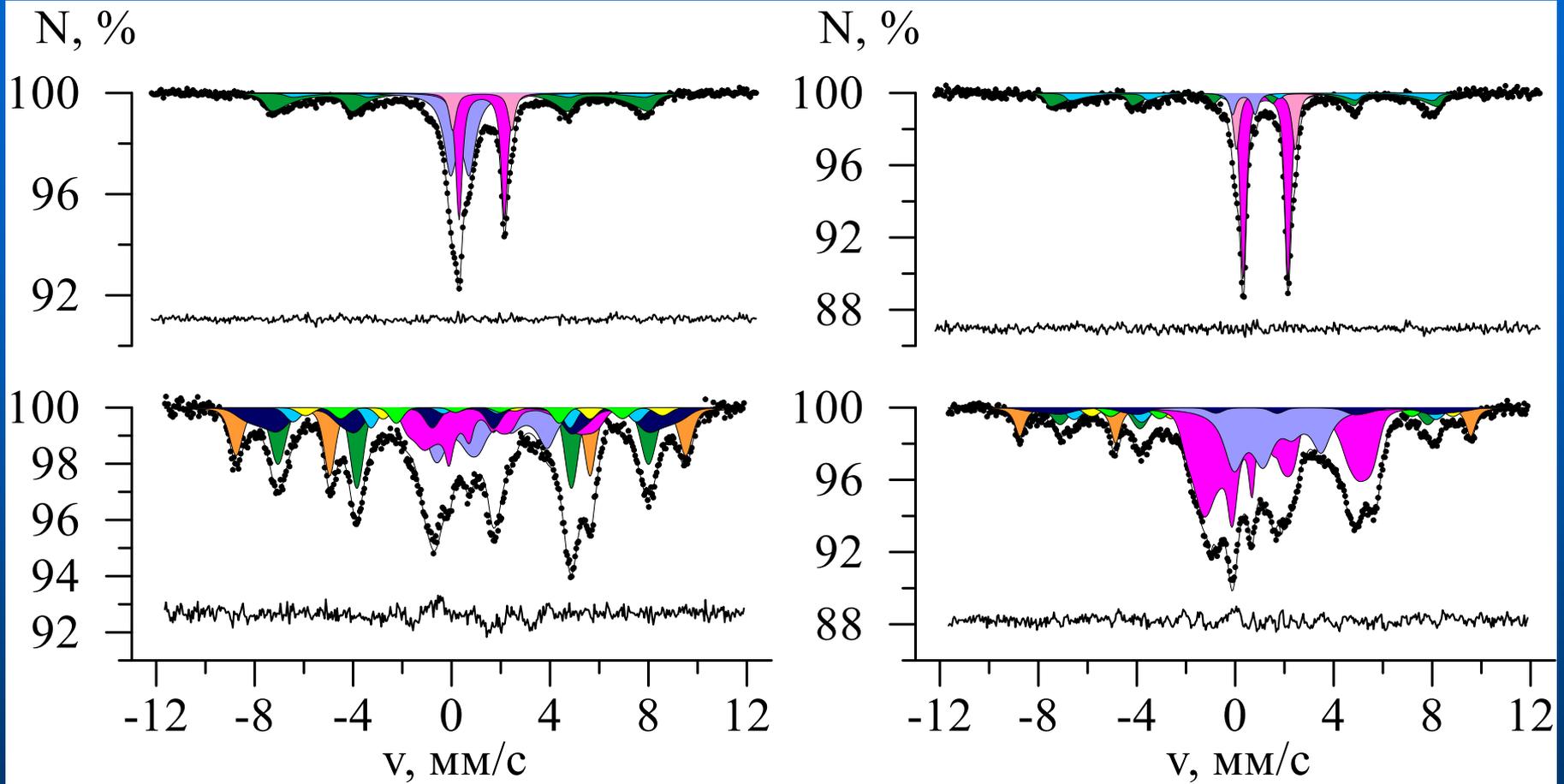


Thermincola ferriacetica



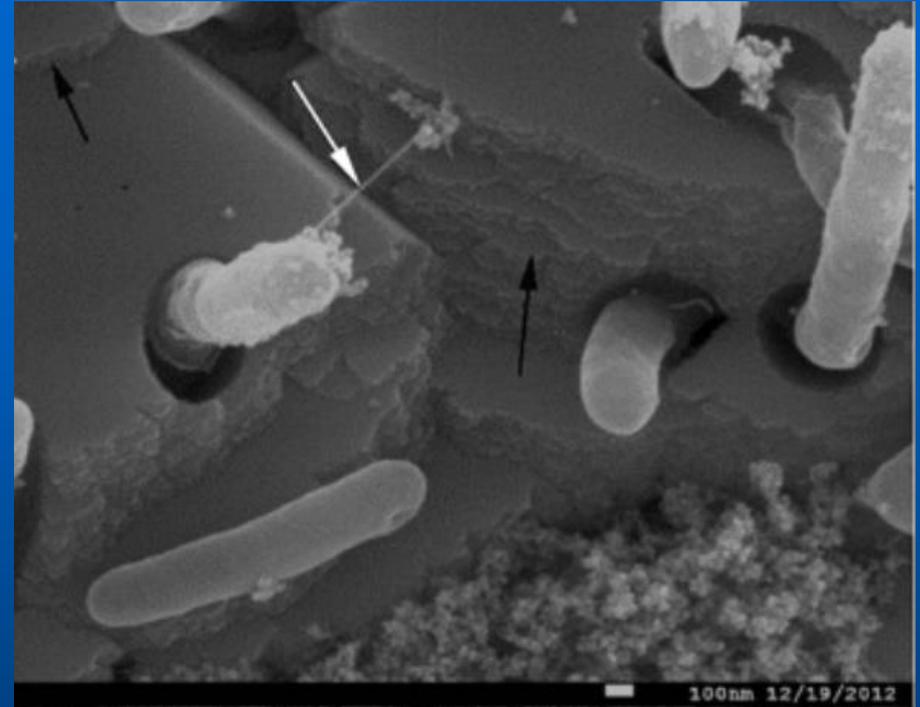
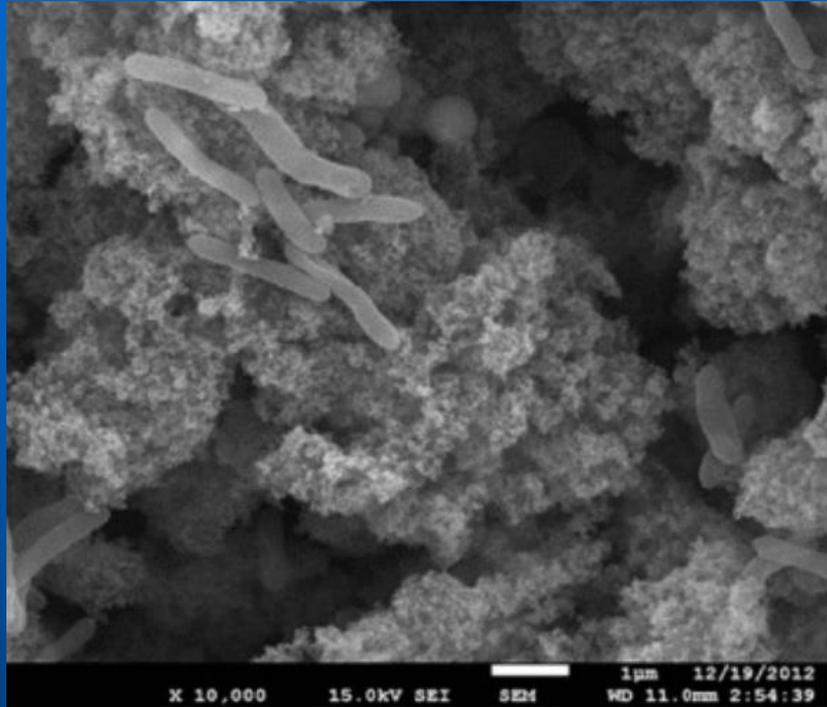
Изображения СЭМ (а,б) сидерита, (в–е) мелких частиц магнетита, маггемита и зеленой ржавчины на поверхности сидерита, сформированные в результате трансформаций синтезированного ферригидрита бактерией *T. Ferriacetica* в присутствии N_2

Thermincola ferriacetica



Мессбауэровские спектры опытных образцов N2 и N3 (13% и 80% CO в газовой фазе), полученные при RT и при $T = 4.2\text{K}$ во внешнем магнитном поле $B = 6\text{ Тл}$.

F. ferrireducens



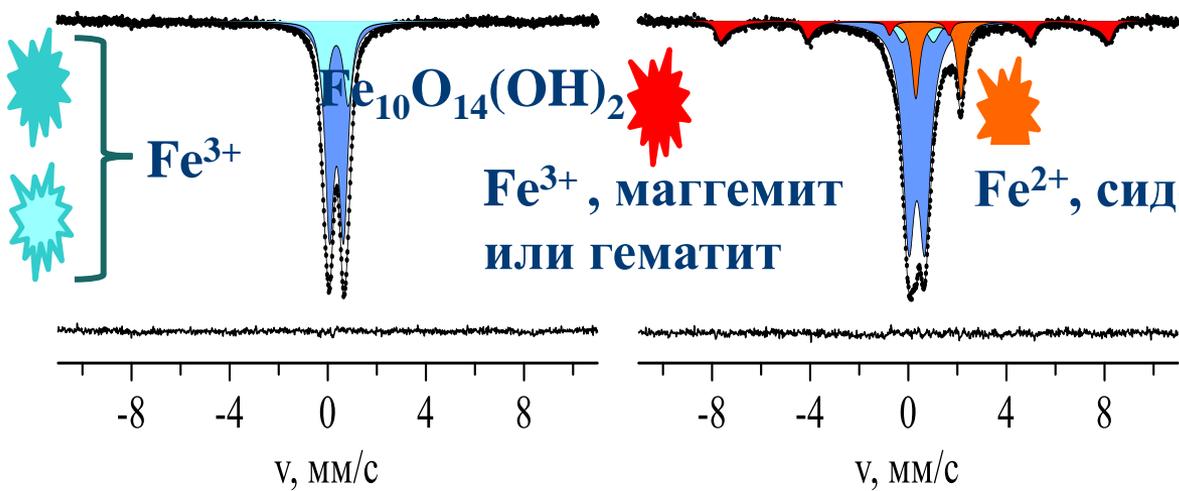
Изображения СЭМ а) маленьких кластеров наноразмерных частиц магнетита б) клеток *F. ferrireducens* на поверхности микро-частиц магнетита (черные стрелки – постепенный рост микро-кристаллов, белые стрелки – соединение клеток с поверхностью минерала с помощью пиль)

Преобразование ферригидрита *F. ferrireducens* с этанолом

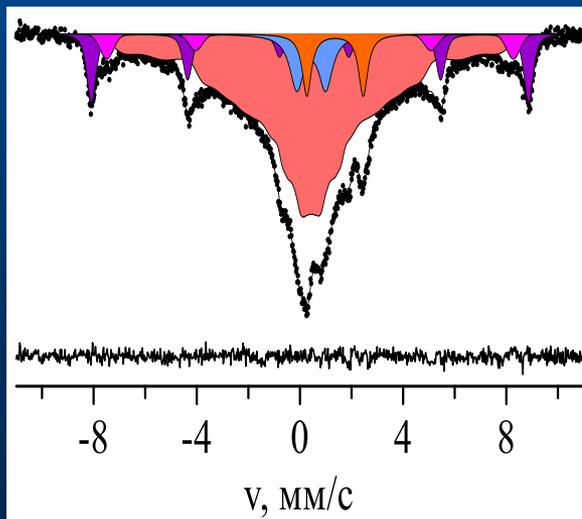
КОНТРОЛЬ

ОПЫТ

Восстановление атомов Fe^{3+}
в структуре ферригидрита



- Сидерит
- **Магнетит**



Fe^{3+} , гематит
 $\alpha-Fe_2O_3$



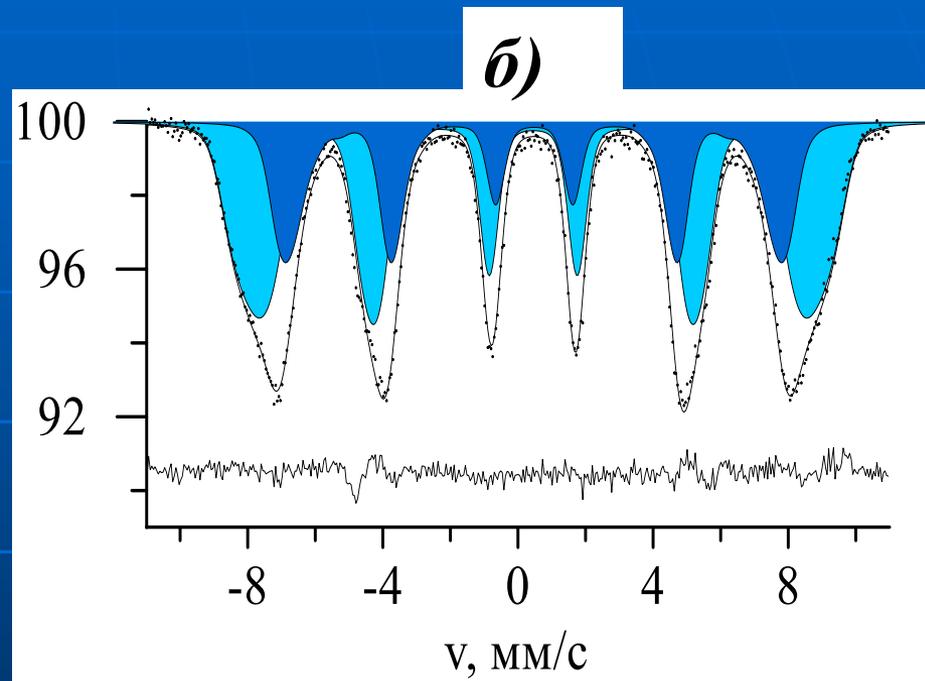
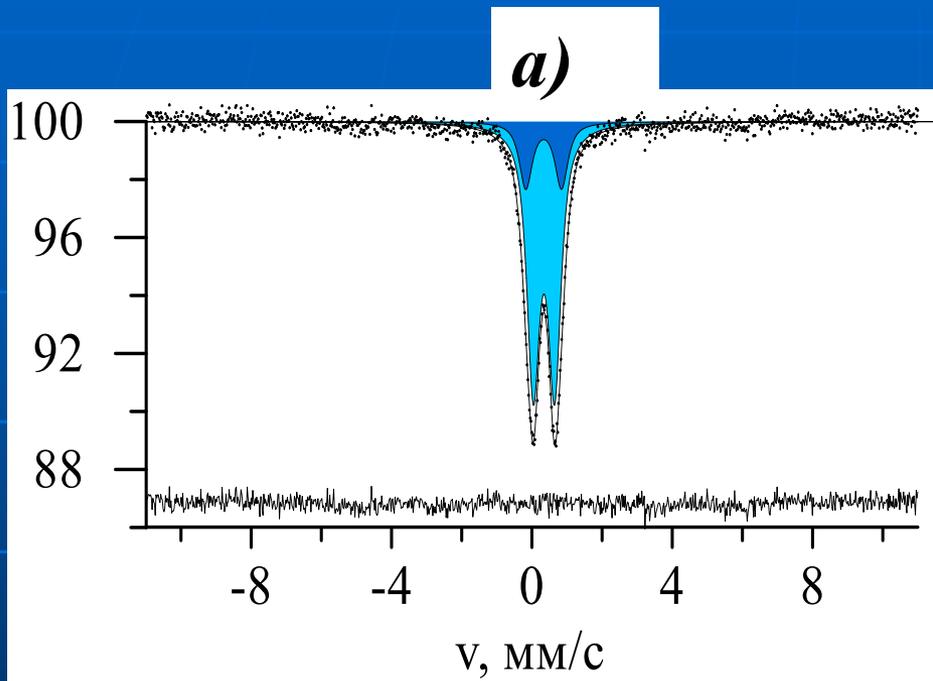
Fe^{3+} , маггемит
 $\gamma-Fe_2O_3$



Мелкие частицы
маггемита и гематита

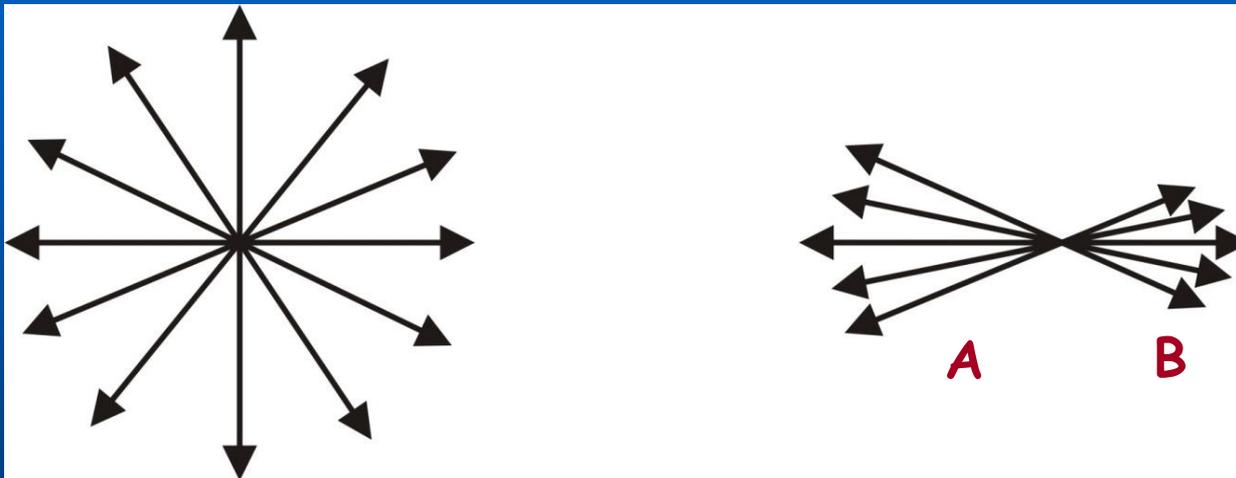
- Маггемит
- Гематит

Мёссбауэровские измерения контрольного образца СФ



Мёссбауэровский спектр контрольного образца СФ
а) при комнатной температуре и б) при $T = 4.2$ К
во внешнем магнитном поле $B = 6$ Тл

Распределение магнитных моментов в СФ



$B = 0$

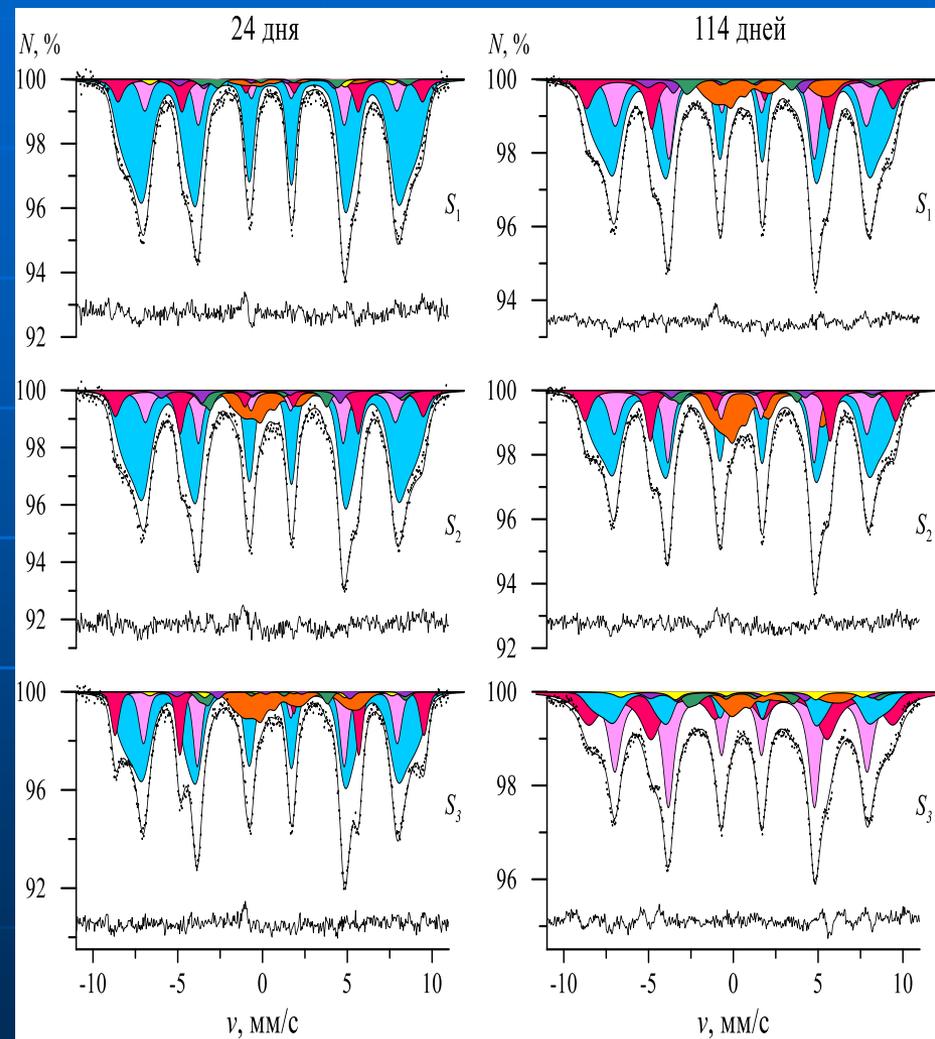
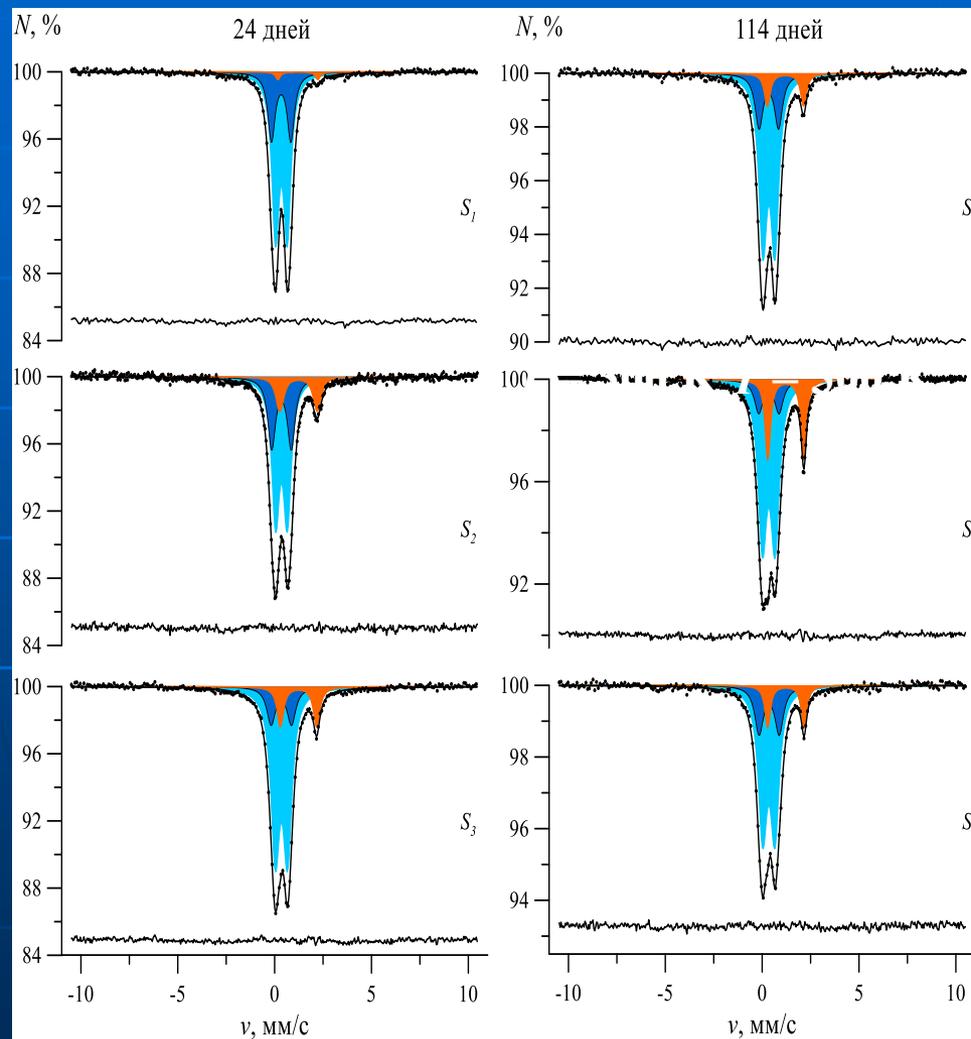


$B \neq 0$

Мёссбауэровские измерения

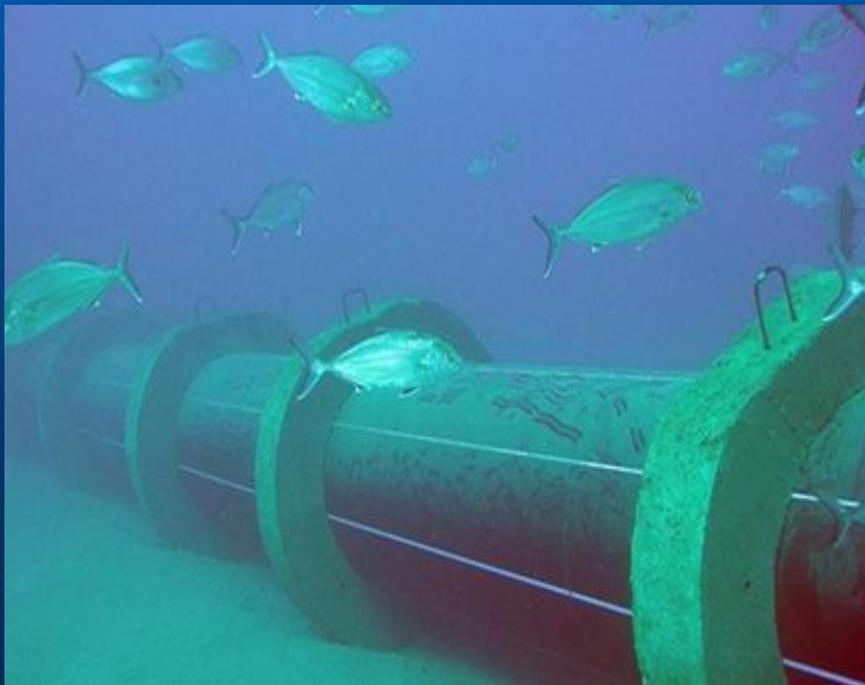
$T = 300 \text{ K}$

$T = 4.2 \text{ K}, B = 6 \text{ Тл}$



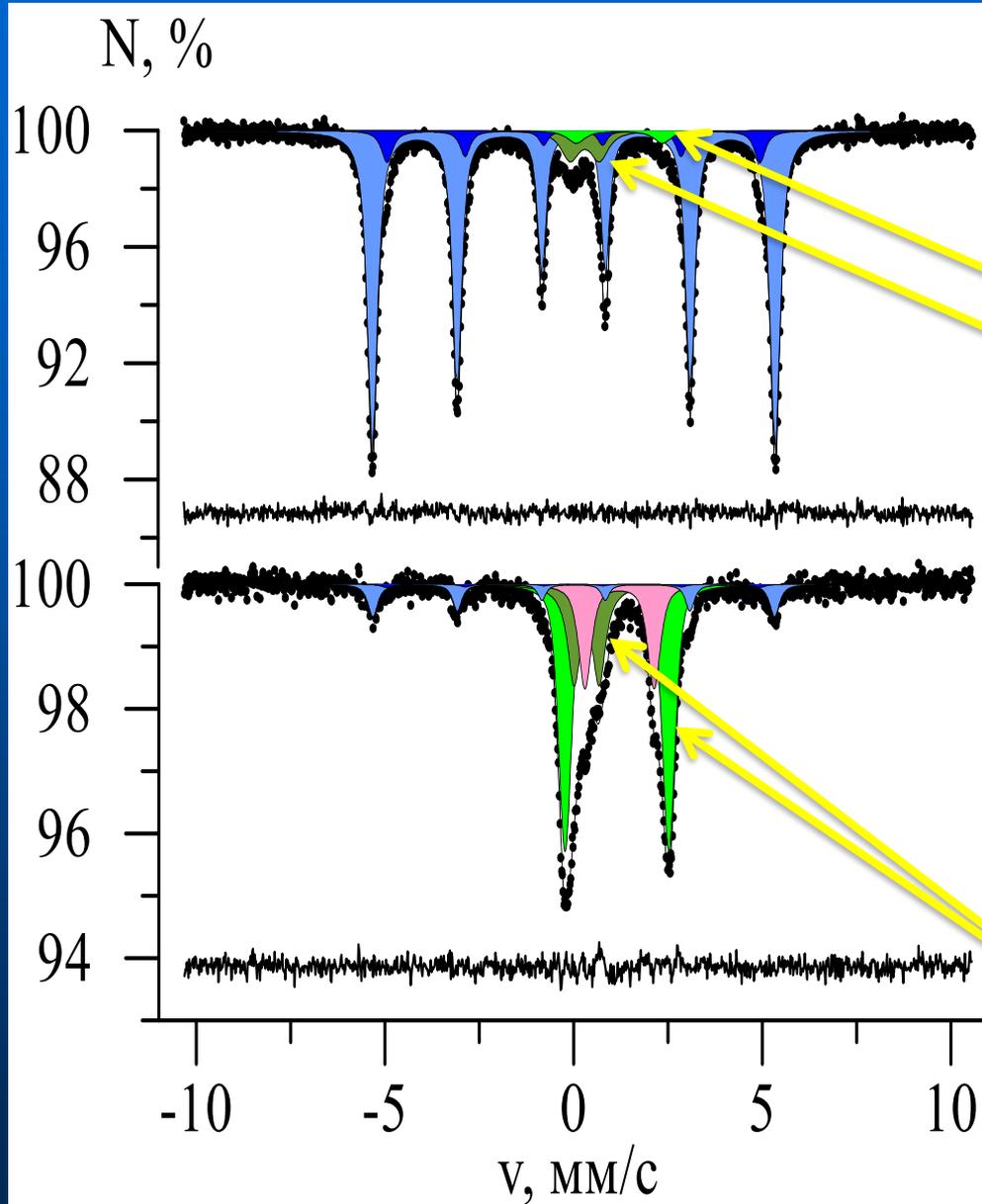
Биокоррозия

В последнее время появляется все больше данных об активном участии микроорганизмов в процессе окисления железа в бескислородных средах, в том числе в морских и пресных водах.



Коррозия металлического железа, обусловленная жизнедеятельностью бактерий, называется **биокоррозией**, и протекает в анаэробных условиях.

Биокоррозия



Спектр образца, полученный в результате роста *Geoalkalibacter ferrihydriticus*

Параметры дублета соответствуют атомам Fe²⁺

Параметры дублета соответствуют атомам Fe³⁺

Спектр опытного образца – осадок

Темно-зеленый дублет с параметрами, соответствующими атомам Fe³⁺.

Два дублета соответствуют атомам Fe²⁺.
Параметры розового дублета, соответствуют атомам железа в структуре сидерита.

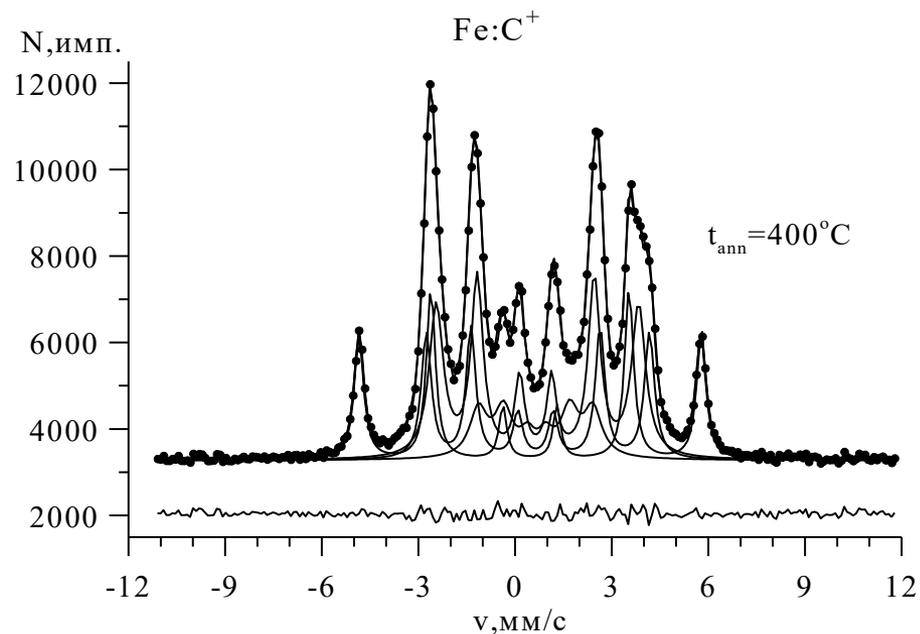
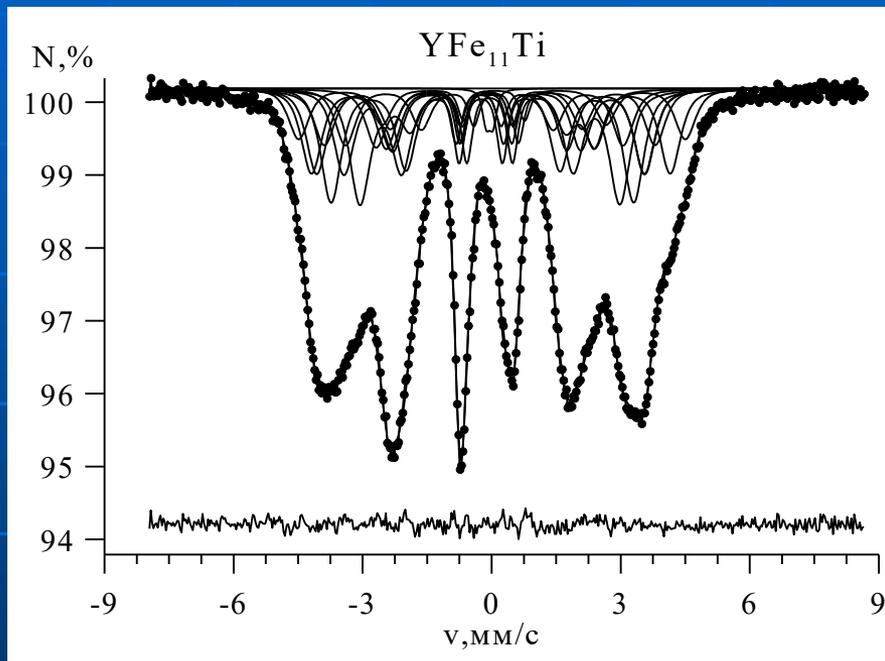
Зеленая ржавчина (green rust)



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

Многоподрешеточный магнетик

Имплантанционная система

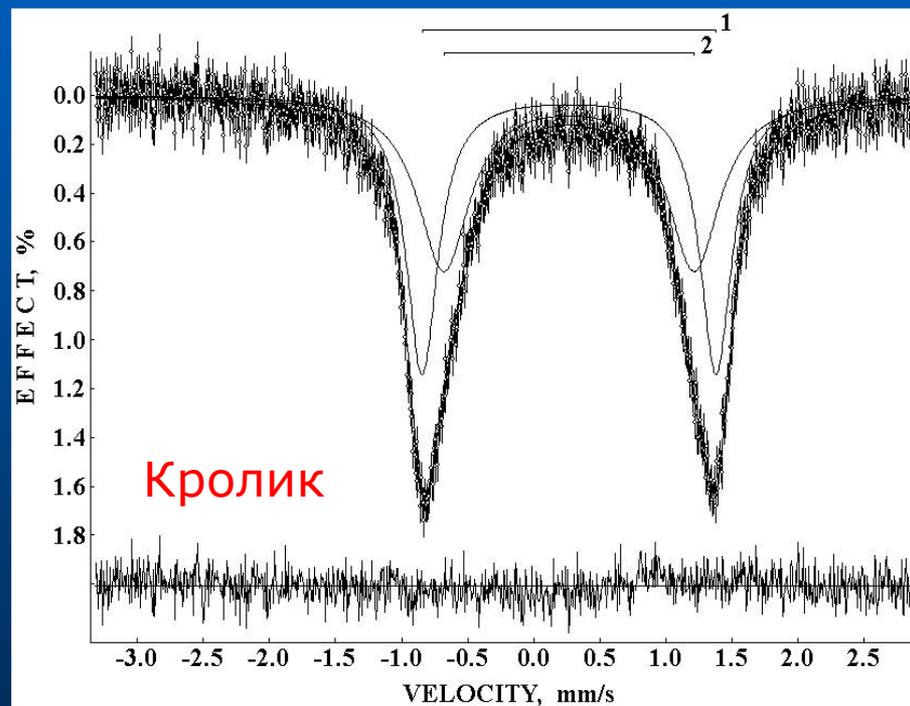
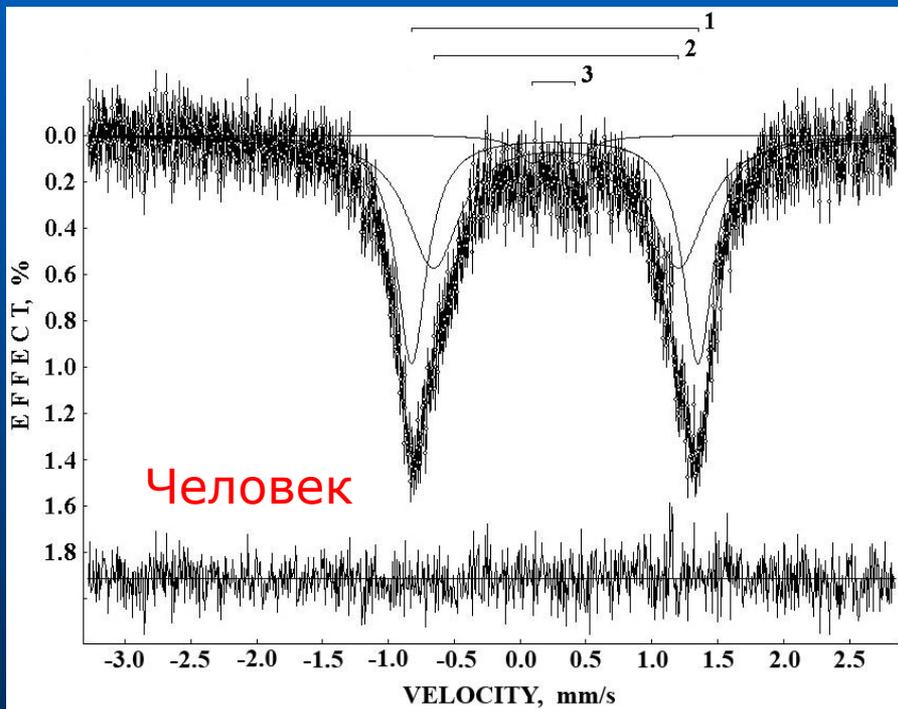


Модельная расшифровка МС и КЭМС спектров ядер ^{57}Fe

РАЗВИТИЕ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ВЫСОКИМ СКОРОСТНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, В ИЗУЧЕНИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ И НАНОСТРУКТУРНЫХ СИСТЕМ И ВЕЩЕСТВА ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

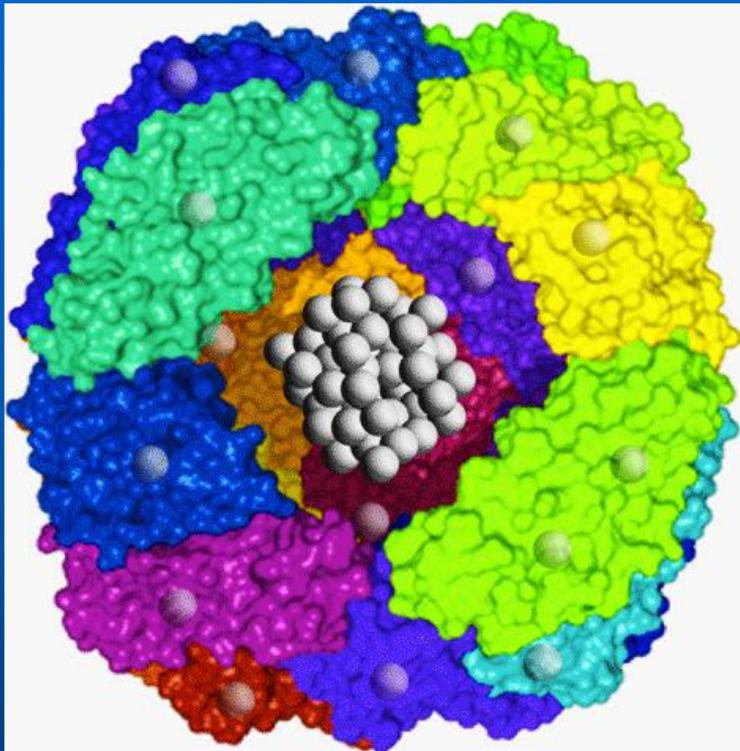
А. А. Максимова, И. В. Аленкина, М. В. Горюнов, М. В. Ушаков, Е. В. Петрова, Е. Г. Новиков, В. А. Семёнкин, М. И. Оштрах

Траектория исследований – человек, природа, технологии, выпуск 1, 2023

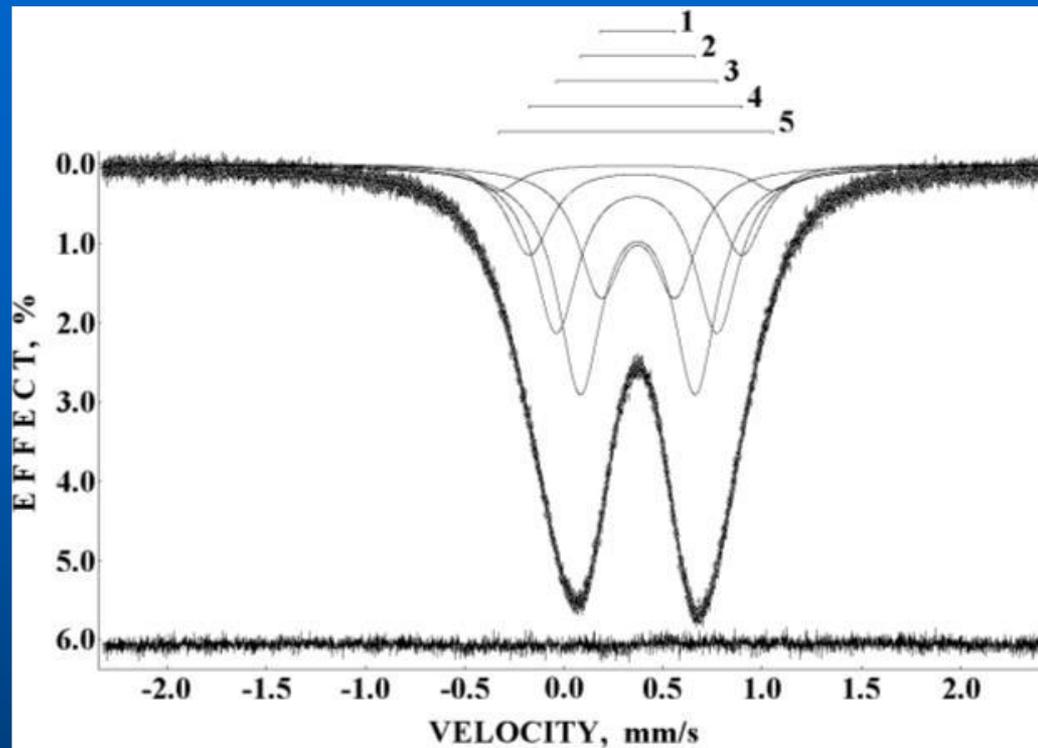


Мессбауэровские спектры оксигемоглобинов человека и кролика.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

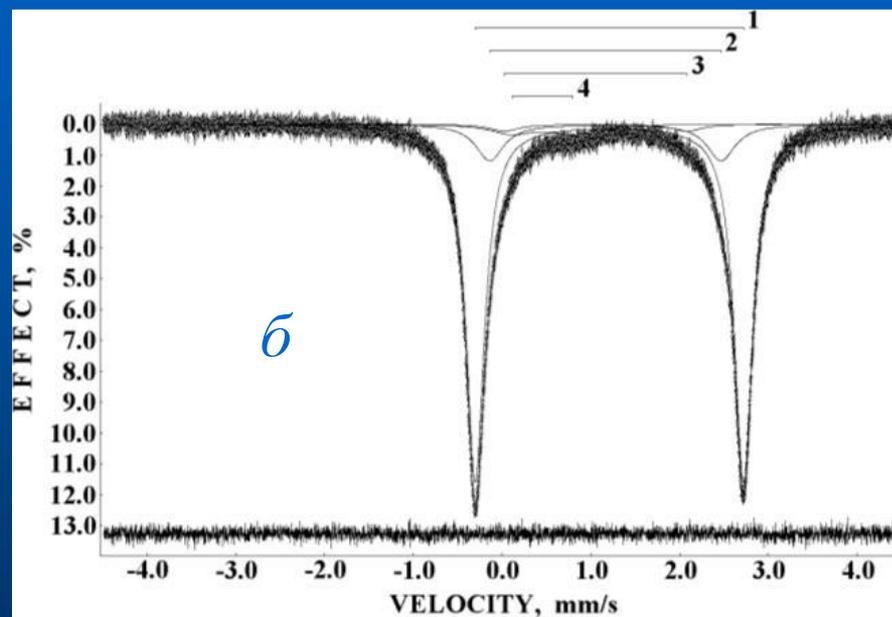
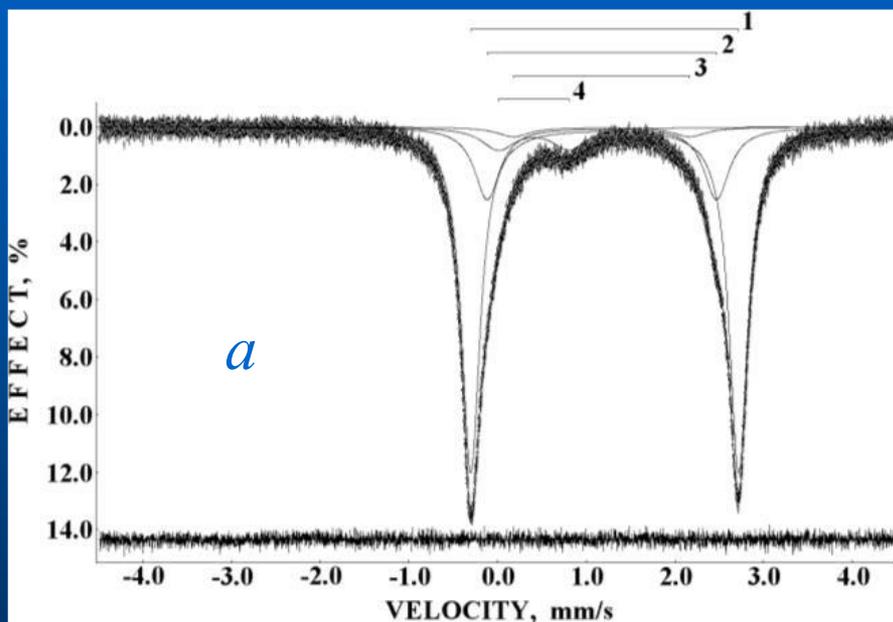


Структура макромолекулы
ферритина



Мессбауэровский спектр ферритина

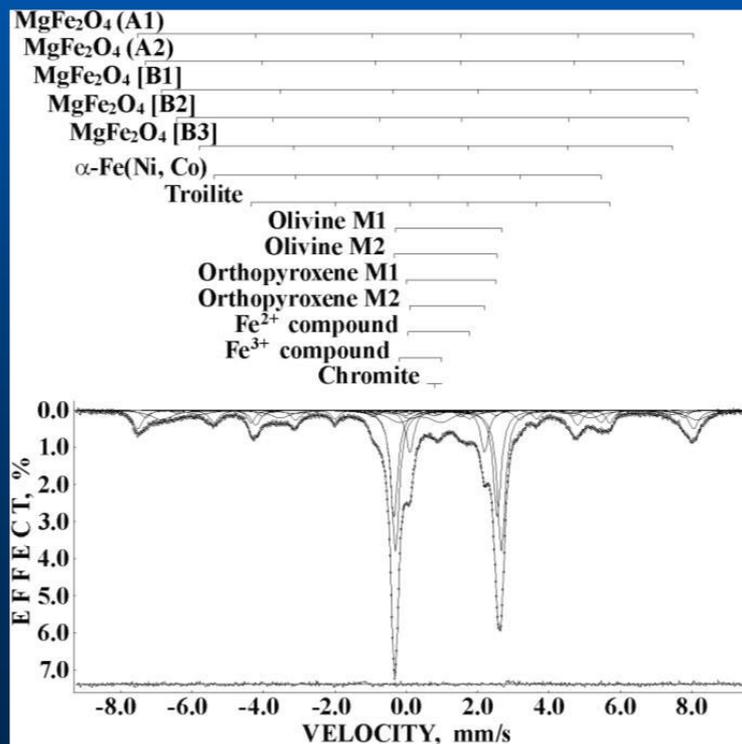
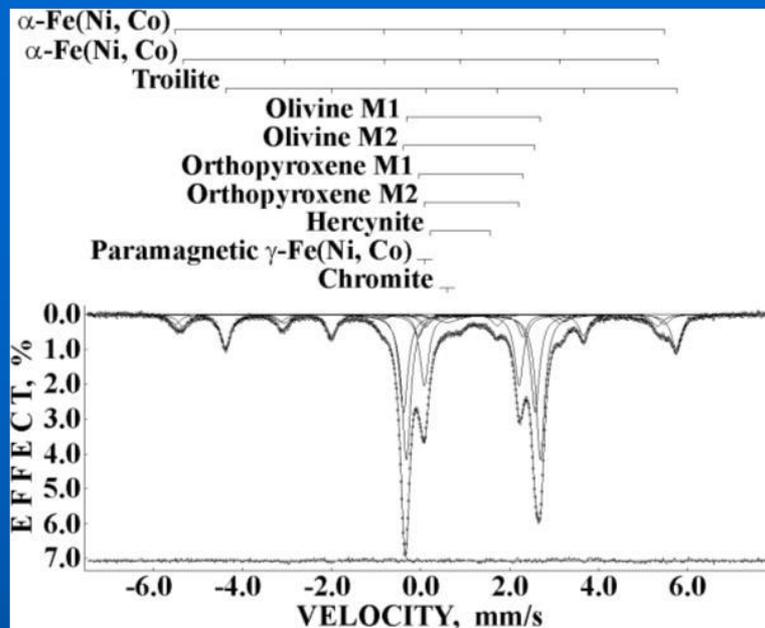
Анализ влияния старения препарата на соединения железа был проведен для образца препарата Ascofer® (Espefa, Kraków, Poland), содержащего глюконат железа ($C_{12}H_{24}FeO_{14}$)



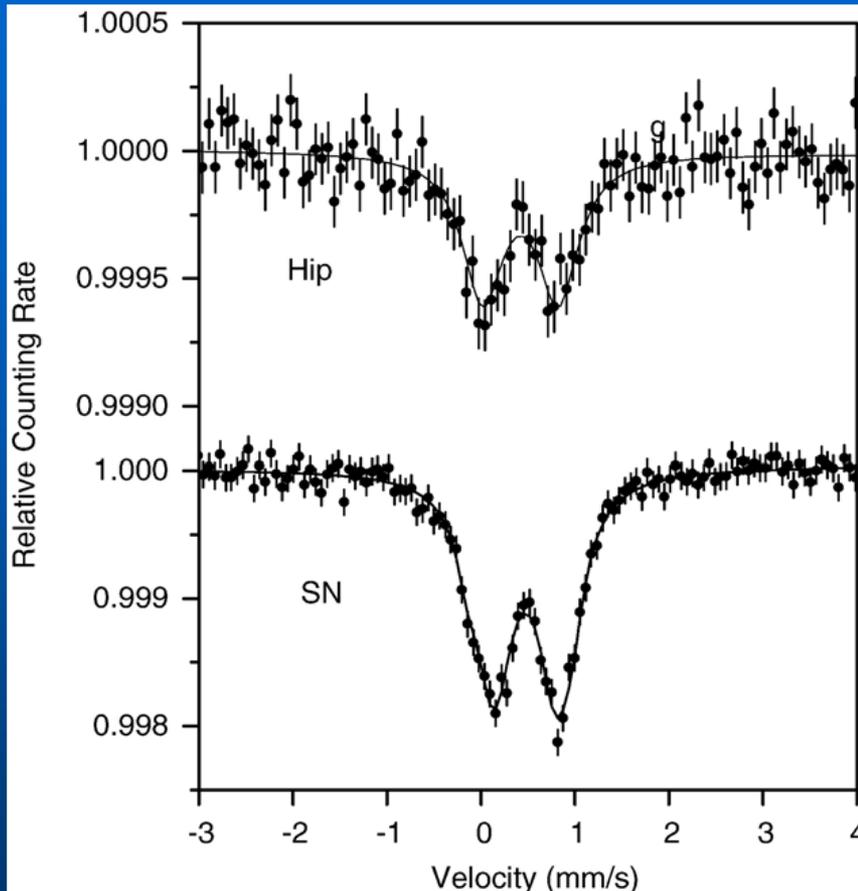
Мессбауэровские спектры препарата Ascofer®: свежего на момент измерения (а) и с истекшим в 2004 г. сроком годности (б)



Фрагмент метеорита Озерки L6 с указанием внутренней области и коры плавления



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС



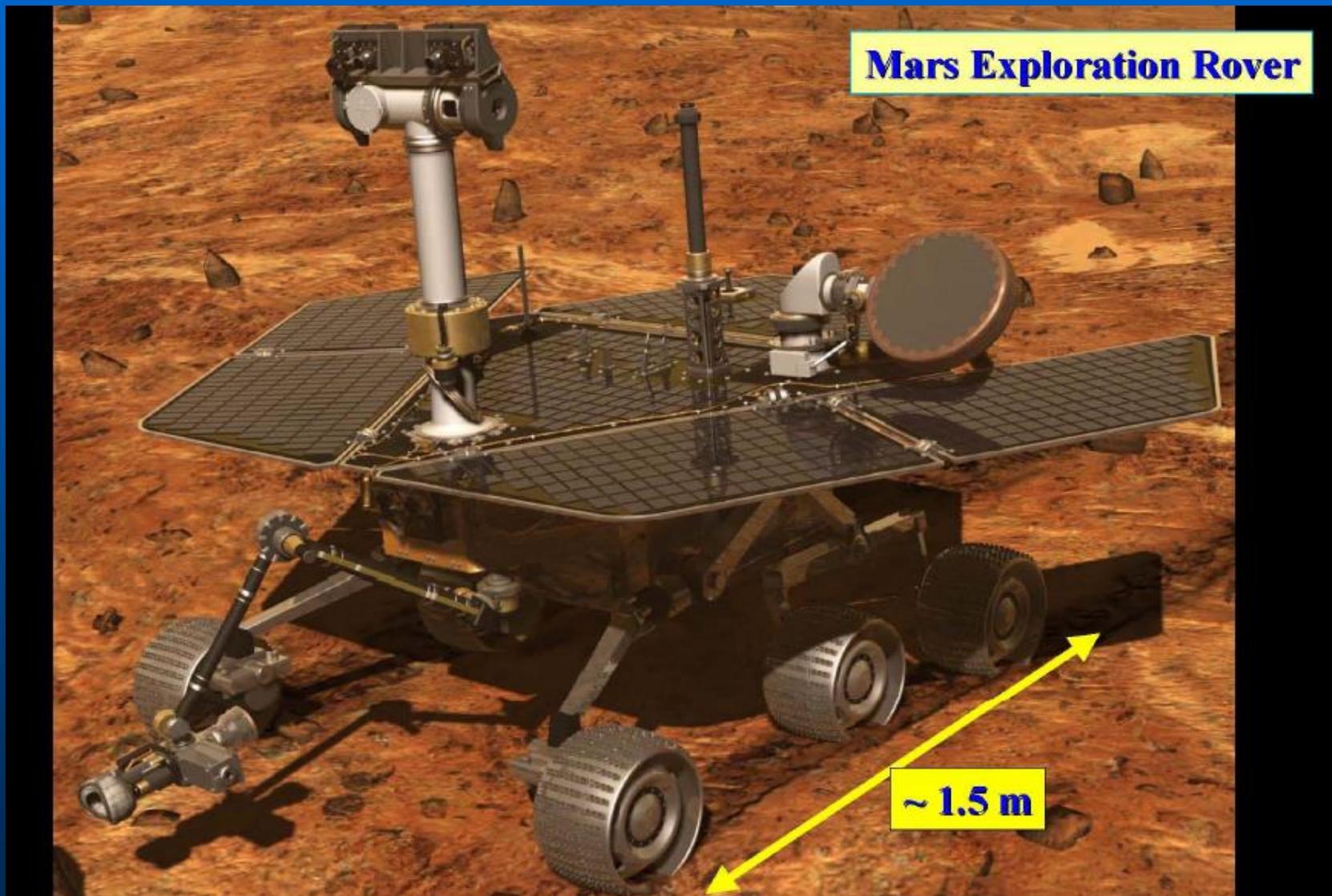
Friedman, A., Galazka-Friedman, J., Bauminger, E. R., & Koziorowski, D. (2006). Iron and ferritin in hippocampal cortex and substantia nigra in human brain—Implications for the possible role of iron in dementia. *Journal of the neurological sciences*, 248(1-2), 31-34.

Mössbauer spectra of hippocampus (Hip) and substantia nigra (SN) obtained at 90 K from samples of about 1 g of fresh frozen tissues.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

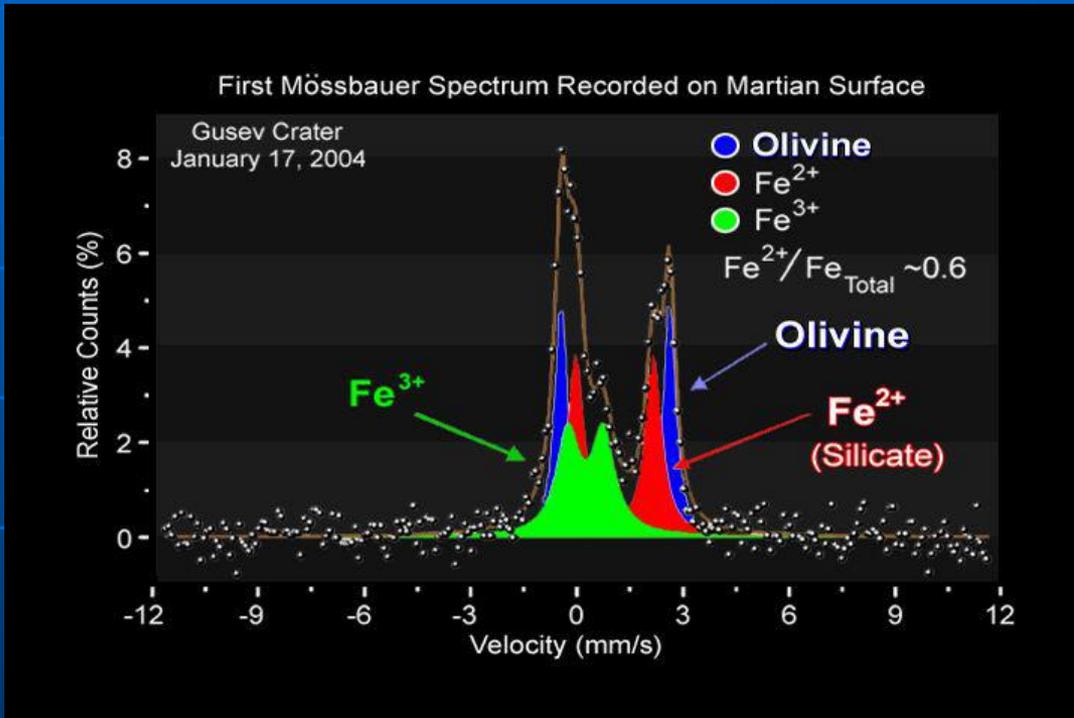
Mars Exploration Rover

~ 1.5 m



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

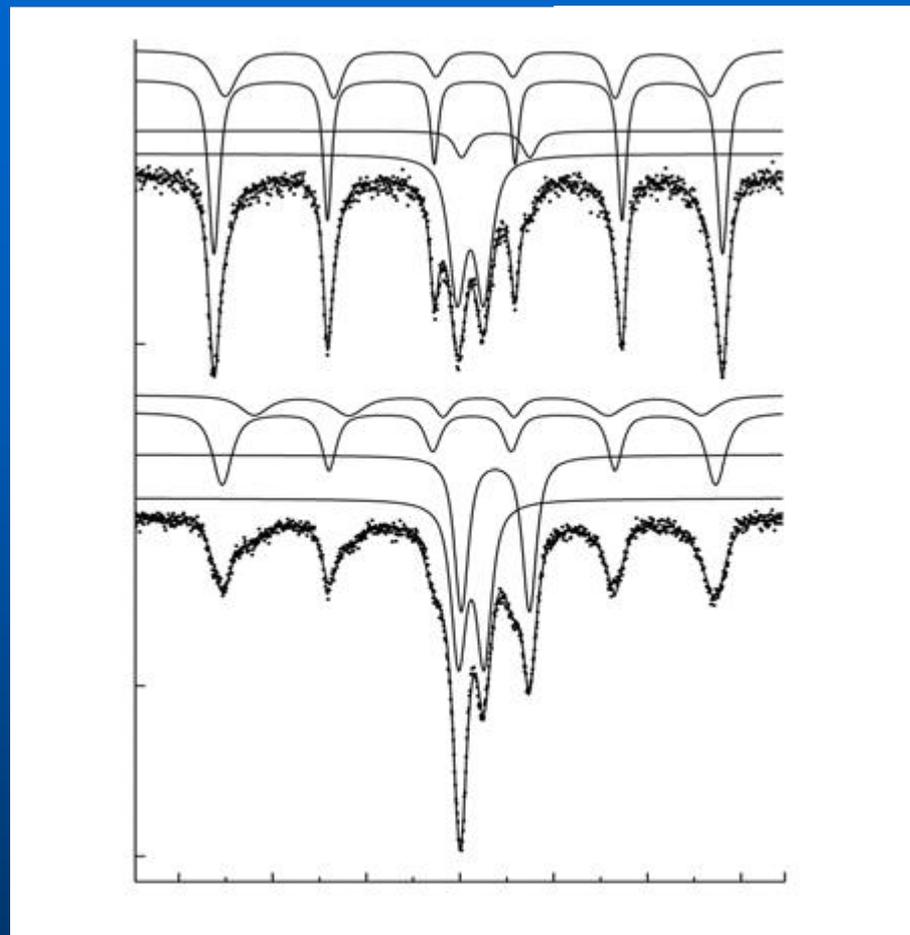
Спектр Марсианского грунта



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС



Внешний вид сфероконического сосуда



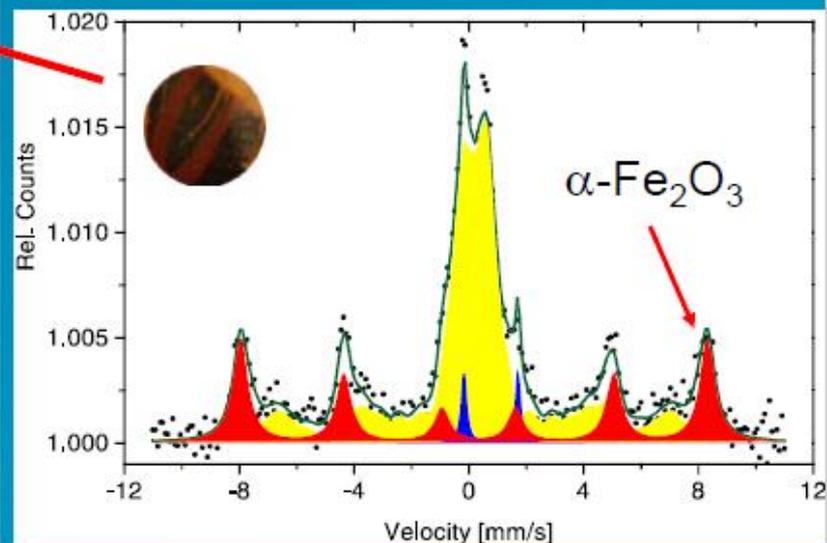
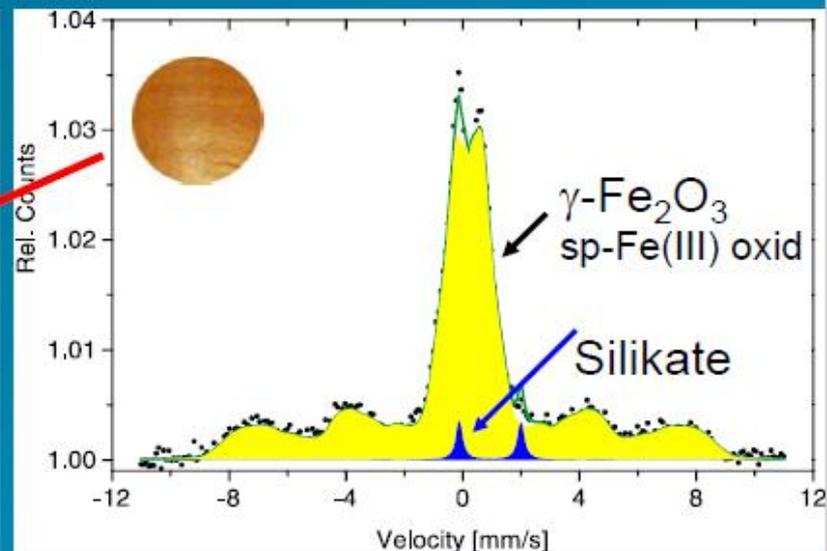
Мёссбауэровские спектры внешней и внутренней части образца

Иванова, А. Г., Нуретдинова, А. Р., Пятаев, А. В., Валиулина, С. И., & Воронина, Е. В. (2017). ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ СФЕРОКОНИЧЕСКИХ СОСУДОВ БОЛГАРА. *Журнал прикладной спектроскопии*, 84(2), 253-257

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

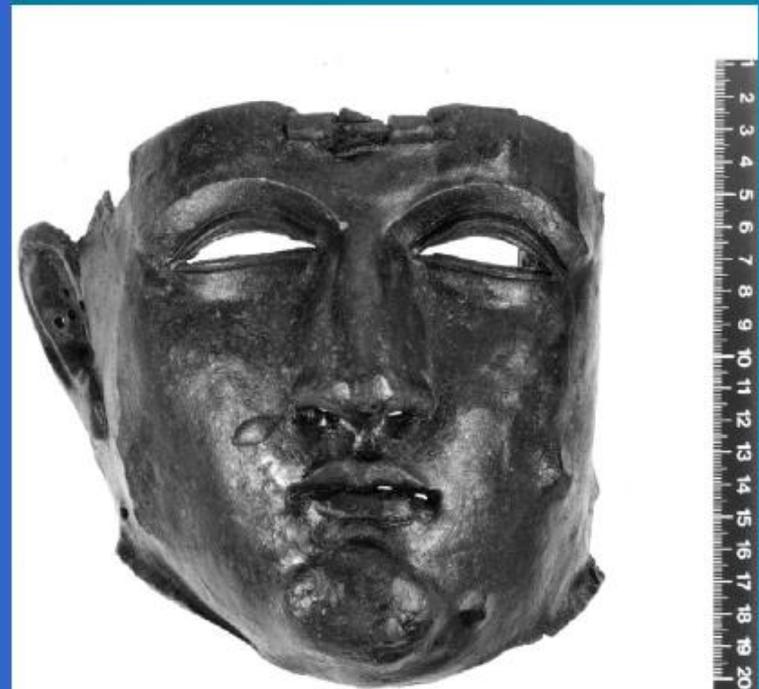
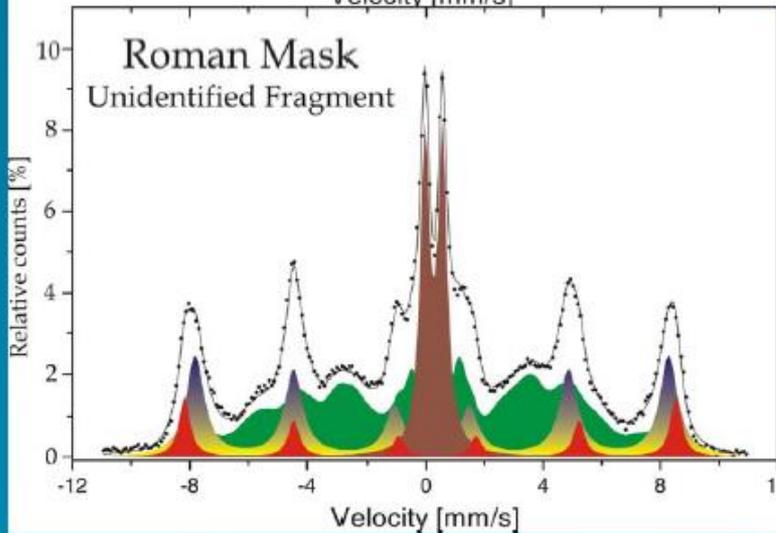
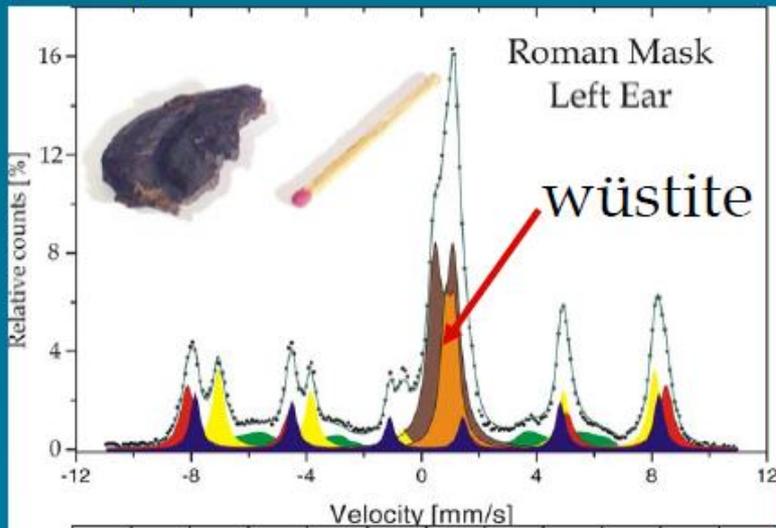
Lekythos
500 b. C.

Röm.-germ.
Zentralmuseum
Mainz



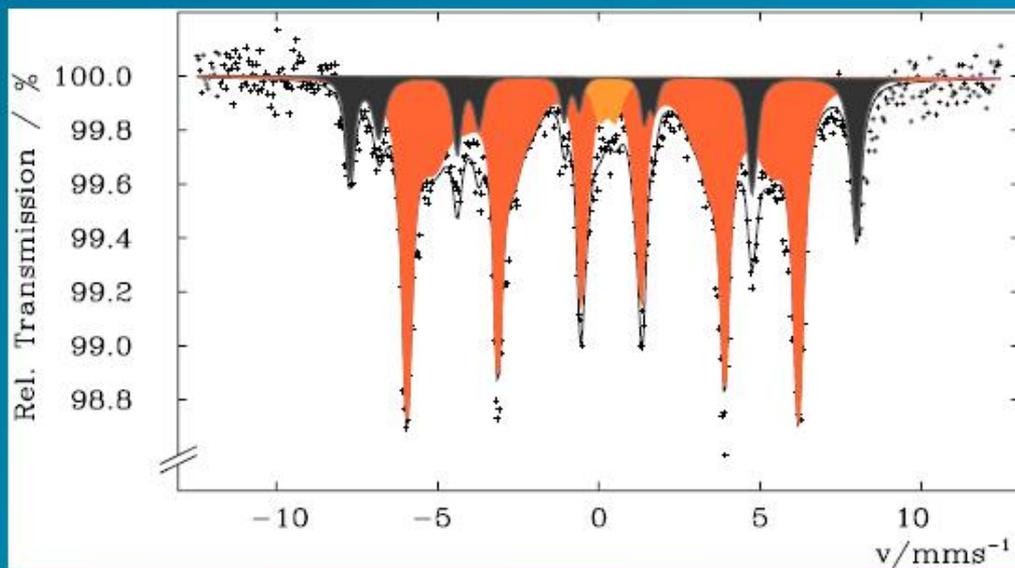
ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

Restoration of a Roman Mask



ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

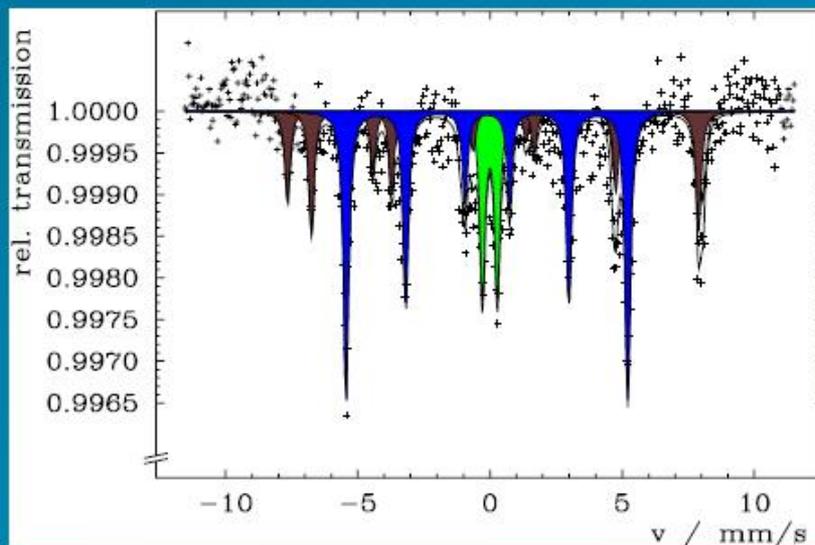
^{57}Fe Mössbauer Spectrum of a 1 US-Dollar Bill



Constituents	area-%
Magnetite, Fe_3O_4	20
Goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$	80

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

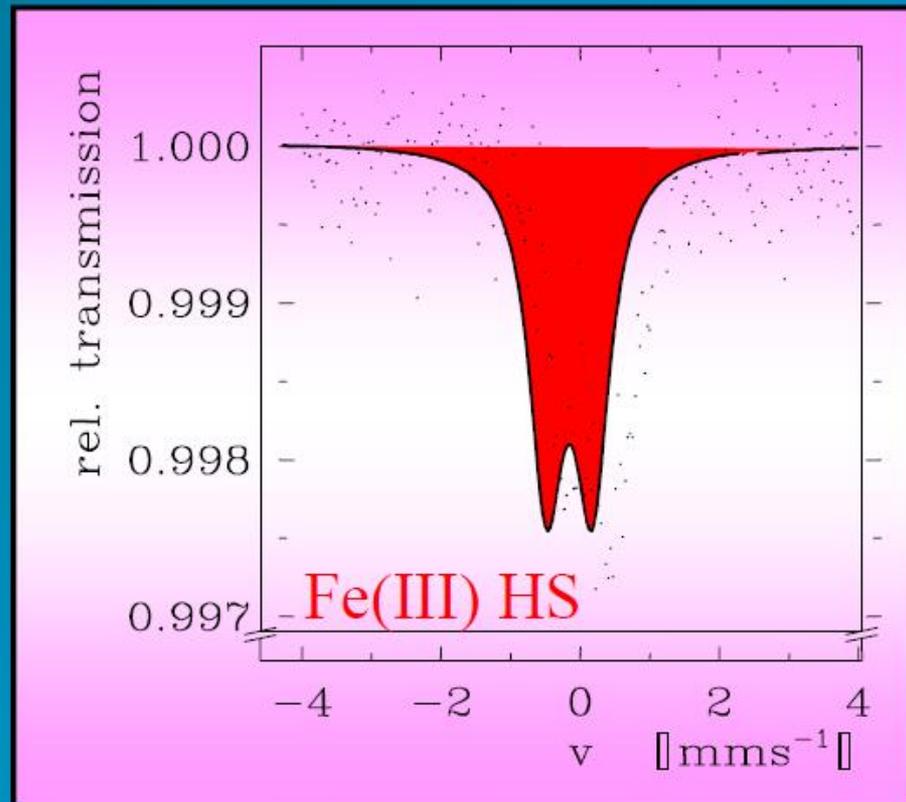
^{57}Fe Mössbauer Spectrum of a 50 Euro Bill



<u>Constituents</u>	<u>area-/%</u>
α Iron	48
Magnetite	36
doublet	16

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МС

Eisen in französischem Rotwein



Спасибо за внимание!

