Симметрии в квантовой теории поля. Нарушение CP четности и фаза в матрице ККМ.

Аннотация

Какой должен быть гамильтониан, чтобы описать нарушение CP четности? Очевидно, что такой гамильтониан должен нарушать симметрию при обращении времени, поскольку такое нарушение эквивалентно нарушению CP четности.

В квантовой теории поля известны симметрии различных фермионных форм. Комбинация таких форм, имеющая вид мнимого скаляра или мнимого псевдоскаляра T-неинвариантны. То есть гамильтониан в виде мнимого скаляра или мнимого псевдоскаляра объясняет несохранение *CP* в распадах частиц или при прохождении нейтронов через среду.

Следовательно, задача заключается в том, чтобы использовать гамильтониан в виде мнимого скаляра или мнимого псевдоскаляра. Это имеет место при введении фазы в матрицу КМ. При этом смешанные нижние кварки левых дублетов становятся комплексными, комплексными становятся также левые кварковые токи. При этом взаимодействия (скалярное и псевдоскалярное), представляющее собой произведение левых кварковых и левых лептонных токов, становятся комплексным. Мнимые части этих взаимодействий нарушает *T* инвариантность, а, следовательно, и *CP* четность.

Проблема нарушения CP-четности неоднократно обсуждалась у нас на семинарах. Доклады делали Шегельский, несколько раз Дзюба, а также Серебров. Но, ясности в понимании проблемы достигнуто не было.
Нет этой ясности и в мировой литературе. Во всех статьях указывается, что фаза в матрице смешивания хорошо объясняет нарушение *CP* четности, но прозрачного объяснения этого факта нет. Нет объяснения и причин, вызывающих *CP* нарушение за счет не сохранения зарядовой четности или за счет не сохранения пространственной четности.
Поэтому в докладе будет показано следующее.
1.Установлена связь фазы с нарушением *CP* – четности.
2.Объяснено два типа нарушения *CP*, а именно: а) нарушение зарядовой четности при сохранении пространственной и б) сохранение зарядовой четности при нарушении пространственной.
3.Представлено Т-неинвариантное выражение для асимметрии эффекта, меняющее знак при обращении времени, поскольку нарушение *CP* четности эквивалентно нарушению симметрии при обращении времени.

Прежде чем приступить к докладу, нужно устранить имеющееся в ОФВЭ заблуждение об эрмитовости гамильтониана при движении нейтронов в среде. Это заблуждение получило широкое распространение, включая ОТФ и редакции журналов ЖЭТФ и ЭЧАЯ

Около года назад я написал статью о симметриях в нейтронном рассеянии. Внутренняя рецензия ОФВЭ была отрицательна. С ней я согласиться не мог и была внешняя рецензия сотрудника Тер. отдела Бунакова В. Е с заключением , что статья ошибочна. Поэтому я отправил ее в журнал ЖЭТФ. Редакция назначает рецензентом Бунакова, который переписывает свою рецензию. Статью заблокировали. Затем я направил статью в ЭЧАЯ. Но срабатывает злой рок. Редакция ЭЧАЯ выбирает рецензентом опять Бунакова, результат известен. Но на этом история не закончилась, так как раньше в 2024 году на ту же тему в ЖЭТФ была опубликована моя статья, с которой В. Бунаков согласиться никак не мог. Поэтому он написал комментарий, который так и называется “Комментарий к статье Лукашевича В. В. …”и который повторял уже известную и растиражированную рецензию. Этот комментарий был опубликован в 2025 г. в ЖЭТФ, 2025 г., Том 167, Вып. 6, стр. 798. Смысл тот же. Моя опубликованная статья глубоко неправильна и самые сильные утверждения заключаются в том, что при движении нейтронов в среде гамильтониан должен быть эрмитов, а представление об антиунитарном характере обращения времени ложно.

Первое утверждение особенно удивительно, потому что в ПИЯФ имеется два реактора и ускоритель, на которых установлена мощная защита от излучения. А зачем?, если с эрмитовым гамильтонианом среда прозрачна для нейтронов и сторонники эрмитовости могут спокойно постоять под пучком реактора ПИК и совершить другие чудесные действия. Вряд ли они это сделают. Жизнь важнее. Думаю, эти сторонники не правильно понимают содержание термина эрмитовость.

Поэтому напомним, в чем заключается понятие эрмитово сопряжения.

1.Эрмитово сопряжение. Это важное свойство в квантовой механике, которое следует точно понимать, чтобы не возникало ситуаций, имеющей место в ОФВЭ и ОТФ, когда на основе ложных представлений принимаются неправомерные административные решения, блокирующие научные публикации .

Эрмитово сопряжение это перенос действия в скалярном произведении оператора с правой функции (или вектора) ϕ на левую функцию (или вектор) φ согласно равенству . $<\varphi| a\phi> = <a^{+}\varphi| \phi>$

То есть всегда можно подобрать такой оператор a+, чтобы равенство выполнялось. Тогда этот оператор называется эрмитово сопряженным оператору *a*. Может случиться так, что эти операторы совпадают.

Оператор a эрмитов, если $a=a+$. Все физические величины представлены эрмитовыми операторами, собственные значения эрмитовых операторов вещественны. Эрмитов оператор *a* определяет унитарный оператор *U* следующим образом $U = \exp(ia)$. Оператор унитарен, если $UU^{+} = 1$

Унитарные операторы сохраняют норму волновой функции, вероятности переходов и независимость от системы координат. Поэтому они широко используются в квантовой теории

Но, есть примеры использования и не унитарных преобразований. Например, группа Лоренца не унитарна. Однако, любая нормальная теория должна быть инвариантна относительно группы Лоренца. Фундамент теории поля это квантовая механика и группа Лоренца. Комментарии на тему важно или не важно, что группа Лоренца не унитарна, мне не известны.

Пример неэрмитовых операторов. Это операторы, представленные мнимой единицей производной d/dx или d/dt , комплексным гамильтонианом и ряд других.

Иногда можно услышать в ОФВЭ, что комплексные гамильтонианы могут быть эрмитовы. Это не так. Такого не бывает.

Произведение мнимой единицы на эрмитов оператор делает его неэрмитовым . Произведение мнимой единицы *i* на производную является эрмитовым оператором, вторая производная также эрмитов оператор.

Если движение частицы в среде описывается комплексным гамильтонианом, то плотность вероятности экспоненциально затухает благодаря мнимой части гамильтониана

Представим решение уравнения Шредингера в операторной форме (это оператор эволюции) $\psi = \psi_0 \exp(-iHt/\hbar)$ Из этого решения следует уравнение для плотности вероятности $\rho = |\psi|^2 = \exp(-it(H - H^{+})/\hbar)|\psi_0|^2 = \exp(-2\mathrm{Im}Ht/\hbar)|\psi_0|^2$

Такой же результат имеет место, если исходить из уравнения непрерывности, где в дивергенцию тока следует подставить вторую производную (кинетический член) из уравнения Шредингера с потенциалом

Если гамильтониан эрмитов, то среда прозрачна для частиц, поглощения нет. Но, частицы могут исчезать в результате распада. Мнимая часть гамильтониана в этом случае именуется шириной или шириной резонанса. При эрмитовом гамильтониане распады не возможны, частицы стабильны.

Вывод: При движении частиц в среде или распадах нестабильных частиц гамильтонианы всегда не эрмитовы

Руководству ОФВЭ надлежит согласиться и принять это утверждение, как научный факт.

Модель нарушения симметрий.

С 1933 года по 1956 год гамильтониан Ферми теории был скаляром, все симметрии сохранялись. После открытия не сохранения пространственной четности *P* гамильтониан изменили, он стал псевдоскаляром. Чтобы сохранить свойства пространства, Ландау ввел комбинированную четность, так что симметрия была восстановлена, поскольку *CP* четность сохраняется.

Вся ответственность за нарушение симметрии была возложена на частицы. По слабому взаимодействию мир разделился на две части. В слабом взаимодействии участвуют левые частицы и правые античастицы. *P*-четность нарушена 100 %, поскольку левое можно, а правое нет. Зарядовая четность С также нарушена на 100%, так как левых античастиц нет, а есть только правые.

1. Левое и правое.

Для ясности рассмотрим, почему появилось левое и правое. Эти понятия возникли при преобразовании спиноров по группе Лоренца. Преобразования Лоренца это гиперболические повороты, которые не образуют группу, поскольку генераторы этих преобразований K не имеют замкнутой алгебры. Произведение двух ортогональных бустов (гиперболических поворотов) дает вращение вокруг третьего направления (генератор этого вращения это оператор углового момента J). Это прецессия Томаса, известная в релятивисткой физике. Магнитного поля нет, но спин прецессирует. Но, соединение группы вращения с преобразованием Лоренца образует шести параметрическую группу. Эта группа приводима. При переходе к генераторам $M=(J+iK)/2$ и $N=(J-iK)/2$ она распадается две неприводимые подгруппы. Для спина 1/2 возникает два представления M=1/2, N=0 и M=0, N=1/2.

В первом случае спин направлен по импульсу и это представление группы описывает правые спиноры (винт вкручивается по импульсу). Ток таких частиц называется правым. Этот ток есть сумма векторного и аксиального токов .

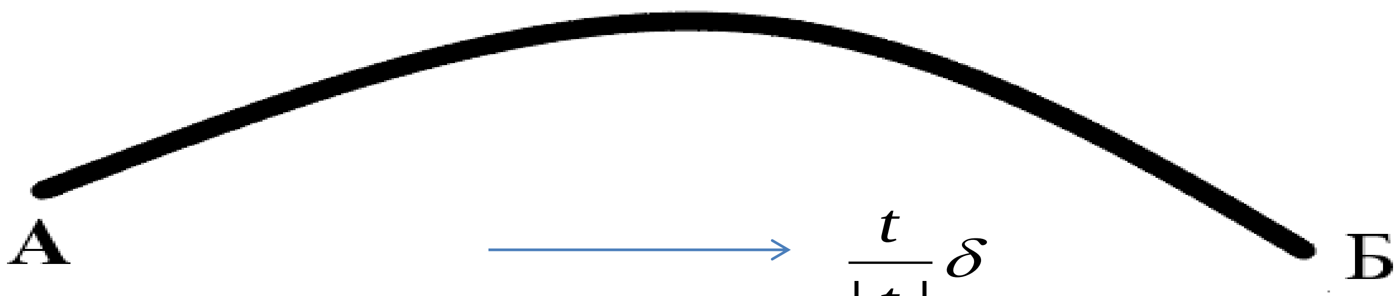
Во втором случае спин направлен против импульса Это левые спиноры и левые токи. Левый ток это разность векторного и аксиального токов. Сумма правого и левого токов равна векторному току (произведение заряда частицы на ее скорость) Но вернемся к симметриям. Проблема возникла в 1964 году, когда было открыто нарушение CP – четности. Сбой происходит или с нарушением зарядовой четностью (не полный 100%) или с пространственной четностью (также не полные 100%). В обоих случая нарушение CP четности эквивалентно нарушению T – инвариантности.

2.Полет камня.

Чтобы понять как устроено нарушение симметрии при обращении времени, рассмотрим полет камня. Брошенный из точки А, он падает в точку Б. При соблюдении начальных условий, камень при броске из точки Б попадает в точку А. Или же сняли фильм с полетом камня и затем прокручиваем его обратно. Все симметрии в этом случае сохраняются.

Представим себе, что к камню привязана маленькая деталь, как добавка δ к силе тяжести, меняющая знак при обращении времени по правилу . При движении вперед камень становится тяжелее и до точки Б не долетает.

При обращении времени (t отрицательно) камень становится легче и падает левее точки А. То есть в этом случае при полете камня имеет место нарушение Т – инвариантности. Но, поскольку симметрии могут нарушаться только парами, то

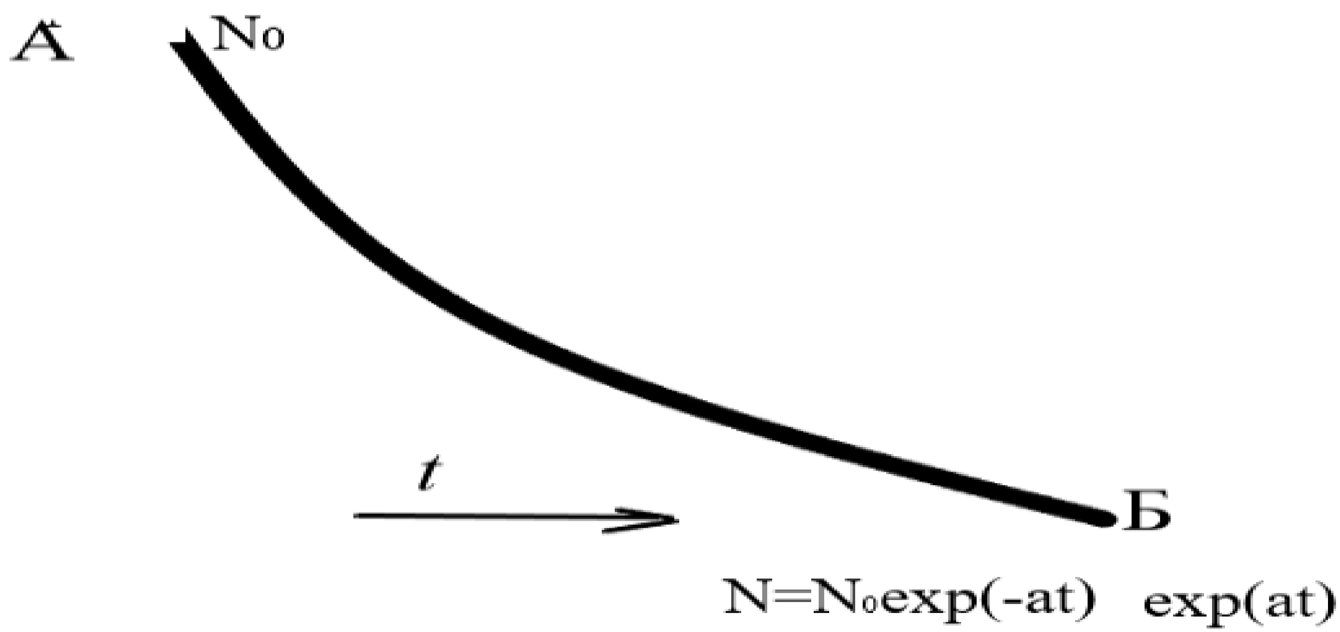


$$\frac{t}{|t|}\delta$$

добавления к этой модели еще одного переключателя типа $\frac{x}{|x|}\delta$ приводит к нарушения СР –четности в силу теоремы СРТ.

Этот пример приведен для того, чтобы показать, что нарушения симметрии связаны с характером взаимодействия и с величиной, создающей знакопеременную добавку в потенциале. Аналогично можно рассмотреть поглощение пучка в среде или распад нестабильных частиц. В случае поглощения пучка должна быть знакопеременная добавка к сечению, а в распадах знакопеременная добавка к полной ширине. И то и другое имеет место в квантовой физике.

Следующий рисунок демонстрирует поглощение пучка частиц в среде или убывание числа части в случае распада. При обращении времени начальное и конечное состояния меняются местами. Теперь точка Б это начальное состояние с нормой N_0exp(-at) и при достижении точки А норма становится равной величине N_0. Ничего не происходит, симметрии не нарушаются. Чтобы имело место нарушение Т-инвариантности, необходимо иметь знакопеременную добавку к сечению или к постоянной распада



$N_{\pm} = N_0 \exp(-t(a \pm \delta))$ и асимметрия $$A = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = th(t\delta)$$

имеет явный Т-неинвариатный вид.

В квантовой физике роль переключателя направления времени играет мнимая единица, потому что она меняет знак при обращении времени.

3. Мнимая единица

.Это происходит из за того, что операция обращения времени T антиунитарна. Она может быть представлена в виде произведения унитарной операции U и операции комплексного сопряжения K . Обоснование этого свойства имеется в квантовой теории поля.

Итак, мнимая единица изменяет знак при комплексном сопряжении, при эрмитовом сопряжении и при обращении времени.

Ниже приведены равенства, иллюстрирующие изменение знака у мнимой единице.

В этих равенствах импульс, матрицы Паули и спин ядра изменяют знак при замене t ->--t

$$[x, p_x] = i\hbar \tag{1}$$

$$(\sigma_x \sigma_y) = i\sigma_z \tag{2}$$

$$(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{I})(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p}) = i(\boldsymbol{\sigma}[\mathbf{I}\times\mathbf{p}]) \tag{3}$$

$$(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{I}) = i(\boldsymbol{\sigma}\{\mathbf{I}\times\mathbf{p}])(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p}) / p^2 \tag{4}$$

$$(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p}) = i(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{I})(\sigma[\mathbf{I}\times\mathbf{p}]) / I^2 \tag{5}$$

При обращении времени равенства (1-5) выполняются только, если у мнимой единице изменить знак. Например, коммутатор сигма матриц слева не меняет знак при обращении времени, но справа сигма матрица становится отрицательной и чтобы убрать этот минус нужно изменить знак мнимой единицы.

И еще приведем выражение для энергии $E=mc^2$ $\qquad \widetilde{E} = i\hbar d / dt$.

Если в операторе энергии измерить только знак времени, то в формуле Эйнштейна нужно изменить знак массы, что, конечно, является абсурдом. То же самое относится к выражениям импульса и его оператора.

$$p = mv \qquad \widetilde{p} = -i\hbar d / dx.$$

Ранее упоминалось о скалярном и псевдоскалярном гамильтонианах. Для первого сохраняются все симметрии, а для второго имеет место нарушение пространственной и зарядовой четности. Скалярный гамильтониан ответственен за переходы Ферми. Это переходы без изменения четности и спина. Для псевдоскалярного гамильтониана меняются четности и спин ядра. Это Гамов-Теллеровские переходы.

Возникает вопрос, каким должен быть гамильтониан, чтобы имело место нарушение *CP* четности. Ответ дает квантовая теория поля

Ниже приведена таблица с формулами *C*, *P* и *T* преобразований для различных фермионных форм, а именно: скаляра, мнимого псевдоскаляра, вектора, псевдовектора, тензора и производных. Таблица позволяет установить симметрию парных (скалярных) комбинаций различных фермионных величин. Из этой таблицы следует, что нарушение симметрии при обращении времени, то есть нарушение *CP* четности, имеет место только для мнимого скаляра или мнимого псевдоскаляра.

Это утверждение универсально и относится как к рассеянию нейтронов так и распадам частиц.

Таблица взята из книги “Введение в квантовую теорию поля” Пескина и Шредера и из нее следуют симметрии вещественных и мнимых скалярных и псевдоскалярных величин.. Сводка формул приведена для того, чтобы показать, что вектор является *C*-нечетной величиной, поэтому и псевдоскаляр (произведение третьего и четвертого столбцов) *C*-нечетен. Поэтому имеет место комбинированная *CP* четность Ландау.

Таблица 1. Симметрии скаляра, мнимого псевдоскаляра, вектора, псевдовектора, тензора и производной

Сводка формул по C, P и T преобразованиям

Свойства преобразования различных фермионных билинейных форм под действием преобразований C, P, и T сведены вместе в приведенной ниже таблице. Здесь мы используем сокращения $(-1)^\mu \equiv 1$ для $\mu = 0$ и $(-1)^\mu \equiv -1$ для $\mu = 1, 2, 3$.

	$\bar\psi\psi$	$i\bar\psi\gamma^5\psi$	$\bar\psi\gamma^\mu\psi$	$\bar\psi\gamma^\mu\gamma^5\psi$	$\bar\psi\sigma^{\mu\nu}\psi$	∂_μ
P	$+1$	-1	$(-1)^\mu$	$-(-1)^\mu$	$(-1)^\mu(-1)^\nu$	$(-1)^\mu$
T	$+1$	-1	$(-1)^\mu$	$(-1)^\mu$	$-(-1)^\mu(-1)^\nu$	$-(-1)^\mu$
C	$+1$	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$
CPT	$+1$	$+1$	-1	-1	$+1$	-1

Псевдоскалярное взаимодействие приводит к автоматическому несохранению зарядовой и пространственной четностей

C-нечетен и мнимый скаляр, но мнимый псевдоскаляр и реальный скаляр *C*-четны. Симметрии скаляра и псевлоскаляра отражены на диаграмме рис. 2, построенной из данных таблицы со сводкой формул *C*, *P* и *T* преобразований. Из этого рисунка следует, что величина *CT* является инвариантом. Как говорил Фейнман - античастица это частица, которая движется вспять по времени. Этот инвариант в случае скаляра и мнимого скаляра равен *CT*=+1, а для псевдоскаляра и мнимого псевдоскаляра равен *CT*=-1

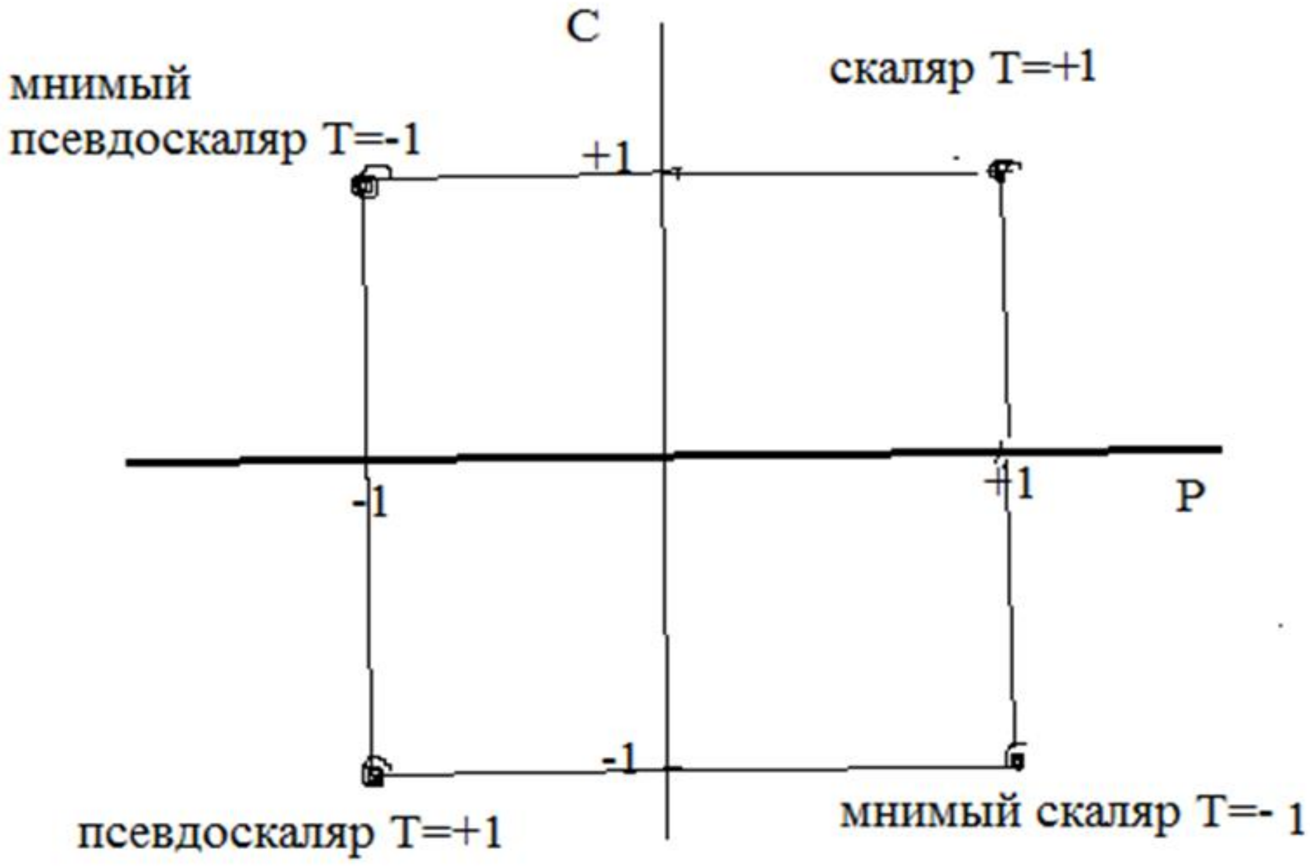


Рис. 2. Симметрии скаляра и псевдоскаляра. *CT*=+1 для скаляра и *CT*=-1 для псевдоскаляра.

В литературе периодически появляются статьи с доказательством того, что теорема *CPT* выполняется для эрмитовых гамильтонианов, но ничего не говорится, что будет в случае неэрмитового гамильтониана. В квантовой теории поля *CPT* теорема справедлива, как это следует из рисунка 2, и для неэрмитовых гамильтонианов.
Все выше сказанное можно использовать для анализа свойств симметрии в рассеянии нейтронов. Это отражено в таблице 1, где приведены симметрии спин зависимых слабого (w) и сильного (str) взаимодействий. Данные по рассеянию нейтронов дополнены данными по распадам К мезонов.. Учтено, что зарядовая четность *К1* мезона положительна, а *К2* мезона –отрицательна, а также то, что *К* мезоны и *пи* мезоны являются псевдоскалярными частицами.

Таблица 1. Симметрии спин зависимых взаимодействий.

C	**P**	**T**	**CP**	**Взаимодействия**
+	-	-	-	Мнимый псевдоскаляр $i\,\mathrm{Im}\,g_w(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p})$, , $K_1 = K_0 + \widetilde{K}_0 \to 3\pi$
-	+	-	-	Мнимый скаляр $i\,\mathrm{Im}\,g_{str}(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{I})$ $K_2 = K_0 - \widetilde{K}_0 \to 2\pi$
-	-	+	+	Псевдоскаляр $\mathrm{Re}\,g_w(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p})$, $K_2 = K_0 - \widetilde{K}_0 \to 3\pi$
+	+	+	+	Скаляр $\mathrm{Re}\,g_{str}(\boldsymbol{\sigma}\mathbf{I})$ $K_1 = K_0 + \widetilde{K}_0 \to 2\pi$

Из таблицы видно, что для *CP* нарушения в *K1* мезоне (первая строка таблицы) гамильтониан должен быть мнимым псевдоскаляром, а *CP*- нечетный распад *K2* имеет место в случае мнимого скаляра.

Подведем итог. 1. Комбинированная четность следует из квантовой теории поля, определяющей симметрию псевдовектора. Эта величина *C* и *P* нечетна.

2. Из этой же теории следует, что нарушение симметрии при обращении времени (нарушение *CP* четности) имеет место для мнимой части скалярного или псевдоскалярного гамильтонианов. Это справедливо для рассеяния и для распадов частиц.

3. *CP* четность для мнимого скаляра нарушается за счет зарядовой четности, а для мнимого псевдоскаляра – за счет нарушения P четности.

4. *CPT* теорема справедлива для неэрмитовых гамильтонианов.

Из нарисованной картины свойств симметрии становится ясным, что взаимодействие, описывающее *CP* нарушения в распадах частиц, должен иметь мнимую часть, так как при этом нарушается *T*-инвариантность, что эквивалентно *CP* нарушению. Это достигается введением фазы в матрицу смешивания нижних кварков. Повернутые кварки становятся комплексными, а взаимодействия, представляющие собой произведение ток на ток, приобретают мнимую компоненту. Трудно сказать, что это означает физически. Но, этот технический прием объясняет нарушение *CP*.

4.Матрица Кабаяши-Москава (КМ) и фаза.

Слабое взаимодействие в четырех-фермионном приближении, когда пропагатор калибровочного бозона стягивается в точку, имеет следующий вид:.

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}}[\bar{e}\gamma_\lambda(1+\gamma_5)]J^\lambda \quad .$$

Это произведение лептонного и кваркового токов. Ниже дано определение кваркового тока для трех поколений кварков.

$$J^\lambda = \overline{\begin{bmatrix} u \\ c \\ t \end{bmatrix}}\gamma^\lambda(1+\gamma_5)V\begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} \quad .$$

Оператор с гамма матрицами это разность вектора и аксиального вектора, то есть это ***v-a*** ток левых частиц. Вспомним определение левых частиц по группе Лоренца.

Ток правых частиц это сумма векторного и аксиального токов. Сумма правых и левых токов это обычный векторный ток электродинамики, определяемый как заряд умноженный на скорость

Скалярное произведение левых кваркового и лептонного v-а токов приводит к скалярому и псевдоскалярному взаимодействиям .
Матрица *V* это обобщение матрицы Кабибо для трех поколений кварков

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

Эта матрица устроена точно также как три поворота в трехмерном пространстве. Первое вращение в плоскости XY (поворот вокруг оси Z), затем вращение вокруг оси Y и затем вокруг оси X. Результат трех унитарных поворотов представлен ниже. Здесь оси X,Y, Z переименованы в 1, 2, 3, что в свою очередь указывает на кварки d, s и b.
Для стандартной параметризации (Miani) эта матрица имеет следующий вид:

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix},$$

$$\cos\theta_{ij} = c_{ij}, \qquad \sin\theta_{ij} = s_{ij}.$$

Угол 12- это угол Кабибо, угол смешивания d и s кварков.Угол 13 означает угол поворота кварков d и b вокруг кварка s .
В каждую матрицу вращения можно ввести произвольную фазу. Тогда фаза в первой матрице может быть отнесена к входным кваркам и ею можно пренебречь. Фазу в третьей матрице можно отнести к конечным кваркам и ею также можно пренебречь. Это не физические фазы. Но от фазы, введенной в среднюю матрицу, таким образом избавиться не возможно, так как ее нельзя отнести ни к входным ни к выходным кваркам. Это фаза δ является четвертым параметром матрицы смешивания.
Как видим введенная фаза делает матрицу комплексной:

$$V=\mathrm{Re}V+i\mathrm{Im}V=\mathrm{Re}V+i\sin\delta\sin\theta_{13}\mathrm{Im}V`.$$

Теперь мы можем написать выражение для мнимой части псевдоскалярного взаимодействия

$$i\,\mathrm{Im}\,L=iG_F\sin\delta\sin\theta_{13}Y\gamma_5\,, \qquad (2)$$

где величина Y определяется начальными условиями, то есть типом частиц, каналов распада, вкладами спиноров. Сюда будут входить матричные элементы матрицы $V`$. и другие члены. Для нас важно другое: мнимая часть взаимодействия в любом случае будет содержать четыре сомножителя $G_F\sin\delta\sin\theta_{13}\gamma_5$.

Тогда, для плотности вероятности получим

$$\rho = \exp(-\Gamma t)\exp(-tG_F \sin\delta \sin\theta_{13} Y\gamma_5).$$

Полученная плотность вероятности позволяет найти среднее значение псевдоскаляра, определяющее величину T неинвариантного эффекта.

$$A = \frac{Tr(\gamma_5\rho)}{Tr\rho} = \frac{Tr(\gamma_5(\cosh(tw) + \lambda_5 \sinh(tw))}{\cosh(tw)} = th(tw),$$

где

$$w = G_F \sin\delta \sin\theta_{13} Y$$

Это выражение при обращении времени меняет знак, то есть T не инвариантно. Иначе, оно описывает эффект нарушения CP – четности в соответствии с определением из квантовой теории поля, что мнимая часть псевдоскалярного взаимодействия нарушает CP- четность.

Эффект пропадает в двух случаях: а именно, а именно, если фаза δ равна нулю, либо в случае равенства нулю угла θ_{13}, то есть при исключении третьего поколения кварков в матрице смешивания

Мнимая часть скаляра также T-неинварианта. Поскольку скалярное взаимодействие и псевдоскалярное это разные типы взаимодействий, то они должны интерферировать.
Результат: CP нарушается мнимой частью скалярного взаимодействия, мнимой частью псевдоскалярного взаимодействия и их интерференцией.

Выводы

1.Согласно квантовой теории поля существуют комплексные скалярные и псевдоскалярные гамильтонианы, мнимые части которых нарушают CP четность. Это свойство универсально, относится как к рассеянию частиц, так и к их распадам.
2.В матрице Кабаяши-Маскава вводится фаза, позволяющая создать указанные комплексные взаимодействия. Введенная фаза позволяет записать матрицу смешивания в комплексном виде, как вещественная часть плюс мнимая. В результате скалярное и псевдоскалярное взаимодействия, как результат произведения левых токов, становятся также комплексными. Мнимые части этих взаимодействий нарушают CP-четность. Поскольку это взаимодействия разного рода, то возможна их интерференция.
4. Асимметрия любого процесса, например, спин зависимого рассеяния нейтронов или распада частиц для таких взаимодействий выражается T- неинвариантным образом, то есть меняет знак при обращении времени

Обычно это гиперболический тангенс, аргументом которого является время умноженное на мнимую часть взаимодействия в единицах постоянной Планка

5.Приведенные результаты следует детализировать, включить спинорные вычисления и сопоставить данный подход с результатами феноменологического анализа.