Axionの一般的な理論

東京大学 宇宙線研究所
伊部研究室 修士1年
鈴木和峰

強いCP問題とは

強いCP問題 = 強い相互作用においてCP対称性が存在すること

理論：QCD(量子色力学)

$$\mathcal{L}_{\mathrm{QCD}} = \overline{Q_i}(i\gamma^\mu D_\mu - m_{ij})Q_j - \frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^{a\mu\nu} + \underline{\frac{g^2\theta}{32\pi^2}G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^{a\mu\nu}}$$

CPを破る項

$$\rightarrow \mathcal{L}_{\mathrm{nEDM}} = \frac{1}{2}d_n\overline{n}i\gamma_5\sigma_{\mu\nu}nF^{\mu\nu}$$

$$d_n \sim \theta \cdot 10^{-16} e\,\mathrm{cm}$$

実験： [Baker et al (2006)]

$$|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} e\,\mathrm{cm} \qquad \Rightarrow |\theta| \lesssim 10^{-9}$$

強いCP問題の解決法

Peccei-Quinn 機構　[Peccei, Quinn (1977)]

1. 理論にカイラル対称性$\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$を導入する
2. $\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$が自発的に破れる
3. 南部-Goldstoneボソン(ここではaxion)が出現

$$L_{\mathrm{axion}} = \frac{1}{2}\partial_\mu a \partial^\mu a - \frac{g^2\theta}{32\pi^2}\frac{a}{f_a}G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^{a\mu\nu}$$

a : axion field

f_a : axion decay constant

4. 有効ポテンシャルが最小の点 $\Leftrightarrow \theta - \dfrac{a}{f_a} = 0$
5. 強いCP問題解決！

Axionのモデル

具体的にどう$\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$を破るか？

◯Weinberg-Wilczek model [Weinberg (1978), Wilczek (1978)]

two Higgs doublet

→既に実験からの制限で排除された

◯KSVZ model [Kim (1979), Shifman, Vainshtein, Zakharov (1980)]

heavy “quark” + a new scalar

◯ZDFS model [Zhitnitsky (1980), Dine, Fischler, Srednicki (1981)]

two Higgs doublet + a SM singlet scalar

→まだ排除されていない！

invisible axion

Axionの性質

Axionと中性パイ中間子の類似性:

どちらもカイラル対称性の破れによるNGボソン

$$\to \mathcal{L} \qquad = \frac{1}{4} g \qquad a F \quad \tilde{F} \qquad = -g \qquad a \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{B}$$

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha C}{2\pi f_a} \qquad C \sim \begin{cases} 0.97 & \text{KSVZ} \\ -0.36 & \text{ZDFS} \end{cases}$$

Axionの質量

$$m_a \simeq \frac{f_\pi m_\pi}{f_a} \longleftarrow \sim (\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}\text{の破れるスケール})$$

$$\text{"} f_a \gg \Lambda_{EW} \text{"} =$$ 相互作用が弱い(invisible)、軽い

Axion decay const.への制限

Axionの生成過程(“軽い”axionについて考える)

1. 核子-核子の制動放射 $N+N \rightarrow N+N+a$
2. 電磁場中でのPrimakoff 効果 $\gamma \leftrightarrow a$
3. 電子での光生成 $\gamma + e^- \rightarrow e^- + a$
4. 原子核内の電子の制動放射 $e^- + (A,Z) \rightarrow e^- + a + (A,Z)$
5. 光子の融合 $\gamma + \gamma \rightarrow a$

星の中で生成された
axionによる
エネルギーロス

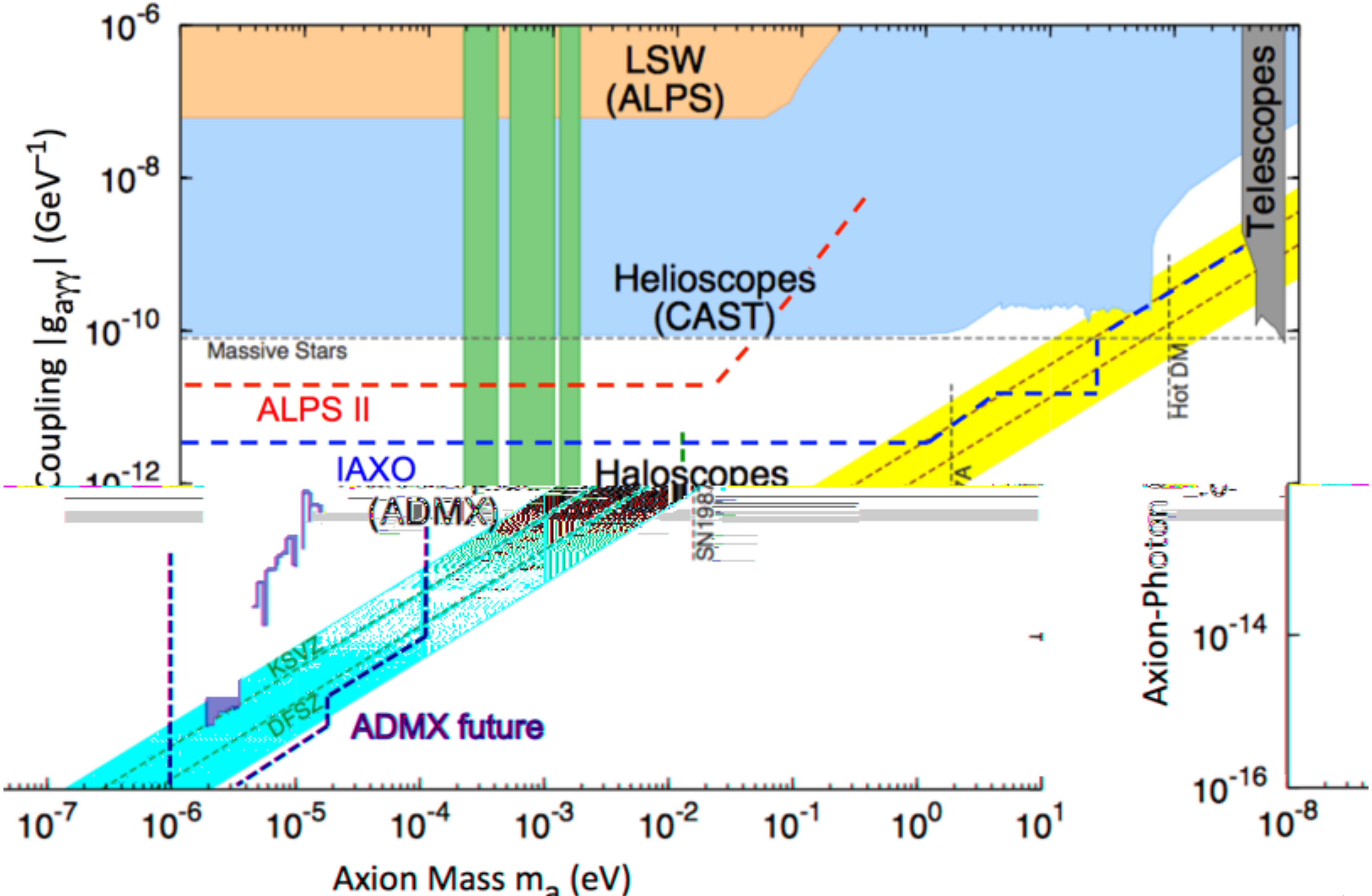
⇨

$$10^9\mathrm{GeV} \lesssim f_a \lesssim 10^{12}\mathrm{GeV}$$
$$10^{-3}\mathrm{eV} \gtrsim m_a \gtrsim 10^{-6}\mathrm{eV}$$

⇦

宇宙の臨界密度を
超えて宇宙が
閉じないように

Axionへの制限



[Graham et al (2016)]

まとめ

1. 強いCP問題 = なぜ θ は小さいのか？
2. axion = 強いCP問題の解決法として導入される$\mathrm{U(1)_{PQ}}$の破れにより出現するNGボソン
3. Axionのモデルの紹介 (WW, KSVZ, ZDFS)
4. Axion decay constant, axion massへの制限
5. 現在の実験の状況

θ項の係数が0になる理由

有効ポテンシャル $V(a)$

$$\exp\left[-\int d^4xV\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)\right]$$
$$=\int \mathcal{D}A_\mu \exp\left[-\int d^4x\left\{-\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^a_{\mu\nu}+i\frac{g^2}{32\pi^2}\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^a_{\mu\nu}\right\}\right]$$
$$\leq\left|\int \mathcal{D}A_\mu \exp\left[-\int d^4x\left\{-\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^a_{\mu\nu}+i\frac{g^2}{32\pi^2}\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^a_{\mu\nu}\right\}\right]\right|$$
$$\leq\int \mathcal{D}A_\mu \left|\exp\left[-\int d^4x\left\{-\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^a_{\mu\nu}+i\frac{g^2}{32\pi^2}\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^a_{\mu\nu}\right\}\right]\right|$$
$$\leq\int \mathcal{D}A_\mu \exp\left[-\int d^4x\left\{-\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^a_{\mu\nu}\right\}\right]$$
$$\leq \exp\left[-\int d^4xV(0)\right]$$

$$\exp\left[-\int d^4xV\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)\right]\leq \exp\left[-\int d^4xV(0)\right] \quad \Leftrightarrow \quad V(0)\leq V\left(\theta-\frac{a}{f_a}\right)$$

南部-Goldstoneの定理

1. 並進不変性・明白なLorentz共変性があり
2. 保存するベクトルカレントが存在して
3. その電荷の対称性が自発的に破れている

宅理論には破れた生成子の数だけゼロ質量の
南部-GoldstoneボソンＮ(NGボソン)が出現する

対称性の破れ	$\mathrm{SU}(2)_{\mathrm{L}} \times \mathrm{U}(1)_{\mathrm{Y}} \times \mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}} \to \mathrm{U}(1)_{\mathrm{EM}}$
生成子の数	$3 \quad + \quad 1 \quad + \quad 1 \quad \to \quad 1$

→出現するNGボソンは4つ!(うち3つは $W^{\pm}, Z$ に食べられる)

破れた生成子とは

そもそも“真空$|0\rangle$ に対称性がある”とは、その変換 $\exp(i\alpha Q)$に対して真空が不変であるということ：

$$|0\rangle \to |0\rangle' \equiv \exp(i\alpha Q)|0\rangle = |0\rangle \Leftrightarrow Q|0\rangle = 0$$

それとは逆に、対称性が破れて真空を変えてしまう変換(生成子)を破れた生成子と呼ぶ：

$$|0\rangle \to |0\rangle' \equiv \exp(i\alpha Q)|0\rangle \neq |0\rangle \Leftrightarrow Q|0\rangle \neq 0$$

この破れた生成子の数を数えることで出現するNGボソンの数が分かる

関係式など

$$(D_\mu Q)_i = \partial_\mu Q_i - igG^a_\mu (T^a)^j_i Q_j$$

$$G^a_{\mu\nu} = \partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu + gf^{abc} G^b_\mu G^c_\nu$$

$$\tilde{G}^{a\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G^a_{\rho\sigma}$$

$$\sigma_{\mu\nu} = \frac{1}{2i}[\gamma_\mu, \gamma_\nu]$$

$$\frac{g^2\theta}{32\pi^2} G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^{a\mu\nu} = \theta\partial_\mu K^\mu$$

$$K^\mu = \frac{1}{16\pi^2}\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}\left[A^a_\nu \partial_\alpha A^a_\beta + \frac{g}{3} f^{abc} A^a_\nu A^b_\alpha A^c_\beta\right]$$