



Удивительный нейтрон

А.И. Франк

ЛНФ им. И.М.Франка ОИЯИ

Предыстория

- **Июнь 1920** - **Э. Резерфорд** высказал мысль о возможном существовании нейтральной частицы, образованной в результате тесного соединения протона и электрона
- **1920** - В лаборатории Резерфорда (**Д. Глассон, Д. Робертс**) поиски «нейтрона» при пропускании электрического разряда через водород
- **1928** - **Э. Резерфорд и Дж. Чэдвик** повторение опытов с разрядом – поиски ионизации с помощью счетчика Гейгера
- **1928 -29 (?) Дж. Чэдвик**- идея о возможном рождении нейтрона при бомбардировке атомов протонами. Поиски трансформатора на 200 кВ. В письме Резерфорду: «Я считаю, что мы должны приступить к подлинным поискам нейтрона. Уверен, что располагаю действенной схемой работы»
- **Июнь 1930.** – **W. Bothe и H. Becker.** Наблюдение γ -лучей (они так считали) при облучении α -частицами Ве.
- Экспериментальные указания (**Webster**, Cavendish lab.) на направленность бериллиевых лучей. **Чэдвик** полагает, что речь идет о нейтральной частице. Но думая, что и НЕЙТРАЛЬНАЯ ЧАСТИЦА ДОЛЖНА ПРОИЗВОДИТЬ ИОНИЗАЦИЮ, пропускает лучи через камеру Вильсона. Результат отрицателен



Ernest Rutherford



James Chadwick

Работа Ирен Кюри и Ф. Жолио (1932).

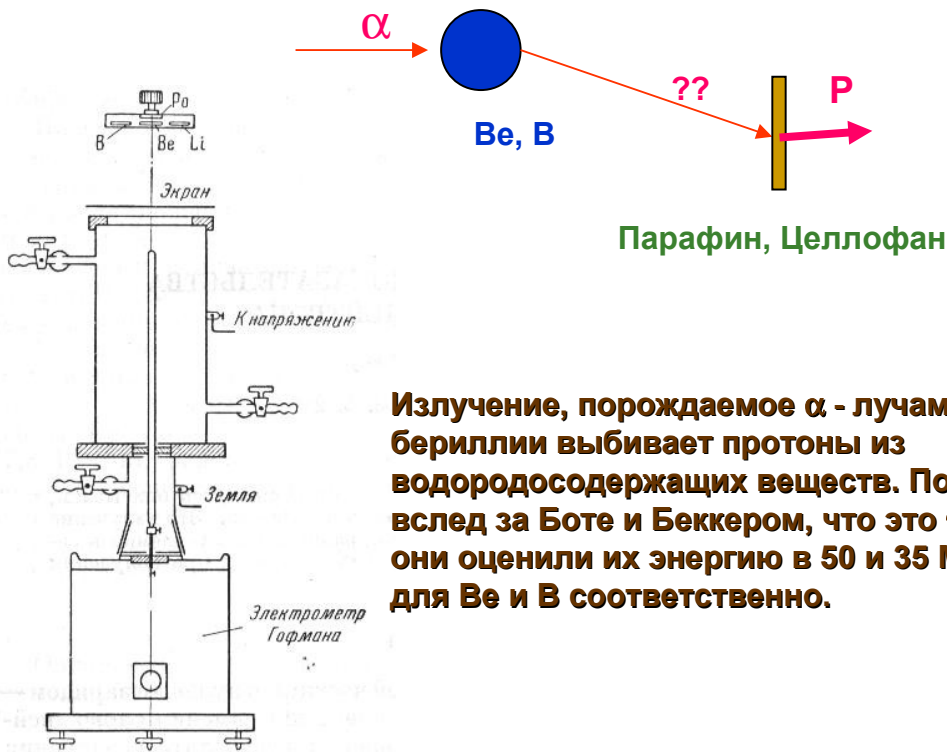
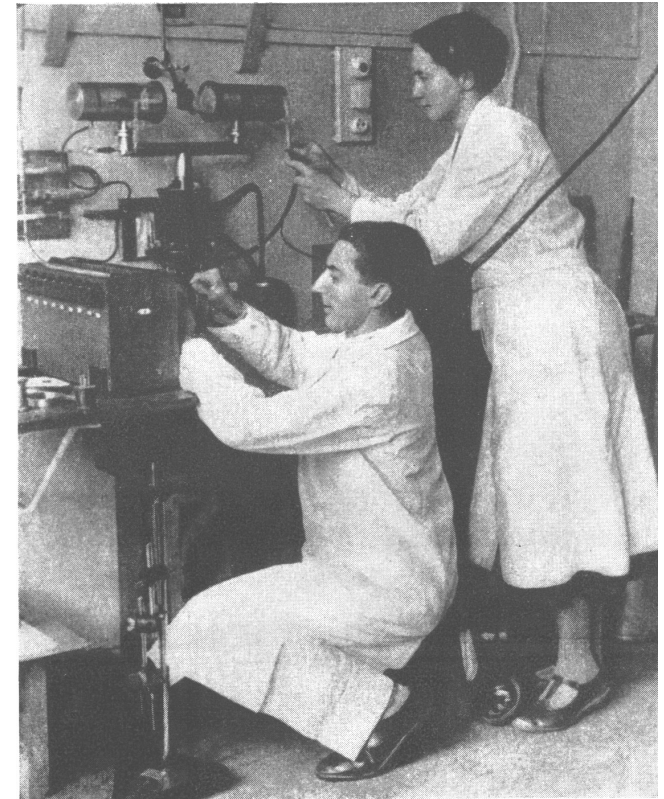


Рис. 1.

Излучение, порождаемое α - лучами в бериллии выбивает протоны из водородосодержащих веществ. Полагая вслед за Боте и Беккером, что это γ лучи, они оценили их энергию в 50 и 35 МэВ для Be и Li соответственно.



Ирен Кюри и Фредерик Жолио в лаборатории (1934 г.).

I. Curie, F. Joliot – C.r. Acad. sci. Paris, 194 (1932) 273

Открытие нейтрона (1932)



J. Chadwick

(из водорода) такую энергию

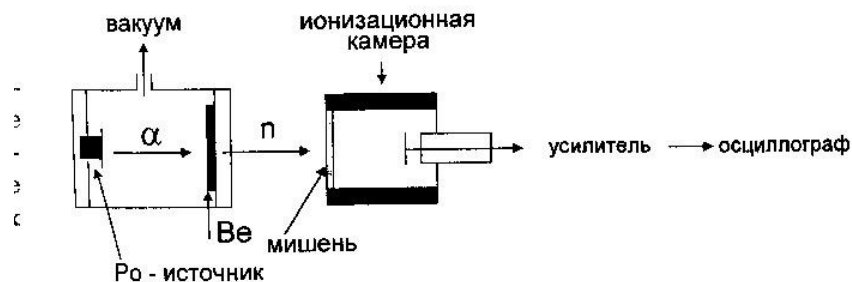


Рис. 1.3. Схема опыта Чэдвика

Измерив энергию выбиваемых протонов и ядер отдачи азота Чэдвик пришел к выводу, что гипотеза γ -лучей противоречит законам сохранения энергии и импульса. Противоречие снимается если речь идет о массивной частице с массой близкой к массе протона – **НЕЙТРОН!**

Nature 17 февраля 1932г



Спустя 3 месяца: масса нейтрона $m_n = 1.15 \pm 0.10$

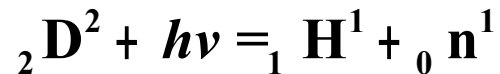
Конечно, можно было бы предположить, что нейтрон является элементарной частицей. Однако **НЕТ ДОСТАТОЧНЫХ ОСНОВАНИЙ** принять эту точку зрения, за исключением возможности объяснения статистики таких ядер как ${}^{14}\text{N}$.

Чэдвик

Изучение свойств нейтрона

Масса: *I. Curie, F. Joliot, (1933)* $m_n = 1.011 \div 1.011$ а.е
I. Curie, F. Joliot, (1934) $m_n = 1.010 \pm 0.005$ а.е

Масса: *Chadwick, Goldhaber (1935)* Фоторасщепление дейтона



$m_n = 1.0084 \pm 0.0005$ а.е и предположение о возможной радиоактивности нейтрона

Современное значение $m_n = 1.008\ 664\ 915\ 78$ (55)

Спин

$$s = \frac{1}{2} \hbar$$

Д.Д.Иваненко, J. Chadwick, W.Heisenderg, 1932

Гипотеза о протон-нейтронном составе атомных ядер
Статистика легких ядер.

Позже – опыты с магнитным расщеплением состояния



Магнитный момент нейтрона

I. Estermann and O. Stern (Апрель 1934г) Опыт Штерна-Герлаха с H^2 и D^2 .
 $\mu_n = -1.5 \div -2$ ядерных магнетонов

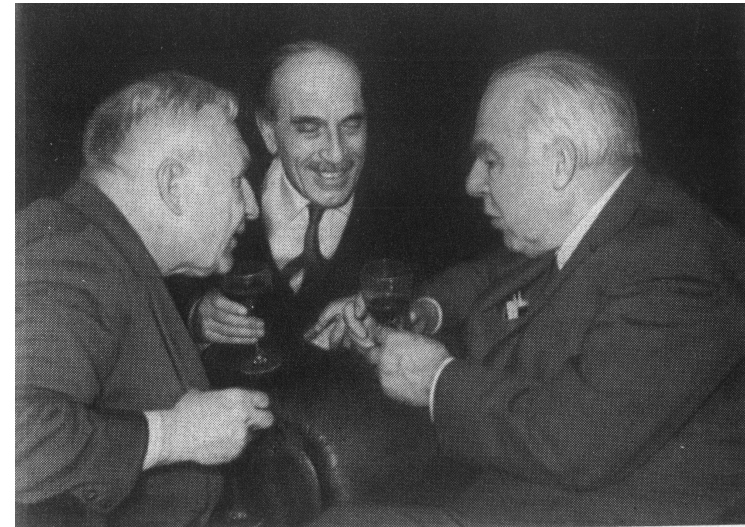
С.А.Альшулер и И.Е.Тамм (февраль 1934г)
(Магнитные моменты ядер с четным Z и нечетным N) $\mu_n \sim -0.5$ ядерных магнетонов

Otto Stern

Теперь, даже трудно понять, почему это было воспринято как нелепая ересь, простительная еще, если ее высказал экспериментатор, но постыдная в устах образованного теоретика. Тогда считалось несомненным... что элементарные частицы - точечные, и у нейтрона, не несущего в целом электрического заряда, неоткуда взяться магнитному моменту. На Харьковском совещании 1934 г., где была доложена эта работа, было много крупных физиков, самых именитых иностранных и наших. (В т.ч. и Н.Бор. пр.А.Ф.)

Игорь Евгеньевич рассказывал мне, как мягко и даже с некоторым состраданием эти люди, любившие и уважавшие его, люди, которых и он глубоко уважал, старались на разных языках объяснить ему нелепость его вывода. Он их внимательно слушал, с горячностью спорил и не мог отступить от своей точки зрения — он не видел убедительного опровержения. Впоследствии - и скоро - стало ясно, что он был прав

Е.Л.Фейнберг



И.Е. Тамм, Н.Н.Семенов и Н.Бор в институте физических проблем (1961)

Магнитный момент нейтрона

F. Bloch. (1936) Магнитное рассеяние нейтрона

1. Зависимость сечения от температуры (точка Кюри!)
2. Намагниченное железо как поляризатор и анализатор

I.I.Rabi (1937) Вращающееся э/м поле как эффективный спин- флиппер

J.Swinger (1937). Теория деполяризации в размагниченном железе

O.Frsh, H.Halban, P.Powers. (1937). Магнитный момент нейтрона обнаружен в опытах с намагниченным железом и флиппером Раби. $-3 < \mu_n < -1$ я.м.

L.Alvarez, F. Bloch (1940) Измерен магнитный момент нейтрона $\mu_n < -1.93 \pm 0.02 \mu_N$

Современное значение $\mu_n = -1,9130427 \pm 0,0000005 \mu_N$.

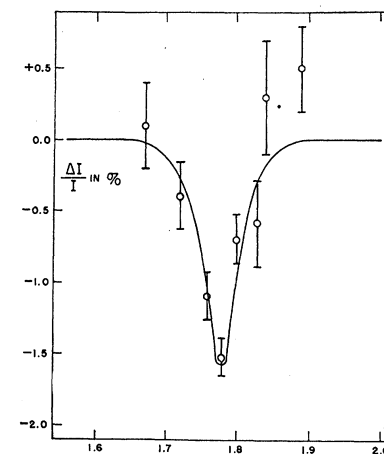
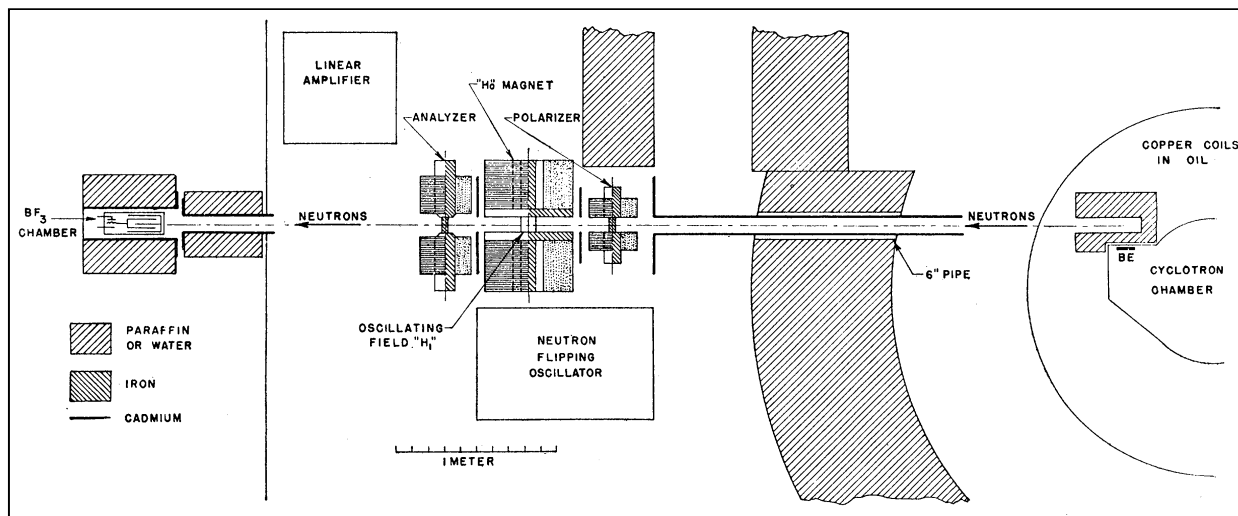
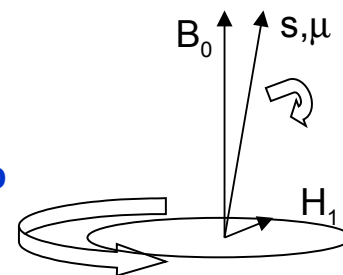


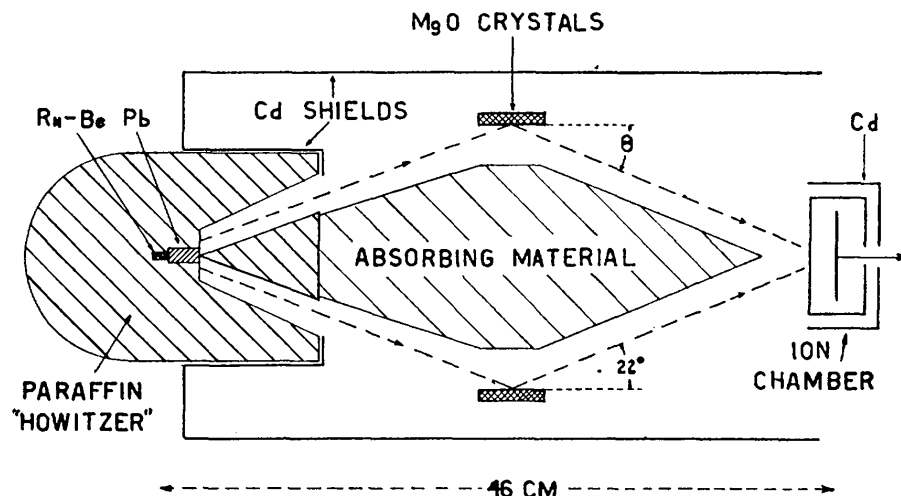
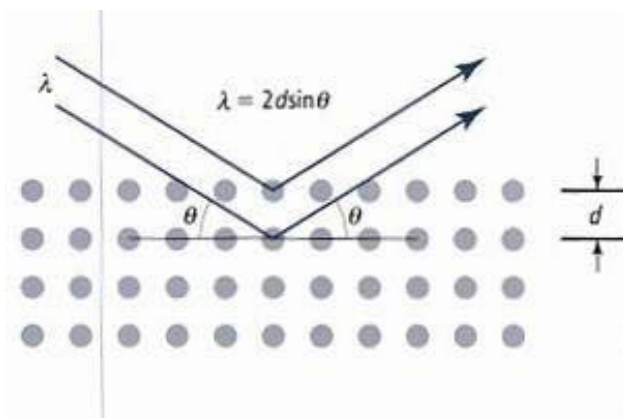
Fig. 5. Neutron resonance dip. The magnet current in arbitrary units is plotted against the fractional change ($\Delta I/I$) of the intensity of the neutron beam.

Волновые свойства нейтрона

W. Elsasser, 1936 У нейтрона должны быть волновые свойства

$$\lambda = \frac{h}{mV}$$

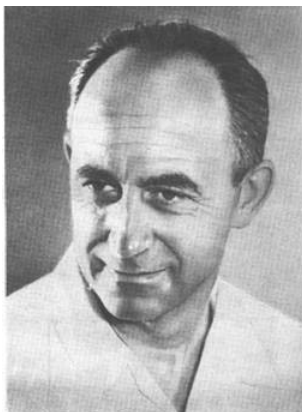
H. Halban, P.Preiswerk, 1936. Попытка наблюдения дифракции



D.Mitchel, P.Powers, 1936. Первый эксперимент по наблюдению Брэгговской дифракции

Зарождение нейтронной физики

Ферми с сотрудниками 1934-1938 гг



Enrico Fermi

- | | |
|---|--------------|
| 1. Радиоктивность, наведенная нейтронной бомбардировкой | 1934 (35-38) |
| 2. Возможное образование элементов с атомным номером выше 92 | 1934 |
| 3. Влияние водородосодержащих веществ на радиоактивность, наведенную нейтронами | 1934 |
| 4. О законе распределения медленных нейтронов по скоростям | 1935 |
| 5. О поглощении и диффузии медленных нейтронов | 1936 |
| 6. Альbedo медленных нейтронов | 1938 |

Открытие деления (1939)



Otto Hanh



Fritz Strassmann

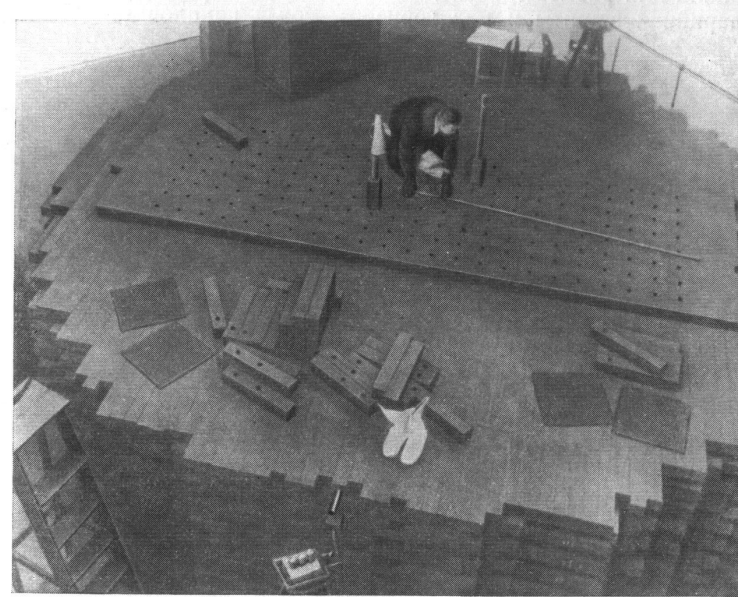


Lise Meitner (1878–1968),
photo taken in 1900

Первые реакторы



Чикаго, Декабрь 1942г.



Москва, декабрь 1946г

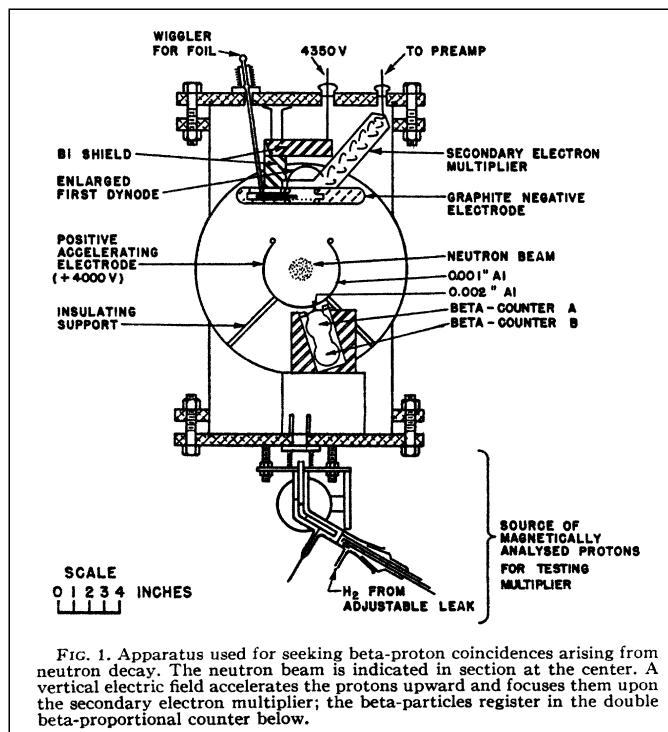
Распад нейтрона

Chadwick, Goldhaber, 1935 (фоторасщепление дейтона) $m_n = 1.0084 \pm 0.0005$ а.е.
и предположение о **возможной радиоактивности нейтрона**

H.Snell, L.C.Miller, 1948, $t_{1/2} \approx 30$ min

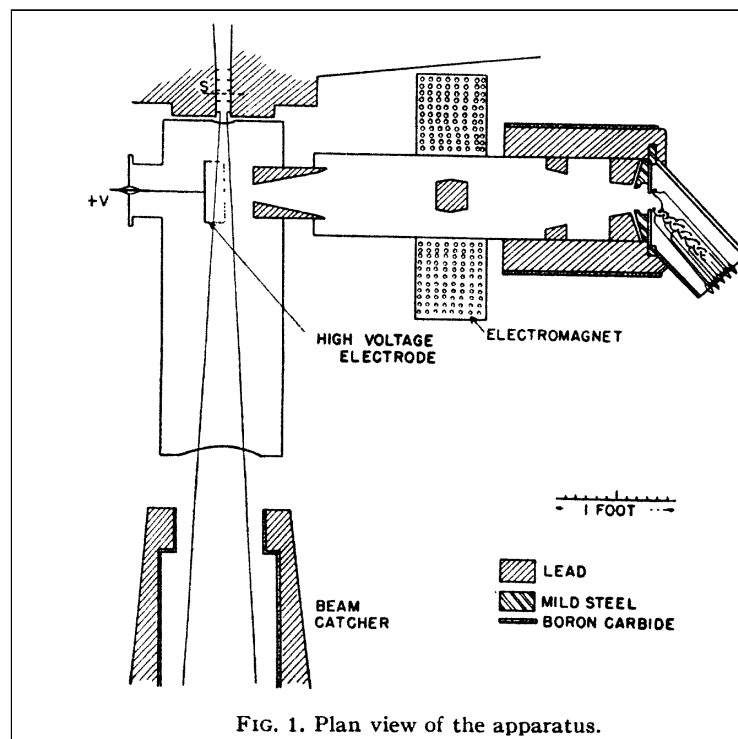
Radioactive Decay of the Neutron*

ARTHUR H. SNELL, FRANCES PLEASANTON, AND R. V. MCCORD
Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tennessee
March 6, 1950.



Radioactive Decay of the Neutron

J. M. ROBSON
Atomic Energy Project, National Research Council of Canada,
Chalk River, Ontario, Canada
March 13, 1950



$T_{1/2} = 8 \div 15$ мин (1950г) $T_{1/2} = 12,8 \pm 2,5$ мин (1955г)

Распад нейтрона

П.Е. Спивак, А.Н.Сосновский, Ю.А.Прокофьев, В.С.Соколов (1950-55г.)



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

$T_{1/2} = 8 \div 15$ мин (1950г)

$T_{1/2} = 12,0 \pm 1,5$ мин (1955)

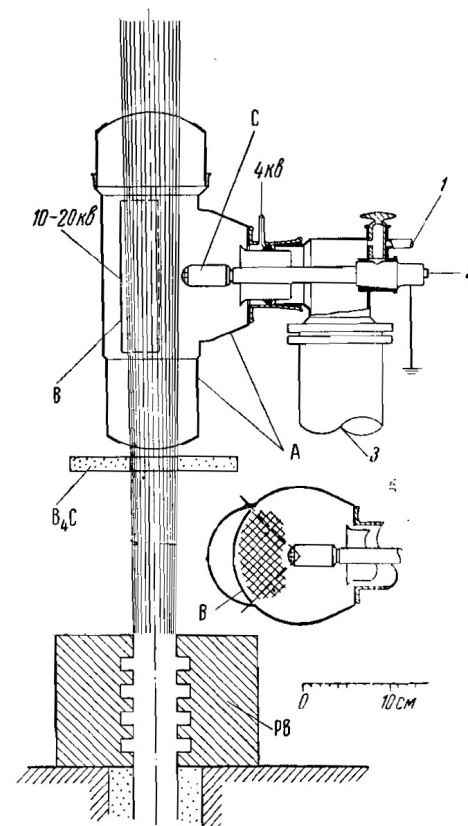


Рис. 1. Схематический разрез установки:

A — камера; B — цилиндрический электрод; C — центральный электрод; 1 — к балластному объему; 2 — к усилителю; 3 — к насосу,

Распад нейтрона и слабое взаимодействие в 50-80г

Константа распада τ

D'Angelo, П.Е.Спивак, С.Ж. Christensen

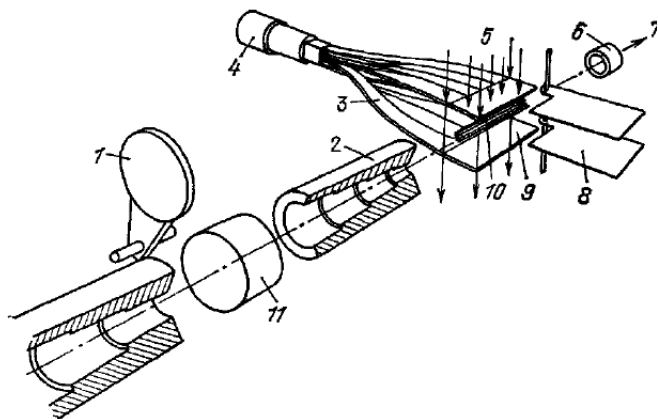


Рис. 5. Схема опыта Кристиенсена и др. ⁶⁴ по измерению времени жизни нейтрона.

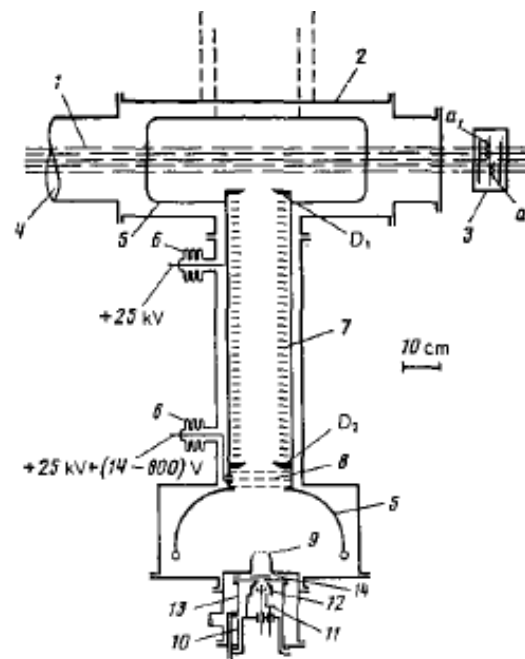


Figure 8. The IAE neutron lifetime experiment counting decay protons

$\tau \approx 900$ сек Точность $\approx 10-15$ сек

Распад нейтрона и слабое взаимодействие в 50-80гг

Поляризованные нейтроны, корреляции,

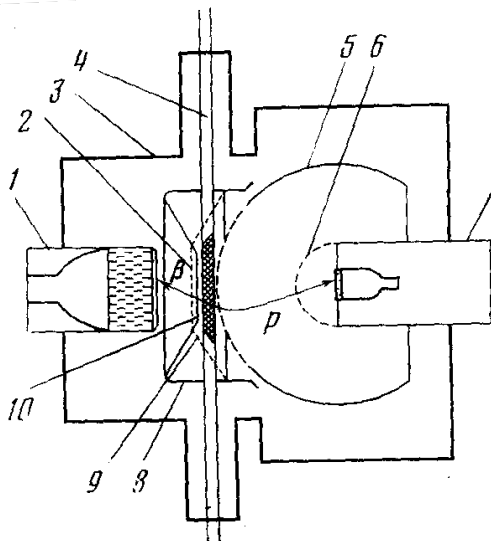
$$\lambda = \frac{g_A}{g_V}$$

М.Т. Burgy, V.E. Krohn, Б.Г.Ерозолимский, С. Christensen

$$W dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu \sim p_e E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu$$

$$\times \left[1 + a \frac{\vec{p}_e \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} + b \frac{m_e}{E_e} + \langle \vec{\sigma}_n \rangle \left(A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_\nu}{E_\nu} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} \right) \right]$$

Измерены с разумной точностью
все основные корреляции



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. ВОЙЦИГ

ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

(Поступила в редакцию 26 апреля 1979 г.)

$$\lambda = \frac{g_A}{g_V} \approx -1.26 \pm 0.012 \quad (1975 \text{ г.})$$



Г.И. Будкер и Б.Г.Ерозолимский, 1977

Нейтронная оптика в 40-50гг

Fermi and Zinn (1944-46). Refraction index of neutron waves reflection from the mirrors

$$n^2 = 1 - \frac{Nb}{\pi} \lambda^2$$

$$v_{\perp} = v \sin \theta < v_{\text{lim}} = \frac{h}{m} \sqrt{\frac{Nb}{\pi}} \longrightarrow$$

Полное отражение

N – Число ядер в единице объема

b – длина когерентного рассеяния

$$|b| = \sqrt{\frac{\sigma_s}{4\pi}}$$

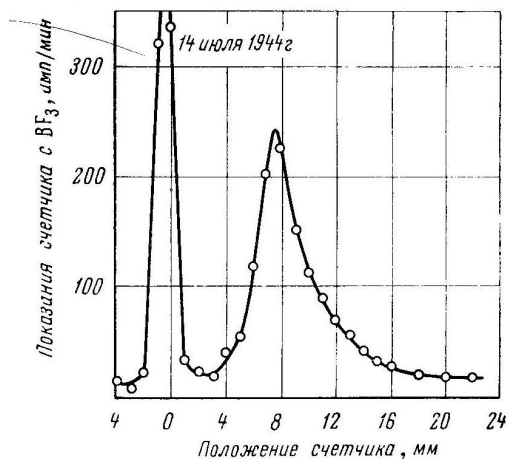
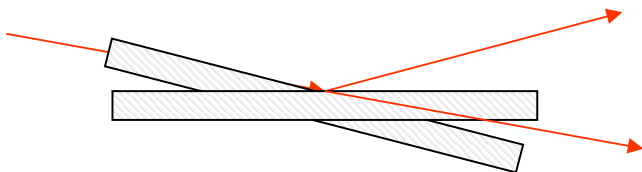
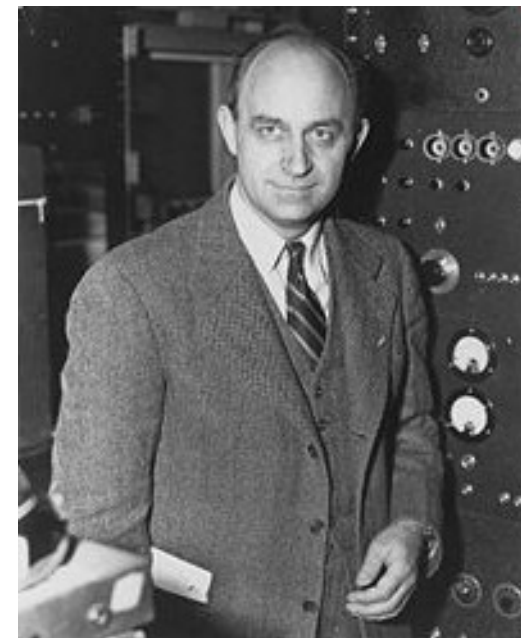


Рис. 1. Графитовое зеркало. Угол скольжения 3'. Отраженный пучок смещен на 0,8 см



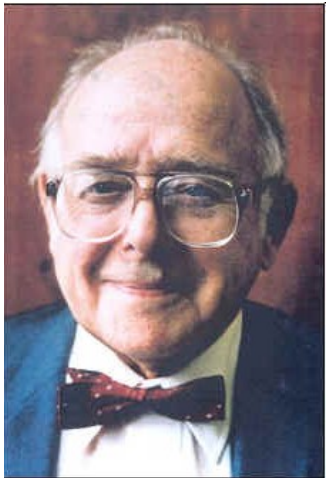
Enrico Fermi

Нейтронная оптика в 40-50гг

(Ранние эксперименты по дифракции нейтронов)

Laue Photography of Neutron Diffraction

E. O. WOLLAN, C. G. SHULL, AND M. C. MARNEY
Clinton National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
January 19, 1948



Clifford Shull,
Nobel Prize winner of 1994

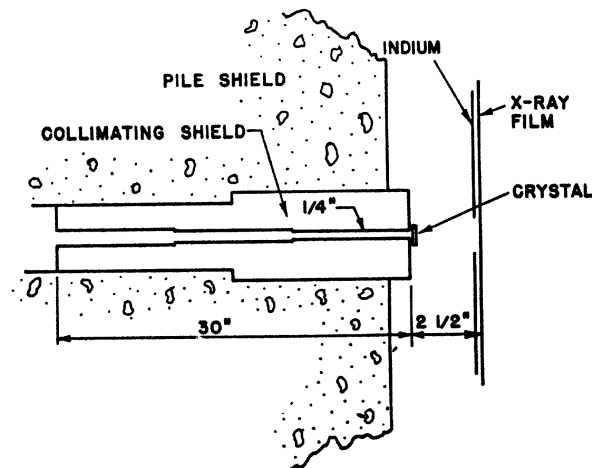


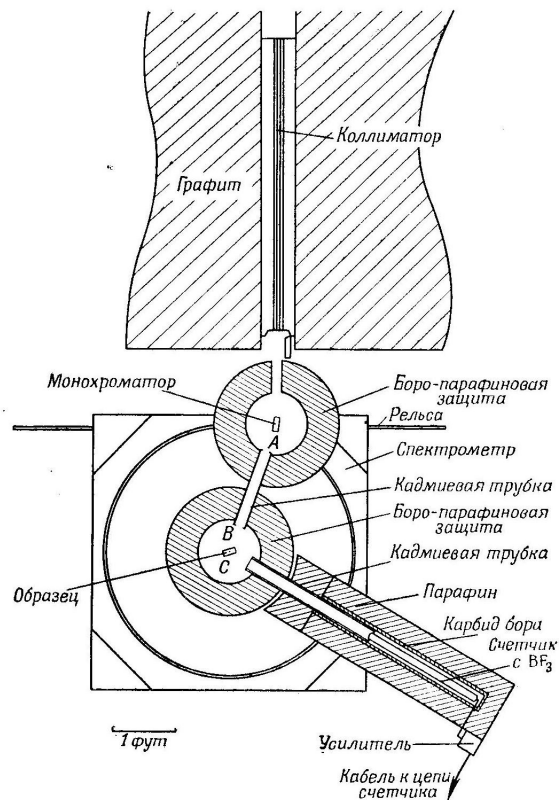
FIG. 2. Schematic diagram of Laue camera for obtaining neutron diffraction patterns.



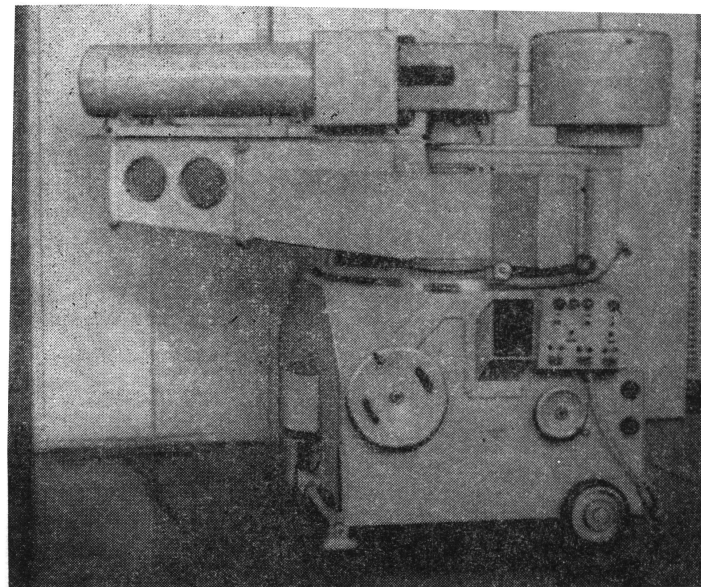
FIG. 1. Laue photograph showing neutron diffraction by NaCl.

Нейтронная оптика в 40-50гг

(Ранние эксперименты по дифракции нейтронов)



Фиг. 6. Схема устройства нейтронного спектрометра в Харуэлле.



Фиг. 5. Двойной нейтронный кристалл-спектрометр в Харуэлле

1950

Френелевская дифракция холодных нейтронов

R.Gähler, A.Klein, A.Zeilinger, 1981



Roland Gähler,



Tony Klein



Anton Zeilinger

$(\lambda = 2 \text{ nm})$

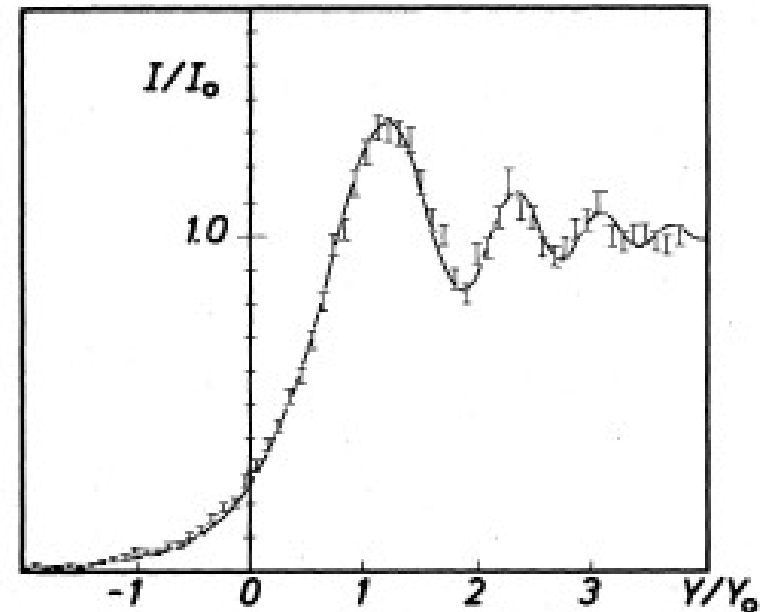
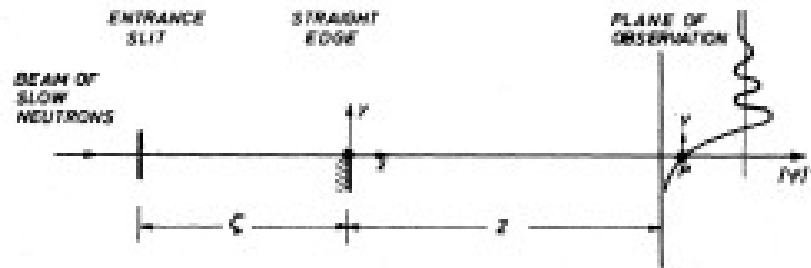


FIG. 3. Measured diffraction pattern of an absorbing straight-edge compared with the curve obtained from standard linear theory.



Призмы и линзы для нейтронов

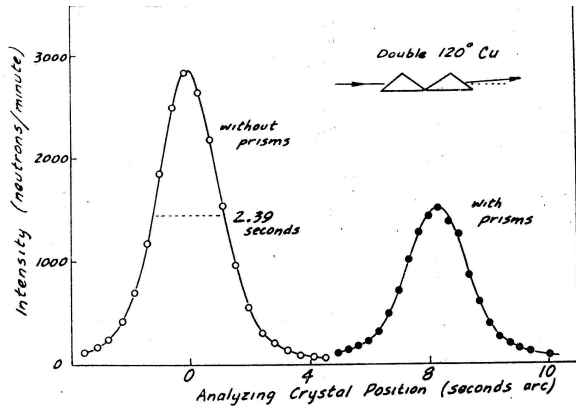
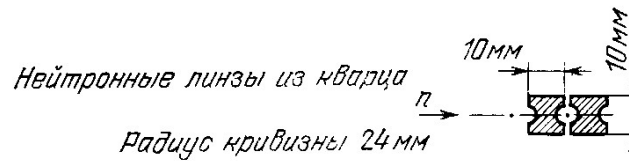
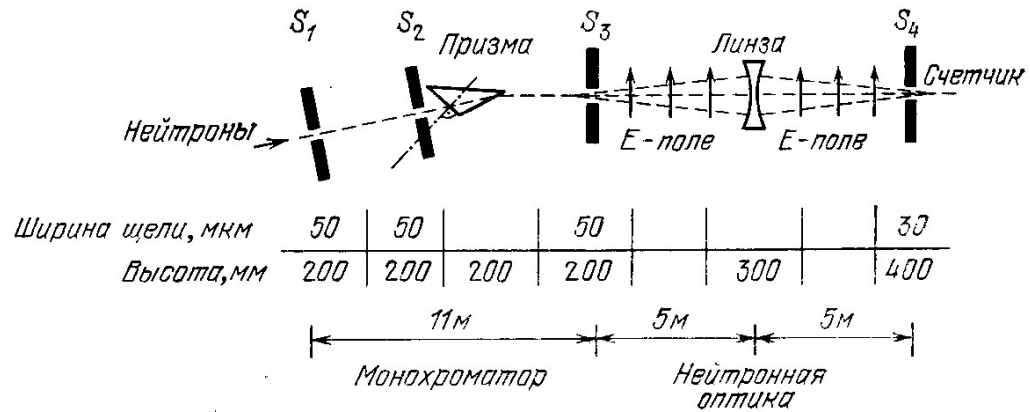


Fig. 6. Rocking curves of the double crystal spectrometer in the experiment with deflecting prisms.



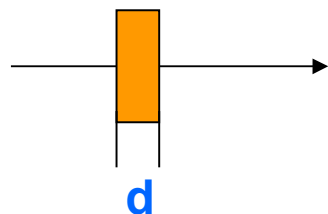
C.Shull. Лекция на нейтронной школе в Алуште (1969)

J.Felber, R.Gähler, J.Kalus, W.Mampe (1980)

Линза вогнутая! ($n < 1$)

$$q = (-0.4 \pm 1.1) \cdot 10^{-21} \text{ e (1988г.)}$$

Скорость нейтрона в веществе



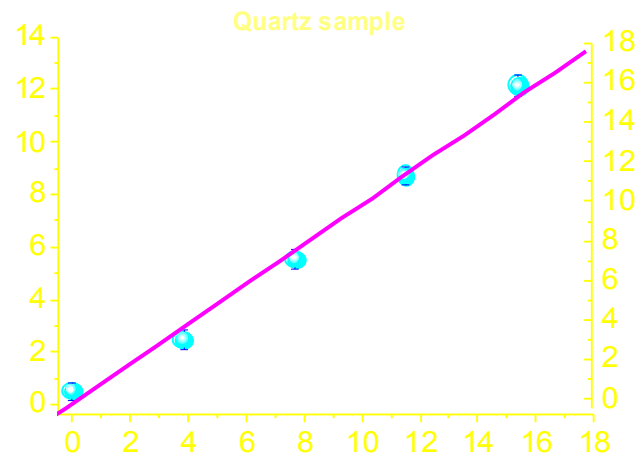
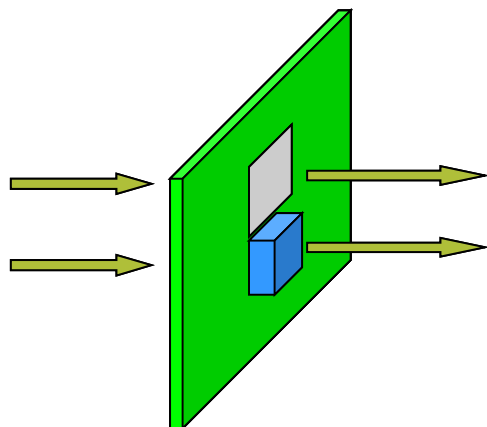
В веществе

$$k = nk_0 \quad k = \frac{mv}{\hbar}$$

$$v = nv_0 \quad (n < 1)$$

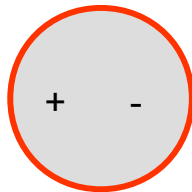
$$\Delta t = \frac{d}{nv} - \frac{d}{v_0} = \frac{d}{v_0} \left(\frac{1}{n} - 1 \right)$$

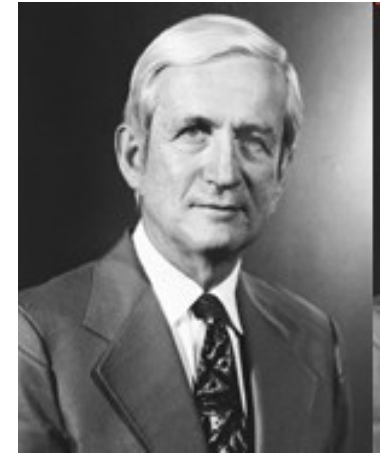
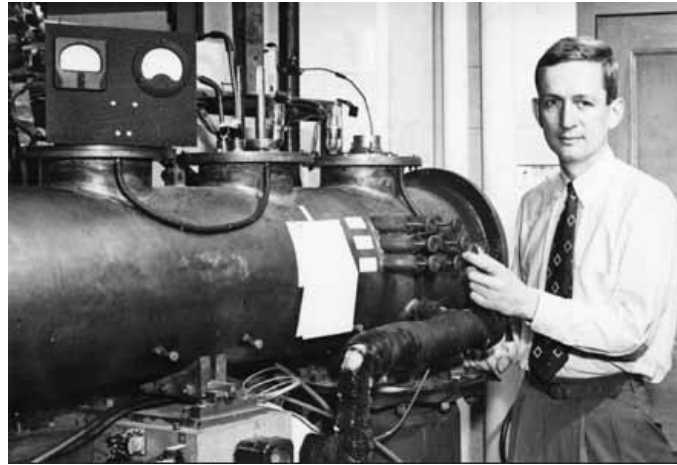
Временная задержка



A.Frank et al, 2001

Поиски ЭДМ нейтрона в пучковых экспериментах





Edward Mills Purcell (N.P.W. 1952)

Norman Foster Ramsey (N.P.W. 1989)

On the Possibility of Electric Dipole Moments for Elementary Particles and Nuclei

E. M. PURCELL AND N. F. RAMSEY

Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

April 27, 1950

IT is generally assumed on the basis of some suggestive theoretical symmetry arguments¹ that nuclei and elementary particles can have no electric dipole moments. It is the purpose of this note to point out that although these theoretical arguments are valid when applied to molecular and atomic moments whose electromagnetic origin is well understood, their extension to nuclei and elementary particles rests on assumptions not yet tested.

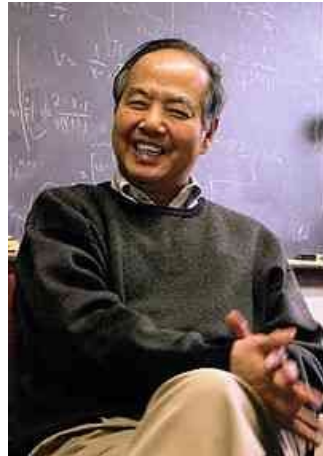
Результаты первого эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона, поставленного в 1950г.
(J.H.Smith, E.M.Purcell, N.F.Ramsey)

были опубликованы только после открытия несохранения четности



Янг Чжэньнин

Нобелевская премия 1957г

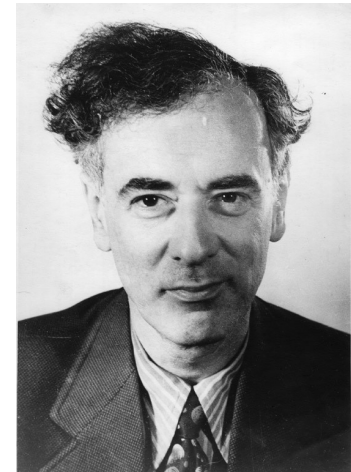


Ли Чжэндао



Ву Цзяньсюн

Нобелевская премия 1962г



Л.Д.Ландау

Проблема приобрела еще большую актуальность после работы
Л.Д.Ландау, в которой было введено понятие CP-четности

*Л.Д.Ландау. О законах сохранения при слабых
взаимодействиях ЖЭТФ, 32, 405, 1957*

Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron

J. H. SMITH,* E. M. PURCELL, AND N. F. RAMSEY

Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, and Harvard University, Cambridge, Massachusetts

(Received May 17, 1957)

An experimental measurement of the electric dipole moment of the neutron by a neutron-beam magnetic resonance method is described. The result of the experiment is that the electric dipole moment of the neutron equals the charge of the electron multiplied by a distance $D = (-0.1 \pm 2.4) \times 10^{-20}$ cm. Consequently, if an electric dipole moment of the neutron exists and is associated with the spin angular momentum, its magnitude almost certainly corresponds to a value of D less than 5×10^{-20} cm.

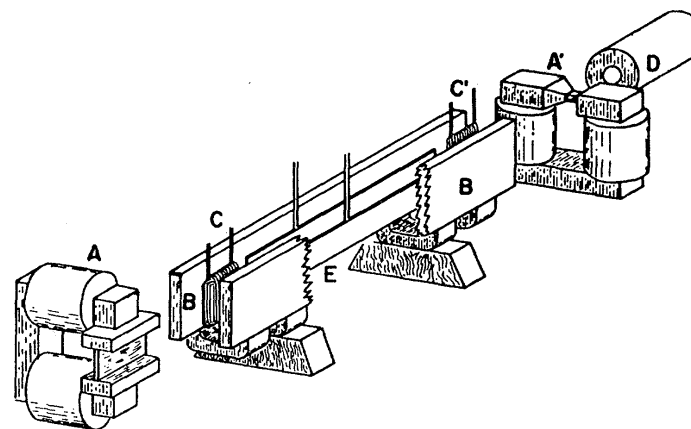
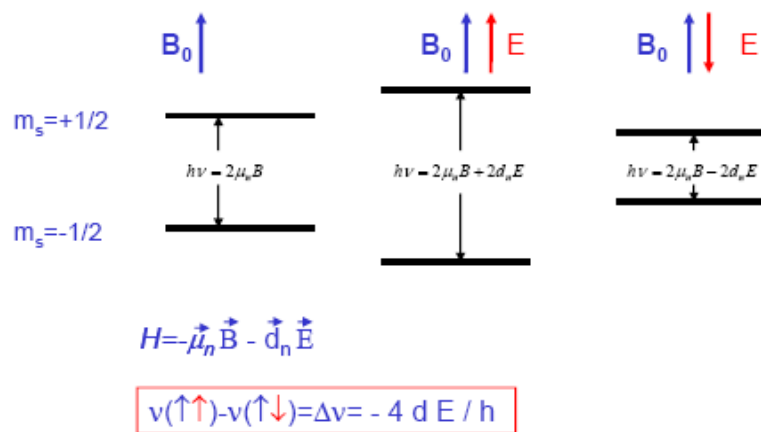


FIG. 1. Schematic diagram of the apparatus. *A*, the magnetized

Открытие несохранения T – четности в K^0 –распаде (1964г)

VOLUME 13, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

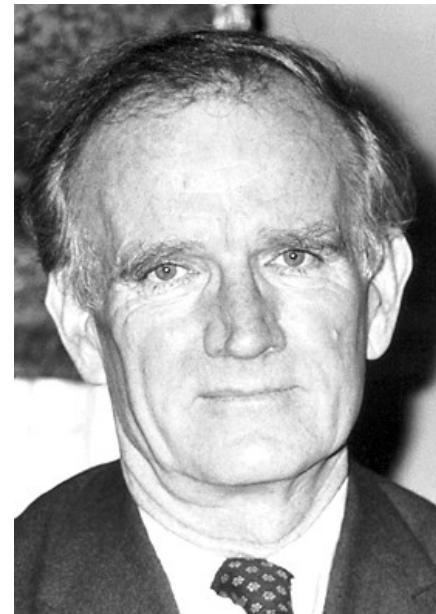
27 JULY 1964

EVIDENCE FOR THE 2π DECAY OF THE K_2^0 MESON*†

J. H. Christenson, J. W. Cronin,[‡] V. L. Fitch,[‡] and R. Turley[§]
Princeton University, Princeton, New Jersey
(Received 10 July 1964)



James Watson Cronin



Val Logsdon Fitch

Нобелевская премия 1980г

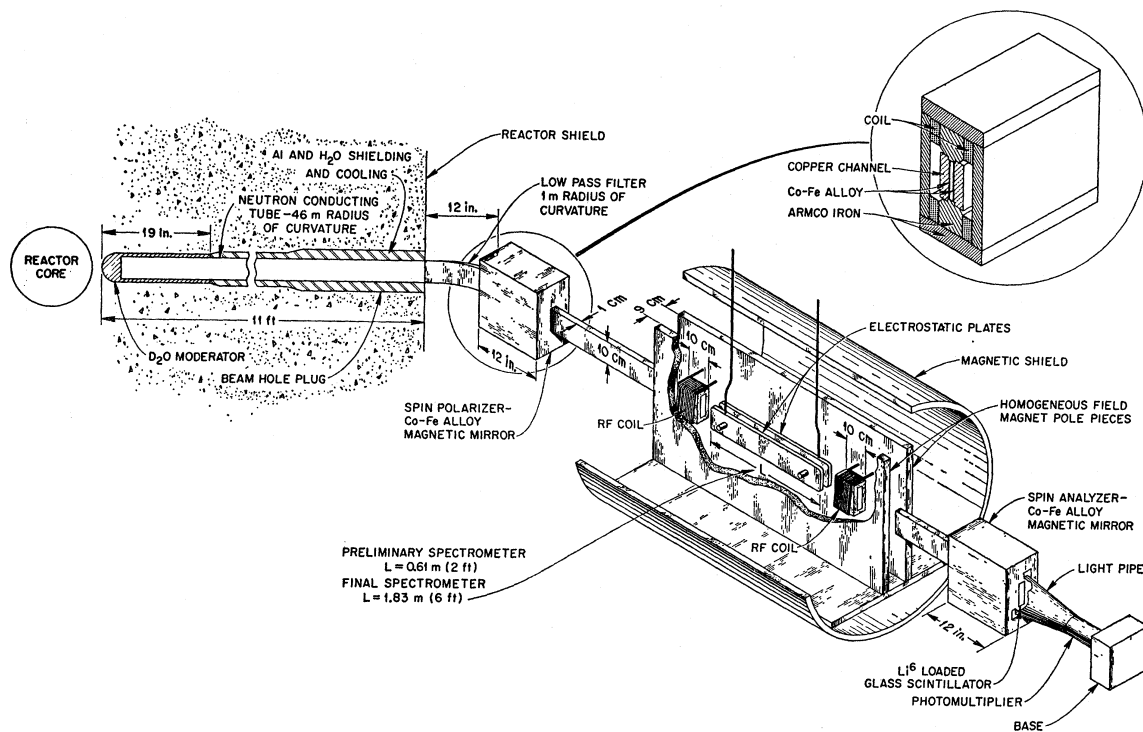


FIG. 2. Sketch of the experimental arrangement of the apparatus.

$$1968\text{г. } d_n < 5 \times 10^{-23} \text{ ехсм}$$

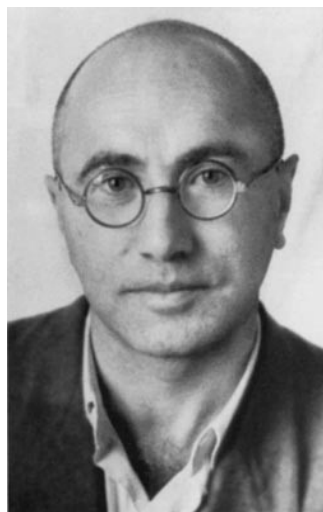
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДИПОЛЬНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ *)

Ф. Л. Шапиро

Другой возможный путь состоит в использовании предложения Я. Б. Зельдовича³¹ о хранении ультрахолодных нейтронов в замкнутой полости (рис. 7). Нейтроны со скоростью меньше граничной,

$$v_{\text{гр}} = \frac{2\hbar}{m} \sqrt{\pi N b_{\text{ког}}}, \quad (10)$$

испытывают полное отражение от поверхности вещества при любых углах падения (m — масса нейтрона, N — число ядер в 1 см^3 , $b_{\text{ког}}$ — когерентная длина рассеяния). Для Ni^{58} $v_{\text{гр}} \sim 10 \text{ м/сек}$; так как в максвеллов-ный



Я.Б.Зельдович в 1960г

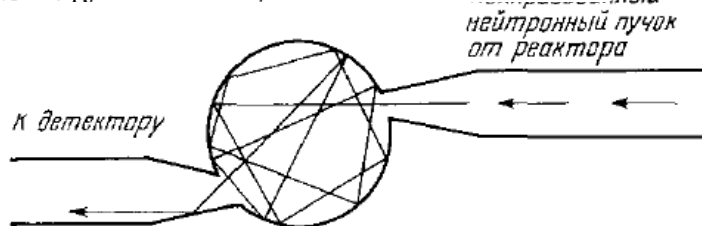


Рис. 7.

ХРАНЕНИЕ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Я. Б. Зельдович

Идея удержания медленных нейтронов высказывалась неоднократно, однако соответствующие опыты до сих пор не производились и в литературе нет даже грубых оценок, относящихся к этому вопросу.

Известно, что медленные нейтроны испытывают полное внутреннее отражение при скользющем падении на поверхность большинства веществ. При достаточно малой скорости нейтроны не смогут проникнуть в такое вещество даже при нормальном падении. Так, для углерода с плотностью



Ф.Л. Шапиро

Эра УХН

Свойства УХН

**Полное отражение при всех углах падения
и возможность хранения в замкнутых сосудах**

$$\lambda \approx (40 \text{ ÷ } 100) \text{ nm} \quad v \approx (3 \text{ ÷ } 7) \text{ m/sec}$$

$$E \approx (0.2 \text{ ÷ } 2) \text{ ГэВ} \quad \text{LHC} \longrightarrow 7 \text{ ТэВ}$$

**Отношение этих величин того же порядка,
что и
отношение расстояния **Земля-Солнце** и размера **атома****



Ф.Л. Шапиро, В.И.Луциков, А.В.Стрелков, Ю.Н. Покотилловский



Albert Steyerl

Письма в ЖЭТФ
Т. 9 1969 Вып. 1

Volume 29B, number 1

PHYSICS LETTERS

31 March 1969

30
НАБЛЮДЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
В.И. Луциков, Ю.Н. Покотилловский, А.В. Стрелков,
Ф.Л. Шапиро

MEASUREMENTS OF TOTAL CROSS SECTIONS FOR VERY SLOW
NEUTRONS WITH VELOCITIES FROM 100 m/sec TO 5 m/sec

A. STEYERL
Physik-Department, Technische Hochschule München, Munich, Germany
Received 24 February 1969

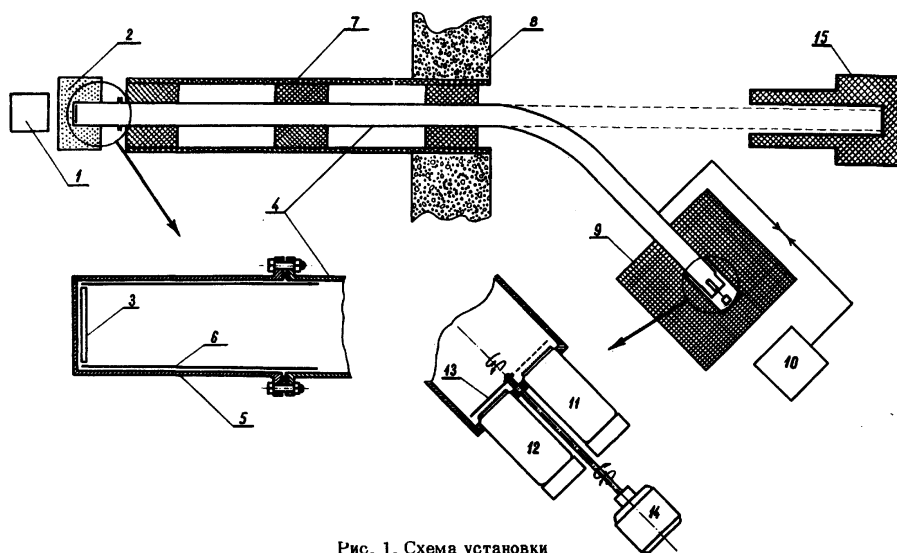


Рис. 1. Схема установки

Very cold neutrons from 60 μ eV to 0.1 μ eV were obtained through a vertical total-reflecting neutron guide tube. Total cross sections measured by time-of-flight technique for gold and aluminium were found to obey the $1/v$ law.

Palmgren [1,2] was the first to perform total cross-section measurements for neutrons as slow as 42 m/s in a "Doppler chopper" where the target moved in the same direction as the neu-

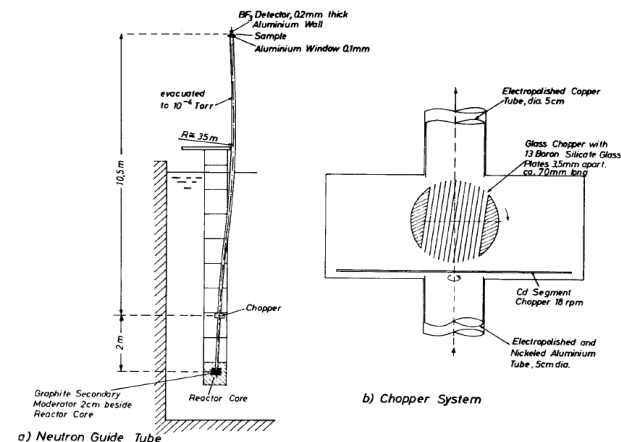


Fig. 1. Vertical beam tube for very slow neutrons.

Два типа экспериментов с УХН

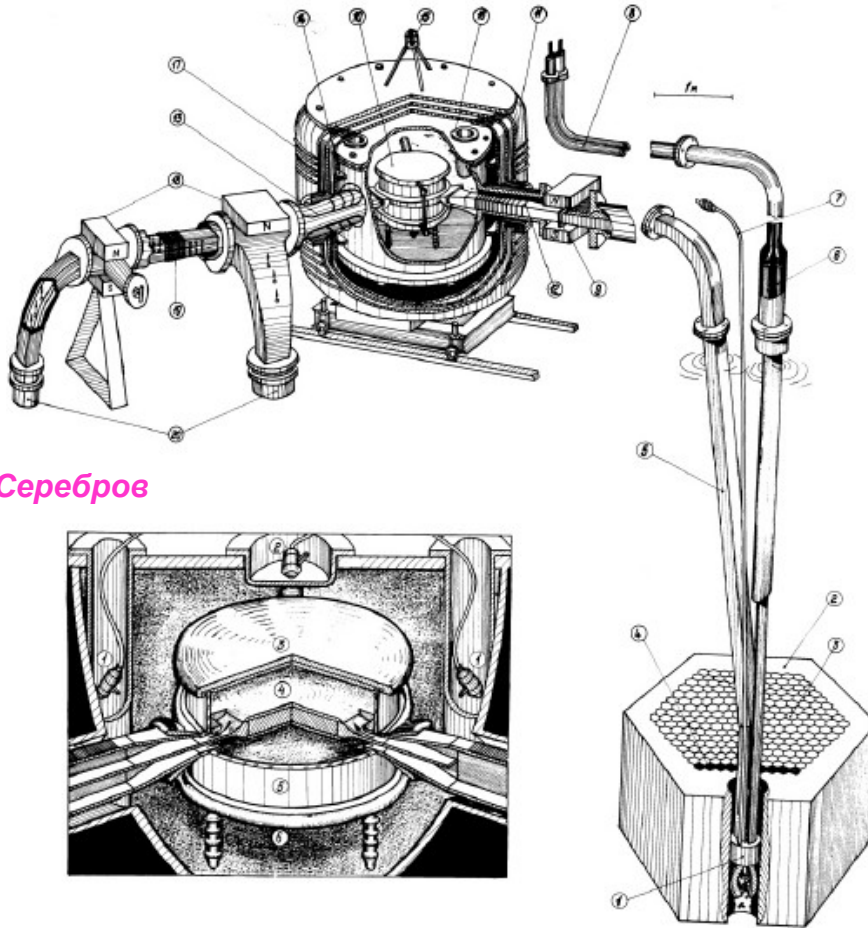
I. Эксперименты с хранением УХН в ловушках.

1. Поиск EDM нейтрона
2. Измерение времени жизни нейтрона.

II. Эксперименты, для которых существенна малая величина энергии нейтрона (большая длина волны)

1. Классическая и квантовая нейтронная оптика
2. Прецизионная спектрометрия УХН

Эксперимент ПИЯФ по поиску ЭДМ 1969 – 1996гг
(В.М. Лобашев с сотрудниками)



А.П. Серебров



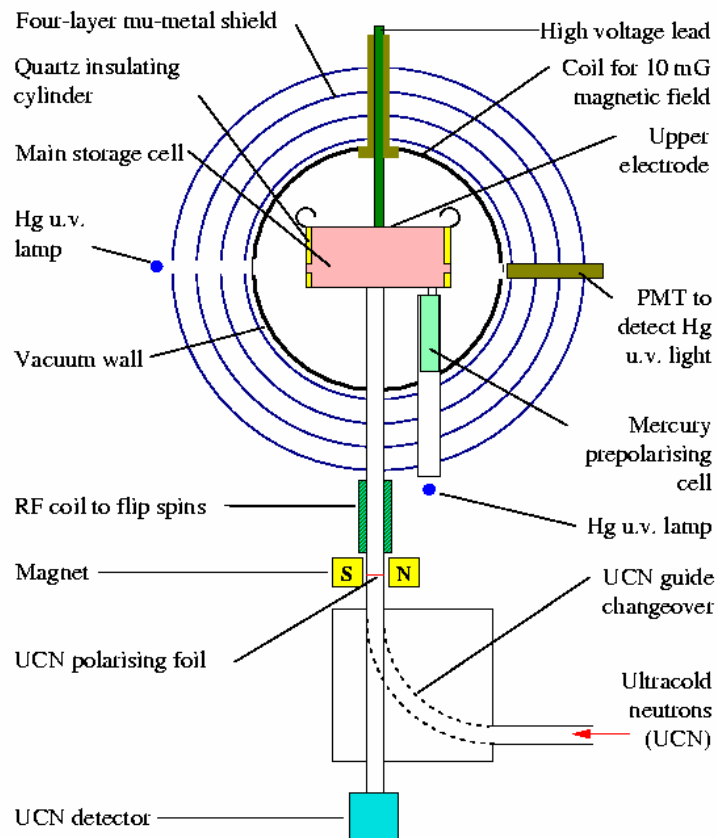
В.М. Лобашев

$$d_n = (+2.6 \pm 4.0 \pm 1.6) \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

$$d_n | < 9.7 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ (90\% C.L.)}$$

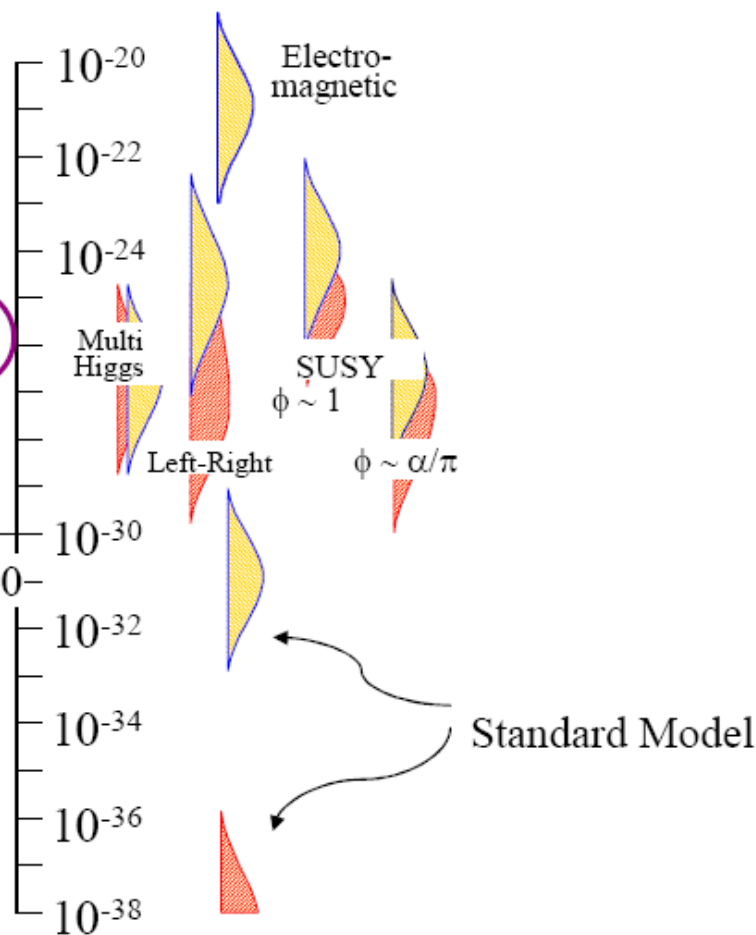
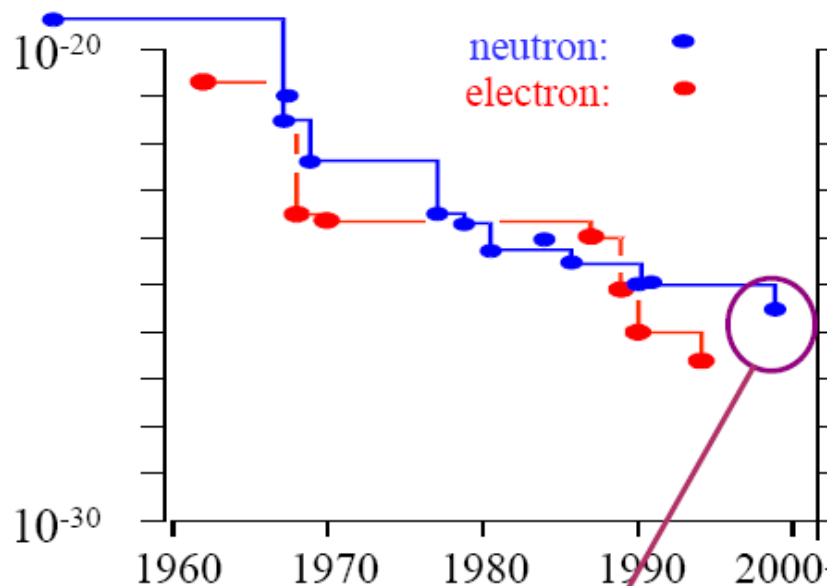
RAL –Sussex-ILL ЭДМ эксперимент 1984-1999

Neutron EDM Experimental Apparatus



EDM limits: the first 50 years

Experimental Limit on d_n ($e\cdot\text{cm}$)



Factor ~ 10 per 8 years

Cited ~ 280 times already!

$[d_n < 6.3 \times 10^{-26} e\cdot\text{cm} (90\% \text{ CL}); \text{PRL } 82, 904 (1999)]$

"It is fair to say that the neutron EDM has ruled out more theories (put forward to explain K_0 decay) than any experiment in the history of physics" R. Golub

RAL –Sussex-ILL CryoEDM experiment (in progress)

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 611 (2009) 129–132



Contents lists available at ScienceDirect
Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



CryoEDM: A cryogenic experiment to measure the neutron electric dipole moment

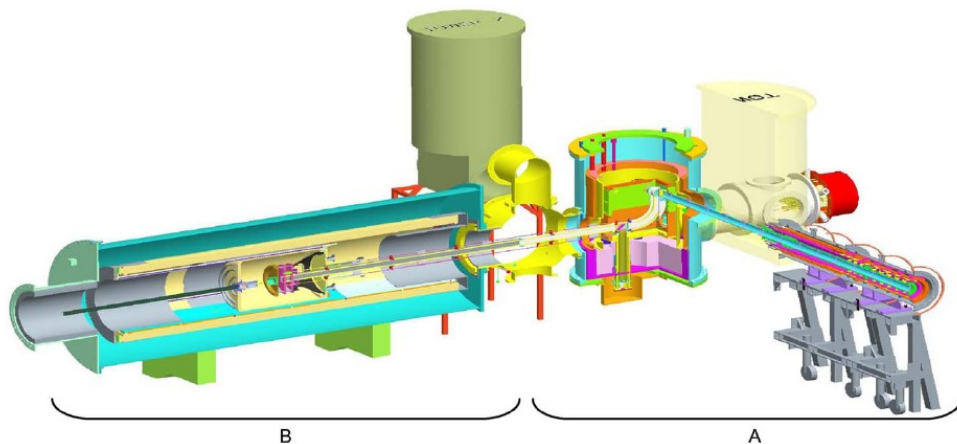
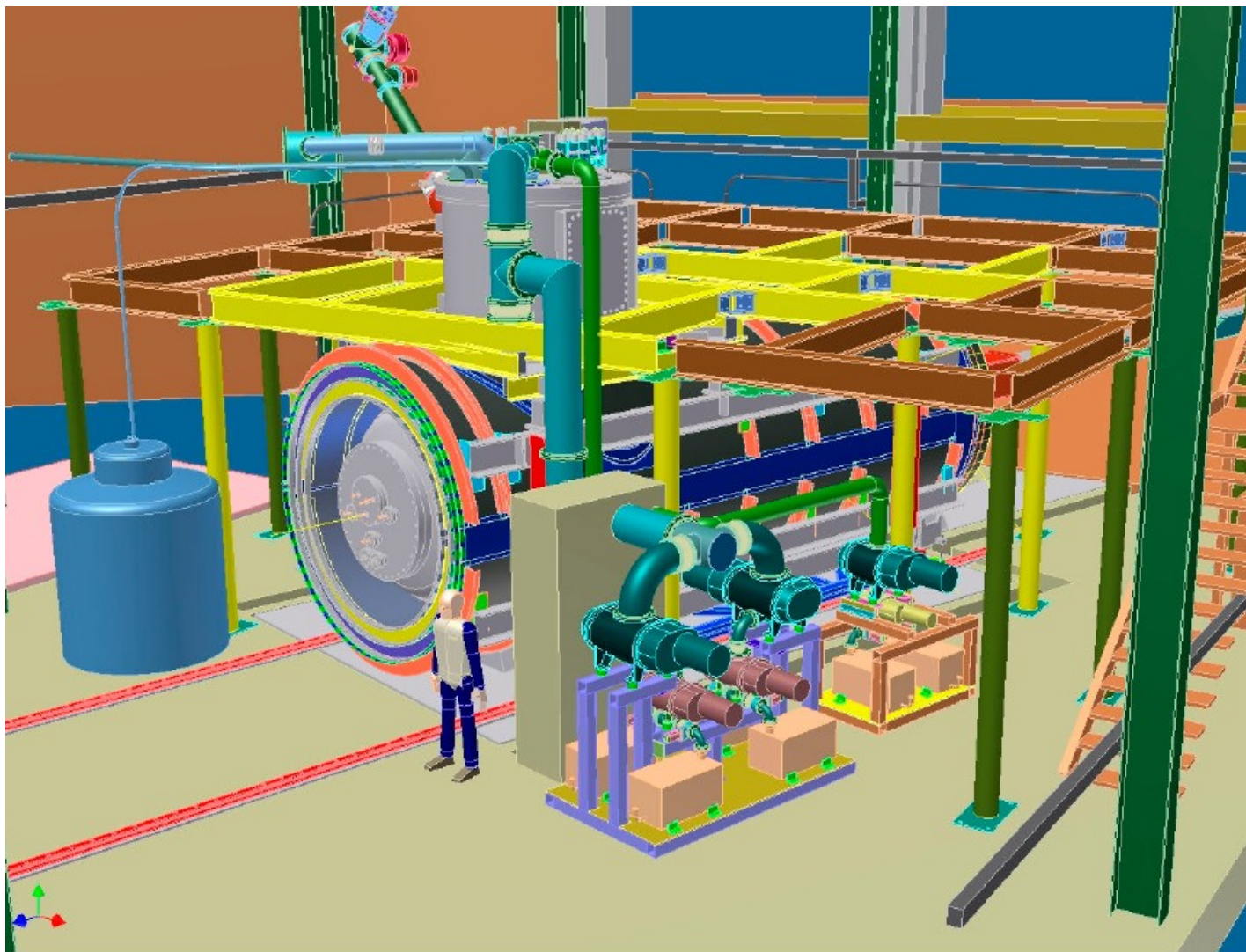


Fig. 1. The main components of the CryoEDM apparatus. Part A comprises the ^3He circulation cryostat with the super-thermal UCN source and the transfer cryostat with the detector chamber. Part B contains the horizontal shields and storage cells.



Fig. 2. A picture of the horizontal shields connected to the UCN source.

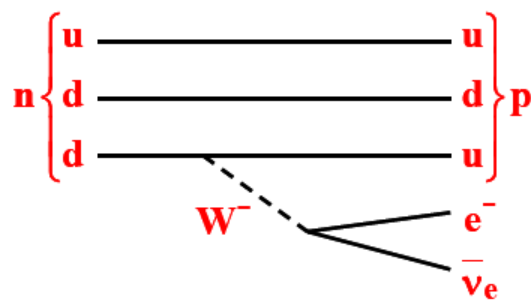
SNS project (In progress in Oak Ridge)



11 марта 2011г

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Францб

Распад нейтрона



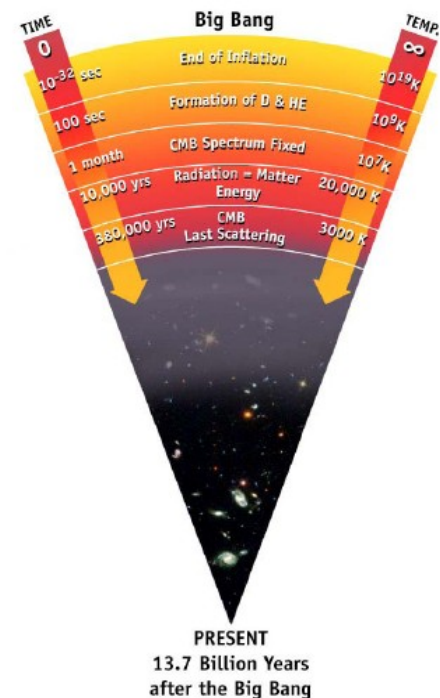
$$|V_{ud}|^2 = \frac{4908.7 \pm 1.9 \text{ s}}{\tau_n (1 + 3\lambda^2)}$$

CKM mixing matrix:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$G_V = G_F \cdot V_{ud}$$

$$\lambda = \frac{G_A}{G_V}$$



“Эксперимент «Ковш»

Письма в ЖЭТФ, том 52, вып. 7, стр. 984 - 989

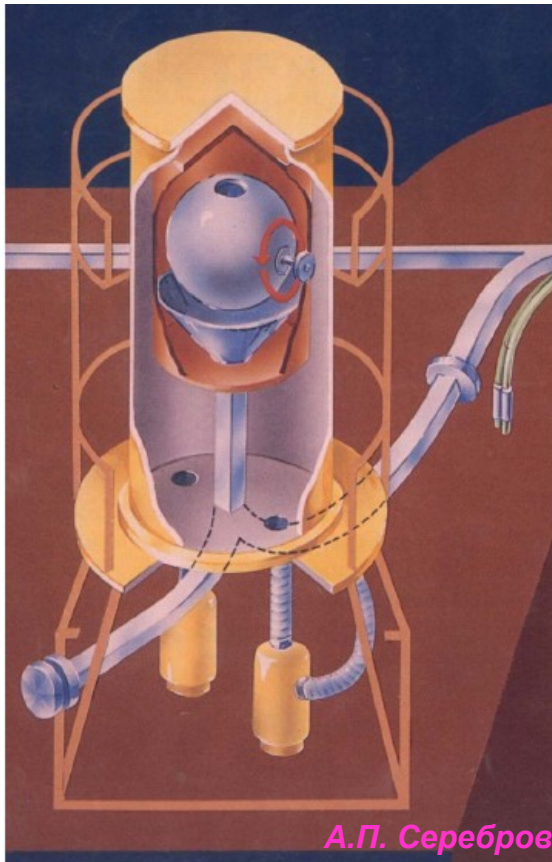
10 октября 1990 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА С ГРАВИТАЦИОННОЙ ЛОВУШКОЙ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

*В.П.Алфименков¹⁾, В.Е.Варламов, А.В.Васильев, В.П.Гудков,
В.И.Луциков¹⁾, В.В.Несвижевский, А.П.Серебров, А.В.Стрелков¹⁾,
С.О.Сужбаев, Р.Р.Тальдаев, А.Г.Харитонов, В.Н.Швецов¹⁾*

1992 ОИЯИ – ПИЯФ $\tau_n = 888.4 \pm 3.3$ s

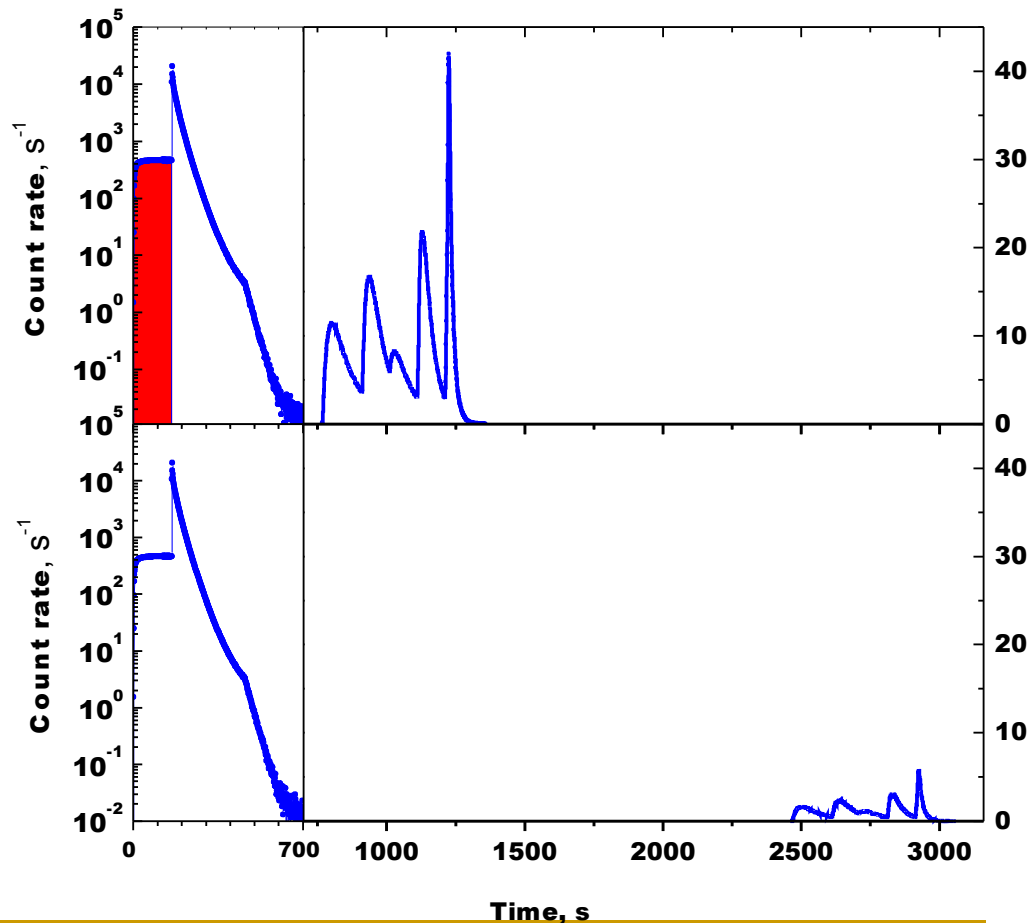
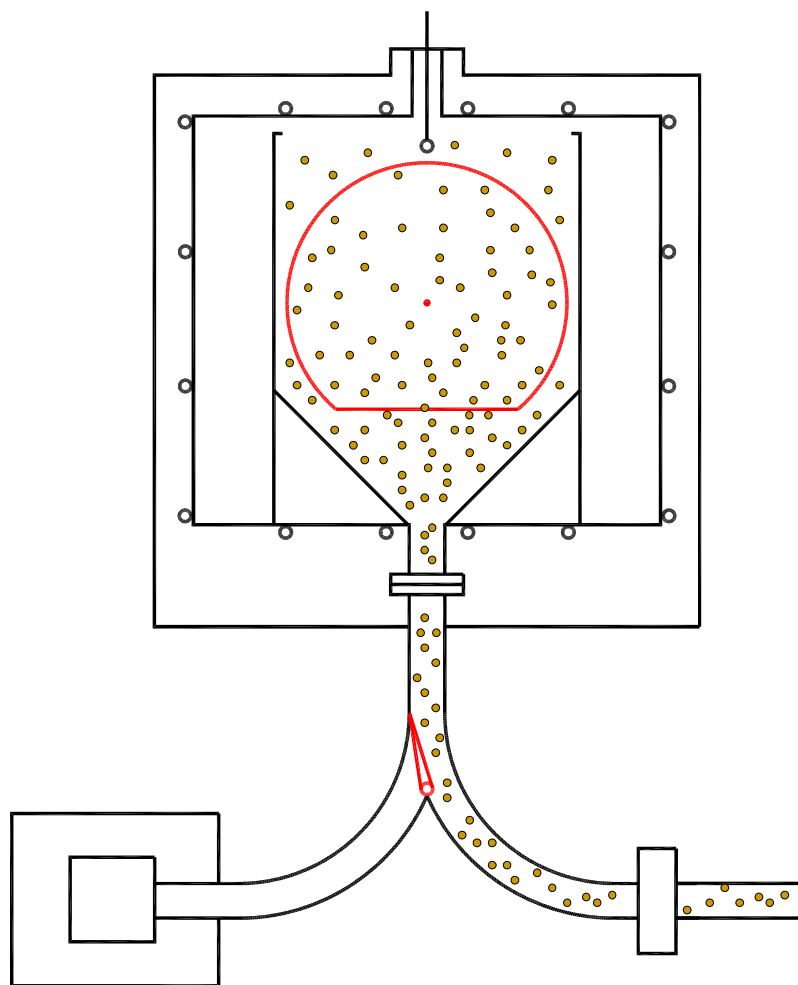
2004 ПИЯФ –ИЛЛ (А.Р.Serebrov et al.) $\tau_n = 878.5 \pm 0.8$ s



11 марта 2011г

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франц8

Filling of trap $\theta=180^\circ$

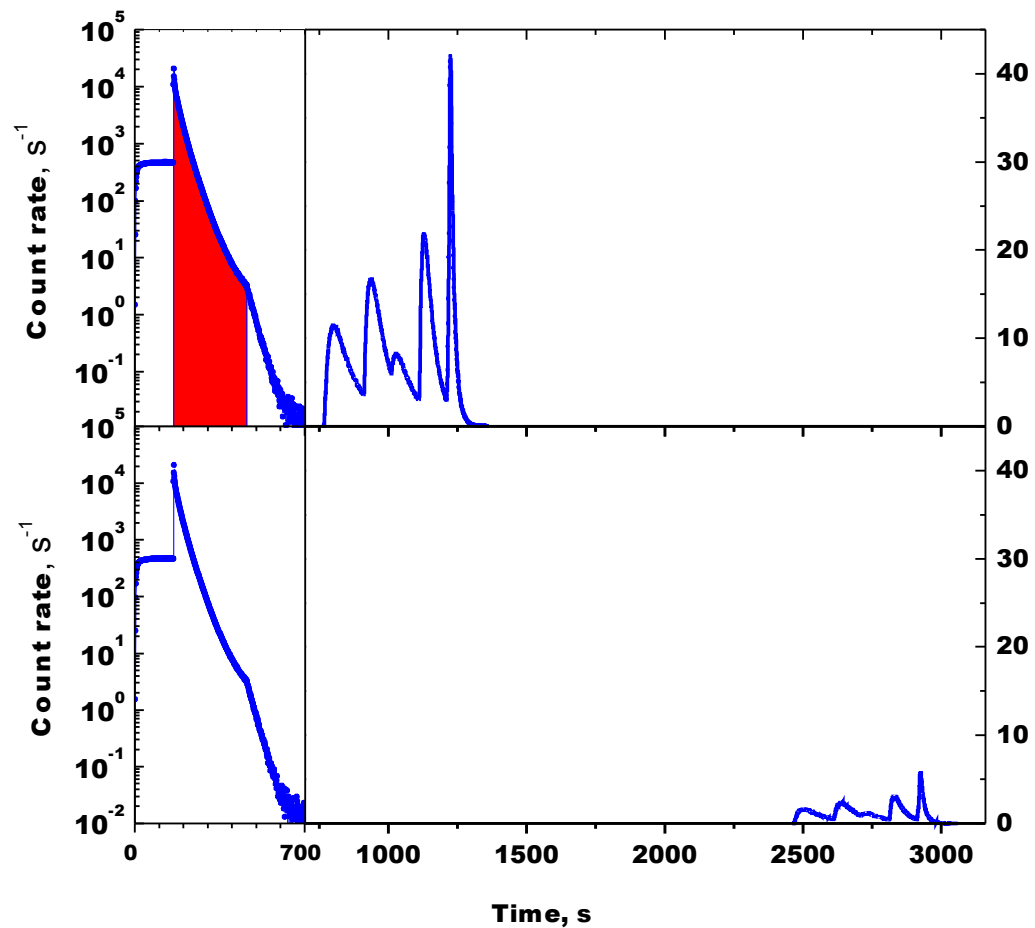
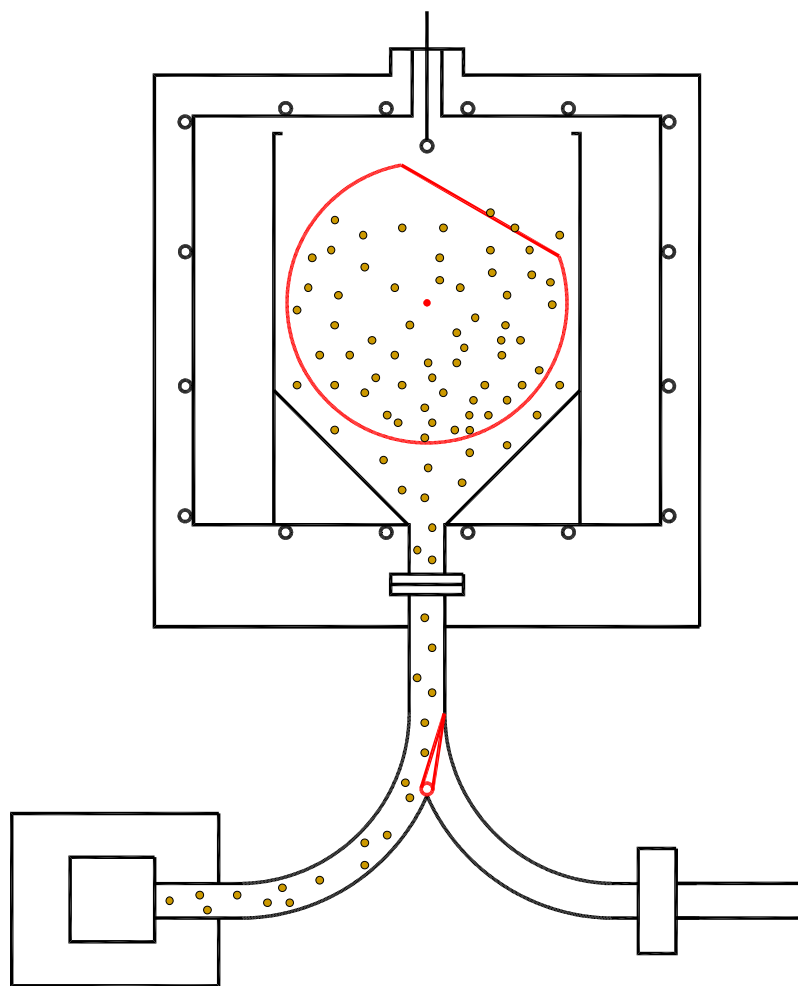


11 марта 2011г

А.П. Серебров

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франц99

Monitoring $\theta=30^\circ$

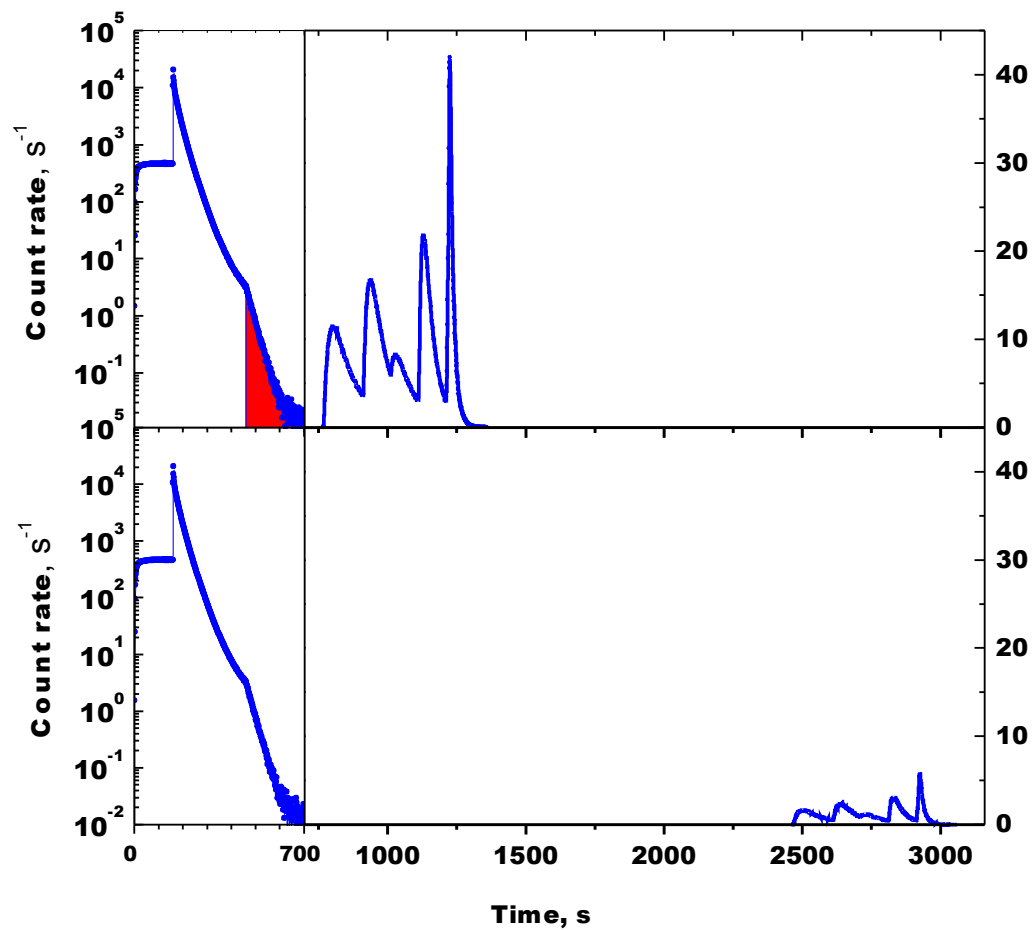
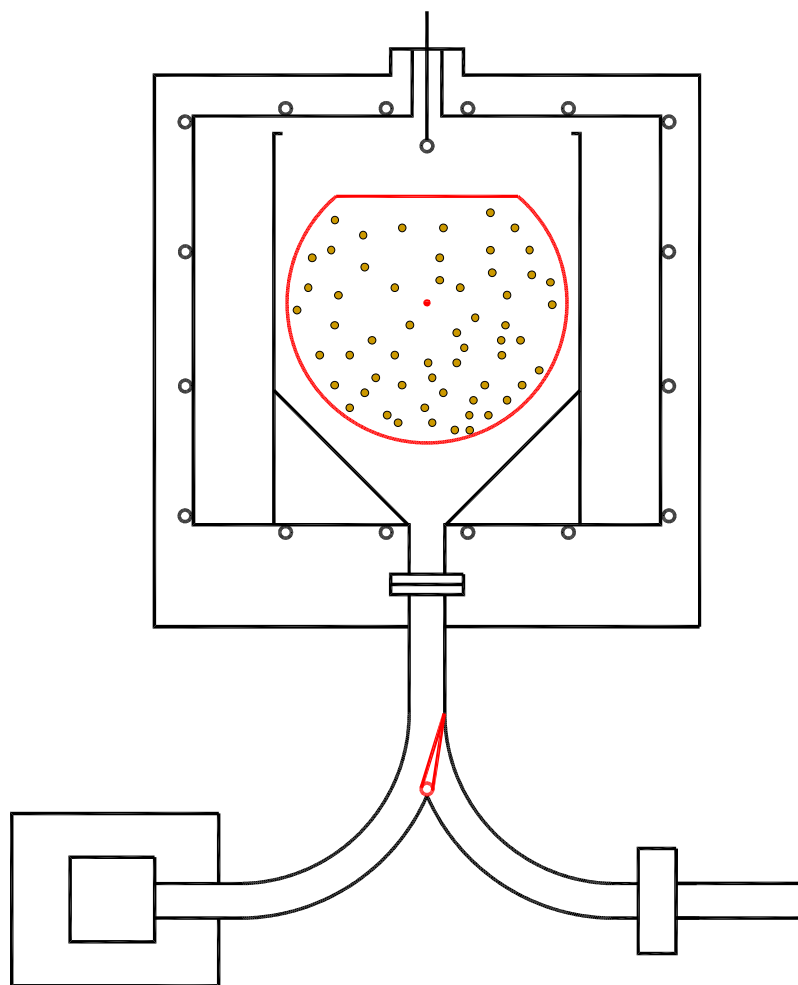


11 марта 2011г

А.П. Серебров

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франк

Storage $\theta=0^\circ$

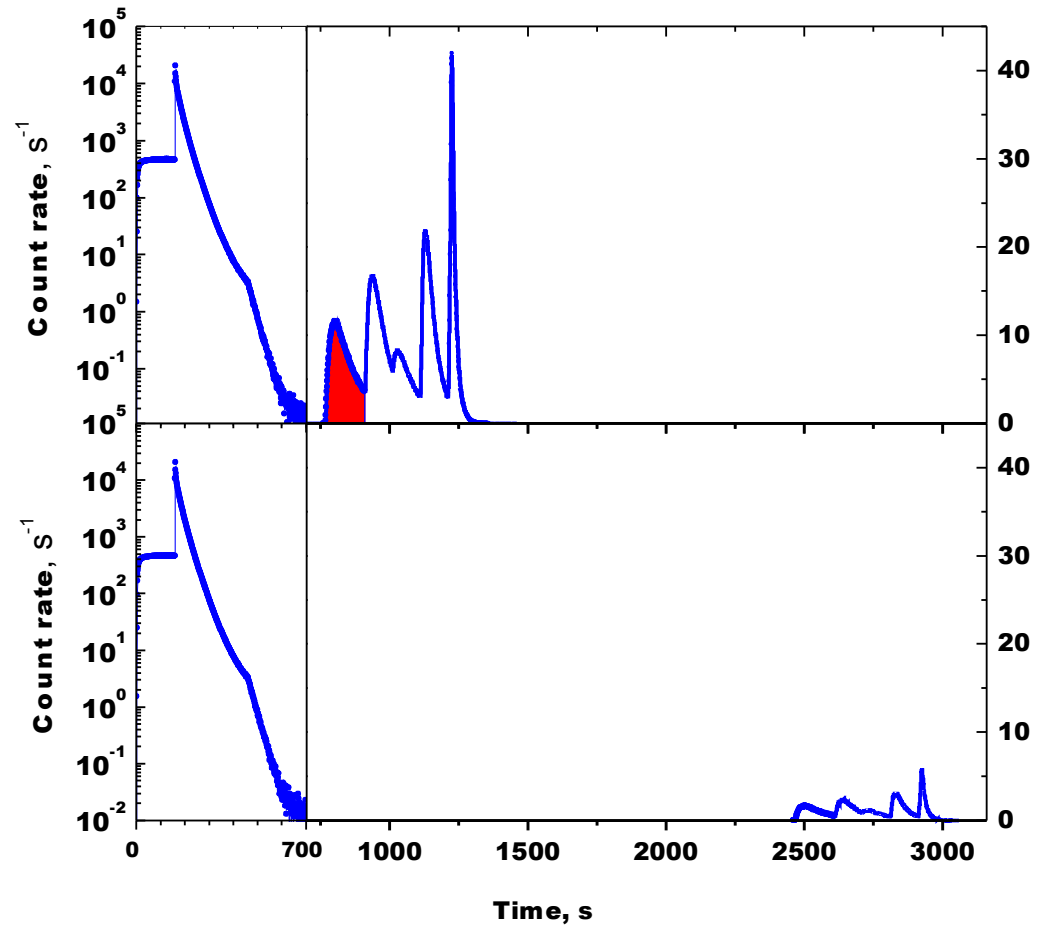
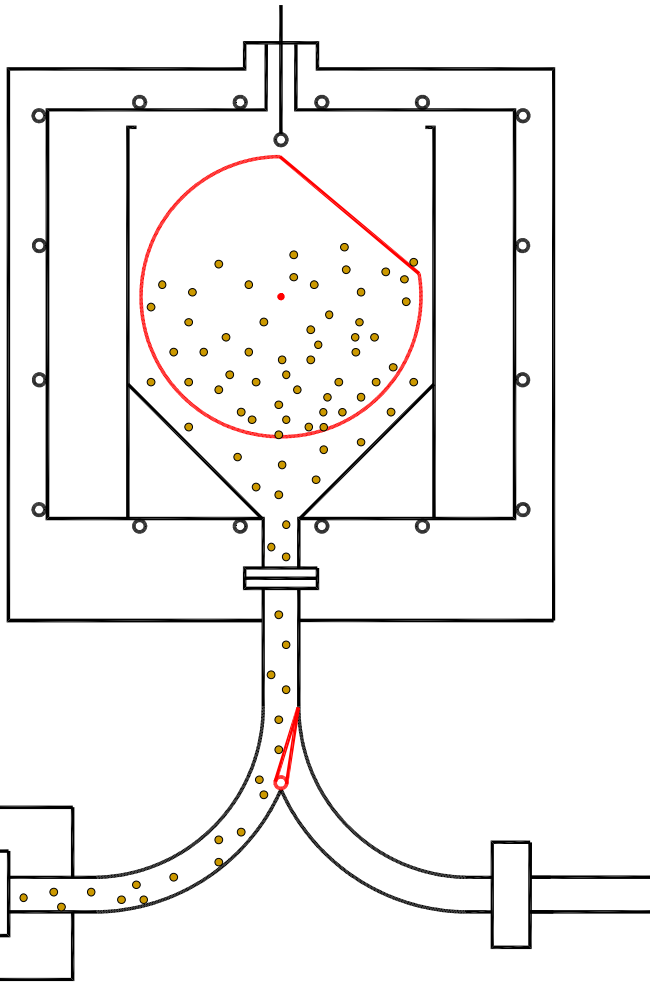


11 марта 2011г

А.П. Серебров

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франк1

Emptying $\theta=40^\circ$

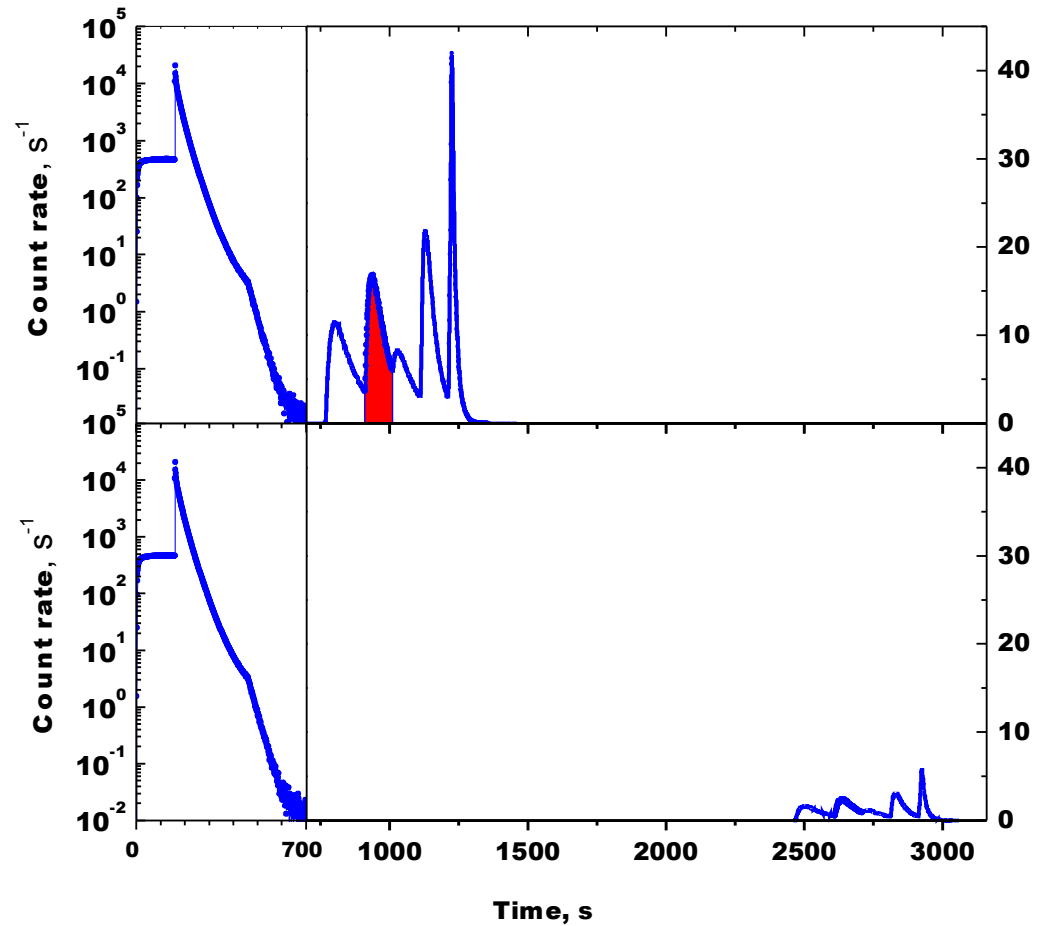
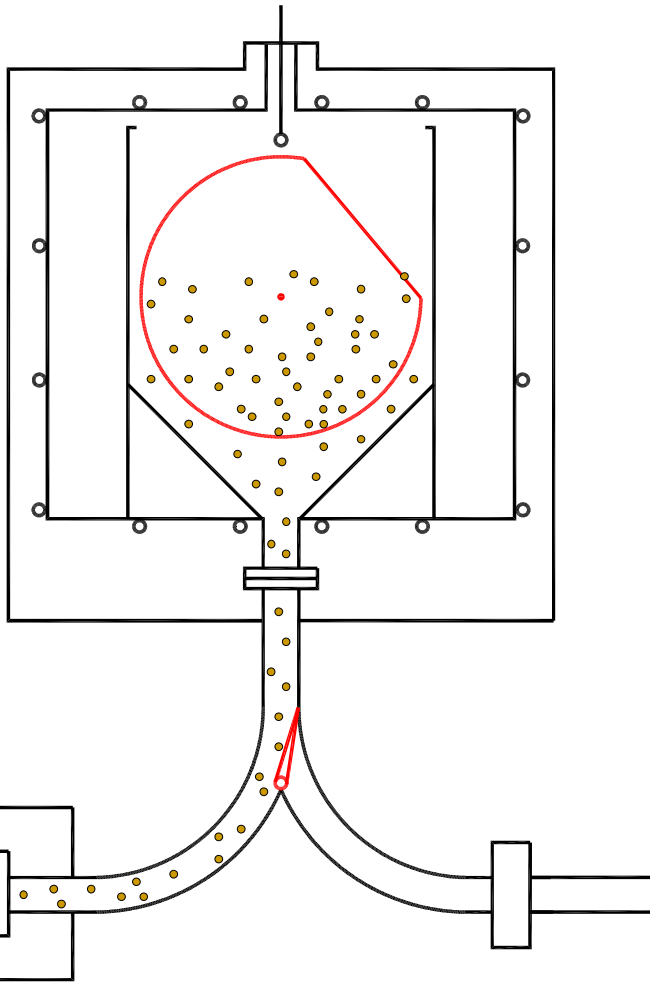


11 марта 2011г

А.П. Серебров

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франк 2

Emptying $\theta=50^\circ$

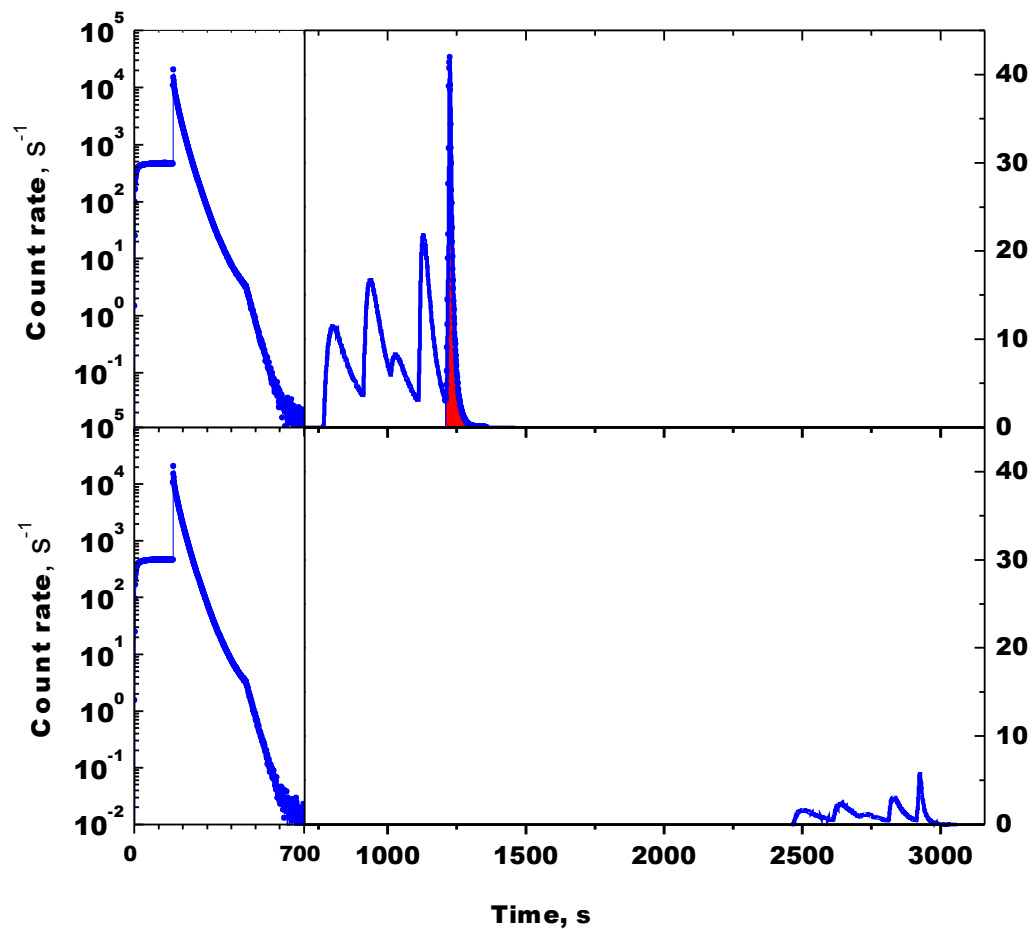
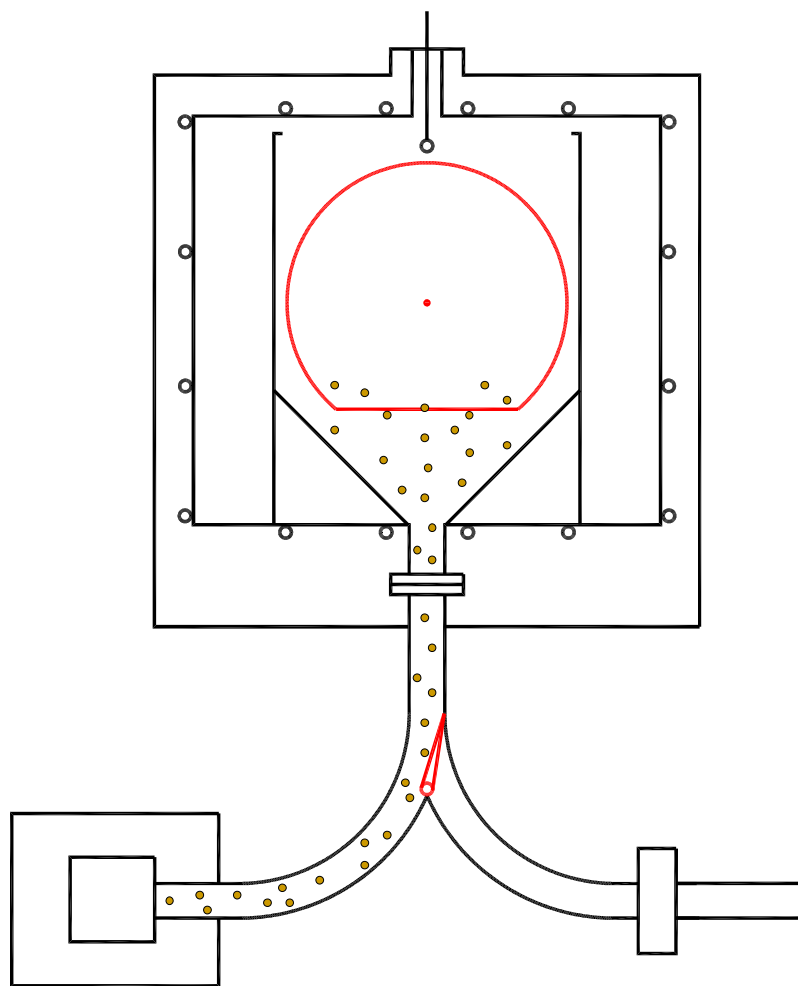


11 марта 2011г

А.П. Серебров

ЯДРО -100, Дубна. А.И. Франк

Emptying $\theta=180^\circ$



11 марта 2011г

А.П. Сергеев -100, Дубна. А.И. Франк 44

Neutron lifetime measured by monitored storing of ultra-cold neutrons

S. Arzumanov^a, L. Bondarenko^{a,*}, S. Chernyavsky^a, W. Drexel^b, A. Fomin^a,
P. Geltenbort^b, V. Morozov^a, Yu. Panin^a, J. Pendlebury^c, K. Schreckenbach^d

^aRussian Research Center "Kurchatov Institute", 123182 Moscow, Russia

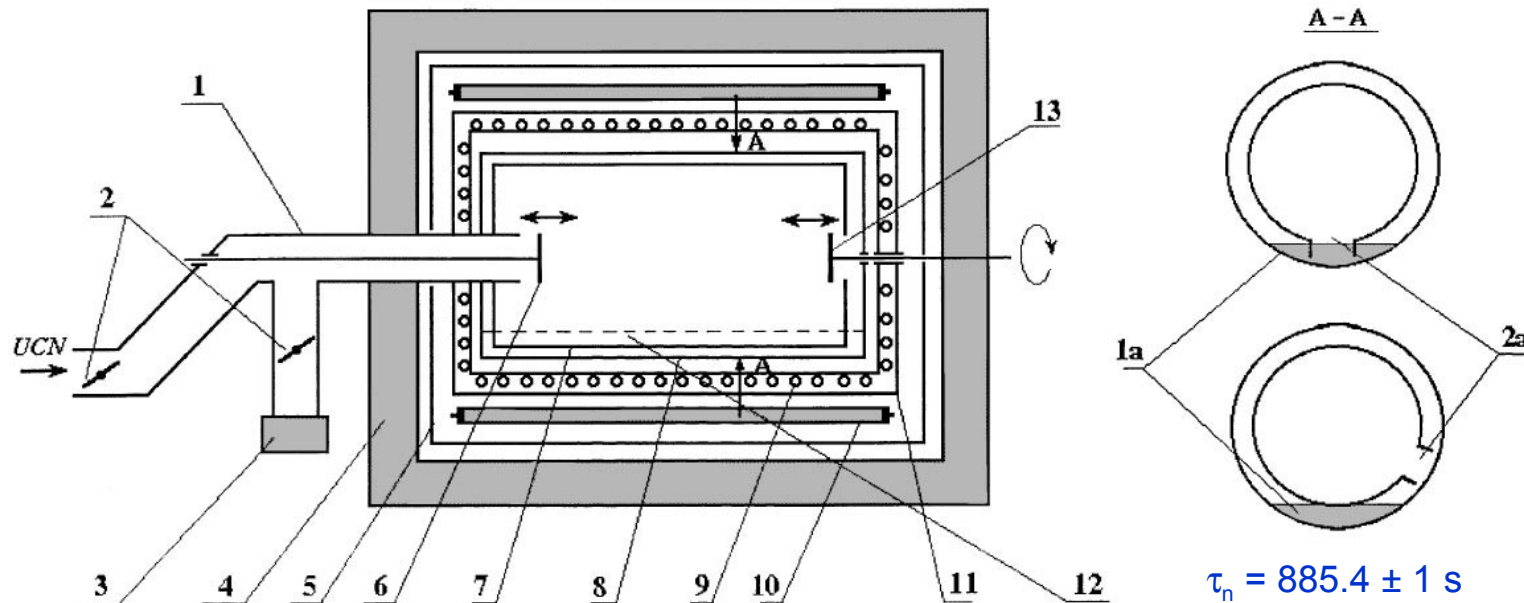
^bInstitute Laue-Langevin, BP 156, 38042 Grenoble Cedex 9, France

^cTechnical University, D-85747 Garching, Germany

^dUniversity of Sussex, Brighton BN1 9QJ, Sussex, UK



С.С.Арзуманов, Ю.Н.Панин, В.И. Морозов, Л.Н.Бондаренко
ИЛЛ, Гренобль, 2004г.



Хранение УХН в магнитных ловушках

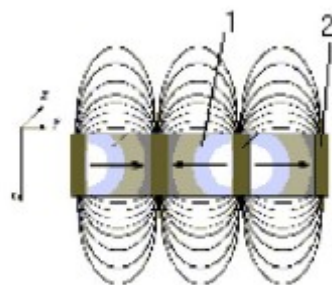


В.В.Владимирский

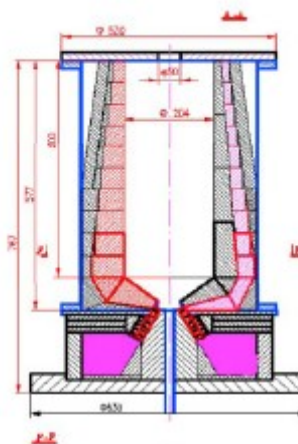
МАГНИТНЫЕ ЗЕРКАЛА, КАНАЛЫ И БУТЫЛКИ
ДЛЯ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

В. В. Владимирский

ЖЭТФ, 1960

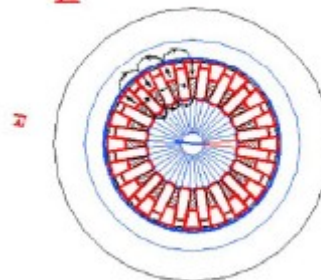
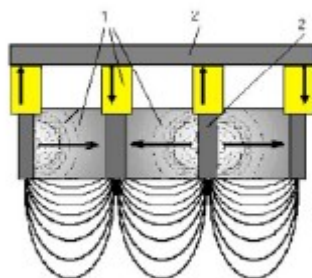


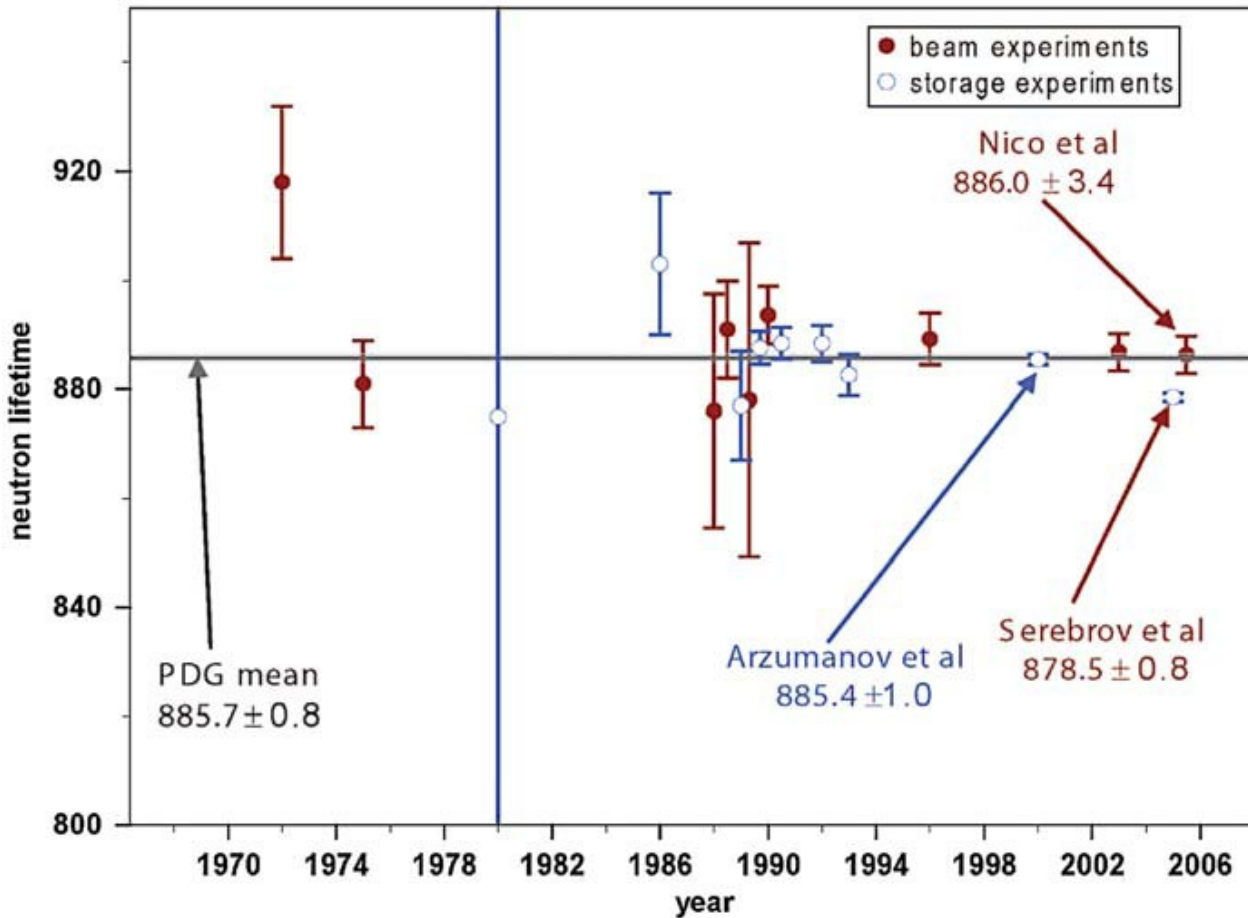
1 – permanent magnet
2 – magnetic field guide



В.Ф.Ежов

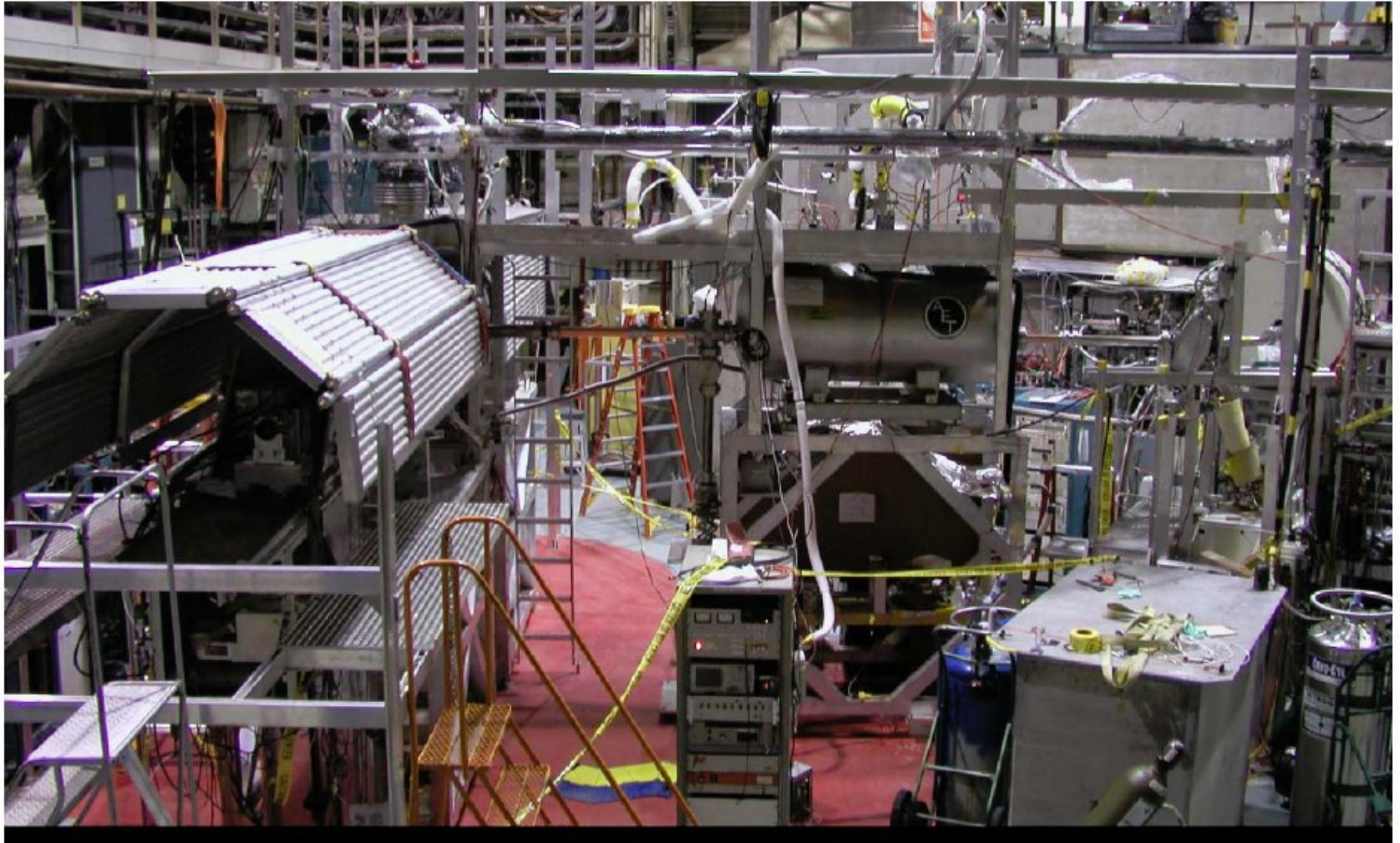
$\tau_n = 878.4 \pm 1.8$ с
В.Ф.Ежов и др.





А.П.Серебров

UCNA Apparatus in LANSCE Area B



УХН и Нейтронная оптика



И.М.Франк и Ф.Л.Шапиро

УХН и Нейтронный микроскоп

ПРИРОДА

Дорогой Саше
от отца
20/73 И.Ф.

СЕНТЯБРЬ

ОТТИСК ИЗ № 9
за 1972 год

Письма в ЖЭТФ, том 28, вып.8, стр. 559 – 560

20 октября 1978 г.

О ПРИМЕНИМОСТИ ПРИНЦИПА ФЕРМА К ОПТИКЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

И.М.Франк, А.И.Франк

Рассмотрен вопрос о применимости принципа Ферма к оптике ультрахолодных нейтронов (УХН), когда наличие гравитации существенно искривляет траектории нейтронов. Показано, что принцип Ферма вполне применим и в случае нейтронных волн

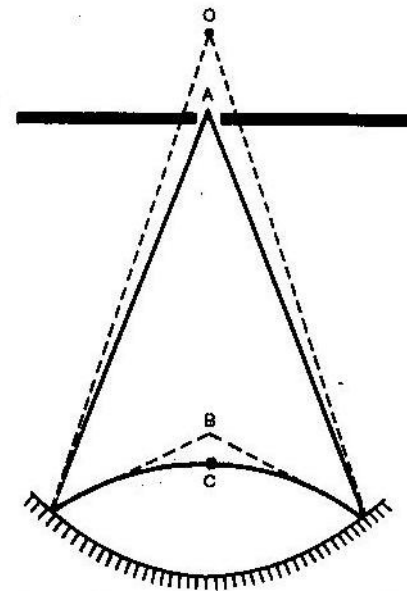
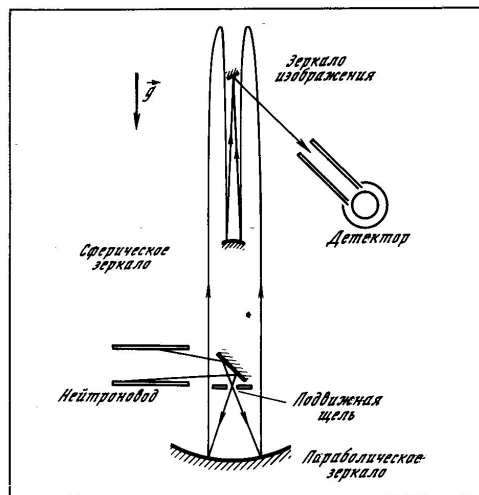


Рис. 7. Простейшая схема опыта для получения оптического изображения отражением ультрахолодных нейтронов от вогнутого зеркала. Через небольшое отверстие А ультрахолодные нейтроны падают на вогнутое зеркало. Но за счет силы тяжести их пути изгибаются так, как если бы они шли по прямой из О. По той же причине они соберутся не в оптическом фокусе В, а в ниже лежащей точке С.

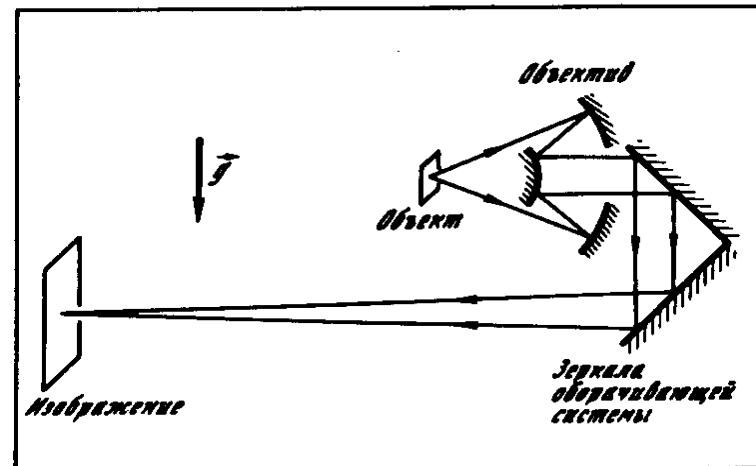
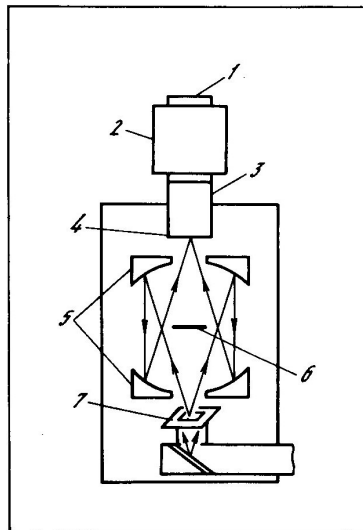
Neutron microscope with UCN and the problem of image formation

A.Frank et al, 1986- 90

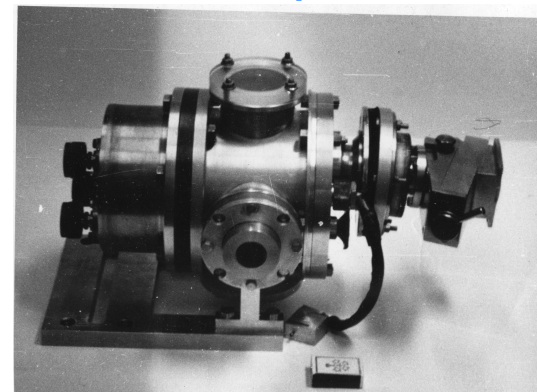
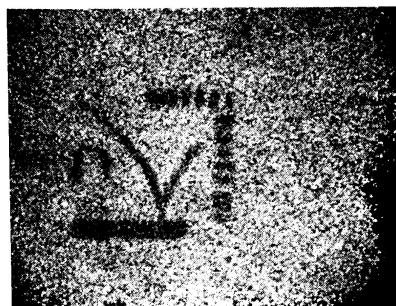
A.Steyerl et al, 1985



Resolution $\approx 10 \mu$



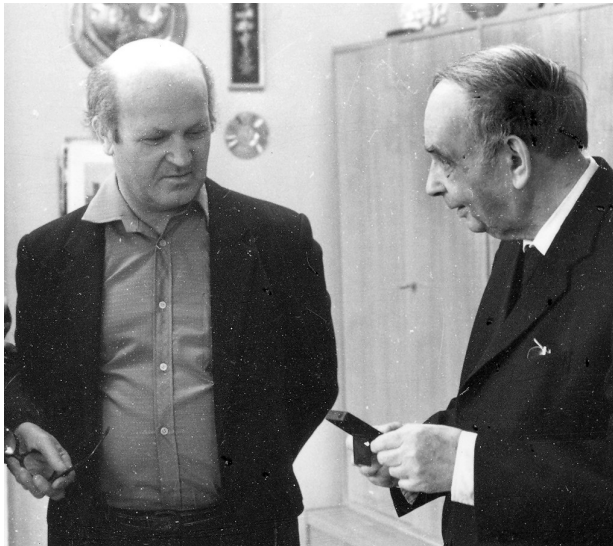
Resolution $\approx 15 \mu$



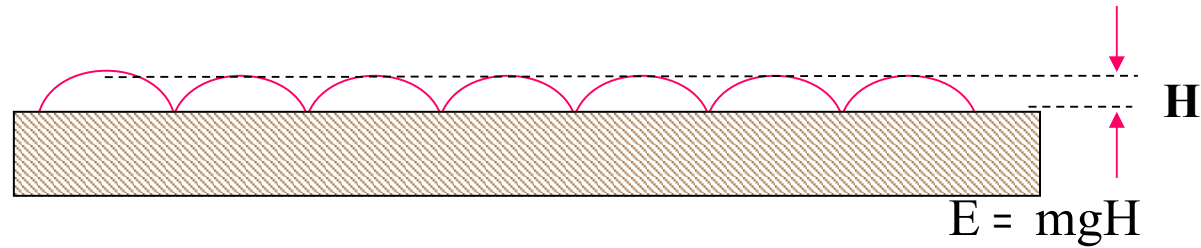
Some ways for the solution of gravity aberration problem were found in 1990- th

Квантовые эффекты при хранении УХН на плоскости

В.И.Луциков, 1976; В.И.Луциков, А.И.Франк, 1978



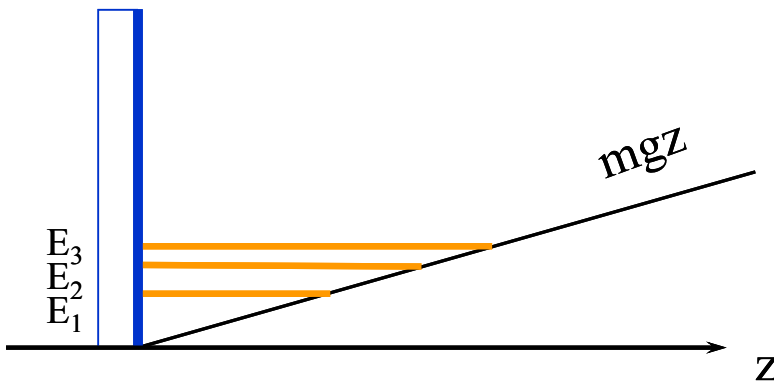
В.И.Луциков и И.М.Франк



Классическая задача при $E_z \gg \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar}{T}$

$$T = 2\sqrt{\frac{2E}{mg^2}} \quad \hbar\omega = \left[\frac{\pi^2 \hbar^2 mg^2}{2} \right]^{1/3} = \varepsilon_g \approx 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ eV}$$

Квантовый подход при $E_z \approx \varepsilon_g$



$$l_g \approx \left(\frac{\hbar^2}{2m^2g} \right)^{1/3} \approx 5.9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$



В.В.Несвижевский

Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field

Valery V. Nesvizhevsky*, Hans G. Börner*, Alexander K. Petukhov*, Hartmut Abele†, Stefan Baeßler†, Frank J. Rueß†, Thilo Stöferle†, Alexander Westphal†, Alexei M. Gagarski‡, Guennady A. Petrov‡ & Alexander V. Strelkov§

* Institute Laue-Langevin, 6 rue Jules Horowitz, Grenoble F-38042, France

† University of Heidelberg, 12 Philosophenweg, Heidelberg D-69120, Germany

‡ Petersburg Nuclear Physics Institute, Orlova Roscha, Gatchina, Leningrad reg. R-188350, Russia

§ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow reg. R-141980, Russia

The discrete quantum properties of matter are manifest in a variety of phenomena. Any particle that is trapped in a sufficiently deep and wide potential well is settled in quantum bound states. For example, the existence of quantum states of electrons in an electromagnetic field is responsible for the structure of atoms¹⁶, and quantum states of nucleons in a strong nuclear field give rise to the structure of atomic nuclei¹⁷. In an analogous way, the gravitational field should lead to the formation of quantum states. But the gravitational force is extremely weak compared to the

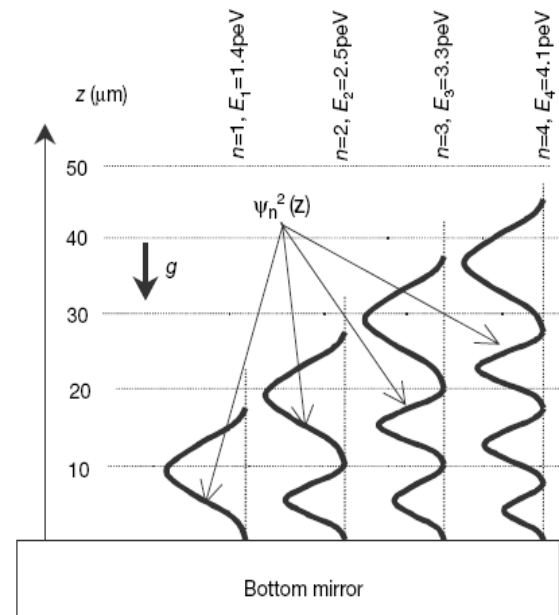
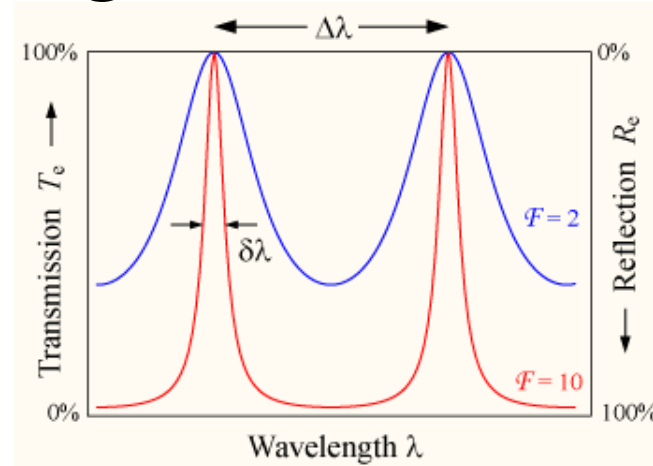
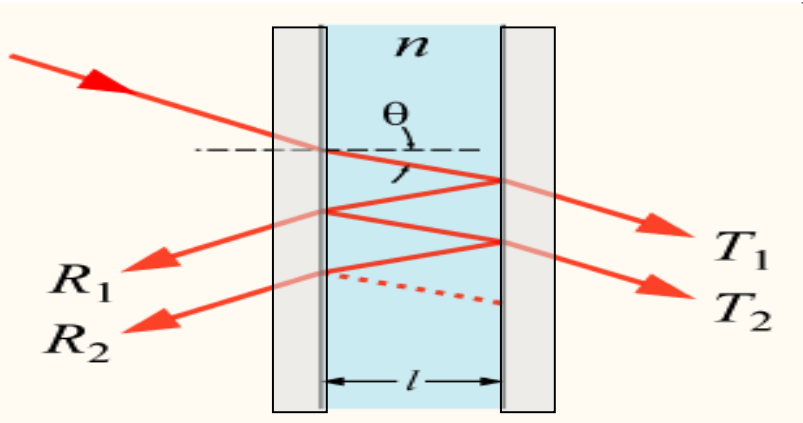
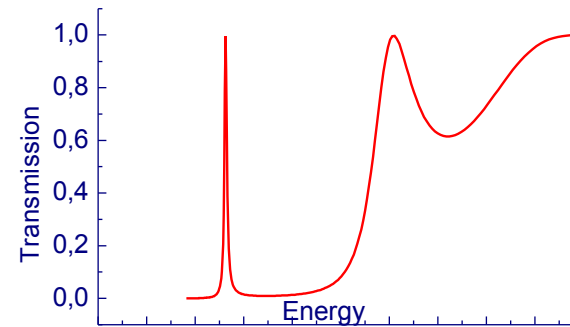
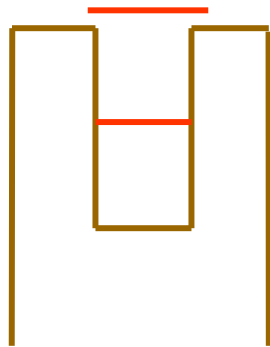


Figure 1 Wavefunctions of the quantum states of neutrons in the potential well formed by the Earth's gravitational field and the horizontal mirror. The probability of finding neutrons at height z corresponding to the n th quantum state, is proportional to the square of the neutron wavefunction $\psi_n^2(z)$. The vertical axis z provides the length scale for this phenomenon. E_n is the energy of the n th quantum state.

Fabry Perot interferometer for light and its quantum analog



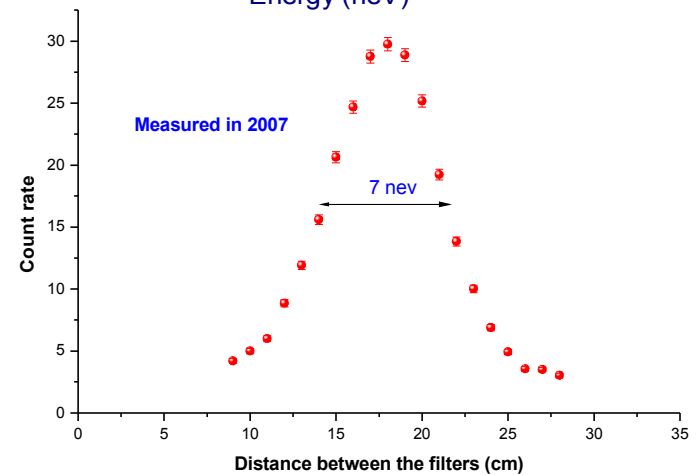
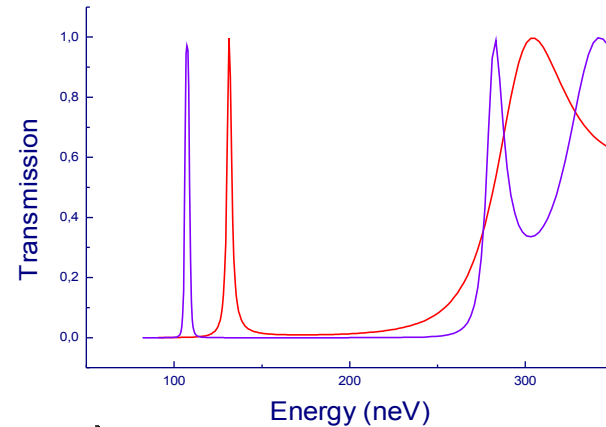
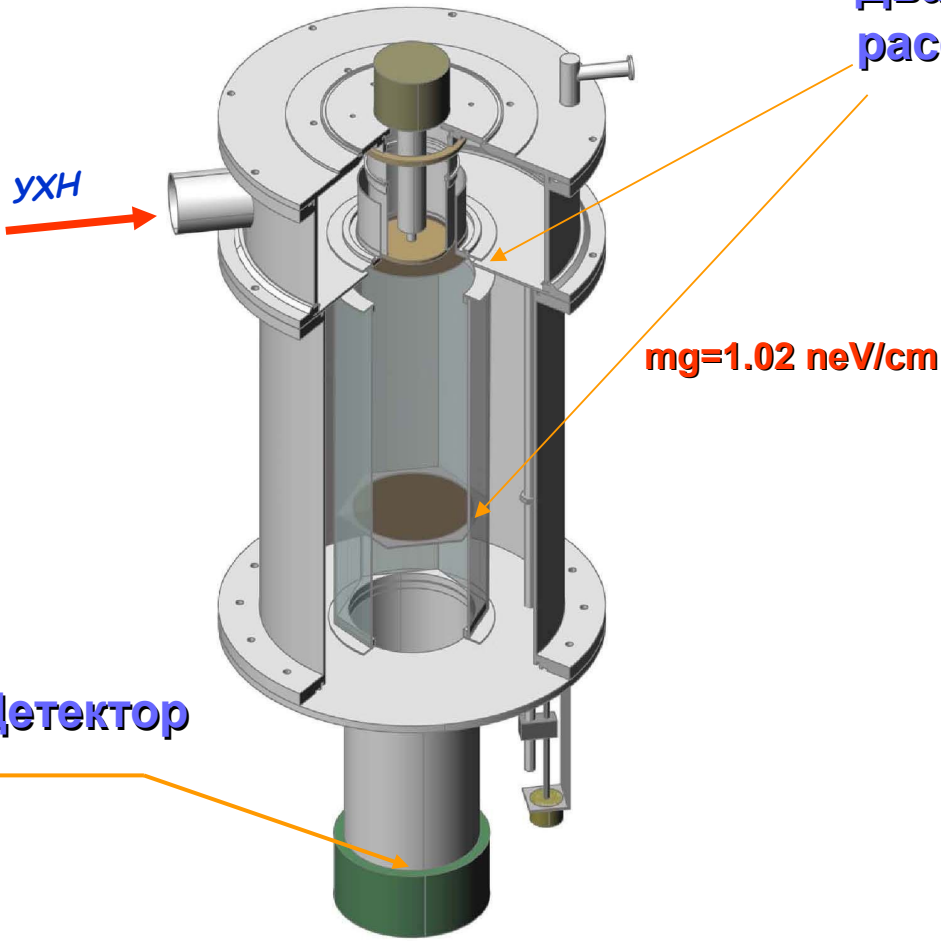
Quantum state →



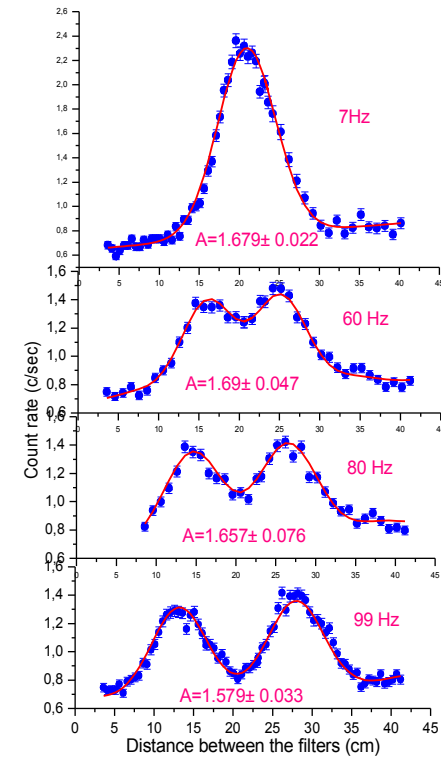
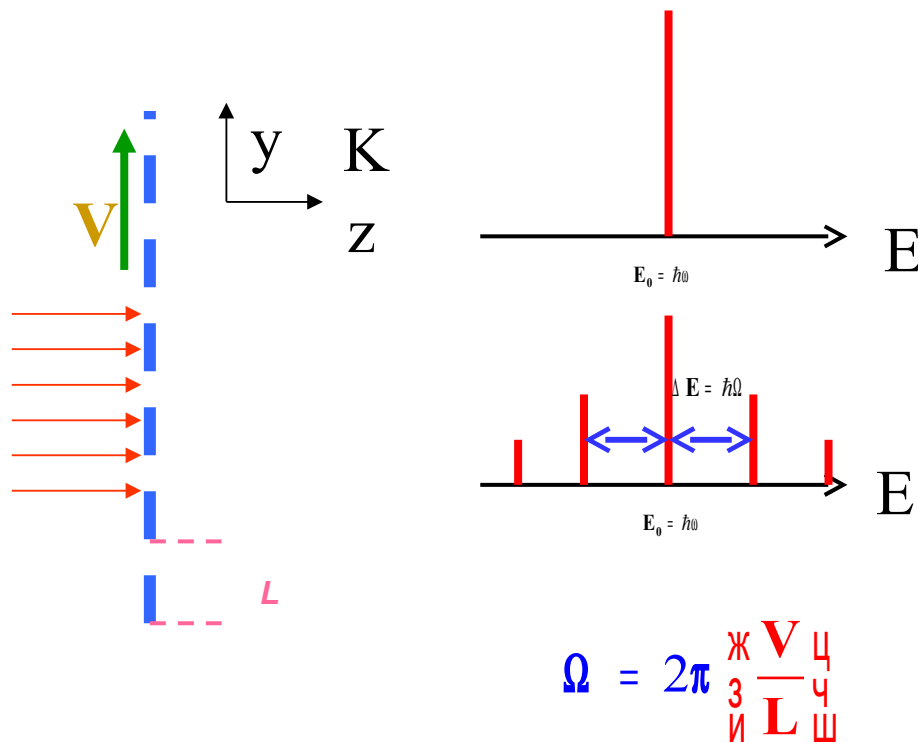
1. A.A. Seregin, Sov. Phys. JETP 46 (1977), p. 859.
2. M.I. Novopoltsev et al. NIM A. 264 (1988) P.518.
3. A. Steyerl, et al, Physica B 151 (1988) 36.
4. Bondarenko I.V., Frank A.I., Balashov S.N. et al. J.Phys. Soc. Jpn. 65(1996). Suppl. A. P.29.

УХН спектрометр с Фабри-Перо интерферометрами

Два ФПИ с переменным расстоянием между ними



Neutron diffraction by a moving grating as a non stationary quantum phenomenon



$$|a_1|_{th}^2 = 0.403 \quad |a_1|_{exp}^2 = 0.383(8)$$

A.Frank, V.Nosov, *Physics Letters A*. 188(1994),20

Frank et al. *JETP Lett*, 81(2005) 427

Test of the weak equivalence principle for a neutrons.

Is neutron falling in the Earth gravitational field with the same acceleration as a macroscopic bodies?

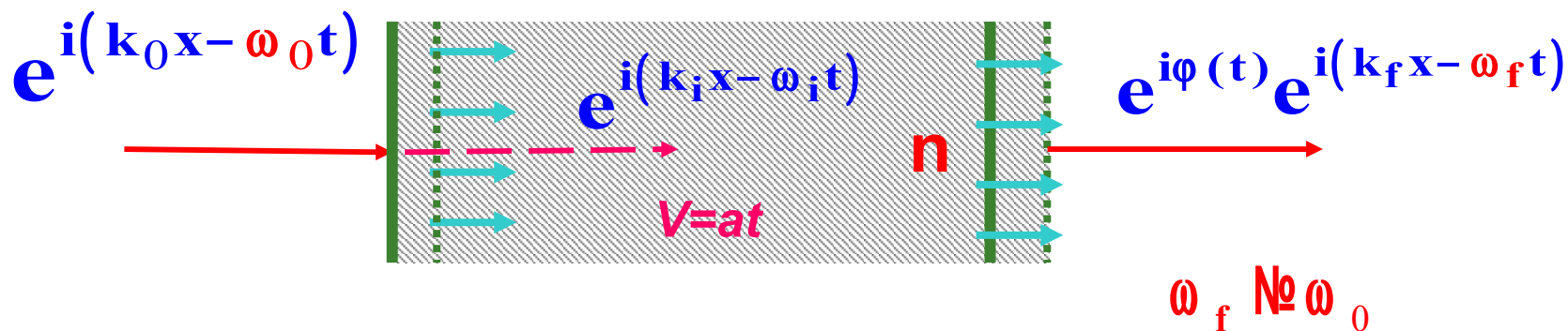
$$m_g g_n H = \hbar \Omega$$

$$1 - \frac{m_g g_n}{m_i g_{loc}} = (1.8 \pm 2.1) \cdot 10^{-3}$$

*A.I. Frank, P. Geltenbort, M. Jentschel, et al
Письма в ЖЭТФ, 86, (2007), 255*

New experiment with planning accuracy to 10^{-4} is now in preparation

Эффект ускоряющегося вещества



В случае **ускоренного движения** частота волны, прошедшей через преломляющий образец, отличается от исходной.

Нейтроны

$$\Delta E \approx maL \left(\frac{1}{3n} - \frac{1}{3} \right)$$

$$\Delta E \approx (2-5) \times 10^{-10} \text{ eV}$$

Свет $\Delta \omega \approx \frac{\omega aL}{c^2} (n - 1)$

V.G.Nosov, A.I.Frank. *Physics of Atomic Nuclei*, v.61, pp. 613-623, 1998
 A.I. Frank, P.Geltenbort, G.V.Kulin, et al, *Phys. At. Nuclei*, 71 (2008) 1656.
 Письма в ЖЭТФ, 2011 (в печати)

Эффект ускоренного вещества для двухкомпонентного нейтрино

Двухкомпонентное нейтрино проходит **сквозь** слой вещества, движущегося с ускорением (например через оболочку сверхновой)

Каждая из компонент **изменит** свою энергию (частоту) **но не на одинаковую величину**, что эквивалентно присутствию в вакууме фиктивного потенциала W_{ac}



$$\Delta E_{e,\alpha} = p(n_{e,\alpha} - 1)aL = V_{e,\alpha} aL \quad (\hbar = c = 1)$$

Эволюция состояния после прохождения ускоренного слоя

$$i \frac{dv}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta_m + W_{ac} & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta_m \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta_m & \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_e \\ v_\alpha \end{pmatrix}$$

$$\sin^2 2\theta_{ac} = \frac{\sin^2 2\theta_m}{(\cos 2\theta_m - 2W_{ac}E/\Delta m^2)^2 + \sin^2 2\theta_m}$$

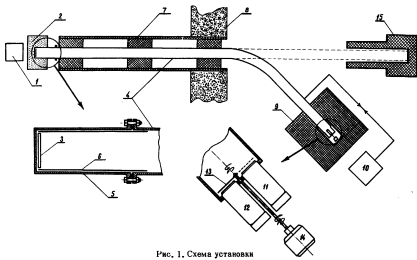
$$W_{ac} = UaL$$

$$U = V_e - V_\alpha = \sqrt{2}G_f N_e$$

Резонанс при $W_{ac} = (\Delta m^2/2E) \cos \theta_m$

Первые источники УХН (1970-1990) Дубна, ОИЯИ

1. Москва, ИАЭ им. Курчатова
2. Гатчина, ЛИЯФ
3. Дмитровград, НИИАР
4. Алма-Ата
5. Мюнхен



Действующие источники УХН (2011)

1. ILL, Grenoble, France
2. Mainz, Germany
3. Los Alamos, USA
4. KEK-Japan
5. J-park – Japan

Источники УХН следующего поколения (строящиеся)

1. PSI, Switzerland
2. ILL, Grenoble, France
3. SMS, USA
4. ПИЯФ, Гатчина
5. TU-Munchen, Garching, Germany
6. J-Park, Japan
7. Triumph, Canada (in collaboration with KEK)

Спасибо за внимание!