

## Симметричное по времени квантование релятивистских полей.

### 2. Электрослабая теория. Наблюдаемые эффекты СВК

Захид Закир<sup>1</sup>

#### Аннотация

В методе симметричного по времени квантования (СВК) релятивистских систем, основанном на интерпретации Штюкельберга-Фейнмана, операторы рождения-уничтожения квантов комплексных полей и безмассовых калибровочных полей автоматически нормально упорядочены и нет энергии и заряда вакуума (З. Закир 2023, статья 1). В данной второй статье рассмотрены применение СВК к массивным бозонным полям электрослабой теории и наблюдательные следствия СВК. Показано, что в вакууме этих полей нет нулевой энергии и нулевого заряда, и поэтому нет и их вклада в космологическую постоянную. Прямым наблюдательным следствием СВК является кроссинг-симметрия в физике частиц. Наблюдаемые эффекты, которые приписывались нулевой энергии вакуума, в действительности порождены полями реальных зарядов и нет свидетельств существования нулевой энергии вакуума фундаментальных полей. Этот факт противоречит предсказанию стандартной формулировке квантовой теории поля, но косвенно подтверждает СВК.

*Ключевые слова:* электрослабая теория, скалярный бозон, массивные калибровочные бозоны, нулевая энергия, лэмбовский сдвиг, эффект Казимира, космологическая постоянная

#### Содержание

<b>1. ВВЕДЕНИЕ</b> .....	1
<b>2. СИММЕТРИЧНОЕ ПО ВРЕМЕНИ КВАНТОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОСЛАБОЙ ТЕОРИИ</b> .....	2
2.1. КВАНТОВАНИЕ БОЗОННЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОСЛАБОЙ ТЕОРИИ .....	2
2.2. СВОБОДНЫЙ ГАМИЛЬТониАН: ОТСУТСТВИЕ НУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ И БЕЗМАССОВЫЙ ПРОПАГАТОР .....	3
<b>3. О НАБЛЮДАЕМЫХ СЛЕДСТВИЯХ СВК</b> .....	4
3.1. КРОССИНГ СИММЕТРИЯ В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ .....	4
3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ОТСУТСТВИЯ НУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ ПОЛЕЙ .	6
3.3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ ДЛЯ СВОБОДНЫХ ПОЛЕЙ .	7
3.4. ОТСУТСТВИЕ НУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НАРУШЕННОЙ СУПЕРСИММЕТРИИ .....	8
<b>4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	8
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	9

### 1. Введение

В первой статье [1] был сформулирован метод симметричного по времени квантования (СВК) и затем он был применён к квантовой теории поля и к теории струн. СВК состоит в последовательном следовании интерпретации Штюкельберга-Фейнмана [2,3] при квантовании релятивистских систем, ковариантная формулировка которых включает состояния отрицательной энергии. Было показано, что в СВК вакуум комплексных полей не содержит нулевой энергии и нулевого заряда. Поле фотонов и

<sup>1</sup> *Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент Узбекистан, zzakir@qgph.org, ORCID*

других безмассовые калибровочные поля также описываются в терминах комплексных полей, так как спиральность играет роль кирального заряда.

В данной второй статье сначала будет показано, что это относится и к полям электрослабой теории. Заряженные массивные бозоны  $W^\pm$  являются парой частица-античастица и в рамках СВК их вакуум не имеет нулевой энергии. Две поперечные компоненты нейтрального бозона  $Z_L, Z_R$ , также зарядово-сопряженные, так как спиральность играет роль кирального заряда. Поэтому в СВК вакуум для этих полевых степеней свободы также не имеет нулевой энергии.

Продольная компонента нейтрального бозона  $Z_\parallel$  появляется при калибровочном преобразовании вместо одной из компонент нейтрального скалярного поля. До этого две компоненты этого комплексного скалярного поля были зарядово-сопряженными и их квантование не привело бы к нулевой энергии. После спонтанного нарушения и калибровочного преобразования они приобретают разные массы. Однако, массы этим скалярным полям придаются за счёт членов взаимодействия, т.е. путём перенормировки массы. В свободном гамильтониане без вклада взаимодействий они по-прежнему остаются зарядово-сопряженными, хотя и одна из скалярных полей теперь фигурирует в составе продольной компоненты калибровочного бозона в виде  $Z_\parallel \sim \partial_\parallel \phi$ . Поэтому в СВК эти полевые степени свободы также не дают вклада в нулевую энергию вакуума.

При рассмотрении наблюдательных следствий СВК отмечается, что прямым следствием СВК является хорошо известное и широко применяемое в физике частиц кроссинг симметрия. Наблюдаемые эффекты же, которые ранее приписывались нулевой энергии вакуума, как давно известно, полностью объясняются полями реальных источников. В частности, Лэмбовский сдвиг есть следствие петлевых поправок и не имеет никакого отношения к флуктуациям гипотетического вакуумного внешнего поля, связанного с энергией нулевых колебаний в свободном гамильтониане. Точно также эффект Казимира есть следствие сил Ван дер Ваальса, возникающих от длинноволновой части флуктуирующего поля атомов в твёрдых телах. Поэтому в действительности нет свидетельств существования нулевой энергии вакуума полей Стандартной Модели (СМ). Это противоречит стандартной формулировке КТП, предсказывавшей их наличие, и находится в согласии только с СВК. То, что в СВК нет энергии вакуума свободных полей, решает проблему космологической постоянной в отношении таких вкладов.

В разделе 2 СВК применено к полям электрослабой теории, а разделе 3 рассмотрены следствия СВК для наблюдаемых эффектов. Более детальное обсуждение этих вопросов приводится в книге [4].

## 2. Симметричное по времени квантование в электрослабой теории

### 2.1. Квантование бозонных полей электрослабой теории

Рассмотрим в рамках СВК квантование полей электрослабой теории с локальной симметрией  $SU(2) \times U(1)$ . Если имеется пара частица-античастица, то в СВК античастица описывается как частица отрицательной энергии, идущая назад во времени и в такой теории нет нулевой энергии вакуума [1]. Проблема возникает только для истинно нейтральных частиц, у которых нет античастицы.

Полевые операторы двух поперечных компонент заряженного калибровочного поля  $W_L^-, W_R^+$  являются взаимно зарядово-сопряженными и их кванты ведут себя как частица-античастица. Две продольные компоненты этих двух заряженных полей  $W_\parallel^-, W_\parallel^+$ , появляющиеся взамен двум зарядово-сопряженным компонентам скалярного дублета  $\phi^\pm$ , также остаются взаимно зарядово-сопряженными. Поэтому при

квантовании в рамках СВК вакуум заряженных калибровочных полей  $W^\pm$  не содержит нулевой энергии и нулевого заряда.

Две поперечные компоненты нейтрального калибровочного поля  $Z_L, Z_R$ , будучи аналогами фотона, до придания им массы были взаимно зарядово-сопряжёнными, так как роль кирального заряда играла спиральность. Поскольку масса им придаётся путём включения членов взаимодействия, т.е. перенормировкой массы, то в их свободном гамильтониане, не содержащем членов взаимодействия, эти две полевые степени свободы по-прежнему остаются зарядово-сопряжёнными. Поэтому в СВК их вакуум также не содержит нулевой энергии.

В рамках СВК требуют специального рассмотрения продольная компонента нейтрального массивного векторного поля  $Z_\parallel$ , которая появляется взамен одной из двух компонент комплексного скалярного поля  $\phi^0$ , а также вторая компонента этого скалярного поля - хиггсовское поле  $\chi$ . Если эти две полевые степени свободы были бы независимыми и квантовались по отдельности, то в рамках СВК каждое такое поле без зарядово-сопряжённой компоненты приводило бы к нулевой энергии.

До калибровочного преобразования, исключившее одну из скалярных полей и породившее вместо него продольную компоненту массивного векторного поля  $Z_\parallel$ , эти две нейтральные бозонные степени свободы были зарядово-сопряжёнными компонентами комплексного скалярного поля  $\phi^0$ . После калибровочного преобразования же они приобретают разные массы и, на первый взгляд, перестают быть взаимно зарядово-сопряжёнными состояниями.

В действительности же наличие или отсутствие нулевой энергии вакуума относится исключительно к свойствам свободного гамильтониана, без вклада в этот гамильтониан членов взаимодействия ведущих к перенормировке масс, зарядов и операторов полей. Учёт этого обстоятельства снимает вопрос о возможности нулевой энергии нейтральных компонент полей электрослабой теории. Свободный гамильтониан электрослабой теории содержит лишь безмассовые поля, которые являются попарно зарядово-сопряжёнными и не приводят к нулевой энергии в свободном гамильтониане. Массы же появляются эффективно после учёта взаимодействий с калибровочными полями и самодействия скалярного поля, т.е. массовые члены – это по определению вклады членов взаимодействия. Эти массы пропорциональны константам взаимодействия и их включение в свободный гамильтониан не привносит нулевую энергию, которая не зависит от каких-либо констант взаимодействия.

Итак, при квантовании в рамках СВК полей электрослабой теории нулевая энергия и нулевой заряд отсутствует для безмассовых свободных полей СМ с «голыми» массами и зарядами, а дальнейшая перенормировка зарядов и появление эффективных масс не порождает нулевую энергию и нулевой заряд вакуума.

Ниже обсудим некоторые особенности такого подхода к квантованию полей и перенормировке в электрослабой теории (более подробное обсуждение см. в [4])

## 2.2. Свободный гамильтониан: отсутствие нулевой энергии и безмассовый пропагатор

В электрослабой теории производится сдвиг дублета комплексных скалярных полей путём добавления вещественной константы  $\eta$ . Этот сдвиг, через члены взаимодействия,

придаёт эффективные массы  $\delta m_{(i)}$  поперечным физическим компонентам калибровочных полей  $W^\pm, Z^0$  и четырём скалярным полям.

Эти эффективные массы пропорциональны константам взаимодействия и в диаграммах для свободных пропагаторов безмассовых квантов появляются как двухточечные вершины взаимодействия, разделяющие мировые линии на две части.

Затем в электрослабой теории производится калибровочное преобразование, исключаящее три степени свободы скалярных полей, а вместо них появляются три продольные компоненты калибровочных полей  $W^\pm, Z^0$ .

Однако, как только калибровочные бозоны становятся массивными, их пропагаторы перестают удовлетворять условиям перенормируемости, так как растут с ростом импульса быстрее, чем допустимо. Эта трудность обходится введением в лагранжиан специально подобранных членов, фиксирующих калибровку. Тогда в лагранжиане появляются духовые поля, в том числе фермионные, и теория существенно усложняется.

В рамках СВК, как было показано в предыдущем разделе, появляется другая, более простая и ясная с физической точки зрения, возможность удовлетворения условиям перенормируемости, обеспечивая одновременно и отсутствие нулевой энергии. Для этого нам достаточно, как обычно и делается в КТП, вначале оперировать только со свободным гамильтонианом, без каких-либо членов взаимодействия.

Дело в том, что если в «голый» лагранжиан включаются двухточечные члены взаимодействия лишь потому, что ведут себя как массовый член, то встаёт вопрос: а почему также не включаются трёхточечные и четырёхточечные члены взаимодействия, имеющие аналоги в этом же лагранжиане?

Поэтому если вопросы энергии вакуума и построения свободных пропагаторов рассматривать на базе свободного гамильтониана, то из-за попарной зарядовой сопряжённости полей нулевая энергия не появится. Вдобавок, из-за того, что свободные пропагаторы калибровочных бозонов остаются такими же, как для безмассовых полей, условия перенормируемости выполняются как обычно. То обстоятельство, что при перенормировке массы калибровочные бозоны приобретают эффективную массу, не влияет на их поведение на очень малых расстояниях, где они ведут себя как безмассовые.

Проблемы с перенормируемостью имеют место только для векторных бозонов с затравочной или «голой» массой  $m_0$  в свободном гамильтониане, которая и меняет поведение пропагаторов при высоких энергиях. А у калибровочных бозонов с эффективной массой  $\delta m$  свободный пропагатор не зависит от этой добавки, возникающей лишь при учёте взаимодействий. Полный пропагатор же входит лишь в древесные диаграммы с перенормированными зарядами и растёт при больших внешних импульсах, что уже не имеет отношения к перенормируемости.

### 3. О наблюдаемых следствиях СВК

#### 3.1. Кроссинг симметрия в физике частиц

В прежней стандартной трактовке КТП, основанной на введении состояний только положительной энергии, операторы частиц отрицательной энергии  $a_{-k}$  и  $a_{-k}^*$  исключались путём замены «вручную» на операторы античастиц положительной энергии. При этом такая замена делалась прямо в операторах полей:  $a_{-k}^* \rightarrow b_k$ ,  $a_{-k} \rightarrow b_k^*$ , что затем приводило к проблемам в произведениях полевых операторов. Затем и эти проблемы преодолевались «вручную», расставляя операторы в том порядке, который нужен для подгонки теории под эксперименты.

В СВК же, как и в одной из её практически используемых в физике частиц форм - перекрёстной (или кроссинг) симметрии, указанная выше замена операторов

включает также и замену начальных и конечных состояний, что ведёт к нетривиальным следствиям для произведений операторов. Поэтому здесь требуются осторожность и более аккуратные определения. В частности, все замены операторов  $a_{-k}$ ,  $a_{-k}^*$  и их произведений на операторы античастиц  $b_k^*$ ,  $b_k$  и их произведения должны быть согласованы с условиями кроссинг-симметрии.

Кроссинг-симметрия позволяет из выражения для амплитуды одного процесса сразу же получать амплитуды других «родственных» процессов. Благодаря этой симметрии частицу в начальном (конечном) состоянии с 4-импульсом  $+p_\mu$  можно перевести в конечное (начальное) состояние с 4-импульсом  $-p_\mu$  и, изменив направление эволюции во времени на обратную, считать описанием античастицы:

$$A + B \rightarrow C + D, \quad A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D, \quad A + \bar{D} \rightarrow C + \bar{B}. \quad (1)$$

Тем самым, кроссинг-преобразование, состоящее из поворота мировой линии вокруг вершины в диаграмме с переводом в другой световой конус, изменений знака 4-импульса и направления временной эволюции, превращает частицу в античастицу (и наоборот).

При кроссинг-преобразовании изменение знака энергии частицы и изменение знака интервала времени компенсируют друг друга, что и оставляет положительным знак энергии полученной античастицы. При этом частицы движутся по направлению стрелки в диаграмме, а античастица - в обратном направлении. Тем самым линия частицы, направленная в прошлое, соответствует античастице, идущей в будущее.

При этом СВК, а значит и кроссинг-преобразование, применяются к отдельным линиям в фейнмановской диаграмме, независимо от других линий, что и отличает их от *CPT*-преобразования, относящегося ко всей диаграмме в целом.

Для примера рассмотрим связь между амплитудами рассеяния электронов и позитронов в кулоновском поле. Матричный элемент перехода позитрона:

$$S_{fi} = ie \int d^4x \langle -p_i, s_i | \bar{\psi}(x) \gamma^0 \psi(x) | -p_f, s_f \rangle A_0(x). \quad (2)$$

при подстановке полевых операторов принимает вид:

$$S_{fi} = - \sum_{p,s} \langle -p_i, s_i | b_{-p,s}^+ b_{-p,s} | -p_f, s_f \rangle \tilde{S}_{fi}, \quad (3)$$

где  $\tilde{S}_{fi}$  - все прочие множители. В то же время, после кроссинг-преобразования амплитуды для рассеяния электрона, превращающего её в амплитуду для позитрона, получим:

$$S_{fi} = \sum_{p,s} \langle p_f, s_f | d_{p,s}^+ d_{p,s} | p_i, s_i \rangle \tilde{S}_{fi}. \quad (4)$$

Из сравнения двух выражений, (3) и (4), получаем:

$$- \langle -p_i, s_i | b_{-p,s}^+ b_{-p,s} | -p_f, s_f \rangle = \langle p_f, s_f | d_{p,s}^+ d_{p,s} | p_i, s_i \rangle, \quad (5)$$

что представляет собой матричную форму операторного соотношения для фермионов, следующая из двух форм их гамильтониана.

Согласование в СВК правил квантования с кроссинг-симметрией, являющейся фундаментальной симметрией физики частиц, ведёт к ряду изменений, которые вместе с рассмотренными выше ведут к тому, что СВК принимает форму *кроссинг-*

симметричного квантования. Следствия для взаимодействующих полей, включая уточнения в определениях причинных пропагаторов частиц, правил упорядочения произведений операторов и правил диаграммной техники рассматриваются в [4].

### 3.2. Экспериментальные подтверждения отсутствия нулевой энергии полей

Квантовые флуктуации полей реальных источников, таких как электроны и протоны, ведут ко многим наблюдаемым эффектам. Предсказания КТП с такими реальными источниками согласуются с экспериментами и часто точность такого согласия беспрецедентна.

А. *Лэмбовский сдвиг*. В частности, лэмбовский сдвиг определяется энергией взаимодействия  $H_I^{(r)} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{A}_{(r)}$ , где  $\mathbf{A}_{(r)}$  описывает виртуальные фотоны, а  $\mathbf{j}$  – ток электронов и протонов. Виртуальные фотоны являются возбуждённым состоянием электромагнитного поля, порождаемого реальными источниками и они не имеют отношения к гипотетическим вакуумным внешним полям  $\mathbf{A}_{(0)}$ , ассоциированным с нулевой энергией вакуума  $H_0^{(0)}$ . Эксперименты показали, что наблюдаемое значение лэмбовского сдвига  $\Delta E_I^{\text{exp}}$  полностью объясняется вкладом  $\Delta E_I^{(r)}$  виртуальных фотонов от реальных источников:

$$\Delta E_I^{\text{exp}} = \Delta E_I^{(r)}, \quad (6)$$

В прежней же стандартной формулировке КТП нулевые флуктуации вакуума полей должны были давать дополнительный вклад в лэмбовский сдвиг. В данном случае нулевая энергия электромагнитного поля  $H_0^{(0)}$ , которая там была неизбежна, должна была порождаться флуктуирующими вакуумными полями  $\mathbf{E}_{(0)}$ ,  $\mathbf{B}_{(0)}$ :

$$H_0^{(0)} = 2 \int d^3k \frac{1}{2} \omega_k = \int d^3x \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{(0)}^2 + \mathbf{H}_{(0)}^2) \quad (7)$$

и в полной энергии был бы вклад от энергии взаимодействия зарядов с этими вакуумными полями  $H_I^{(0)} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{A}_{(0)}$ , где  $\mathbf{E}_{(0)}$ ,  $\mathbf{B}_{(0)}$  напряжённости поля  $\mathbf{A}_{(0)}$ . Так как эта дополнительная энергия взаимодействия  $H_I^{(0)}$  входит в гамильтониан взаимодействий *аддитивно* с энергией взаимодействия  $H_I^{(r)}$  этих же частиц с полями реальных источников  $\mathbf{A}_{(r)}$ , то вклад нулевых флуктуаций  $\Delta E_I^{(0)}$  должен был быть суммирован с вкладом реальных источников  $\Delta E_I^{(r)}$ .

Поскольку оба вклада одного порядка (из-за чего их обычно и путали), то предсказываемые сдвиги энергий фактически удваиваются:

$$\Delta E_I = \Delta E_I^{(0)} + \Delta E_I^{(r)} \approx 2\Delta E_I^r. \quad (8)$$

Наблюдения же свидетельствуют о существовании лишь однократного вклада, который следует отнести к вкладу реальных источников  $\Delta E_I^r$ , так как этот вклад не может быть игнорирован.

Б. *Эффекта Казимира*. В случае эффекта Казимира наблюдаемый эффект также полностью объясняется вкладом полей реальных источников, которыми являются флуктуирующие атомы кристалла, генерирующие флуктуирующие поля

излучения. Как хорошо известно, теория сил Ван-дер-Ваальса успешно описывает эффект Казимира, включая зависимости от температуры, объясняя этот эффект как следствие поля излучения атомов при их колебаниях в кристалле, в том числе и при колебаниях при «нулевой температуре» кристалла. Поскольку вклады от чисто вакуумных полей из  $H_I^{(0)}$  того же порядка и должны суммироваться с излучением атомов ( $H_I^{(r)}$ ), то прежняя трактовка с нулевой энергией и в этом случае даёт вдвое большее значение эффекта Казимира, чем наблюдается.

Таким образом, вклады реальных источников, которых нельзя игнорировать, полностью объясняют результаты наблюдений обоих эффектов – лэмбовского сдвига и эффекта Казимира. Поэтому эксперименты исключают нулевые флуктуации вакуума и только СВК находится в согласии с этими экспериментами.

Однако, об этих же экспериментах был создан миф, будто бы они подтвердили обратное утверждение, что нулевая энергия вакуума в них якобы явно проявилась. Этот миф затем укоренился в научной литературе и вошёл в учебники по КТП. В действительности же этот миф основан на логическом трюке, когда явление сначала объясняется желанной (но нереальной) причиной, игнорируя реальную причину. Затем, когда это же явление всё же приходится объяснять его реальной причиной, умалчивается о «доказанном» чуть ранее вкладе желанной причины, так как эта добавка нарушила бы согласие теории с экспериментом.

В традиционной же научной методологии, если у явления предполагаются две одновременно влияющие причины, то следствия их влияния также должны быть учтены одновременно. Если же при этом явление полностью объясняется только одной из причин, существование которой не вызывает сомнений, то вторая причина должна считаться отсутствующей и потому опровергнутой. В нашем случае реальной причиной, которую нельзя игнорировать, и которая достаточна для объяснения наблюдений, есть поля реальных источников. Влияние же нулевых флуктуаций вакуумных полей, без которого всё и так объясняется, есть миф.

### 3.3. Решение проблемы космологической постоянной для свободных полей

Как показывают наблюдения, космологическая постоянная очень мала и СВК естественным образом объясняет этот наблюдательный факт в части отсутствия вклада от вакуума свободных фундаментальных полей.

Но этот факт был загадочным в прежней формулировке КТП с большим вкладом нулевой энергии полей СМ. Все попытки сокращения этой энергии в рамках стандартной формулировки КТП только усугубляли ситуацию, потребовав введения всё возрастающего числа нереалистичных гипотез.

При этом существование гравитации с самого начала делало неприемлемы попытки устранения расходящейся нулевой энергии искусственными приёмами, типа «нормального упорядочения» или сдвига точки отсчёта энергии. В этой связи СМ, опиравшаяся на стандартную формулировку КТП, также оказывалась в принципе несостоятельной, что было странно из-за её высочайшей эффективности.

Поэтому исчезновение нулевой энергии вакуума полей в СВК свидетельствует о внутренней самосогласованности и верности физических идей и принципов, лежащих в основе всей релятивистской квантовой теории.

В то же время это исключает лишь вклад вакуума свободных полей и поэтому не означает полное решение проблемы космологической постоянной. Другие возможные вклады, такие как вклады конденсатов полей и другие непертурбативные вклады полей требуют дальнейшего исследования.

Отметим, что и в теории взаимодействующих полей СВК приводит к автоматическому нормальному упорядочению многих произведений операторов, что исключает расходящиеся петлевые вклады в энергию вакуума. Этот факт, тем самым, решает проблему космологической постоянной также и в части вклада вакуума взаимодействующих полей, по крайней мере в рамках теории возмущений.

### 3.4. Отсутствие нулевой энергии при нарушенной суперсимметрии

Возможное существование суперсимметрии, симметрии между бозонами и фермионами, позволяющее решить проблемы с расходимостями в теории поля и проблем объединения в физике частиц, было одной из наиболее обнадеживающих и широко развиваемых гипотез за последние полвека.

Были три ожидания от этой новой симметрии: взаимное сокращение нулевых энергий бозонов и фермионов, частичное сокращение расходимостей в петлевых диаграммах, а также возможности создания более простых моделей объединения полей и частиц. Здесь остановимся только на первом из этих надежд – на возможном сокращении нулевых энергий.

Идея о возможности сокращения нулевых энергий бозонов и фермионов следует из того факта, что при стандартном квантовании фермионных полей возникала не обычная нулевая энергия, а нулевая энергия отрицательного знака!

Однако, последовательное квантование фермионов в рамках СВК показало, что на самом деле фермионы в релятивистской теории не имеют нулевой энергии вообще. В прежней трактовке (отрицательная) нулевая энергия появлялась из-за того, что операторы античастиц вводились в фермионные полевые функции вручную. В СВК же переход к античастицам производится либо кроссинг-преобразованием отдельных мировых линий частиц, либо *CPT*-преобразованием всей диаграммы и эти операции не ведут к нулевой энергии. В диаграммах конкретных процессов переход к античастицам делается именно так, но такой переход не меняет гамильтониан именно из-за указанных симметрий гамильтониана.

Таким образом, из трёх основных аргументов в пользу суперсимметрии один, связанный с нулевыми энергиями, оказался в действительности неактуальным.

## 4. Заключение

В первой статье [1], в которой были сформулированы основные положения СВК и рассмотрены его применения к релятивистским полям и струнам, было показано, что вакуум комплексных полей не содержит нулевой энергии. При этом отрицательный знак потока вероятности для частиц отрицательной энергии был связан с тем фактом, что их мировые линии, согласно интерпретации Штюкельберга-Фейнмана, направлены назад во времени.

В данной, второй статье, при рассмотрении применения СВК к электрослабой теории, показано, что основные результаты СВК, в частности, отсутствие нулевой энергии вакуума, также сохраняют свою силу.

Во-первых, все компоненты векторного поля, описывающего заряженные бозоны  $W^\pm$ , как и две поперечные компоненты нейтрального калибровочного бозона  $Z_\perp^0$ , остаются попарно зарядово-сопряжёнными и после приобретения массы. В СВК этого достаточно для отсутствия нулевой энергии в вакууме их полей. Особого внимания потребовали только продольная компонента  $Z_\parallel^0$ , возникающая вместо одной из двух компонент комплексного нейтрального скалярного поля, а также остающаяся вторая компонента этого поля.



С одной стороны, до приобретения масс обе нейтральные полевые степени свободы были взаимно зарядово-сопряжёнными компонентами комплексного безмассового скалярного поля. Поэтому в рамках СВК «голый» гамильтониан таких полей, где нет вкладов от членов взаимодействия, не содержит нулевой энергии.

Во-вторых, массы частиц этих полевых степеней свободы возникают в результате взаимодействий. Поэтому они являются эффективными массами, будучи такими же добавками за счёт взаимодействий, какими являются добавки к «голым» массам от петлевых диаграмм, делающие последние перенормированными массами. Но эти добавки, пропорциональные константам взаимодействия, не имеют отношения к нулевой энергии вакуума и, естественно, не порождают такой энергии.

Итак, поскольку используемые в теории гамильтонианы и пропагаторы массивных частиц являются «перенормированными» в указанном выше смысле, то в СВК стандартная форма электрослабой теории практически не меняется. Появление же эффективных масс за счёт взаимодействий и калибровочное преобразование полей, перегруппирующее их степени свободы, не ведут к нулевой энергии в свободном гамильтониане.

В статье также рассмотрен тот факт, что СВК, исключая нулевую энергию вакуума полей  $SM$ , находится в согласии с известными экспериментами. Дело в том, что результаты всех экспериментов по эффектам, ранее приписанным нулевой энергии, полностью объясняются через вклады полей реальных зарядов. Этот факт подтверждает СВК, где таких вкладов отсутствуют, и противоречит стандартной форме КТП, где такие вклады предсказывались.

Отсутствие в СВК и в экспериментах нулевой энергии вакуума свободных полей решает и проблему космологической постоянной в части таких вкладов.

Более детальное рассмотрение СВК и его следствий приводится в книге [4].

## Литература

1. Закир З. (2023) *Квант. и грав. физ.*, **4:023-8181**.
2. Stueckelberg E.C.G. (1941) *Helv. Phys. Acta*, **14**, 588.
3. Feynman R. (1949) *Phys. Rev.*, **76**, 749.
4. Закир З. (2023) *Конечная квантовая теория поля*. ЦТФА, Т.