

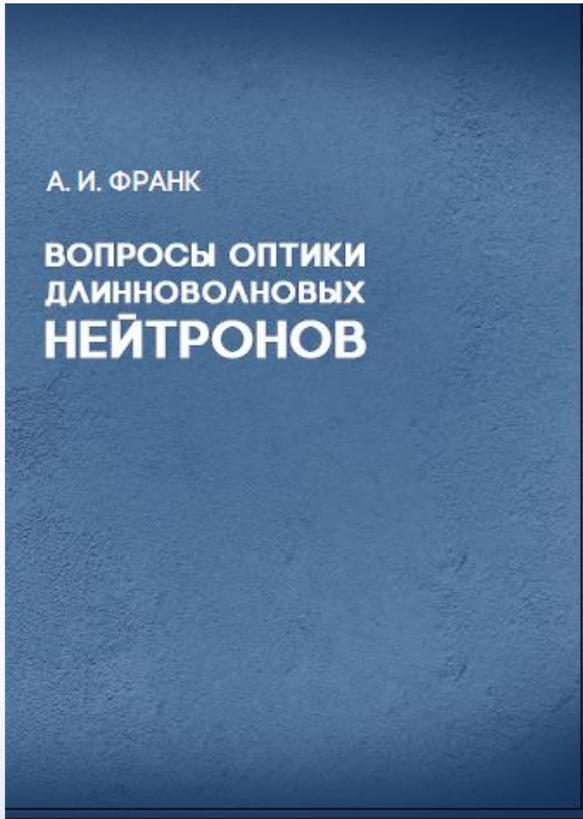


Вопросы оптики длинноволновых нейтронов (Презентация книги)

А. И. Франк

frank@jinr.ru

Дубна, 23 марта 2023 г



Структура книги

- | | |
|--|--------------------|
| I. Нейтронная микроскопия | 5+1 статья |
| II. Нейтронные волны в среде | 5+1 статья |
| III. Квантовые явления в нейтронной оптике | 7 +1 статья |
| IV. Оптика движущихся сред и эффект ускорения | 5 +1 статья |
- Именной указатель**

**Посвящается светлой памяти
моего отца
Ильи Михайловича Франка**



Часть I

Нейтронная микроскопия

Часть I. Нейтронная микроскопия

О работах по нейтронной микроскопии	9
О применимости принципа Ферма к оптике ультрахолодных нейтронов	15
Регистрация изображения в нейтронном микроскопе	17
Оптика ультрахолодных нейтронов и проблема нейтронного микроскопа	21
Optics of very slow neutrons and neutron microscopy	74
Эксперименты с нейтронным микроскопом	90

Как это начиналось 50 лет назад (1974г)



Ю.А. Прокофьев и П.Е Спивак
в Институте Курчатова



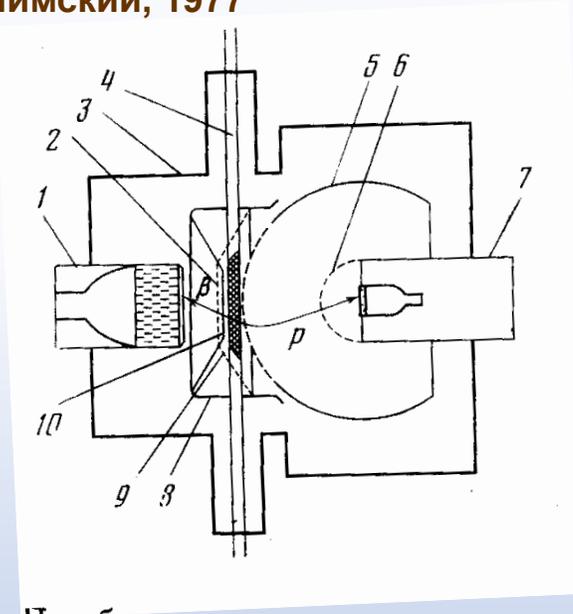
Г.И. Будкер и Б.Г.Ерозолимский, 1977

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ СПИН-ЭЛЕКТРОН
В РАСПАДЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ G_A/G_V**

Б. Г. ЕРОЗОЛИМСКИЙ, А. И. ФРАНК, Ю. А. МОСТОВОЙ,
С. С. АРЗУМАНОВ, Л. Р. ВОЙЦИК

ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

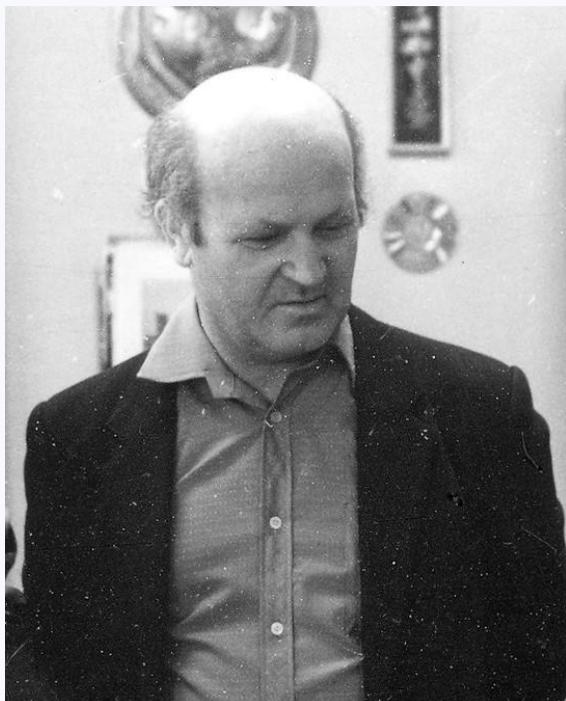
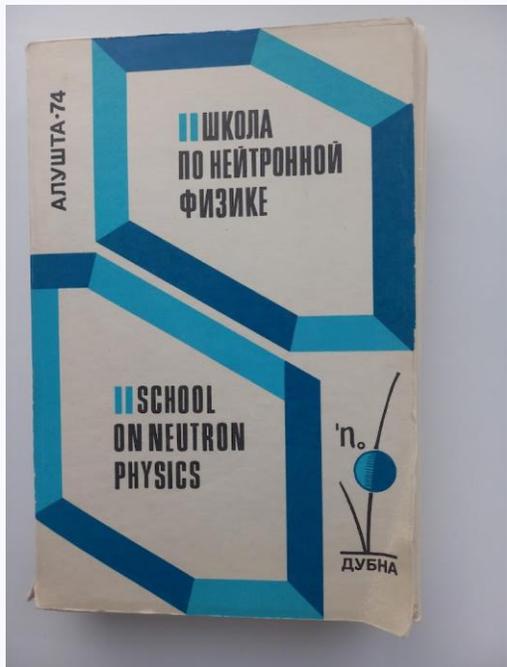
(Поступила в редакцию 26 апреля 1979 г.)



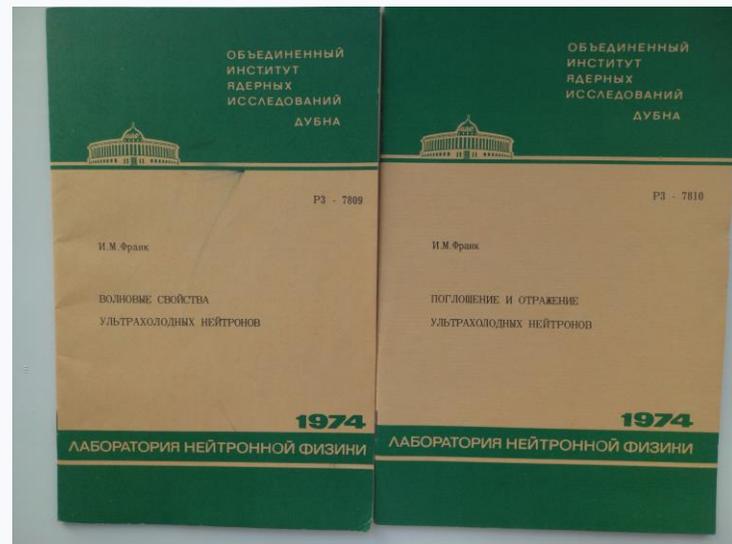
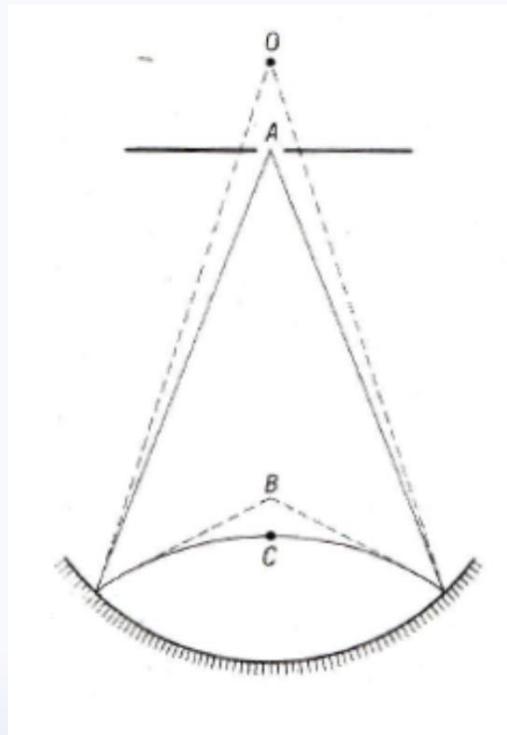
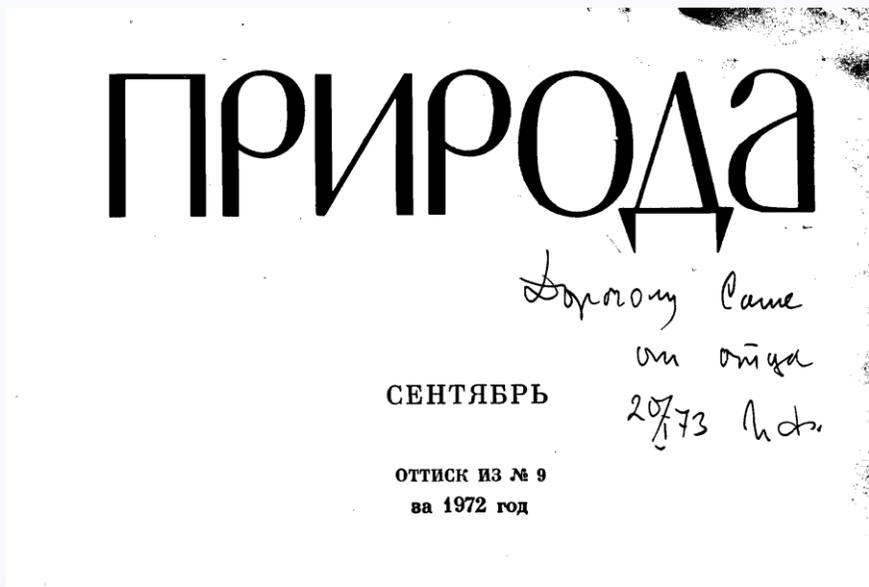
15 публикаций с моим участием 1968-1979 гг
Кандидатская диссертация 1976г.



Б.Г. Ерозолимский с С.М., и А.Ф. Шапиро. Андовер, США. Около 2010 г



	Стр
В.И.Лушиков	Хранение ультрахолодных нейтронов 7
И.М.Франк	Нейтронная оптика и ультрахолодные нейтроны 19
A.Steyerl	Very Cold Neutrons - A New Tool in Condensed Matter Research 42



Ноябрь 1991 г.

Том 161. № 11

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

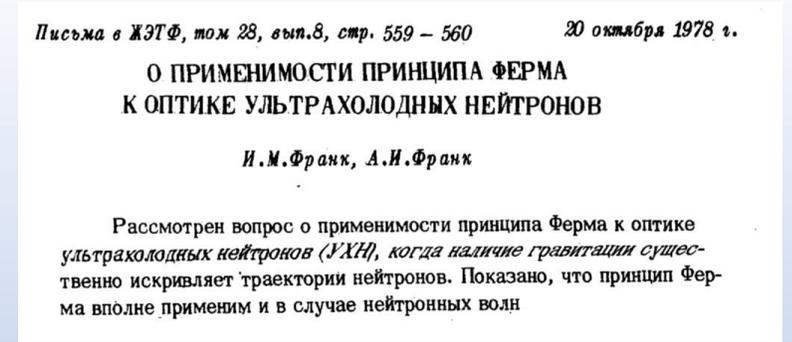
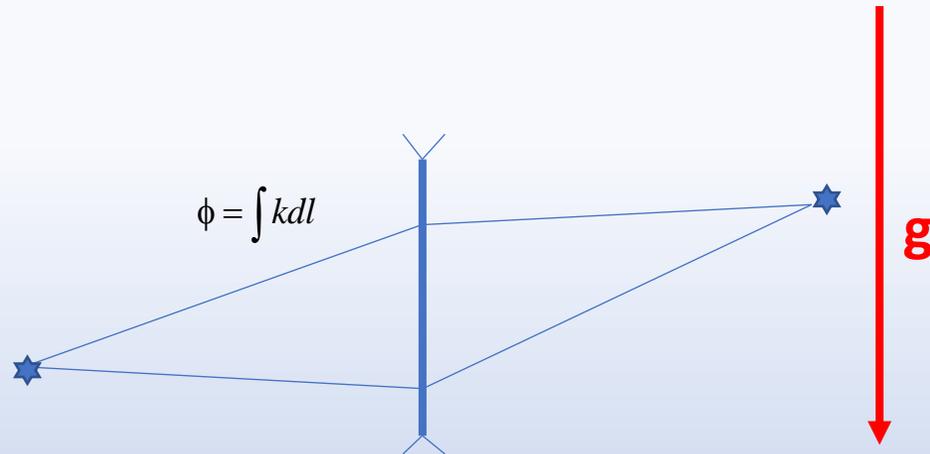
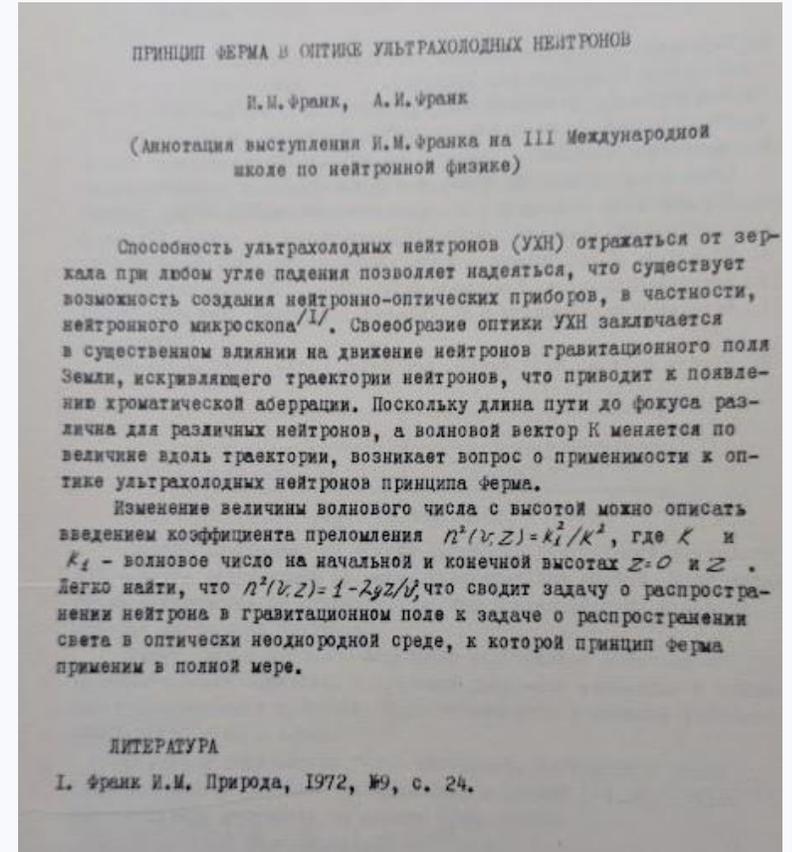
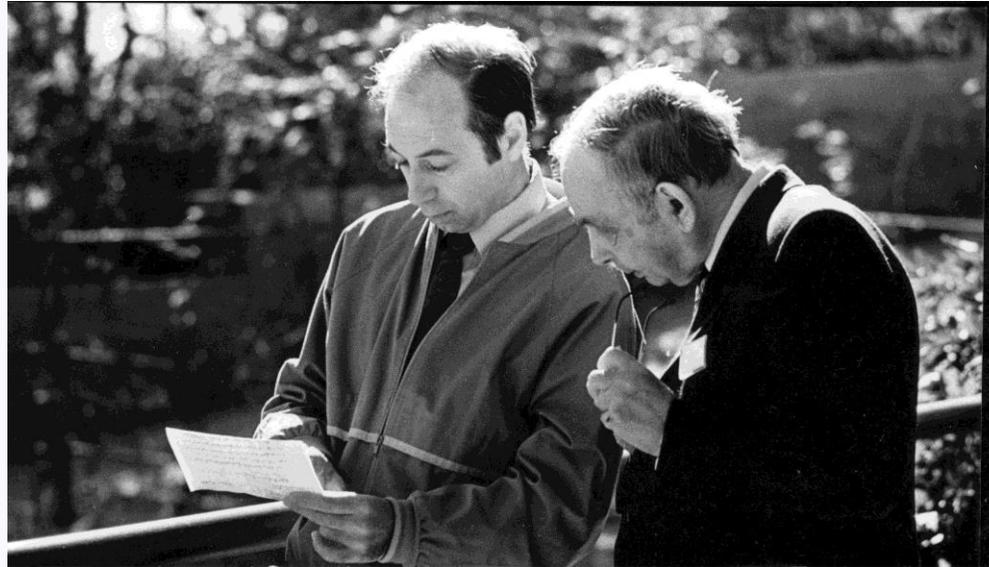
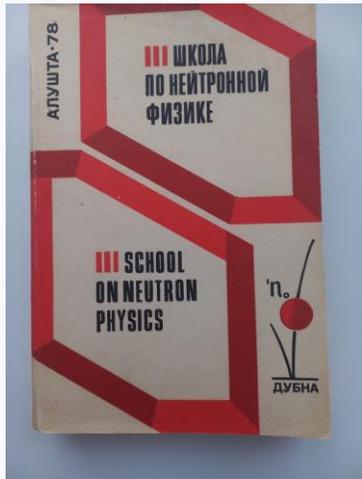
539.125.523.5

НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА И УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

И.М. Франк

(II Международная школа по нейтронной физике. Алушта, Крым, 2–19 октября 1974. — Сб. лекций. — Дубна: ОИЯИ. ДЗ-7991, 1974. — С. 19 — 41)

III школа по нейтронной физике. Начало (1978г)

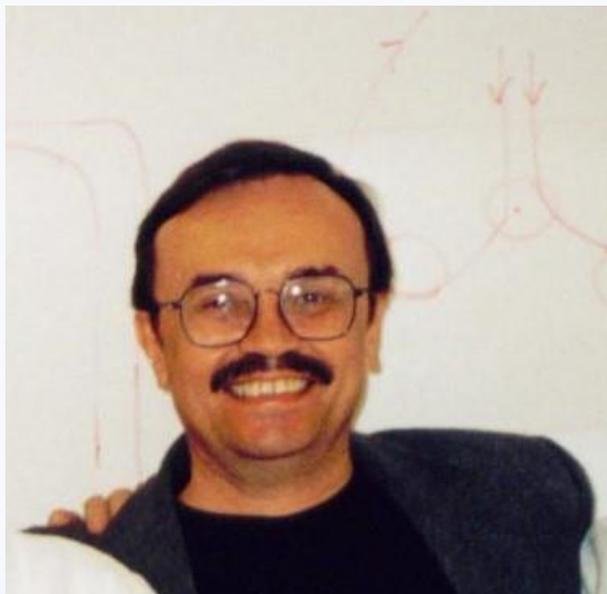


1984 – 1990. Работы по нейтронной микроскопии Курчатовский институт – ЛИТМО (Ленинград) - ЛИЯФ (Гатчина)



**С С. Арзумановым на реакторе ВВР-К
Алма-Ата 1979-80 гг**

23 марта 2023г



С.В.Масалович



А.Н. Стрепетов. Фото 2004г.

**1984 – 1990. Работы по нейтронной микроскопии
Курчатовский институт - ЛИЯФ (Гатчина) – ЛИТМО (Ленинград)**



А.П. Серебров



А.И. Иоффе



Б.Г. Ерозолимский



М.М. Русинов

1986-1989. Первые международные доклады

1986 год. Лекция на V нейтронной школе – обзор в УФН

1989 год – Доклад на конференции в Гренобле. – Первая поездка в Европу и новые знакомства, перешедшие в длительную дружбу и сотрудничество



Тони Клейн, Вена, 2009г



**С Роландом Гейлером.
Гренобль, 2003г**



**С Питером Гелтенбортом и Г.А. Петровым.
ISINN 20. Алушта, Крым 2012г.**

Письма в ЖЭТФ, том 44, вып. 5, стр. 213 – 216

10 сентября 1986 г.

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В НЕЙТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

С.С.Арзуманов, С.В.Масалович, А.Н.Стрепетов, А.И.Франк

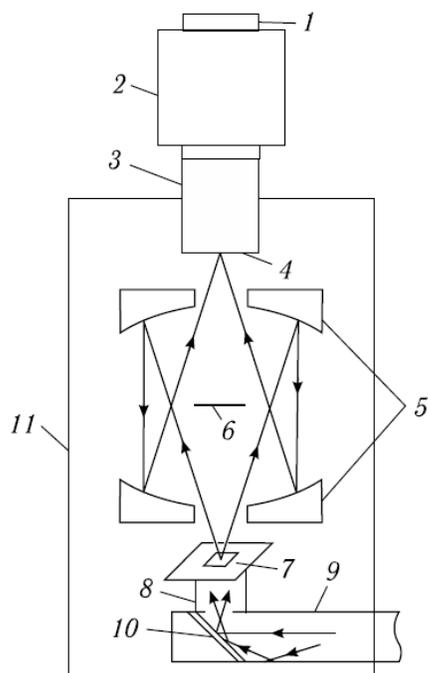


Рис. 1. Схема установки: 1 — фотопленка; 2 — электронно-оптический преобразователь; 3 — волоконный световод; 4 — сцинтиллятор, чувствительный к УХН; 5 — зеркала оптической системы; 6 — защита от прямых «лучей»; 7 — объект; 8, 9 — нейтронотводы; 10 — вспомогательное зеркало

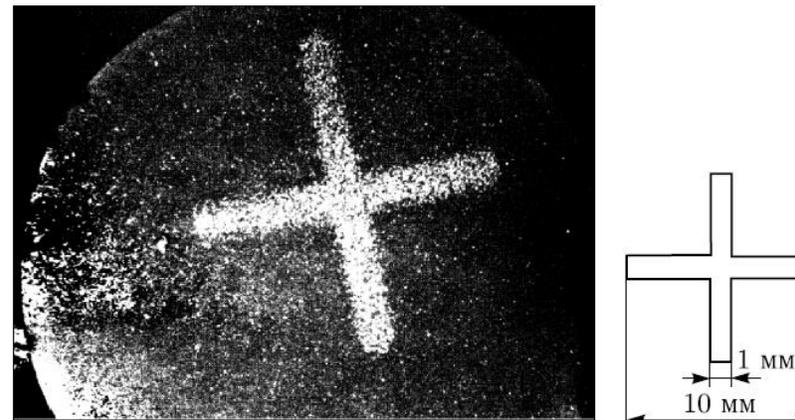


Рис. 2. Изображение крестообразной диафрагмы. На врезке показаны ее размеры

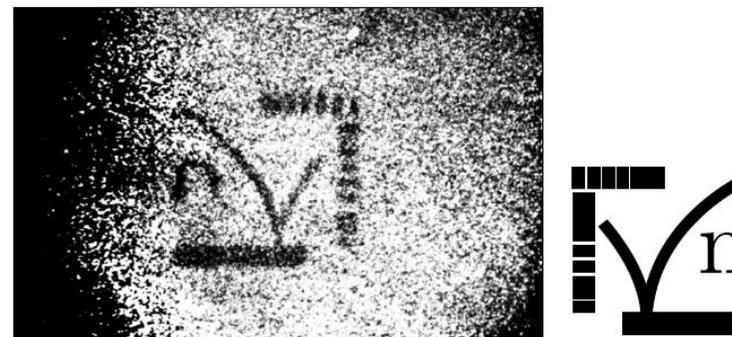


Рис. 3. Фотошаблон, с которого изготавливался тест-объект, и изображение объекта, зарегистрированное в нейтронном «свете». Темным участком соответствует покрытие из никеля

Письма в ЖЭТФ, том 52, вып. 7, стр. 981 - 984

10 октября 1990 г.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕЙТРОННЫМ МИКРОСКОПОМ

С.С.Арзуманов, С.В.Масалович, А.А.Сабельников, А.Н.Стрепетов,
А.И.Франк

Сообщается о результатах пробных экспериментов с зеркальным нейтронным микроскопом. Зарегистрировано нейтронное изображение двух щелей с шириной 40 и 13,5 мкм и изображение периодического тест-объекта с периодом ≈ 65 мкм. При оптическом увеличении $M = 47\times$, разрешение прибора оценивается величиной 17 мкм.

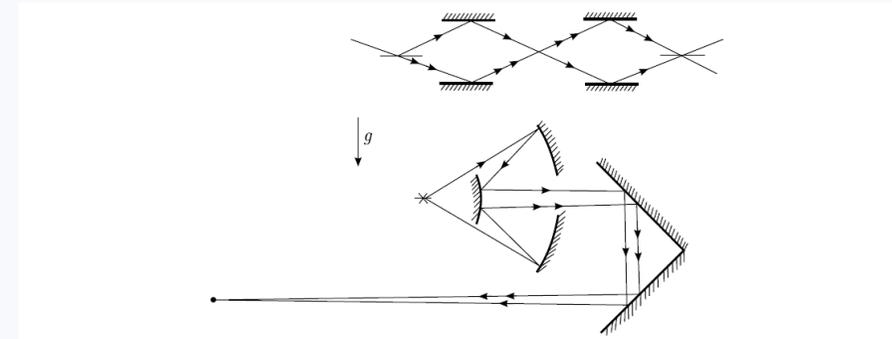


Fig. 5. Two isochronal achromatic devices: two-part neutron interferometer for UCNs in the gravitational field of the Earth and a horizontal neutron microscope with a reversing device

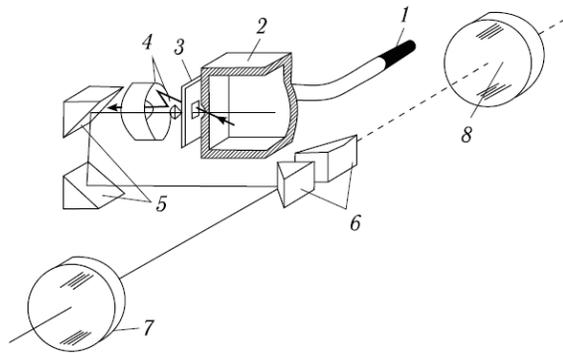


Fig. 6. The horizontal neutron microscope. 1 — optical fiber; 2 — neutron guides; 3 — specimen on the moveable table; 4 — objective mirrors; 5 — reversing devices; 6 — auxiliary mirrors; 7 — optical fiber with UCN-sensitive scintillator; 8 — optical fiber of the optical channel

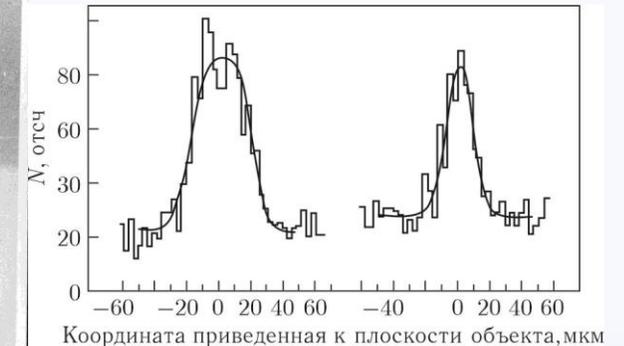
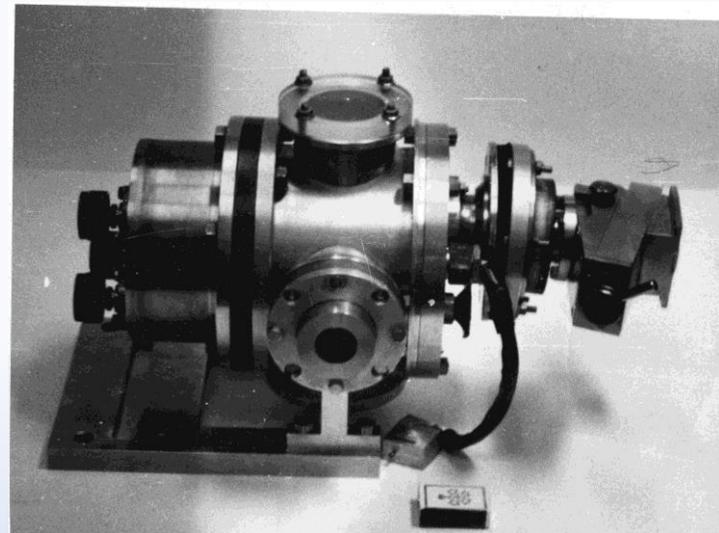


Рис. 2. Зависимость счета нейтронов от координаты при поперечном сечении изображения двух щелей: шириной 40 (слева) и 13 мкм. Плавная кривая представляет собой расчетное распределение для гауссовой функции разрешения с шириной на половине высоты 17 мкм.

Часть II

Нейтронные волны в среде

Часть II. Нейтронные волны в среде

Закон дисперсии медленных нейтронов. Нерешенные вопросы	95
Закон дисперсии длинноволновых нейтронов и возможность его прецизионной проверки	102
Resonant tunneling of UCNs through the moving interference filter and experimental test of the UCN dispersion law.	115
New experimental test of dispersion law for very slow neutrons	132
Нейтронная оптика сильно поглощающих сред и взаимодействие длинноволновых нейтронов с пленками гадолиния	139
О свойствах «потенциального» закона дисперсии нейтрона в преломляющей среде	162

Аномалия в хранении УХН (1975 -1990гг)

Два направления поиска причин аномалии

1. «Технические» (загрязнение поверхности, вибрации и т.д) - большинство экспериментаторов.
2. Неполнота теории (И.М. Франк, 1974)

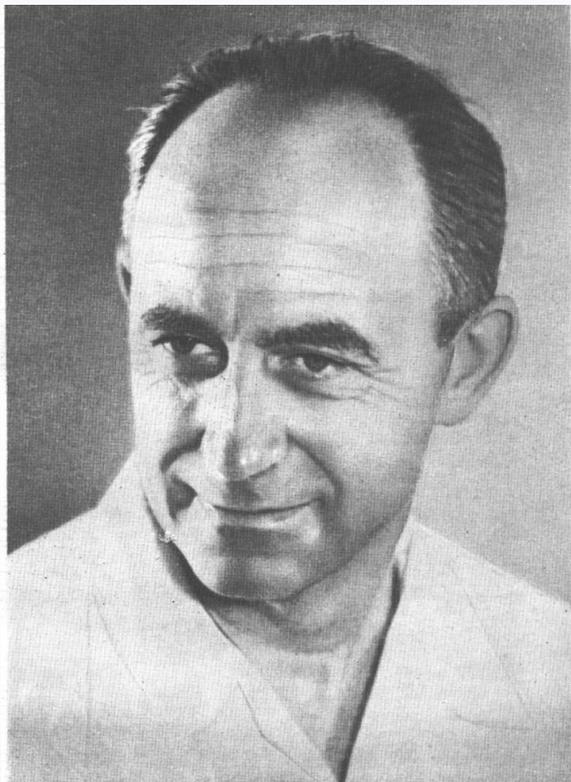


ISINN -3. Дубна, 1995г . В.И. Морозов, А.В.Стрелков, А.П.Серебров, В.К.Игнатович, А.И.Франк, Г.В.Нехаев, В.И.Луциков.

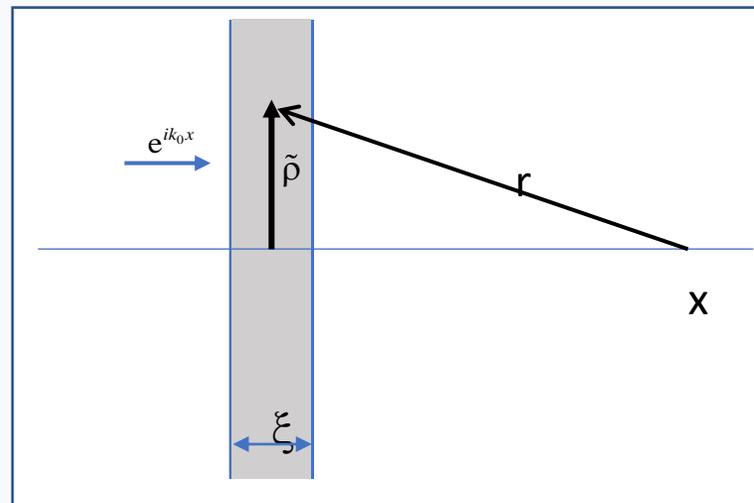


И.М. Франк

Показатель преломления и закон дисперсии нейтронных волн



Enrico Fermi



Э Ферми, 1944-1950,

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi\rho b$$

L.Foldy, 1945

$$n^2 = 1 - \frac{2\pi}{k_0^2} \rho b \quad b = b' - ib''$$

Закон дисперсии для света и нейтронов

$$k_1^2 = k_0^2 + 4\pi\rho C f_0$$

$$C = \begin{cases} C = \frac{1}{1 - (4\pi/3)\rho\alpha} & \text{for light} \\ C = 1 \ (f_0 = -b) & \text{for neutrons} \end{cases}$$

Lax, 1951

Гипотеза Франка: для нейтронов $C \neq 1$

Наличие очень малой мнимой части коэффициента C ведет к заметному изменению коэффициента поглощения

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi\rho}{k_0^2} (C' - iC'')(b' - ib'')$$

$$b''/b' \approx 10^{-4} - 10^{-5}$$

$$C''b' \cong b''$$

I.M. Frank, 1974

$$\eta = \frac{b''}{b'} \rightarrow \frac{b''}{b'} + C''$$

Обычно

$$\frac{b''}{b'} \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$$

Малые поправки в закон дисперсии холодных нейтронов были позже предсказаны теорией

$$n^2 = 1 + \frac{4\pi}{k^2} \rho f C, \quad f = -b + ikb^2 \quad C = (1 - J)^{-1} \approx 1 + J' + J''$$

$$J = Nb \int \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) G(\mathbf{r}) [1 - g(r)] d\mathbf{r} \quad G(\mathbf{r}) = \exp(ikr)/r$$

V.F.Sears, 1982

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi\rho b/k_0^2}{1 + (4\pi\rho b/nk_0^2) \int e^{ix} \sin(nx) [g(x/k_0) - 1] dx}$$

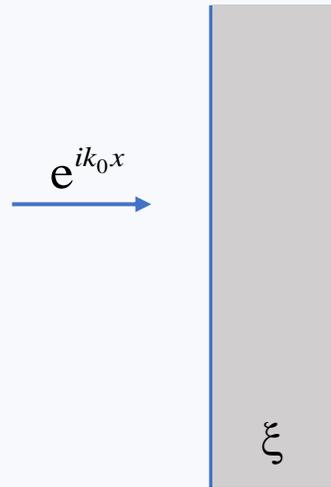
M. Warner & J.E.Gubernatis, 1985

Закон дисперсии УХН и гипотеза сверхмедленных нейтронов



В.Г.Носов. 1928- 2008

В. Г. Носов был блестящим специалистом, с глубокой интуицией и обширнейшими знаниями в области всей физики. В дополнение к этому, он имел весьма трудный характер и редкую научную принципиальность в отстаивании своей точки зрения. Последнее сказывалось и сказывается на оценке его работ.



$$\Psi_{scat} = 2\pi\rho b \frac{e^{ik_0 x}}{ik_0} \xi \quad |\Psi_{scat}| \ll 1, \quad \xi \gg a \approx \rho^{-1/3}$$

$$\frac{2\pi\rho b}{k_0} a \ll 1$$

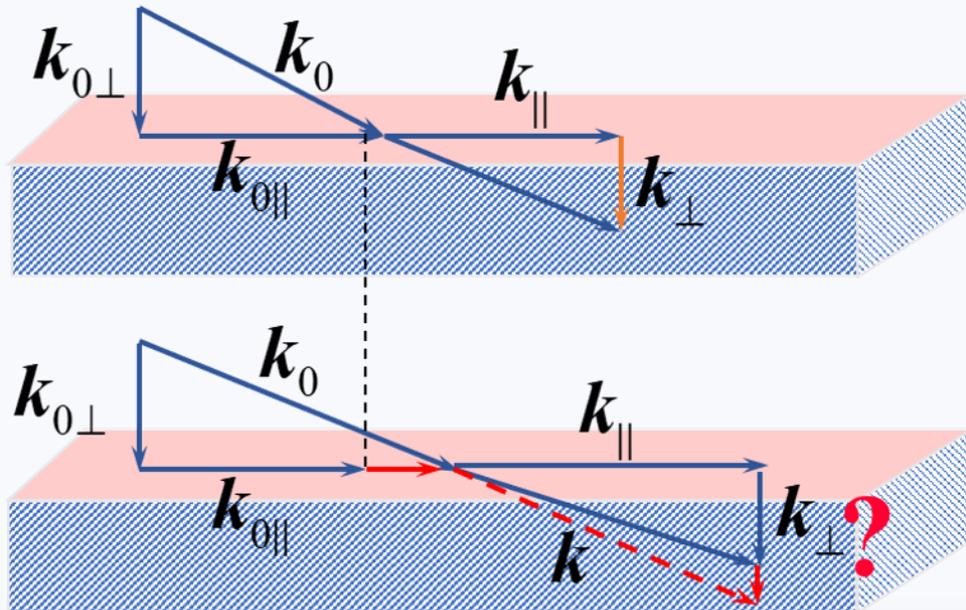
Если $k_0 \leq 4\pi\rho b a$ то имеет место переотражение на расстояниях, $\hat{\rho} = (k_b^2 a)^{-1}$
 Что ведет к неопределенности $\Delta k \approx \hat{\rho}^{-1} \approx k_0$

Область применимости потенциального закона дисперсии

$$k_0 \gg 4\pi\rho b a = \chi^2 a \quad \chi^2 = 4\pi\rho b$$

Закон дисперсии сверхмедленных нейтронов ($v \leq 10\text{cm/s}$) неизвестен
 Возможны малые поправки в закон дисперсии УХН

Особое свойство потенциального закона дисперсии



$$k_{II}^2 = k_{0II}^2$$

$$k^2 = k_0^2 - \chi^2; \quad \chi^2 = 4\pi\rho b$$

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - \chi^2; \quad b = const$$

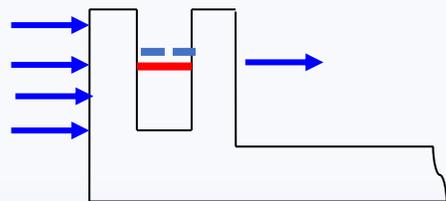
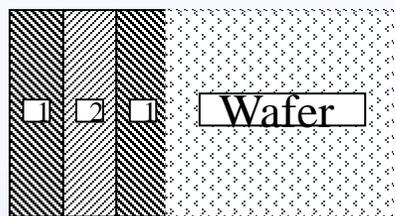
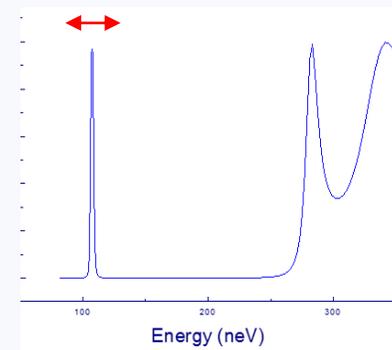
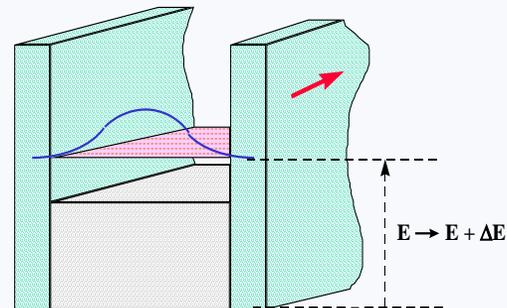
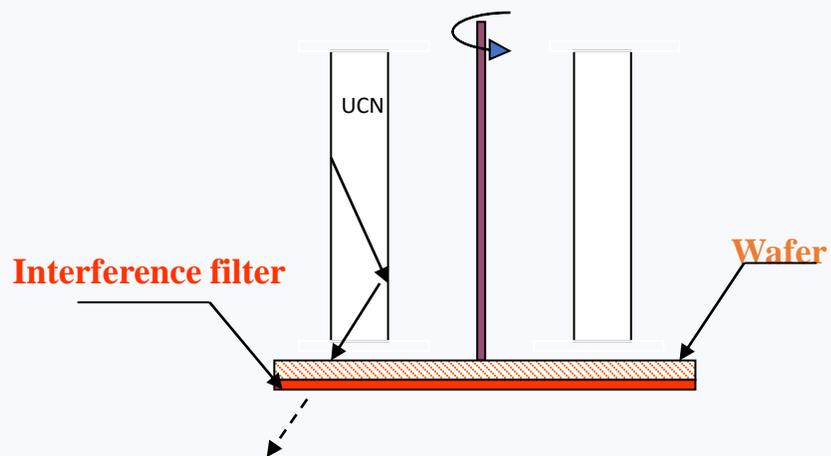
I.M.Frank, 1974,

A.G.Klein, S.A.Werner, 1983

$$k^2 = k_0^2 - \chi^2 + \varepsilon(k_0^2); \quad \chi^2 = 4\pi\rho b$$

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - \chi^2 + \varepsilon(k_0^2);$$

Идея опыта по проверке закона дисперсии УХН в эксперименте с вращающимся интерференционным фильтром



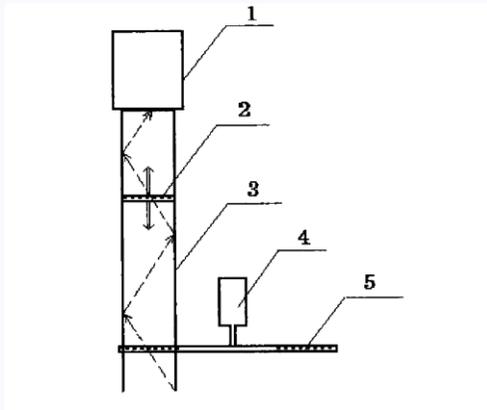
В случае отклонения от потенциального закона дисперсии ($\varepsilon \neq 0$) положение резонанса должно смещаться при приведении фильтра во вращение

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi Nb + \varepsilon(k_0^2)$$

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - 4\pi Nb + \varepsilon(k_0^2)$$

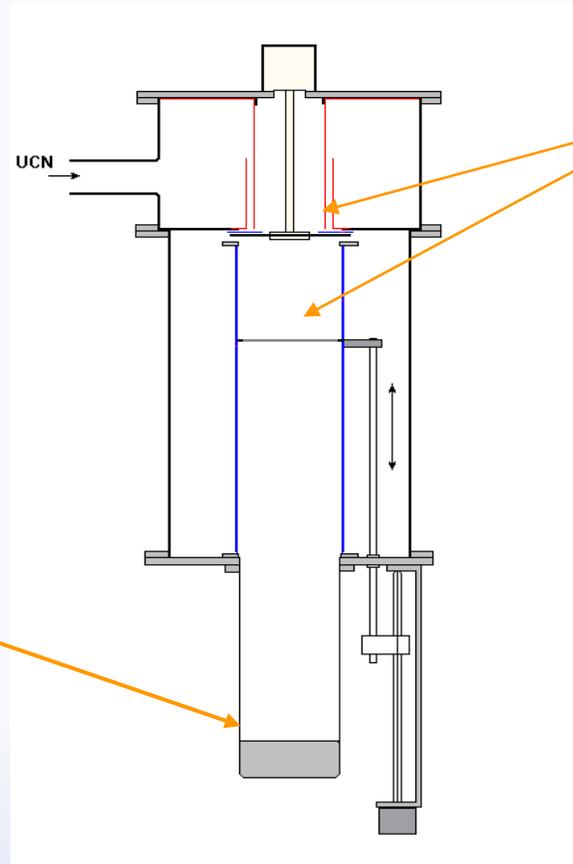
$$U_{1,2} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} (\rho b)_{1,2}$$

Гравитационный спектрометр УХН с интерференционными фильтрами: идея



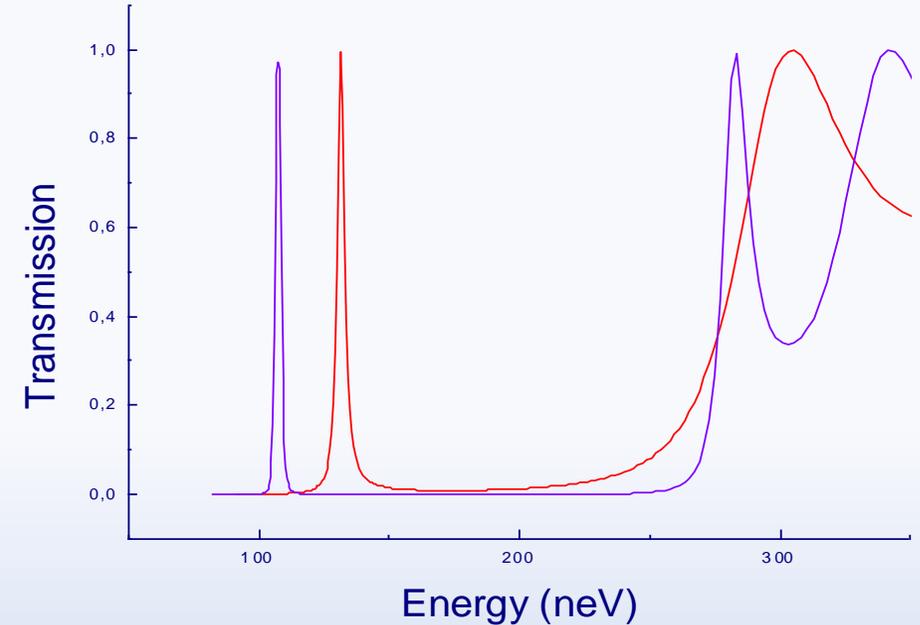
→
Спасибо
Тони Клейну

Детектор



Два НИФ с переменным
расстоянием между ними

$mg=1.02 \text{ neV}$

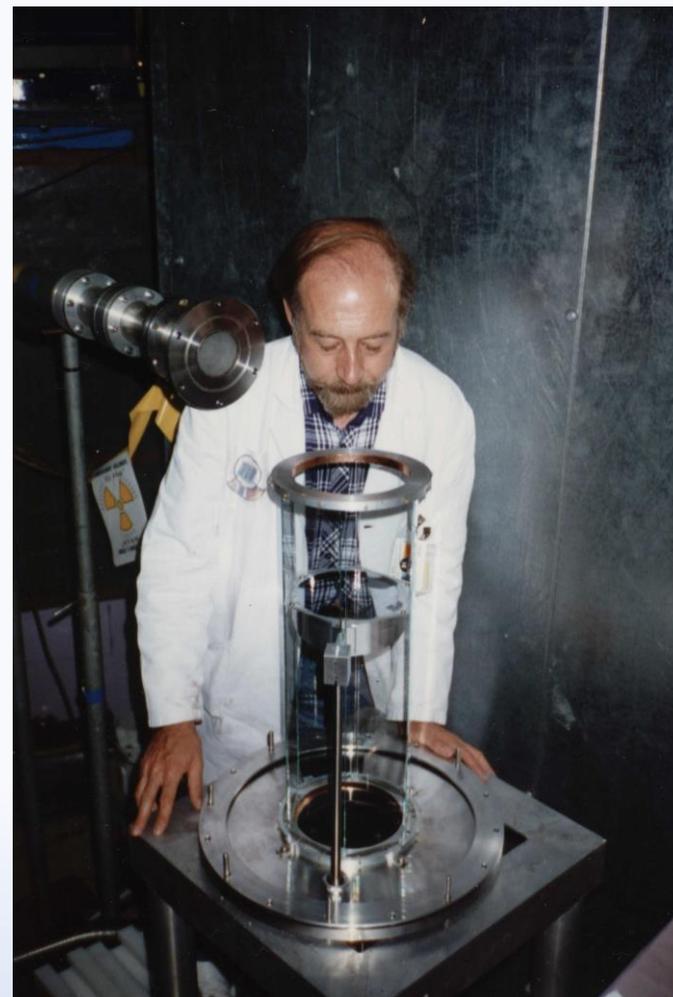




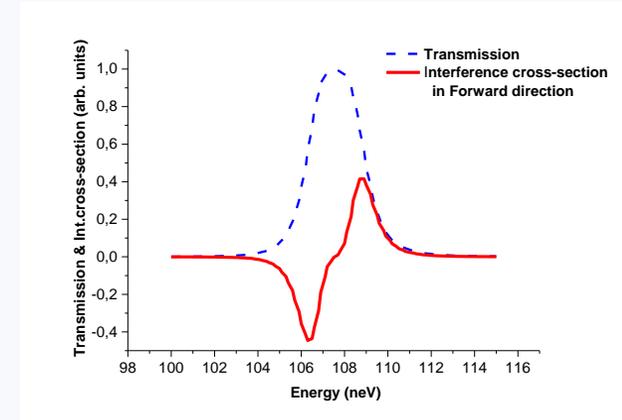
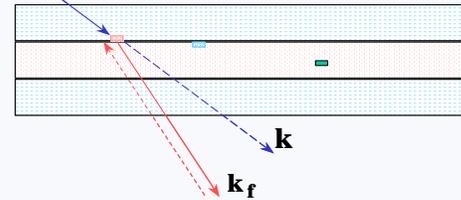
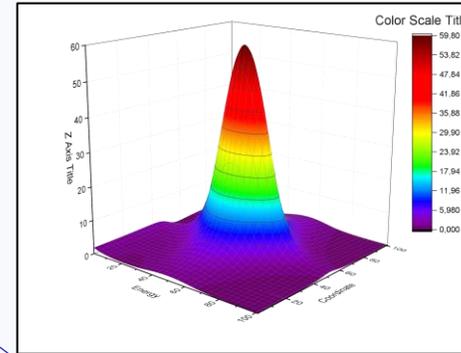
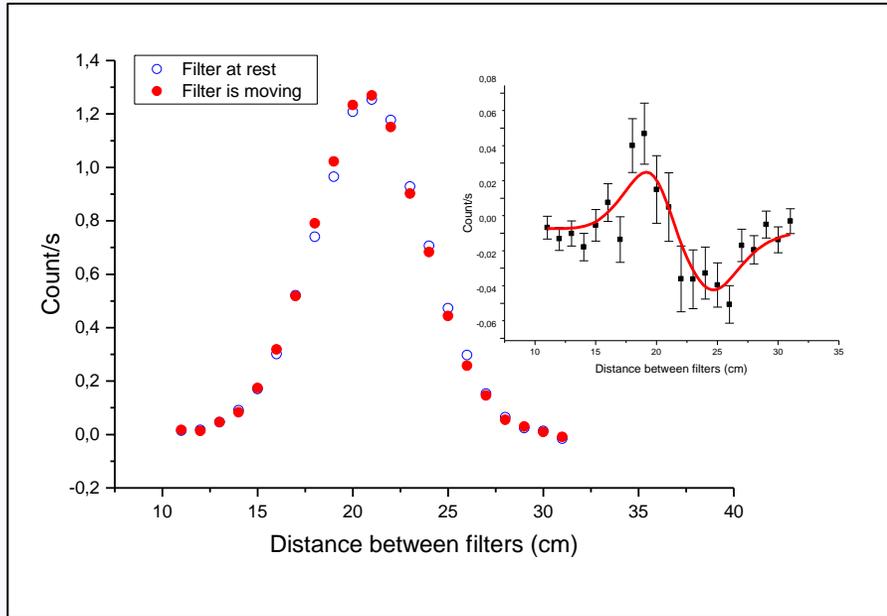
Тони Клейн, ИЛЛ, Гренобль, 1996г.



С Альберто Циммино и С.Н.Балашовым ИЛЛ, Гренобль, 1996г.



В экспериментах 1997-99г найдены неизвестные ранее особенности резонансного туннелирования нейтронов, препятствующие использованию НИФ для проверки закона дисперсии



$$f(k', k) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int \tilde{\Psi}_f(\vec{r}) V_1(\vec{r}) \Psi(\vec{r}) d\vec{r}$$

$$\sigma_{ts} = -\frac{4\pi}{k} \text{Im} \{ T^* f(k_t, k_t) \}$$

Письма в ЖЭТФ, том 67, вып.10, стр.746 - 751 © 1998г. 25 мая

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

И.В.Бондаренко, С.Н.Балашов, П.Гелтенборт⁺¹, А.Г.Кляйн^{□1},
А.В.Красноперов, С.В.Масалович*, В.Г.Носов*, А.И.Франк², П.Хогхой⁺¹,
А. Чиммино^{□1}*

A. I. Frank¹, S. N. Balashov^{2,3}, I. V. Bondarenko¹,
P. Geltenbort⁴, P. Hoghoj^{4,5}, A. V. Kozlov^{1,6},
S. V. Masalovich^{2,9}, B. P. Toperverg^{7,8}

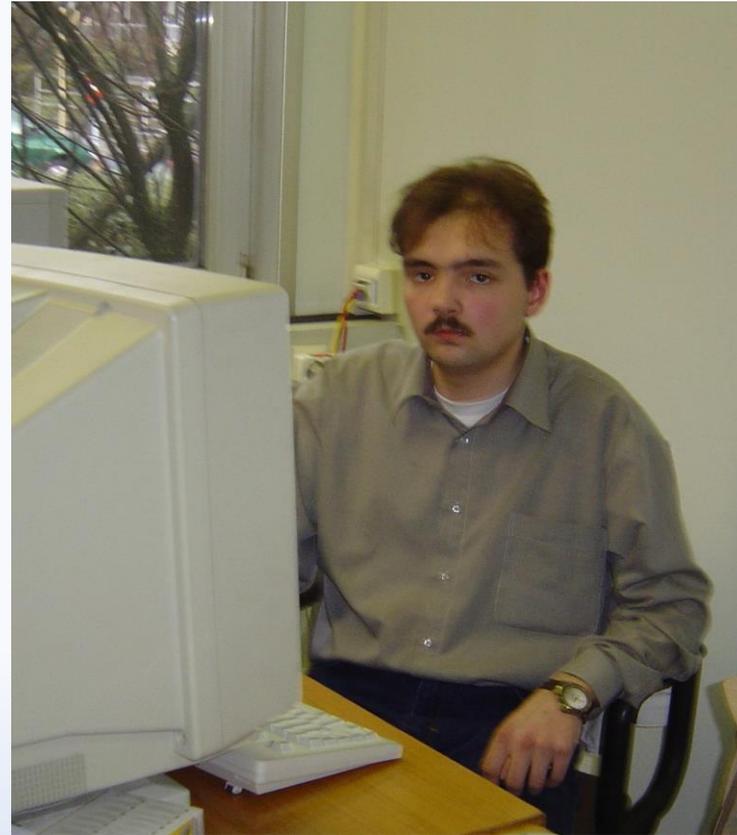
RESONANT TUNNELING OF UCN
THROUGH THE MOVING INTERFERENCE FILTER
AND EXPERIMENTAL TEST
OF THE UCN DISPERSION LAW

(2001)

Интригующие результаты Рауха с сотрудниками по пропусканию УХН через образцы, содержащие Gd (1999г) заставили нас обратиться к этой тематике.



С Гельмутом Раухом. Вена 2009г



Герман Кулин, ИЛЛ, Гренобль, 2004г



Ольга Кулина, Дубна, 2004г

Нейтронная оптика сильно поглощающих сред (некоторые иллюстрации)

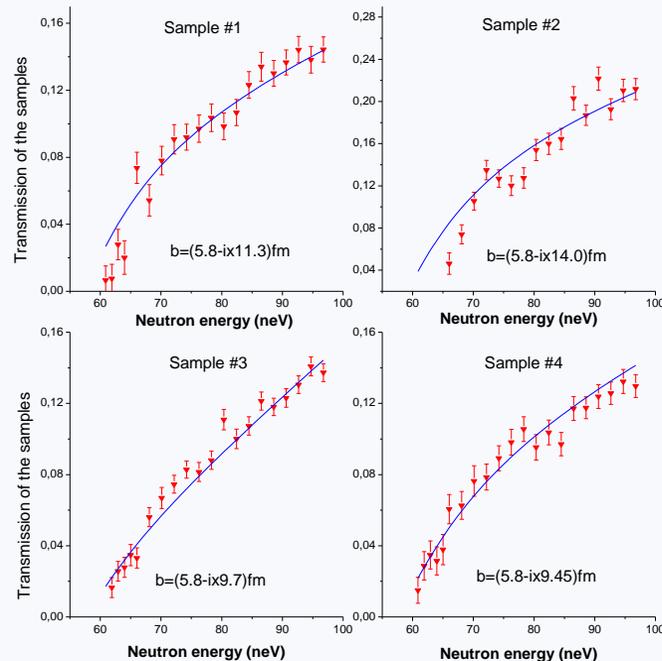
$$n^2 = 1 - \frac{4\pi N}{k_0^2} (b' - ib'') \quad b'' \approx b'$$

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m} N(b' - ib'') = V - iW$$

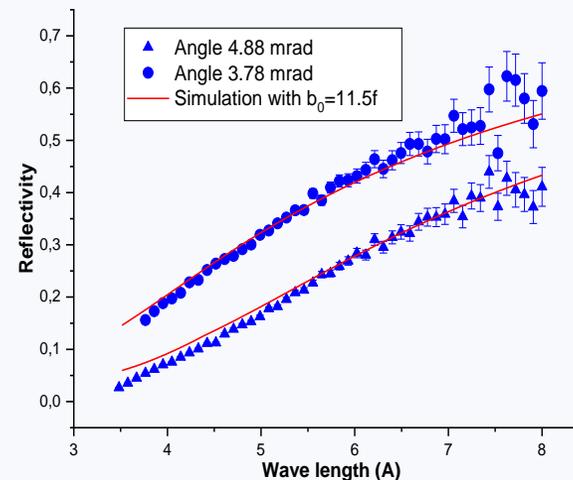
$$k^2 = k_0^2 - 4\pi N(b' - ib'') \quad k = k' - ik''$$

$$k' = \sqrt{\frac{k_0^2 - 4\pi\rho b'}{2} + \sqrt{\frac{(k_0^2 - 4\pi\rho b')^2}{4} + (2\pi\rho b'')^2}}$$

$$k'' = \sqrt{\frac{4\pi\rho b' - k_0^2}{2} + \sqrt{\frac{(k_0^2 - 4\pi\rho b')^2}{4} + (2\pi\rho b'')^2}}$$



Пропускание УХН через естественный Gd



$$b_0 = 11,5 \pm 0,7 f$$

Для УХН ! $U=V-iW$ $V = 45 \text{ neV}$ $W=82 \text{ neV}$

Хорошее согласие с теорией комплексного потенциала.
Сечение захвата для УХН пропорционально $1/V$
Условия эксперимента уникальны. Сечение захвата достигало величины $\sigma \cong 23\text{Mb}$, а длина затухания $(N\sigma)^{-1} \approx 300\text{Å}$ была втрое короче длины волны $\lambda \approx 1000\text{Å}$

**НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД
И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЛИННОВОЛНОВЫХ НЕЙТРОНОВ
С ПЛЕНКАМИ ГАДОЛИНИЯ**

© 2003 г. А. И. Франк*, В. И. Боднарчук, П. Гелтенборг¹⁾,
И. Л. Карпихин²⁾, Г. В. Кулин, О. В. Кулина

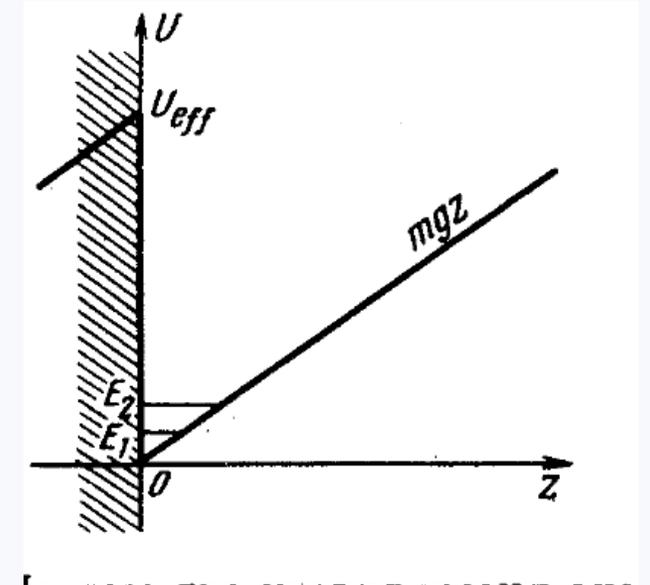
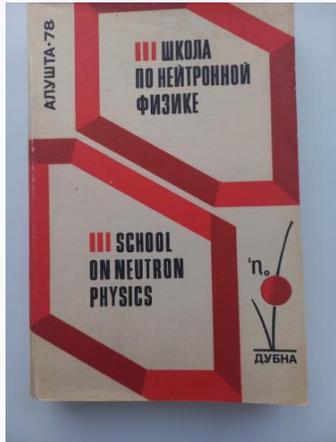
Часть III

Квантовые явления в нейтронной оптике

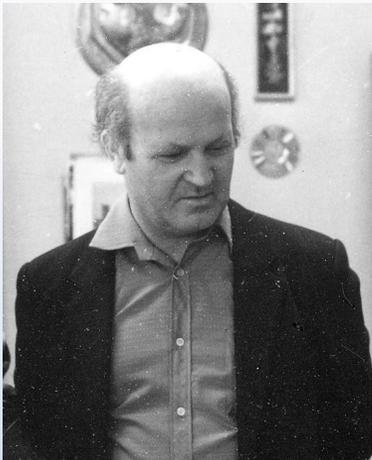
Часть III. Квантовые явления в нейтронной оптике

Нейтронная оптика и квантовая механика	169
Квантовые эффекты при хранении ультрахолодных нейтронов на плоскости . . .	180
Ларморовская прецессия спина и нейтронная оптика	183
Neutron multiray reflection	204
Квантовая модуляция нейтронной волны и временной интерферометр	207
Neutron diffraction on a moving grating and quasi-energy of cold neutrons	219
Phase modulation of a neutron wave and diffraction of ultracold neutrons on a moving grating	226
Фокусировка нейтронов во времени	235

III школа по нейтронной физике. Начало (1978г)



По совету Валерия Ломоносова я обратился к задачнику Флюгге



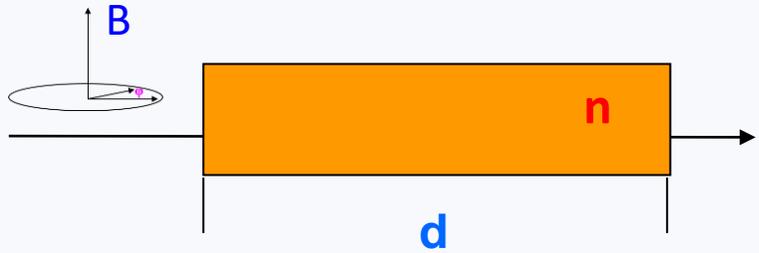
Письма в ЖЭТФ, том 28, вып. 9, стр. 607 – 609

5 ноября 1978 г.

КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ХРАНЕНИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ПЛОСКОСТИ

В.И. Лушиков, А.И. Франк

Дополнительная прецессия при преломлении (оптическое вращение спина)



Сдвиг фазы при преломлении

$$\phi = \mathbf{k} \cdot (1 - \mathbf{n}) \mathbf{d}$$

Для состояния с прецессирующим спином

$$\mathbf{k}_{\pm} = k_0 \sqrt{1 \mp \frac{\mu \mathbf{B}}{E}}$$

$$\mathbf{n}_{\pm} = \sqrt{1 - \frac{U}{E \mp \mu \mathbf{B}}}$$

$$\phi_{\pm} = \mathbf{k}_{\pm} \cdot (1 - \mathbf{n}_{\pm}) \mathbf{d}$$

$$\Delta \Phi = \phi_{+} - \phi_{-}$$

Угол поворота спина, обусловленный преломлением

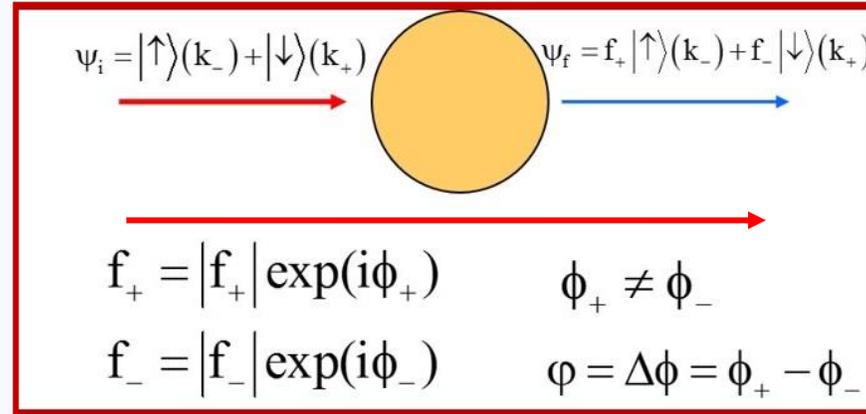
$$\Delta \Phi = \omega_L \left(\frac{1 - \mathbf{n}}{\mathbf{n}} \right) \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{v}} \quad \omega_L = \frac{2\mu \mathbf{B}}{\hbar}$$

Физическое основание для фазового контраста

В.Л. Гинзбург
 ↓
 С.Т. Беляев
 ↓
 Д.П. Гречухин
 ↓
В.Г. Носов

А.И.Франк. Вопросы атомной науки и техники, Серия: Общая и ядерная физика, (36), с.69, 1986.
 V.G.Baryshevskii, S.V.Cherepitsa, A.I.Frank. Phys.Lett.A, 1991, V.153, 299.
 Франк А.И., УФН, 161, 95 (1991)

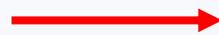
Ларморовская прецессия как часы



Время задержки обусловленное взаимодействием может быть определено как

$$\tau = \frac{\Delta\phi}{\omega_L}$$

$$\tau = \hbar \frac{\Delta\phi}{2\mu B} = \hbar \frac{\Delta\phi}{\Delta E}$$



$$\tau = \hbar \frac{d\phi}{dE}$$

в пределе

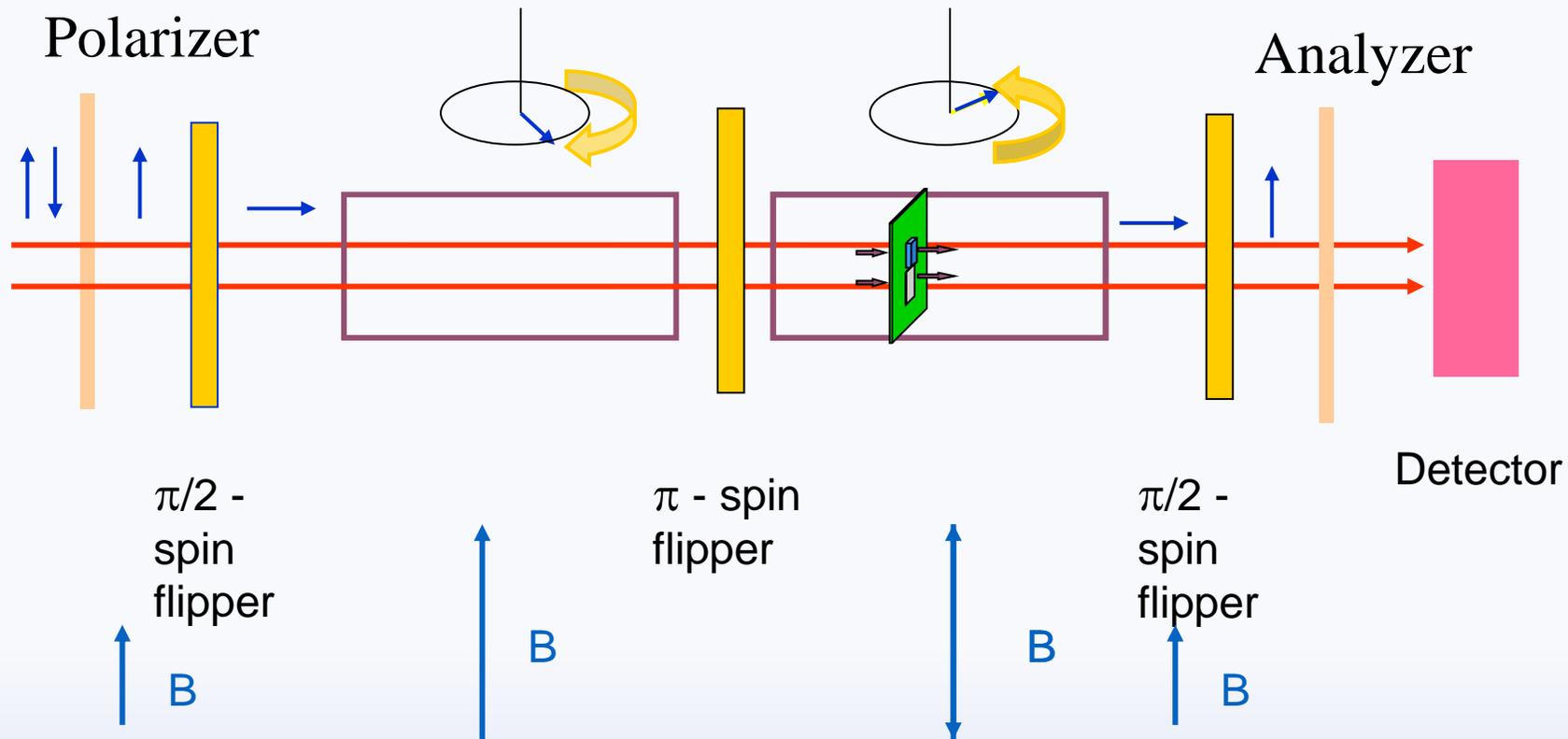
$$B, \Delta E \rightarrow 0$$

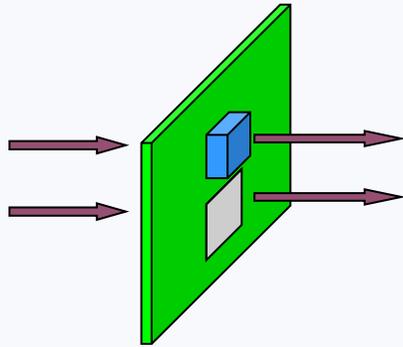
А.И.Базь, 1966

Формула Бома-Вигнера (групповое время задержки)

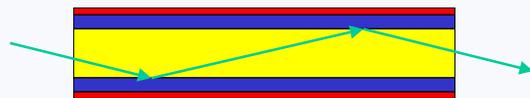
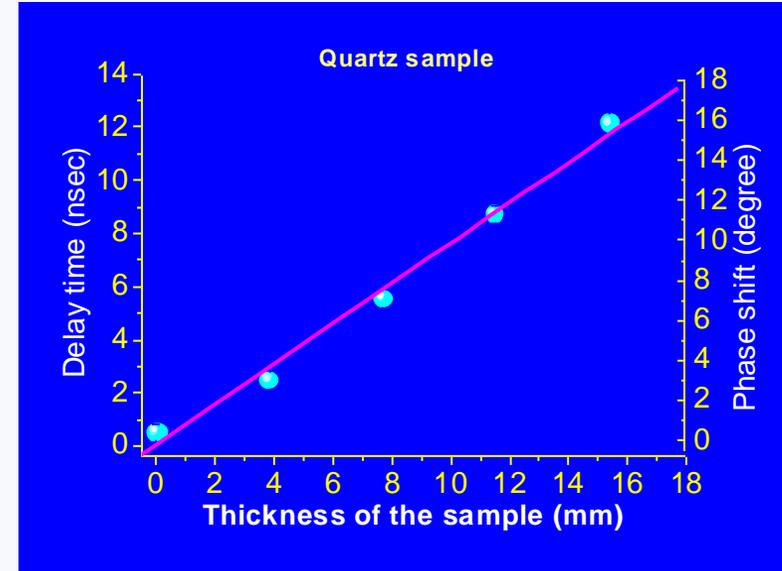
Ларморовские часы – некоторые иллюстрации

Detection of the precession phase



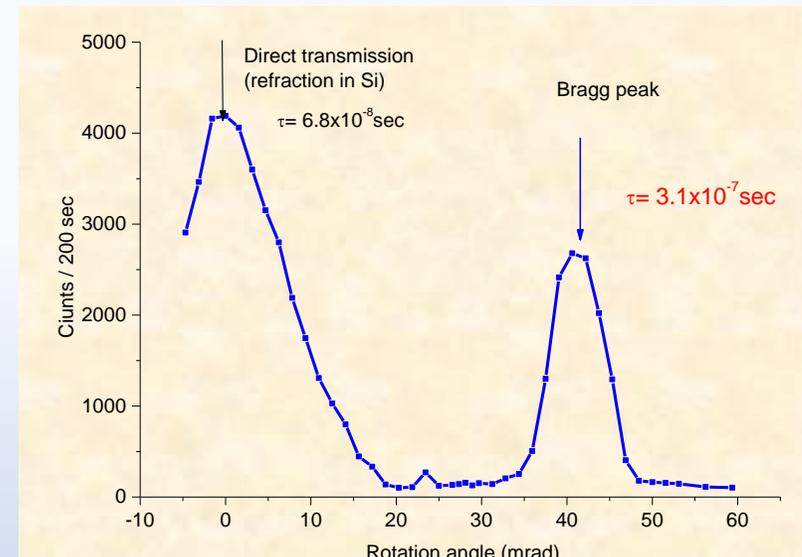


$$\Delta\Phi = \omega_L \left(\frac{1-n}{n} \right) \frac{d}{v}$$

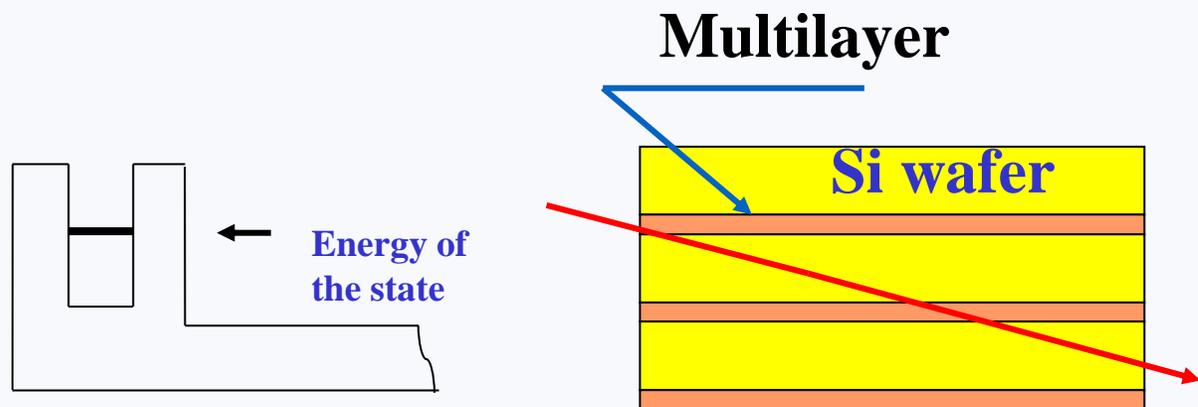


- Si wafer** (two-side polished)
- Multilayers**
NiV(7) (130A+Ti 70A)x30
- Gd absorber** 700-100A

A.I. Frank, I.V. Bondarenko, A.V. Kozlov, P. Høghøj and G. Ehlers. Physica B: Condensed Matter 297, 307 (2001)



Время туннелирования в резонансе квазисвязанного состояния



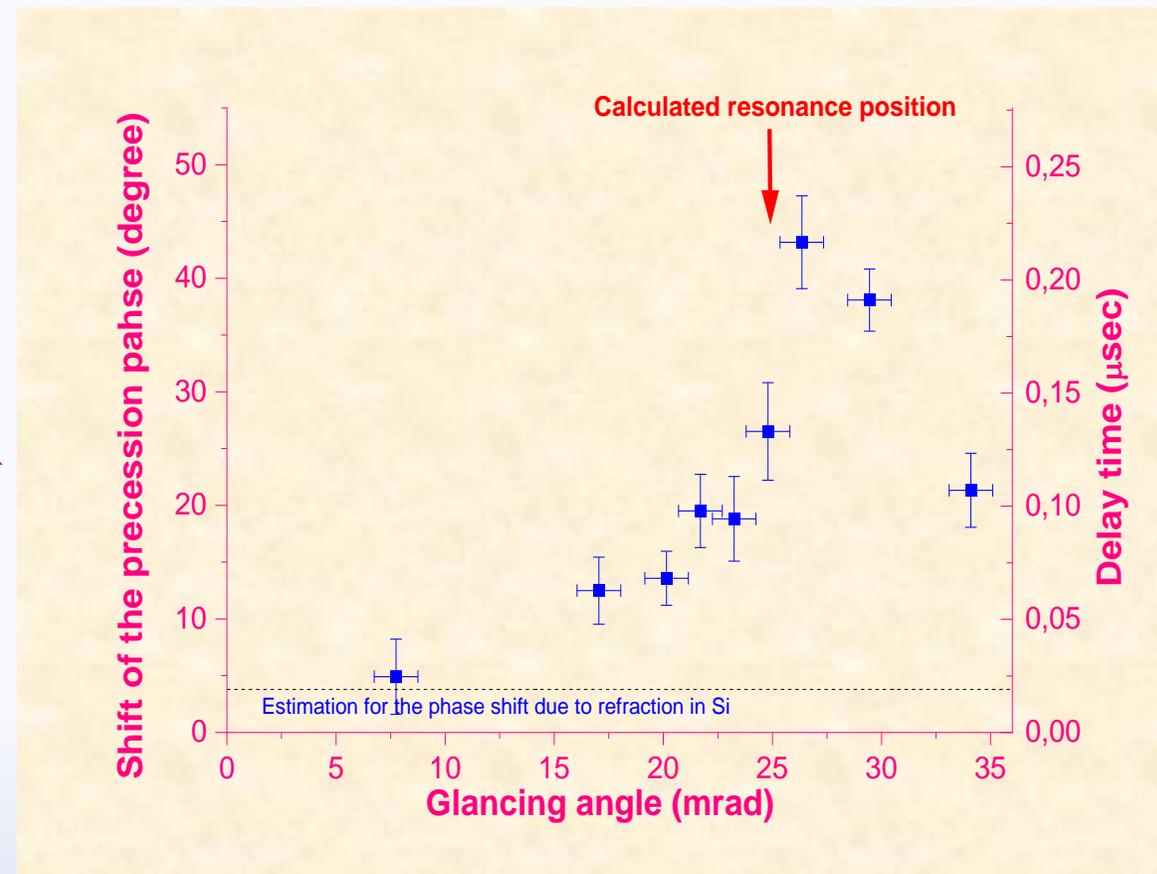
===== ЯДРА =====

ЛАРМОРОВСКАЯ ПРЕЦЕССИЯ СПИНА И НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА

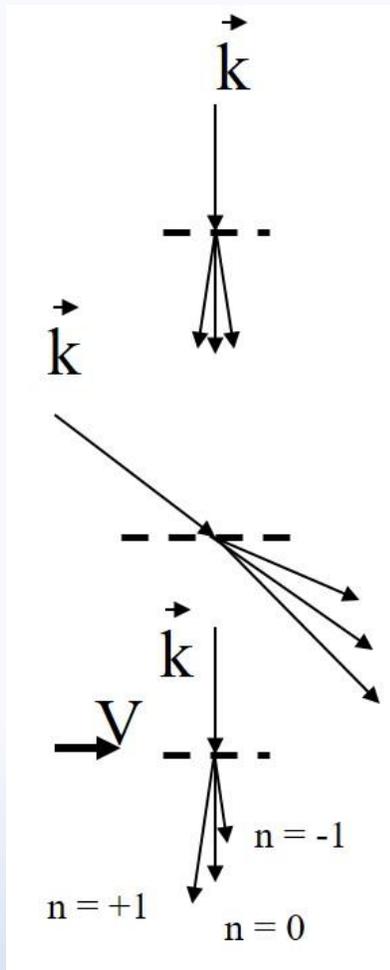
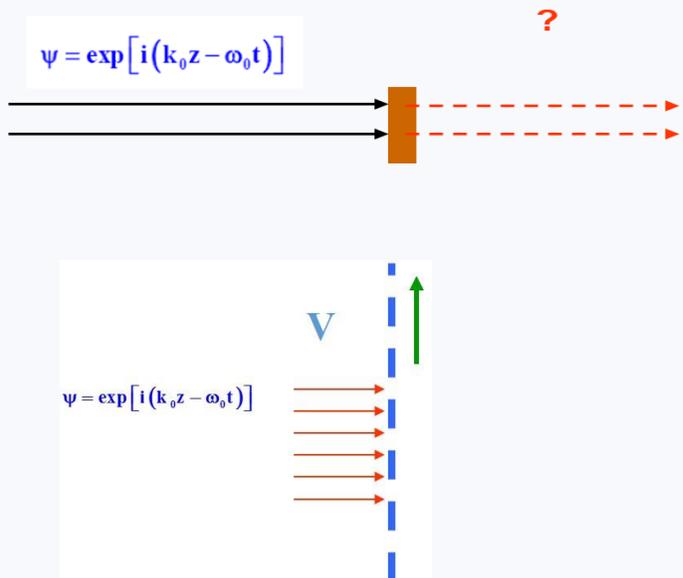
© 2002 г. А. И. Франк, И. Андерсон¹⁾,
И. В. Бондаренко, А. В. Козлов, П. Хогхой¹⁾, Г. Элер¹⁾

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Поступила в редакцию 11.03.2002 г.



Дифракция на движущейся решетке как фазовая модуляция нейтронной волны



$$\Psi(z, y, t) = \sum_j a_j \exp[i(\mathbf{k}_j z + \mathbf{q}_j y - \omega_j t)] \quad (k_0 L \ll 1)$$

$$a_j = \frac{1}{d} \int_0^L T(x) \exp(-iq_j x) dx \quad \mathbf{q}_j = \mathbf{j} \cdot \left(\frac{2\pi}{d}\right) = \mathbf{j} \mathbf{q}_0$$

$$\omega_j = \omega_0 + \mathbf{j}\Omega \quad \mathbf{k}_j \cong \mathbf{k}_0 \left(1 + \mathbf{j} \frac{\Omega}{\omega_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \mathbf{j} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 2\pi \left(\frac{V}{d}\right) \quad d - \text{space period of a grating}$$

Neutron diffraction on a moving grating and quasi-energy of cold neutrons

A.I. Frank

Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow Region, Russian Federation

V.G. Nosov

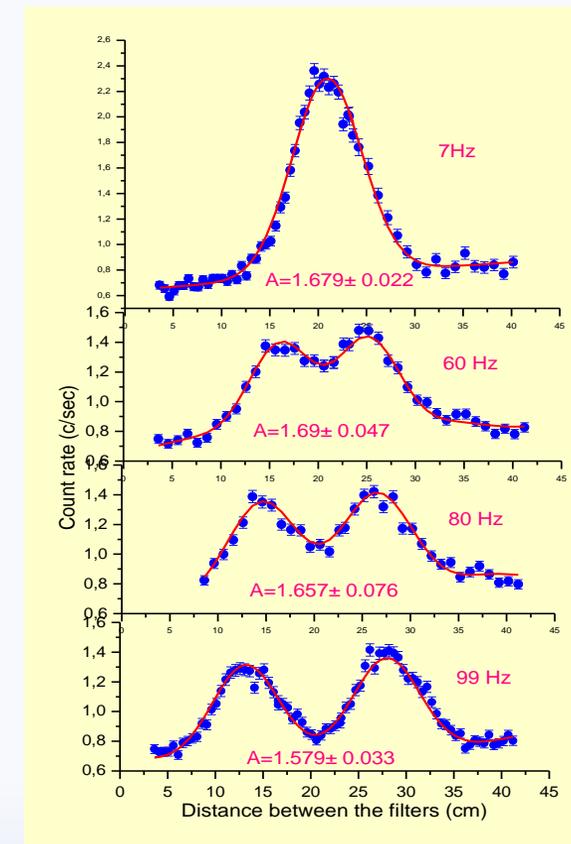
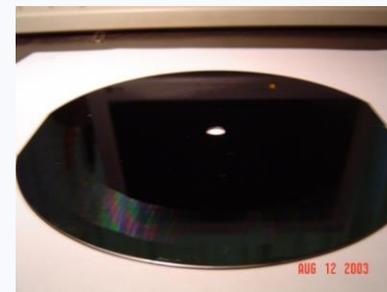
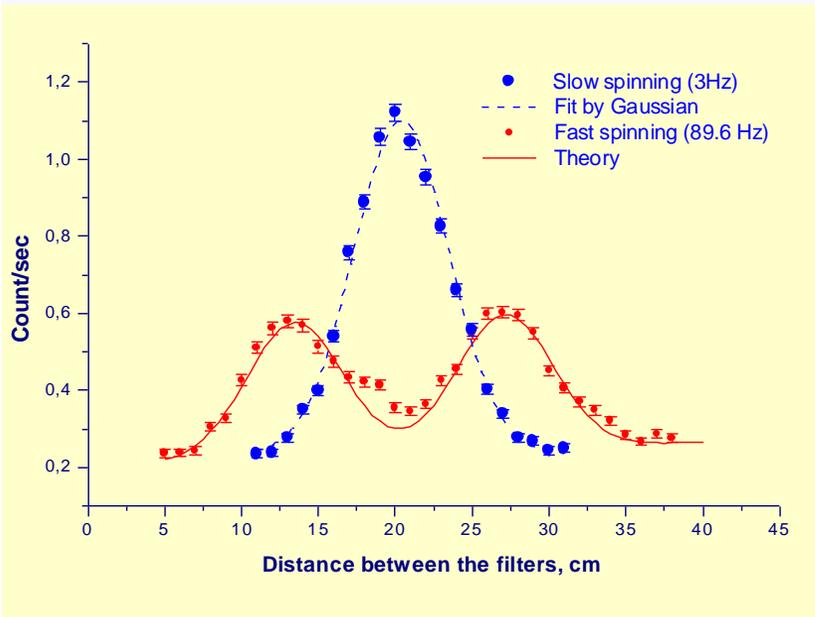
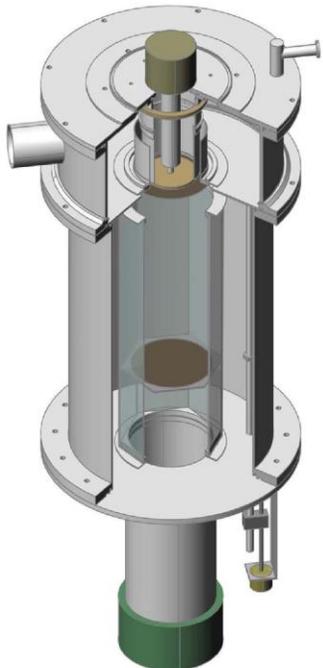
General and Nuclear Physics Institute, Russian Research Center "Kurchatov Institute", 123182 Moscow, Russian Federation

Received 18 February 1993; revised manuscript received 8 March 1994; accepted for publication 14 March 1994

Communicated by J.P. Vignier

V.G.Nosov, A.I.Frank. *J. Mosc. Phys. Society*, 1, 1 (1991).
A.I.Frank, V.G.Nosov. *Phys. Lett. A*. 188, 120 (1994).

Демонстрация квантового расщепления спектра



Phase modulation of a neutron wave and diffraction of ultracold neutrons on a moving grating

A.I. Frank ^{a,*}, S.N. Balashov ^b, I.V. Bondarenko ^a, P. Geltenbort ^c, P. Hoghoj ^c,
S.V. Masalovich ^b, V.G. Nosov ^b

^a Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^b Institute of General and Nuclear Physics, RNC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

^c Institut Laue-Langevin, Grenoble, France

Received 29 April 2002; received in revised form 8 March 2003; accepted 10 March 2003

$$|a_1|_{th}^2 = 0.405$$

$$|a_1|_{exp}^2 = 0.383(8)$$

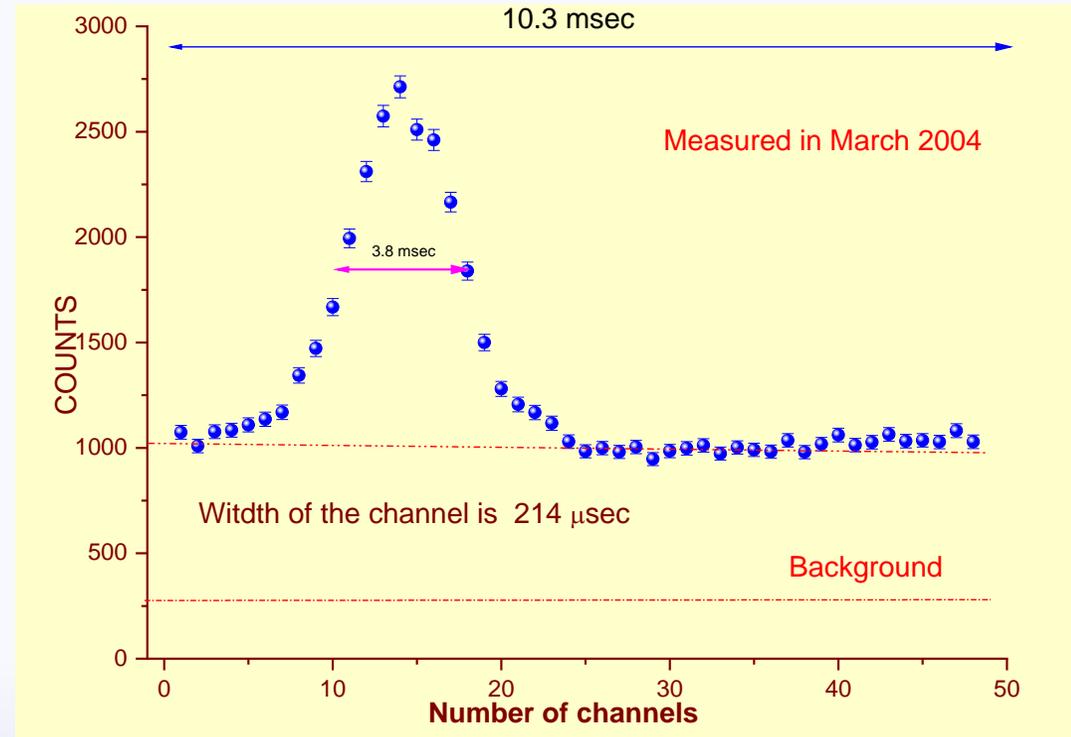
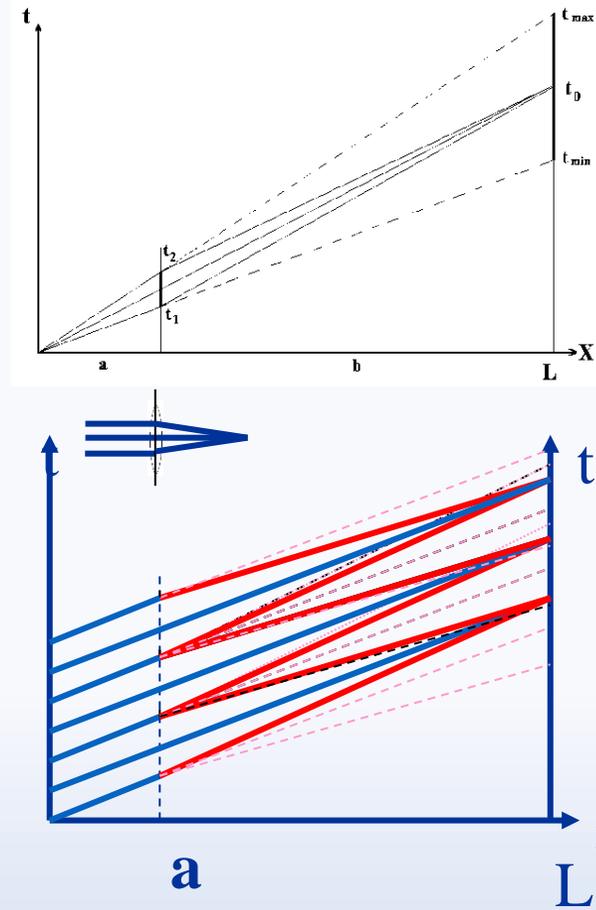
**A.I. Frank et al. ILL annual report 2001
Phys.Lett.A 311 (2003) 6**

**А.И.Франк, П.Гелтенборт, Г.В. Кулин, Д.В.Кустов,
В.Г.Носов, А.Н Стрепетов. Письма в ЖЭТФ, т. 81, 427 (2005)**

Временная фокусировка нейтронов



Roland Gähler, 2012



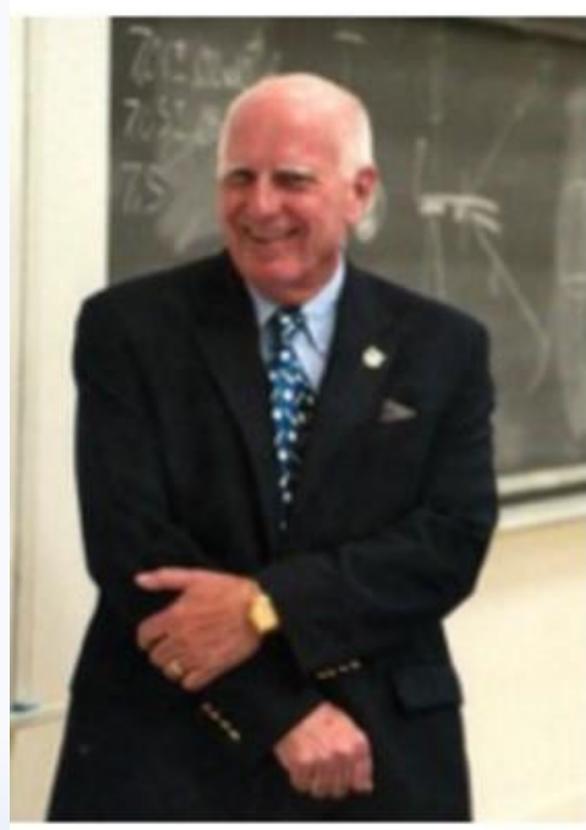
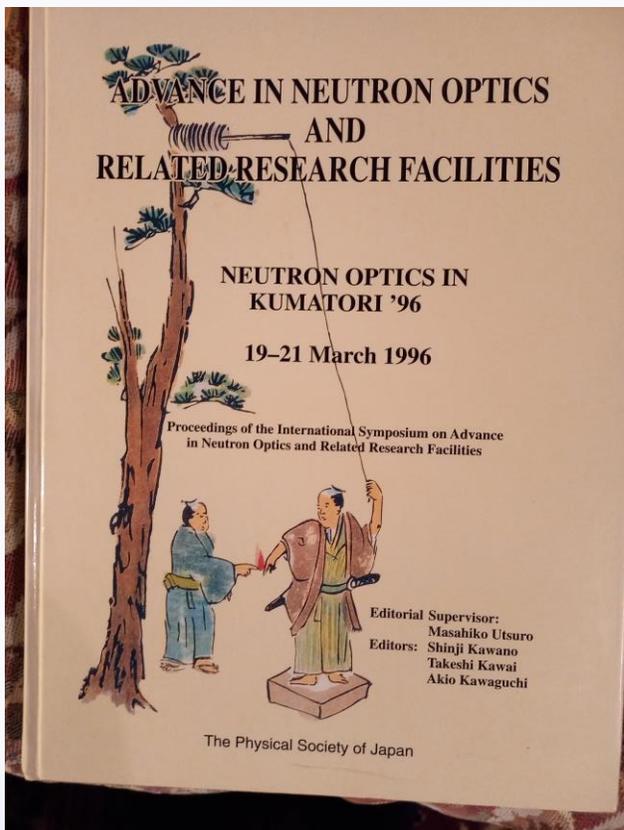
A.I.Frank and R.Gähler. *Phys. of Atomic Nuclei*, 63, (2000) 545
 A. I. Frank, P. Geltenbort, G. V. Kulin et al. *JETP Lett.* 78, (2003) 188
 S.N. Balashov, I.V. Bondarenko, A.I. Frank et al, *Physica B*, 350 (2004) 24

Часть IV

Оптика движущихся сред и эффект ускорения

Часть IV. Оптика движущихся сред и эффект ускорения

Оптика сред, движущихся с ускорением	243
Взаимодействие медленных нейтронов с движущимся веществом	248
Эффект ускоряющегося вещества в нейтронной оптике	267
Взаимодействие волн с двоякопреломляющим веществом, движущимся с ускорением	293
Взаимодействие волны с ускоряющимся объектом и принцип эквивалентности	312
Interaction of ultracold neutrons with potential structures moving with acceleration	318



Samuel A. Werner

Proc. Int. Symposium on Neutron Optics and Related Research Facilities, Kumatori, 1996
J. Phys. Soc. Jpn. 65 (1996) Suppl. A pp. 98-101

Neutron Interferometry in Non- Inertial Reference Frames

Kenneth LITTRELL, Samuel WERNER, and Brendan ALLMAN

Department of Physics and Research Reactor Center, University of Missouri Columbia MO 65211 USA

(Received 1 February 1996; accepted 1 May 1996)

Interaction of neutrons with accelerating matter: test of the equivalence principle

F.V. Kowalski

Department of Physics, Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA

Received 20 August 1993; accepted for publication 22 September 1993

Communicated by J.P. Vigiér

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 1998, том 61, № 4, с. 686-696

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ С ДВИЖУЩИМСЯ ВЕЩЕСТВОМ

© 1998 г. В. Г. Носов, А. И. Франк¹⁾

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва

Поступила в редакцию 09.06.97 г.

$$\Delta E \cong mwd \left(\frac{1}{n} - 1 \right)$$

Формула Ковальского-Носова-Франка

Proposed Fundamental Investigations Using Neutron Interference Filters and Gravity Spectrometry

Ilya V. Bondarenko, Alexander I. Frank, Sergey N. Balashov, Sergey V. Masalovich
 and Vadim G. Nosov

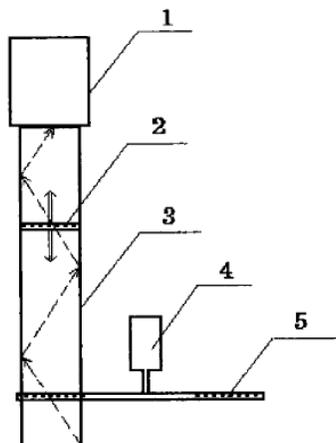


Fig. 2. Layout of the proposed experiment to test the neutron dispersion law: (1) detector, (2) interference filter-analyzer, (3) neutron guide, (4) motor / turbine, (5) disk with interference filter.

1. 1997 г. Создание гравитационного спектрометра
2. 1998 -1999 г. Эксперименты по проверке закона дисперсии УХН
3. 1999 -2002 гг. Нейтронная спиновая интерферометрия и ларморовские часы
4. 2002-2003 гг. Оптика сильно поглощающих сред – пропускание УХН через пленки Gd.
5. 2003 -2005гг. Наблюдение и изучение нестационарной дифракции УХН на движущейся решетке
6. 2003 г. Демонстрация временной фокусировки
7. 2006 г. Проверка закона $1/v$ при взаимодействии УХН с гадолинием





Ефим Иосифович
Кац



А.Н.Стрепетов, Г.В.Кулин, Д.В Кустов,
А.И.Франк



Michael Jentschel



Peter Geltrnbort



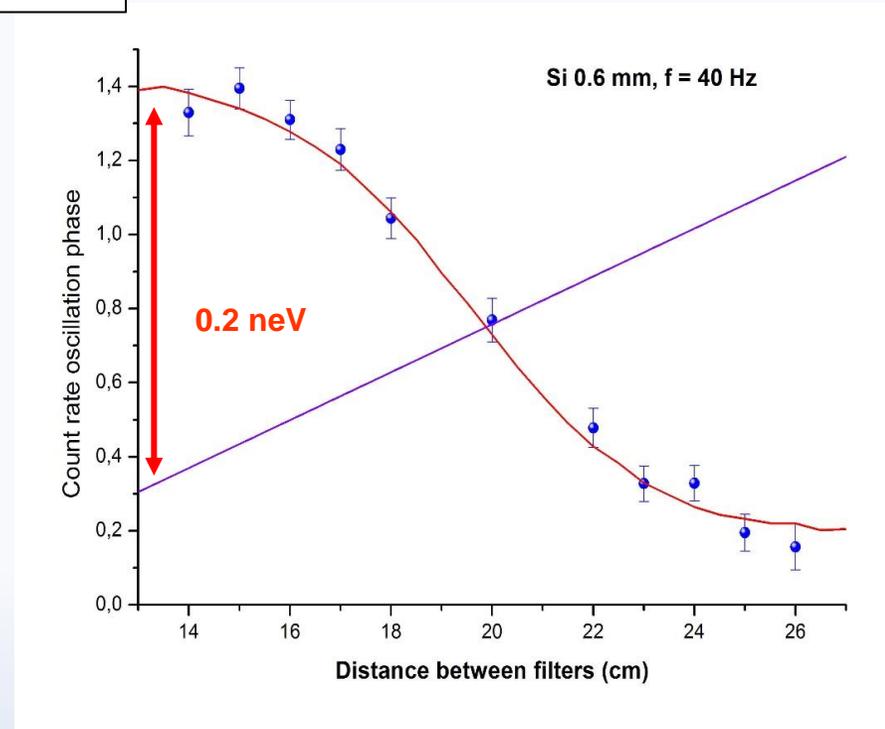
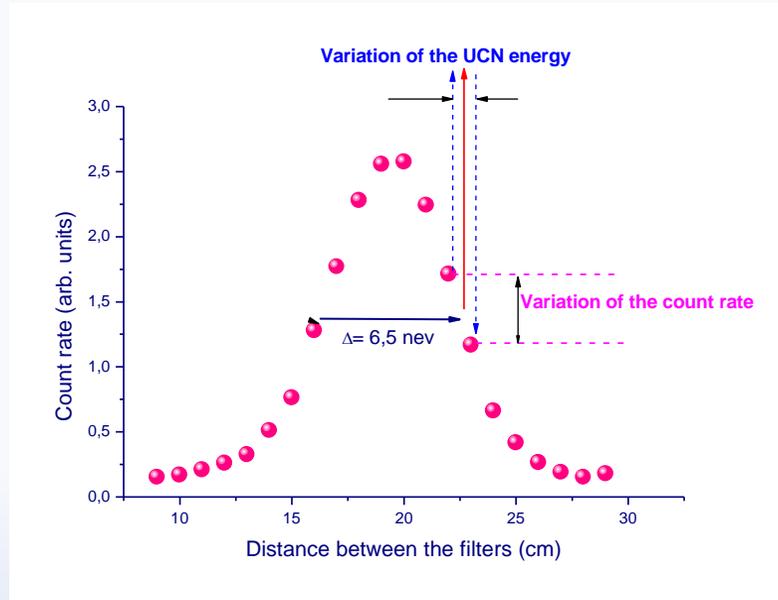
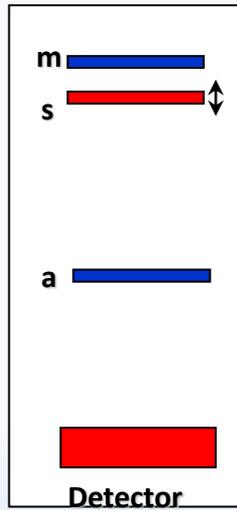
А. Франк. Семинар ЛНФ. Презентация книги

ЭФФЕКТ УСКОРЯЮЩЕГОСЯ ВЕЩЕСТВА В НЕЙТРОННОЙ ОПТИКЕ

© 2008 г. А. И. Франк*, П. Гелтенборг¹⁾, М. Жентшель¹⁾,
 Д. В. Кустов²⁾, Г. В. Кулин, В. Г. Носов³⁾, А. Н. Стрепетов³⁾

Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка,
 Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Поступила в редакцию 12.02.2008 г.



$$\Delta E \cong -K m A \Omega^2 L \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \sin \Omega t$$

$$K = 0.94 \pm 0.06$$

Май 2020 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 190, № 5

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

**Взаимодействие волны с ускоряющимся объектом
и принцип эквивалентности**

А.И. Франк

Любой объект, рассеивающий волну, или передающий сигнал, сдвигает частоту если он движется с ускорением.

Общее выражение

$$\Delta\omega = ka\Delta\tau$$

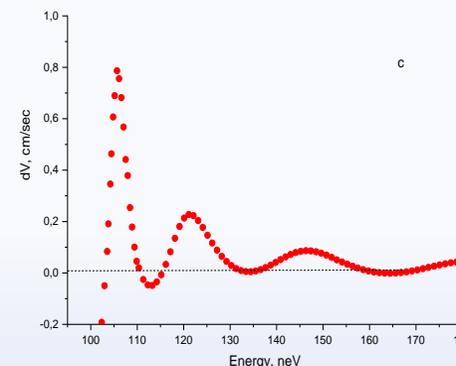
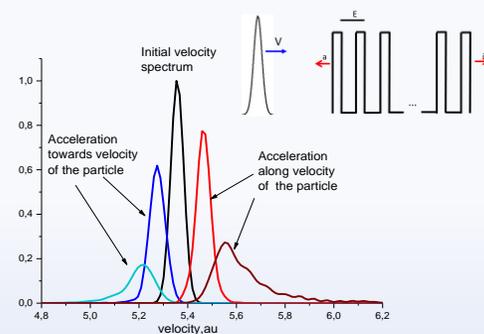
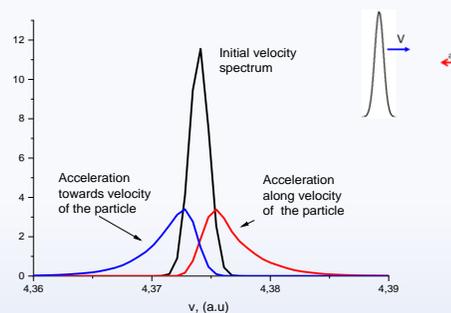
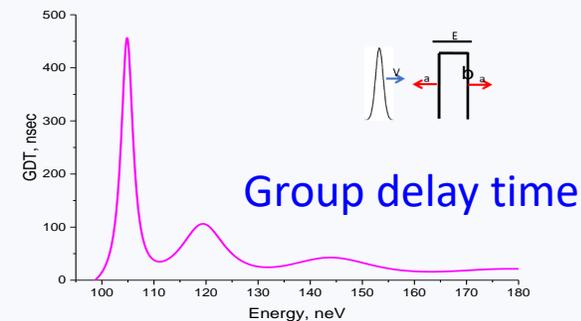
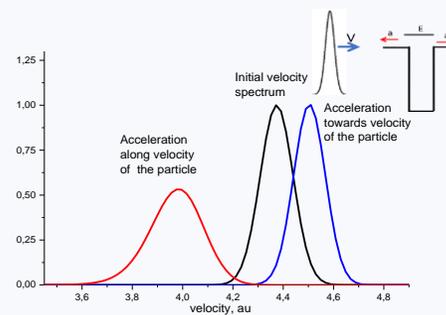
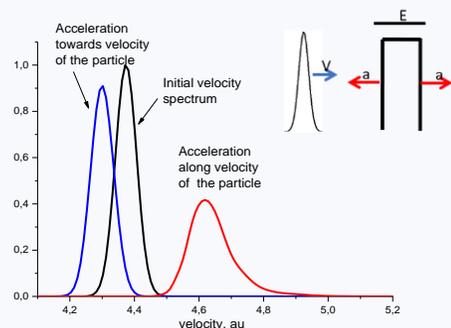
Взаимодействие волнового пакета с ускоряющимися потенциальными структурами

Interaction of a wave packet with potential structures moving with acceleration

M. A. Zakharov^{1,2,*}, G. V. Kulin², and A. I. Frank²



М.А.Захаров



$$\tau_g = \hbar \left(\frac{d\phi}{dE_z} \right)$$

$$\Delta v \approx \omega \tau$$

Эффект ускорения, дополняющий эффект Доплера, должен иметь место и в квантовой механике

Искренняя благодарность моим соавторам



*Д.Б. Аманджолова, В.И.Боднарчук, И.В. Бондаренко, С.В. Горюнов, Д.А. Корнеев,
А. В. Козлов, Г.В. Кулин, О.В. Кулина, Д. В. Кустов, В.И. Луциков, М.А. Захаров.*



В.А. Наумов



С.С.Арзуманов, С.Н. Балашов, С.В.Масалович, В.Г.Носов , А.А. Сабельников, А.Н.Стрепетов



Б.П.Топерверг



И Л. Карпихин



I. Anderson, G. Ehlers, R. Gähler, P. Geltenbort, P. Høghøj, M. Jentschel,

Этот сборник не мог бы появиться если бы рядом со мной не было

Риммы Васильевны Франк

***Этот сборник не мог бы появиться если бы рядом со
мною не было***

Риммы Васильевны Франк

Спасибо за внимание!