
Supernova-scopeを用いたアクシオンの 直接観測方法の提案

Based on

Shao-Feng Ge, Koichi Hamaguchi, Koichi Ichimura, Koji Ishidoshiro, YK, Yasuhiro
Kishimoto, Natsumi Nagata, Jiaming Zheng

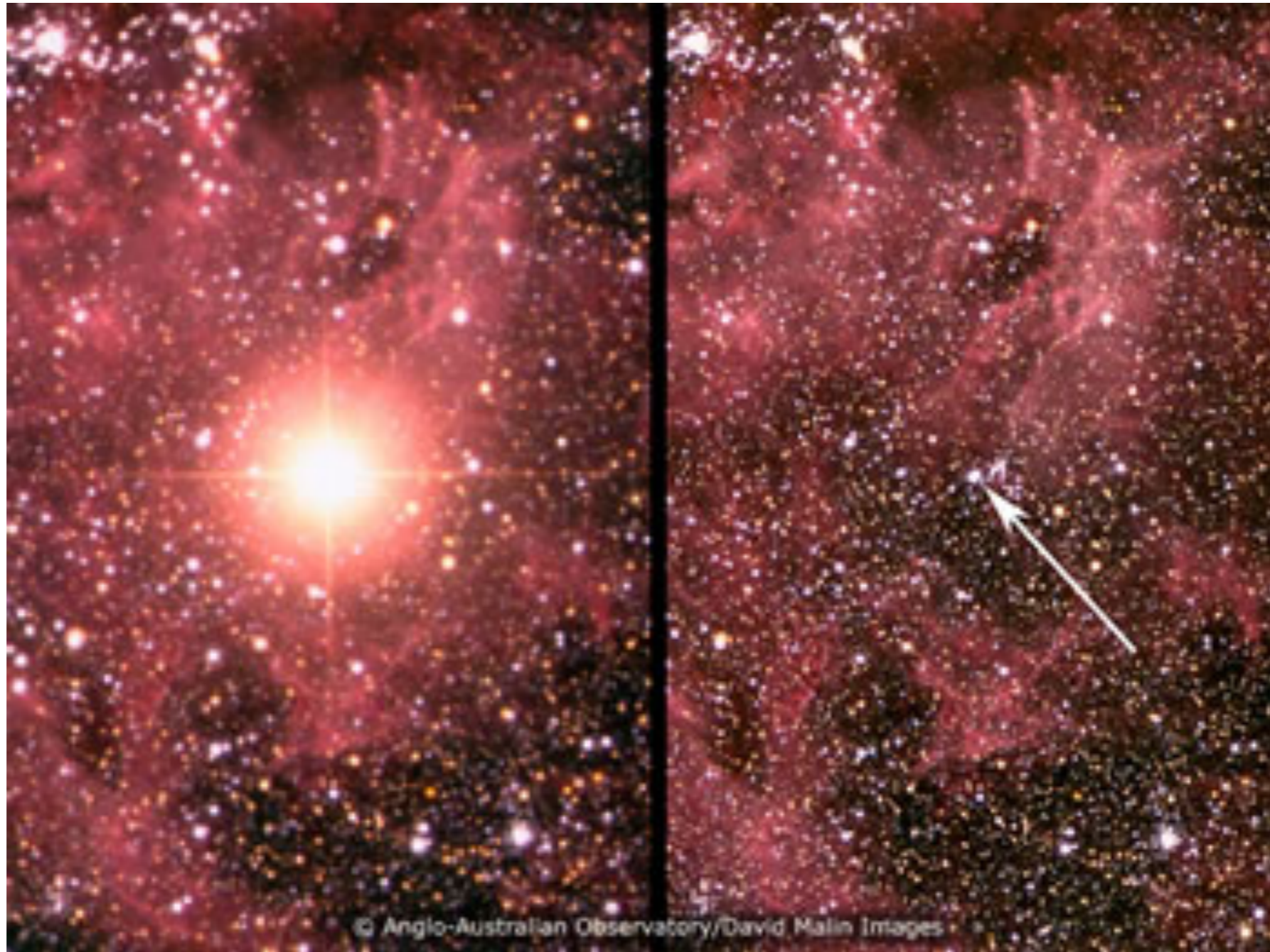
[arXiv : 2008.03924]

金澤慶季 (東京大学 M2)

基研研究会 素粒子物理学の進展2020

2020/9/2

SN 1987A



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/supernova.html>

1. Introduction

アクシオン

アクシオンとは、、、

- 新たな U(1) 対称性 ($U(1)_{PQ}$ 対称性)の自発的な破れに伴う南部-Goldstone boson
- Strong CP問題 (θ 項 $|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10}$ なぜこんなに小さい?) の解決策
- 暗黒物質の候補

S. Weinberg, 1978

F. Wilczek, 1978

R. D. Peccei and H. R. Quinn, 1977

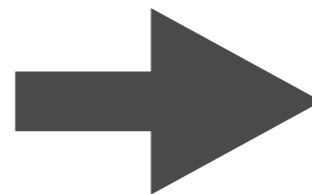
天体実験による間接的な観測

- SN 1987Aのニュートリノ測定
- 中性子星の温度測定

⋮

→アクシオン模型への制限

しかし、不定性が大きい



直接観測によってより正確な情報を得たい

超新星爆発由来のアクシオンを

検出出来るかもしれない(?)

アクシオン

アクシオンが現れるスケール = $U(1)_{PQ}$ が破れるスケールは、

アクシオンの崩壊定数 f_a によって特徴づけられる

f_a への制限

SN 1987Aのニュートリノ測定

$$f_a \gtrsim 3.9 \times 10^8 \text{ GeV} \quad (\text{KSVZ})$$

$$f_a \gtrsim 4.7 \times 10^8 \text{ GeV} \quad (\text{DFSZ, } \tan \beta = 10)$$

P. Carenza, T. Fischer, M. Giannotti, G. Guo,

G. Martinez-Pinedo, A. Mirizzi, 2019

Cassiopeia A 中性子星の温度測定

$$f_a \gtrsim 5 \times 10^8 \text{ GeV} \quad (\text{KSVZ})$$

$$f_a \gtrsim 7 \times 10^8 \text{ GeV} \quad (\text{DFSZ, } \tan \beta = 10)$$

K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi, J. Zheng, 2018

など

- f_a は標準模型のスケール ($\simeq 10^2 \text{ GeV}$) より非常に大きい
- 低エネルギーでは $1/f_a$ に関する摂動論として扱える

アクシオンの相互作用

アクシオンと標準模型粒子の相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{g^2}{32\pi^2} \frac{a}{f_a} G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a + \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} + \sum_f \frac{C_f}{2f_a} \bar{f} \gamma^\mu \gamma_5 f \partial_\mu a + \mathcal{O}\left(\frac{1}{f_a^2}\right)$$

↑
無視する

a : Axion field

f : SM fermion

$F_{\mu\nu}$: EM field strength

$G_{\mu\nu}^a$: Color field strength

ChPTのleading orderにおいて、

$$\text{Axion mass } m_a \simeq 5.8 \times \left(\frac{f_a}{10^9 \text{ GeV}} \right)^{-1} \text{ meV}$$

$$\text{Axion-Photon coupling } g_{a\gamma\gamma} \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} \left(\frac{E}{N} - 2.0 \right) \quad \frac{E}{N} = \frac{(\text{EM anomaly})}{(\text{color anomaly})}$$

$$= 0 \text{ (KSVZ)}, \quad \frac{8}{3} \text{ (DFSZ)}$$

アクシオンの相互作用

アクシオンと核子の相互作用

$$\mathcal{L}_{aNN} = \sum_{N=p,n} \frac{C_N}{2f_a} \bar{N} \gamma^\mu \gamma_5 N \partial_\mu a = \sum_{N=p,n} \frac{g_{aN}}{2m_N} \bar{N} \gamma^\mu \gamma_5 N \partial_\mu a \quad \left(g_{aN} \equiv \frac{C_N m_N}{f_a} \right)$$

p : Proton

n : Neutron

Axion-Nucleon coupling

KSVZ model

$$C_p = -0.47(3)$$

$$C_n = -0.02(3)$$

DFSZ model

$$C_p = -0.182(25) - 0.435 \sin^2 \beta$$

$$C_n = -0.160(25) + 0.414 \sin^2 \beta$$

Outline

1. Introduction
2. Nearby SN candidates and pre-SN neutrino alarm
3. Axion Supernova-scope
4. Prospects

2. Nearby SN candidates and pre-SN neutrino alarm

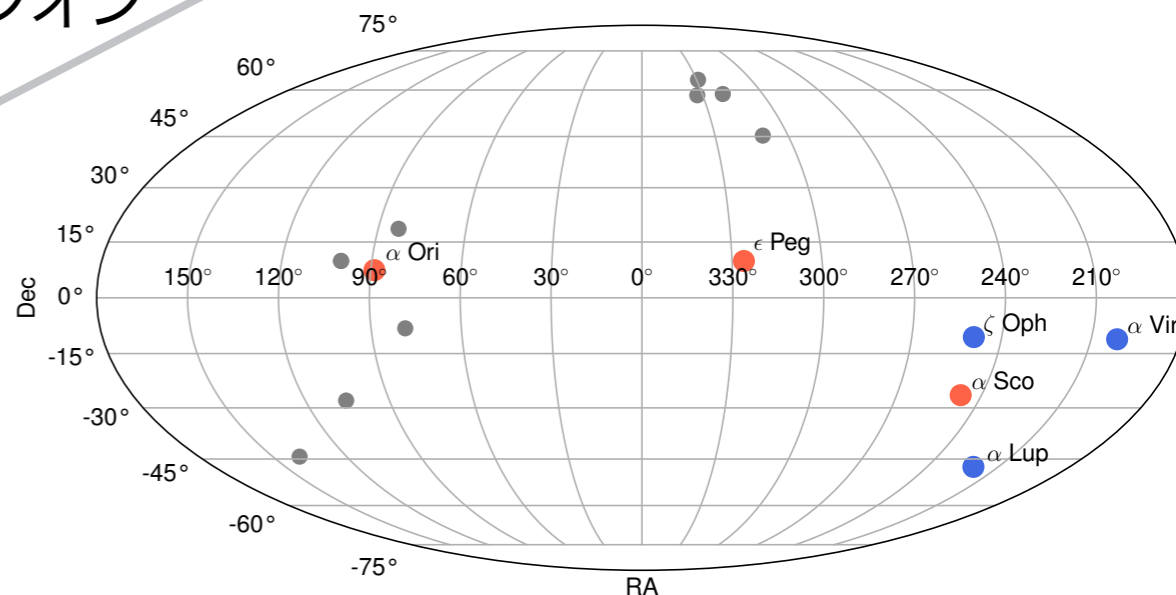
超新星候補

今回のターゲット

→ 重力崩壊型の超新星爆発によって放出されるアクシオン

- ・ 質量 $M \gtrsim 10 M_{\odot}$ の赤色超巨星 or 青色超巨星
- ・ 距離 $d \lesssim 250$ pc の天体

SN 1987Aは青色超巨星



K. Nakamura, et al., 2016

M. Mukhopadhyay, et al., 2016

Ko Nakamura's Website

超新星候補リスト

HIP	Common Name	Distance (pc)	Mass (M_{\odot})	RA (J2000)	Dec (J2000)
65474	Spica/ α Virginis	77(4)	11.43 ± 1.15 [79]	13:25:11.58	-11:09:40.8
81377	ζ Ophiuchi	112(3)	20.0 [80]	16:37:09.54	-10:34:01.5
71860	α Lupi	142(3)	10.1 ± 1.0 [81]	14:41:55.76	-47:23:17.5
80763	Antares/ α Scorpii	170(30)	11-14.3 [82]	16:29:24.46	-26:25:55.2
107315	Enif/ ϵ Pegasi	211(8)	$11.7(8)$ [81]	21:44:11.16	+09:52:30.0
27989	Betelgeuse/ α Orionis	222^{+48}_{-34} [83]	$11.6^{+5.0}_{-3.9}$ [84]	05:55:10.31	+07:24:25.4

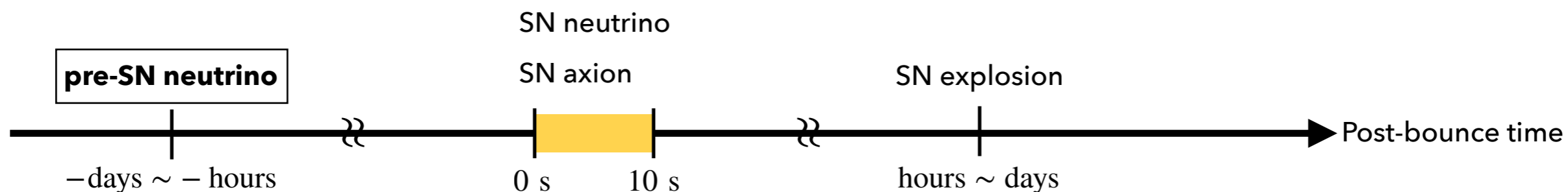
● 赤色超巨星

● 青色超巨星

● $d > 250$ pc

前兆ニュートリノ

いつ起きるか分からない超新星爆発が起きる方向をどうやって特定するのか？



SNEWS (SuperNova Early Warning System)

K. Scholberg, 2004, P. Antonioli, et al., 2004, SNEWS Collaboration, 2011

1. 超新星爆発の数時間～数日前から 1-2 MeV 程度の前兆ニュートリノが放出される



2. ニュートリノ検出器で前兆ニュートリノを検出する

例) KamLAND, SNO+, Super-Kamiokande, Hyper-Kamiokande, JUNO, DUNE

C. Kato, K. Ishidoshiro,



3. 数時間前までに超新星候補の方向を特定できる可能性がある

Alarm time for NO

T. Yoshida, 2020

JUNO . . . 30-78 hr 前 ($d \lesssim 740 - 1110$ pc)

KamLAND . . . 0.2-38 hr 前 ($d \lesssim 260 - 490$ pc)

SK-Gd . . . 0.1-10 hr 前 ($d \lesssim 240 - 490$ pc)



アクシオン検出器を超新星候補の方向に向ける

3. Axion Supernova-scope

Helioscope と Supernova-scope

Axion Helioscope

検出原理

アクシオンに磁場を当てて光子に変換
→光子を検出する

検出器

典型的なエネルギーは 4 keV
→ X線検出器で検出する。

Axion Supernova-scope

Helioscopeと同じ

典型的なエネルギーは $\mathcal{O}(10)$ MeV
→ γ 線検出器で検出する。

Axion Helioscope リスト

	Experiment	(Proposed) site	B (T)	L (m)	A (m ²)
進行中	CAST [34–39]	CERN	9	9.3	2.9×10^{-3}
計画中	BabyIAXO [41]	DESY	~ 2	10	0.77
	IAXO baseline [40, 41]	DESY	~ 2.5	20	2.3
	IAXO+ [41]	DESY	~ 3.5	22	3.9
	TASTE [42]	INR	3.5	12	0.28

セットアップ

進行中/計画中のHelioscope

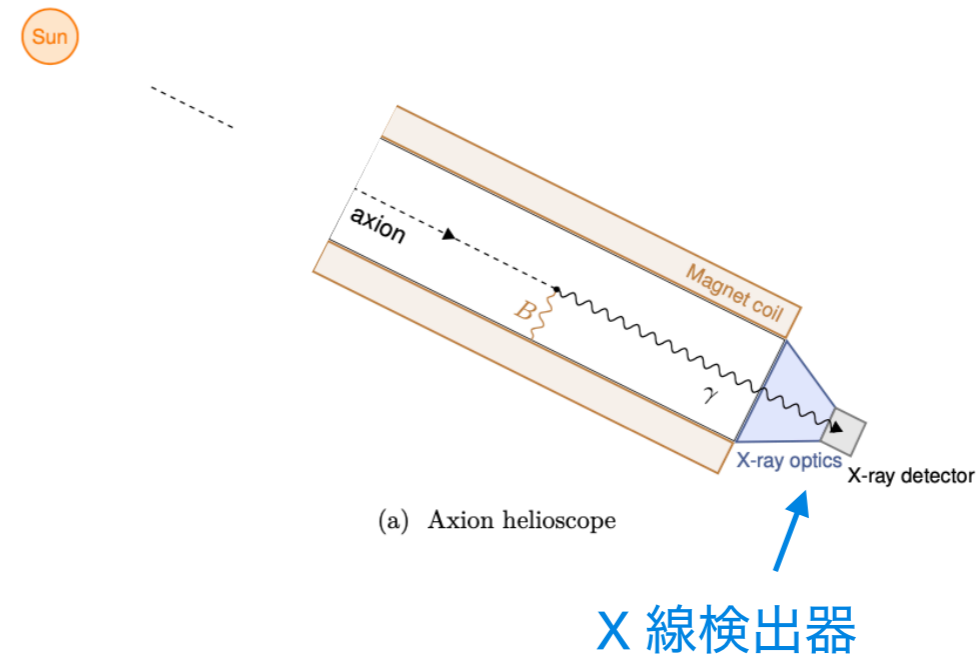


Figure 2: Conceptual design of the axion detector discussed in this paper and its orientation for the detection of (a) solar and (b) SN axions.

セットアップ

我々の提案

Helioscope の X 線検出器の反対の端に

γ 線検出器(緑色)を取り付ける

通常時は Helioscope として利用 →

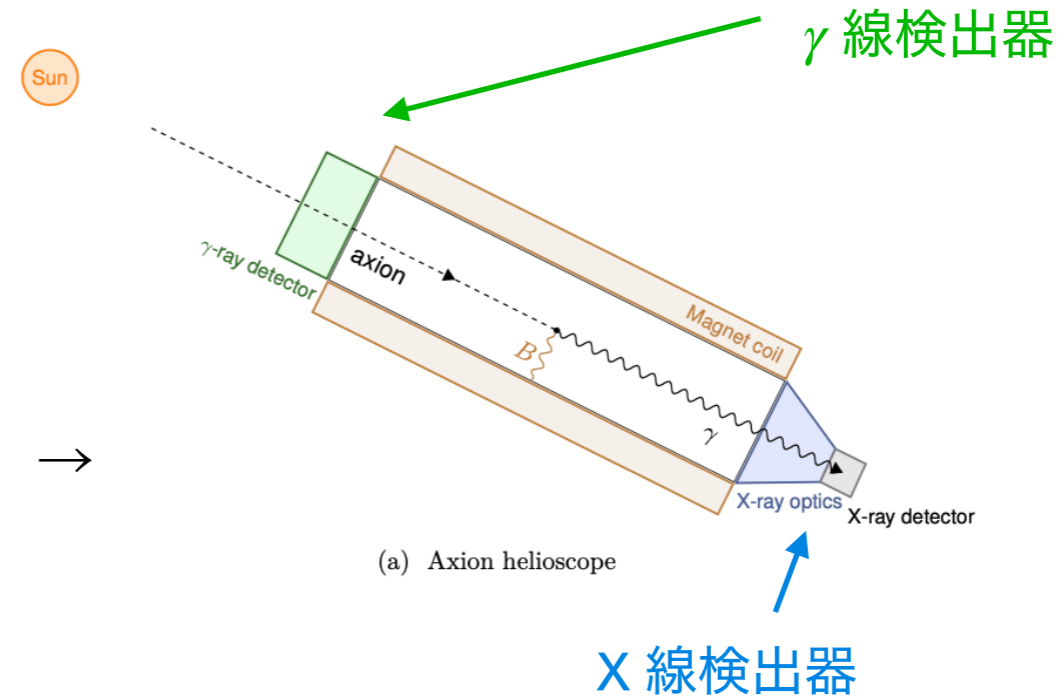


Figure 2: Conceptual design of the axion detector discussed in this paper and its orientation for the detection of (a) solar and (b) SN axions.

セットアップ

我々の提案

Helioscope の X 線検出器の反対の端に

γ 線検出器(緑色)を取り付ける

通常時は Helioscope として利用 →

前兆ニュートリノを合図に
向きを変える

Supernova-scope として利用 →

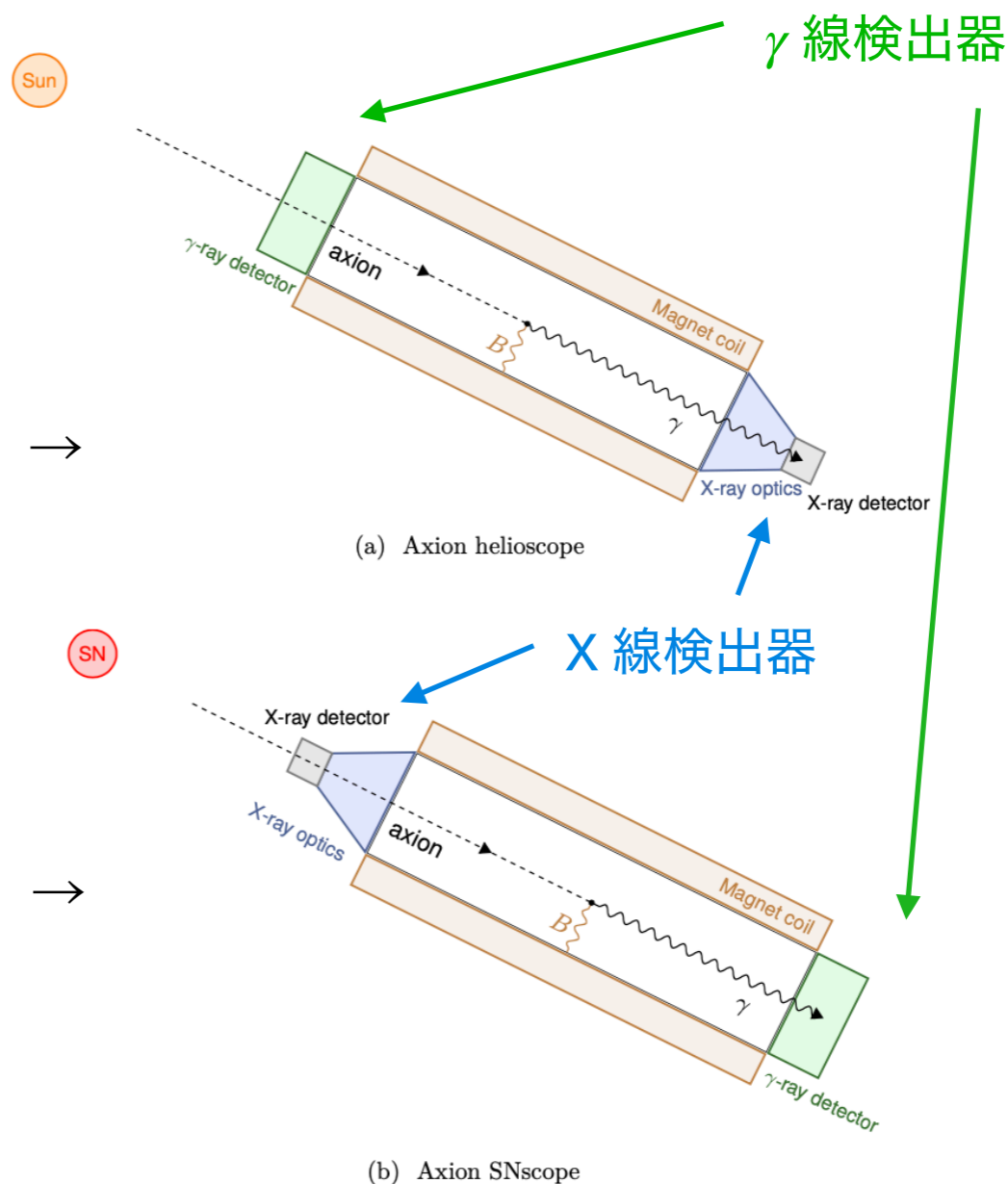


Figure 2: Conceptual design of the axion detector discussed in this paper and its orientation for the detection of (a) solar and (b) SN axions.

4. Prospects

超新星アクション検出に関わる3大要素

- ・ 観測可能時間の割合
- ・ 検出される事象数の見積もり
- ・ バックグラウンドの見積もり

観測可能時間の割合

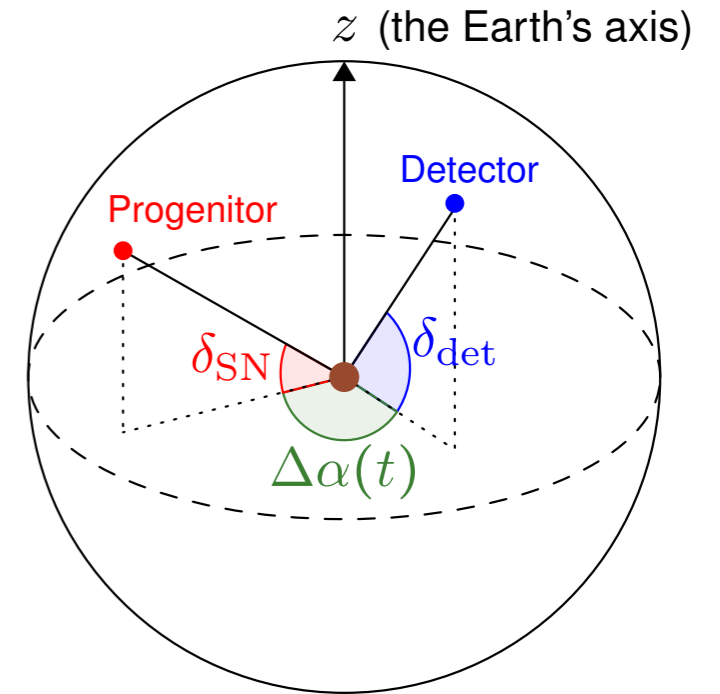
赤道座標系 (α, δ) . . . z 軸を地軸の方向とした天球上の座標系

α : 赤経、Right Ascension

δ : 赤緯、Declination

検出器の座標 $(\alpha_{\text{det}}(t), \delta_{\text{det}})$

超新星候補の座標 $(\alpha_{\text{SN}}, \delta_{\text{SN}})$



Axion Supernova-scope の可動域

水平方向 : 360°

鉛直方向 : $-\theta_{\text{max}} \sim \theta_{\text{max}}$

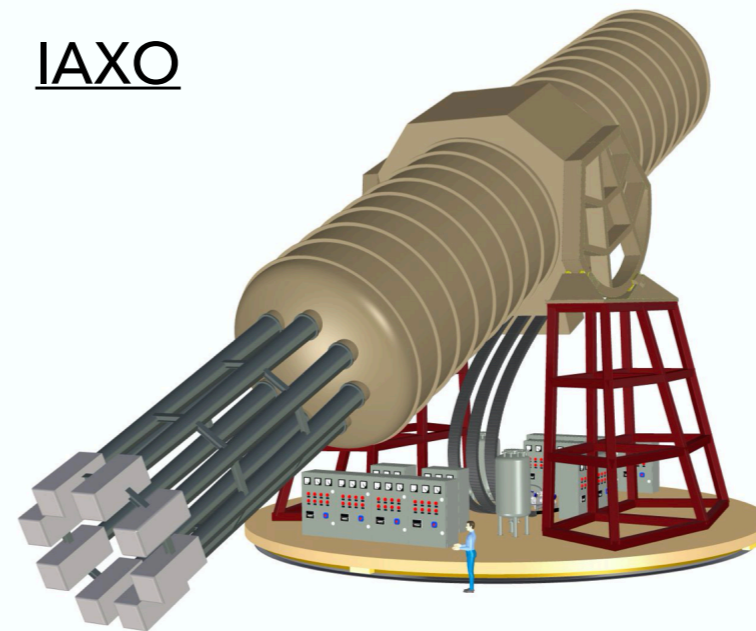
E. Armengaud, et al., 2014

$\theta_{\text{max}} = 25^\circ$: IAXO

$\theta_{\text{max}} = 20^\circ$: TASTE

TASTE Collaboration, 2017

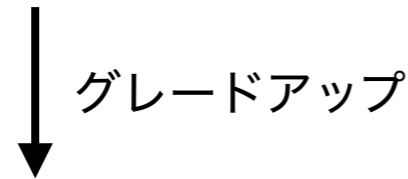
IAXO



E. Armengaud, et al., 2019

観測可能時間の割合

検出器: DESY, $\theta_{\max} = 25^\circ$ (IAXO) → α Lupi 以外は1日の50%以上が観測可能
(濃い青)

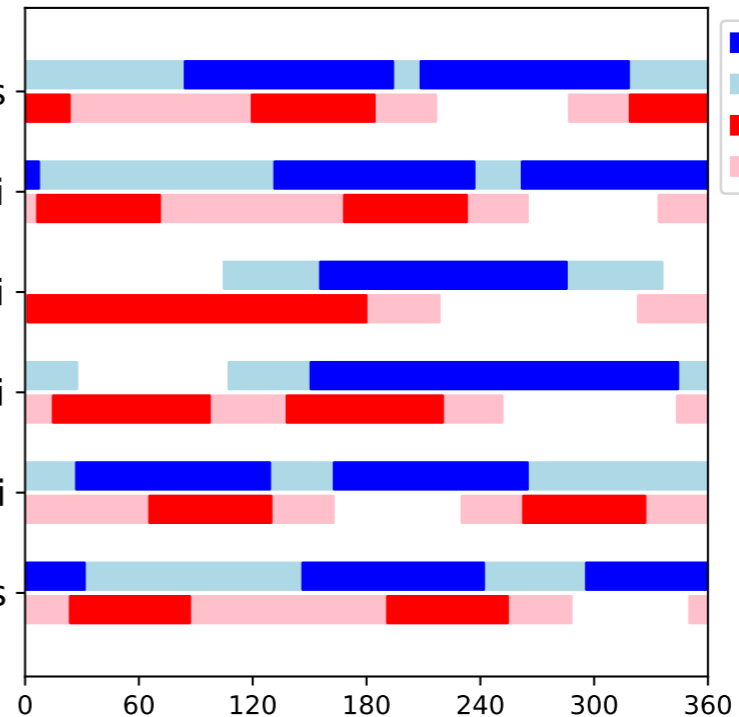


検出器: DESYと東京, $\theta_{\max} = 50^\circ$ → 常に全ての超新星候補を1つ以上の検出器で観測可能
(全ての色)

経度差 $\approx 130^\circ$

DESY, $\theta_{\max} = 25^\circ$ の割合

61% α Virginis
59% ζ Ophiuchi
36% α Lupi
54% α Scorpii
57% ϵ Pegasi
53% α Orionis



■ Hamburg(DESY), $\theta_{\max} = 25^\circ$
■ Hamburg(DESY), $\theta_{\max} = 50^\circ$
■ Tokyo, $\theta_{\max} = 25^\circ$
■ Tokyo, $\theta_{\max} = 50^\circ$

DESY, $\theta_{\max} = 25^\circ$
DESY, $\theta_{\max} = 50^\circ$
Tokyo, $\theta_{\max} = 25^\circ$
Tokyo, $\theta_{\max} = 50^\circ$

地球の自転1周分に対応 → Azimuth $\alpha_{\text{det}}^{(\text{DESY})}(t)$ [°]

検出される事象数の見積もり

超新星アクシオンが放出されてから検出されるまでの流れ

- 超新星サイド P. Carenza, T. Fischer, M. Giannotti, G. Guo,
G. Martinez-Pinedo, A. Mirizzi, 2019

超新星アクシオンの主要な生成反応は、バウンス後 $\Delta t \simeq 10$ s に起きる核子の制動放射

- 超新星の温度 $T \simeq 30$ MeV

- バウンスの 1 s 後のアクシオンのルミノシティ L_a

$$L_a \simeq 2.42 \times 10^{70} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \times (m_N / f_a)^2 C_{N,\text{eff}}^2 \quad (C_{N,\text{eff}}^2 = C_n^2 + 0.61 C_p^2 + 0.53 C_n C_p)$$

- 超新星アクシオンの平均エネルギー $\langle \omega \rangle \simeq 2.3 T \simeq 70$ MeV

- 検出器サイド

アクシオンに磁場を当てて光子に変換 $\rightarrow \gamma$ 線検出器で検出する

$$\begin{aligned} \text{・ アクシオンと光子の反応確率} \quad P &= \frac{1}{4} (g_{a\gamma\gamma} B L)^2 \left(\frac{\sin(qL/2)}{qL/2} \right)^2 \quad (q \simeq m_a^2 / (2\omega)) \\ &\simeq \frac{1}{4} (g_{a\gamma\gamma} B L)^2 \quad qL \lesssim 1 \quad \text{or} \quad m_a \lesssim 1 \text{ eV} \end{aligned}$$

検出される事象数の見積もり

検出される事象数 N

\approx (単位時間に放出される超新星アクシオンの総数)

\times (放出される時間)

\times (フラックス全体のうち検出器を通過するものの割合)

\times (アクシオンと光子の反応確率)

$$\approx \frac{L_a}{\langle \omega \rangle} \times \Delta t \times \frac{A}{4\pi d^2} \times P$$

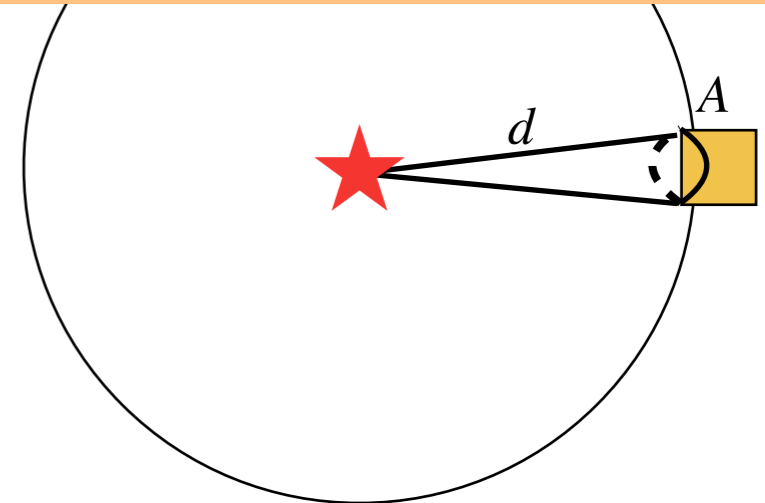
$$\approx 1.0 \times \left(\frac{A}{2.3 \text{ m}^2} \right) \left(\frac{B}{2.5 \text{ T}} \right)^2 \left(\frac{L}{20 \text{ m}} \right)^2$$

Detector

$$\times \left(\frac{150 \text{ pc}}{d} \right)^2 \left(\frac{T}{30 \text{ MeV}} \right)^{5/2} \left(\frac{\Delta t}{10 \text{ s}} \right) \times \left(\frac{C_{a\gamma\gamma}}{0.0023} \right)^2 \left(\frac{3 \times 10^8 \text{ GeV}}{f_a} \right)^4 \left(\frac{C_{N,\text{eff}}}{0.37} \right)^2 \quad (m_a \lesssim 1 \text{ eV})$$

Supernova

Axion model



A : 検出器の断面積

d : 超新星候補までの距離

B : 磁場の大きさ

T : 超新星の温度

L : 検出器の長さ

Δt : 超新星アクシオンが放出される時間

$$C_{a\gamma\gamma} \equiv g_{a\gamma\gamma} f_a$$

$$C_{N,\text{eff}}^2 = C_n^2 + 0.61 C_p^2 + 0.53 C_n C_p \subset \text{luminosity}$$

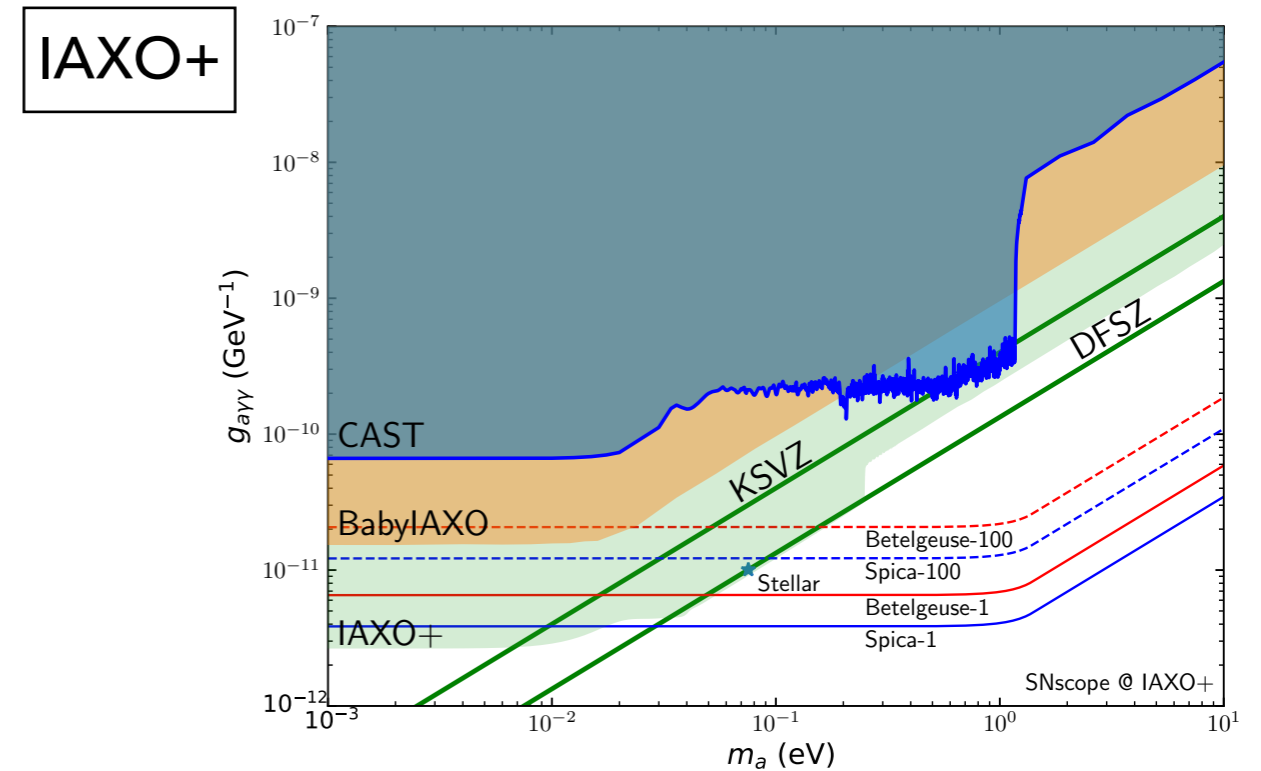
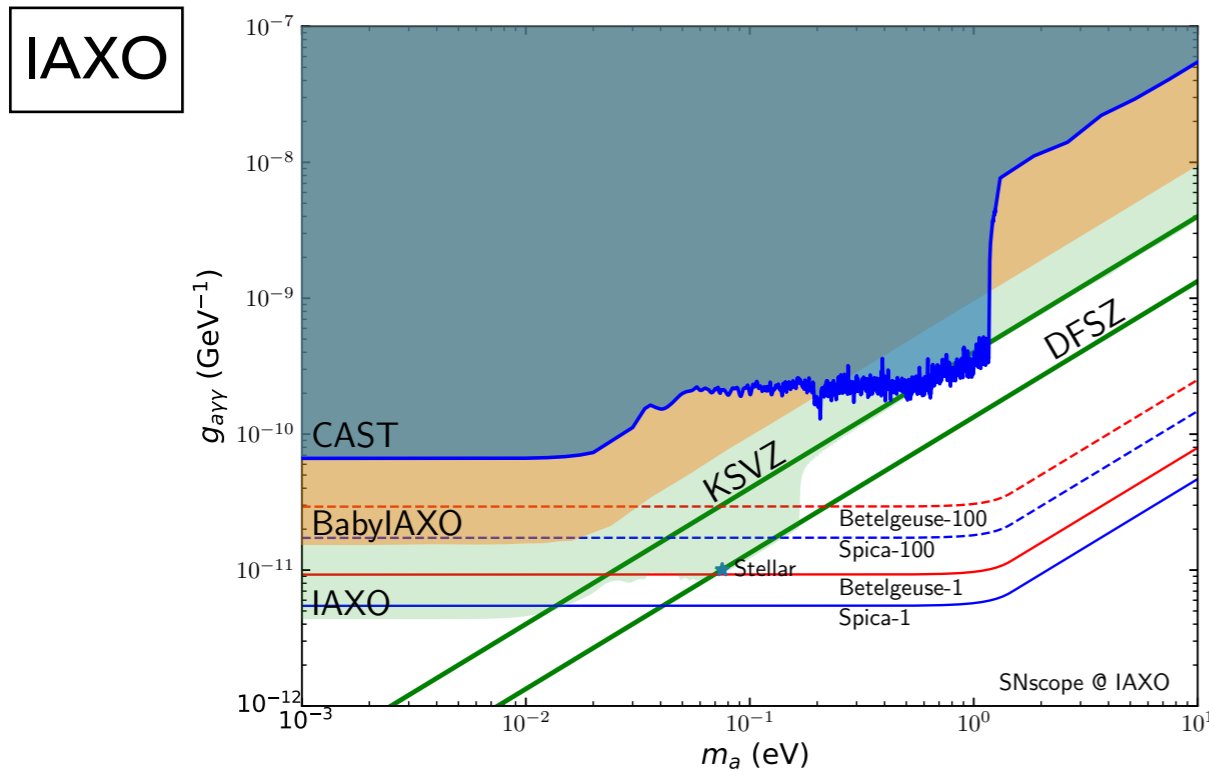
f_a : アクシオンの崩壊定数

検出される事象数の見積もり

$m_a - g_{a\gamma\gamma}$ グラフ

$$C_{N,\text{eff}} = 0.37 \text{ (KSVZ)}, \quad C_{a\gamma\gamma} = \alpha/\pi, \quad \text{Betelgeuse or Spica, 1 or 100 events}$$

- m_a が小さい領域は太陽アクシオン実験と超新星アクシオン実験の両方で調べられる
- m_a が大きい領域は超新星アクシオン実験でのみ調べられる



バックグラウンドの見積もり

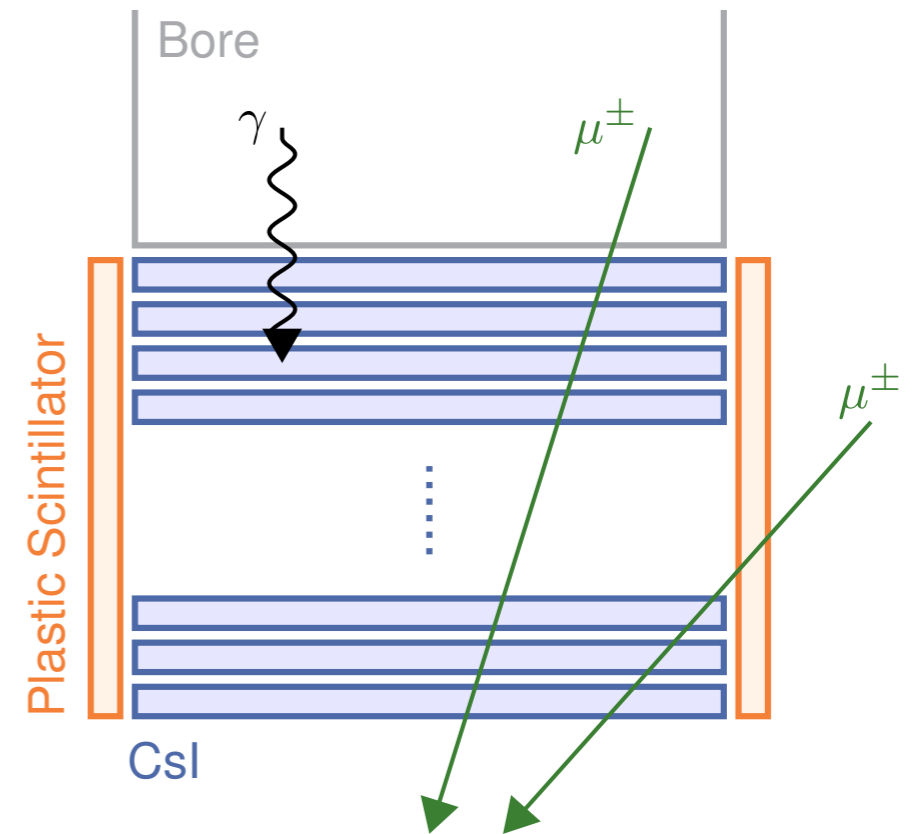
主要なバックグラウンドは宇宙線ミュオン

検出器

- 25層の CsI シンチレータ (青色)
- 両サイドにプラスチックシンチレータ (橙色)
→横から入射するミュオンを区別するため

バックグラウンドの区別方法

- エネルギーデポジットの合計
- 1 MeV 以上のエネルギーデポジットを受け取る枚数

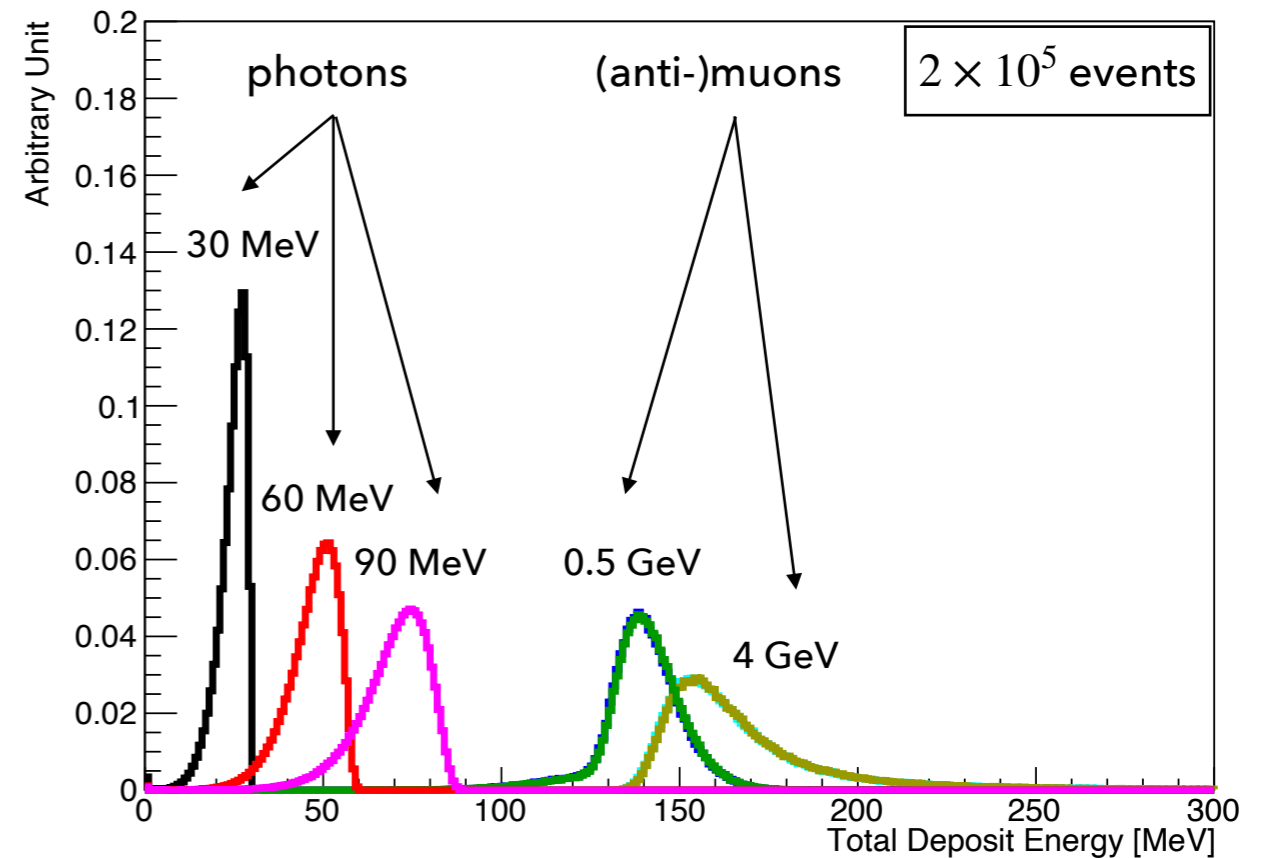


CsI シンチレータ × 25枚
→検出効率ほぼ100%

バックグラウンドの見積もり

エネルギーデポジットの合計

- 超新星アクシオンのエネルギー $\simeq \mathcal{O}(10)$ MeV
- ミューオンのエネルギー
0.5 GeV (エネルギーの下限)
4 GeV (地上での平均的なエネルギー)



- 光子はほとんどのエネルギーを落とす
- ミューオンはごく一部のエネルギーを落とす
- ミューオンの落とすエネルギーは光子より大きい

バックグラウンドの見積もり

1 MeV 以上のエネルギーデポジットを受け取る枚数

- 1 MeV 以上のエネルギーデポジットを受け取る枚数が12枚以下の割合

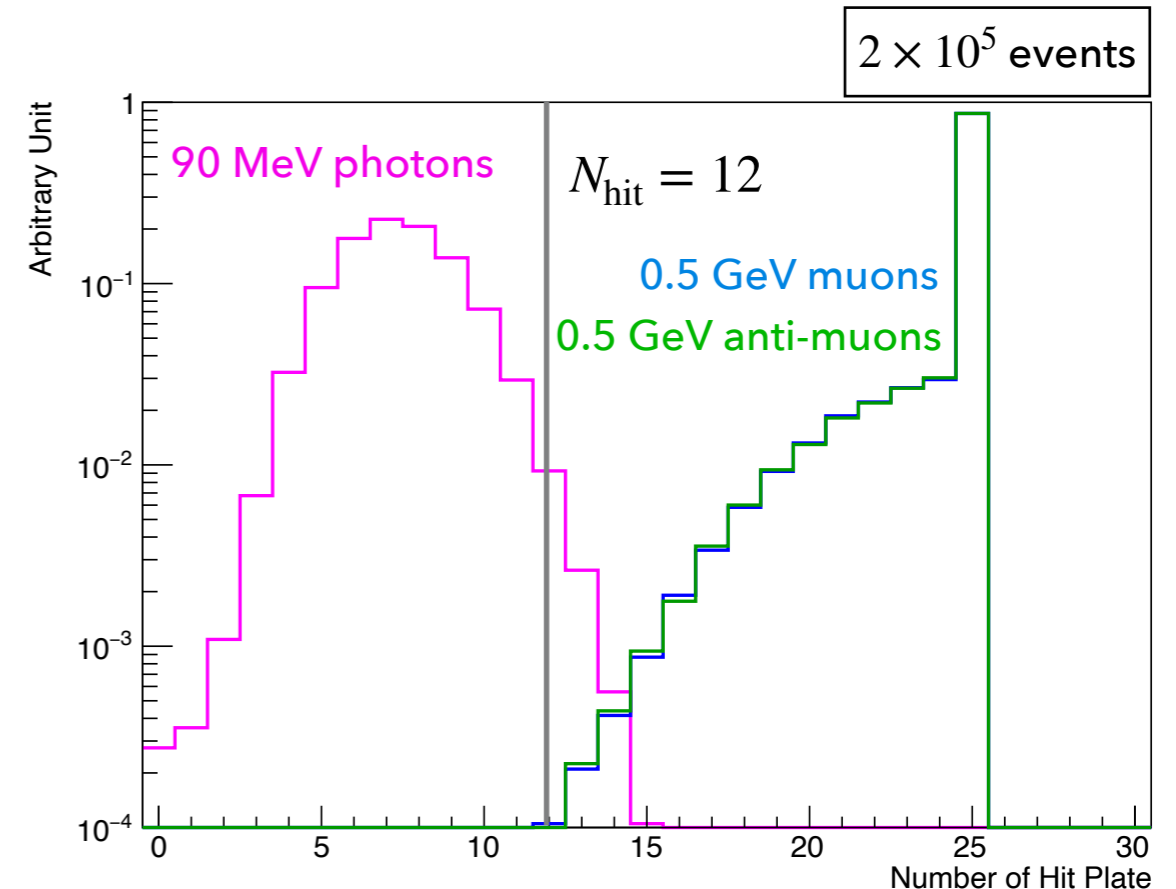
90 MeV photons → 99.5% 以上

0.5 GeV (anti-)muons → $\mathcal{O}(10^{-4})$

他に考えられるバックグラウンド

- 検出器内で起きる核反応によって放出される光子

バックグラウンド由来の光子(10 MeV 以下) < 超新星アクシオン由来の光子 ($\mathcal{O}(10)$ MeV)



まとめ

- 超新星アクシオン探索という斬新な試み
- 前兆ニュートリノを観測 → 予め Supernova-scope を超新星候補の方向に向ける
- 250 pc より近くで超新星爆発が起きれば、 $f_a \simeq 10^8$ GeV の時、 $\mathcal{O}(1)$ 以上の事象数が期待出来る

超新星アクシオン探索実験を通して、
天体物理や素粒子物理に関する新しい知見が得られるかもしれない

Backup

Angular resolution

Liquid scintillator detector を用いた超新星候補の位置特定 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$: Inverse beta decay

(JUNO-like detector) M. Mukhopadhyay, C. Lunardini, F. X. Timmes, K. Zuber, 2020

Angular aperture β

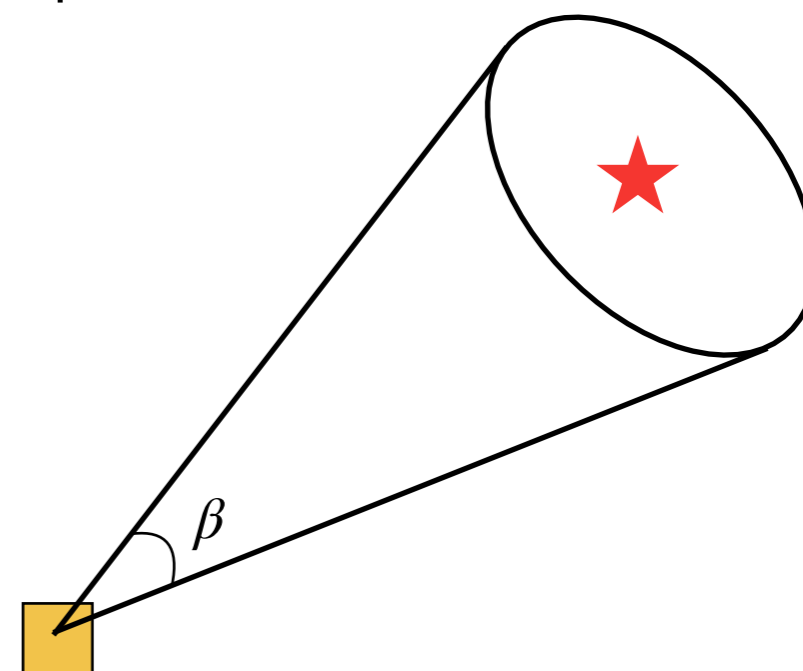
LS : Liquid Scintillator

LS-Li : Lithium-loaded Liquid Scintillator

	LS	LS-Li
C. L. 68%	63.92°	15.47°
C. L. 90%	98.42°	22.26°

Betelgeuse (222 pc)

$t_{pb} \simeq -1 \text{ hr}$



→ event 数も考慮すれば、近傍($d \lesssim 250 \text{ pc}$) の超新星候補の方向を特定できる可能性がある

超新星の温度

$M = 18M_{\odot}$
球対称

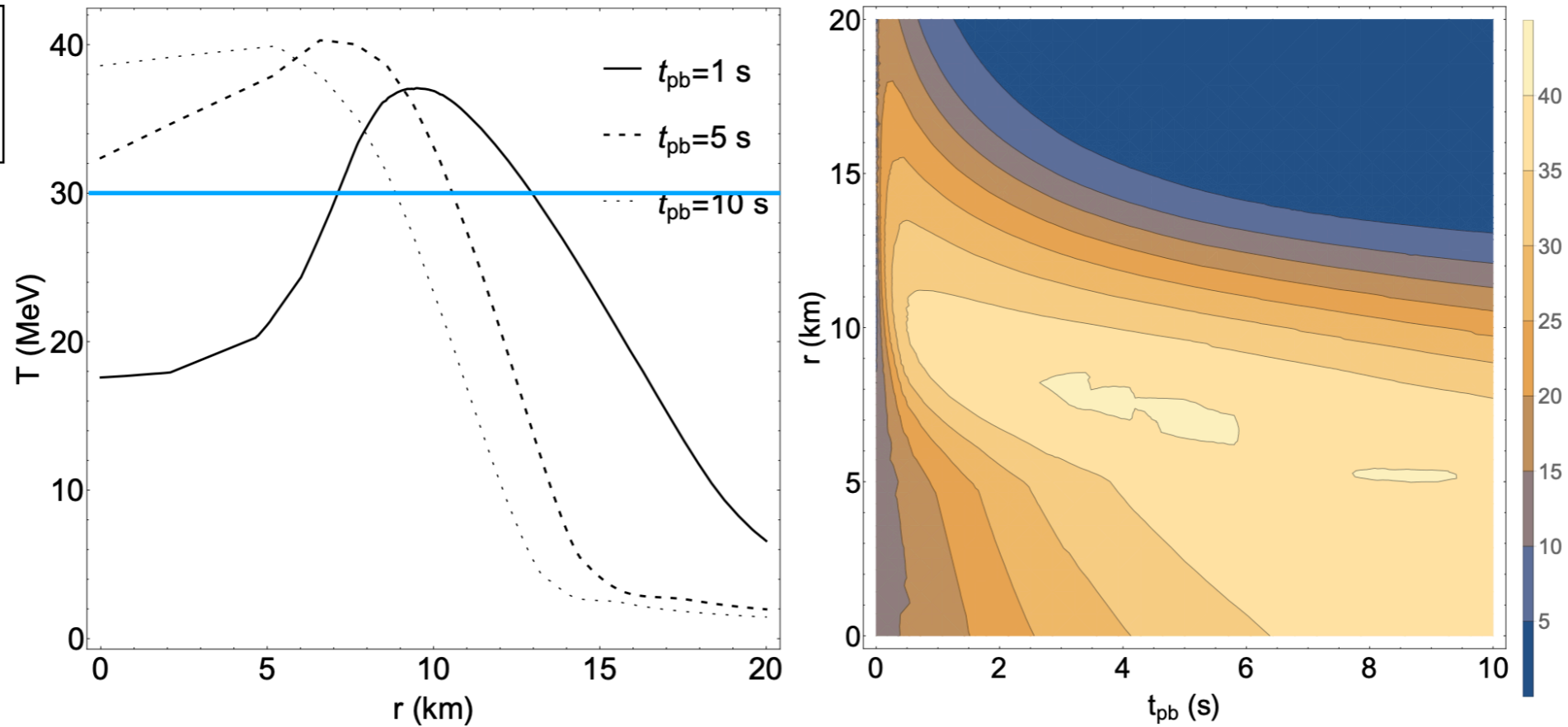


Figure 2. Left panel: Radial evolution of the temperature T at different post-bounce times t_{pb} . Right panel: T behavior in the plane t_{pb} - r .

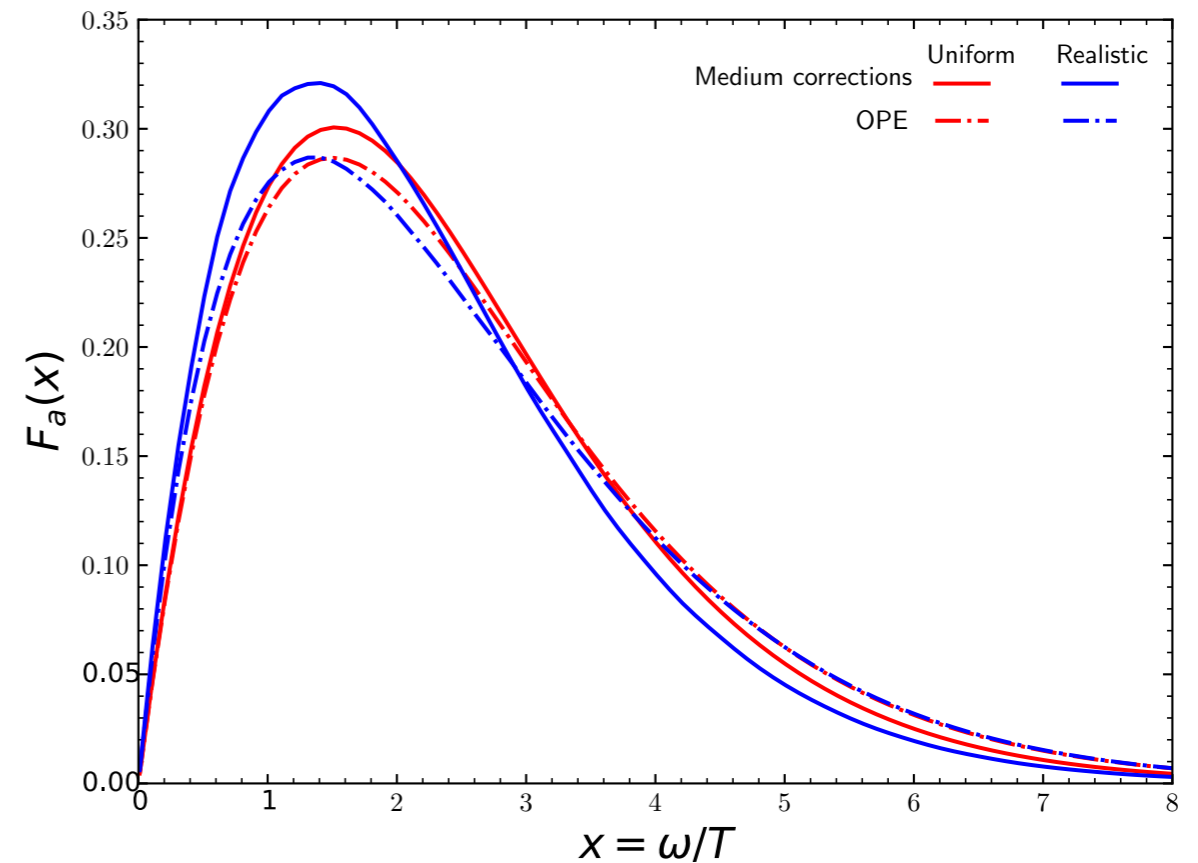
P. Carenza, T. Fischer, M. Giannotti, G. Guo,
G. Martinez-Pinedo, A. Mirizzi, 2019

エネルギースペクトル

$$\frac{dN_a}{d\omega dt dV} = \frac{1}{4\pi^{7/2} f_a^2} \left(\frac{g_A}{2f_\pi} \right)^4 n_B \rho \omega \sqrt{m_N T} e^{-\omega/T} s(\omega/T)$$

超新星の温度 $T \simeq 30$ MeV

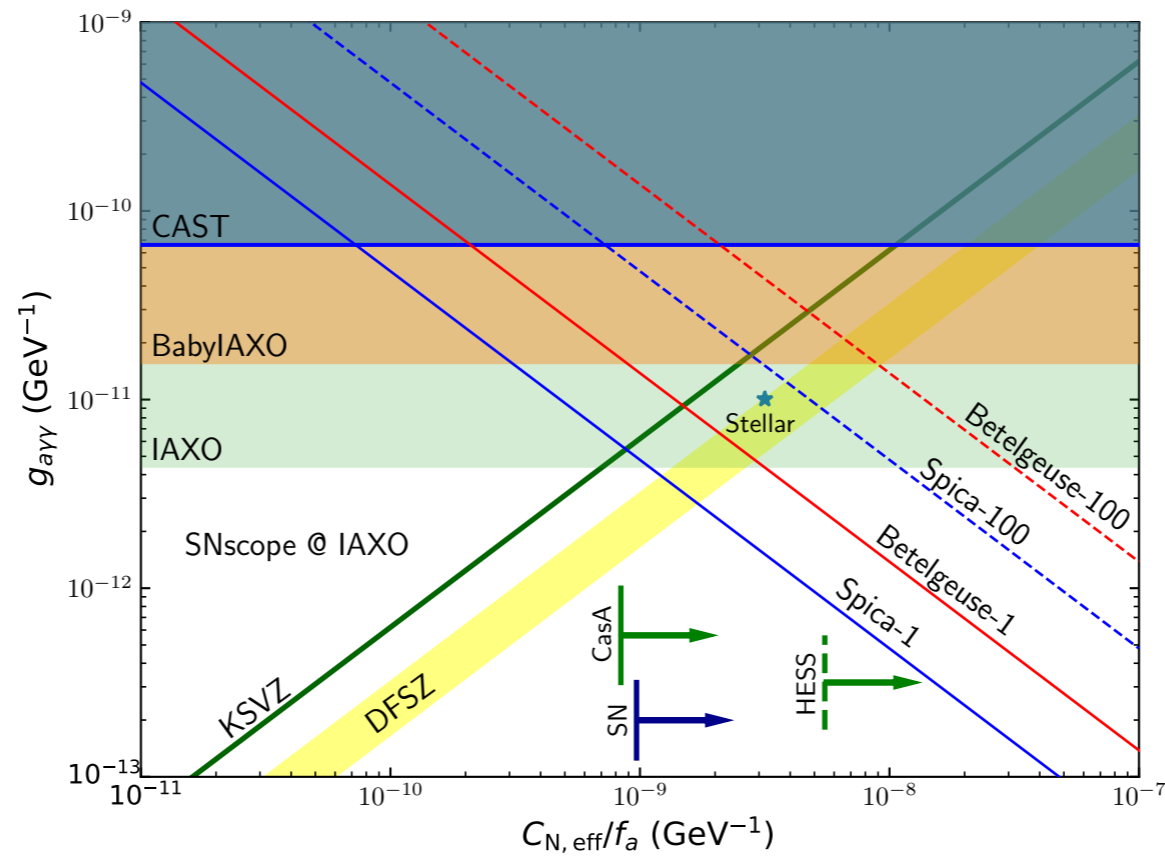
平均エネルギー $\langle \omega \rangle \simeq 2.3 T \simeq 70$ MeV



グラフ

$g_{\gamma\gamma} - C_{N,\text{eff}}/f_a$ グラフ

$m_a = 10^{-3}$ eV, **Betelgeuse** or **Spica**, 1 or 100 events



L_a の不定性

超新星サイドの計算に不定性あり → 真の値 $\tilde{L}_a = C_{\text{err}} L_a$

- SN 1987A の観測に基づく f_a の下限 $\propto C_{\text{err}}^{1/2}$

$$\tilde{L}_a \lesssim L_\nu \simeq 2 \times 10^{52} \text{ erg s}^{-1} \quad \text{at } t_{\text{pb}} = 1 \text{ s}$$

$$\tilde{L}_a \propto C_{\text{err}} f_a^{-2}$$

- 事象数 N を固定した時の $f_a \propto C_{\text{err}}^{1/4}$

$C_{\text{err}} = 0.1 - 0.3$ の時、Spica で $\mathcal{O}(10)$ 、

Betelgeuse で $\mathcal{O}(1)$ の事象数が期待できる

