

О проверке принципа относительности в β - распаде свободного нейтрона

В.Р. Ской

Принцип относительности - один из фундаментальных принципов симметрии, согласно которому все физические процессы в инерциальных системах отсчета протекают одинаково, независимо от того, неподвижна ли система или она находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения.

Свободный нейтрон – нейтрон, не взаимодействующий с другими частицами, электромагнитными полями любого происхождения, гравитационным полем и силами инерции. Т.е. на него не действуют никакие внешние **контролируемые** факторы.

1. СТРУКТУРА P-НЕЧЕТНЫХ ЭФФЕКТОВ

(коэффициент, описывающий взаимодействие C) ·
(аксиальный вектор)·(полярный вектор)

$$C(\vec{s} \cdot \vec{p})$$

P- нечетный эффект	Векторная корреляция
β - распад	$C_{\beta}(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e)$
Трансмиссия поляризованных нейтронов	$C_N(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n)$
Асимметрия выхода γ - квантов	$C_N(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_{\gamma})$
${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$	$C_N(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_T)$
Деление	$C_N(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_f)$

Во всех этих эффектах есть общая черта. Ни в одной из корреляций, составляющие ее элементы: коэффициент C , спин и импульс не относятся к одному и тому же объекту.

Вопрос: возможен ли P - нечетный эффект в случае, когда все три элемента корреляции относятся к одному объекту?

Таким объектом может быть **свободный нейтрон**. Коэффициент C_n связан со слабым, взаимодействием, а спин и импульс естественным образом образуют нужную векторную комбинацию - спиральность. А поскольку слабое взаимодействие приводит к распаду нейтрона, то естественно ожидать, что нарушение четности проявится как зависимость вероятности этого распада (времени жизни нейтрона) от спиральности нейтрона.

$$C_n(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n)$$

Однако, поскольку спиральность массивных частиц **не является** Лоренц – инвариантной величиной, то с ней не может быть связан никакой физической эффект в отсутствии взаимодействия с другими частицами или полями. Поэтому эффект зависимости времени жизни свободного нейтрона от спиральности противоречит принципу относительности.

Таким образом, данную гипотезу можно либо игнорировать как абсурдную, либо рассматривать предполагаемый эффект как проверку принципа относительности в слабом взаимодействии.

2. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТА

β -распад нейтрона определяется слабым взаимодействием – переходом d-кварка в u-кварк. В Стандартной Модели смешивания кварков описывается матрицей Кабиббо – Кобаяши - Маскавы (ККМ):

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Матрица ККМ унитарна, т.е., например для первой строки:

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$

Унитарность ККМ матрицы означает сохранение вероятности.

В рамках Стандартной Модели, u-кварк может смешиваться только с d-, s- и b-кварками.

Отличие этого выражения от 1 означает либо существование большего числа кварков, чем в Стандартной Модели, либо существование иных взаимодействий.

Связь времени жизни нейтрона и элемента V_{ud} матрицы ККМ:

$$\tau_0 = A/V_{ud}^2$$

Пусть время жизни зависит от спиральности нейтрона $\sigma = \vec{p}_n \vec{s}_n = \pm 1/2$, где \vec{p}_n - единичный вектор импульса нейтрона, \vec{s}_n - его спин. Допустим, что матричный элемент V_{ud} имеет вид:

$$V_{ud} \rightarrow V_{ud} \pm \sigma w$$

где $w \ll V_{ud}$ - матричный элемент P - нечетного взаимодействия. Тогда:

$$\tau_{\pm} = \frac{A}{(V_{ud} \pm \sigma w)^2} \approx \frac{A}{V_{ud}^2 (1 \pm w/V_{ud})} = \frac{A}{V_{ud}^2 (1 \pm \xi)}$$
$$\tau_{\pm} \approx \tau_0 (1 \mp \xi)$$

Рассмотрим систему, в которой в начальный момент времени было одинаковое число нейтронов с обеими спиральностями: $N_+ = N_- = N_0/2$. Тогда по истечении времени t эти числа равны:

$$N_{\pm}(t) = \frac{1}{2} N_0 \exp(-t/\tau_{\pm})$$

Их нормированная разность (поляризация) будет:

$$\rho = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \tanh(\xi \cdot t / \tau_0)$$
$$\rho \approx \xi \cdot t / \tau_0$$

Далее возможны два варианта:

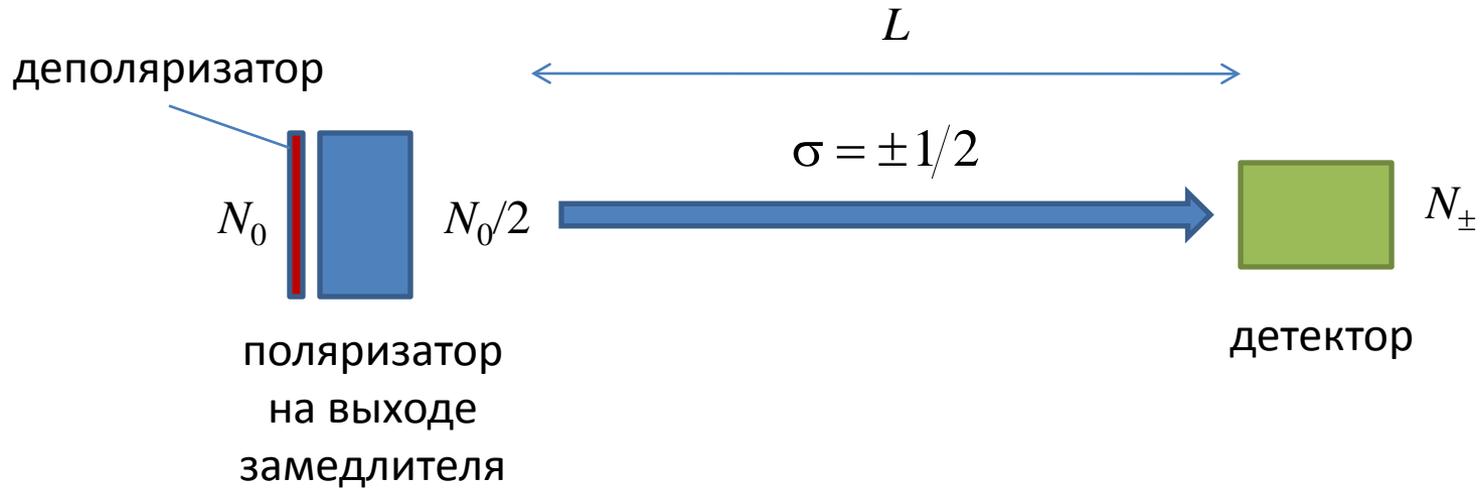
1. Матрица ККМ по прежнему унитарна. Тогда верхний предел на величину ξ следует из нынешних величин $|V_{ud}| = 0.9737 \pm 0.0003$ и $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0009$ (PDG 2022). Откуда следует:

$$w \leq 10^{-3}$$

2. Величина $w > 10^{-3}$, тогда $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 > 1$ и **матрица ККМ не унитарна** («новая физика»?)

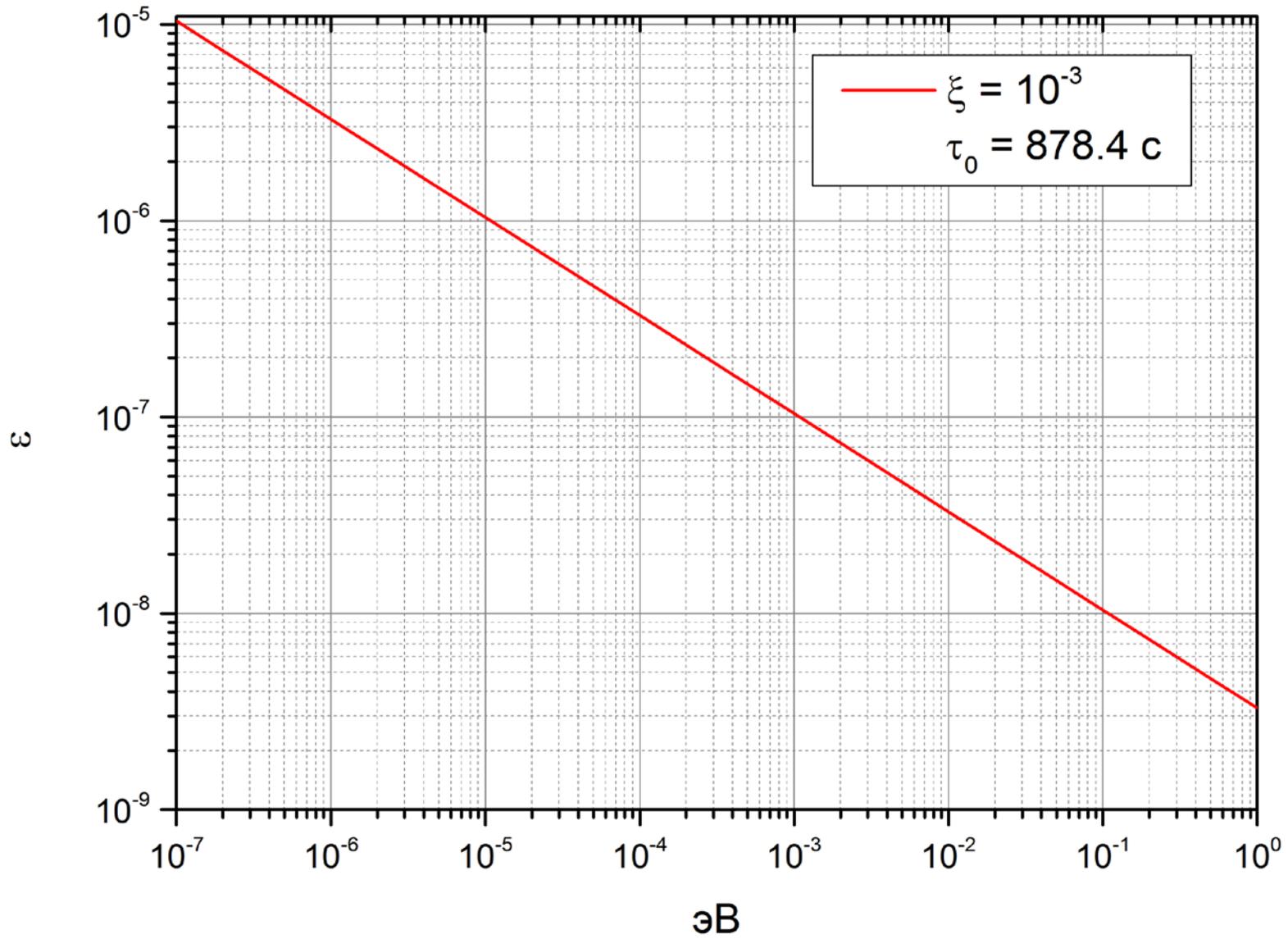
Далее полагается: $\xi \sim w \sim 10^{-3}$

3. ИЗМЕРЕНИЕ ТРАНСМИССИИ ПРОДОЛЬНОПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА



Для эксперимента по времени пролета на базе L асимметрия ε как функция энергии нейтрона E имеет вид:

$$\varepsilon(E) = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \approx \frac{\xi}{\tau_0} \cdot \frac{72.3L}{\sqrt{E}} \times 10^{-6}$$



Относительная статистическая ошибка $N_+ \approx N_- = N_0/2$:

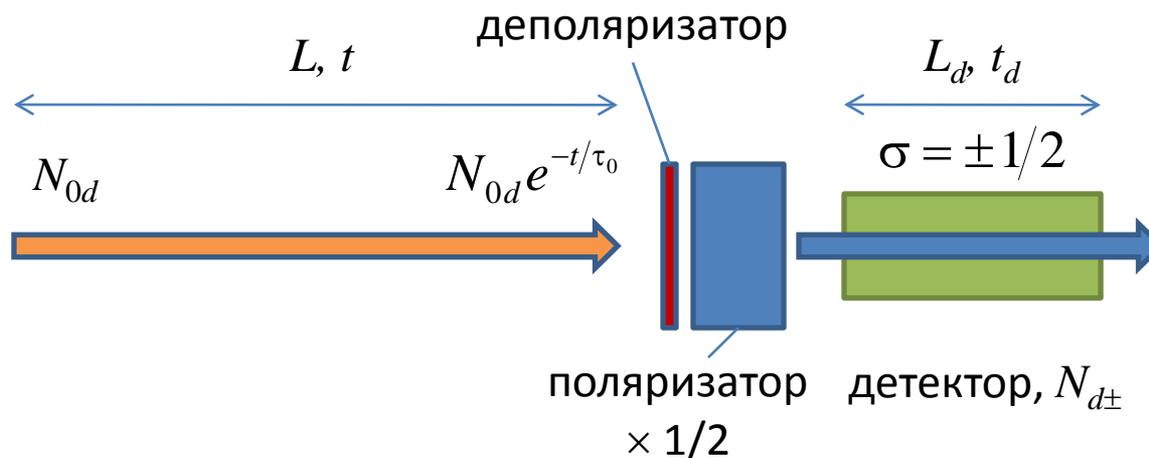
$$\delta\varepsilon \approx \frac{1}{\varepsilon\sqrt{N_0}}$$

Для $\delta\varepsilon = 1$ **полное число нейтронов на выходе замедлителя за время измерения**, при $\xi = 10^{-3}$ должно быть согласно рисунку:

$$N_0 \sim 2 \times 1/\varepsilon^2 \sim \begin{cases} 2 \times 10^{14}, & 10^{-3} \text{ эВ} \\ 2 \times 10^{12}, & 10^{-5} \text{ эВ} \end{cases}$$

(1 год = 3×10^7 сек.)

4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛА РАСПАДОВ В ПРОДОЛЬНОПОЛЯРИЗОВАННОМ ПУЧКЕ



Количество распадов за время пролета нейтронов через детектор t_d :

$$N_{d\pm} = \frac{1}{2} N_{0d} \exp(-t/\tau_0) [1 - \exp(-t_d/\tau_{\pm})]$$

А их асимметрия при $t_d \ll \tau_0$:

$$\varepsilon_d \approx \frac{\xi}{\exp(t_d/\tau_0) - 1} \cdot t_d/\tau_0 \approx \xi \left(1 - \frac{t_d}{2\tau_0} \right) \approx \xi$$

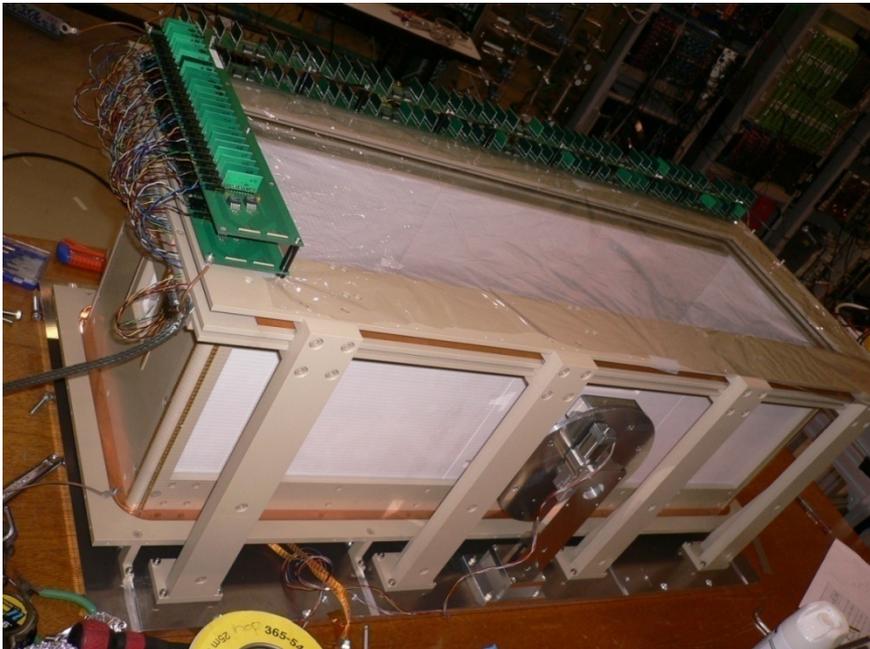
Т.е, предполагаемый эффект пропорционален ξ при любом $t_d \ll \tau_0$. Зависимость от энергии нейтрона появляется только при очень большой длине детектора.

Полное число зарегистрированных **распадов каждой спиральности** для обеспечения относительной ошибки $\delta\varepsilon_d \sim 1$ должно быть в зависимости от величины ξ :

$$N_{d\pm} \sim 1/\xi^2 \sim 10^6$$

Однако, чтобы обеспечить регистрацию такого количества распадов, общее число нейтронов на выходе замедлителя должно быть ($\xi = 10^{-3}$, $L_d = 1$ м и $E = 10^{-5}$ эВ):

$$N_{0d} \sim 2 \times 2N_{d\pm} \frac{\tau_0}{t_d} \exp(t/\tau_0) \sim 2 \times 10^{11}$$



Параметры пучкового эксперимента по измерению τ_0 на J-PARC. Длина детектора по пучку 1 м, $\lambda = 4.5$ А (4 мэВ)

$$\tau_0 = 898 \pm 10_{stat}^{+15} {}_{-18}^{sys} \text{ с}$$

(2020)

Signal and background event rates

	220 kW	1 MW
Signal rate	0.1 cps	0.4 cps
× duty factor (40ms/2.8ms)	1.4 cps	5.7 cps

Background source	Rate
Natural activity inside TPC	0.1 cps
Natural activity outside TPC	0.8 cps
Cosmic rays	0.5 cps
Neutron gamma (upstream & neighbor)	0.5 cps
Scattered neutrons inside TPC	0.003 cps



5. ХРАНЕНИЕ УХН

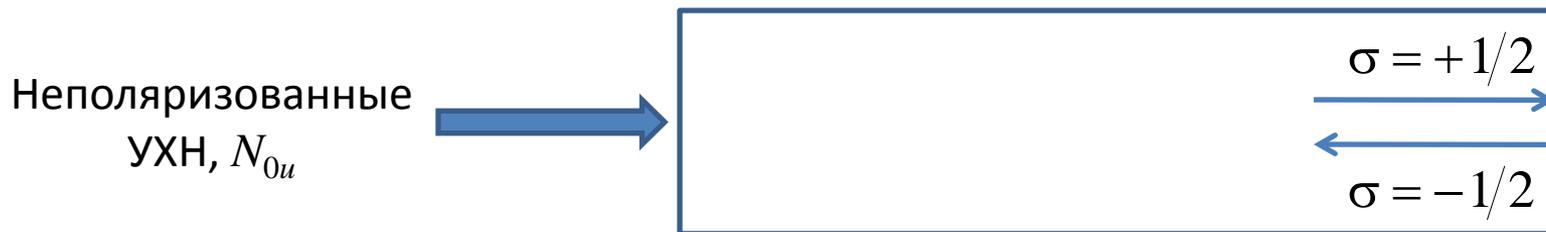
Для УХН t в выражении для асимметрии:

$$\varepsilon_u \approx \xi \cdot t / \tau_0$$

имеет смысл времени хранения $t = t_s$, а не пролета. Если $t_s \sim \tau_0$, то $\varepsilon \sim \xi$ и полное УХН в ловушке должно быть:

$$N_{0u} \sim 2 \times 10^6$$

Пусть при зеркальном отражении от стенки поляризация УХН не меняется:



Тогда в течении времени хранения t_s , половину его УХН будет иметь спиральность $+1/2$ и половину $-1/2$. Полное число нейтронов, оставшихся к моменту t_s :

$$N_{0u} e^{-t_s/\tau_0} \left(1 - \xi^2 t_s / 4\tau_0\right)$$

Эффект во втором
порядке по ξ

6. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Пусть поляризации нейтронов с положительной и отрицательной спиральностями на выходе поляризатора равны p_+ и p_- , соответственно. Причем из-за неидеальности поляризатора $|p_{\pm}| < 1$ и $|p_+| \neq |p_-|$. Тогда:

Прямой пучок:
$$\varepsilon = \frac{1}{2}(|p_+| + |p_-|) \cdot \xi t / \tau_0$$

Распад:
$$\varepsilon_d = \frac{1}{2}(|p_+| + |p_-|) \cdot \xi \left(1 - \frac{t_d}{2\tau_0}\right)$$

Мониторирование интенсивности пучка можно проводить периодически исключая поляризатор или проводя деполяризацию пучка.

Для поляризатора типа магнитного зеркала мониторировать интенсивность можно по части пучка, прошедшего через зеркало.

Измерения можно проводить на импульсном или постоянном пучке.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку предполагаемый эффект связан со спином и импульсом самого нейтрона, возникает вопрос о распространении его на другие свободные частицы со спином.

Однако для эффекта помимо спина и импульса **необходимо слабое взаимодействие.**

У свободного нейтрона слабое взаимодействие есть – за счет него он и распадается. А, например у **свободных** протона или электрона его нет, - они стабильны.

Частицы с s - и b - кварками слишком короткоживущие, чтобы из них можно было сформировать поляризованные пучки и провести описанные измерения.

Вероятно средствами ФЭЧ возможна постановка эксперимента по измерению, например величины пробега (времени жизни) подходящих частиц с s - и b - кварками, образовавшихся в реакции пучка с мишенью, от их спиральности.

Таким образом, нейтрон является уникальным, если не единственным, объектом, с которым можно провести подобные измерения.

Эффект обнаружен, что дальше?

Согласно принципу относительности любые процессы в двух произвольных инерциальных системах тождественны по своим количественным характеристикам. Если процессы имеют место в обеих системах, но количественно различны, то такие системы неинерциальны.

В рассматриваемом случае реализуется подобный вариант – распады нейтрона происходят и в системе с положительной и с отрицательной спиральностями, но количественно различны – разное время жизни. Тогда можно предположить, что обе системы не являются инерциальными.

Поскольку обе системы исчерпывают все возможные состояния движения свободного нейтрона (спин и импульс всегда либо параллельны, либо антипараллельны), то для свободного нейтрона любая система является неинерциальной. Поэтому принцип относительности к нему неприменим.

В чем причина неинерциальности свободного нейтрона?

Есть два типа неинерциальных систем (относительно неподвижной ИСО):

1. Система отсчета, движущаяся поступательно с постоянным ускорением.
2. Система отсчета, вращающаяся вокруг неподвижной оси с постоянной угловой скоростью ω .

Нейтрон имеет спин – собственный момент количества движения, поэтому в классическом смысле «вращается» и является системой второго типа.

Во вращающейся системе с моментом импульса L , потенциал сил инерции U равен:

$$U = L \cdot \omega / 2$$

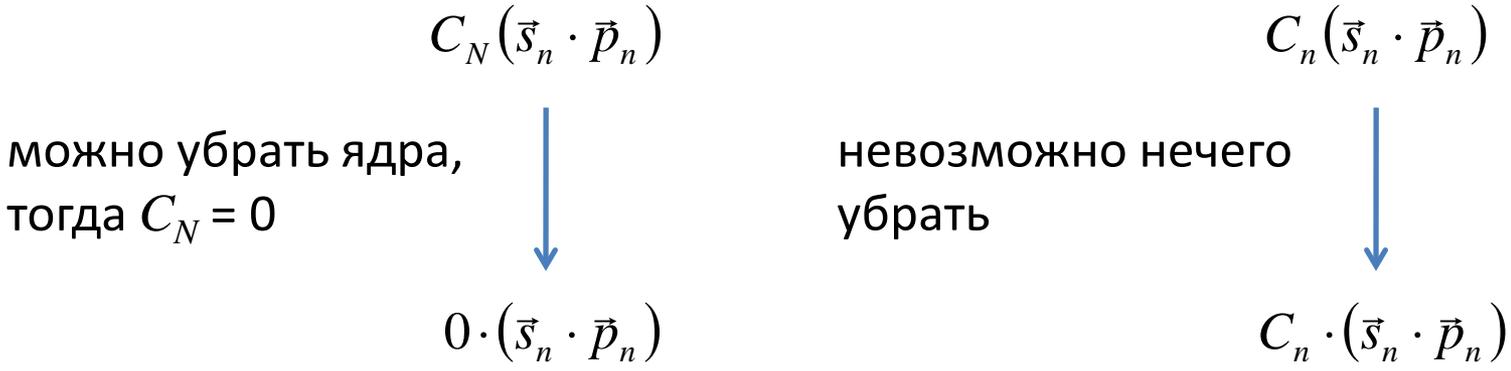
Поскольку предполагаемый эффект зависит от спина $C_n (\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n)$, то положив

$$\left. \begin{array}{l} L \rightarrow s_n \\ C_n \rightarrow \omega \end{array} \right\} U_n \sim C_n s_n$$

Смысл этой аналогии в том, что спин нейтрона задает ось вращения, а его неинерциальность проявляется только в присутствии слабого взаимодействия, связанного с P – нечетным эффектом, поскольку при $C_n \sim \omega = 0$ система просто не «вращается».

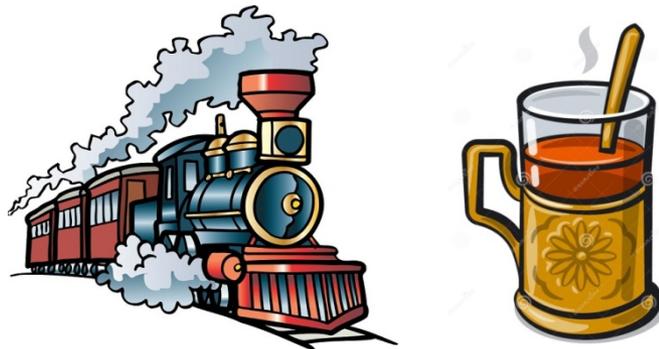
Невозможность введения для свободного нейтрона инерциальной системы отсчета есть следствие того, что это взаимодействие, **нельзя отключить** ни при каких условиях.

Структуры P - нечетного эффекта в трансмиссии и предполагаемого аналогичны:



Поскольку связь C_n убрать нельзя и ее действие зависит от спиральности, то действительно переходя от системы, движущейся медленнее нейтрона к системе, движущейся быстрее него (противоположная спиральность), будем получать разное время жизни.

Эта картина кажется необъяснимой, но только до тех пор, пока нейтрон считается частью инерциальной системы. Если принять допущение, что для него нельзя ввести инерциальную систему – нельзя выключить его взаимодействие с «окружением», то картина находит объяснение в рамках различия явлений в неинерциальных системах.



Таким образом, интерпретация эффекта является альтернативой:

1. Либо для свободного нейтрона можно ввести инерциальную систему, тогда принцип относительности нарушается.
2. Либо такую систему для свободного нейтрона ввести нельзя и любая система отсчета для него является неинерциальной. Тогда принцип относительности неприменим к свободному нейтрону и обсуждение его нарушения не имеет смысла.

Однако, поскольку неинерциальность свободного нейтрона определяется слабым взаимодействием, то оно же определяет и величину сил инерции.

«Источником» сил инерции является само ускоренное движение или вращение системы. В рассматриваемом случае их источником является слабое взаимодействие, что странно.

Вопрос и в том, как природа таких сил инерции соотносится с принципом эквивалентности ОТО, который декларирует одинаковость явления в полях тяготения и сил инерции при условии, что напряженности обоих полей в соответствующих точках пространства совпадают, а начальные условия одинаковы для всех тел замкнутой системы.

8. СЛЕДСТВИЯ

1. Внутренняя четность нейтрона. Свободный нейтрон полагается четной частицей. При действии на его волновую функцию оператора четности P :

$$P\Psi_n = +\Psi_n$$

Однако, если предполагаемый эффект существует, то при пространственной инверсии получается другой нейтрон – его время жизни иное. Поэтому волновая функция своб

Если имеет место T - инвариантность, то для неполяризованного падающего пучка частиц со спином $\frac{1}{2}$, поляризация ρ рассеянных частиц равна асимметрии ε при рассеянии полностью поляризованного пучка.

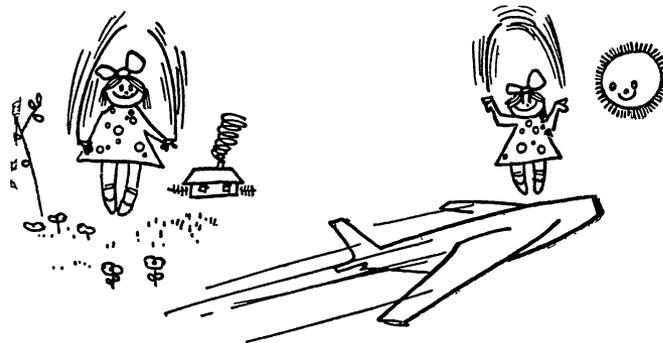
2. Гипотеза неполяризованно-асимметрии ε для поляризованного пучка, если имеет место T инвариантность. Если T -инвариантность нарушается, то согласно П - А теореме $\varepsilon \neq \rho$.

Проверка П-А теоремы может быть альтернативой измерения ЭДМ. Оба эффекта связаны либо с самим нейтроном, либо его взаимодействием с «окружением».

$$w = w_P + iw_T \xrightarrow{T} w_P - iw_T$$

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена гипотеза зависимости времени жизни свободного нейтрона от спиральности.
2. Показано, что предполагаемый эффект противоречит принципу относительности и может стать проверкой принципа относительности в слабом взаимодействии. Однако этот вывод зависит от интерпретации.
3. Построена феноменологическая модель предполагаемого эффекта и сделаны его количественные оценки.
4. Показана принципиальная возможность измерения эффекта на мощных нейтронных источниках.
5. Сформулированы следствия существования предполагаемого эффекта.



Д1. ЛОЖНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЕКТОРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В β - РАСПАДЕ

Вероятность распада поляризованного нейтрона:

$$dW \propto \alpha + A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e) + D \cdot \vec{s}_n \cdot [\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu]$$

Слагаемые, не зависящие от спина нейтрона включены в α . Если обсуждаемый эффект имеет место, то $\alpha \rightarrow \alpha + \xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n)$.

Тогда результат измерений зависит от способа постановки эксперимента и того как обрабатываются результаты.

P-нечетный эффект, связанный с коэффициентом A .

В этом случае:

$$dW \propto \alpha + \xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n) + A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e)$$

Если спин нейтрона перпендикулярен его импульсу, то и ложных эффектов не возникает.

Если спин параллелен импульсу, но для каждой спиральности проводятся измерения с противоположными направлениями вылета электрона и строятся величины:

$$\left. \begin{aligned} dW_{++} &\propto +\xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n) + A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e) \\ dW_{+-} &\propto +\xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n) - A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e) \end{aligned} \right\} dW_{++} - dW_{+-} = 2A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e)$$

$$\left. \begin{aligned} dW_{-+} &\propto -\xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n) + A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e) \\ dW_{--} &\propto -\xi(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_n) - A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e) \end{aligned} \right\} dW_{-+} - dW_{--} = 2A(\vec{s}_n \cdot \vec{p}_e)$$

то ложного эффекта также нет. Однако, если меняется только спиральность нейтрона, то:

$$\left. \begin{aligned} dW_{++} &\propto +\xi(\vec{s} \cdot \vec{p}_n) + A(\vec{s} \cdot \vec{p}_e) \\ dW_{-+} &\propto -\xi(\vec{s} \cdot \vec{p}_n) - A(\vec{s} \cdot \vec{p}_e) \end{aligned} \right\} dW_{++} - dW_{-+} = 2A(\vec{s} \cdot \vec{p}_e) + 2\xi(\vec{s} \cdot \vec{p}_n)$$

появляется ложный эффект. Точно также обстоит дело и при измерении T - неинвариантной корреляции с коэффициентом D .

В хорошо продуманных и поставленных экспериментах подобного типа, с устранением источников систематических ошибок, **случайно** обнаружить искомый эффект

практически невозможно

Д2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ САМОИНФОРМАЦИИ, ПРЕДЛОЖЕННОЕ КЛОДОМ ШЕННОНОМ

1. Событие с вероятностью 100% совершенно неувидительно и не дает никакой информации.
2. Чем менее вероятно событие, тем оно более удивительно и тем больше информации оно дает.
3. Если два независимых события измеряются отдельно, общий объем информации представляет собой сумму самоинформаций отдельных событий.

Эффект обнаружен, что дальше?

Согласно принципу относительности наблюдение за любыми процессами в инерциальных системах не позволяет сделать заключение о состоянии движения или покоя этих систем.

При этом всегда молчаливо предполагается, что возможно полностью отделить инерциальную систему от ее окружения, чтобы внешние процессы никак не влияли на все происходящее в системе.

Если изолировать систему от окружения **принципиально нельзя**, то определить состояние системы возможно, поскольку внешние процессы влияют на то, что в ней происходит. А значит такая система не является инерциальной в принятом смысле и поэтому принцип относительности к ней неприменим.

Наблюдение предполагаемого эффекта может означать, что нейтрон нельзя рассматривать как полностью свободный. Он всегда взаимодействует с окружением, а коэффициент слабого взаимодействия C_n , не связан только лишь с самим нейтроном, вопреки предположению о возможности его полной изоляции.