

Несохранение пространственной четности в нейтрон – ядерных взаимодействиях

К 100 - летию Л.Б. Пикельнера

(θ - τ) проблема

К 1956 г. была создана первая согласованная теория слабого взаимодействия, которая предполагала сохранение *пространственной четности*. Трудность у теории возникла при объяснении распадов двух обнаруженных частиц:

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

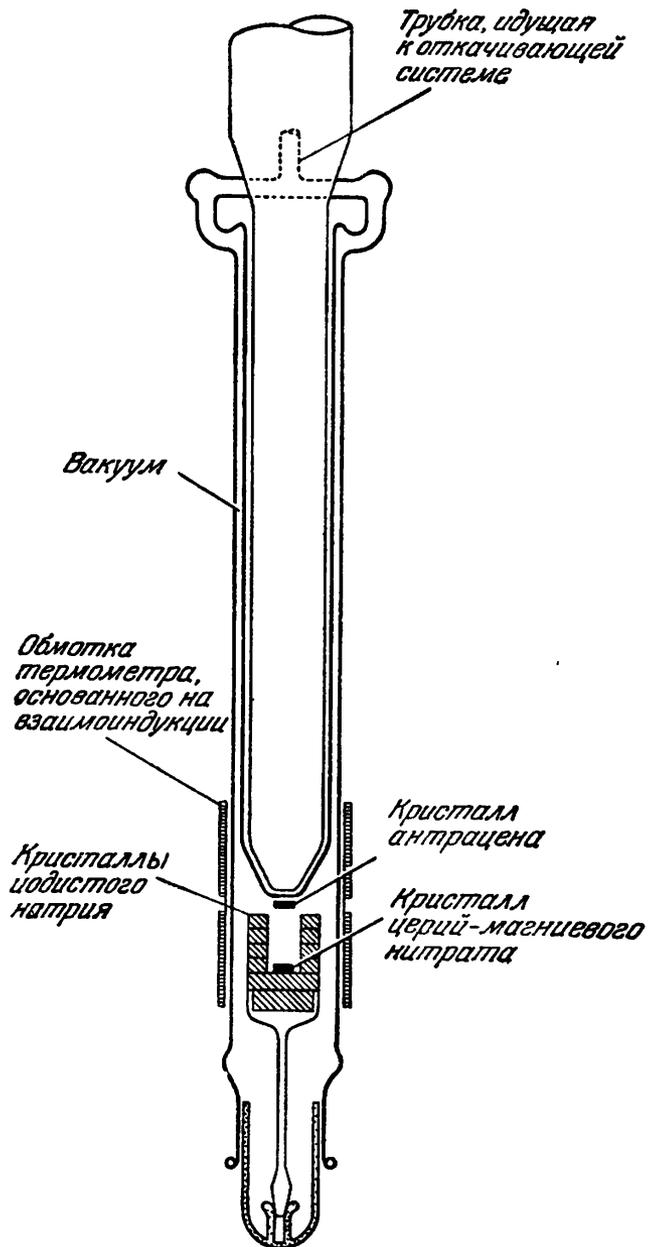
Поскольку четность изолированной системы, согласно теории сохраняется, и для π мезонов равна -1 , то четность θ^+ и τ^+ частиц различна. Однако, массы и время жизни частиц оказались очень близкими. Эти два обстоятельства и получили название (θ - τ) проблемы.

В 1957 г. Ли и Янг предложили новый вариант теории слабого взаимодействия, в котором θ^+ и τ^+ являлись одной и той же частицей (K^+ мезоном), но пространственная четность нарушалась. При этом, остальные выводы прежней теории сохранялись.

Таким образом, (θ - τ) проблема разрешалась, но возникала новая – необходимость распространить концепцию нарушения пространственной четности на все слабые взаимодействия, включая β -распад.

Согласно теории Ли-Янга, несохранение четности можно обнаружить в β -распаде поляризованных ядер.

Эксперимент по проверке теории Ли-Янга (Ц. Ву, 1957)



В эксперименте изучалась гипотеза Ли и Янга об асимметрии вылета электронов при β -распаде поляризованных ядер ^{60}Co .

Тонкий слой ^{60}Co толщиной 0.05 мм на поверхности парамагнитной соли – нитрата Се-Mg, - располагался в криостате и поляризовался методом грубой силы.

Температура образца $\sim 0.01\text{K}$ достигалась методом адиабатического размагничивания парамагнитной соли.

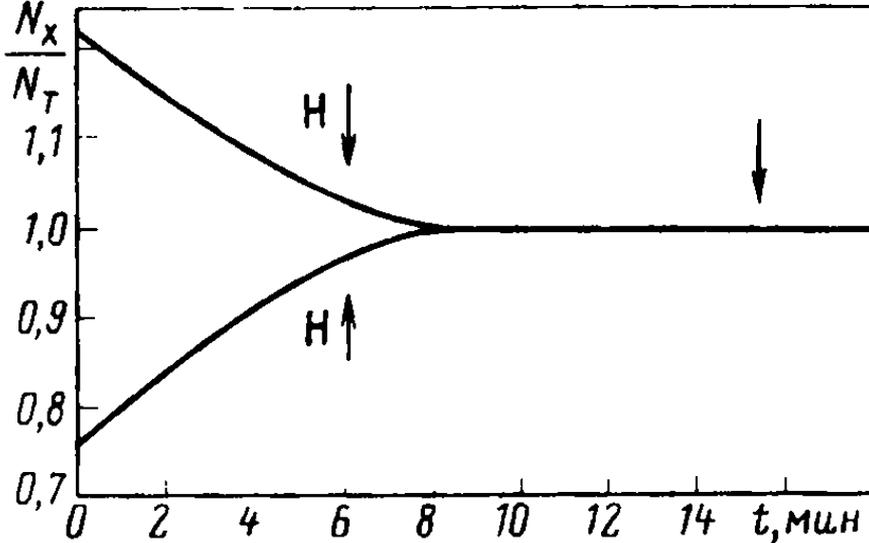
Магнитное поле на ядрах образца $\sim 10\text{Тл}$ создавалось благодаря внутрикристаллическим полям, создаваемым поляризованными электронами самого кобальта.

Электроны β -распада регистрировались органическим сцинтиллятором (антраценом), соединенным с ФЭУ световодом.

Процедура измерений заключалась в следующем:

1. Измерение скорости счета электронов с теплым (неполяризованным) образцом ^{60}Co N_T
2. Измерение скорости счета электронов с холодным образцом для противоположных направлений магнитного поля, т.е, ядерной поляризации ^{60}Co N_X .

В результате была построена зависимость отношения N_X/N_T от времени с момента достижения максимальной поляризации мишени:

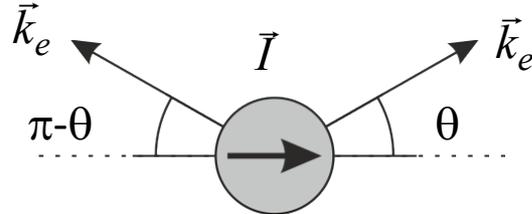


$$b = \frac{N_X \uparrow - N_X \downarrow}{N_X \uparrow + N_X \downarrow}$$

Релаксация этого отношения связана с постепенным нагревом образца за счет притока тепла извне и энергии β -распада.

Таким образом, была установлена асимметрия углового распределения электронов в β -распаде:

$$N(\theta) = A[1 + b(\vec{k}_e \cdot \vec{I})] = A(1 + b \cos \theta)$$



Нарушение пространственной четности в ядерных взаимодействиях

Нарушение P-четности в слабых взаимодействиях, естественным образом поставило вопрос о четности сильных взаимодействий. Было предложено строить гамильтониан нуклонного взаимодействия в виде суммы сильной H_s и слабой H_w частей. Первая сохраняет P-четность, вторая – нарушает ее.:

$$H = H_s + H_w,$$

Тогда, степень нарушения P-четности в нуклонных процессах выражается отношением:

$$F = H_w / H_s$$

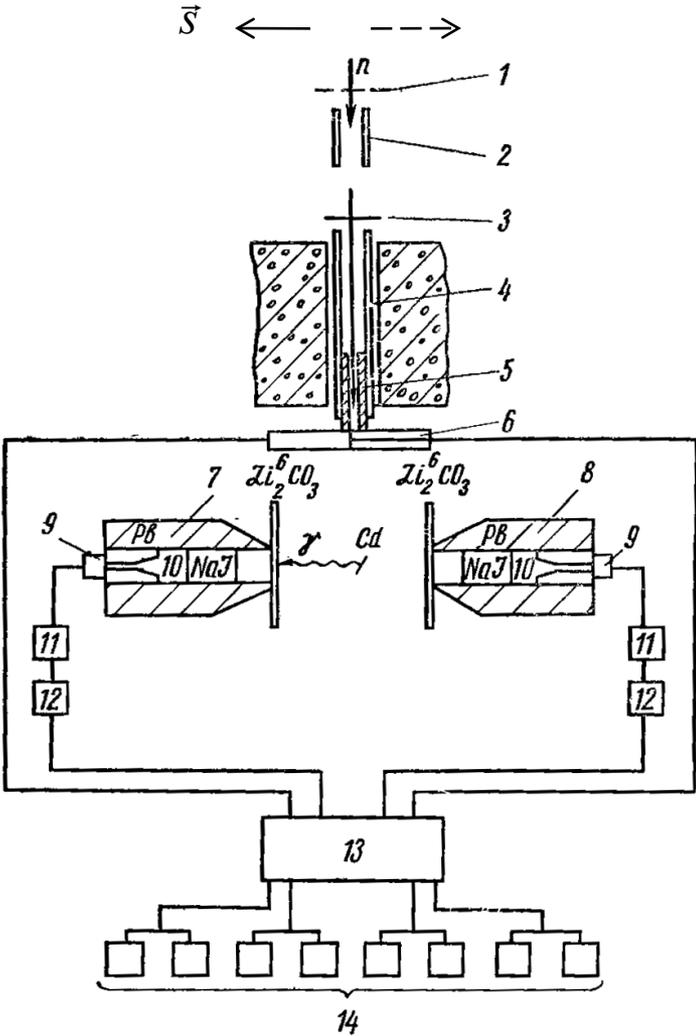
Волновую функцию системы нуклонов также можно представить в виде суммы:

$$\psi = \phi + \alpha \cdot \varphi,$$

где, ϕ и φ - волновые функции состояний с противоположной четностью, и α - коэффициент смешивания этих состояний слабым взаимодействием.

Проведенные теоретические оценки показали, что коэффициент смешивания α должен быть тем выше, чем выше плотность уровней возбужденного состояния ядра после захвата нейтрона. Этот вывод следует из того очевидного факта, что чем выше плотность уровней, тем выше вероятность возбуждения близких уровней с противоположными четностями.

В качестве ядер мишени в первых экспериментах использовались ^{107}Ag , ^{113}Cd , ^{115}In , однако ошибка измерений была слишком велика и обнаружить нарушение Р-четности не удавалось до эксперимента поставленного в ИТЭФ (Ю.Г. Абов, 1964).



Эксперимент был выполнен с мишенью ^{113}Cd , для которой ожидаемой значение коэффициента смешивания $X \sim 10^{-4}$.

Нейтроны поляризовались отражением от кобальтового магнитного зеркала: $pn = 0.79$.

1. Пластина для деполяризации нейтронов (шим)
2. Постоянный магнит
3. Токовая фольга
4. Магнитопровод
5. Коллиматор
6. Вращающийся шим
- 7-8. Детекторы
- 9-14. Элементы схемы регистрации

$$X = -(3.7 \pm 0.9) \times 10^{-4}$$

Однако наибольший интерес представляла векторная корреляция, связанная с полным сечением взаимодействия нейтронов с ядрами:

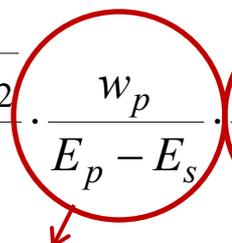
$$\sigma_{tot}^{\pm} = \sigma_0 \pm p_n (\vec{s} \cdot \vec{k}_n) \Delta\sigma_{tot},$$

Где, σ_0 – сечение, даваемое формулой Брейт-Вигнера. В этом случае, нарушение Р-четности приводит к **дихроизму** – различию полных сечений для различных спиральностей (проекций спина на импульс) нейтрона (В.М. Лобашев, 1982) $E \approx 0.01$ эВ.

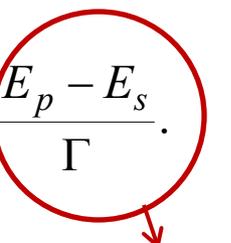
Наиболее сильно нарушение Р-четности должно проявляться вблизи двух соседних состояний с разной четностью, т.е., s- и p-резонансов в полном сечении, четность которых равна $(-1)^0 = 1$ и $(-1)^1 = -1$, соответственно. При этом, спины резонансов должны быть одинаковыми.

$$\Delta\sigma_{tot} = 2\pi\lambda \operatorname{Im} \left[\frac{1}{2} f(s \rightarrow p) + \frac{1}{2} f(p \rightarrow s) \right].$$

$$\Delta\sigma_{tot} \approx \frac{8\pi p_n \lambda^2 g_J \sqrt{\Gamma_{ns} \Gamma_{n1/2}}}{E_p - E_s} \cdot \frac{w_p}{E_p - E_s} \cdot \frac{E_p - E_s}{\Gamma}.$$



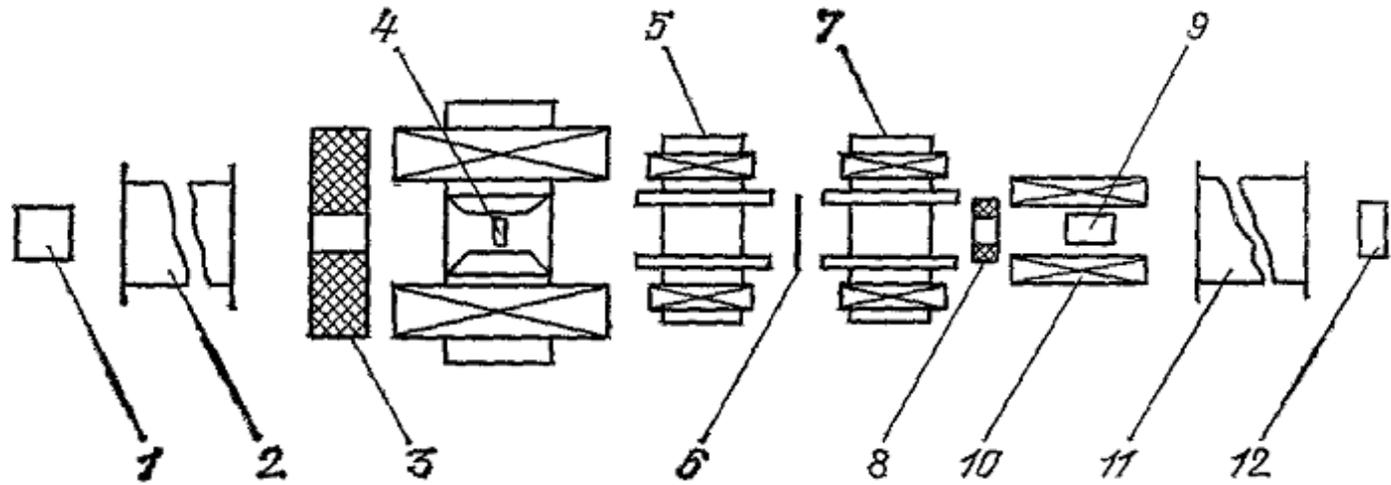
динамическое



резонансное

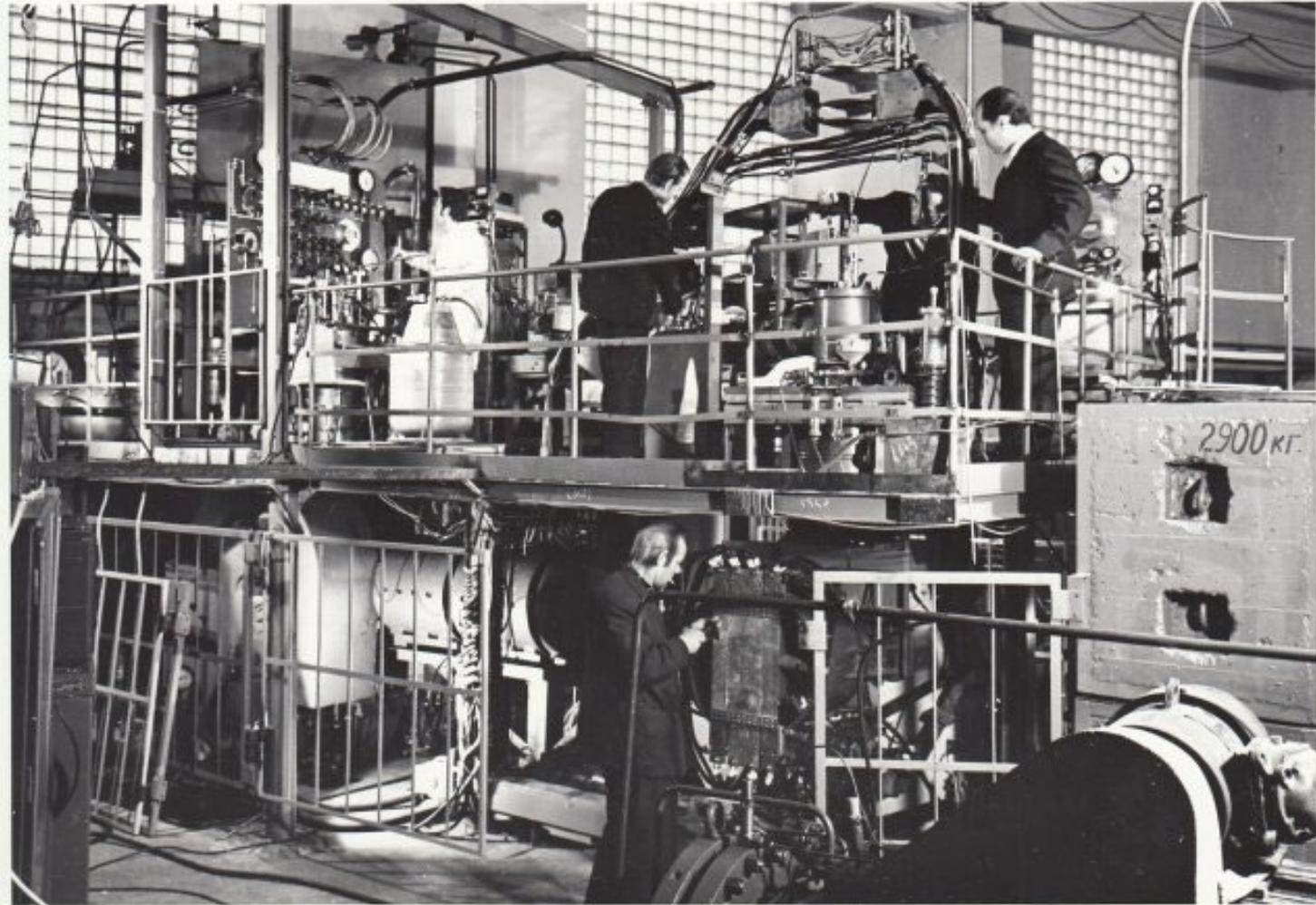
Таким образом, оптимальным условием наблюдения P-нечетного эффекта в полном сечении является р-волновой резонанс вблизи s-волнового с тем же спином.

Экспериментальное наблюдение P-нечетного дихроизма (В.П. Алфименков, 1981 г)



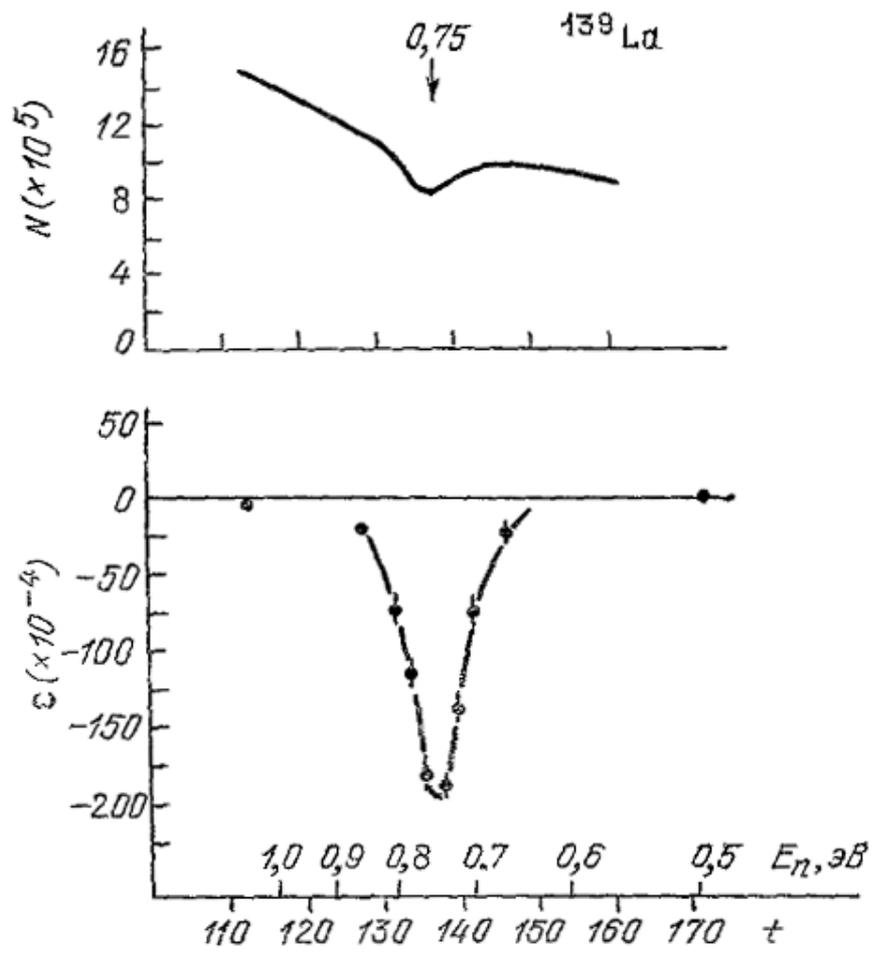
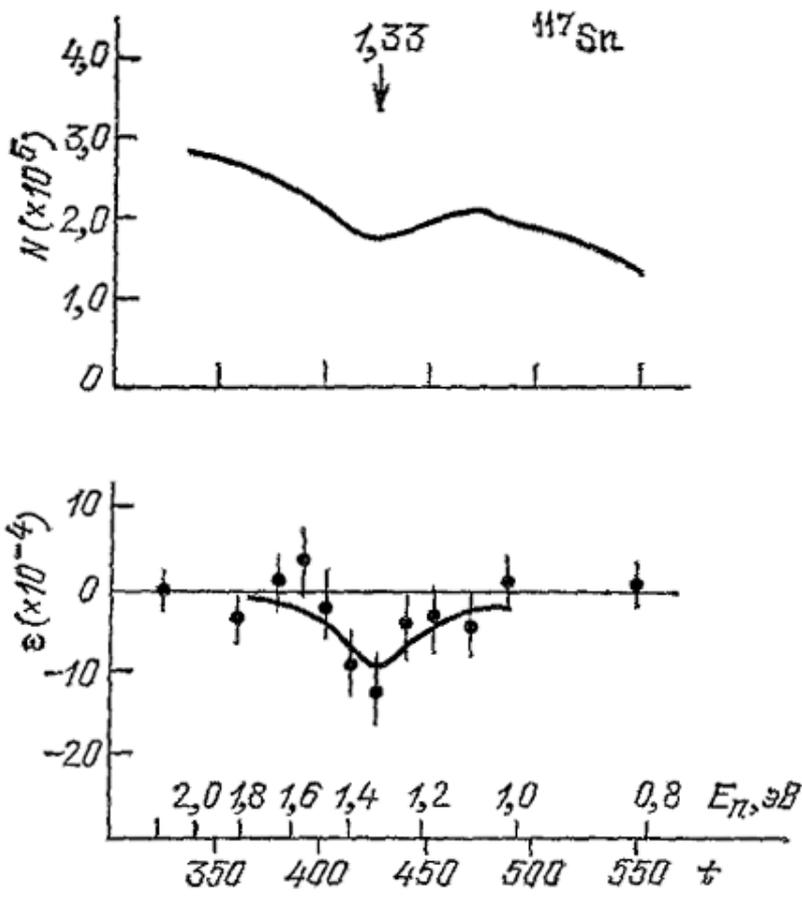
1-реактор, 2,11-нейтроноводы, 3,8-коллиматоры, 4-поляризованная протонная мишень (ЛМН), 5,7-магнитопроводы, 6-токовая фольга, 9-образец, 10-соленоид, 12-детектор.

Установка ПОЛЯНА ЛНФ
Динамическая поляризация ядер



В экспериментах изучалась асимметрия числа отсчетов детектора (трансмиссий) для противоположных спиральностей нейтронов пучка:

$$\varepsilon = \frac{1}{p_n} \cdot \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \frac{T_+ - T_-}{T_+ + T_-}$$



Group	P
JINR [4]	0.073 ± 0.005
KIAE [5]	0.076 ± 0.006
KEK(a) [6]	0.097 ± 0.005
KEK(b) [6]	0.095 ± 0.003
Los Alamos [7]	0.092 ± 0.017
Present work(a)	0.1015 ± 0.0045
Present work(b)	0.0955 ± 0.0035

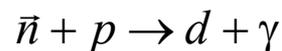
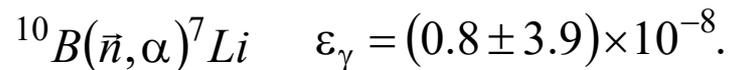
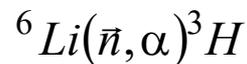
Величина P-нечетной асимметрии, нормированной на p-волновую часть полного сечения

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta\sigma_{tot}}{\sigma_p},$$

в p-волновом резонансе 0.734 эВ ^{139}La
Phys. Rev. C 44(5) (1991), 2187.

Несмотря на огромный объем экспериментальных исследований, в которых P-нечетная асимметрия была обнаружена во многих p-резонансах целого ряда ядер, получить величину матричного элемента слабого нукло-нуклонного взаимодействия не удалось.

Причина – флуктуация величины и знака матричного элемента w_p , смешивающего s- и p-резонансы в тяжелых ядрах. Поэтому, активность была перенесена на изучения P-нечетных эффектов в реакциях поляризованных нейтронов с малонуклонными системами (Ю.М. Гледенов):



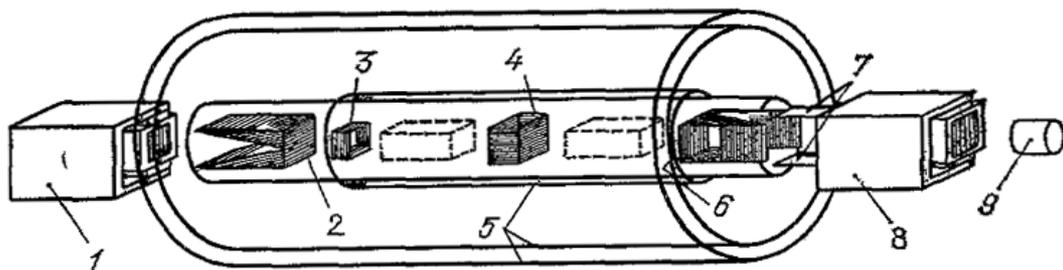
Двойное лучепреломление в трансмиссии поперечно-поляризованных нейтронов

Подобно дихроизму, в трансмиссии существует эффект, аналогичный оптическому двойному лучепреломлению. Слабое взаимодействие приводит к вращению вектора поперечной поляризации нейтрона вокруг его импульса. Угол вращения $\Delta\varphi$ определяется показателем преломления:

$$n = 1 + 2\pi\lambda^2 N \operatorname{Re}[f(0)]$$

$$\Delta\varphi = \frac{z}{\lambda} (n_+ - n_-),$$

где, z – толщина образца и n_{\pm} – показатели преломления для нейтронов с противоположными направлениями поперечной поляризации.



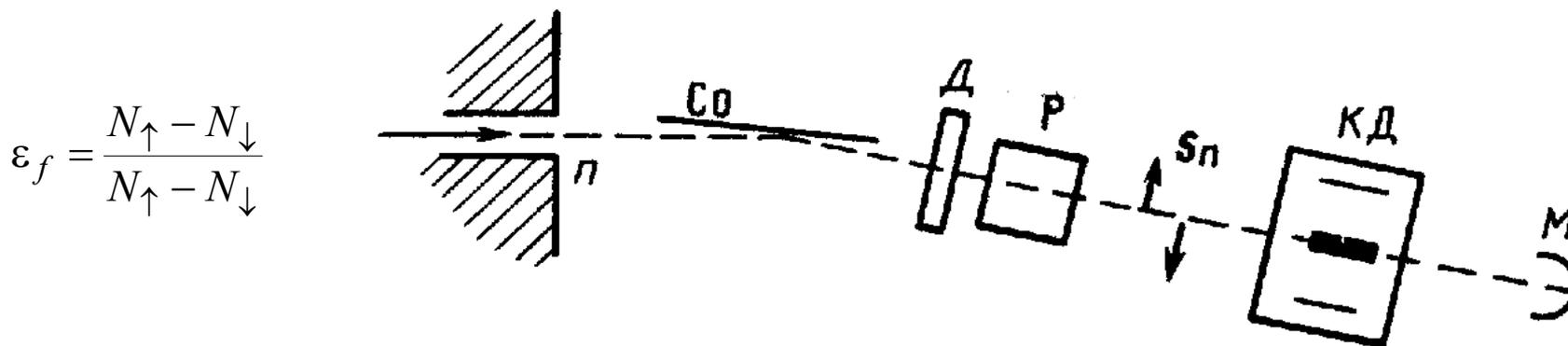
Эксперимент ILL (M.Forte, 1980)

- 1,8-FeCo зеркала
- 2,6-катушки адиабатического прохождения
- 3,4-вспомогательные катушки
- 5-магнитный экран
- 7-шиммирующие насадки
- 9-детектор

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(\text{Sn ест.}) &= (-3.2 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{ рад/см} \\ \Delta\varphi(^{117}\text{Sn}) &= (-36.7 \pm 2.7) \times 10^{-6} \text{ рад/см} \\ \Delta\varphi(\text{Pb ест.}) &= (-2.2 \pm 0.3) \times 10^{-6} \text{ рад/см}\end{aligned}$$

Нарушение пространственной четности в двойном делении (Г.В. Данелян, 1978)

Нарушение P- четности было обнаружено не только в полных сечениях, (n,γ) и (n,α) реакциях, но и в захвате поляризованных тепловых нейтронов изотопами урана и плутония. В эксперименте измерялась асимметрия вылета легких осколков деления для противоположных поперечных поляризаций нейтронного пучка:



$$\varepsilon_f = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

Co – магнитное зеркало, Д – деполяризатор, Р – реверсор поляризации, КД – камера деления, М – монитор пучка.

Делящееся ядро	^{234}U	^{236}U	^{240}Pu
$\varepsilon_f \times 10^4$	2.8 ± 0.3	1.37 ± 0.35	-4.8 ± 0.8

Легкие осколки испускают больше нейтронов, поэтому асимметрия наблюдается также и в вылете нейтронов.