

*Когерентные явления  
при резонансном ядерном  
взаимодействии гамма-квантов  
и синхротронного излучения  
в кристаллах (обзор)*

В. Г. Кон

Посвящается 80-летию Ю. М. Кагана

# Введение

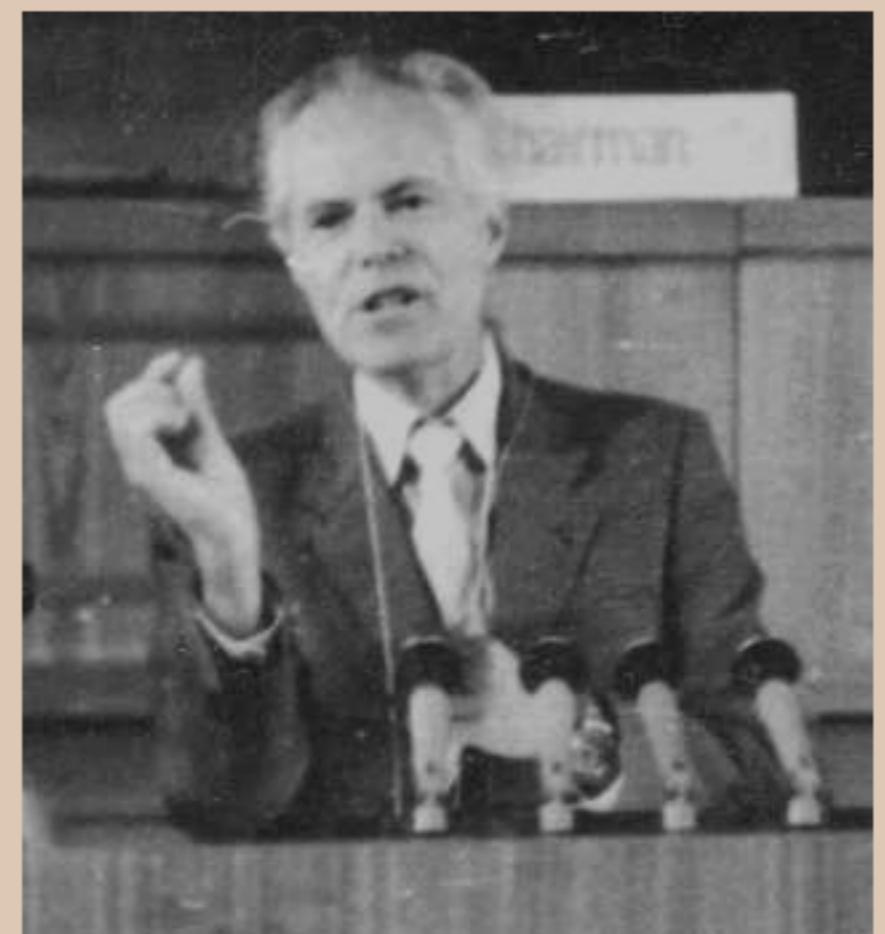
В обычной оптике (ЭР) достаточно иметь только когерентный источник. Ядерное резонансное рассеяние происходит через поглощение и переизлучение фотонов, то есть через промежуточное состояние. Очень интересны изомерные состояния. Так ядро  $^{57}\text{Fe}$  имеет уровень с энергией  $E = 14.413$  кэв и с энергетической шириной  $\Gamma = 4.66 \cdot 10^{-9}$  эв То есть степень монохроматичности  $\Gamma / E = 3 \cdot 10^{-13}$

Когерентная ядерная оптика стала возможна только после открытия Р. Моссбауэром явления ядерного поглощения и испускания фотонов в кристалле без отдачи.

R. L. Mossbauer, Z. Physik, 151 (1958) 124

R. L. Mossbauer, Naturwissenschaften,  
45 (1958) 538

R. L. Mossbauer, Z. Naturforsch.,  
14a (1959) 211



# Первые эксперименты

Радиоактивный источник. Энергетические спектры. Эффект Допплера. Интерференция ЭР и ЯРР, приводящая к асимметрии спектра поглощения и рассеяния из-за разного знака амплитуды рассеяния по обе стороны резонанса. Кинематическая дифракция. Чисто ядерная дифракция. Сверхтонкое расщепление уровней и интерференция разных резонансов.

P. I. Black, P.B. Moon, Nature, 188 (1960) 481

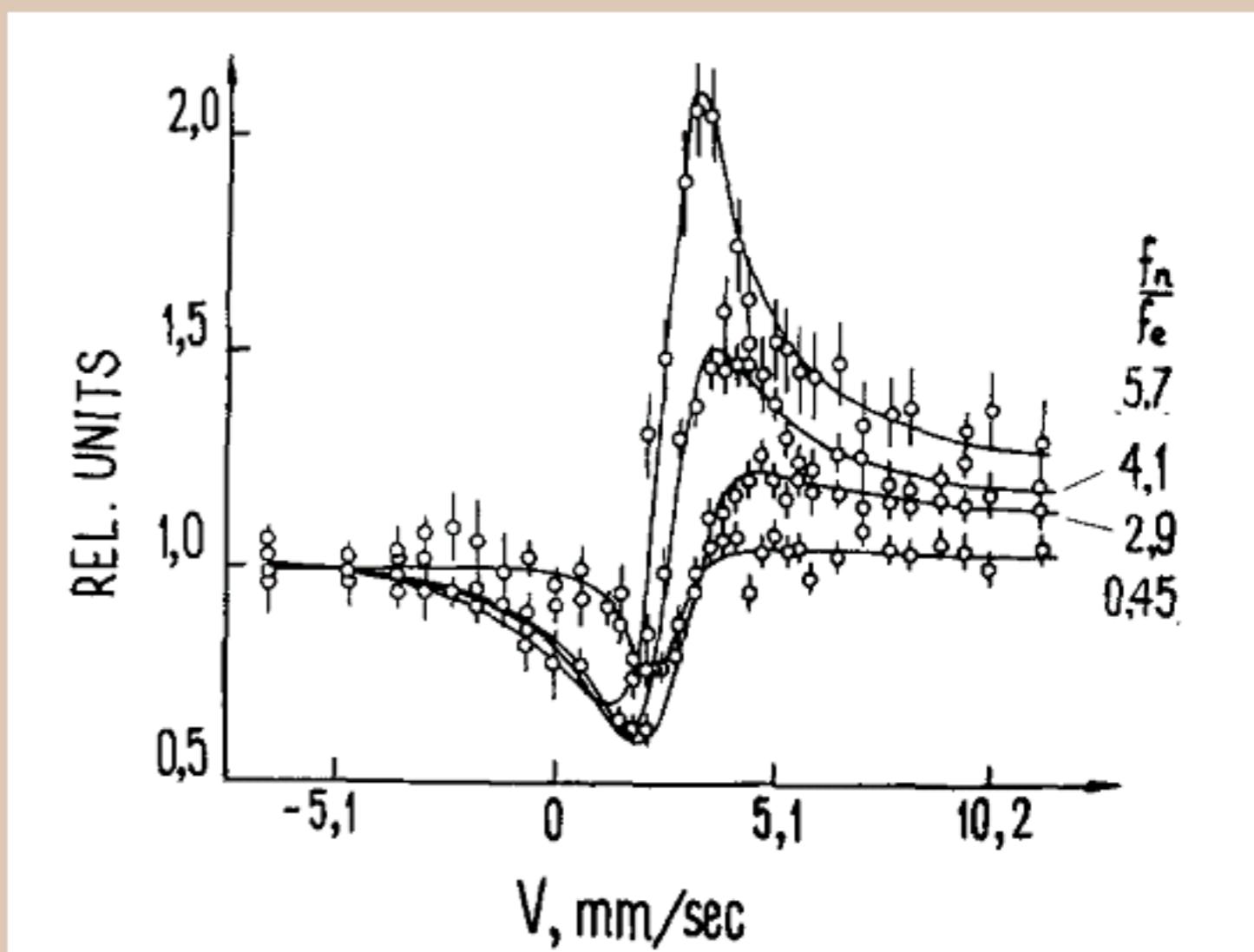
В. К. Войтовецкий и др.,

ЖЭТФ, 54 (1968) 1361

Г. В. Смирнов, В. В. Скляревский и др.

Письма в ЖЭТФ, 9 (1969) 123

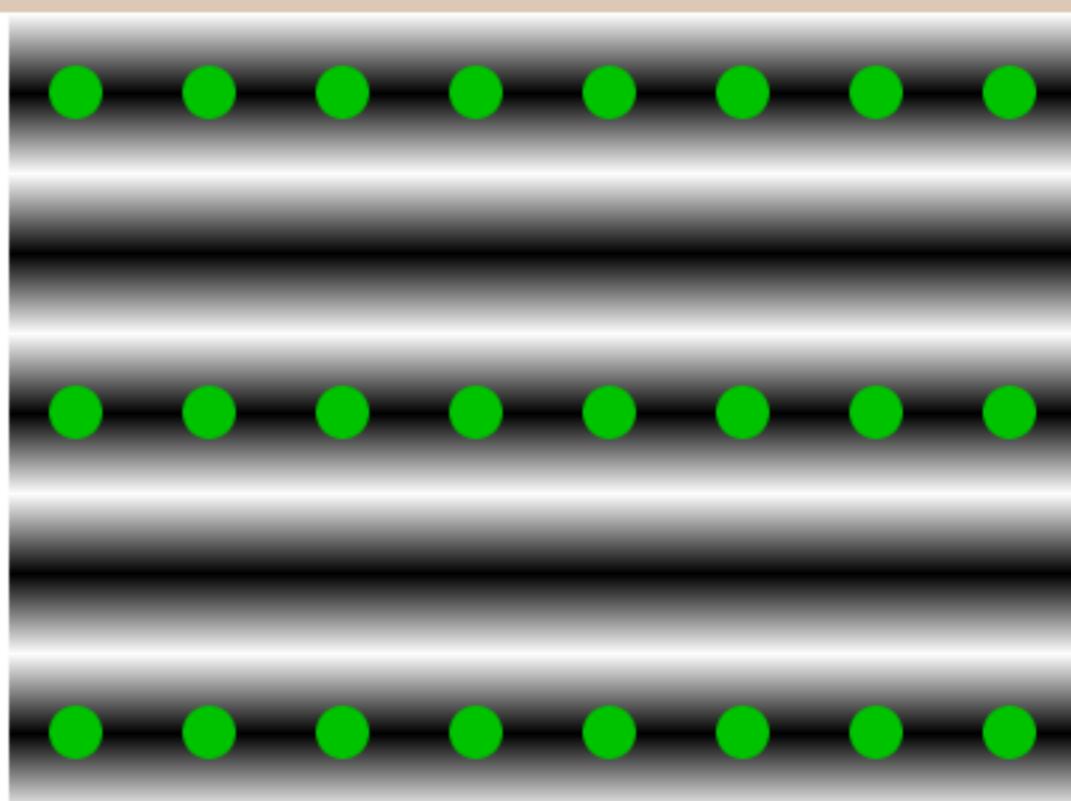
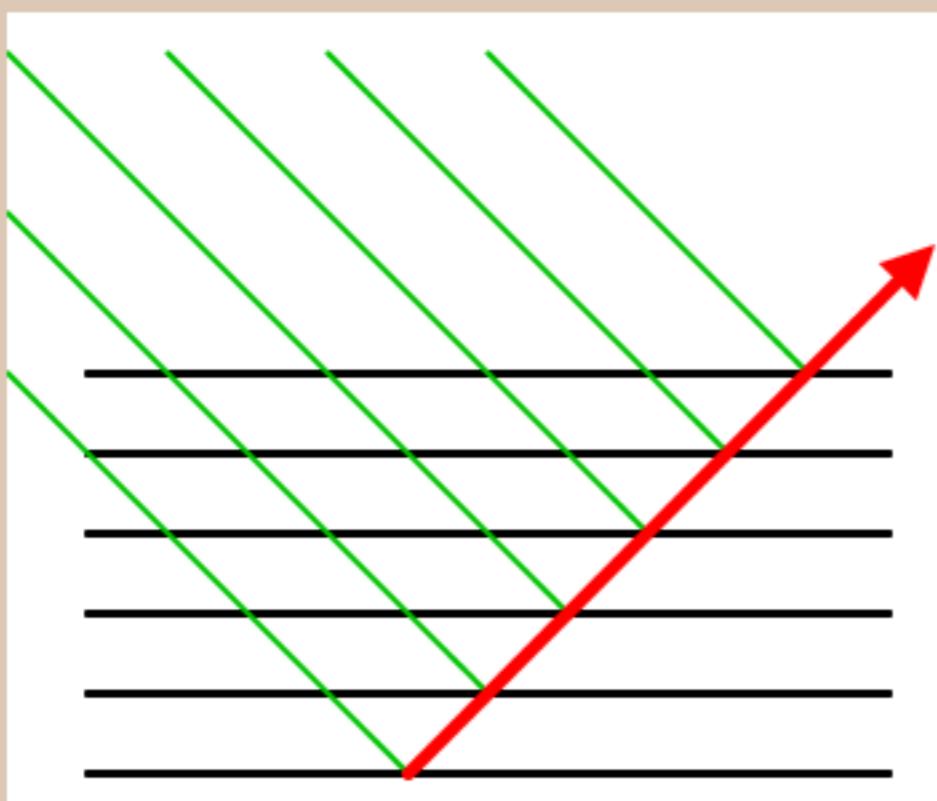
Рисунок из работы Войтовецкого.  
Дифракция в мозаичном кристалле  
Sn-119 при понижении температуры,  
что увеличивает отношение  
амплитуд ЯРР и ЭР



# Монокристал. Эффект Бормана

В ЭР известен эффект АП. G.Borrmann, Z. Physik, 42 (1941) 157

Суть эффекта описывает теория Эвальда-Лауэ. При выполнении условия Брэгга слабые волны, отраженные от разных плоскостей конструктивно интерферируют и амплитуда отраженной волны накапливается на длине экстинкции до величины сравнимой с амплитудой падающей волны. Образуется стоячая рентгеновская волна с нулевой амплитудой в узлах КР. Так как рассеяние мгновенное, то тепловые колебания частично портят эффект аномального прохождения.



# Динамическая теория ЯРР

Ю. М. Каган, А. М. Афанасьев, ЖЭТФ, 48 (1965) 327; 49 (1965) 1504, . . .

J. P. Hannon, G.T. Trammell, Phys. Rev. 169 (1968) 315; 186 (1969) 306

Две школы, два подхода на многие годы. Реально три подхода.

Подход школы Кагана физически проще и продолжает традиции РД

Используются уравнения Максвелла и квантовая механика.

Есть еще квантовая электродинамика (уравнения Дайсона).

и квантовая теория излучения Гайтлера

$$(\mathbf{k}_h^2 - \kappa^2)E^i(k_h) - k_h^i(\mathbf{k}_h \mathbf{E}(\mathbf{k}_h)) = \kappa^2 \sum_{h'} g_{hh'}^{il} E^l(\mathbf{k}_{h'})$$

$$g_{hh'}^{il} = -\frac{4\pi\eta}{\omega^2 v_0} \frac{1}{2I_0 + 1} \sum_{p,\zeta_0,\zeta} \frac{A_h^{i*}(p, \zeta_0, \zeta) A_{h'}^{l*}(p, \zeta_0, \zeta)}{\hbar\omega - E_p(\zeta_0, \zeta) + i\Gamma/2}$$

$$\mathbf{A}_h(p, \zeta_0, \zeta) = f_p(\mathbf{k}_h) \exp(i\mathbf{k}_h \mathbf{p}_h) \langle \hat{\mathbf{j}}_p(\mathbf{k}_h) \rangle_{\zeta_0, \zeta}$$

$$\mathbf{k}_h = \mathbf{k}_0 + \mathbf{K}_h, \quad \kappa = \frac{\omega}{c}$$

# Ядерный экситон. Эффект ПНКЯР.

Учитывая поперечность вектора электрического поля и вводя векторы поляризации в 2-хволновом случае получаем 4 уравнения. Иногда их можно разделить на 2 независимые пары. В этом случае получены условия для 100% подавления неупругих каналов, (электронов конверсии) и усиления радиационного канала. Коллективное возбуждение регулярной системы ядер при выполнении условия Брэгга приводит к пространственно-неоднородной структуре поля, при которой ядра больше не возбуждаются. В отличие от РД эффект не зависит от температуры и стопроцентный. Эффект не очевиден и намного сложнее и богаче рентгеновского аналога

$$g_{hh'}^{ss'} = \sum_{il} (\mathbf{e}_h^{(s)})_i^* g_{hh'}^{il} (\mathbf{e}_{h'}^{(s')})_l = g_{hh'}^{(s)} \delta^{ss'}, \quad h, h' = 0, 1$$

$$\alpha = 0, \quad g_{00}^{(s)} g_{11}^{(s)} - g_{01}^{(s)} g_{10}^{(s)} = 0$$

# Эксперимент. Эффект ПНКЯР.

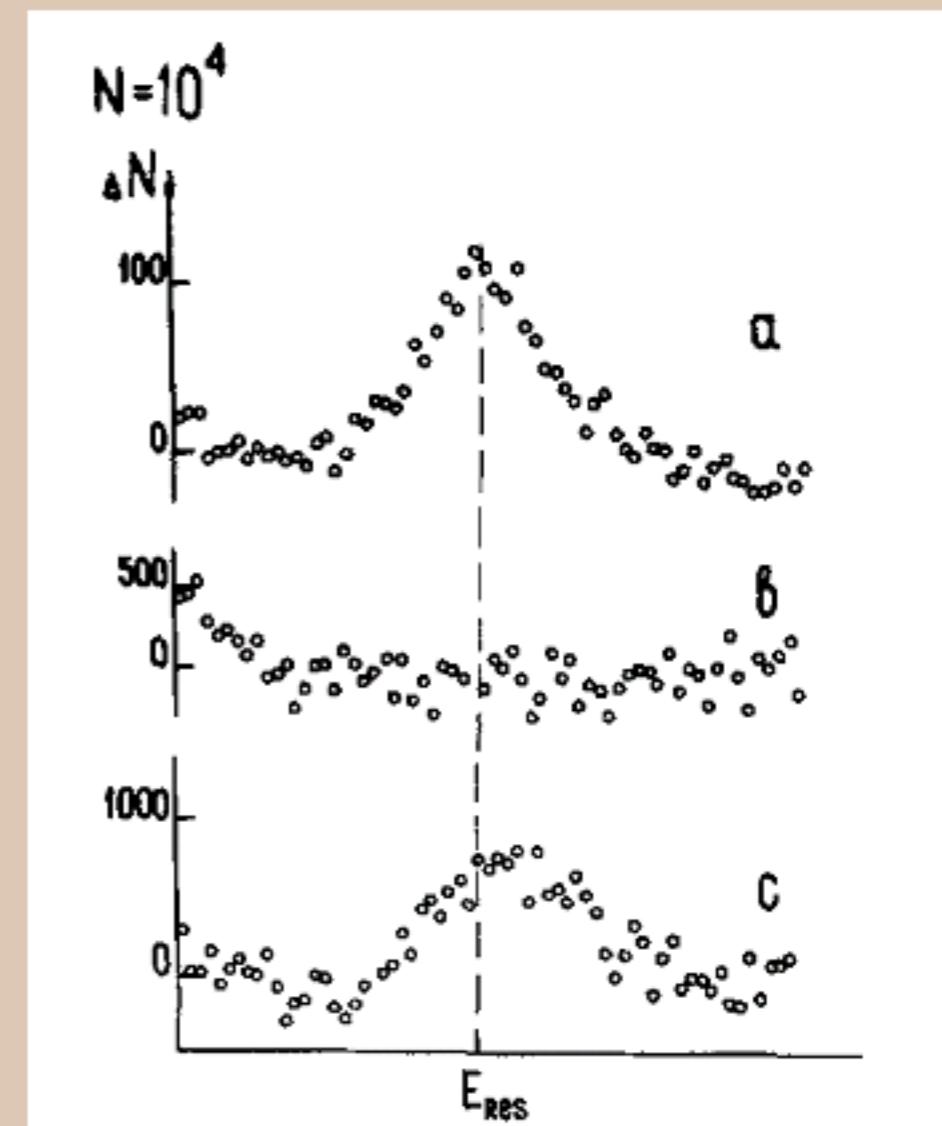
В. К. Войтовецкий и др., Письма в ЖЭТФ, 11 (1970) 149. Изотоп Sn-119.

Г. В. Смирнов и др. ЖЭТФ, 72 (1977) 340. Изотоп Fe-57, Лауэ-геометрия  
Толстый монокристалл Fe. Мессбауэровский источник и анализатор  
Без дифракции резонанса нет, но Лауэ-дифрагированный пучок  
сохраняет резонанс

(a) - падающий пучок

(b) - прошедший пучок, нет дифракции

(c) - Лауэ-дифрагированный пучок



# Эксперимент. Эффект ПНКЯР.

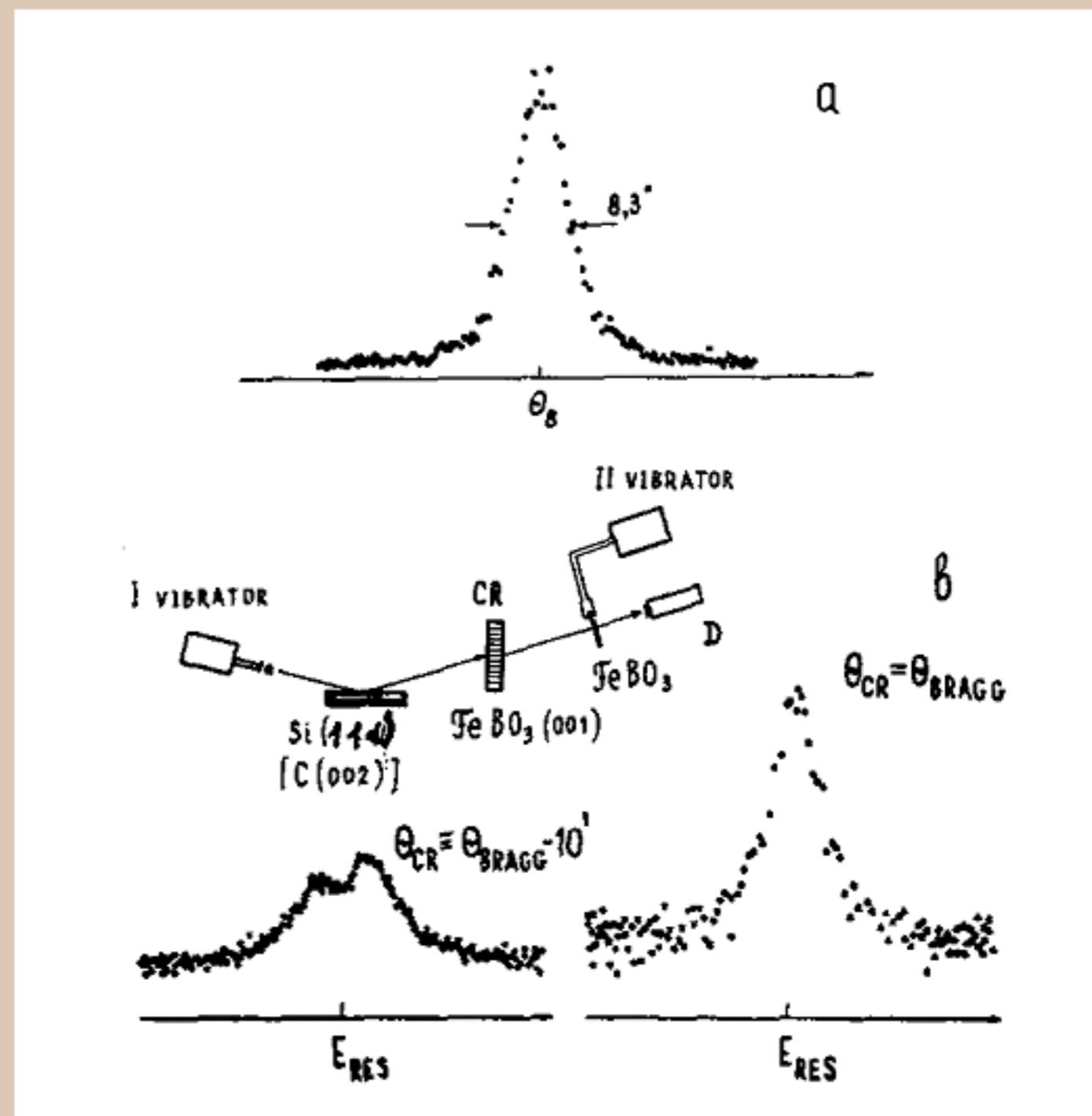
U. van Burck, Г. В. Смирнов и др., J. Phys. C. 19 (1986) 2557.

Монокристалл  $\text{FeVO}_3$ . Чисто-ядерная дифракция, угловая коллимация.

Резонанс сохраняется

в прямом пучке

(a) - угловая ширина  
падающего пучка



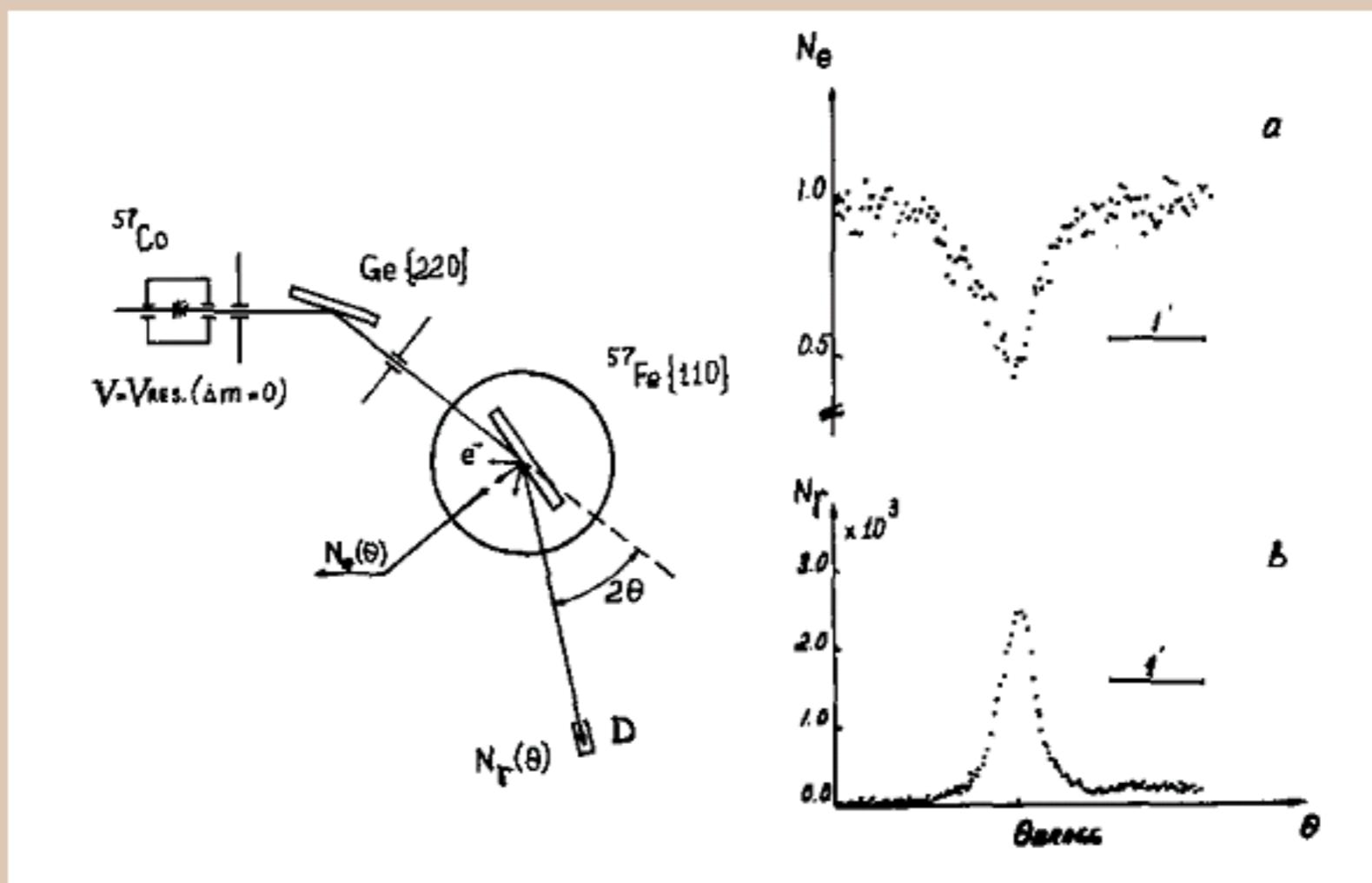
(b) - энергетический спектр  
вне Брэгга (слева)  
и в Брэгге (справа)

# Эксперимент. Эффект ПНКЯР.

Г. В. Смирнов, А. И. Чумаков, ЖЭТФ, 89 (1985) 1169

Дифракция в геометрии Брэгга позволила увидеть эффект непосредственного уменьшения выхода электронов конверсии, то есть подавление неупругого канала в чистом виде.

В отличие от РД эффект полного отражения невозможен без ПНК.



# Другие эффекты.

Было много других работ.

Показано, что рассеяние с переворотом спина некогерентно.

Интерференция выхода фото-электронов и электронов конверсии.

Особенности в тепловом диффузном рассеянии.

Излучение ядра, находящегося в кристалле из ядер в основном состоянии.

Проблема гамма-лазера. Поиск условий, когда эффект Бормана есть, а эффекта ПНКЯР нет, что необходимо для накачки большого числа ядер.

Многоволновая дифракция.

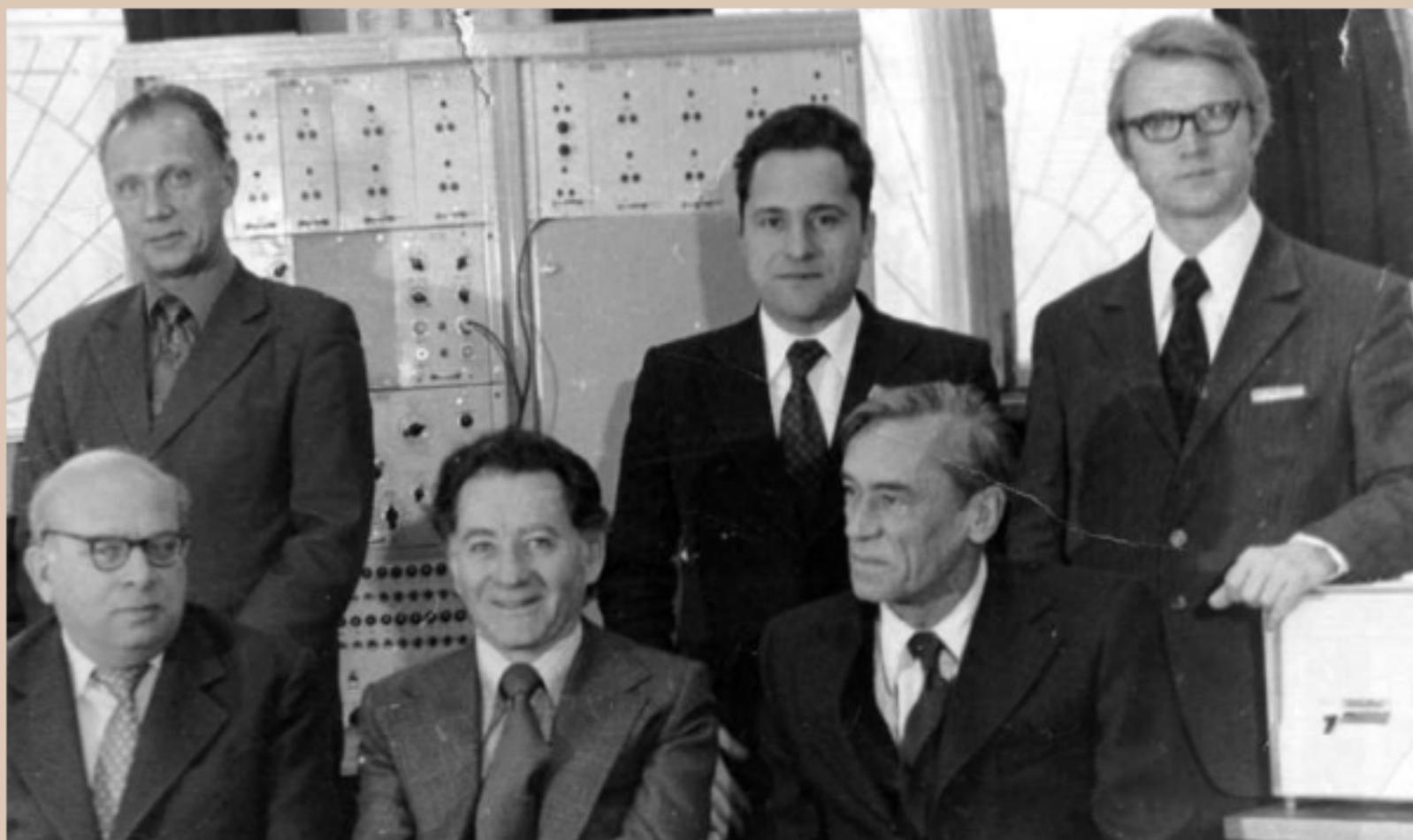
Обобщение теории на случай многоволновой дифракции сделано в работе В. Г. Кон, ЖЭТФ, 105 (1994) 665.

Совмещение чисто ядерной и смешанной дифракции.

Радиоактивный источник Со-57 дает мало фотонов, это минус.

Много интересных работ связано с синхротронным излучением.

# Конец первой серии.



# Синхротронное излучение.

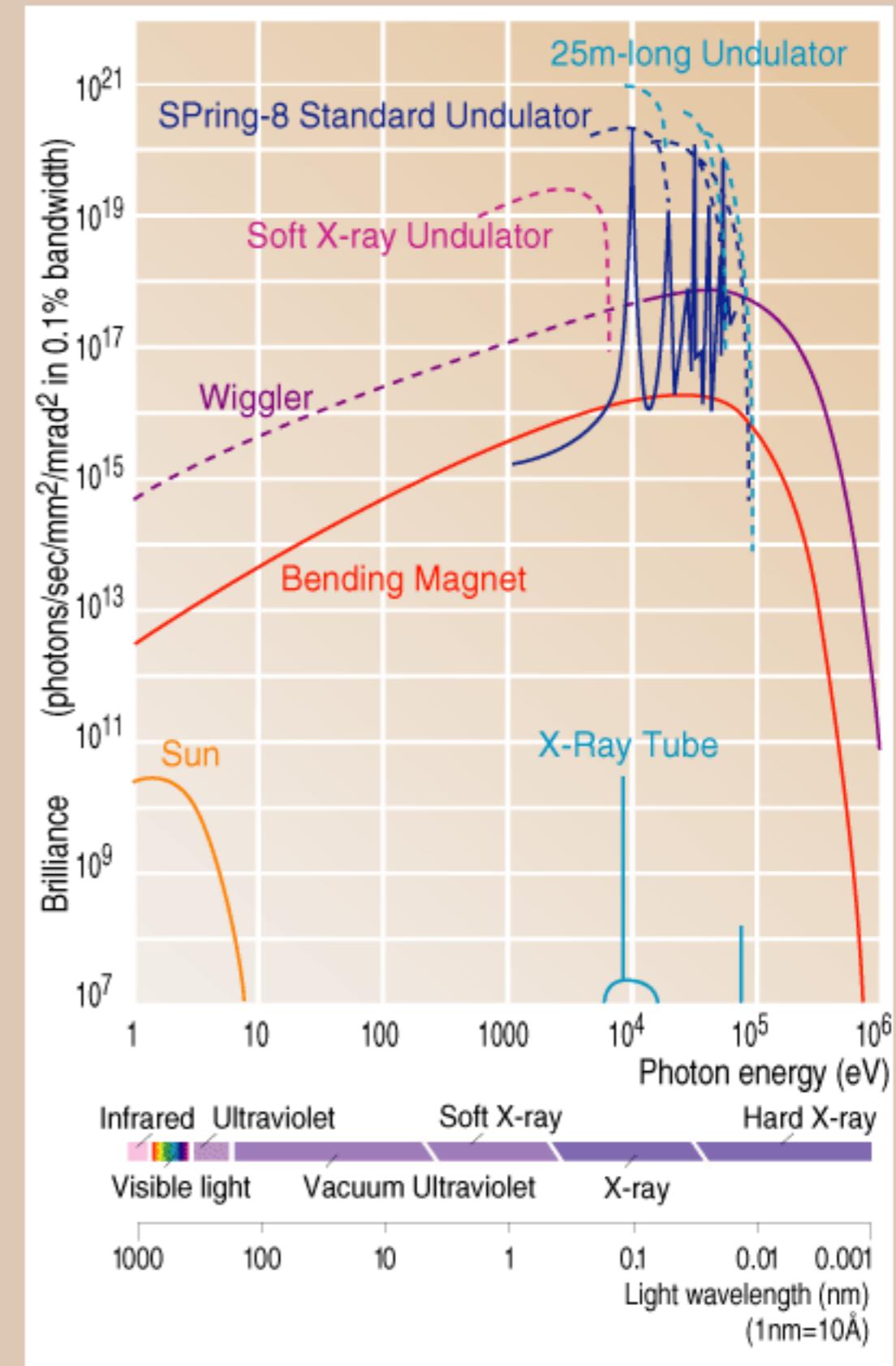
ESRF  
Гренобль  
Франция



APS  
Аргонн  
США



SPring-8  
Hyogo  
Япония



# ЯРР СИ. Идея, первые эксперименты.

СИ - это набор импульсов, длительность одного импульса  $< 1$  нс

Время жизни ядра Fe-57 значительно больше, 141 нс. Спектры во времени

Идея об использовании СИ для ЯРР:

S. L. Ruby, J. Physique, 35 (1974) C6

Первый неполный эксперимент, ЧЯБД на FeВОЗ, Новосибирск, Россия:

А. И. Чечин и др. Письма в ЖЭТФ, 37 (1983) 531

Регулярная работа, начало ЧЯБД на ЖИГ, DESY, Гамбург, Германия:

E. Gerdau, R. Ruffer и др. Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 835

Много экспериментов было выполнено группой из Brookhaven Nat. Lab. на виглере источника в Корнелле (CHESS) в США, в частности первые эксперименты по КРВ на Fe фольге

U. van Burck и др. PRL, 66 (1991) 770; PRB, 46 (1992) 6207

Источники второго поколения без виглера (РНЦ КИ) не используются.

# Теория ЯРР СИ.

Теория была построена раньше экспериментов.

Два аспекта когерентности.

Квантовые биения из-за расщепления резонанса при сверхтонком взаимодействии предсказали

J. P. Hannon, G. T. Trammell,

Phys. Rev. B, 18 (1978) 165; Physica B, 159 (1989) 161

Ускорение распада и динамические биения интенсивности во времени на одном резонансе предсказали

Ю. М. Каган, А. М. Афанасьев, В. Г. Кон,

Phys. Lett. 68A (1978) 339; J. Phys. C, 12 (1979) 615

# Когерентное рассеяние вперед.

Этот случай реализуется в любом образце независимо от его структуры. Выделение одного резонанса позволило получить аналитику, наглядно описывающую нетривиальные особенности распада системы ядер, отличные от распада одного ядра - Ускорение и биения. Подход Кагана делает решение задачи максимально простым. Достаточно вычислить фурье-образ частотной функции отклика.

$$R(\omega) = \exp\left(i \frac{\kappa g_{00} l}{2\gamma_0}\right), \quad g_{00} = \chi_0 - \frac{g_0 \Gamma}{2\hbar(\omega - \omega_0) + i\Gamma}, \quad g_0 = \frac{n}{\kappa} \sigma_0 f^2(\mathbf{k})$$

$$G(t) = \int \frac{d\omega}{2\pi} \exp(-i\omega t) R(\omega)$$

$$G(t) = e^{i\varphi} \left\{ \delta(t) - \theta(t) \exp\left(-i\omega_0 t - \frac{\tau}{2}\right) \frac{\xi}{\tau_0} \frac{J_1(2[\xi\tau]^{1/2})}{[\xi\tau]^{1/2}} \right\}$$

$$\xi = \frac{g_0 \kappa l}{4\gamma_0}, \quad \varphi = \frac{\chi_0 \kappa l}{2\gamma_0}, \quad \tau = \frac{t}{\tau_0}, \quad \tau_0 = \frac{\hbar}{\Gamma}, \quad \kappa = \frac{\omega}{c}$$

# Чисто ядерная брэгговская дифракция

Рассмотрен случай с разделением поляризаций (двухвольной), чисто ядерная дифракция, что часто имеет место в сложных кристаллах и толстый отражатель (толщина в задачу не входит).

$$R(\omega) = -\frac{\tilde{g}}{g} \frac{s}{\tau_0} \frac{1}{(\omega - z_0) + [(s/\tau_0)^2 - (\omega - z_0)^2]^{1/2}}$$

$$g_{00,11} = \chi_0 - \frac{g_{0,1}\Gamma}{2\hbar(\omega - \omega_0) + i\Gamma}, \quad g_{10,01} = \chi_0 - \frac{(\tilde{g}, \tilde{g}^*)\Gamma}{2\hbar(\omega - \omega_0) + i\Gamma}$$

$$s = \frac{g}{\alpha - 2\chi_0}, \quad z_0 = \omega_0 - \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{i}{2} + \frac{s}{p} \right), \quad p = \frac{2g}{g_0 + g_1}, \quad g = |\tilde{g}|$$

$$G(t) = \int \frac{d\omega}{2\pi} \exp(-i\omega t) R(\omega)$$

$$G(t) = i\theta(t) \frac{\tilde{g}}{g} \frac{1}{\tau_0} \exp\left(-i\omega_0 t - \frac{\tau}{2}\right) \frac{J_1(s\tau)}{\tau} \exp\left(i\frac{s\tau}{p}\right)$$

# Эксперимент. Пример #1

EUROPHYSICS LETTERS

1 May 1993

*Europhys. Lett.*, 22 (4), pp. 305-310 (1993)

## Nuclear Bragg Diffraction of Synchrotron Radiation in the Presence of Acoustic Vibrations.

YU. V. SHVYD'KO(\*), A. I. CHUMAKOV(\*), G. V. SMIRNOV(\*), V. G. KOHN(\*), T. HERTRICH(\*\*), U. VAN BÜRCK(\*\*), E. GERDAU(\*\*\*), H. D. RÜTER(\*\*\*), J. METGE(\*\*\*) and O. LEUPOLD(\*\*\*)

(\*) Russian Scientific Center «Kurchatov Institute» - Moscow 123182, Russia

(\*\*) Physik-Department E15, Technische Universität München  
D-8046 Garching, Germany

(\*\*\*) II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg  
D-2000 Hamburg 50, Germany

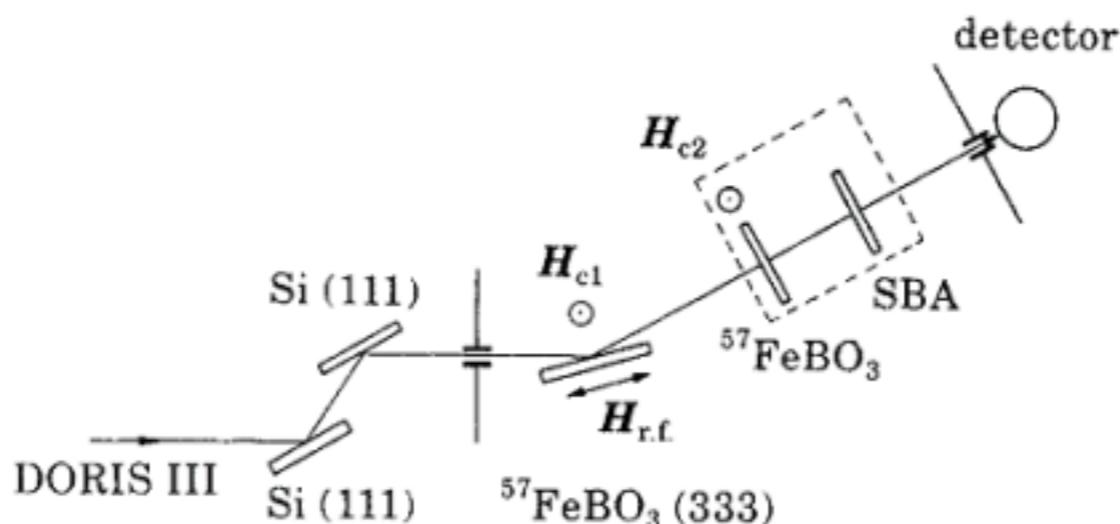
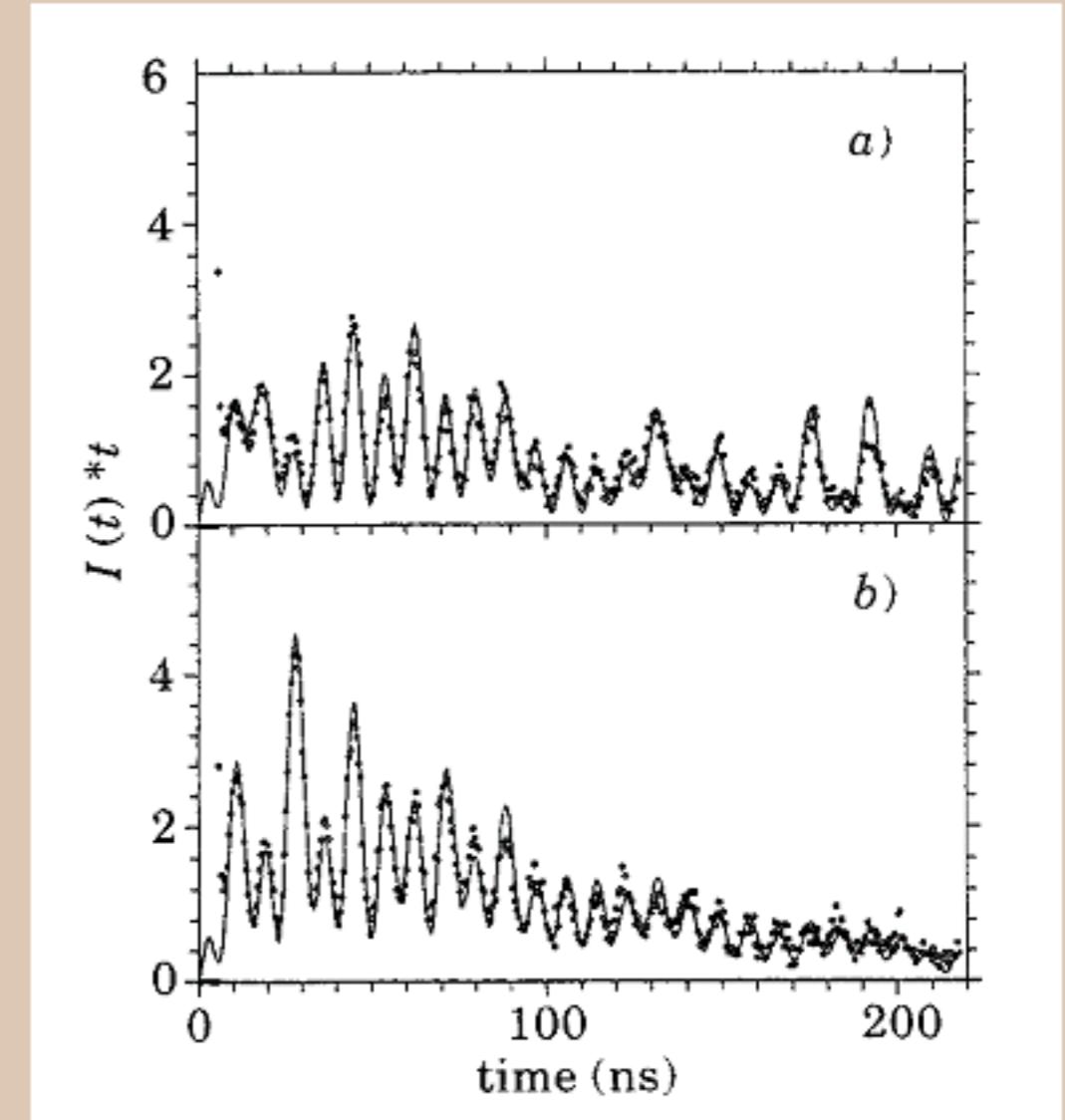
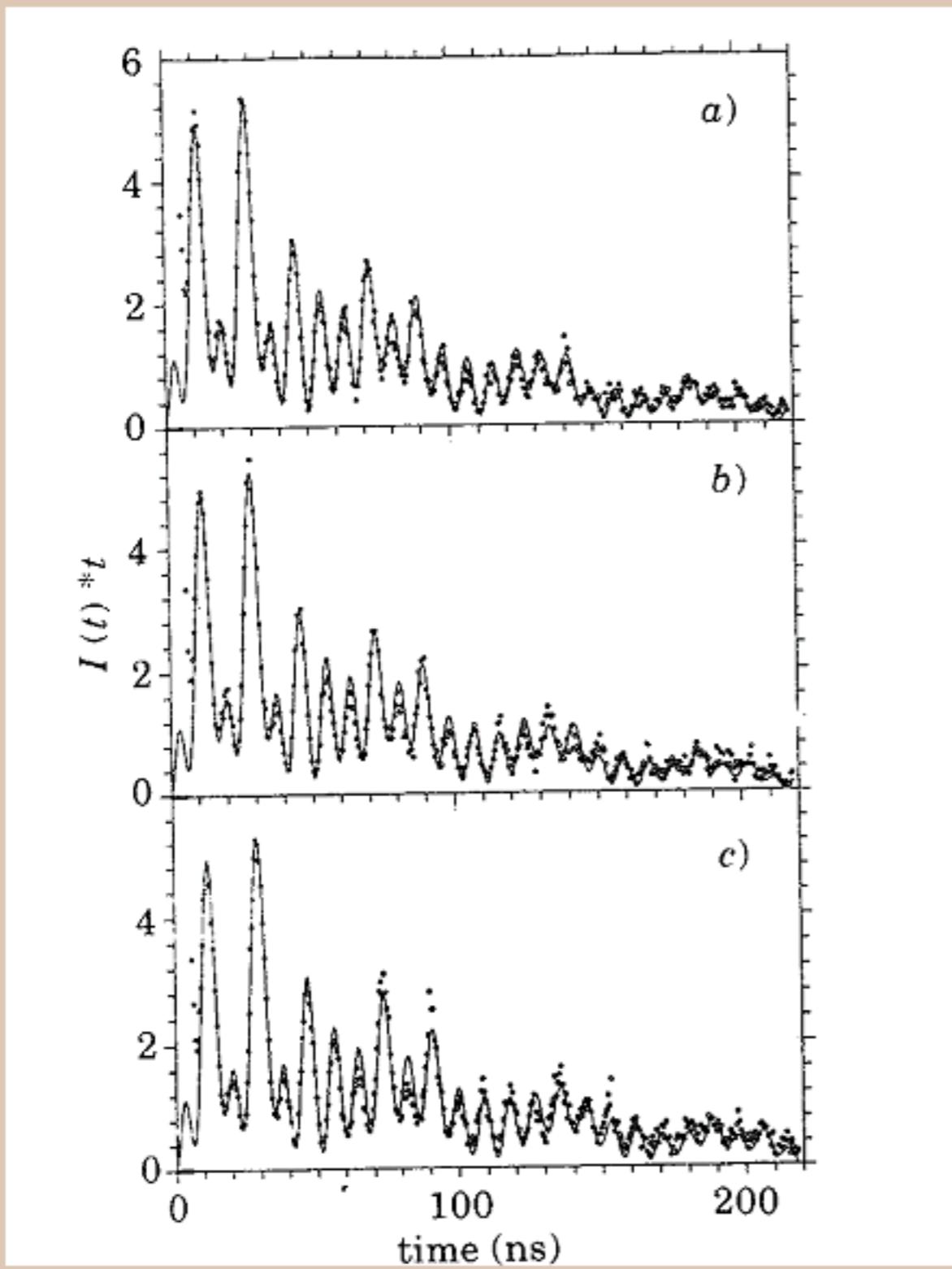


Fig. 1. – Scheme of the experimental set-up. The SR pulse from DORIS III was monochromatized by a double Si-reflection and Bragg-reflected by a  $^{57}\text{FeBO}_3$  single crystal. A constant magnetic field  $\mathbf{H}_{c1}$  and a magnetic r.f. field  $\mathbf{H}_{r.f.}$  were applied to the crystal. The  $^{57}\text{FeBO}_3$  resonance absorber and the SBA analyser, shown in the dashed box, were installed only in the control experiments.

# Эксперимент. Пример #1



Частота 2.93 Мгц, а, б, с - амплитуды Hrf 0, 6.8, 15.8 Ое  
Слева только отражение, справа - с поглотителем  
Проекция амплитуды колебаний на направление пучка  
 $a = 0.8 \text{ \AA}$  найдена из подгонки с расчетом.  
В. Г. Кон, Ю. В. Швыдько, J. Phys. CM, 7 (1995) 7589

# Эксперимент. Пример #2

VOLUME 77, NUMBER 15

PHYSICAL REVIEW LETTERS

7 OCTOBER 1996

## Storage of Nuclear Excitation Energy through Magnetic Switching

Yu. V. Shvyd'ko,<sup>1</sup> T. Hertrich,<sup>2</sup> U. van Bürek,<sup>2</sup> E. Gerdau,<sup>1</sup> O. Leupold,<sup>1</sup> J. Metge,<sup>1</sup> H. D. Rüter,<sup>1</sup> S. Schwendy,<sup>1</sup> G. V. Smirnov,<sup>3</sup> W. Potzel,<sup>2</sup> and P. Schindelmann<sup>2</sup>

Когерентное рассеяние вперед, кристалл FeBO<sub>3</sub>, антиферромагнетик

Постоянное магнитное поле 20 Г., два резонанса,  $\Delta m = 0$

Импульсное магн. поле 50 Г., поворачивает направление ВМП на 72°

Переключение в Максимуме  $\Delta m = 0 \rightarrow \Delta m = \pm 1$

Переключение в Минимуме  $\Delta m = 0 \rightarrow \Delta m = 0$

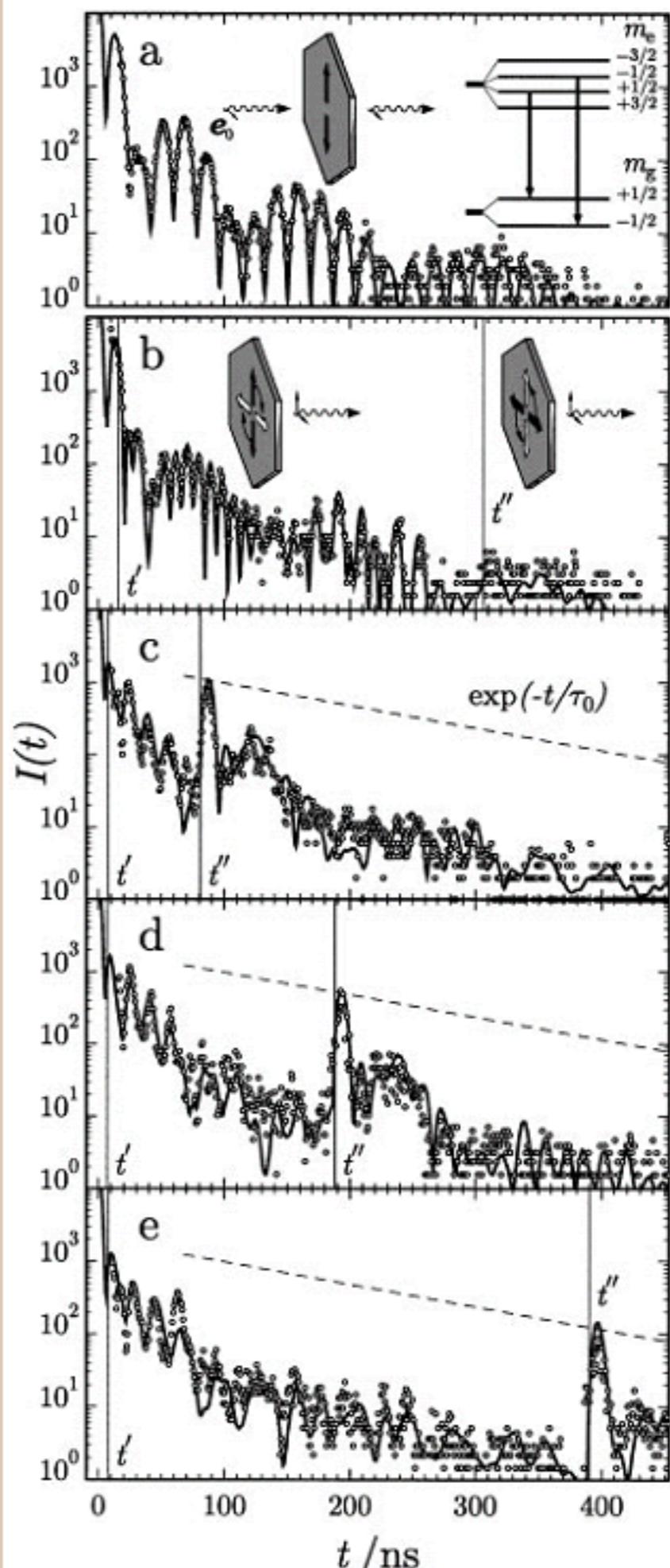
Обратное переключение повышает интенсивность до уровня, характерного для некогерентного распада ядра.

Ядерный экситон в реальном времени, решаются уравнения

Максвелла в пространстве и времени с учетом изменения

амплитуд рассеяния во времени.

Программа Motif (Ю. Швыдько), Программа NERT (В. Кон).



# Что еще

Когерентное рассеяние вперед в условиях диффузии ядер

Теория (Смирнов, Кон), Эксперимент (Vogl, Sepiol)

Когерентное рассеяние вперед на нескольких мишенях

Теория и эксперимент (Смирнов, Ван Бюрк и др.)

Дифракция в обратном направлении и

Интерферометр Фабри-Перо

(Швыдько, Gerdau, Кон и др.)

LLL интерферометр с использованием суперкогерентного

резонансного излучения (Hasegawa, Kikuta)

Полное внешнее отражение и многослойные структуры

(Чумаков, Смирнов и др.)

БЛАГОДАРЮ

ЗА

ВНИМАНИЕ