



Axion dark matter and XENON1T excess

@darkONline2020
Sep.8th,2020

**Fumi Takahashi
(Tohoku University)**

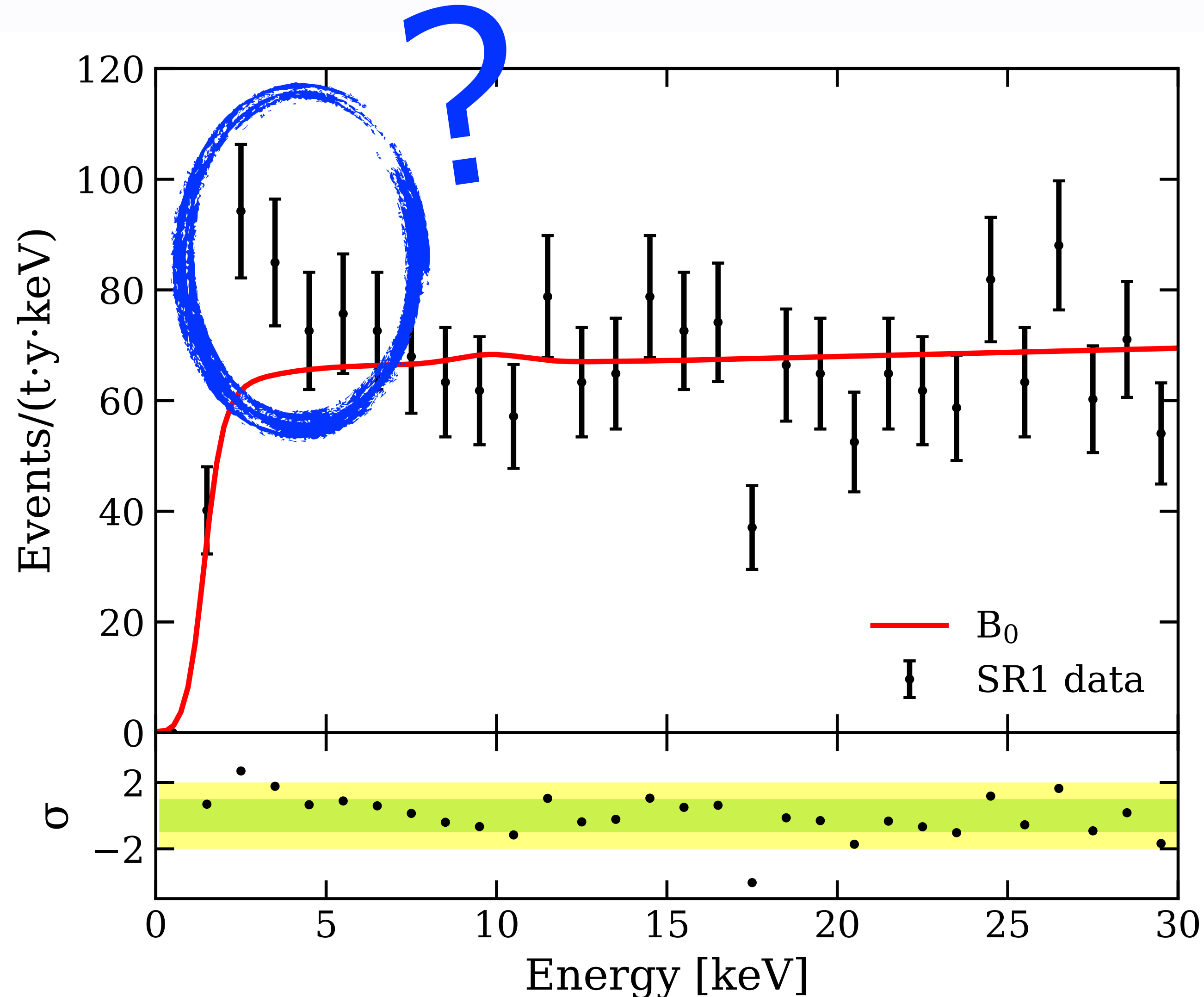
Content

1. 導入 - XENON1Tと理論模型
2. Axion dark matter
3. Hidden photon dark matter
4. まとめ

1. 導入 - XENON IT と理論模型

Electron recoil events in XENON1T

XENON1T, arXiv:2006.09721



Interpretations in terms of new physics

1. Solar axions
2. Neutrino magnetic moment
3. KeV-scale bosonic DM
 - a) Axion (ALP)
 - b) Dark photon
4. Others (more exotics)

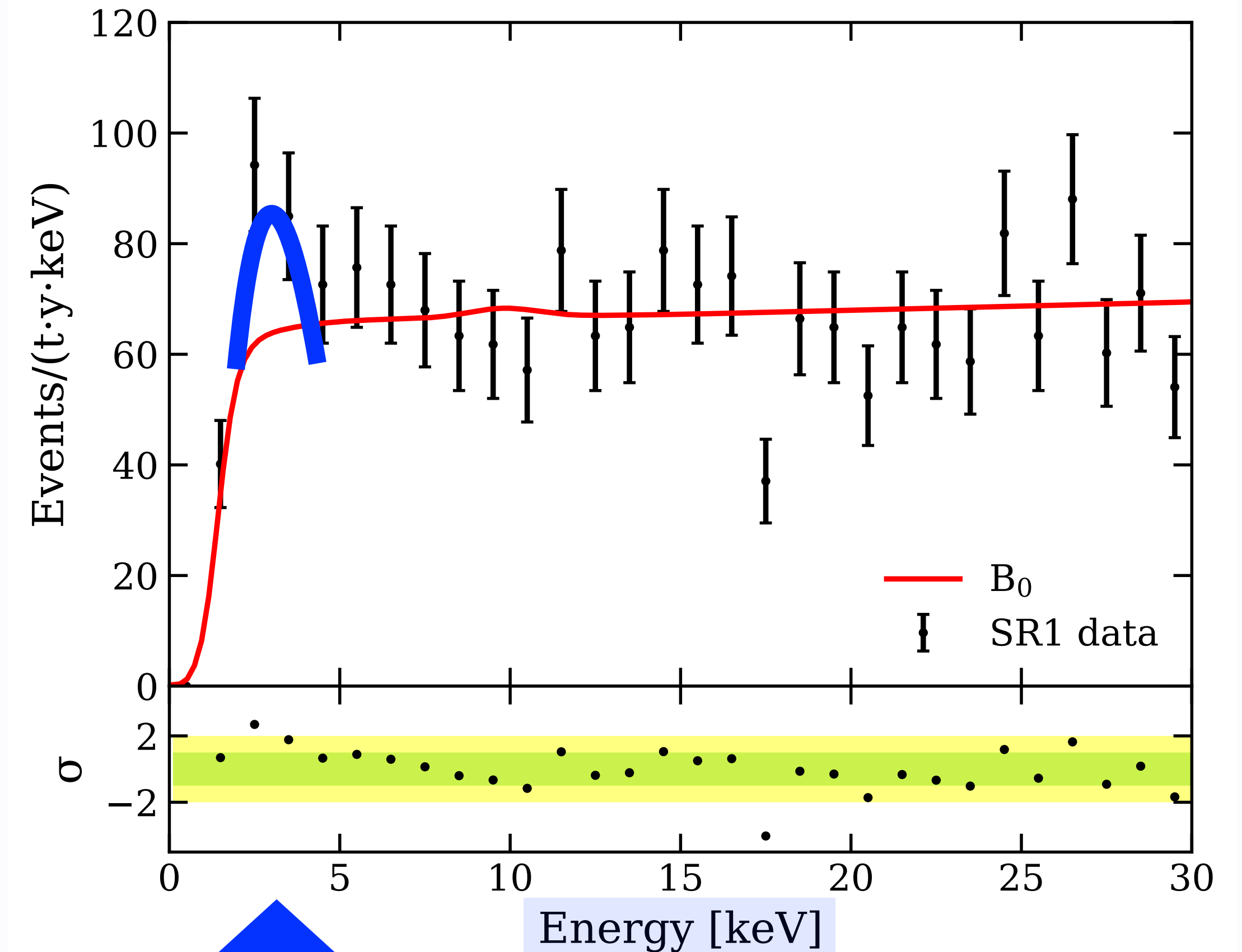
まず過剰事象をnew physicsで説明するには,

1. Energy transfer of O(keV)

何かがXENON検出器まで飛んできて、
なんとかしてkeVのエネルギーを
「電子」に渡さないといけない。

2. Number of events and spectral shape

電子反跳エネルギースペクトルは
低エネルギー (2-3keV)に顕著なピーク。



理論模型で説明したい点は、

- “飛んでくる何か”の起源
- どうやって“電子反跳”？
- 他の制限（星の冷却，他の直接/
間接検出 etc)を満たすか？

DMに関係 or DMとは無関係

電子 or 光子， 吸収 or 散乱

模型依存。満たさないなら，その
模型は諦める or 何らかの拡張

理論模型で説明したい点は、

- “飛んでくる何か”の起源
- どうやって“電子反跳”？
- 他の制限（星の冷却，他の直接/間接検出 etc)を満たすか？

DMに關係 or DMとは無關係
電子 or 光子， 吸収 or 散乱
模型依存。満たさないなら，その模型は諦める or 何らかの拡張

- なんでkeV?
なんでこれくらいの超過？
- 他に予言があるか？あったとして将来実験観測の予想感度内か？

別な理由でエネルギーや相互作用の強さが決まっていると嬉しい。

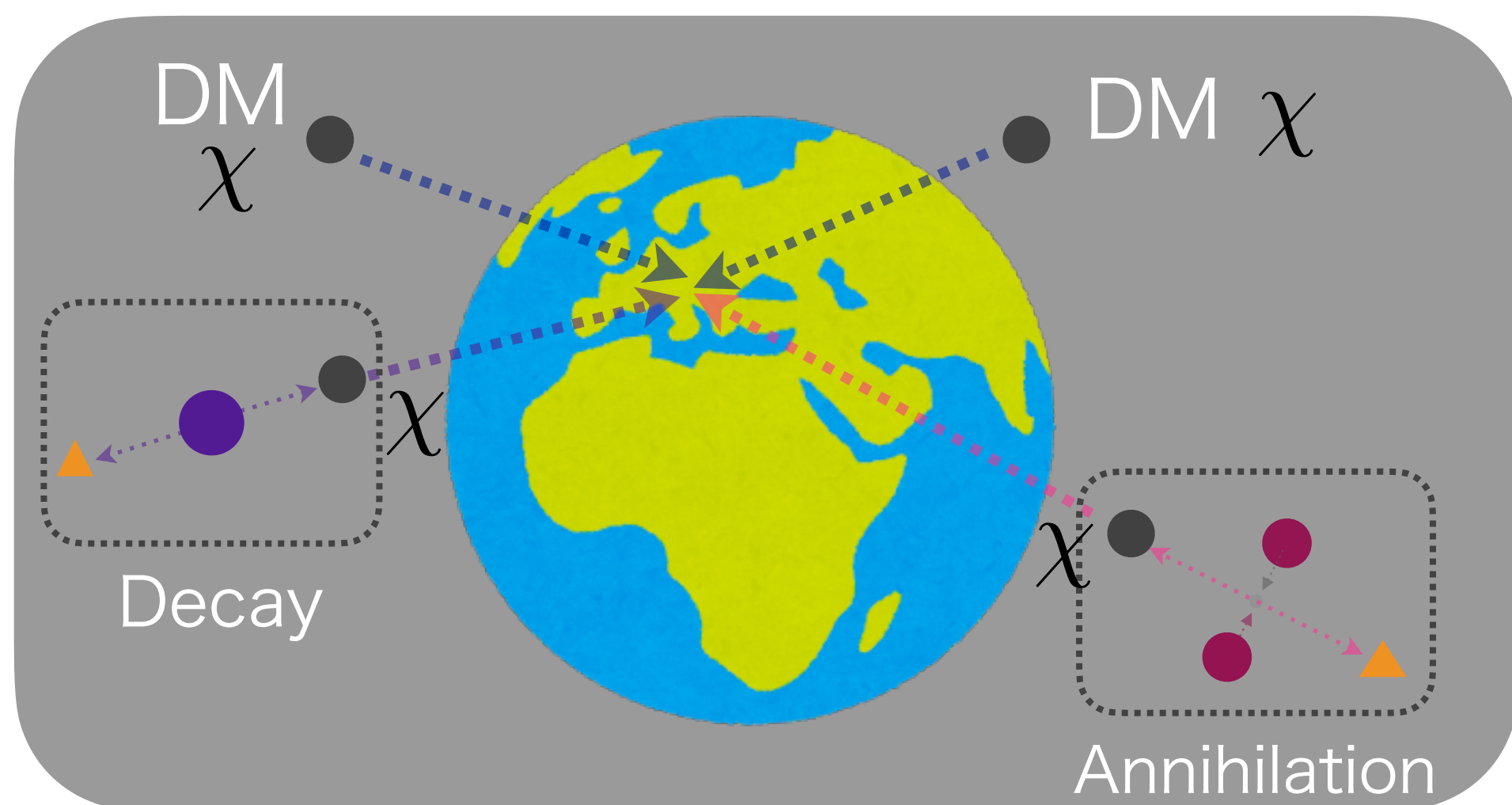
将来に検証可能なら嬉しい。

+

“飛んでくる何か”の起源

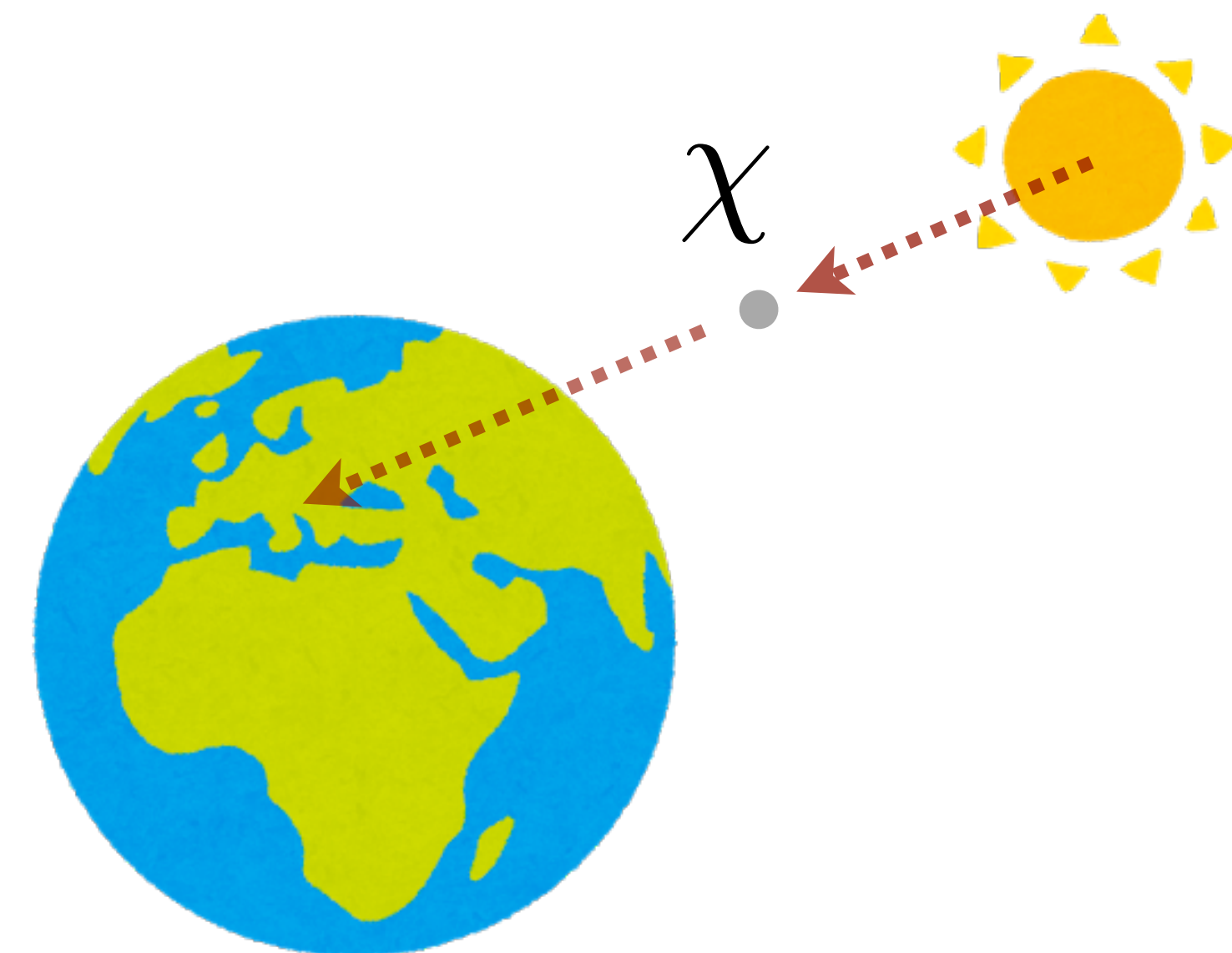
ダークマターに関連

- ・ダークマターそのもの
- ・ダークマターの対消滅や崩壊によって出来た粒子



ダークマターとは関係ない

- 例：太陽中心部でつくられて飛んでくる
solar axion, solar dark photon

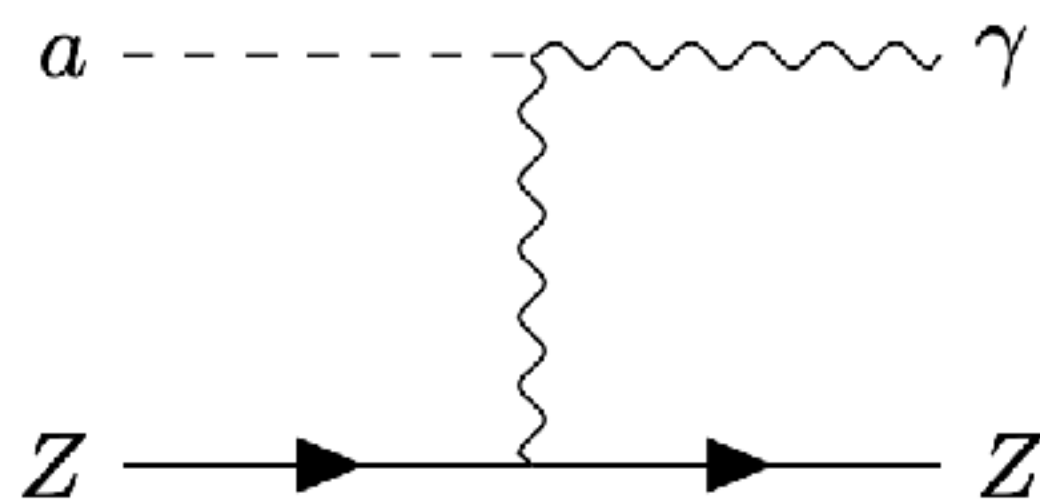


どうやって“電子反跳”？

「電子反跳」イベントは

電子 or 光子

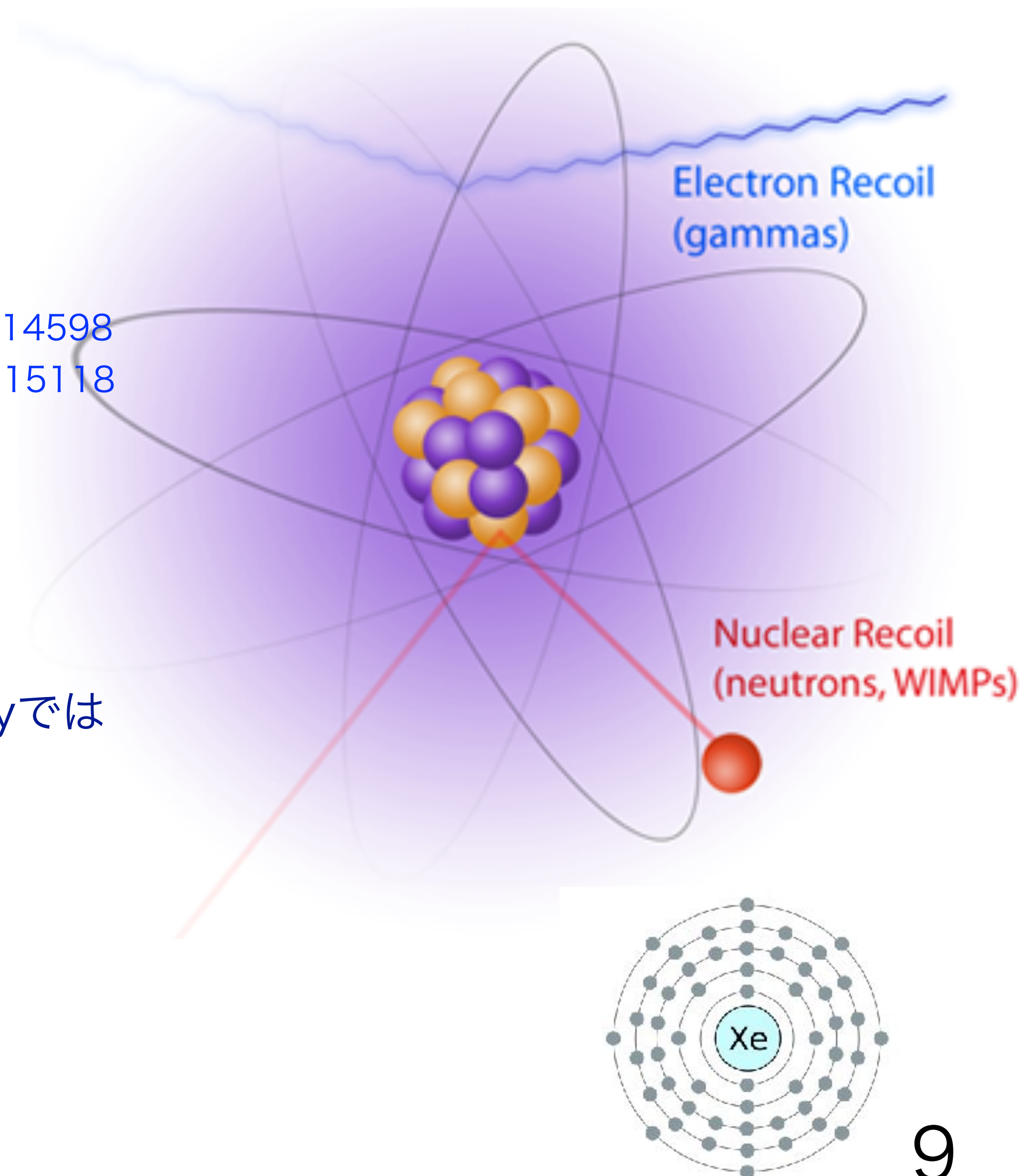
cf. inverse Primakoff effect, Gao et al 2006. 14598
Dent et al 2006.15118



ただし太陽アクシオン with Primakoff onlyでは
stellar coolingとtension

以下，電子との相互作用を考える。

電子：

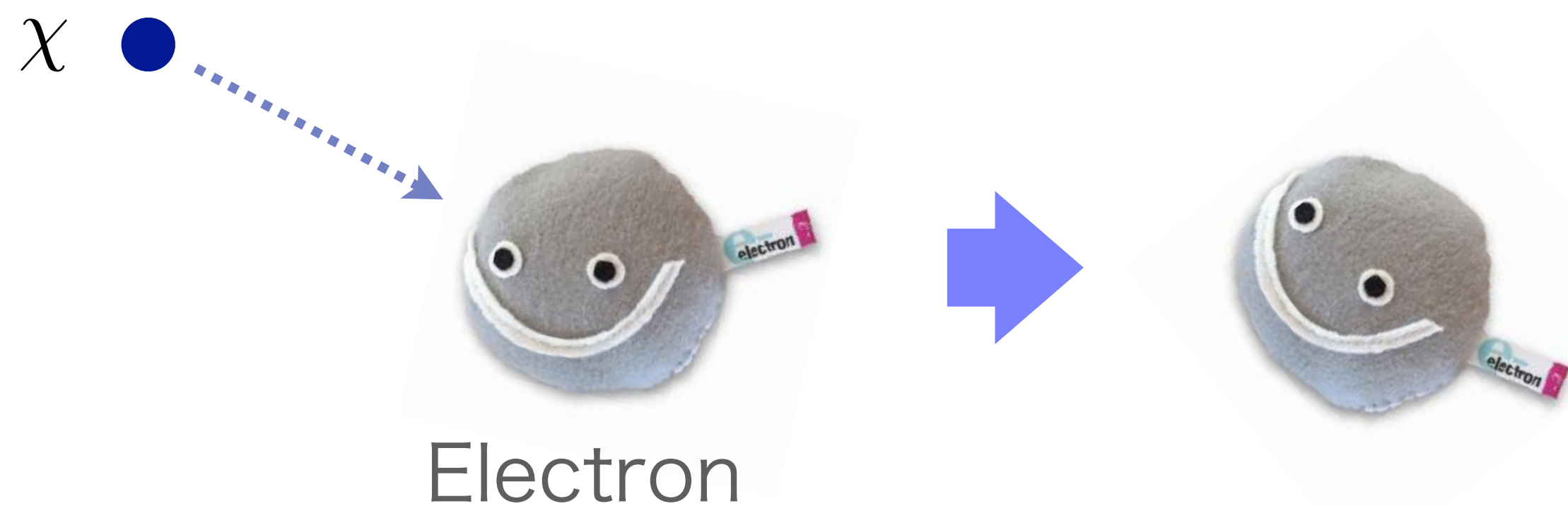


どうやって“電子反跳”？（つづき）

電子へのエネルギーの渡し方： **吸収 or 散乱**

吸収

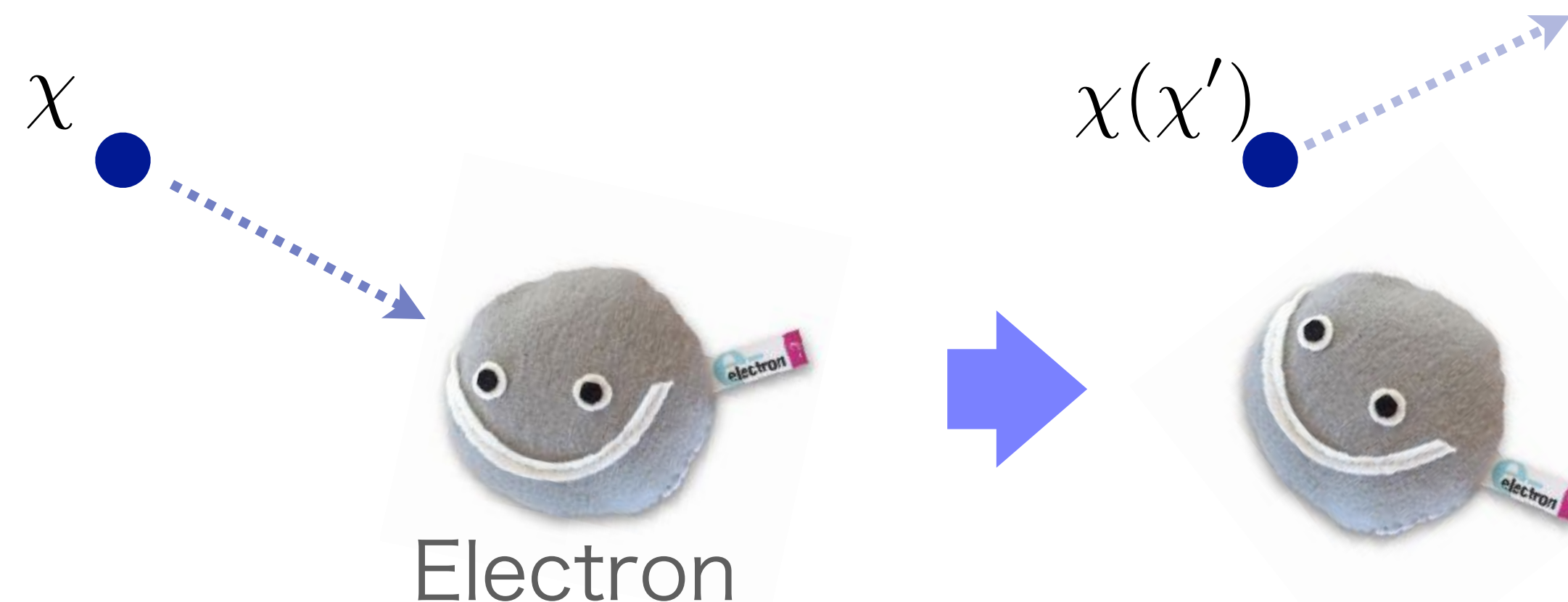
χ : 飛んでくる「何か」



- 全エネルギーが反跳エネルギーに。
- 非相対論的なら keVの質量
- 相対論的ならkeVの運動エネルギー

運動エネルギーの起源？太陽？

散乱



$$E_R \sim \text{keV} \sim \frac{\mu^2 v^2}{m_e} \lesssim m_e v^2 \quad \mu = \frac{m_\chi m_e}{m_\chi + m_e}$$

$$\therefore v \gtrsim 0.1c \gg v_{\text{local}} \simeq 220\text{km/sec}$$

ちなみに脱出速度 $v_{\text{escape}}(r_\odot) \simeq 580\text{km/sec} \sim 0.002c$

加速機構が必要

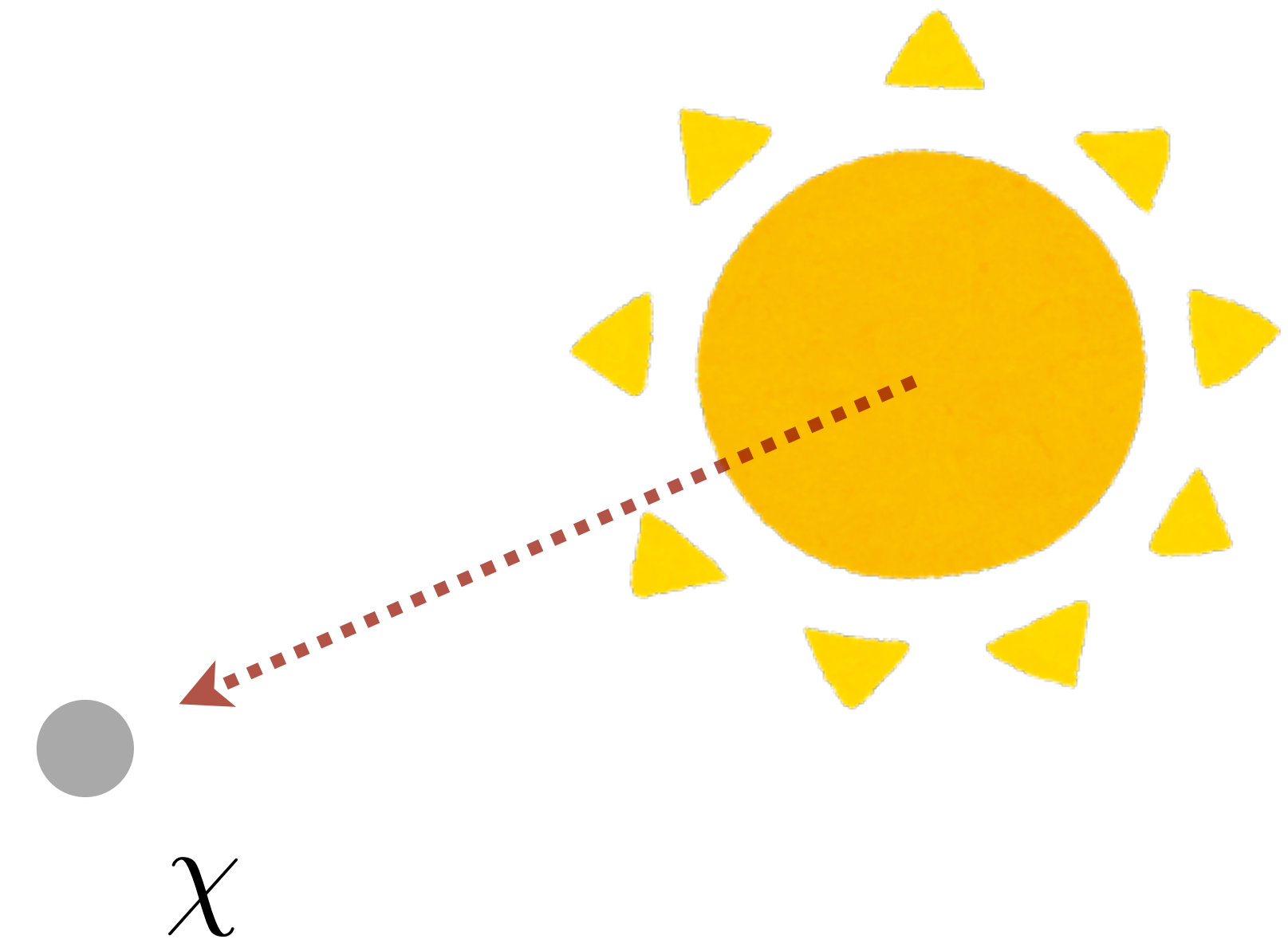
DMのdecay, (semi)annihilation, exothermic DM

他の制限は？

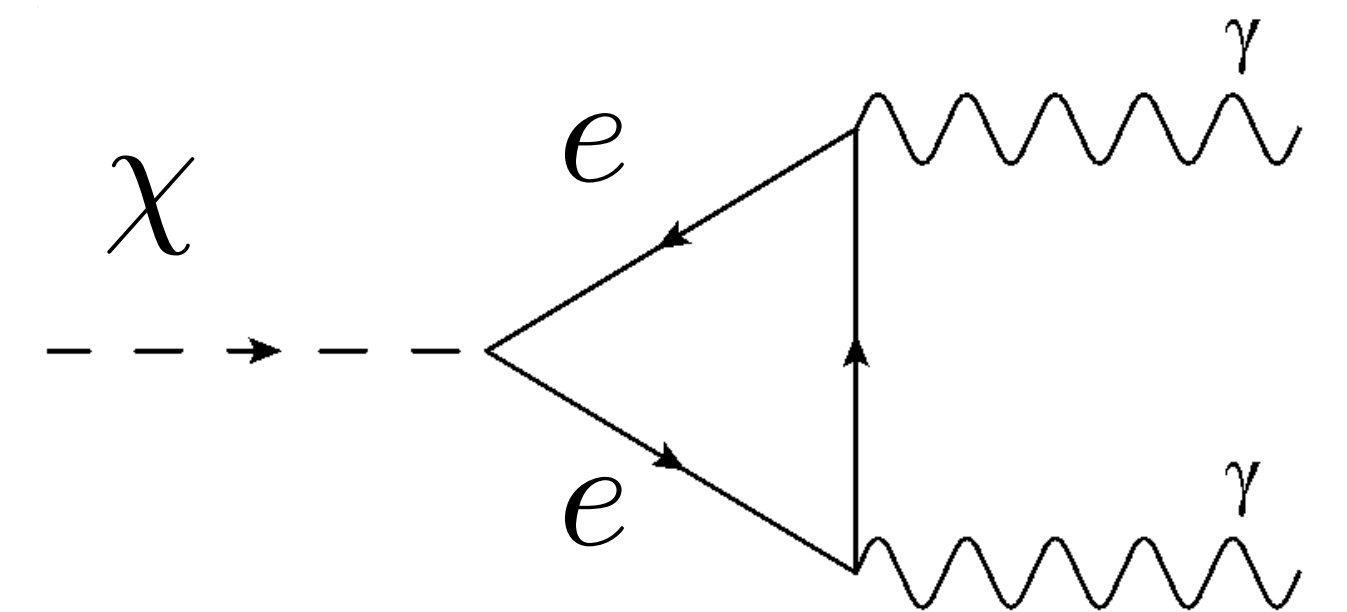
- 一般に，軽くて相互作用の弱い粒子は太陽などの天体内部で生成されてエネルギーを持ち逃げするため**天体進化に影響**を与える。

たとえば太陽： $L_{\chi} \lesssim L_{\odot}$

太陽組成，ニュートリノfluxなどを用いてもっとaggressiveな制限も可能。
白色矮星 (WD), 赤色巨星 (RG), 水平分岐星 (HB)からも制限。



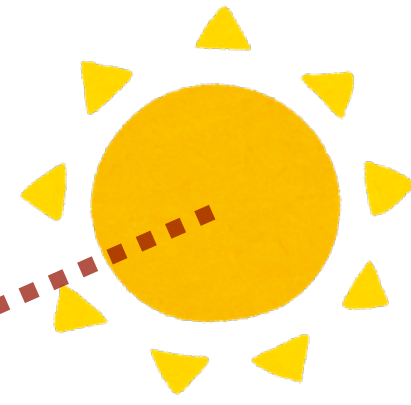
- あるいは，keV質量のダークマターが光子に崩壊すると**X線観測**から制限される。



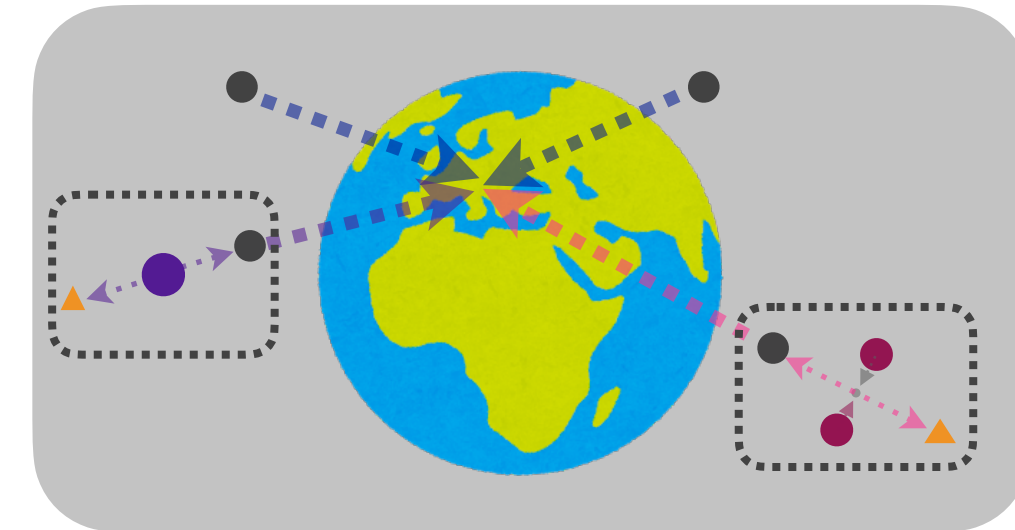
- 他にも**元素合成**や**構造形成**からの制限など。 **千草さんのtalk**

具体的な模型

広島さんのtalk



- Solar axion/hidden(dark) photon
- Solar neutrinos + extra interactions (e.g. magnetic moment, vector portal)
- Axion/hidden photon DM
- Boosted DM (Two-component DM, semi-annihilation, self-annihilation ($3 \rightarrow 2$), Nearby DM clump)
- Exothermic DM
- etc.
- Many interesting ideas on production or boosting DM (e.g. Sun-/CR-heated DM, stellar basin), avoiding the stellar cooling bounds, and implications for other experiments...



しかし, solar axion/dark photonはstellar coolingの制限により
XENON1T超過の説明としてはうまくいかない。

Axion-electron couplingでexcessを説明するためには

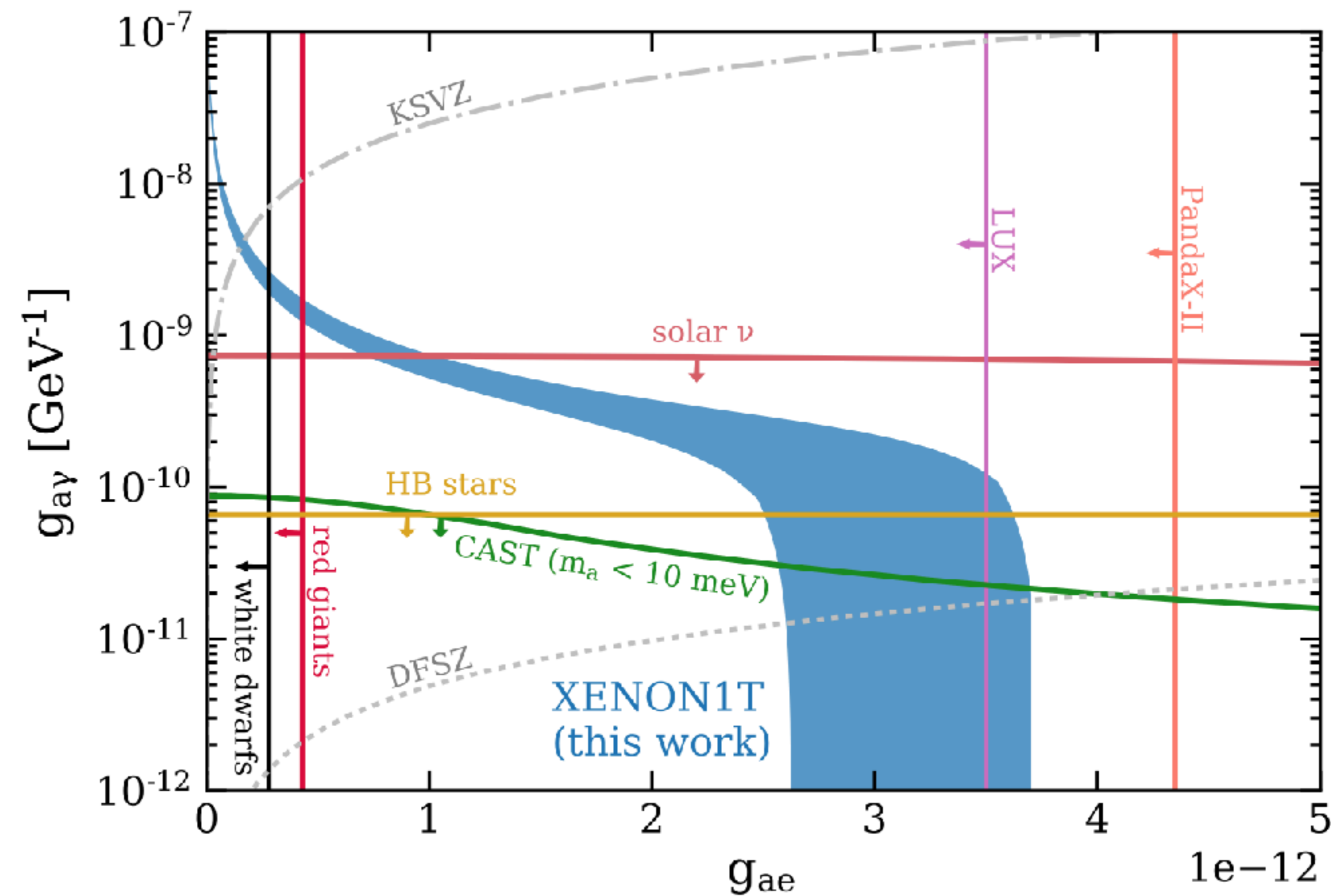
$$g_{ae} = \mathcal{O}(10^{-12})$$

が必要

(massはkeV以下でOK, というのも
solar axion flux peakは \sim keV)

一方, WDのcooling boundは

$$g_{ae} \lesssim \mathcal{O}(10^{-13})$$

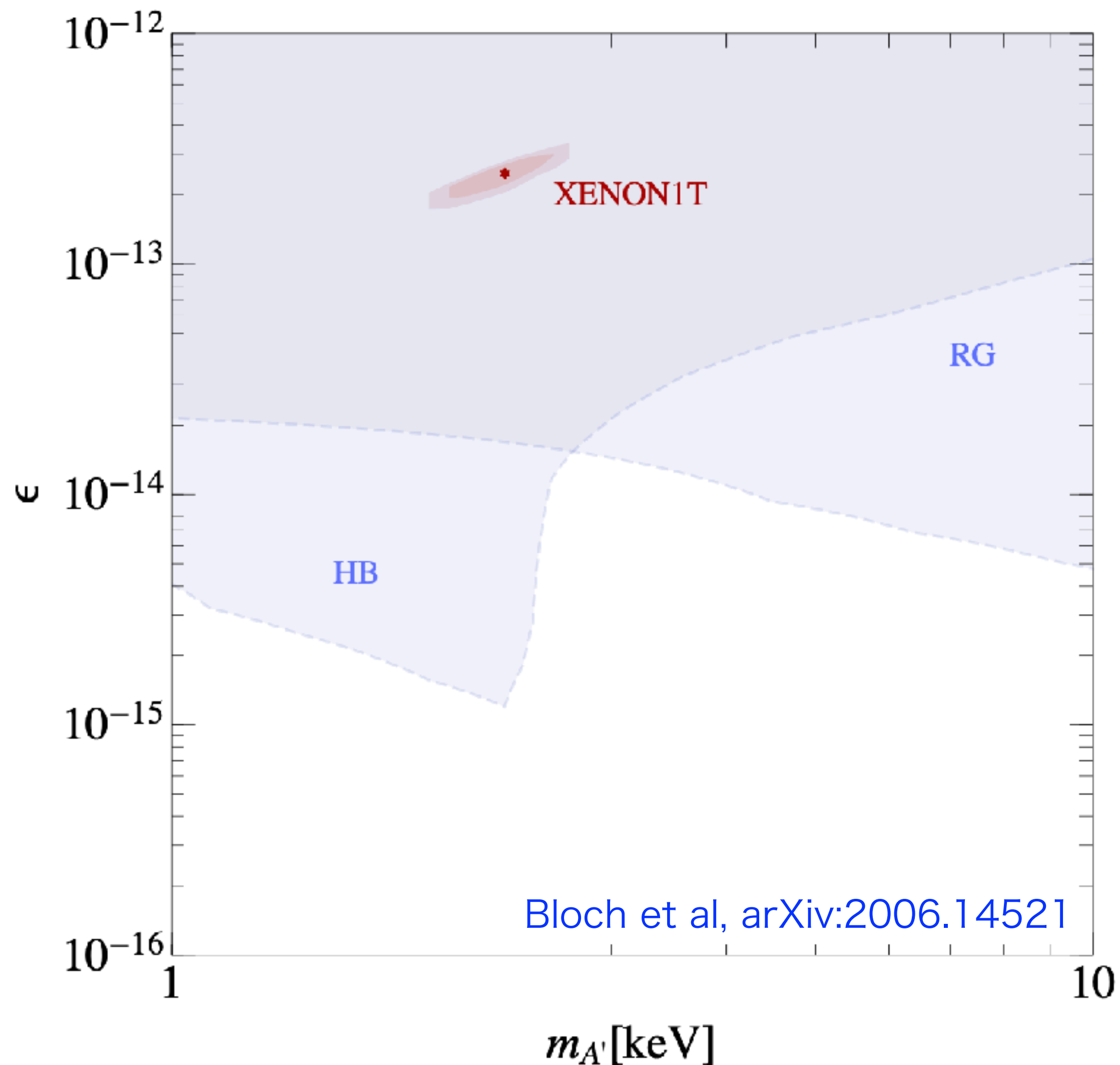


XENON1T, arXiv:2006.09721

Raffelt `86 + more

しかし, solar axion/dark photonはstellar coolingの制限により XENON1T超過の説明としてはうまくいかない。

Solar Dark Photon (Stuckelberg)



Solar dark photonでexcessを説明するためには

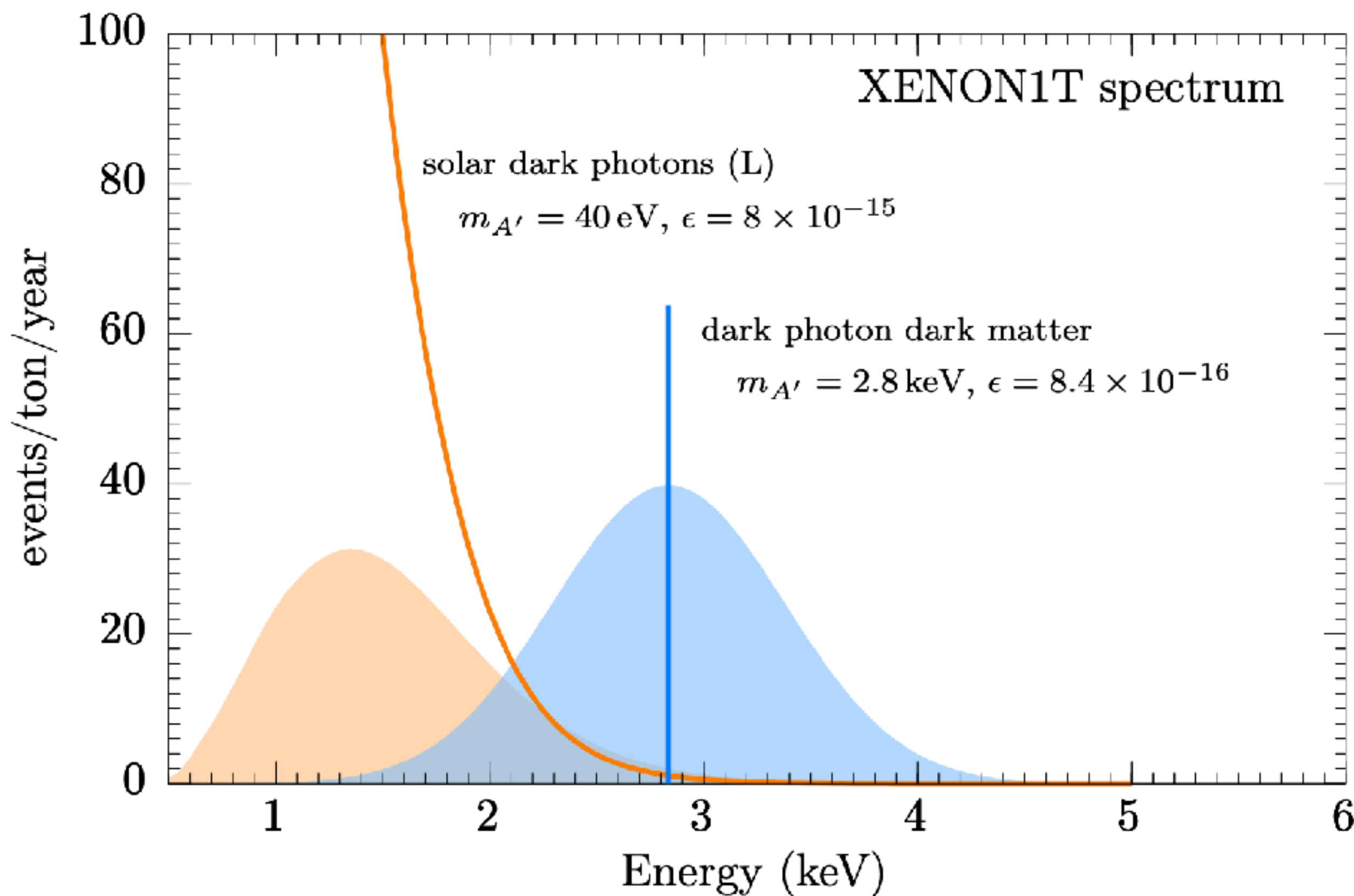
運動項混合: $\kappa = \mathcal{O}(10^{-13})$

質量: $m_{\gamma'} = 2 - 3 \text{ keV}$

が必要。一方, HBから $\kappa \lesssim 10^{-14}$

Solar axionと違い, keV質量が必要なのは DP fluxが低エネルギーほど増えるので, 質量でカット必要だから。

しかし, solar axion/dark photonはstellar coolingの制限により XENON1T超過の説明としてはうまくいかない。



An, Pospelov, Pradler, Ritz, arXiv:2006.13929

Solar dark photonでexcessを説明するためには

運動項混合: $\kappa = \mathcal{O}(10^{-13})$

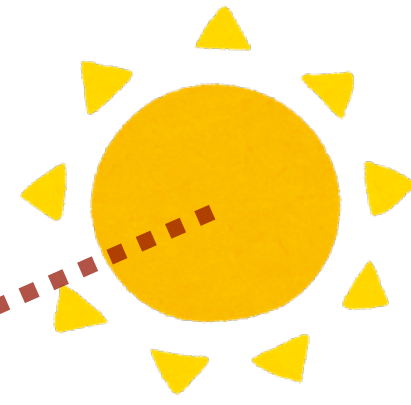
質量: $m_{\gamma'} = 2 - 3 \text{ keV}$

が必要。一方, HBから $\kappa \lesssim 10^{-14}$

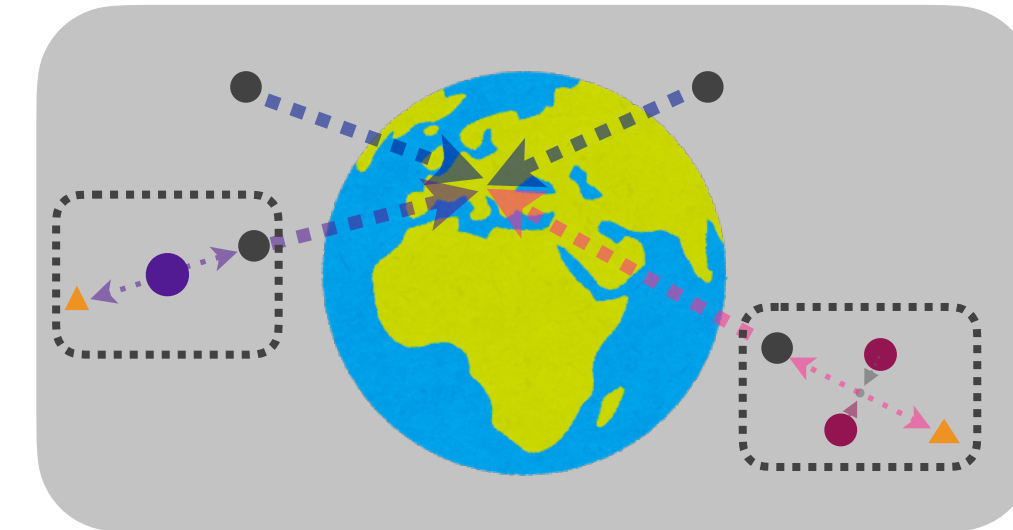
Solar axionと違い, keV質量が必要なのは DP fluxが低エネルギーほど増えるので, 質量でカット必要だから。

具体的な模型

広島さんのtalk



- Solar axion/hidden(dark) photon
- Solar neutrinos + extra interactions (e.g. magnetic moment, vector portal)
- **Axion/hidden photon DM** ← これに着目
- Boosted DM (Two-component DM, semi-annihilation, self-annihilation ($3 \rightarrow 2$), Nearby DM clump)
- Exothermic DM
- etc.
- Many interesting ideas on production or boosting DM (e.g. Sun-/CR-heated DM, stellar basin), avoiding the stellar cooling bounds, and implications for other experiments...

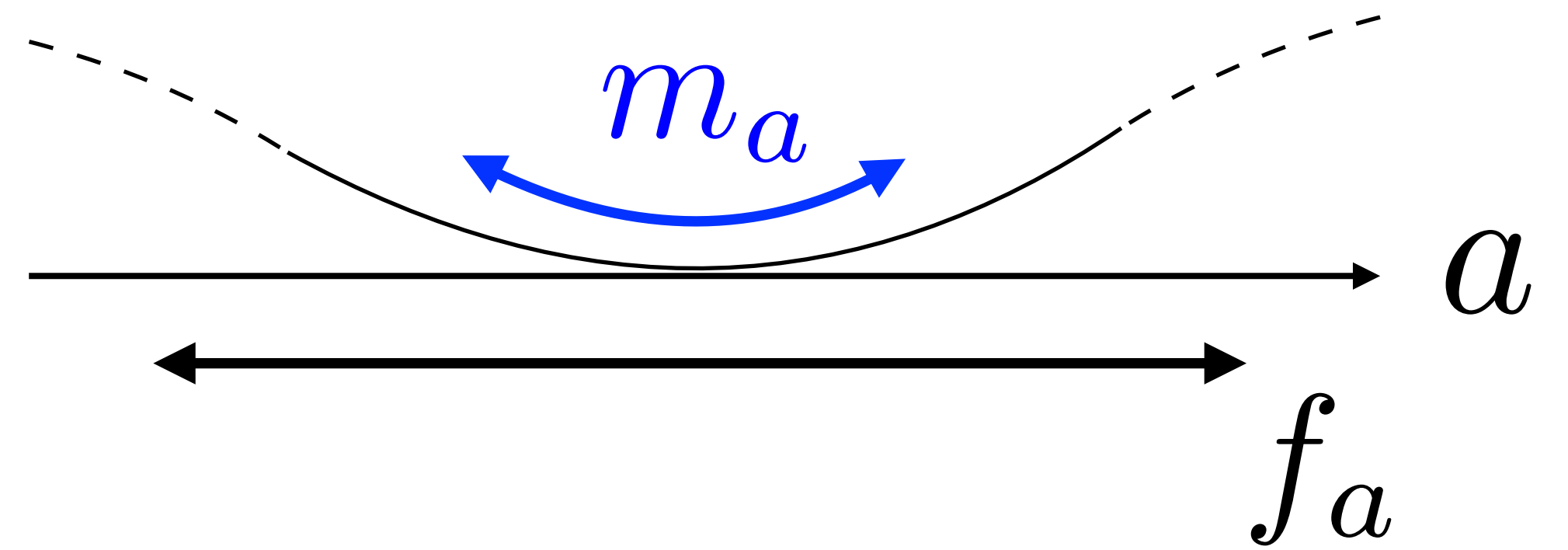


2. Axion dark matter

Axion (ALP) DM

2つの重要なパラメーター：質量 m_a と崩壊定数 f_a

$$V(a) \simeq \frac{1}{2} m_a^2 a^2 + \dots$$



標準理論粒子との主な相互作用：

• Photons $\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} = -g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$

• Electrons $\mathcal{L}_{aee} = \frac{C_e}{2f_a} \partial_\mu a (\bar{\Psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_e) = -ig_{aee} a (\bar{\Psi}_e \gamma_5 \Psi_e) + \dots$

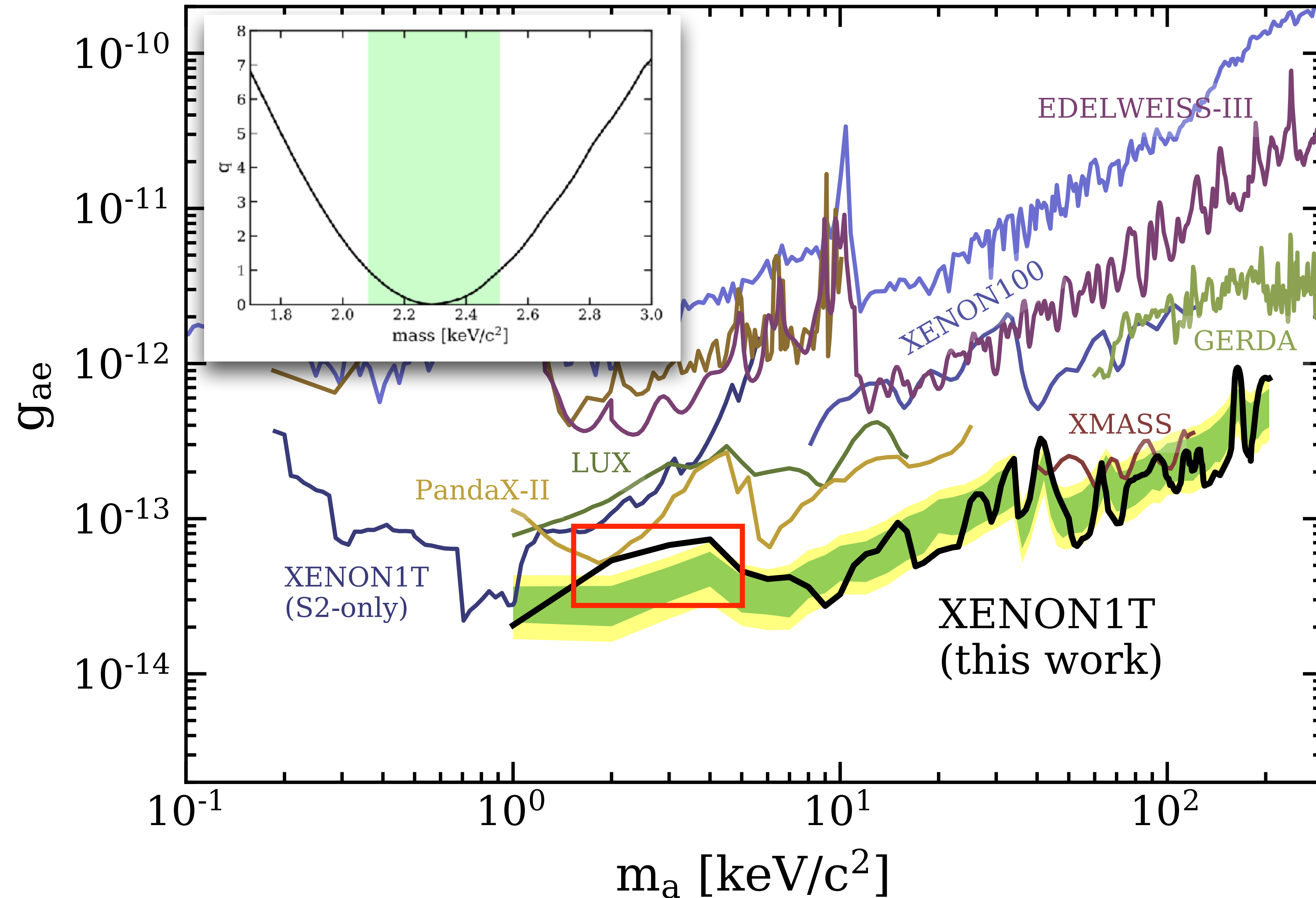
• Nucleons $\mathcal{L}_{aNN} = \sum_{N=p,n} \frac{C_N}{2f_a} \partial_\mu a (\bar{\Psi}_N \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_N)$

$$g_{aee} \equiv \frac{C_e m_e}{f_a}$$

Axion (ALP) DMの特徴

- ✓ **吸収**によってXENON1T超過を説明可能 (monochromatic spectrum)
- ✓ 太陽アクシオンとは異なり (生成が別なので) **stellar cooling boundを満たす**ことができる。
 - ・特にDMの10%くらいを占める場合には, white dwarf/red giantのcooling anomalyを説明できる。
- ✓ ただし**photonとの結合は小さく**しないといけない; **anomaly-free ALP.**
- ✓ Vacuum misalignment機構によってcold ALP DMの**生成が容易**。
 - ・熱的にもつくれる。(warm DM < 10% DM)

Direct DM search bounds on g_{ae}



$$\mathcal{L} = ig_{ae}a\bar{\Psi}_e\gamma_5\Psi_e$$

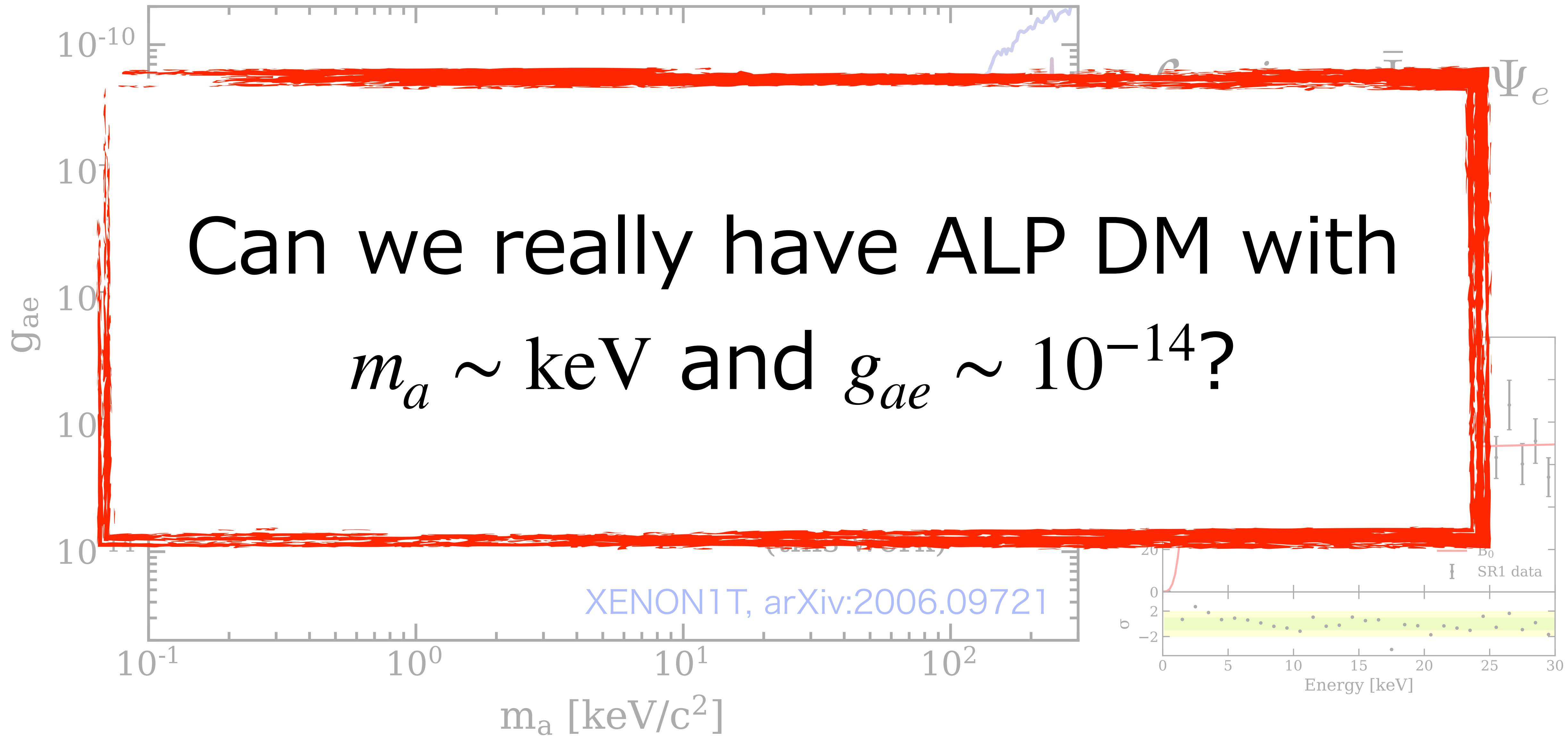
The excess favors a mono-energetic peak at

$$m_a = 2.3 \pm 0.2 \text{ keV}$$

$$g_{ae} \approx 3 \times 10^{-14}$$

with 3σ significance over background.

Direct DM search bounds on g_{ae}

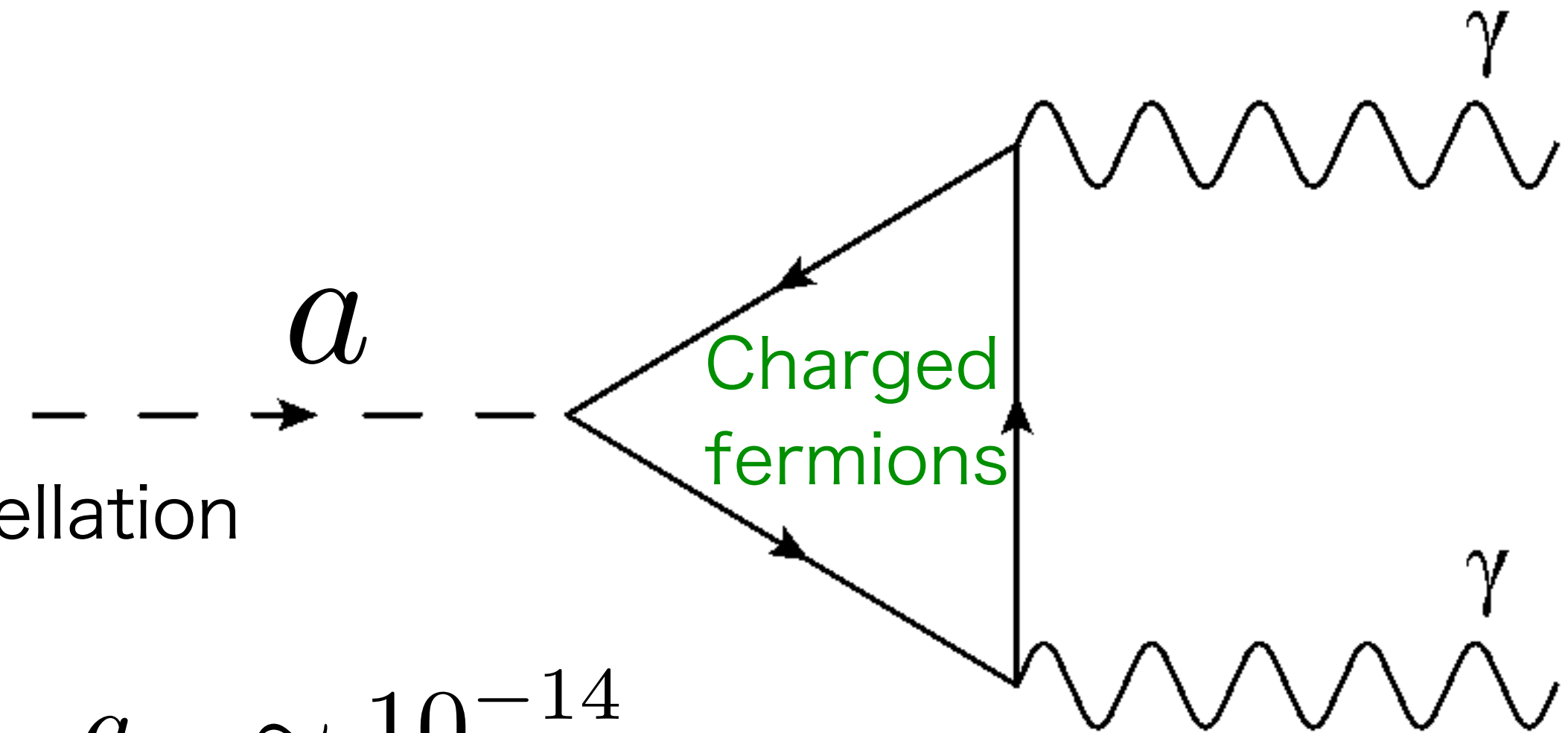


Anomaly-free ALP DM

FT, Yamada, Yin 2006.10035
 Nakayama, FT, Yanagida 1403.7390
 see also Pospelov, Ritz, Voloshin 0807.3279

The axion generically has an anomalous coupling to photons

$$\mathcal{L} = \frac{g_{a\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



w/o cancellation

$$g_{a\gamma} \sim \frac{\alpha}{2\pi f_a} (C_e + \dots) \sim \frac{\alpha g_{ae}}{2\pi m_e}$$

$g_{aee} \equiv \frac{C_e m_e}{f_a}$

$g_{ae} \sim 10^{-14}$
 suggested by XENON1T

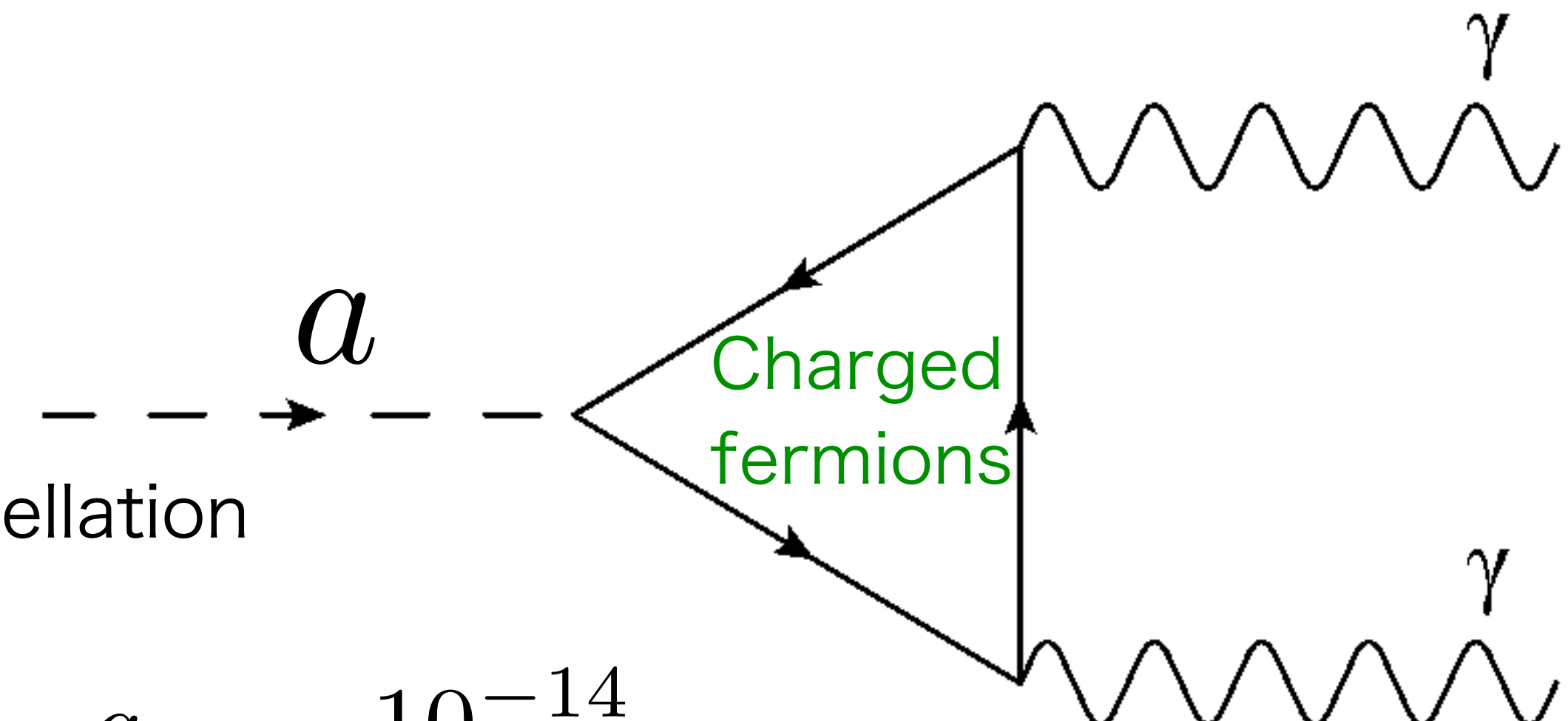
$$\Gamma_{a \rightarrow \gamma\gamma} \simeq \frac{\alpha_{\text{em}}^2 g_{ae}^2 m_a^3}{256\pi^3 m_e^2} \simeq \frac{1}{2 \times 10^{21} \text{ sec}} \quad \text{for } m_a = 2.3 \text{ keV}, g_{ae} \approx 3 \times 10^{-14}$$

The X-ray obs. constrains the lifetime to be longer than 10^{28} sec.

Anomaly-free ALP DM

FT, Yamada, Yin 2006.10035
 Nakayama, FT, Yanagida 1403.7390
 see also Pospelov, Ritz, Voloshin 0807.3279

The axion generically has an anomalous coupling to photons

$$\mathcal{L} = \frac{g_{a\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$


w/o cancellation

$$g_{a\gamma} \sim \frac{\alpha}{2\pi f_a} (C_e + \dots) \stackrel{=0}{\sim} \frac{\alpha g_{ae}}{2\pi m_e}$$

$g_{ae} \equiv \frac{C_e m_e}{f_a}$

$g_{ae} \sim 10^{-14}$
suggested by XENON1T

The X-ray observations tightly constrain the axion-photon coupling in the keV range, and we would need $g_{ae} \lesssim \mathcal{O}(10^{-18})$!!

Thus, we are led to consider the anomaly-free ALP DM.

Anomaly-free ALP DM

FT, Yamada, Yin 2006.10035
 Nakayama, FT, Yanagida 1403.7390
 see also Pospelov, Ritz, Voloshin 0807.3279

Integrating out electrically charged SM fermions, we obtain

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \simeq -\overset{=0}{(C_e + C_\mu + \dots)} \frac{\alpha_{em}}{4\pi f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + \frac{\alpha}{48\pi f_a} \left(\frac{C_e}{m_e^2} + \frac{C_\mu}{m_\mu^2} + \dots \right) \left((\partial^2 a) F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + 2a F_{\mu\nu} \partial^2 \tilde{F}^{\mu\nu} \right)$$

$$\simeq \frac{\alpha C_e}{48\pi f_a} \frac{m_a^2}{m_e^2} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

threshold corrections
 (dominated by **electron**)

↙ assuming on-shell ALP and photon.

$$\Gamma_{a \rightarrow \gamma\gamma} \simeq \frac{\alpha_{em}^2 C_e^2}{9216\pi^3} \frac{m_a^7}{m_e^4 f_a^2} = \frac{\alpha_{em}^2 g_{ae}^2}{9216\pi^3} \frac{m_a^7}{m_e^6}$$

cf. Anomalous ALP:

$$\Gamma_{a \rightarrow \gamma\gamma} \simeq \frac{\alpha_{em}^2 g_{ae}^2}{256\pi^3} \frac{m_a^3}{m_e^2}$$

The decay into photons is significantly suppressed, satisfying the bound.
 Also, the rate is **universal** for various anomaly-free ALP DM models.

Anomaly-free ALP DM

FT, Yamada, Yin 2006.10035
Nakayama, FT, Yanagida 1403.7390
see also Pospelov, Ritz, Voloshin 0807.3279

具体的な条件はEM anomalyとcolor anomalyが消えること：

$$\sum_i C_i q_i^2 = 0 \quad \text{かつ} \quad \sum_{i \in \text{color}} C_i = 0$$

PQ charge ↓ ↑ EM charge

(π^0 とのmixingを避ける)

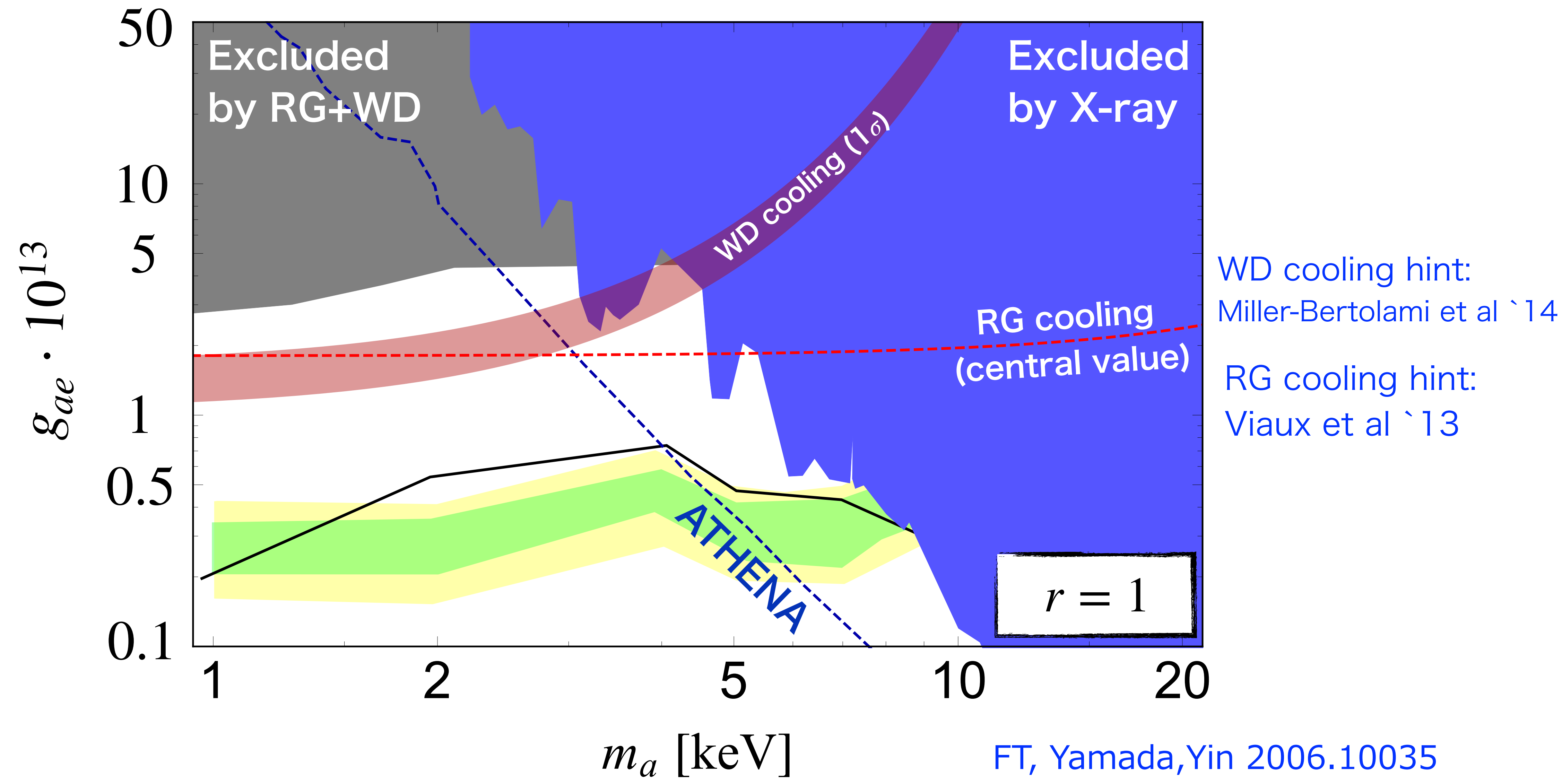
e.g.

- leptophilic ALP: $C_e = -C_\mu$ or C_τ $C_{\text{others}} = 0$
- DFSZ-like ALP (based on type-I 2HDM, PQ = hypercharge)

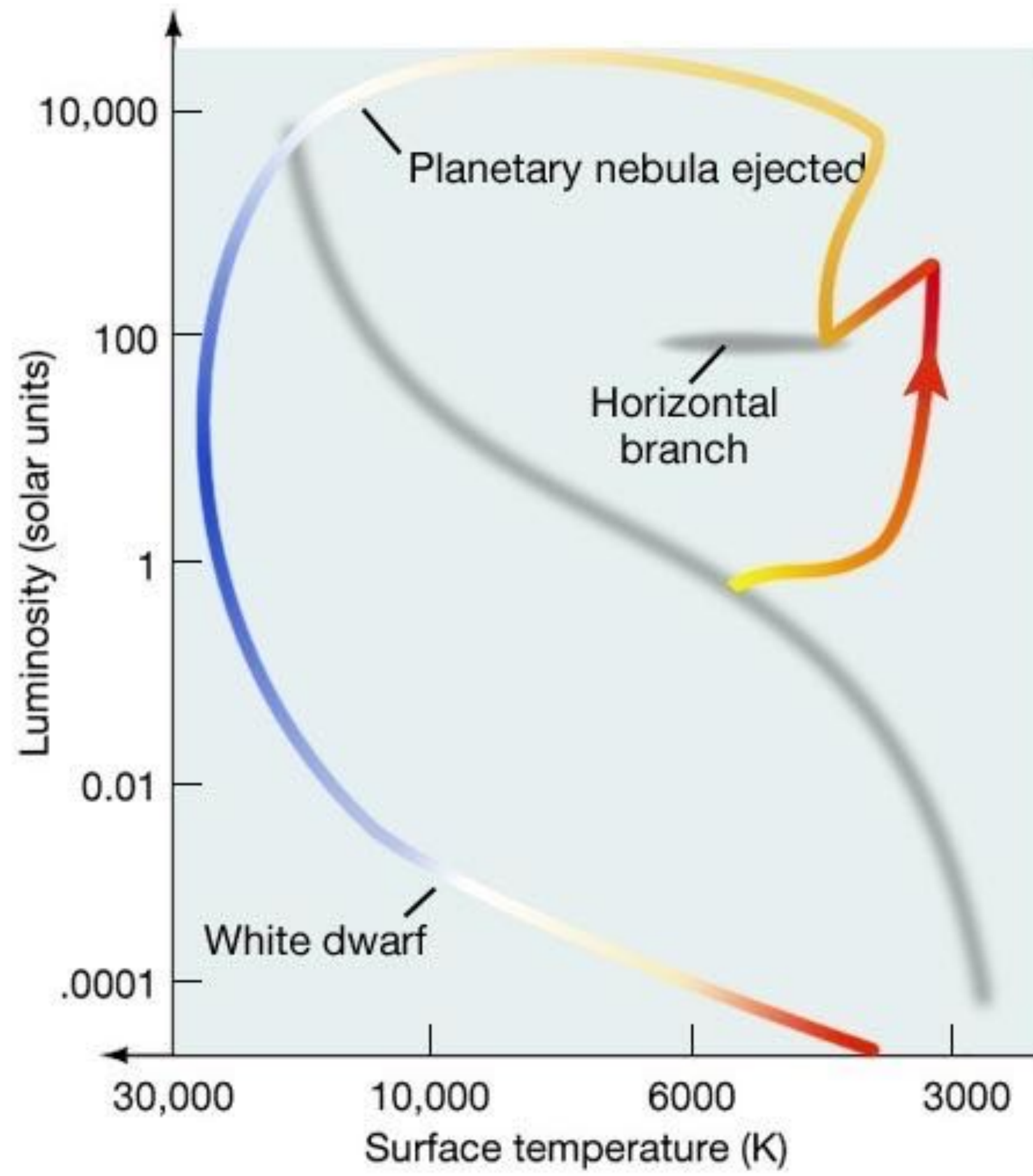
一般的なUV modelは、 $\mathcal{L} = (\partial_\mu a / f_a) J_{\text{PQ}}^\mu$ で与えられる微分結合のみの
(SM)アノマリーがないベースに移れるような模型。

Results

$$r \equiv \Omega_a / \Omega_{\text{DM}} = 1$$

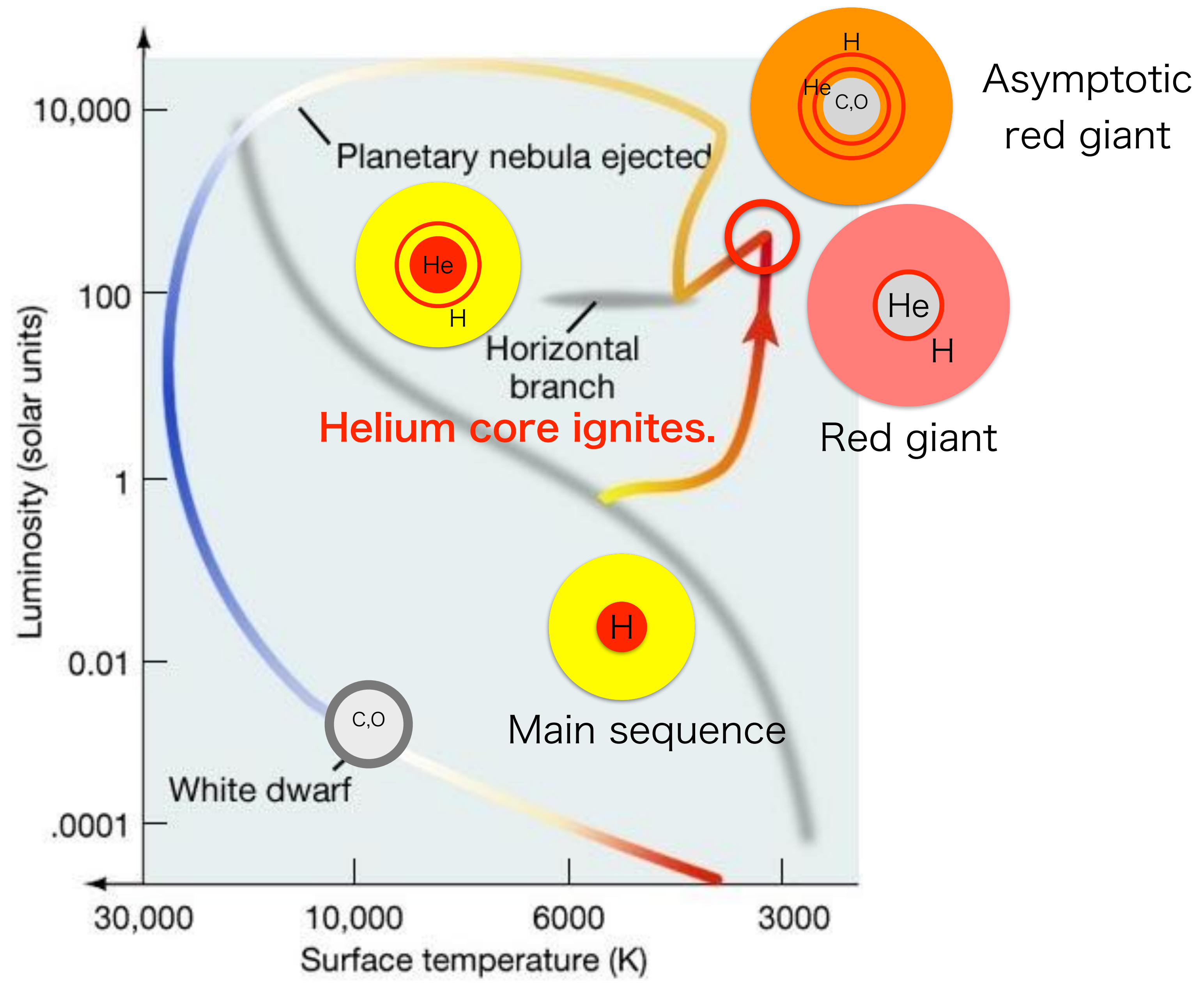


星の進化と アクシオン生成



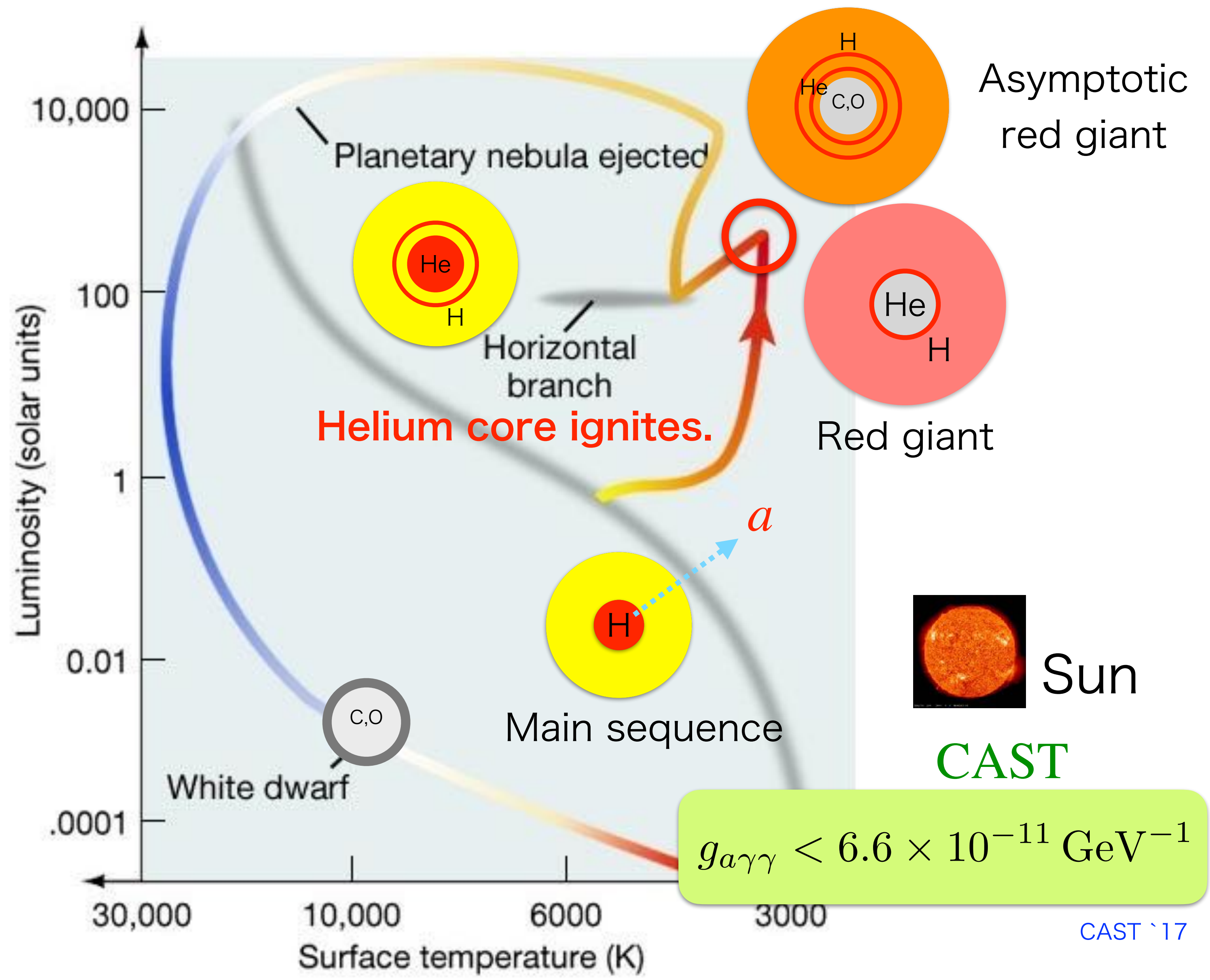
Hertzsprung-Russell diagram

星の進化と アクシオン生成



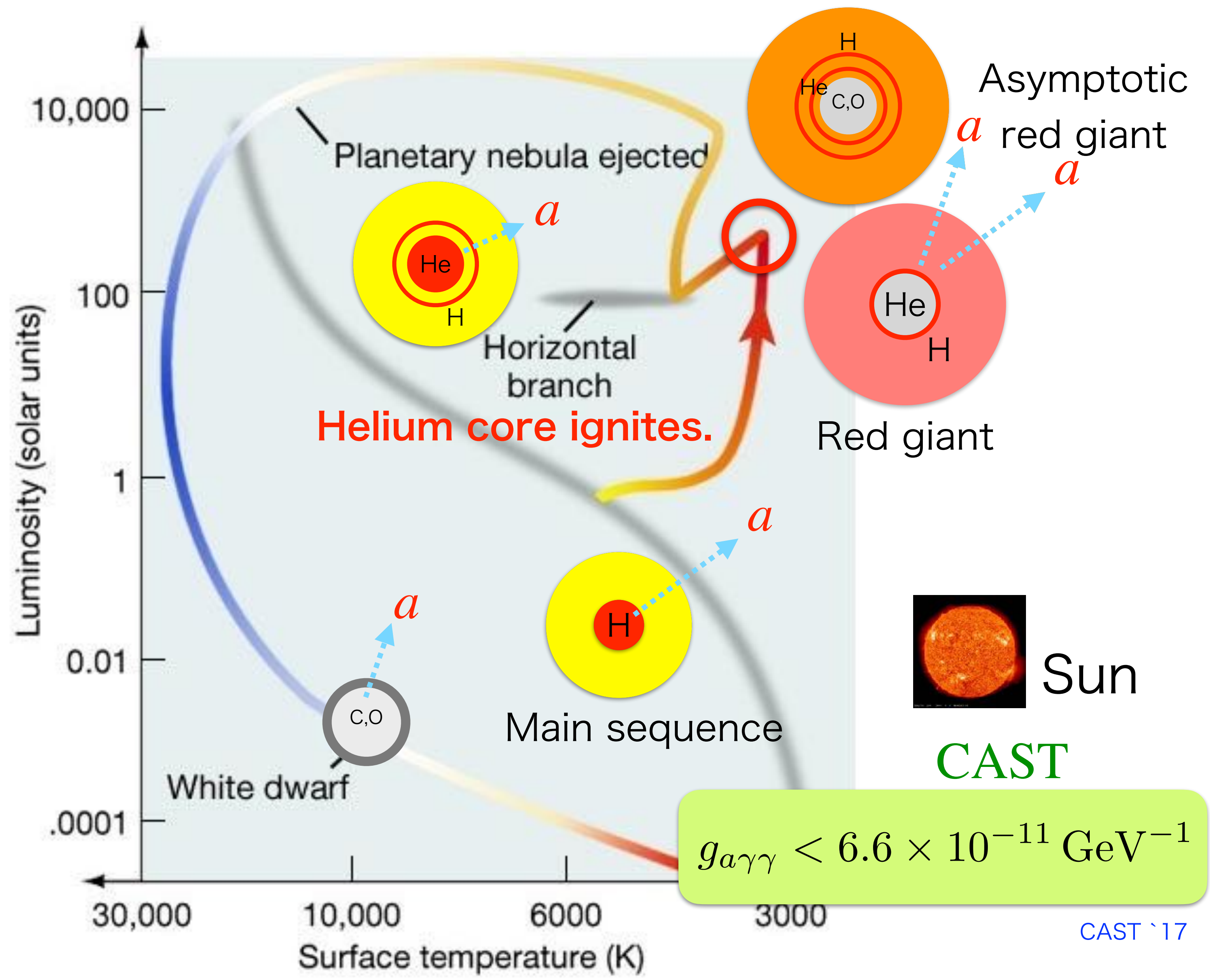
Hertzsprung-Russell diagram

星の進化と アクシオン生成



Hertzsprung-Russell diagram

星の進化と アクシオン生成



Hertzsprung-Russell diagram

星の進化と アクシオン生成

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

Ayala et al, 1406.6053

$$g_{aee} < 2.8 \times 10^{-13}$$

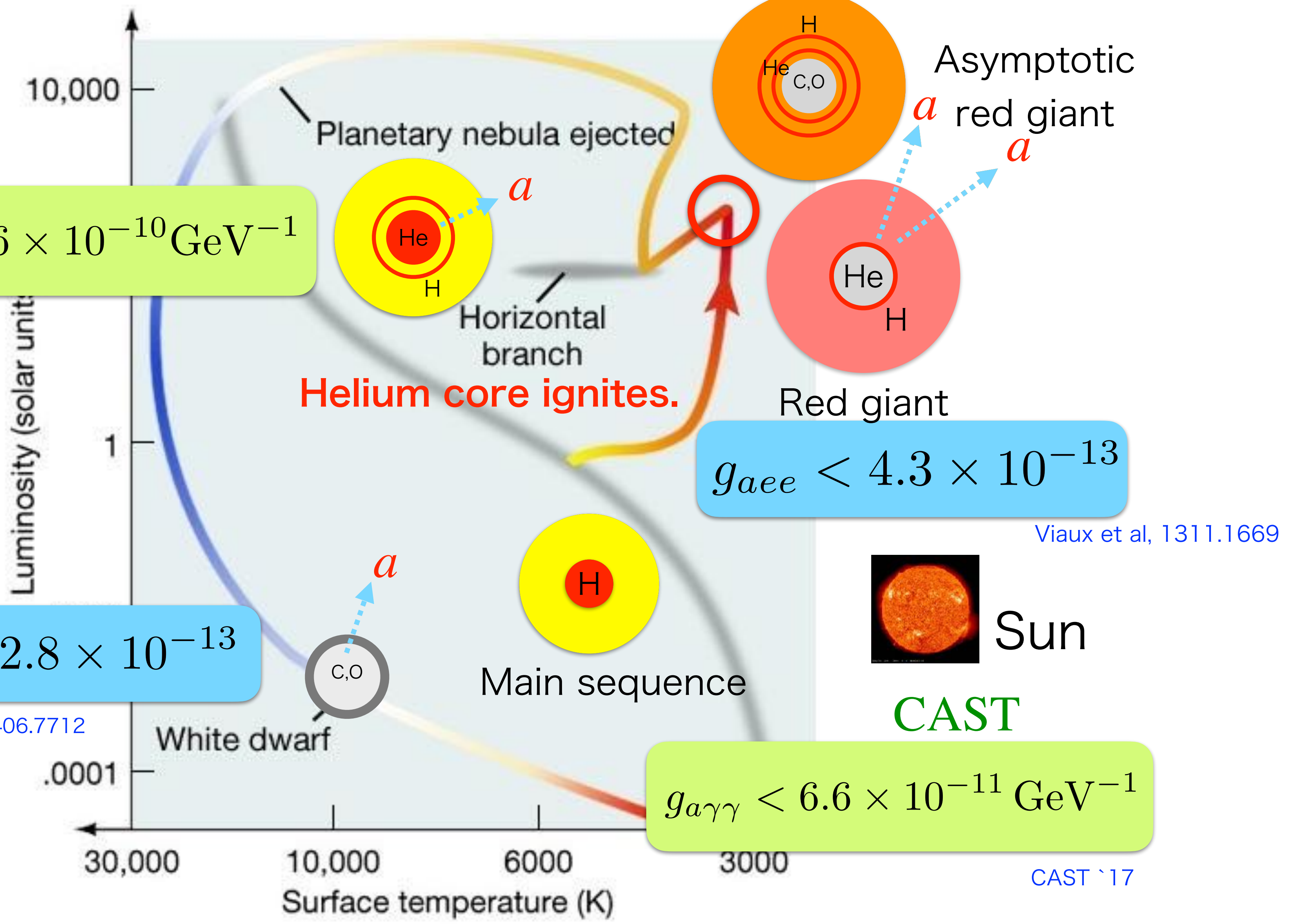
Miller Bertolami et al, 1406.7712

$$g_{aee} < 4.3 \times 10^{-13}$$

Viaux et al, 1311.1669

$$g_{a\gamma\gamma} < 6.6 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$$

CAST '17



Hertzsprung-Russell diagram

星の進化と アクシオン生成

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

Ayala et al, 1406.6053

$$g_{aee} < 2.8 \times 10^{-13}$$

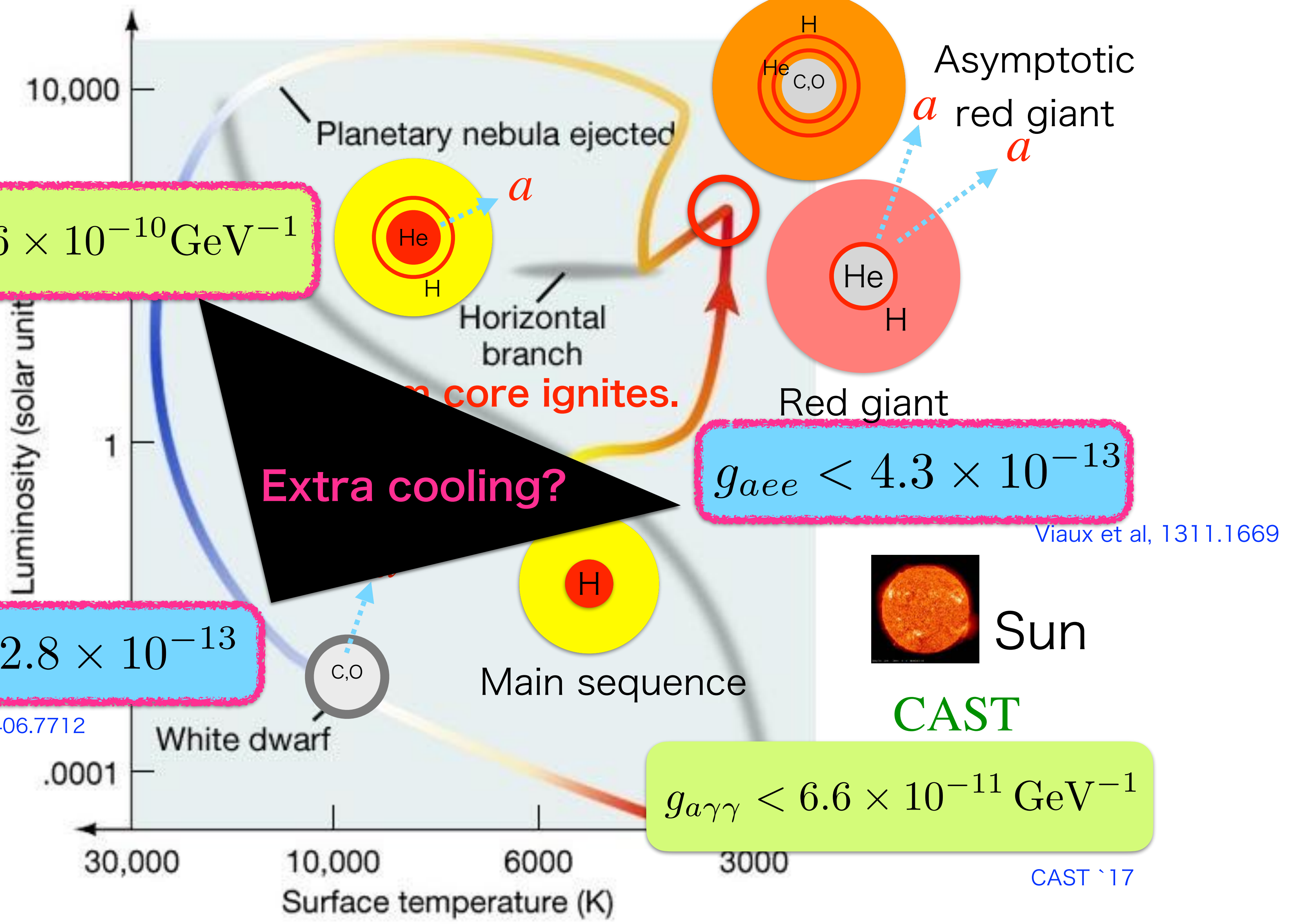
Miller Bertolami et al, 1406.7712

$$g_{aee} < 4.3 \times 10^{-13}$$

Viaux et al, 1311.1669

$$g_{a\gamma\gamma} < 6.6 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$$

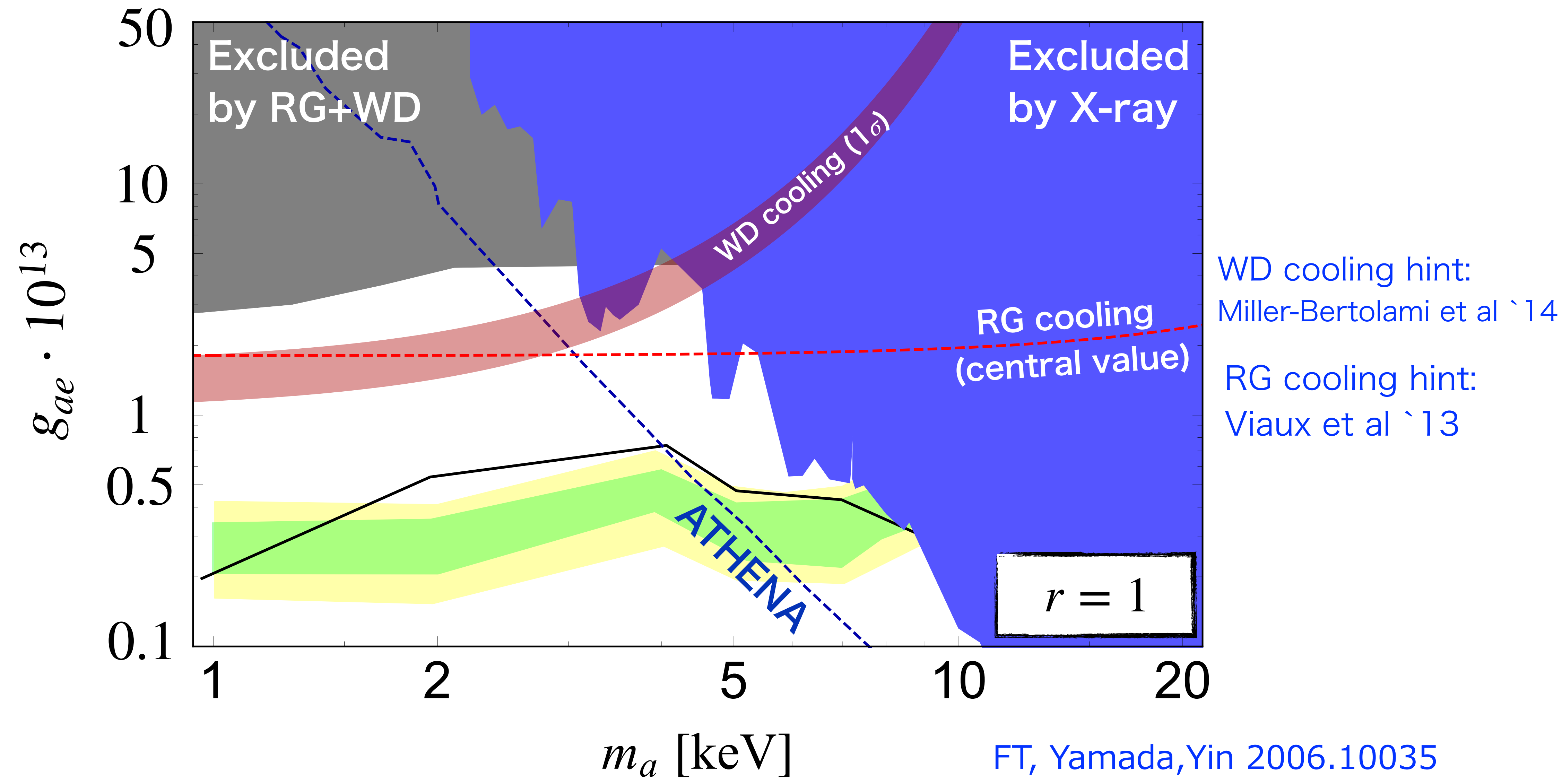
CAST '17



Hertzsprung-Russell diagram

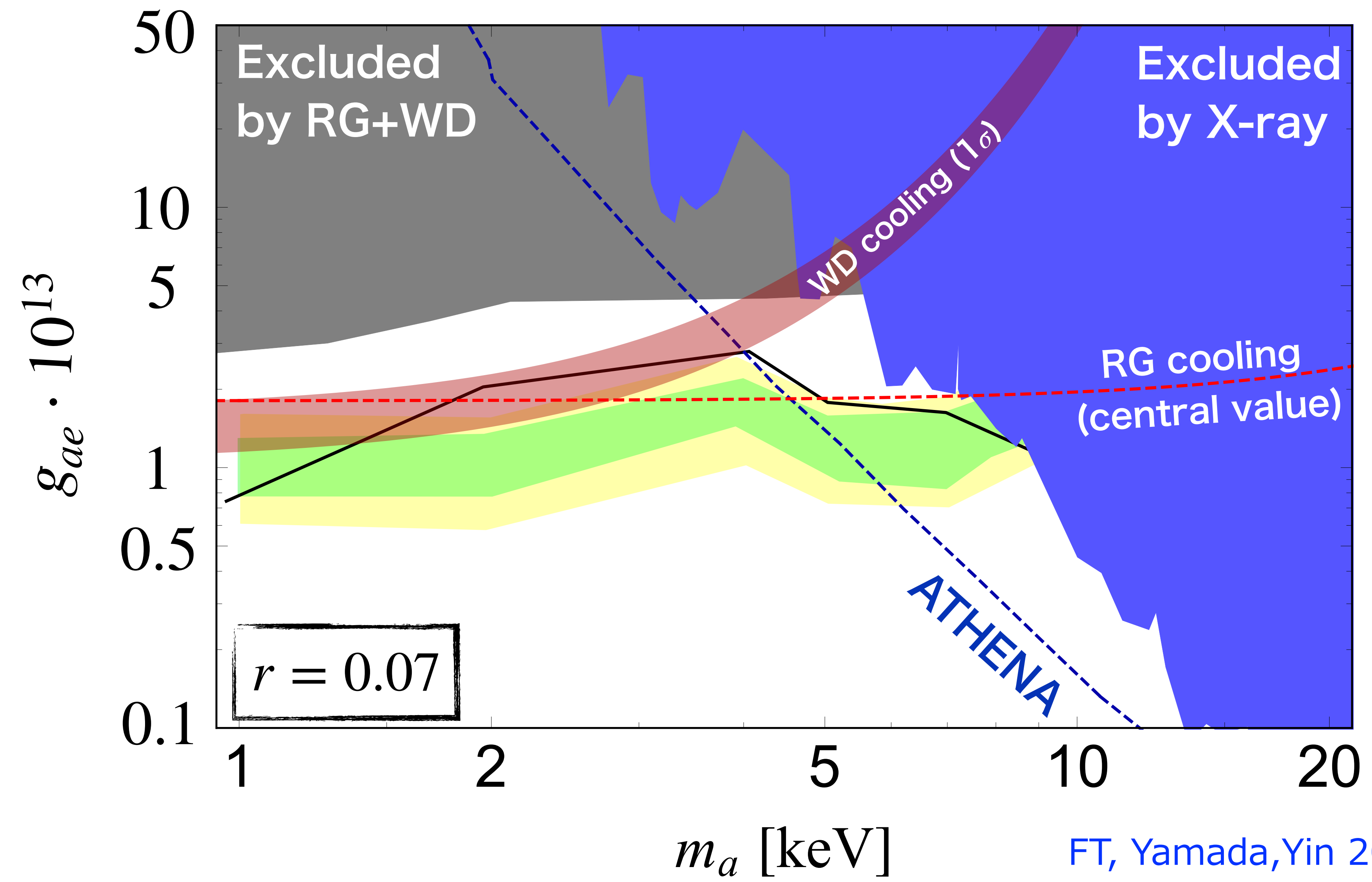
Results

$$r \equiv \Omega_a / \Omega_{\text{DM}} = 1$$



Results

$$r \equiv \Omega_a / \Omega_{\text{DM}} = 0.07$$



cf. $g_{an} \simeq 4 \times 10^{-10}$
from neutron star
(CasA) cooling.

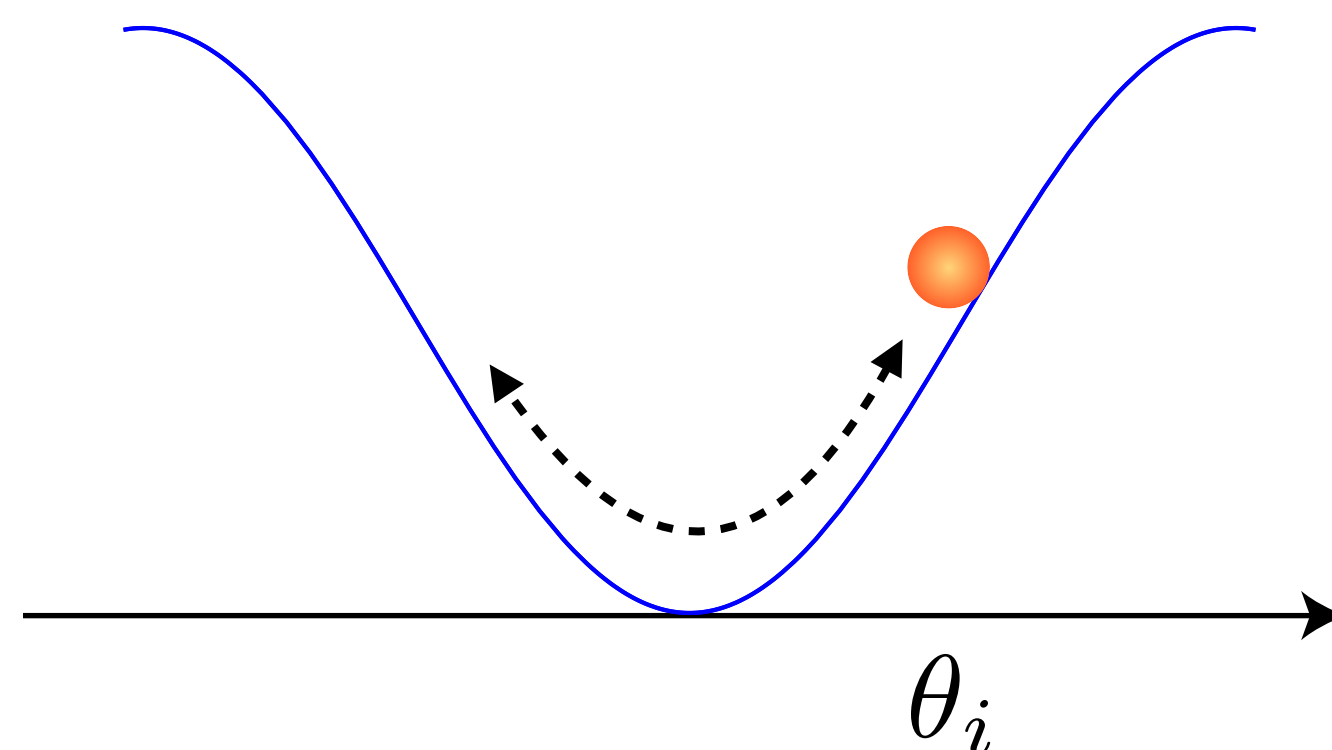
Leinson `14, see however
Hamaguchi et al `18

ALP production

- Misalignment mechanism

$$\Omega_{\text{ALP}}^{(\text{mis})} h^2 \sim 0.1 \left(\frac{\theta_*}{2} \right)^2 \left(\frac{C_e}{4} \right)^2 \left(\frac{f_a / C_e}{10^{10} \text{ GeV}} \right)^2$$

$$\times \begin{cases} \left(\frac{T_R}{10^6 \text{ GeV}} \right) & \text{for } T_R \lesssim T_{\text{osc}} \\ \left(\frac{m_a}{2 \text{ keV}} \right)^{1/2} & \text{for } T_R \gtrsim T_{\text{osc}} \end{cases}$$

$$T_{\text{osc}} \sim 10^6 \text{ GeV} \left(\frac{m_a}{2 \text{ keV}} \right)^{1/2}$$


ALP is cold and can explain all DM.

- We need $T_{\text{RH}} \gtrsim 10^6 \text{ GeV}$ to get the right abundance for $C_e = O(1)$.
- For $T_{\text{RH}} \lesssim 10^6 \text{ GeV}$ we need to invoke the clockwork to get $C_e \gg 1$ or use the anharmonic effect.

ALP production

- Thermal production

$$\Omega_{\text{ALP}}^{(\text{th})} h^2 \sim 0.01 \left(\frac{T_R}{3 \times 10^5 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{m_a}{2 \text{ keV}} \right) \times \left(\frac{f_a/C_e}{10^{10} \text{ GeV}} \right)^{-2} \sum_f \left(\frac{C_f m_f / C_e}{1 \text{ GeV}} \right)^2$$

ALP is warm DM and can explain about 10% of DM (or less).

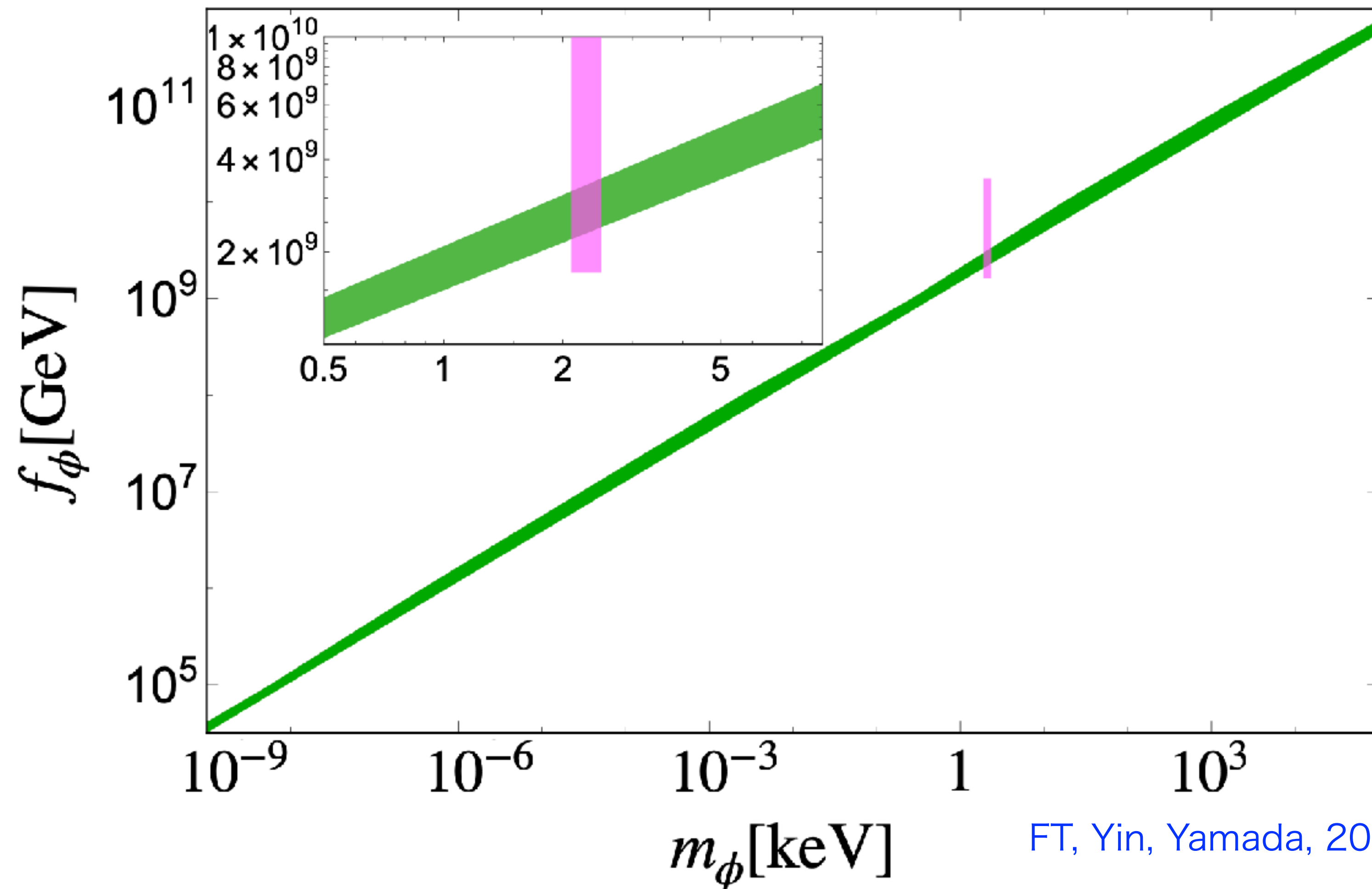
The reheating should be low if the ALP is coupled to heavy fermions. If the ALP is coupled to only e and mu, it can be as high as 10^8 GeV.

Why $m_a \sim \text{keV}$ and $f_a \sim \mathcal{O}(10^9) \text{ GeV}$?

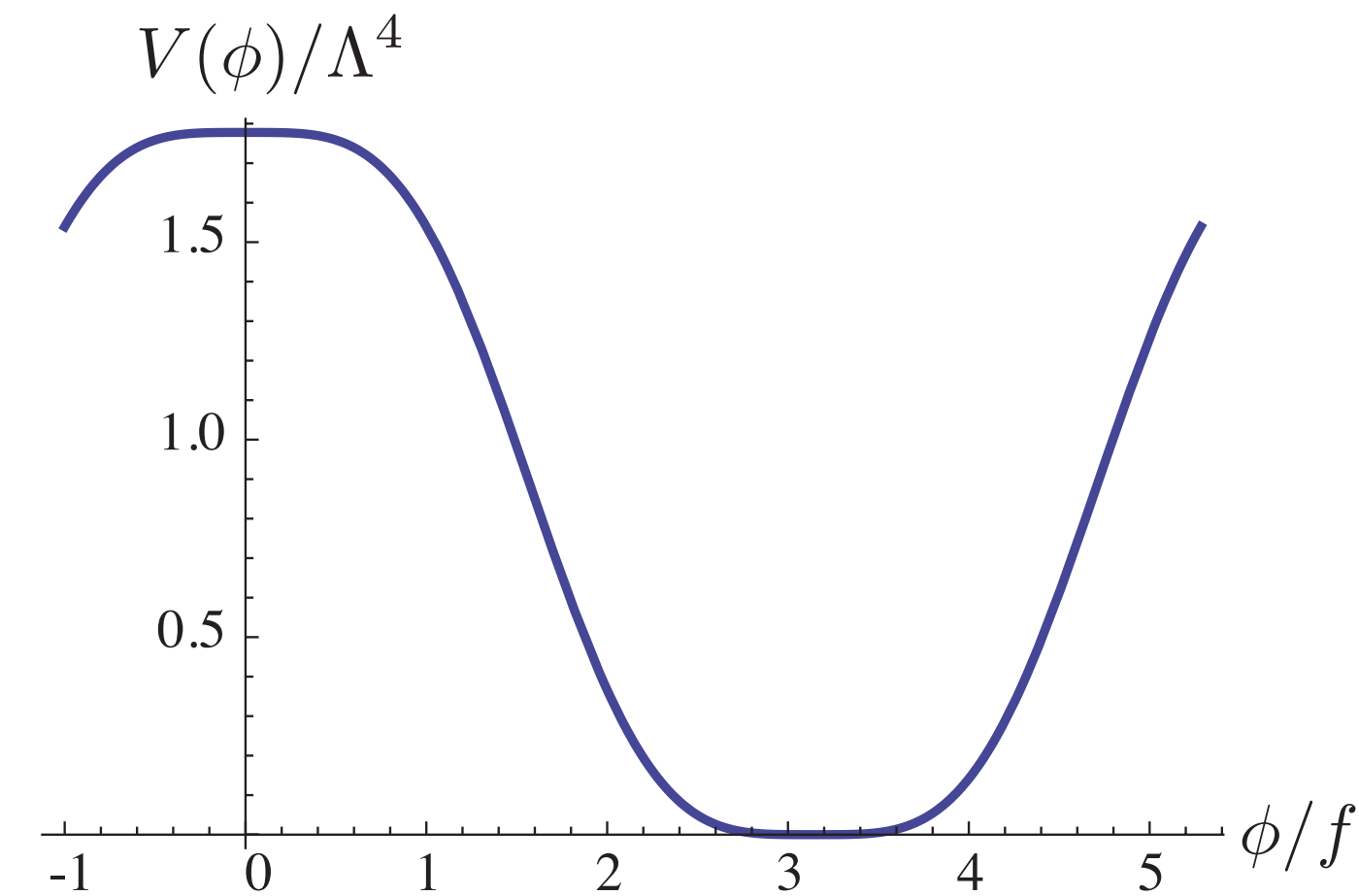
ALP = DM = inflaton ?

Daido, FT, and Yin 1702.03284, 1710.11107
FT and Yin, 1903.00462, FT, Yin, Yamada, 2007.10311

The mass and coupling hinted by XENON1T and stellar cooling anomaly are consistent with the prediction of the ALP inflaton model !



$$f \sim 10^3 \sqrt{m_\phi M_p}$$



FT, Yin, Yamada, 2007.10311

3. Hidden photon DM

Hidden photon DM

2つの重要なパラメーター：質量 $m_{\gamma'}$ と運動項混合 χ

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}A'_\mu A'^\mu - J_\mu A^\mu$$

Kinetic mixingは場の再定義, $A_\mu \rightarrow A_\mu - \chi A'_\mu$ で消去することができ,

すると, $-J_\mu A^\mu \rightarrow -J_\mu (A^\mu - \chi A'^\mu)$ より, 電荷を持つSM fermionは

hidden U(1)を感じるようになる。

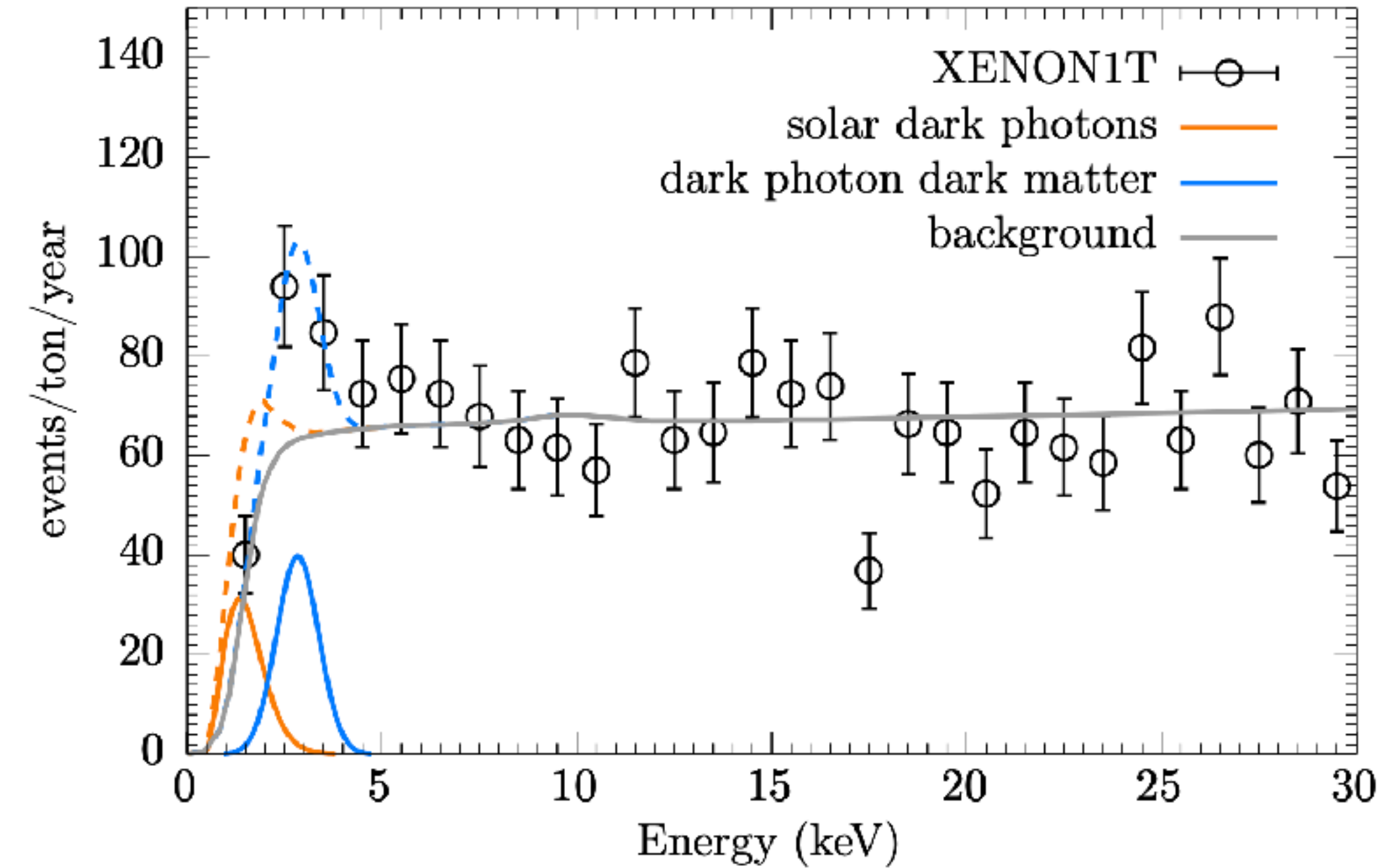
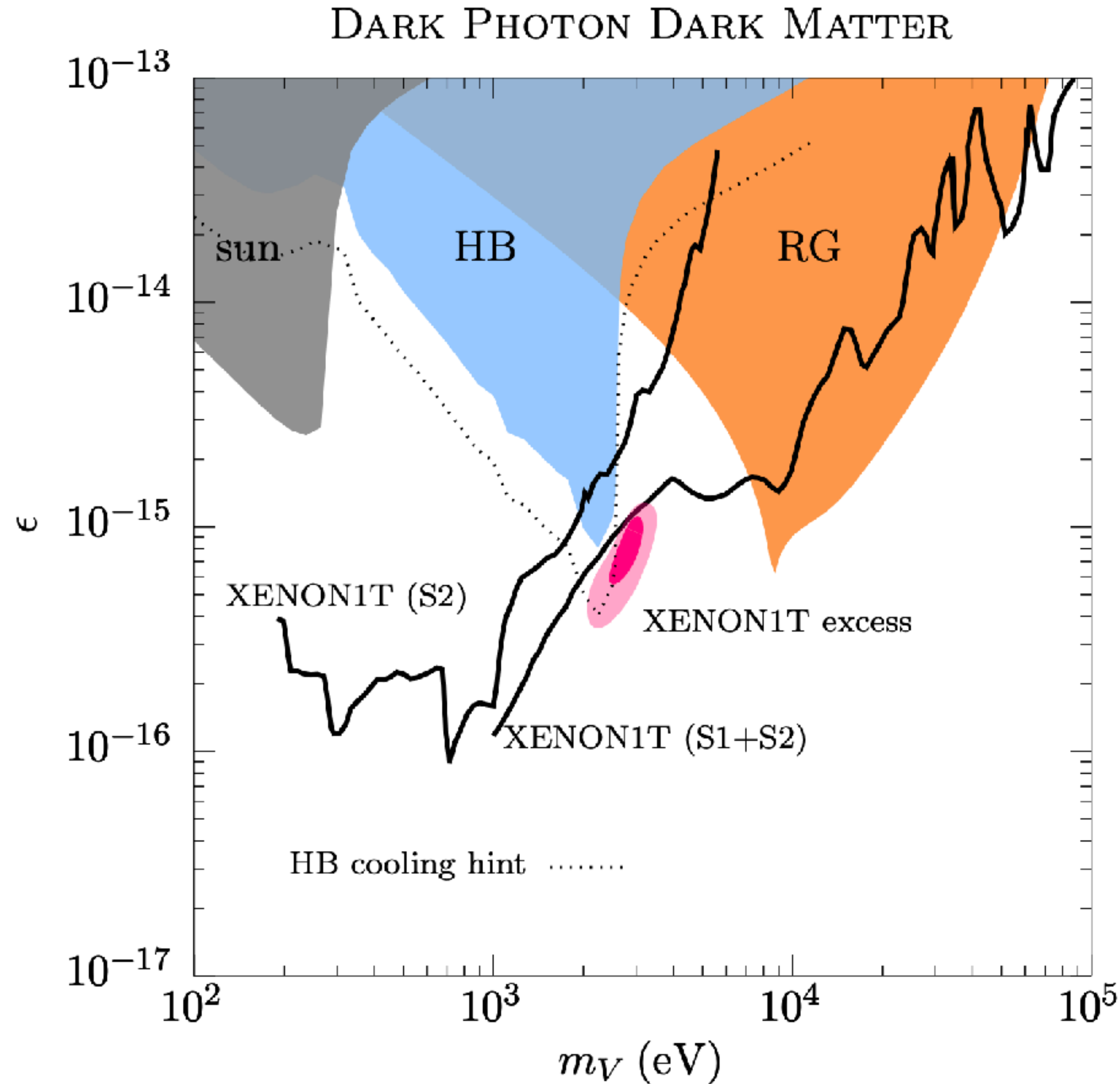
Hidden photon DMの特徴

- ✓ **吸収**によってXENON1T超過を説明可能 (monochromatic spectrum)
- ✓ アクシオンとは異なり, 星の中での生成は共鳴反応; 星の種別ごとに制限が厳しい質量が異なる。 **水平分岐(HB)星の制限を満たす**ことができる。
 - ・HB星の冷却異常を説明できる。
- ✓ アクシオンとは異なり, 崩壊は $\gamma' \rightarrow 3\gamma$ を通じて起こるため **寿命は非常に長い**。
- ✓ 生成は難しいとされてきたが, 最近様々な機構が提唱: 重力的生成, アクシオンからの崩壊や共鳴的生成など。

Stellar cooling bounds on HP DM.

Alonso-Alvarez et al 2006.11243

An, Pospelov, Pradler, Ritz, arXiv:2006.13929



まとめ

- ✓ XENON1T超過はDMによる様々な説明が可能, 特にAxion/hidden photon DMは比較的シンプルな説明。
- ✓ Stellar cooling boundを満たし anomaly(WD,RGB/HB)も説明可能。
 - ・そもそもXENON1Tの制限はcooling boundを凌駕してるから (すごい)
- ✓ Axion DMは **photonとの結合** を抑制するため **anomaly-free** にする必要。
それでも threshold corr.により X線輝線を予言。
- ✓ Hidden photon DMは生成機構ごとに特徴的な予言：たとえば重力的生成であれば小スケールで揺らぎがenhancedなど。
- ✓ UVへの様々なimplicationあり (inflation, flavor, WGC等)