

轴子的天文探测

殷鹏飞

中国科学院高能物理研究所粒子天体中心

非加速器战略研讨会，高能所，北京

2021.5.15

提纲

- CP破坏机制和轴子模型简介
- 轴子的产生和部分限制
- 与轴子-光子相互作用相关的天文观测
- 总结

强CP问题

- 标准模型QCD的SU(3)规范场具有非平庸的真空结构，可以在拉氏量中诱导出一个CP破坏项。

$$\theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

- 夸克场的手征转动也会诱导出类似的CP破坏项。
- 因此物理贡献同时来自于强相互作用和弱相互作用部分。

$$\bar{\theta} = \theta + \text{Arg Det } Y_U Y_D$$

- 以上相互作用会贡献到 neutron 电偶极矩。 $|d_n| \sim \frac{1}{8\pi^2} \frac{m_q}{m_n} \frac{\bar{\theta} e}{m_n}$
实验限制： $|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10}$

- **强CP问题**：为什么 $\bar{\theta}$ 如此之小？

PQ机制和轴子

- 1977年Peccei和Quinn提出一个优美的解决强CP问题的理论方案（PQ机制）。理论中引入一个新的手征U(1)对称性和复标量场，使 $\bar{\theta}$ 的改变等同于赝标场的平移。QCD非微扰效应产生了赝标场的势，使得它在极小态的取值可以消去 $\bar{\theta}$ 。

$$\mathcal{L} \supset \left(\frac{a}{f_a} + \theta \right) \frac{1}{32\pi^2} G\tilde{G}$$

- Vafa和Witten 1984年论证了依赖于 $\bar{\theta}$ 的QCD真空能量在其为0时取最小。即PQ场的引入确实可以通过动力学方式消去CP破坏效应。
- 1978年Weinberg和Wilczek 分别提出PQ理论中存在轻赝标量粒子，即轴子。由于瞬子(instanton)效应破坏了PQ对称性，对应的赝标量粒子不是严格无质量的，而是所谓的pseudo-Nambu Goldstone boson。

轴子模型

- **Weinberg**和**Wilczek**的模型中PQ对称性自发破缺的能标 f_a 取在标准模型电弱破缺能标 $v \sim 246 \text{ GeV}$ 。相应的轴子很快被实验所排除。
- **不可见轴子(invisible axion)**: 由于轴子和标准模型的耦合反比于 f 。为了回避实验限制, 可以取 $f_a \gg v$ 来压低耦合和质量 $m_a \sim m_\pi f_\pi / f_a$ 。
- **UV模型**: 高能标下的完整理论。可以具体计算出轴子质量, 以及与标准模型粒子的耦合。
 - **DFSZ模型**: 双希格斯场; 反常耦合由标准模型粒子传递。
 - **KSVZ模型**: 引入新的带色粒子传递反常耦合。
- **弦理论**在低能四维极限下也会预言多种轻的赝标量粒子。这些粒子具有和轴子相似的相互作用形式, 但是具体的性质与以上解释强**CP**问题的轴子模型可能有所不同。
- **类轴子粒子(Axion-like particle)**: 具有和轴子类似相互作用形式的轻赝标粒子。不要求解决强**CP**问题, 具有更自由的参数区间范围。

轴子的有效相互作用

- 有效拉氏量：可以在一定程度上体现的模型无关的性质。

$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial_\mu a)^2 + \frac{a}{f_a} \frac{g_s^2}{32\pi^2} G\tilde{G} + \frac{1}{4}g_{a\gamma}^0 a F\tilde{F} + \frac{\partial_\mu a}{2f_a} \bar{q}c_q^0 \gamma^\mu \gamma_5 q - \bar{q}_L M_q q_R + \text{h.c.}$$

- 通过轴子-夸克相互作用可以定义轴子-核子相互作用。

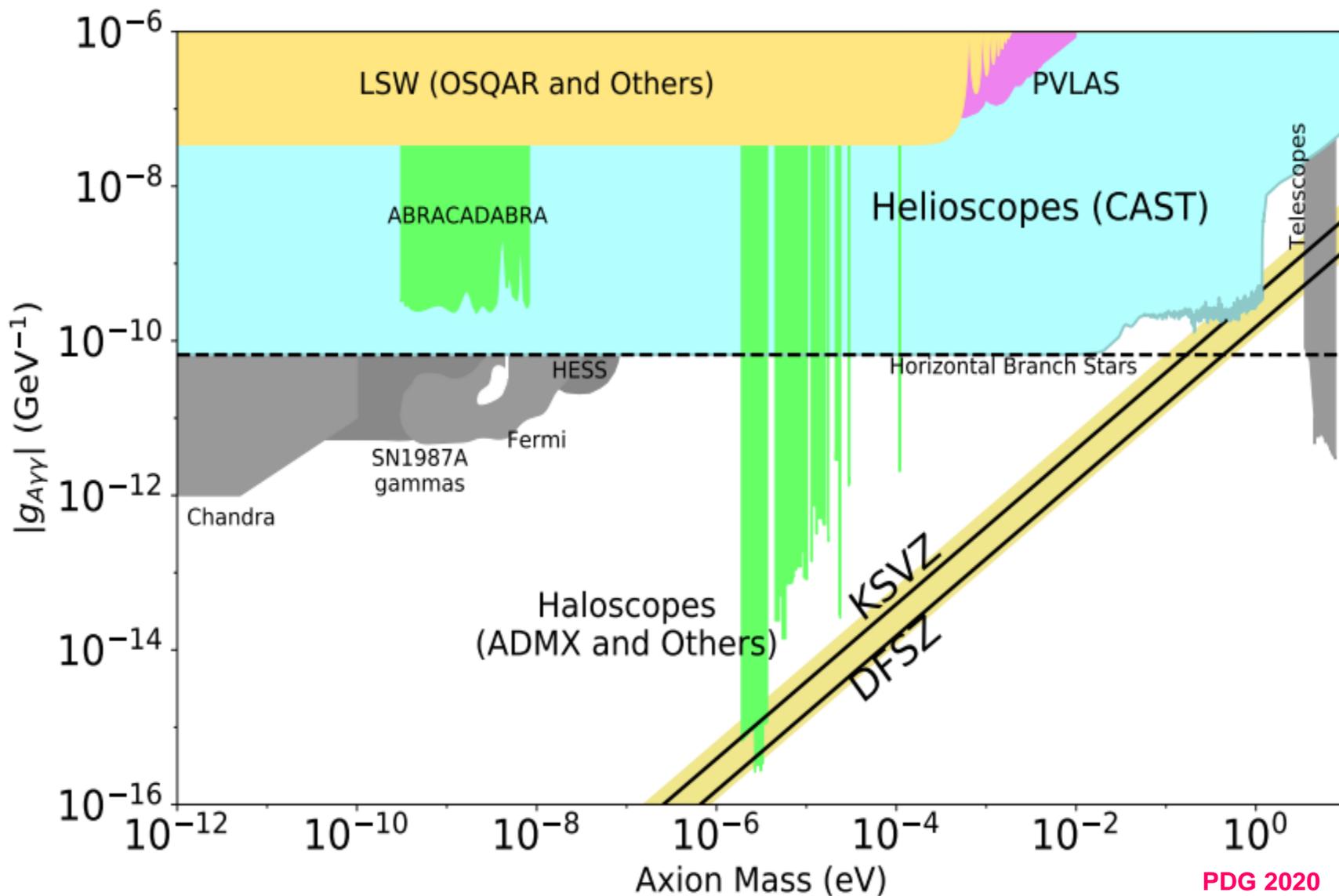
$$\frac{\partial_\mu a}{2f_a} \bar{N} C_{aN} \gamma^\mu \gamma_5 N$$

- 模型中也可能存在轴子-轻子相互作用（例如来自于圈图效应）。

$$C_{ae} \frac{\partial_\mu a}{2f_a} \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 e$$

- 对于在壳费米子，相互作用也可写为 $-ig_{af} a \bar{f} \gamma_5 f$

(部分) 实验限制



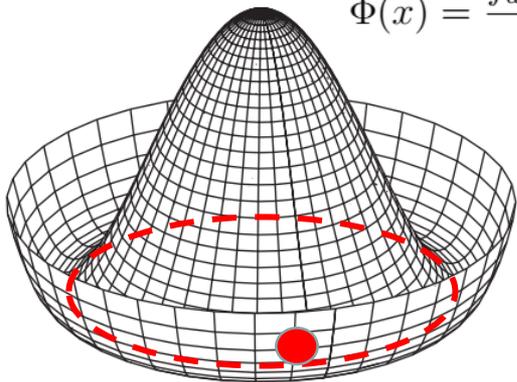
暗物质轴子

- **热产生机制**: 轴子和标准模型粒子之间存在较强的相互作用, 可以达到热平衡。对应 $m_a > 0.1 \text{eV}$ 和 $f_a < 10^8 \text{eV}$ 。可能快速衰变, 并且是“热粒子”, 不适合做暗物质。

- **Misalignment**: 产生冷暗物质。

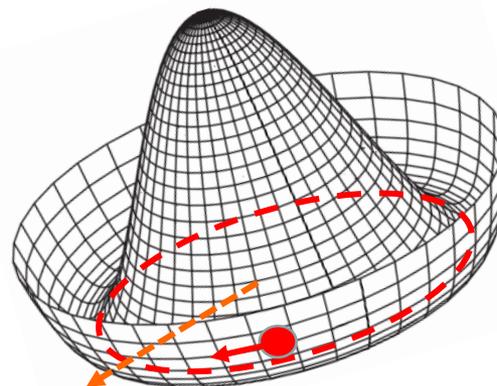
$$\Omega_a h^2 = 0.109 \Theta_1^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.184} = 0.059 \Theta_1^2 \left(\frac{10 \mu\text{eV}}{m_a} \right)^{1.184}$$

$$\Phi(x) = \frac{f_a + \rho(x)}{\sqrt{2}} e^{ia(x)/f_a}$$



$\Lambda_{\text{QCD}} < T < f_a$: PQ对称性自发破缺
轴子场随机位于某个简并基态。

$$a_1 = \Theta_1 f_a$$



$T < \Lambda_{\text{QCD}}$: QCD瞬子效应产生轴子势, 使之获得质量。轴子势出现能量极小态 (CP守恒态)。

轴子场围绕极小态相干振荡, 表现为暗物质凝聚态。

- **拓扑缺陷衰变**: 轴子宇宙弦可以衰变产生轴子。

天体源轴子

● 恒星内部的高温环境可以产生大量轴子。

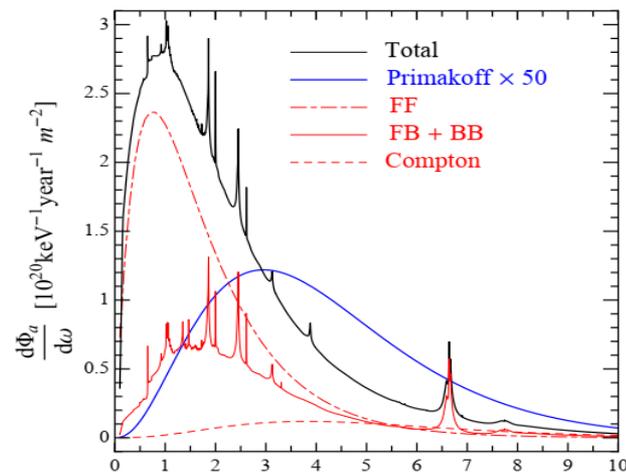
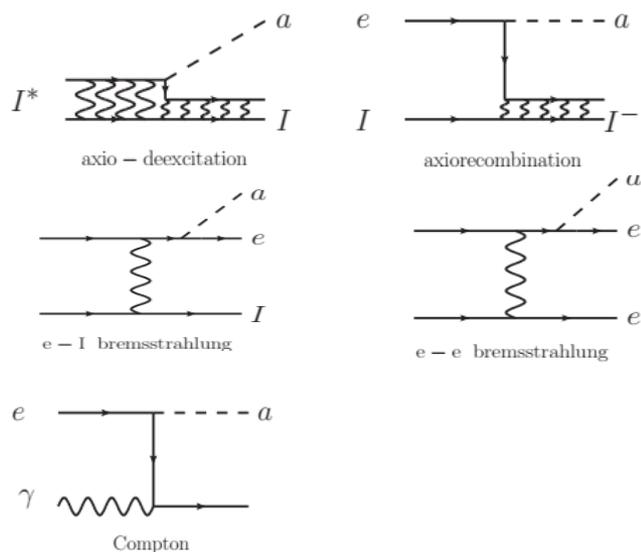
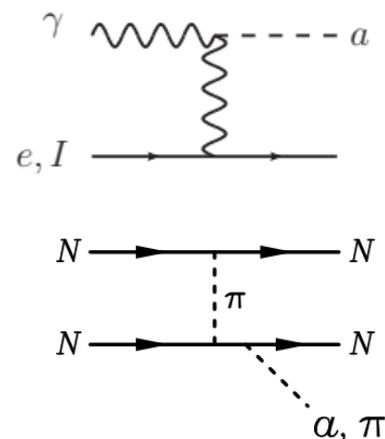
● 轴子-光子相互作用：**Primakoff**过程

对于不与轻子耦合的轴子模型起主导

● 轴子-核子相互作用：核子-核子韧致辐射，

原子核发射线

● 轴子-电子相互作用：“ABC”过程



轴子导致的恒星能损

- 由于轴子相互作用较弱。一旦在恒星内部产生将迅速逃逸，从而带走能量。这种额外的能损不应当显著改变标准的恒星演化机制。

- 太阳轴子光度 $L_A = g_{10}^2 \times 1.85 \times 10^{-3} L_{\odot}$ $g_{10} = |g_{A\gamma\gamma}| \times 10^{10} \text{ GeV}$

根据标准太阳模型 $L_A \lesssim 0.10 L_{\odot}$

具体限制 $g_{10} < 4.1$

Vinyoles et. al, 1501.01639

- 根据球状星团的horizontal branch星观测可以给出更强的限制

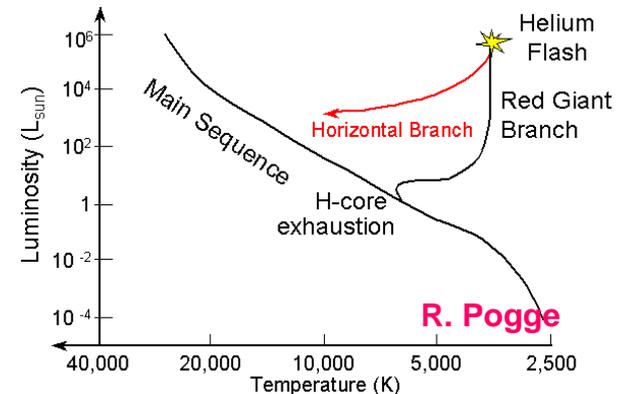
氢燃烧能损 $80 \text{ erg g}^{-1} \text{ s}^{-1}$

轴子能损 $g_{10}^2 30 \text{ erg g}^{-1} \text{ s}^{-1}$

具体限制 $|g_{A\gamma\gamma}| < 6.6 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$

Ayala et. al, 1406.6053

- 利用恒星演化对轴子-核子和轴子-轻子相互作用也可做出限制



直接探测实验

● 地下直接探测实验可以探测太阳轴子和暗物质轴子与探测器中电子的散射。

● 太阳轴子的产生可能来自于多种过程和多种轴子耦合

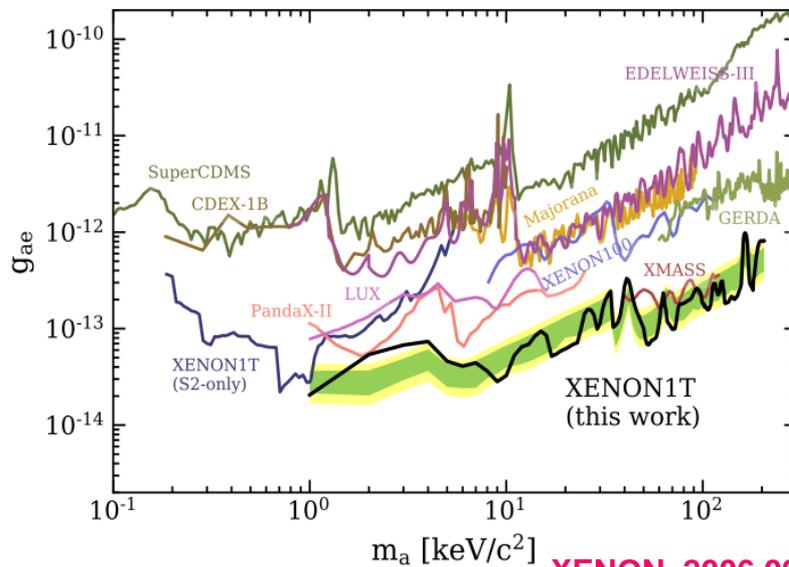
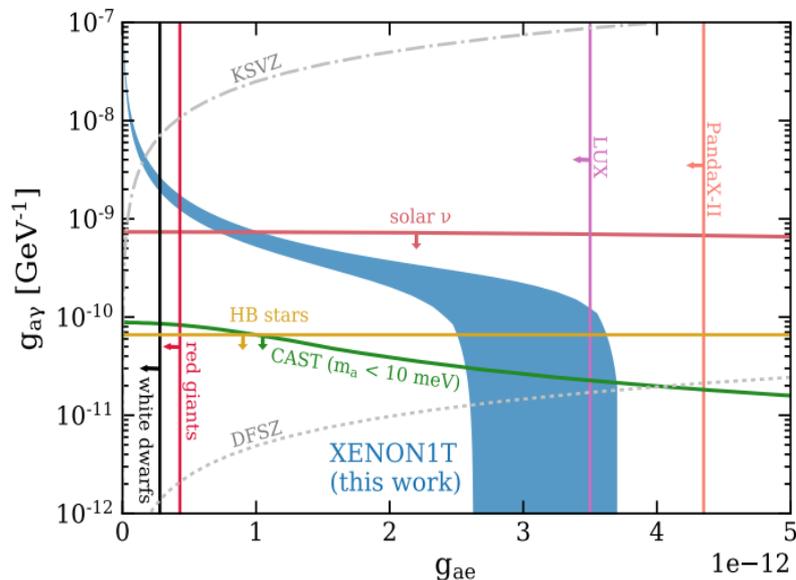
因此实验探测的是多种耦合的组合

● “Excess electronic recoil events in XENON1T”

太阳轴子信号？

未来CDEX和PANDAX的检验

● 对暗物质轴子做出限制



直接探测实验

● 地下直接探测实验可以探测太阳轴子和暗物质轴子与探测器中电子的散射。

● 太阳轴子的产生可能来自于多种过程和多种轴子耦合

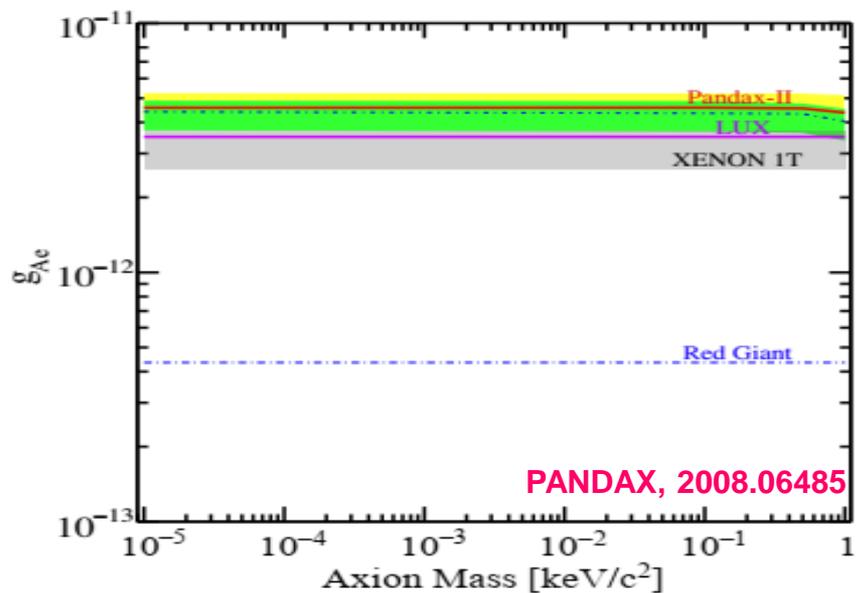
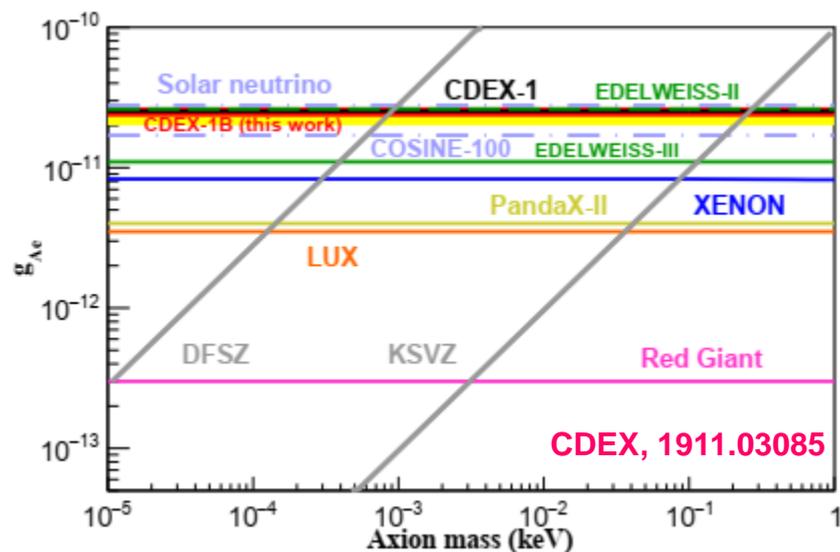
因此实验探测的是多种耦合的组合

● “Excess electronic recoil events in XENON1T”

太阳轴子信号？

未来CDEX和PANDAX的检验

● 对暗物质轴子做出限制



轴子-光子相互作用

● 有效拉氏量:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - A_\mu j^\mu - \frac{1}{4}g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

● 运动方程:

$$\ddot{a} - \nabla^2 a + m_a^2 a = -g_{a\gamma\gamma} \dot{\mathbf{A}} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) \quad \text{有源的轴子运动方程}$$

$$\ddot{\mathbf{A}} - \nabla^2 \mathbf{A} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{j} + g_{a\gamma\gamma} \dot{a} \nabla \times \mathbf{A} - g_{a\gamma\gamma} \nabla a \times \dot{\mathbf{A}} \quad \text{“安培定律”}$$

$$-\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} = \rho - g_{a\gamma\gamma} \nabla a \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) \quad \text{“高斯定律”}$$

● 通常将电磁场和轴子场线性分解为背景场和微扰部分（考察信号）。

$$a(\mathbf{x}, t) = \bar{a}(\mathbf{x}) + \delta a(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \bar{\mathbf{A}}(\mathbf{x}) + \delta \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$$

轴子-光子振荡

- 存在静态强背景场（强磁场）的情况 $A \gg \delta A$

$$\begin{aligned} -\partial_t^2 a + \nabla^2 a &= m_a^2 a - g_{a\gamma\gamma} \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \\ -\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) &= \omega^2 \mathbf{D} + \omega^2 g_{a\gamma\gamma} a \mathbf{B} \end{aligned}$$

\mathbf{E} 为考察的信号电场， \mathbf{B} 为背景磁场

- 轴子和光子存在混合，混合决定于耦合系数 g 与磁场 \mathbf{B} 的乘积。
传播过一定距离后的光子场和轴子场会发生相互转化。
效应有些类似中微子振荡。

- 例如对于入射的纯轴子流，转化到光子的概率

$$P(a \rightarrow \gamma) \sim \sin^2 \Theta \sin^2 (\Delta k L)$$

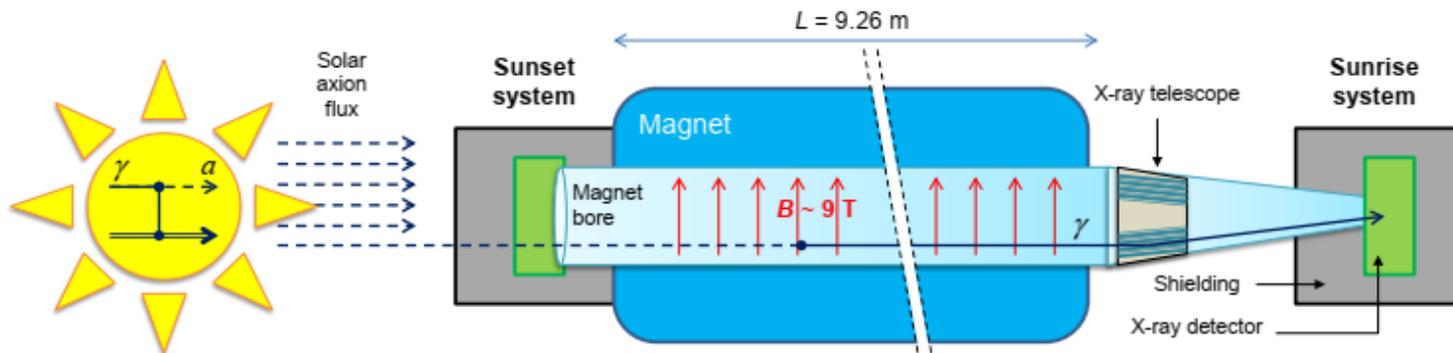
$\tan \Theta \sim B g_{a\gamma\gamma} \omega / (m_a^2 - m_\gamma^2)$ 为混合角， Δk 为两种粒子动量差， L 为转化区域尺度。

太阳轴子转化到光子: Helioscope

CERN Axion Solar Telescope

CAST, 1705.02290

将太阳轴子在实验室磁场中转化为X射线进行观测。



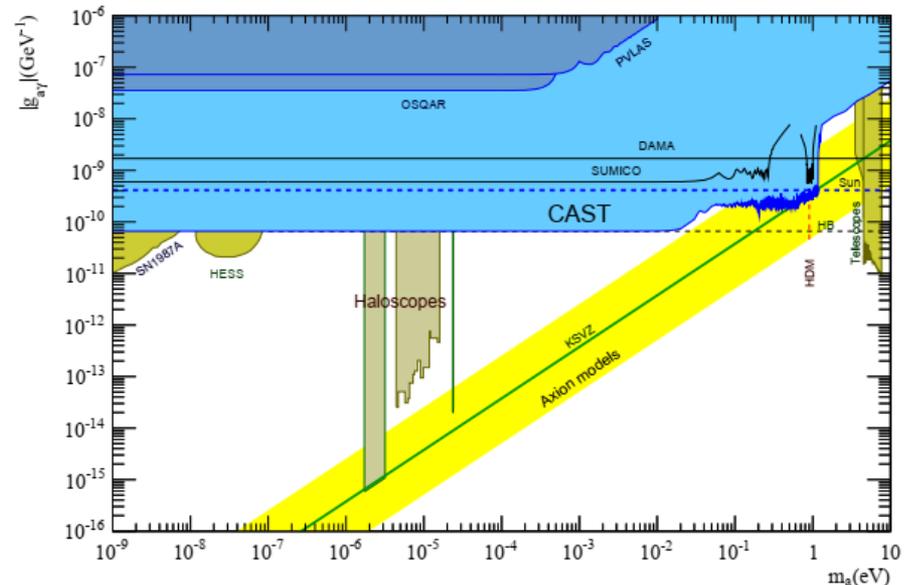
轴子产生率正比于 $g_{a\gamma}^2$

轴子转化为光子的概率正比于 $g_{a\gamma}^2$

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left(g_{a\gamma} B \frac{\sin(qL/2)}{q} \right)^2$$

对于 $m_a \lesssim 0.02 \text{ eV}$

$$g_{a\gamma} < 0.66 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$$



未来IAXO可进一步提升1个多量级。

超新星轴子转化到光子：伽马射线信号

超新星核心的Primakoff过程可以产生大量~100MeV的轴子

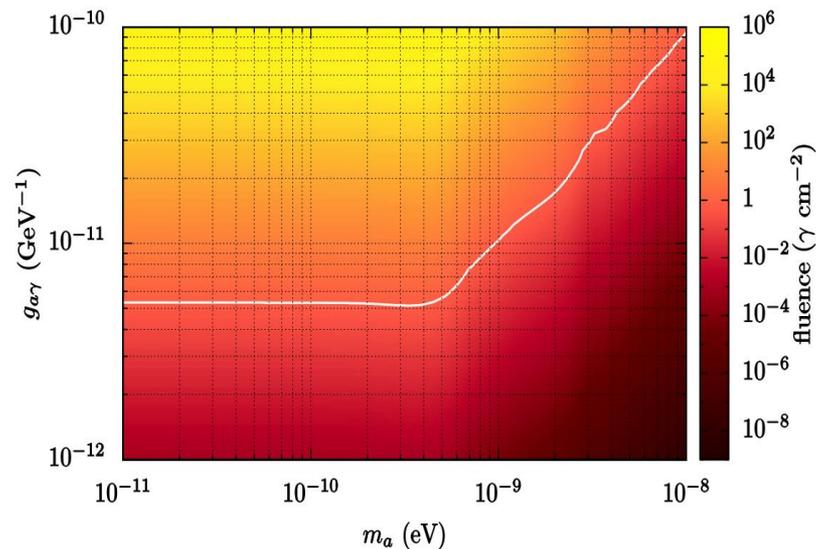
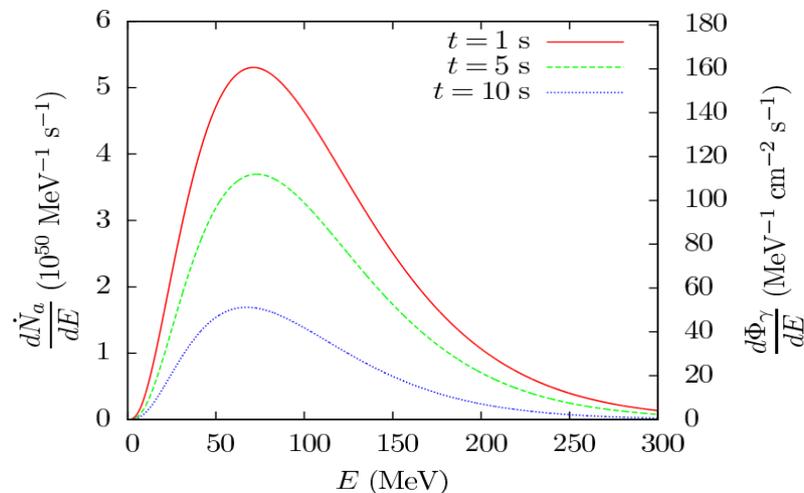
这些轴子在银河系磁场中可以转化为伽马射线。

对1987A的观测并未观测到相应信号。对轴子-光子相互作用做出限制。

Brockway et. al, astro-ph/9605197

Grifols et. Al, astro-ph/9606028

需要对超新星核心轴子产生进行细致研究。



Payez et. al, 1410.3747

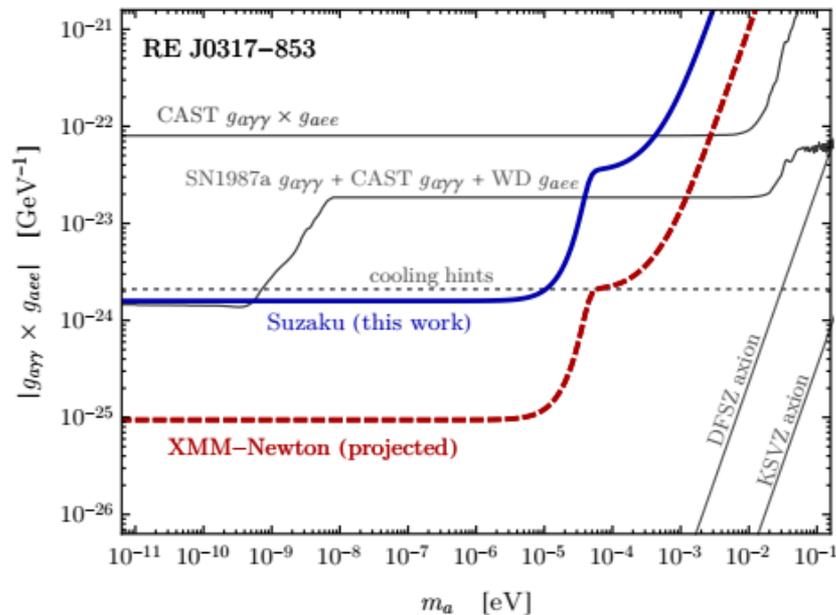
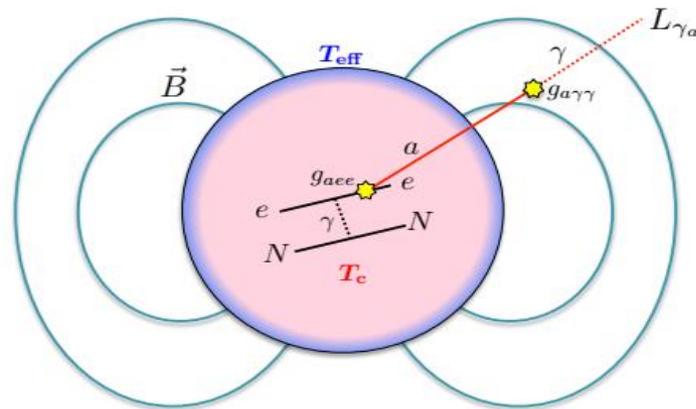
致密星轴子转化到光子：X射线信号

- 轴子在致密星内部产生，穿过星体被强磁场重新转化为高能光子信号。

Morris, PRD, 1986

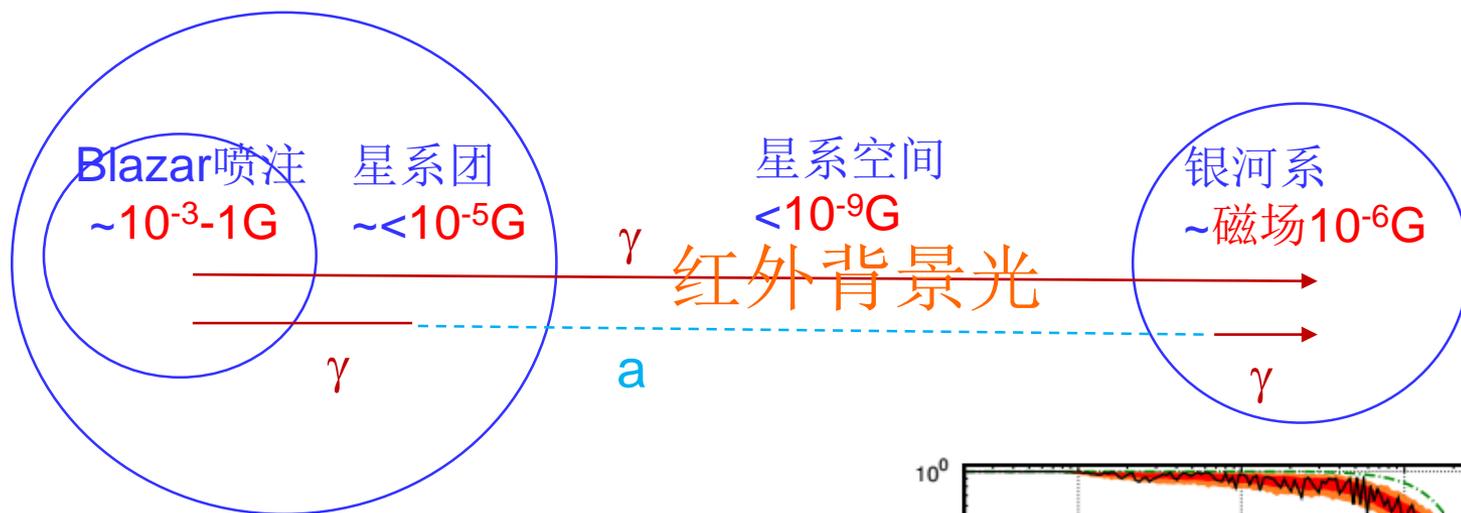
- 对于磁白矮星，中心温度 $\sim 10^7\text{K}$ ，磁场 $< 10^9\text{G}$ ，相比中子星降低了QED真空效应的影响。

- 产生率依赖轴子-电子耦合 g_{ae}^2
信号转化率依赖轴子-光子耦合 $g_{a\gamma}^2$
实际探测两者的乘积



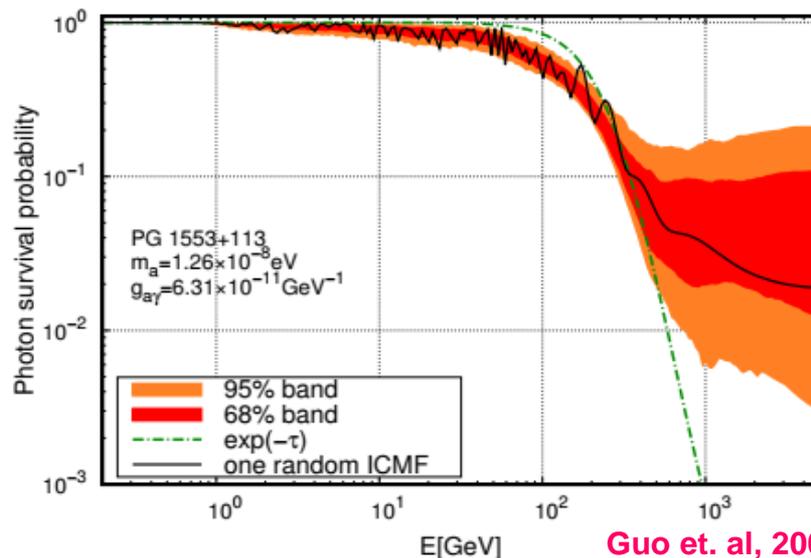
天体高能光子-轴子振荡：能谱变化

- 高红移处天体源（例如Blazar）产生的高能光子经过红外背景光发生吸收效应。高能光子在天体磁场中转化为轴子，轴子传播不受红外背景光影响



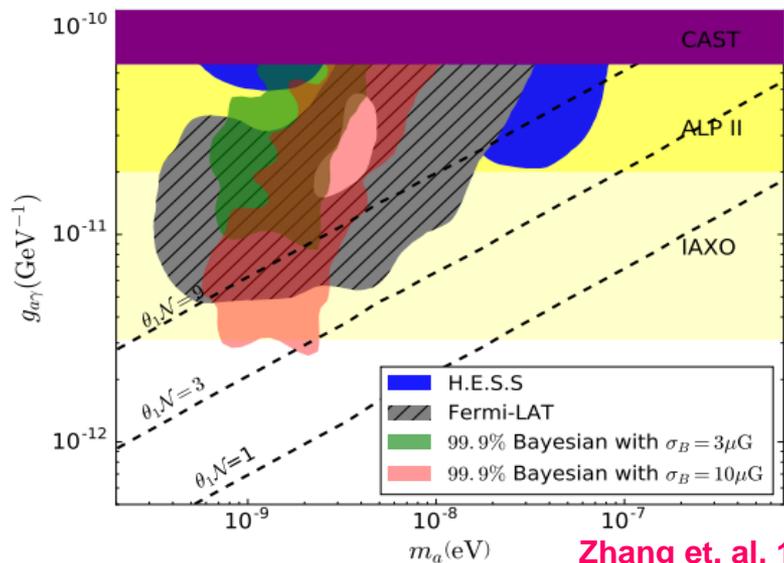
- 光子能谱与传统理论相比发生形变。
- 利用高能光子探测限制理论。

受到天文不确定因素的影响，如红外背景光，天体磁场



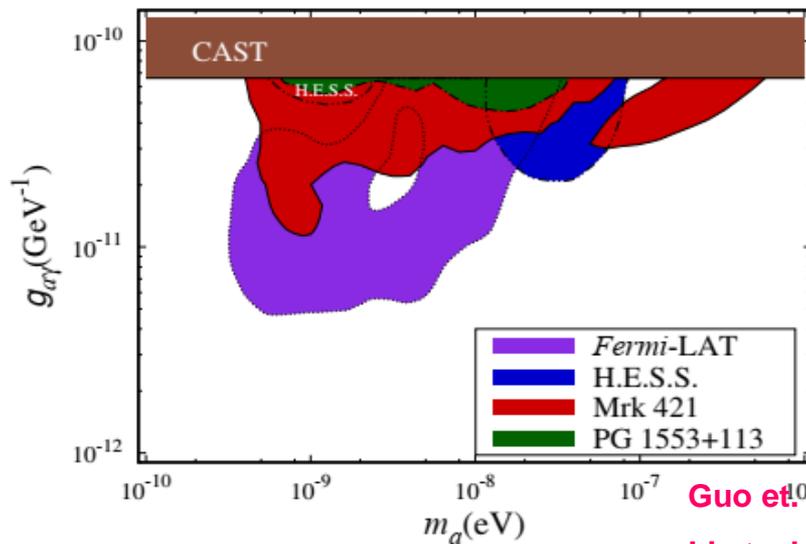
利用高能伽马观测做出的限制

● 利用**Fermi-LAT**观测($\sim 0.1-10^2 \text{GeV}$)做出的限制。其数据精确，有可能限制较细微的能谱变化。



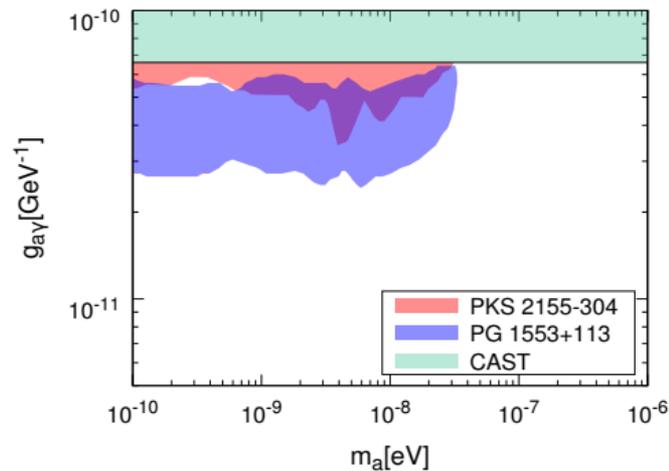
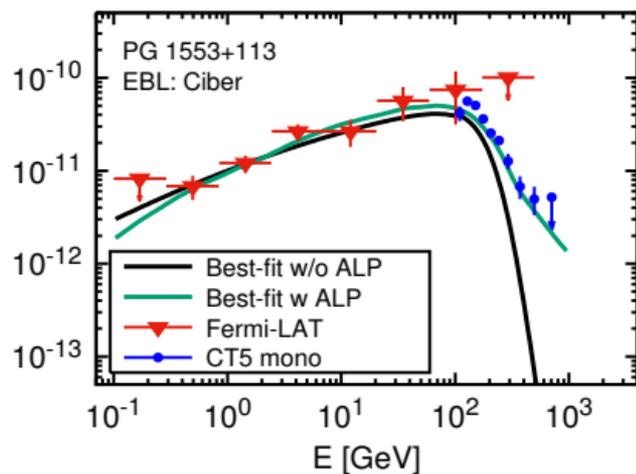
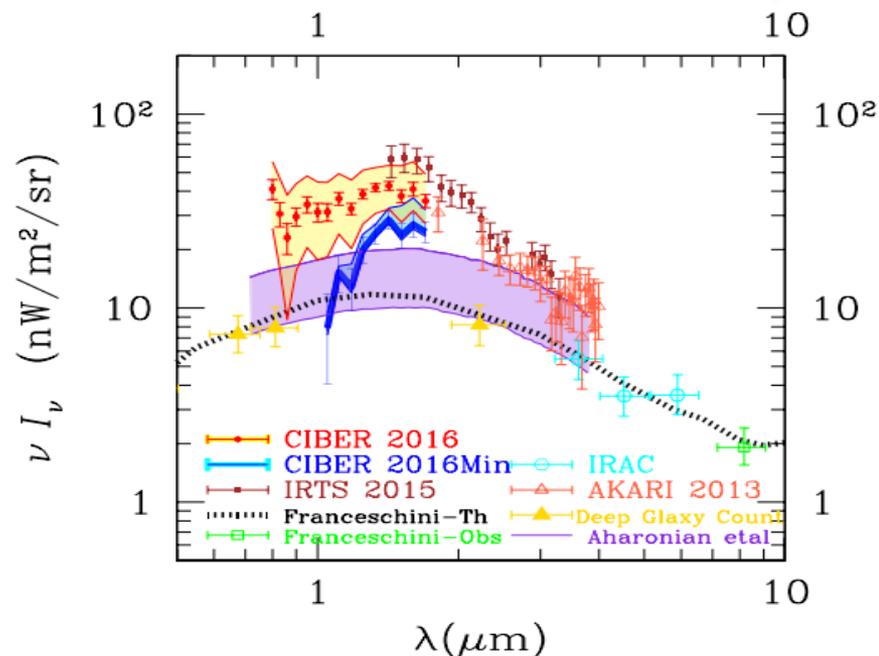
● 加入**HESS**和**ARGO**极高能观测($\sim 10^2-10^3 \text{GeV}$)做出的限制。可能探测极高能光子的转化效应。

未来**LAHHSO**可能进行类似分析。



一个可能的轴子解释区间？

- 以上分析依赖于河外红外背景光模型。传统的模型可以较好的支持观测，因而不倾向于有轴子效应。
- 近年的观测表明 μm 波段红外背景光可能存在超出。如果超出属实，它对高能光子有很强的吸收。而引入轴子可能减弱这个吸收，改善对观测的解释。



Kohri, kodama, 1704.05189

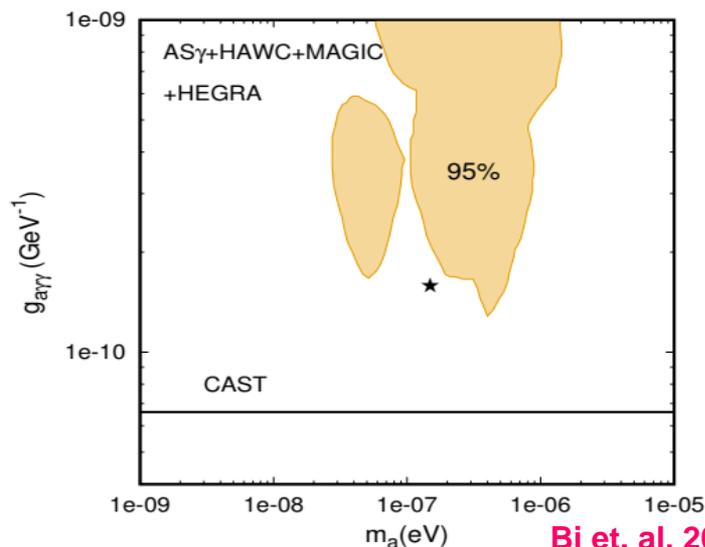
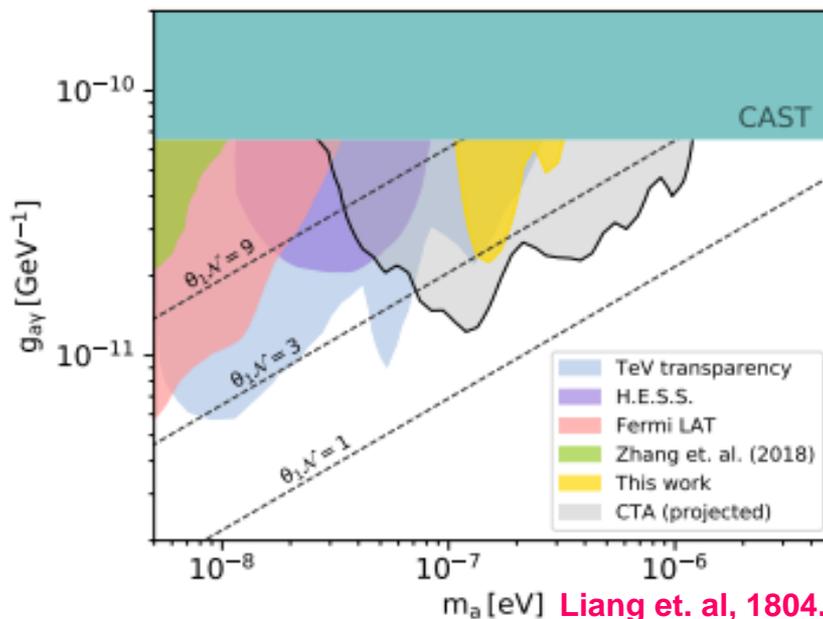
Long et. al, 1912.05309

Guo et. al, 2002.01796

Zhou et. al, 2102.05833

利用银河系内天体源做出的限制

- 利用银河系内极高能天体源可以进行类似研究。相对于河外源，河内磁场和背景光模型不确定性较小，但是轴子-光子转化区域较小。
- 利用HESS对10个河内源的观测做出的联合限制。
- 利用AS γ 对Crab的及高能伽马观测做出的限制。
- 未来利用LAHHSO进行类似研究。



暗物质轴子在中子星磁场中的转化：微波信号

- 典型的QCD暗物质轴子 $m_a \sim \mu\text{eV}$

在致密星磁场中转化为光子，
对应能量在微波波段。

- 转化集中发生在很窄的区域，
满足 $m_a \sim m_\gamma$ （共振转化）， m_γ
为等离子体中光子有效质量

Pshirkov, Popov, 0711.1264

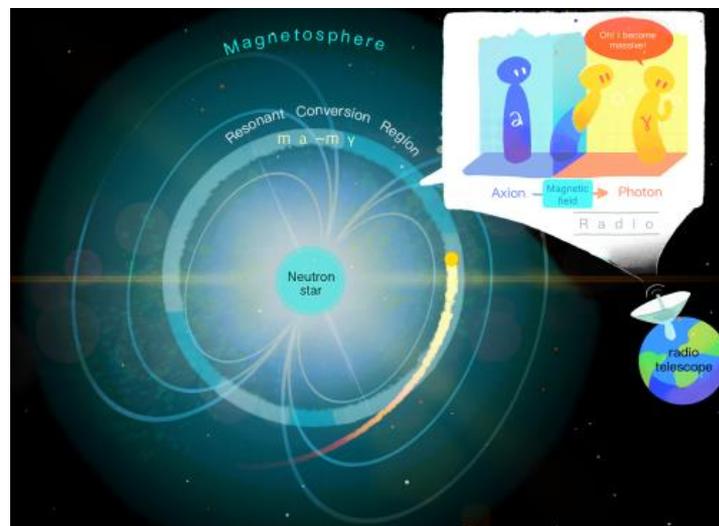
Huang et. al, 1803.08230

Hook et. al, 1804.03145

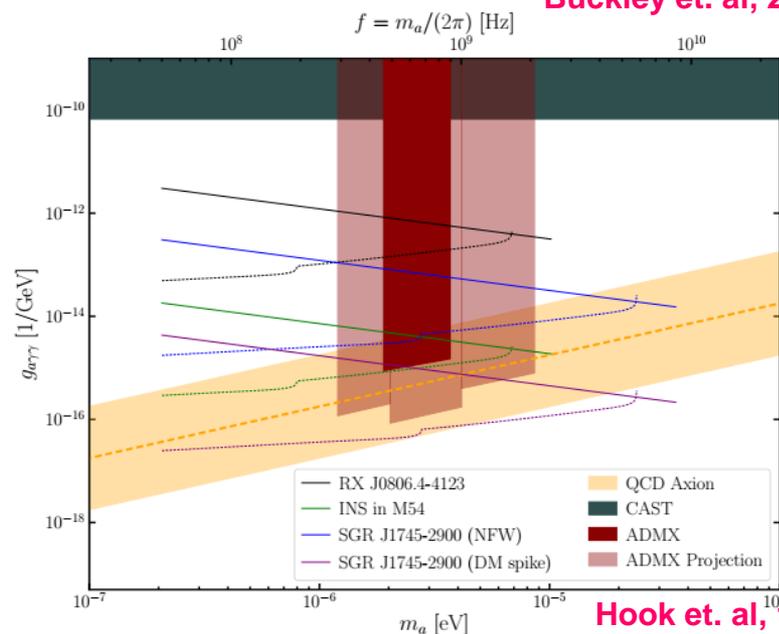
- SKA和FAST等实验可能进行相关信号探测。

- 拓展研究：恒星密集区域的信号；轴子微团块/轴子星的转化等等。

Buckley et. al, 2004.06486



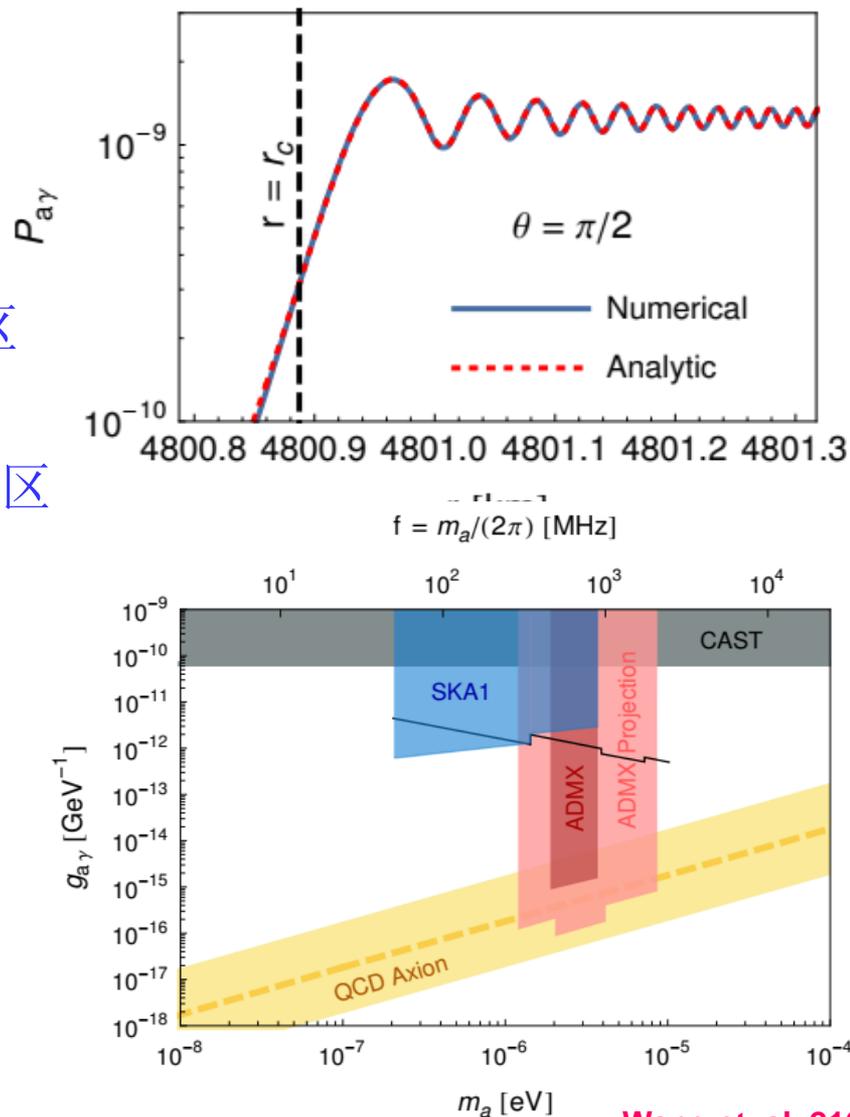
Buckley et. al, 2004.06486



Hook et. al, 1804.03145

暗物质轴子在白矮星磁场中的转化：微波信号

- 如果**磁白矮星**表面存在等离子体构成的冕层（**corona**），也可以将暗物质轴子转化为微波信号。
- 中子星磁场 $\sim 10^{10}\text{--}10^{14}\text{ G}$ ，转化区域半径 $\sim 10^2\text{ km}$ ；
磁白矮星磁场 $\sim 10^6\text{--}10^9\text{ G}$ ，转化区域半径 $\sim 10^4\text{ km}$ 。
- 地球临近区域存在一定数量的磁白矮星。
- 两者信号可比。



光子在背景轴子场中的传播：双折射

- 不存在强背景电磁场的运动方程

$$\ddot{\mathbf{A}} - \nabla^2 \mathbf{A} = g_{a\gamma}(\dot{a}\nabla \times \mathbf{A} + \dot{\mathbf{A}} \times \nabla a)$$

- 定义两种圆偏振模式。
$$\mathbf{A}(t, \mathbf{x}) = \sum_{\pm} \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} A^{\pm}(k) \mathbf{e}^{\pm}(\hat{\mathbf{k}}) e^{(i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} - i\omega_{\pm}t)}$$

代入运动方程可得
$$\omega_{\pm}^2 - k^2 \mp g_{a\gamma}(\dot{a} + \hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla a)|k| = 0$$

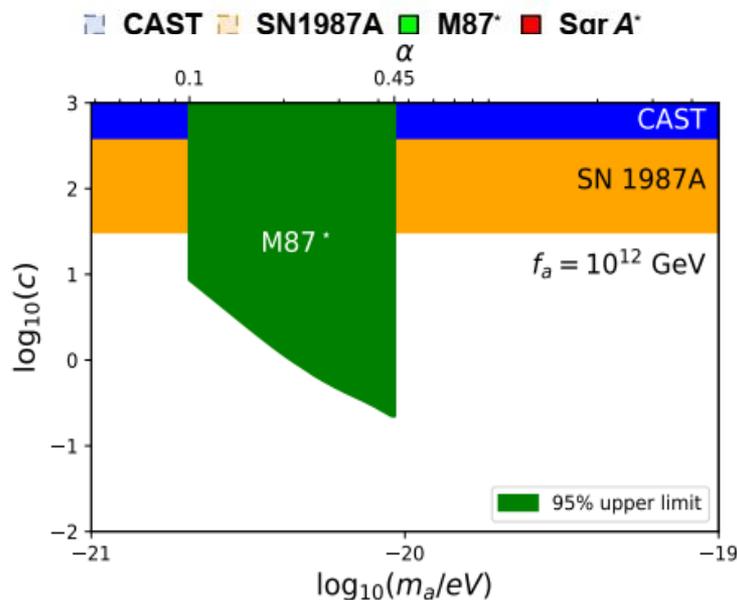
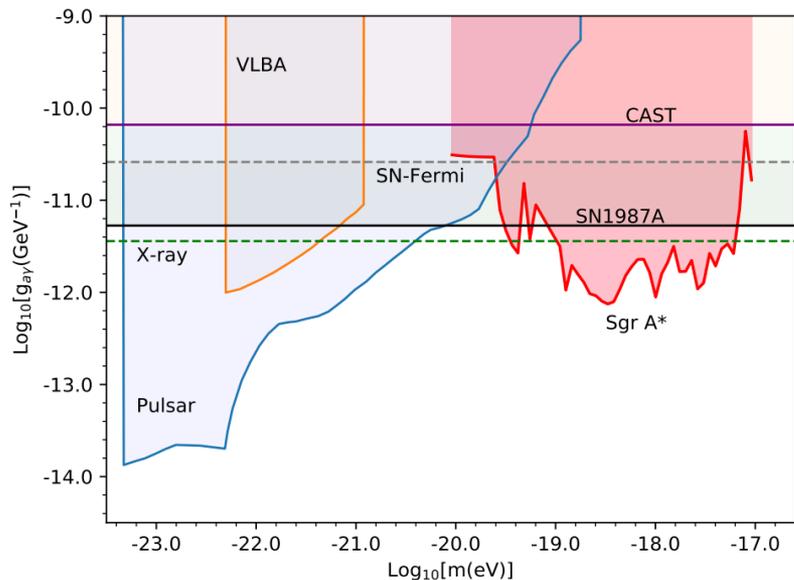
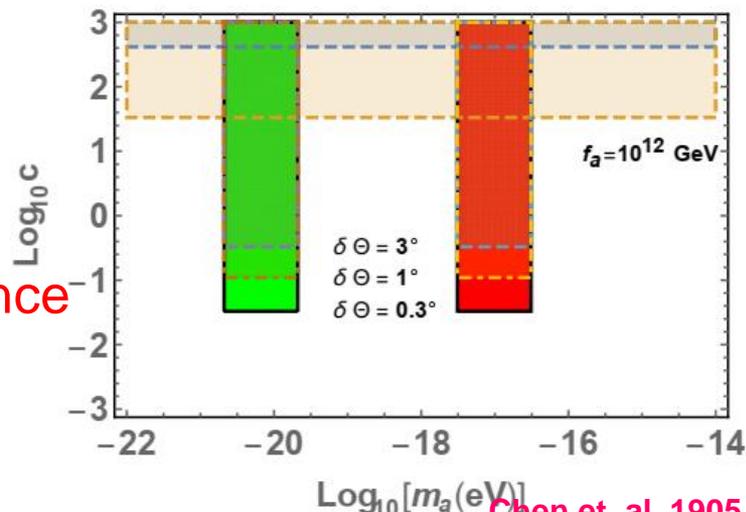
- 两种圆偏振模式具有不同的色散关系。对于初始线偏振模式，经过传播后极化面发生偏转。角度取决于背景轴子场变化。

$$\Delta\phi = \frac{g_{a\gamma}}{2} [a(t_{\text{obs}}, \mathbf{x}_{\text{obs}}) - a(t_{\text{emit}}, \mathbf{x}_{\text{emit}})]$$

$$\Delta\phi(t) \simeq 5^\circ \sin\left(2\pi\frac{t}{T} + \delta(\mathbf{x})\right) \left(\frac{\rho_{\text{DM}}}{2 \times 10^9 \text{ GeV/cm}^3}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-12} \text{ GeV}^{-1}}\right) \left(\frac{m_a}{10^{-18} \text{ eV}}\right)^{-1}$$

利用EHT极化观测做出的限制

- 利用Event Horizon Telescope对超大质量黑洞M87和Sgr A的极化观测对理论进行限制。
- 旋转黑洞附近可能通过superradiance机制增强轴子的分布。
- 需要细致处理天文本底。



总结

- 强CP问题是标准模型中的一个重要难题。PQ机制是一种优美的解决方案，同时预言了轴子的存在。
- 轴子可以在天体过程中大量产生，并且可能作为冷暗物质的候选者。
- 多种天文观测可以探测这两种轴子的效应。
- 存在广阔的待检验理论区间。
- 相关探测和研究可以拓展到其它轻粒子，如暗光子。

谢谢