

Проблема тривиальности в квантовой теории поля и Стандартной Модели

В. Е. Рочев

10 декабря 2019 г.

Содержание

“Mean field expansion, regularization issue and multiquark functions in Nambu–Jona-Lasinio model“

Aydan A. Garibli, Rauf G. Jafarov and Vladimir E. Rochev

(Symmetry (2019) 11: 668)

J. of Phys., (2000), A33, 7379–7406;

Centr. Eur. J. of Phys., (2004), 2: 367–381;

Известия вузов. Физика, (2006), 49: 20–31;

J. of Phys., (2009), A42: 195403;

ТМФ, (2009), 159: 81–95;

ЯФ (2013), 76: 1149–1156.

”Asymptotic behavior in quantum-field models from Schwinger-Dyson equations“

V.E. Rochev

J. of Phys., (2011), A44: 305403;

J. of Phys.,(2012), A45: 205401;

J. of Phys., (2013), A46: 185401;

ЯФ, (2015),78: 475-478;

Int.J.Mod.Phys.Conf.Ser., (2018), 47: 1860095;

Eur.Phys.J. (2018), C78: 927.

Полюс Ландау в КЭД

Л.Д. Ландау, А.А. Абрикосов, И.М. Халатников. (1954).
 ДАН, 95, 1177.

Л.Д. Ландау, И.Я. Померанчук. (1955). ДАН, 102, 489.
 Асимптотическое поведение пропагатора фотона

$$D(p) \propto \frac{1}{p^2} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{\alpha}{3\pi} \log\left(\frac{p^2}{m_e^2}\right)\right]},$$

т.е., кроме нормального полюса в точке $p^2 = 0$ пропагатор фотона имеет "призрачный" полюс в точке

$$M_L^2 = m_e^2 e^{\frac{3\pi}{\alpha}}$$

$$M_L \cong 10^{280} m_e$$

Подобные нефизические полюса вскоре были обнаружены в других моделях: в модели скалярного поля с самодействием ϕ^4 и в модели Юкавы.

Теория с полюсом Ландау не может быть самосогласованной, так как полюс Ландау означает наличие нефизических духовых полей, приводящих к нарушению причинности.

Ландау оценивал положение дел весьма пессимистично и сделал очень категорический вывод:

”Операторы ψ , содержащие ненаблюдаемую информацию, должны исчезнуть из теории; и поскольку гамильтониан можно построить только из операторов ψ , мы с необходимостью приходим к выводу, что гамильтонов метод изжил себя и должен быть похоронен, конечно, со всеми почестями, которые он заслужил.“

Л.Д. Ландау. ”О фундаментальных проблемах.”
(в сб. ”Теоретическая физика в XX веке”, 1960)

Сокращение полюса Ландау

P.J. Redmond.(1958). Phys. Rev., 112, 1404

Н.Н. Боголюбов, А.А. Логунов, Д.В. Ширков. (1959). ЖЭТФ, 37, 805.

Основная идея метода состоит в применении представления Челлена-Лемана для пропагатора фотона. Боголюбов, Логунов и Ширков вычисляли в том же приближении, что и группа Ландау, но не пропагатор фотона, а его спектральную функцию, и затем, используя представление Челлена-Лемана, определили пропагатор, в котором полюс Ландау сократился.

Проблемы:

- 1) неоднозначность процедуры;
- 2) неизвестны динамические причины появления сокращающего члена.

Полюса Ландау появляются при вычислении перенормированных амплитуд всеми стандартными методами: при ренормгрупповом суммировании, в главном порядке $1/N$ -разложения, в квазиклассическом разложении и т.д.

После работ К. Уилсона и др. в семидесятых годах прошлого века была сформулирована концепция тривиальности: все четырехмерные перенормируемые модели, не обладающие свойством асимптотической свободы, являются внутренне противоречивыми и, следовательно, тривиальными.

В восьмидесятых были доказаны строгие теоремы о том, что скалярная теория поля ϕ^4 на решетке при $d \geq 4$ не является теорией с взаимодействием в непрерывном пределе (в пределе нулевого шага решетки), т. е. теория тривиальна.

Aizenman, M. (1981). Proof of the triviality of ϕ_d^4 field theory and some mean field features of Ising model for $d > 4$. Phys.Rev.Lett., 47: 1-4.

Fröhlich, J., (1982). On the triviality of $\lambda\phi_d^4$ theories and the approach to the critical point in $d \geq 4$ dimensions. Nucl.Phys., B 200: 281-296.

Fernandez, R., Fröhlich, J. and Sokal, A.D. (1992). Random Walks, Critical Phenomena and Triviality in Quantum Field Theory (Springer, Berlin).

За пять лет до выхода работы Фрелиха основатель аксиоматического подхода в квантовой теории поля Артур Уайтман, вдохновленный успехами конструктивной теории поля при $d = 2$ и $d = 3$, заявил:

“I would like to offer a theoretical prediction at the 5% confidence level: within five years there will be a rigorous construction of the solutions of $\lambda(\phi^4)_4$ and spin-1/2 quantum electrodynamics in four-dimensional space-time.”

A.S. Wightman (1977). “Should We Believe in Quantum Field Theory?”

Уайтман оказался хорошим предсказателем, но результат был обескураживающим.

Полюса Ландау в электрослабом секторе (для абелевого гиперзаряда и в секторе Хиггса-Юкавы) являются одной из главных принципиальных проблем СМ.

$$L_{int} = -\frac{\lambda}{4}(\Phi^\dagger\Phi)^2 :$$

$$\beta(\lambda) = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{3}{2\pi^2} \lambda^2 \rightarrow \frac{1}{\lambda(t)} = \frac{1}{\lambda_r} - \frac{3}{2\pi^2} t$$

$$(t = \ln \frac{p^2}{\mu^2})$$

Возникает принципиальный вопрос: Является ли Стандартная Модель самосогласованной квантовополевой теорией?

Что делать?

Существуют три основных подхода к решению проблемы.

1) Проблемы нет (Наиболее распространённая точка зрения):

СМ не является фундаментальной теорией, но является хорошей эффективной теорией вплоть до некоторого масштаба Λ .

Далее в игру вступает некая неизвестная пока новая физика: GUT, SUSY, некоммутативная теория поля или что-нибудь подобное, решающее проблему полюсов Ландау.

2) Надо искать “внутренние резервы” в рамках СМ.

Поскольку все стандартные методы так или иначе привязаны к теории возмущений (т.е., являются тем или иным частичным суммированием ряда теории возмущений (РТВ)), необходимо развивать методы радикального выхода за рамки теории возмущений (либо “полного” суммирования РТВ).

Одна из наиболее продвинутых попыток такого рода:

И.М. Суслов (Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ (1999 – 2011))

Обзор:

Тернистый путь теории поля: от тривиальности до взаимодействия и конфайнмента. (arXiv: 1506.06128v1 [hep-ph] (2015))

“Суммирование ряда возмущений для функции Гелл-Манна–Лоу $\beta(\lambda)$ для ϕ^4 теории приводит к асимптотике $\beta(\lambda) = \beta_\infty \lambda^\alpha$ при $\lambda \rightarrow \infty$, где $\alpha \approx 1$ для $d = 2, 3, 4$. Возникает естественная гипотеза, что асимптотическое поведение $\beta(\lambda) \sim \lambda$ для всех d .”

“Тот же результат для асимптотики получен для специальной решеточной регуляризации, в то время как использование высокотемпературных разложений позволяет рассчитать полную β -функцию. Как следствие, β -функция четырехмерной ϕ^4 -теории оказалась безальтернативно имеющей линейную асимптотику на бесконечности. Аналогичная ситуация справедлива для КЭД.”

“Применение этих идей к КХД показывают, что вильсоновская теория конфайнмента не является чисто иллюстративной, но имеет прямое отношение к реальной ситуации. Как результат, проблему доказательства конфайнмента можно считать решенной, по крайней мере, на физическом уровне строгости.”

Дискуссия:

Казаков, Д.И., Попов, В.С. (2002) ЖЭТФ, 122: 675-695

Суслов, И.М. (2002) ЖЭТФ, 122: 696-699

Казаков, Д.И., Попов, В.С. (2003) Письма в ЖЭТФ, 77: 547-551

Суслов, И.М. (2005) Расходящиеся ряды теории возмущений.
ЖЭТФ, 127: 1350-1402

Эпиграф:

“Расходящиеся ряды – это изобретение дьявола...” (Н. Абель, 1828)

Полная цитата:

“Расходящиеся ряды – это изобретение дьявола, и постыдно основывать на них какое бы то ни было доказательство.”

3) Проблему тривиальности может решить концепция Асимптотбезопасности (Asymptotic safety).

Асимптотическая безопасность:

Weinberg, S. (1979). “Ultraviolet divergences in quantum theories of gravitation” in: General Relativity: Einstein Centenary Survey, (Cambridge University Press, Cambridge). 790-831.

Weinberg, S. (2009). “Living with Infinities.”, 16pp., e-Print: arXiv:0903.0568 [hep-th] (see p.14).

Асимптотбезопасность была предложена в качестве возможной панацеи для работы с неперенормируемыми и не-асимптотически свободными взаимодействиями.

Определение асимптотбезопасности:

Litim, D.F. and Sannino, F. (2014)

Asymptotic safety guaranteed.

JHEP, 1412: 178; e-Print: arXiv:1406.2337 [hep-th].

“Asymptotic safety is the scenario which generalizes the notion of a free, Gaussian, ultraviolet fixed point to an interacting, non-Gaussian one. An asymptotically safe UV fixed point then acts as an anchor for the renormalization group evolution of couplings, allowing them to approach the high-energy limit along well-defined RG trajectories without encountering divergences such as Landau poles.”

В терминах функции Гелл-Манна–Лоу:

$$\beta(\alpha) \equiv \partial_t \alpha = A\alpha - B\alpha^2,$$

т.е. существуют два типа фиксированных точек:
тривиальная $\alpha_* = 0$, и нетривиальная $\alpha_* = A/B$.

Асимптотбезопасность в гравитации:

Niedermaier, M. and Reuter, M. (2006)

The Asymptotic Safety Scenario in Quantum Gravity.

Living Reviews in Relativity, 9:5

“Presently the evidence for asymptotic safety in quantum gravity comes from the following very different computational settings: the $2 + \epsilon$ -expansion, perturbation theory of higher derivative theories, a large- N expansion in the number of matter fields, the study of symmetry truncations, and that of truncated functional flow equations. Arguably none of the pieces of evidence is individually compelling but taken together they make a strong case for asymptotic safety.”

A. Ashtekar, M. Reuter and C. Rovelli (2014)
From General Relativity to Quantum Gravity
e-Print: arXiv:1408.4336 [gr-qc]

“QEG (Quantum Einstein Gravity) indeed seems to possess a NGFP (Non-Gaussian Fixed Point) suitable for the Asymptotic Safety construction. Although a complete proof is not within reach, by now there is highly nontrivial evidence for a NGFP (Non-Gaussian Fixed Point) on the full (un-truncated) theory space, rendering QEG (Quantum Einstein Gravity) non-perturbatively renormalizable.”

M. Shaposhnikov, C. Wetterich (2009).

Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass.

Phys.Lett. B683 (2010) 196-200; e-Print: arXiv:0912.0208 [hep-th]

М. Е. Шапошников (2012). Асимптотическая безопасность гравитации и масса бозона Хиггса.

ТМФ, 170: 280-290.

“Если гравитация является асимптотически безопасной теорией, то окончательной теорией может оказаться просто Стандартная модель (минимально дополненная несколькими легкими частицами с целью согласовать массы и осцилляции нейтрино, темное вещество и барионную асимметрию Вселенной) плюс гравитация. Если это действительно так, то массу бозона Хиггса можно предсказать, $m_H = m_{min} \simeq 130$ ГэВ с точностью всего до нескольких ГэВ, или ограничить интервалом $m_{min} < m_H < m_{max} \simeq 174$ ГэВ.”

A. Eichhorn and A. Held (2019)

Towards implications of asymptotically safe gravity for particle physics.
in: An Alpine LHC Physics Summit (ALPS 2019); e-Print:
arXiv:1907.05330 [hep-th]

The 1-loop contribution to the running of the Abelian hypercharge coupling is screening. Hence, in the Standard Model without gravity, it develops a transplanckian triviality problem. Its 1-loop beta function, including a gravitational contribution f_g , reads

$$\beta_{g_Y} = -f_g g_Y + \frac{41}{6 \cdot 16\pi^2} g_Y^3$$

Approximations for f_g , obtained in systematic truncations of the functional Renormalization Group, find $f_g \geq 0$. If it is non-vanishing, the gravitational contribution therefore is antiscreening.

“We have reviewed recent results which hint at a potential quantum-gravity induced UV-completion of the Standard Model. This potential regime of quantum scale-invariance could offer a mechanism to solve the Landau-pole problem.”

D. Barducci, M. Fabbrichesi, C.M. Nieto, R. Percacci, V. Skrinjar.
(2018)

In search of a UV completion of the standard model ? 378,000 models that don't work.

JHEP 1811: 057; e-Print: arXiv:1807.05584 [hep-ph]

Reply:

A. Eichhorn (2019):

“It is difficult to reconcile with a perturbative nature of the extension of Barducci et al, at least if one also insists on solving the U(1) triviality problem.”

J. F. Donoghue (2019) A Critique of the Asymptotic Safety Program
e-Print: arXiv:1911.02967 [hep-th]

“I argue, with examples, that the running of Λ and \mathbf{G} found in Asymptotic Safety are not realized in the real world”.

Заклучение.

“...Физика высоких энергий сегодня находится в тумане, скрывающем от нас горизонты познания. Но рано или поздно туман рассеется и мы увидим те пути, по которым пойдёт будущая наука.”

Д.И. Казаков (2019). “Перспективы физики элементарных частиц”, УФН, 189: 387