Аксионы

ПОДГОТОВИЛ СТУДЕНТ ГРУППЫ М23-114

КИСЕЛЁВ КИРИЛЛ

Математическая интерлюдия: Симметрии и их нарушение

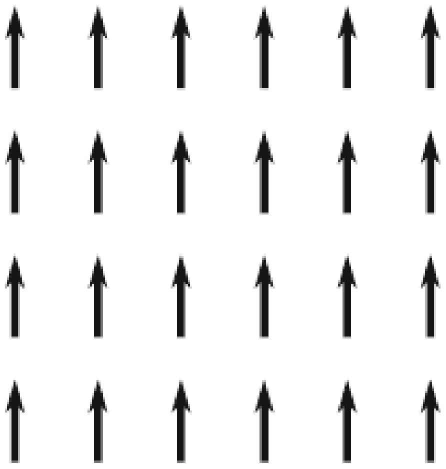
Явное нарушение симметрии

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)^* - \frac{m^2}{2}\phi\phi^* - \epsilon\phi^2$$

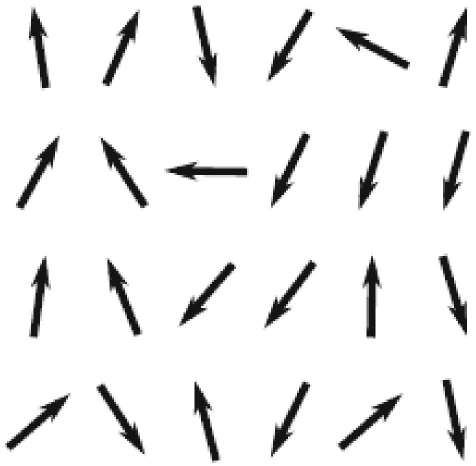
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)^* - \frac{m^2}{2}\phi\phi^* - \epsilon \mathrm{Re}^2(\phi)$$

Спонтанное нарушение симметрии

Теорема Голдстоуна: при спонтанном нарушении симметрии системы в ней появляются безмассовые частицы – намбу-голдстоуновские бозоны.



$T<T_C$



$T>T_C$

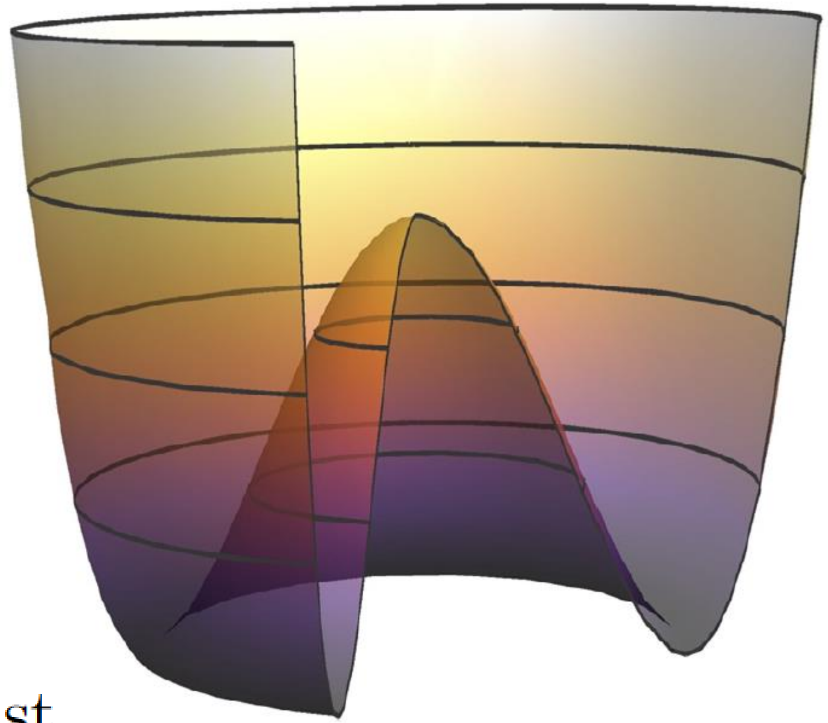
В ферромагнетиках при температуре меньшей, чем температура Кюри T_C, наблюдается спонтанное нарушение симметрии.
Малые локальные возмущения в состоянии с нарушенной симметрией вызовут «спиновую волну», которую можно описать как безмассовую псевдо-частицу.

Goldstone, J. Field theories with «Superconductor» solutions. *Nuovo Cim* **19**, 154–164 (1961). https://doi.org/10.1007/BF02812722
Nambu Y., Jona-Lasinio G. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I //Physical review. – 1961. – Т. 122. – №. 1. – С. 345.

Пример спонтанного нарушения симметрии

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)^* - \left(-\frac{\mu}{2}\phi\phi^* + \frac{\lambda}{4}(\phi\phi^*)^2 \right)$$

U(1)-симметрия: $\varphi \to e^{i\alpha}\varphi \;\Rightarrow\; \mathcal{L} \to \mathcal{L}$



$$\phi = v + \phi_1(x) + i\phi_2(x), v = \frac{\mu}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi_1)(\partial^\mu \phi_1) - \mu^2 \phi_1 \phi_1 + \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi_2)(\partial^\mu \phi_2) + \text{const}$$

Пример спонтанного нарушения симметрии

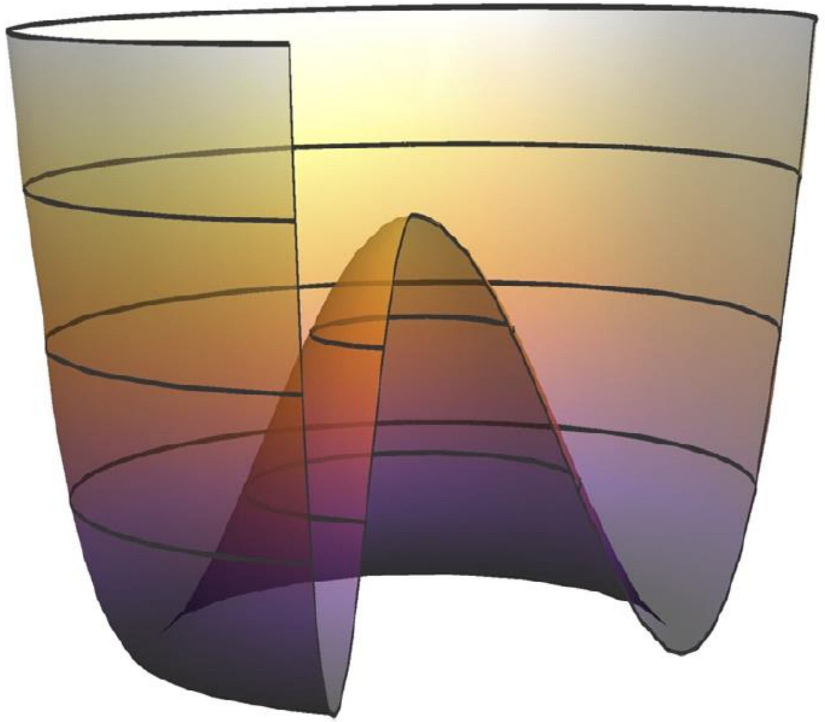
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)^* - \left(-\frac{\mu}{2}\phi\phi^* + \frac{\lambda}{4}(\phi\phi^*)^2 \right)$$

U(1)-симметрия: $\varphi \to e^{i\alpha}\varphi \;\Rightarrow\; \mathcal{L} \to \mathcal{L}$

$$\phi = \rho(x) e^{i\theta(x)}$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \rho)(\partial^\mu \rho) + \frac{\mu}{2}\rho^2 - \frac{\lambda}{4}\rho^4 + \rho^2(\partial_\mu \theta)(\partial^\mu \theta)$$

(спонтанное нарушение симметрии $\rho = v + \chi$)



Общий случай возникновения намбу-голдстоуновских бозонов

Пусть гамильтониан $\mathcal{H}$ (и лагранжиан тоже) полей φ симметричен относительно преобразований какой-то группы G с N генераторами $\hat{T}^a$:

$$\varphi \to e^{i\theta_a \hat{T}^a}\varphi \Rightarrow \mathcal{H} \to \mathcal{H}$$

В общем случае вакуумное состояние φ_0 симметрично только относительно некоторой подгруппы G (с $0 \le M \le N$ генераторами), тогда для этих генераторов ($a \le M$)

$$e^{i\theta_a \hat{T}^a}\varphi_0 \approx \left(\hat{1} + i\theta_a \hat{T}^a\right)\varphi_0 = \varphi_0 + i\theta_a \hat{T}^a \varphi_0 = \varphi_0, \quad \text{или } \hat{T}^a\varphi_0 = 0$$

Геометрически это означает, что в подпространстве полей φ, инвариантном относительно группы G, существует некоторая гиперповерхность размерности (N-M), на которой $\mathcal{H} = \mathrm{const}$.

Генераторы преобразований поля φ, которые обеспечивают «перемещение» по этой поверхности и будут соответствовать намбу-голдстоуновским бозонам (их количество N-M).

Конец математической интерлюдии

Структура сильного взаимодействия

$$\mathcal{L}_{\text{quark}} = i\bar{Q}\not{D}Q \qquad \mathrm{D}_\mu = \ldots + g_s \frac{\hat{\lambda}_a}{2} G^a_\mu$$

$$\mathcal{L}_{\mathrm{G}} = \ldots - \frac{1}{8}\mathrm{Tr}(\hat{G}_{\mu\nu}\hat{G}^{\mu\nu}) = \ldots - \frac{1}{4}(G^a_{\mu\nu}G^{a,\mu\nu})$$

$$G^a_{\mu\nu} = \partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu - g_s f^a_{bc} G^b_\mu G^c_\nu$$

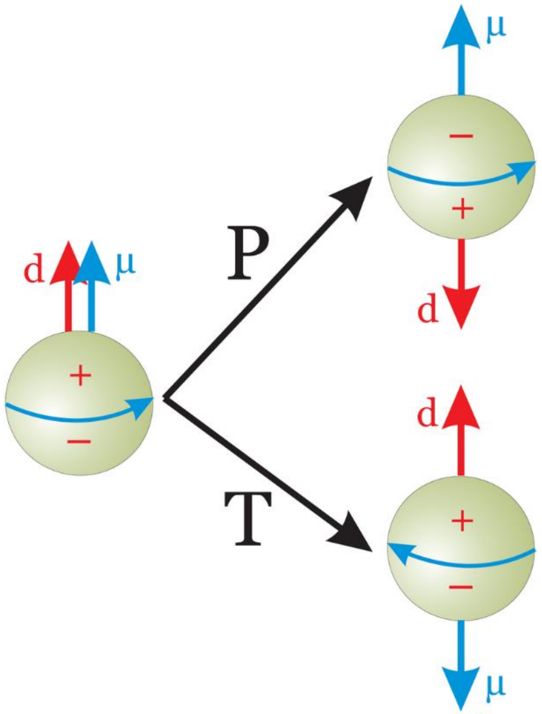
CP-нарушение в теории сильного взаимодействия

Не влияет на уравнения движения

$$\boxed{\mathcal{L}_\theta = \frac{\theta}{32\pi^2} Tr(\hat{G}_{\mu\nu}\tilde{\hat{G}}^{\mu\nu})}$$

$$\tilde{\hat{G}}^{\mu\nu} = \frac{\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}}{2}\hat{G}_{\alpha\beta}$$ Дуальный тензор

$$d_n \approx 3.6 \cdot 10^{-16} \cdot \theta \; e \, \text{см}$$



S. Coleman, Aspects of Symmetry, Cambridge University Press, 1988.
R.J. Crewther, P. di Vecchia, G. Veneziano, E. Witten, Chiral estimate of the electric dipole moment of the neutron in quantum chromodynamics, Phys. Lett. B 88 (1979) 123–127.

CP-нарушение в теории сильного взаимодействия

Экспериментально измеренный электрический дипольный момент нейтрона:

$$d_n \leq 2.9 \cdot 10^{-26} \text{ e см (90\% C.L.)}$$

$$\theta \lesssim 10^{-10}$$

Почему так мал?

Что если существовало бы некоторое поле a, которое в лагранжиане имело бы только кинетические слагаемые (то есть его можно свободно сдвигать) и слагаемые вида $aG\tilde{G}$, и спонтанное нарушение симметрии этого поля фиксировало бы его в значении $-\theta$?

C.A. Baker, D.D. Doyle, P. Geltenbort, K. Green, M.G.D. van der Grinten, P.G. Harris, P. Iaydjiev, S.N. Ivanov, D.J.R. May, J.M. Pendlebury, J.D. Richardson, D. Shiers, K.F. Smith, Improved experimental limit on the electric dipole moment of the neutron, Phys. Rev. Lett. 97 (13) (2006) 131801.

PQWW-модель (Peccei–Quinn–Weinberg–Wilczek)

Идея: ввести второй дублет бозонов Хиггса:

$$
\begin{aligned}
V(\phi_1,\phi_2) = & - \mu_1^2\phi_1^\dagger\phi_1 - \mu_2^2\phi_2^\dagger\phi_2 + \sum_{i,j} a_{ij}\phi_i^\dagger\phi_i\phi_j^\dagger\phi_j \\
& + \sum_{i,j} b_{ij}\phi_i^\dagger\tilde{\phi}_i\tilde{\phi}_j^\dagger\phi_j + \sum_{i\neq j} c_{ij}\phi_i^\dagger\tilde{\phi}_j\phi_i^\dagger\tilde{\phi}_j + h.c.
\end{aligned}
$$

Потенциал симметричен относительно глобальной группы U(1):

$$\phi_1 \to e^{i\beta}\phi_1; \qquad \phi_2 \to e^{i\beta}\phi_2$$

Симметрия $U(1)_{PQ}$: $\phi_1 \to e^{i\alpha\Gamma_1}\phi_1; \qquad \phi_2 \to e^{i\alpha\Gamma_2}\phi_2$

R. Peccei, H.R. Quinn, CP conservation in the presence of instantons, Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 1440–1443.
F. Wilczek, Problem of strong p and t invariance in the presence of instantons, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 279–282
Weinberg, A new light boson? Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 223–226.

PQWW-модель

Взаимодействие с кварками:

$$\mathcal{L}_Y^q = -f_{ij}^{(u)}\bar{q}_{Lj}\phi_2 u_{Ri} - f_{ij}^{(u)}\phi_2^\dagger \bar{u}_{Ri} q_{Lj} - f_{ij}^{(d)}\bar{q}_{Lj}\phi_1 d_{Ri} - f_{ij}^{(d)}\phi_1^\dagger \bar{d}_{Ri} q_{Lj}$$

Взаимодействие с лептонами может происходить за счёт ϕ_1 или ϕ_2:

$$\mathcal{L}_Y^l = -f_{ij}^{(l)}\bar{l}_{Li}\phi_1 e_{Rj} - f_{ij}^{(l)^*}\phi_1^\dagger \bar{e}_{Rj} l_{Li} \qquad \mathcal{L}_Y^l = -f_{ij}^{(l)}\bar{l}_{Li}\tilde{\phi}_2 e_{Rj} - f_{ij}^{(l)^*}\phi_2 \bar{e}_{Rj} l_{Li}$$

Поле аксионов *a* возникает в фазах полей Хиггса:

$$\phi_1^0 = \frac{\nu_1 + \rho_1}{\sqrt{2}} e^{\frac{ip_1}{\nu_1}}; \qquad \phi_2^0 = \frac{\nu_2 + \rho_2}{\sqrt{2}} e^{\frac{ip_2}{\nu_2}} \qquad \nu = \sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2} = 247 \text{ GeV}$$

$$p_1 = cos\theta \times a - sin\theta \times h; \qquad p_2 = sin\theta \times a + cos\theta \times h$$

PQWW-модель

Масса аксиона: $m_a \approx 6 \cdot 10^{-6}\,\text{эВ}\left(\dfrac{10^{12}\,\text{ГэВ}}{\nu/\mathcal{C}}\right)$

Взаимодействие аксиона PQWW с полями СМ:

$$\mathcal{L}_Y^{a-q} = i\frac{a}{\nu}\{m_u(\frac{1}{\chi} - N_g\frac{(\chi+\chi^{-1})}{1+Z})\bar{u}\gamma_5 u + m_d(\chi - N_g\frac{(\chi+\chi^{-1})Z}{1+Z})\bar{d}\gamma_5 d + \ldots\}$$

$$\mathcal{L}_Y^{a-l} = i\frac{a}{\nu}(\chi m_e e\gamma_5 e + \chi m_\mu \mu\gamma_5\mu + \chi m_\tau \tau\gamma_5\tau)$$

$$\mathcal{L}_Y^{a-l} = i\frac{a}{\nu}(-\frac{m_e}{\chi}e\gamma_5 e - \frac{m_\mu}{\chi}\mu\gamma_5\mu - \frac{m_\tau}{\chi}\tau\gamma_5\tau)$$

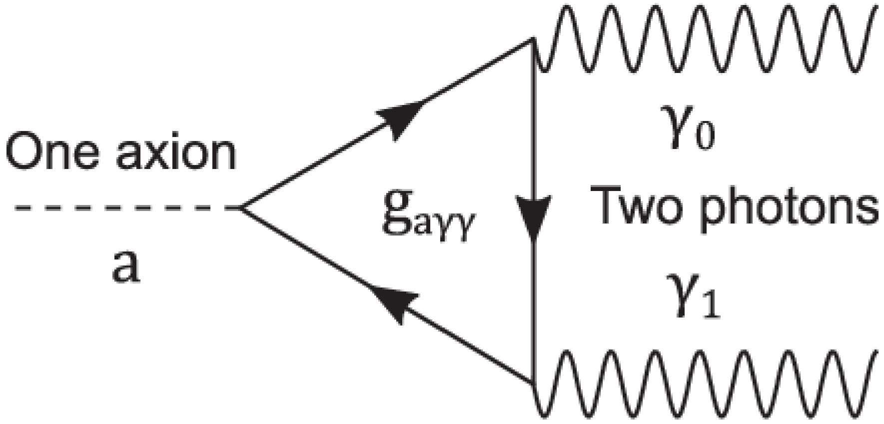
PQWW-модель

Взаимодействие с электромагнитными полями происходит через петлевые диаграммы:

Вид взаимодействия после интегрирования по петле:

$\mathcal{L} \supset g_{a\gamma} a F \tilde{F}$

Константа связи оказывается размерной!

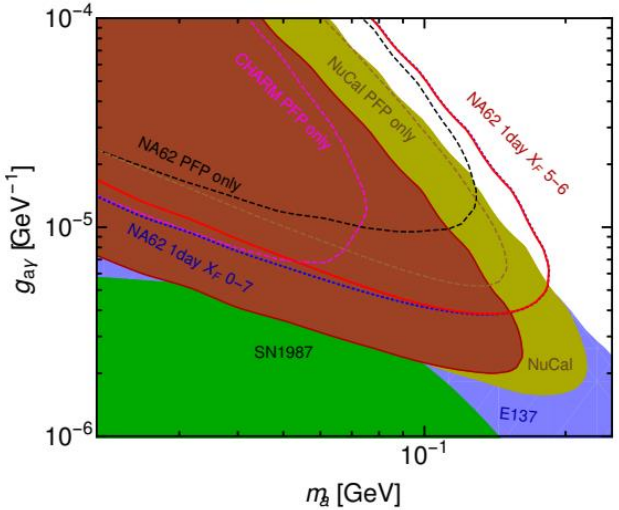


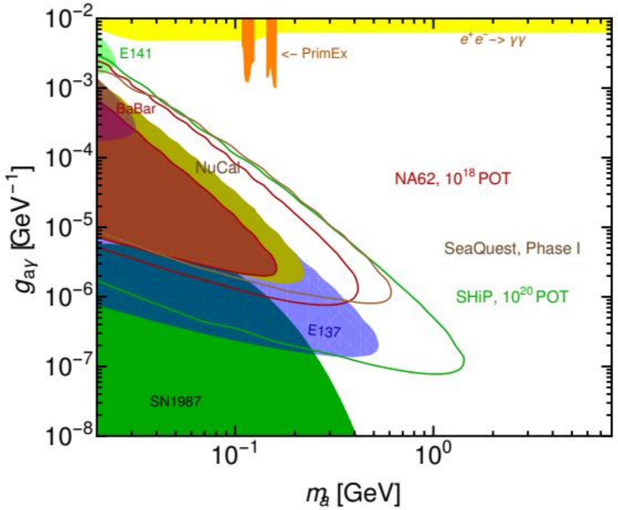
PQWW-модель

В модели PQWW значение ν фиксировано на энергетическом масштабе спонтанного нарушения электрослабой симметрии

$$\nu = \sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2} = 247\ \text{GeV}$$

Как следствие, взаимодействия аксиона с СМ оказываются слишком велики, поэтому **PQWW-модель исключена** ускорительными и beam-dump экспериментами:





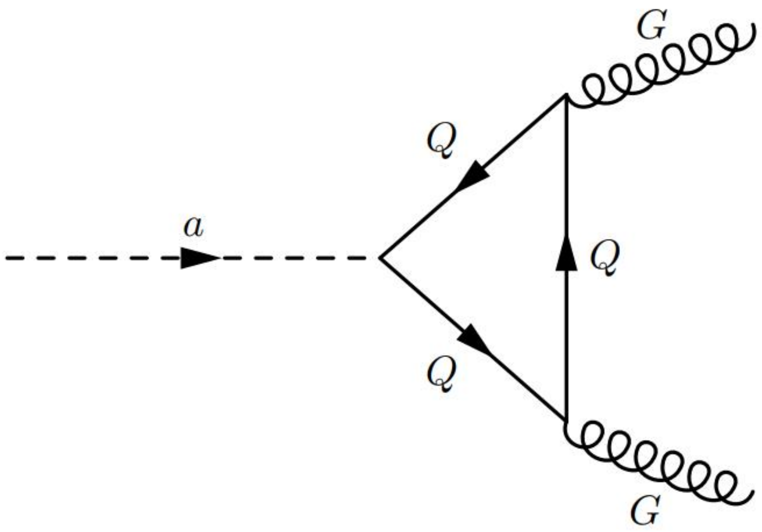
Döbrich, B., Jaeckel, J. & Spadaro, T. Light in the beam dump. Axion-Like Particle production from decay photons in proton beam-dumps. *J. High Energ. Phys.* **2019**, 213 (2019)

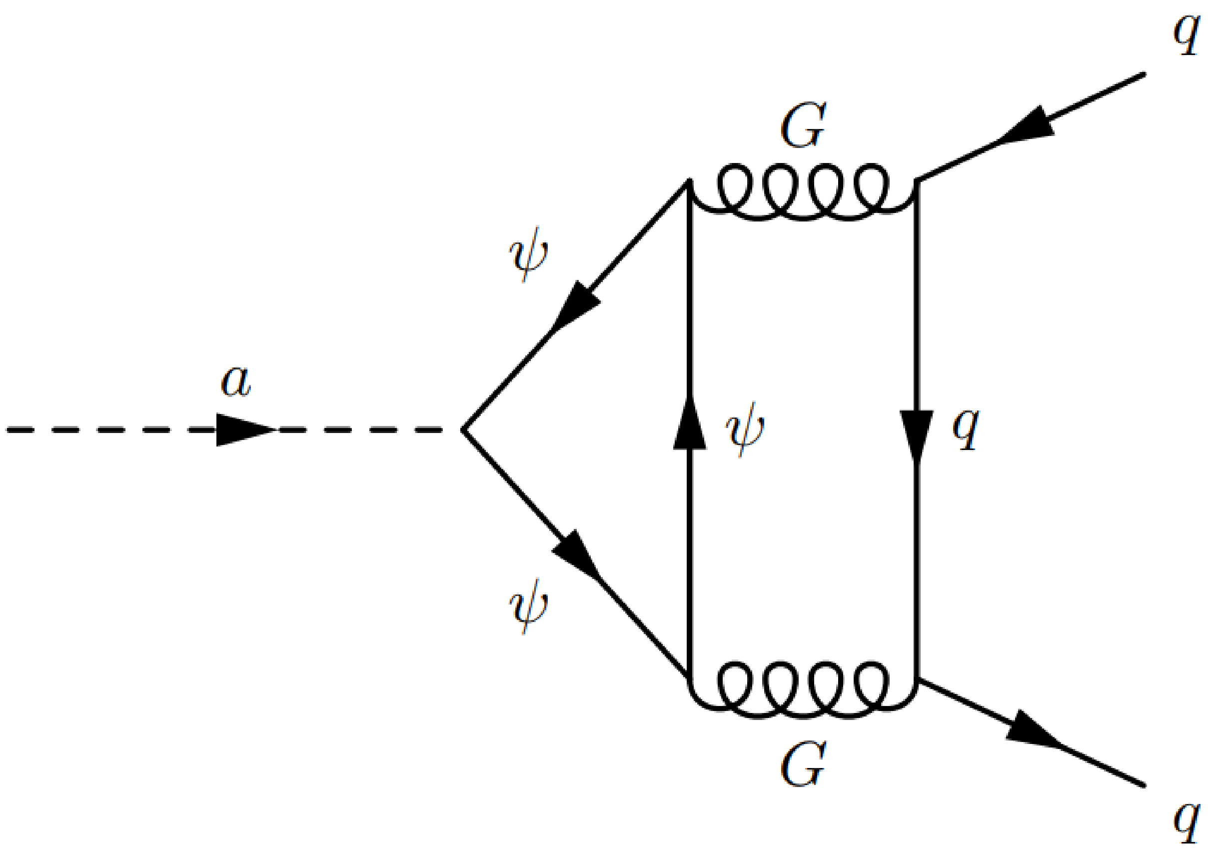
Модели невидимых аксионов.

Идея: **не фиксировать энергетический масштаб $\boldsymbol{\nu}$** спонтанного нарушения симметрии Печчеи-Куинн на уровне 250 ГэВ, а сделать его больше (уменьшив таким образом силу взаимодействия аксионов и СМ).

В пределе значение ν может доходить до планкоского масштаба.

Модели невидимых аксионов. KSVZ-модель (Kim–Shifman–Vainshtein–Zakharov)





Однако через петлевые…

Модели невидимых аксионов. DFSZ-модель (Dine–Fischler–Srednicki–Zhitnitsky)

Рассматривается не один, а два дублета бозонов Хиггса H_u и H_d, но аксион находится в фазе другого поля φ – скаляра СМ, который взаимодействует с бозонами Хиггса:

$$V = \lambda_H \varphi^2 H_u H_d$$

В этой модели поля СМ имеют ненулевые заряды $U(1)_{PQ}$, а потому способны взаимодействовать с аксионом непосредственно, через слагаемые вида

$$\mathcal{L}_{a-q} \supset m_u \frac{a}{f_a} i\bar{u}\gamma^5 u$$

А ещё аксионы могут появляться в теории струн…

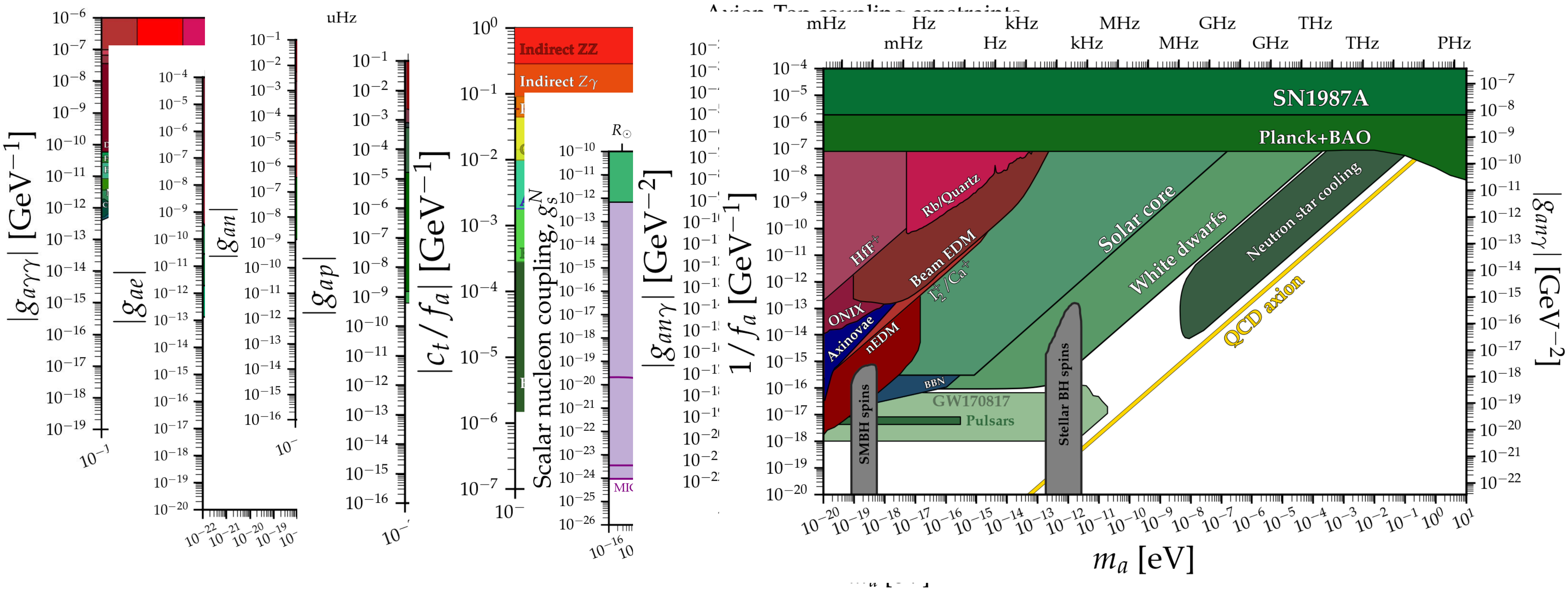
Аксионо-подобные частицы (АПЧ)

Рассматривается упрощённая модель, в которой масса новой частицы $\boldsymbol{m_a}$ **и энергетический масштаб** $\boldsymbol{\nu}$ **не связаны друг с другом**, а являются свободными параметрами теории.

Плюсы: можно подгонять под почти любой эксперимент или астрофизику и космологию

Минусы: не решает проблему CP-нарушения сильного взаимодействия и не является следствием какой-то глубоко-лежащей теории

Разнообразие поиска аксионов и АПЧ (рубрика «Эксперименты»)



Заключение. Логика повествования

- В результате исследования топологической структуры группы SU(3) можно записать в лагранжиан CP-нарушающее θ-слагаемое
- Эксперимент показывает, что безразмерный параметр θ очень мал
- Для динамического зануления θ придумывается новая глобальная симметрия $U(1)_{PQ}$ и некоторые поля, имеющие сопряжённые этой симметрии заряды
- Симметрия спонтанно нарушается, что порождает псевдоскалярный бозон – аксион
- В зависимости от способа введения полей аксион может по-разному взаимодействовать с СМ

Спасибо за терпение!