

Axion Supernovascope

永田 夏海

東京大学

第7回超新星ニュートリノ研究会

Jan. 7, 2021

S. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa,
Y. Kishimoto, N. Nagata, J. Zheng, JCAP 11, 059 (2020).

CP violation

標準模型の弱い相互作用はCP対称性を破っている。

破れの起源は、カビボ小林益川行列内の複素位相：

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

- 3世代の場合、複素位相は唯一一つ

M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973).

- その値はO(1): $\delta \simeq 1.2 \simeq 69^\circ$

弱い相互作用の場合、CP対称性の破れは
理論的に自然かつ一般的な形で与えられる。



Strong CP problem

強い相互作用においても、一般にCP対称性は破れうる。

$$\mathcal{L}_\theta = \theta_G \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^A \tilde{G}^{A\mu\nu} - \sum_q m_q \bar{q} \theta_q i \gamma_5 q \quad \tilde{G}_{\mu\nu}^A = \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} G^{A\mu\nu}$$

これらの項は中性子の電気双極子モーメントを生み出す。

→ $d_n = 8.2 \times 10^{-17} \bar{\theta} \text{ e} \cdot \text{cm}$ $\bar{\theta} = \theta_G + \sum_q \theta_q$

K. Fuyuto, J. Hisano, N. Nagata, Phys. Rev. D87, 054018 (2013).

nEDM collaboration

$$|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm} \rightarrow |\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10}$$

一体なぜここまで小さな値になっているのだろうか？

Strong CP 問題

Peccei-Quinn mechanism

Peccei-Quinn対称性を持つように理論を拡張することで
Strong CP 問題を解決する機構が提案された。 R. D. Peccei and H. R. Quinn (1977).

この対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーン粒子

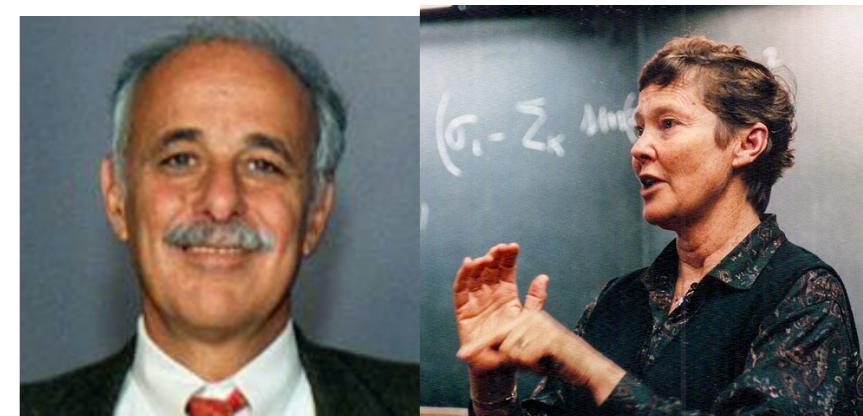


アクション

S. Weinberg (1978); F. Wilczek (1978).

性質

- アクション場に関する有効ポテンシャルの最小点において
強い相互作用はCP対称的になる。
- アクションは暗黒物質の候補にもなる。



Axion

アクシオンの質量

$$m_a \simeq \frac{\Lambda_{\text{QCD}}^2}{f_a}$$

f_a : アクシオン崩壊定数

Λ_{QCD} : QCDスケール (数百MeV)

アクシオンの相互作用

● 光子との相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{C_{a\gamma\gamma}}{4f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

● 核子との相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \sum_{N=p,n} \frac{C_N}{2f_a} \bar{N} \gamma^\mu \gamma_5 N \partial_\mu a$$

▶ f_a の値は (標準模型の質量スケールと比べて) とても大きい。



非常に弱い相互作用 & とても小さな質量

▶ 相互作用の係数は模型に依存する。

KSVZ, DFSZ

Constraints

アクションの相互作用は天文現象から制限されている。

- SN1987A

$$f_a \gtrsim 4 \times 10^8 \text{ GeV (KSVZ)}$$

P. Carenza, et al., JCAP **1910**, 016 (2019).

- 中性子星冷却

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

[カシオペアA中性子星]

K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi, and J. Zheng, Phys. Rev. **D98**, 103015 (2018).

しかしながら、これらの制限には様々な不定性がある。

加えて、新たな冷却源の存在を示唆する観測結果もある。

M. Giannotti, I. G. Irastorza, J. Redondo, A. Ringwald, K. Saikawa, JCAP **1710**, 010 (2017).

天体由来のアクションをもっと直接的に観測する方法はないか？？

Today's topic

近傍超新星由来のアクションを, [axion helioscope](#) を用いて
検出する可能性を議論する。

Similar idea: G. G. Raffelt, J. Redondo, and N. Viaux Maira, Phys. Rev. D 84, 103008, (2011).

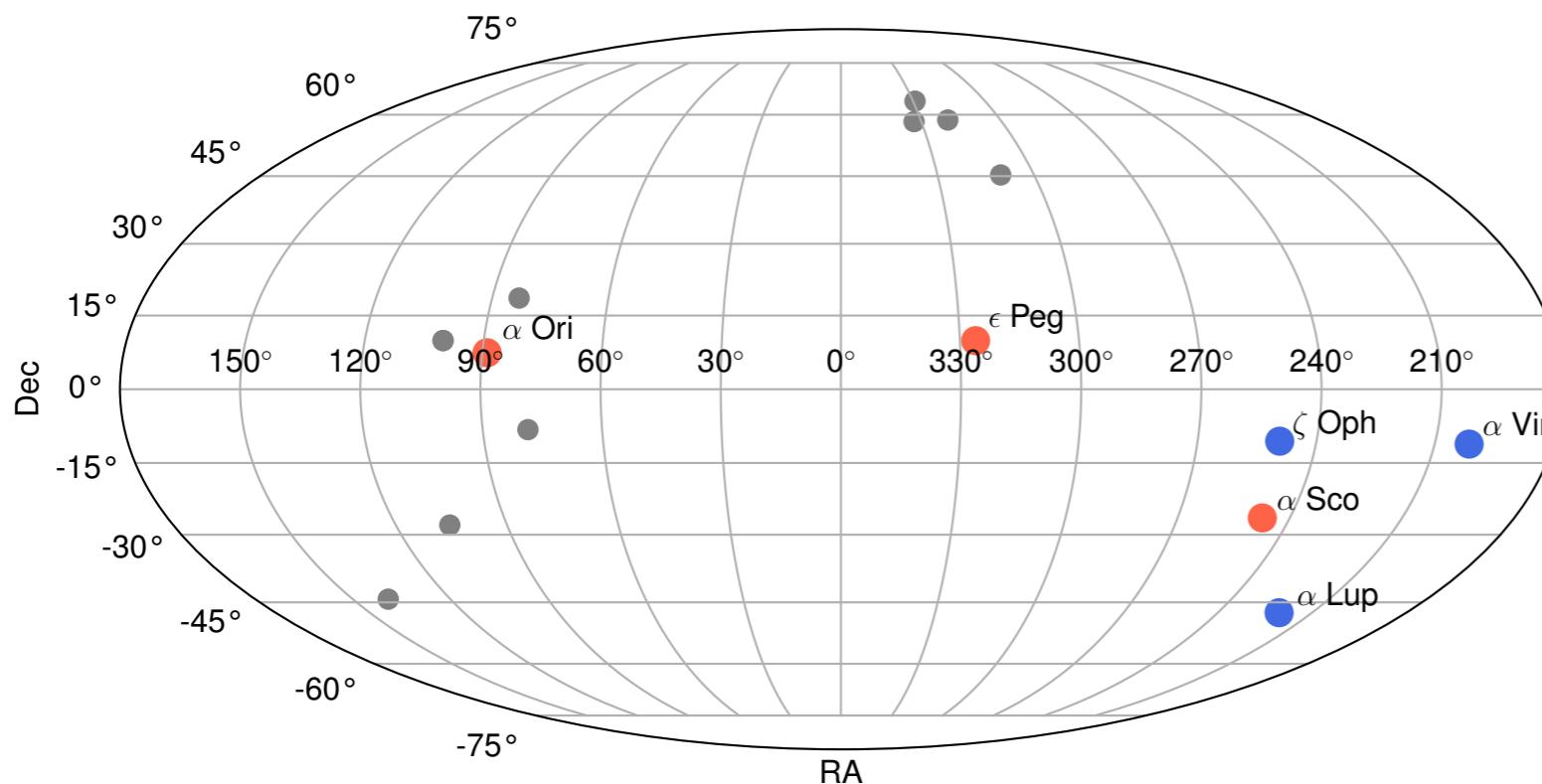
現実的かつ具体的なセットアップを考え, その見込みを
評価する。

Nearby SN progenitor candidates

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

超新星候補天体の位置

$M \gtrsim 10 M_{\odot}, d \lesssim 250$ pc



● $d > 250$ pc

ある程度近くに結構
多くの候補天体がある。

PreSN neutrino alarm

重力崩壊が起こるより前に axion helioscope を超新星に向けておかねばならない。

- 重力崩壊前に放出される前兆ニュートリノを用いる。
- Supernova Early Warning System (SNEWS)

Ref.) K. Ishidoshiro, C. Kato, T. Yoshida, arXiv:2006.02519.

放射源の位置も見積もれるかもしれない。

H.-L. Li, et. al., JCAP **05**, 049 (2020); M. Mukhopadhyay, et.al., APJ **899**, 2, 153 (2020).

- ▶ JUNO, O(1) 時間前 → $\simeq 60^\circ$
- ▶ JUNO (+Li), O(1) 時間前 → $\simeq 15^\circ$

重力崩壊する近傍超新星を前もって同定しうる。

Axion helioscope

検出器として axion helioscope を用いる。

Experiment	(Proposed) site	B (T)	L (m)	A (m^2)	
CAST	CERN	9	9.3	2.9×10^{-3}	過去
BabyIAXO	DESY	~ 2	10	0.77	
IAXO baseline	DESY	~ 2.5	20	2.3	将来
IAXO+	DESY	~ 3.5	22	3.9	
TASTE	INR	3.5	12	0.28	

- 太陽アクション検出を目的に設計

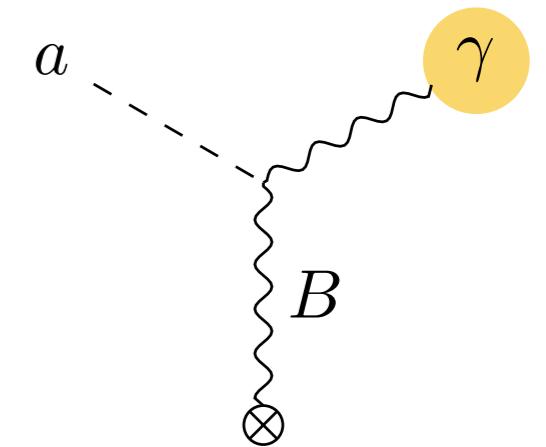
→ エネルギー: $O(1)$ keV

この光子を検出

- X線検出器を搭載

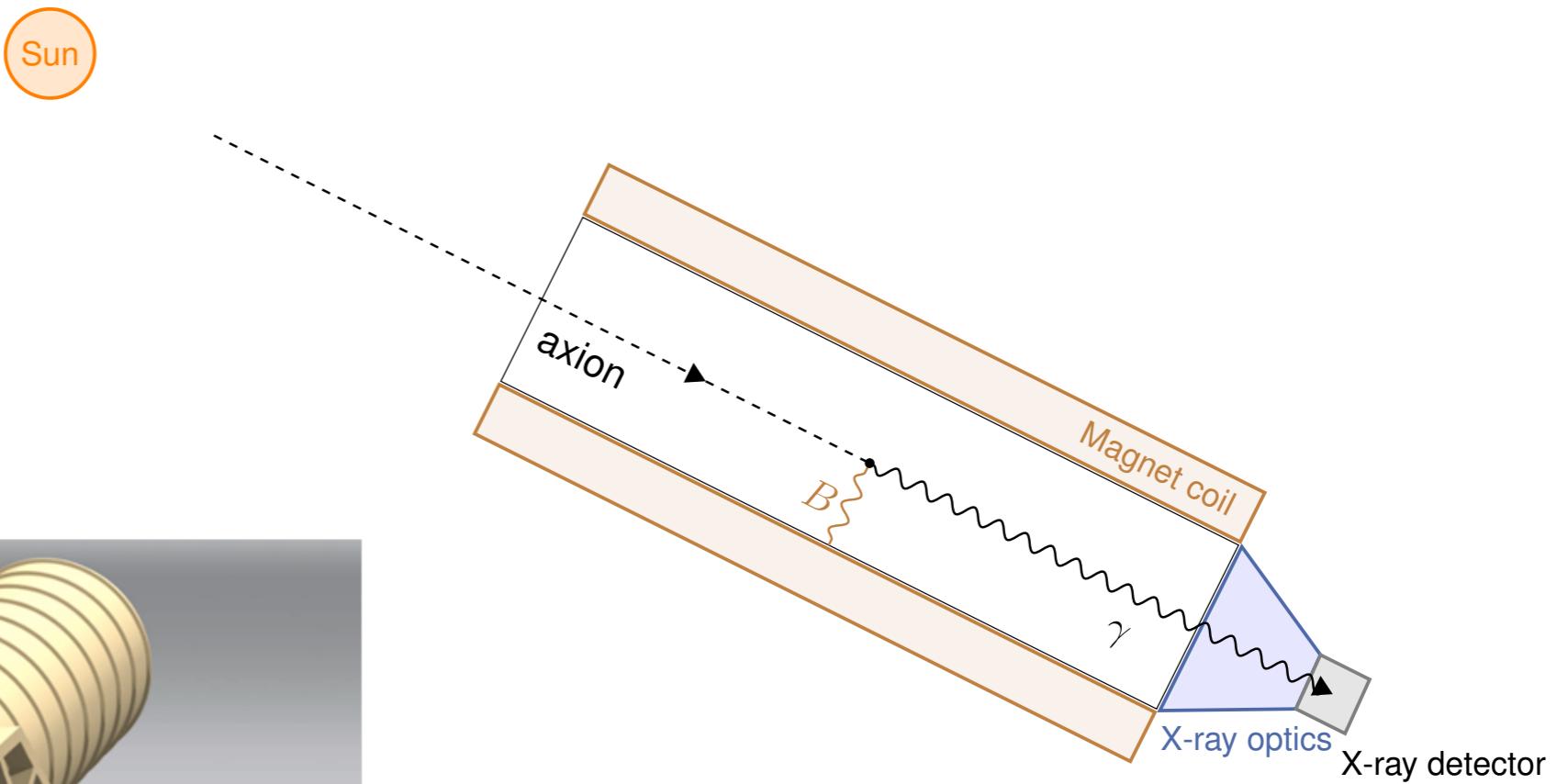
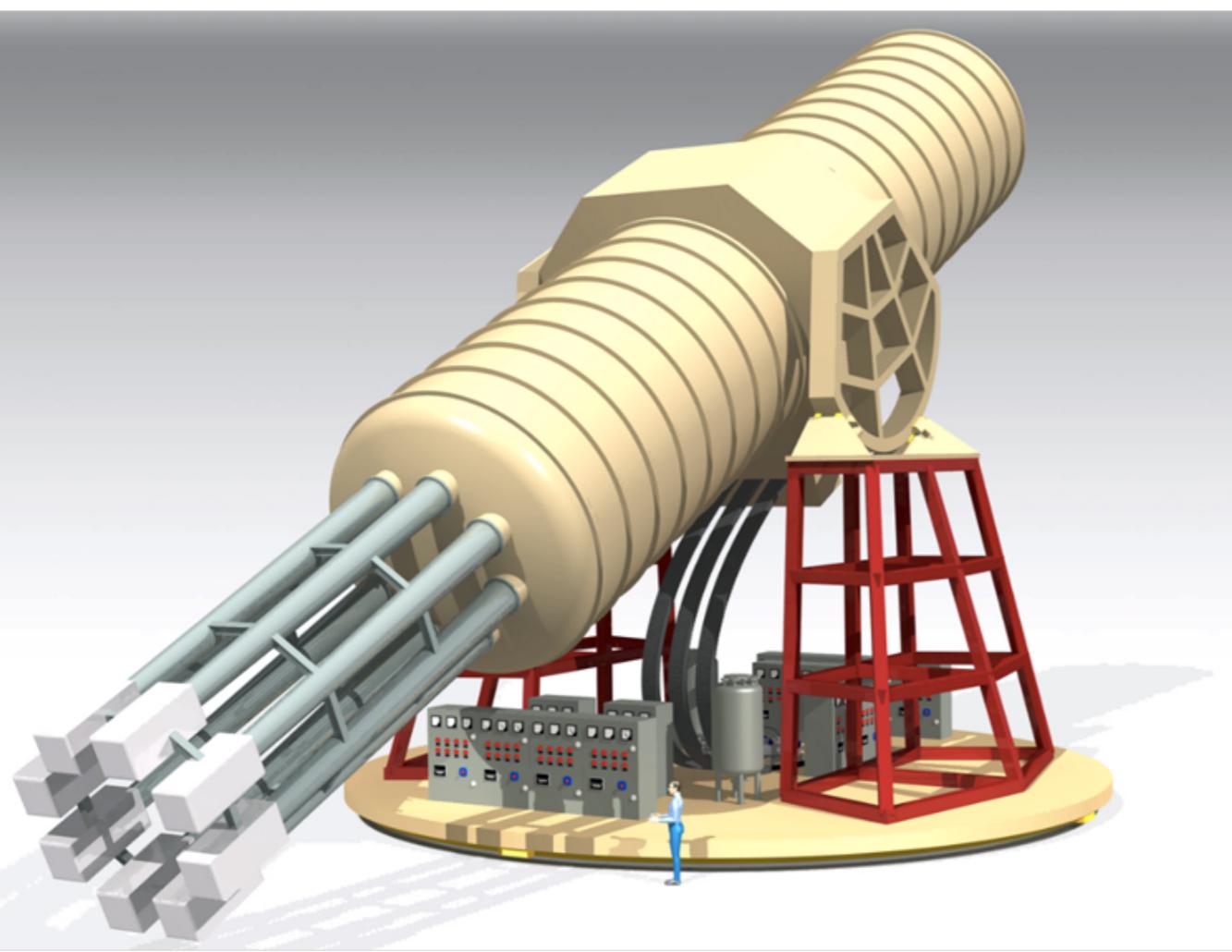
超新星アクションのエネルギー = $O(10)$ MeV

→ γ -rays

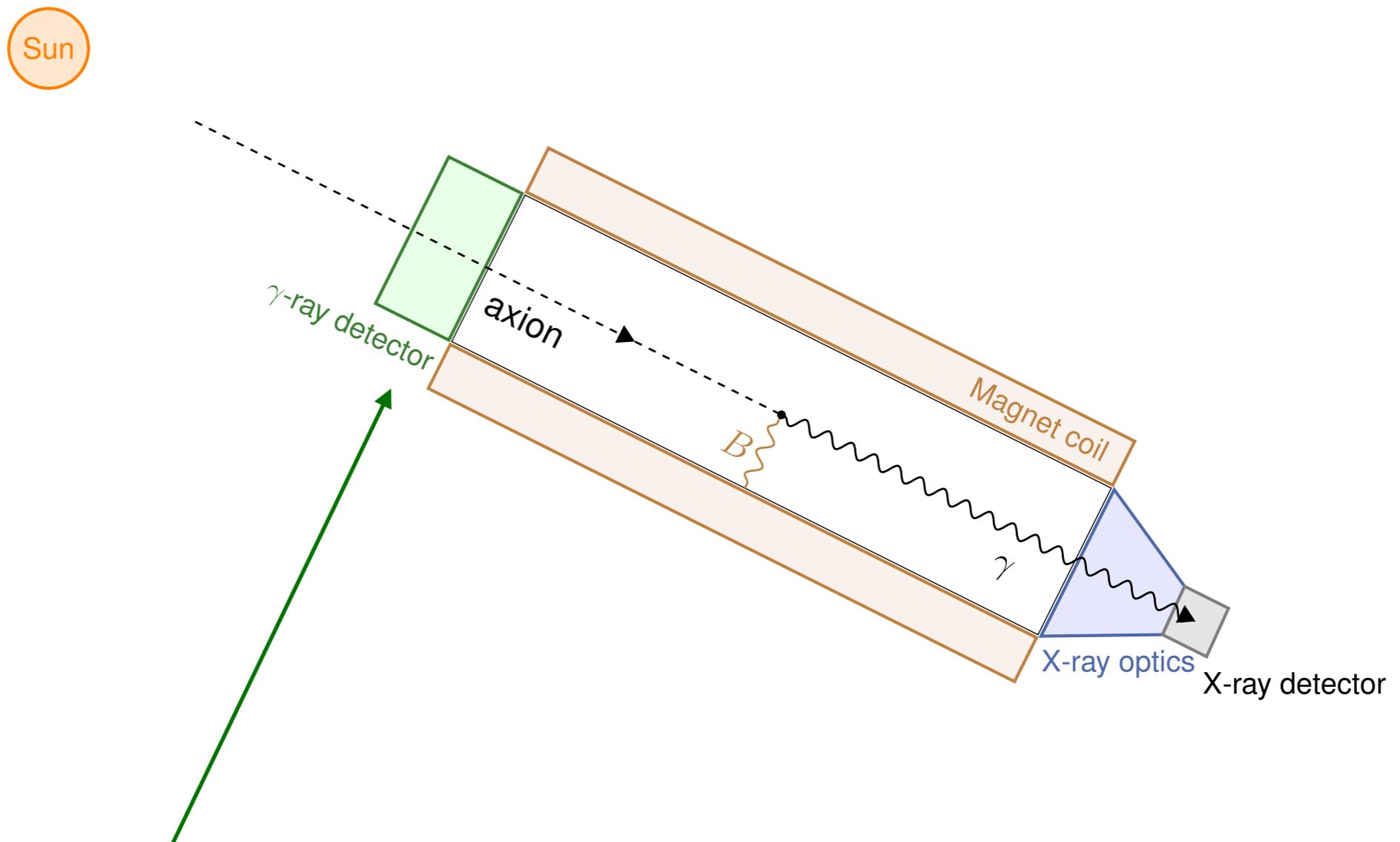


Axion helioscope

IAXO

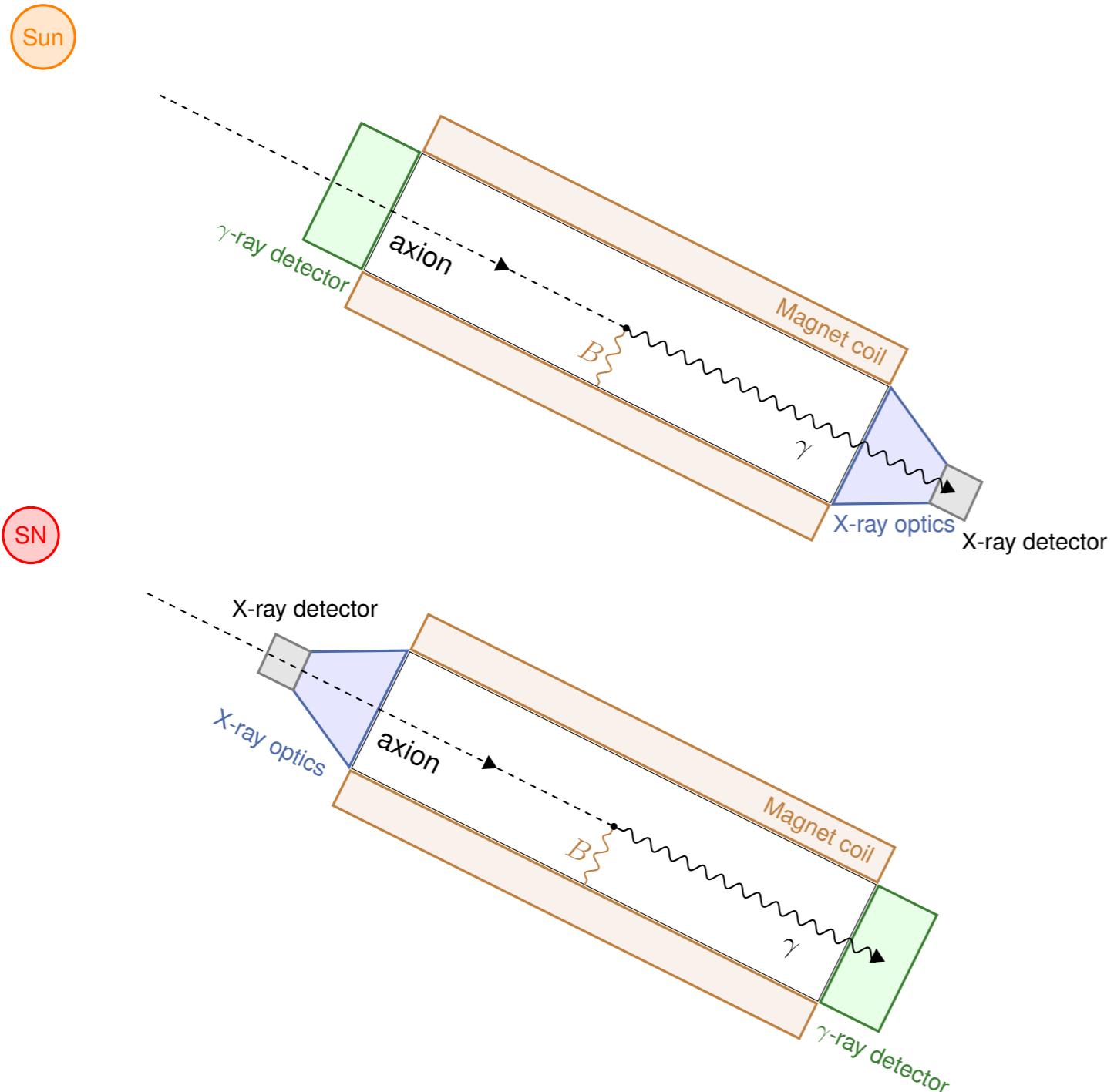


Axion helioscope



γ 線検出器を反対側に取り付けることを提案する。

Axion SN-scope



通常時

前兆ニュートリノ
警報後

検出器をひっくり返して、supernovascope に変身させる。

Timeline

重力崩壊の $O(1)$ 日 – $O(1)$ 時間前

前兆ニュートリノ警報!



Axion supernovascope が候補天体へと向けられる。

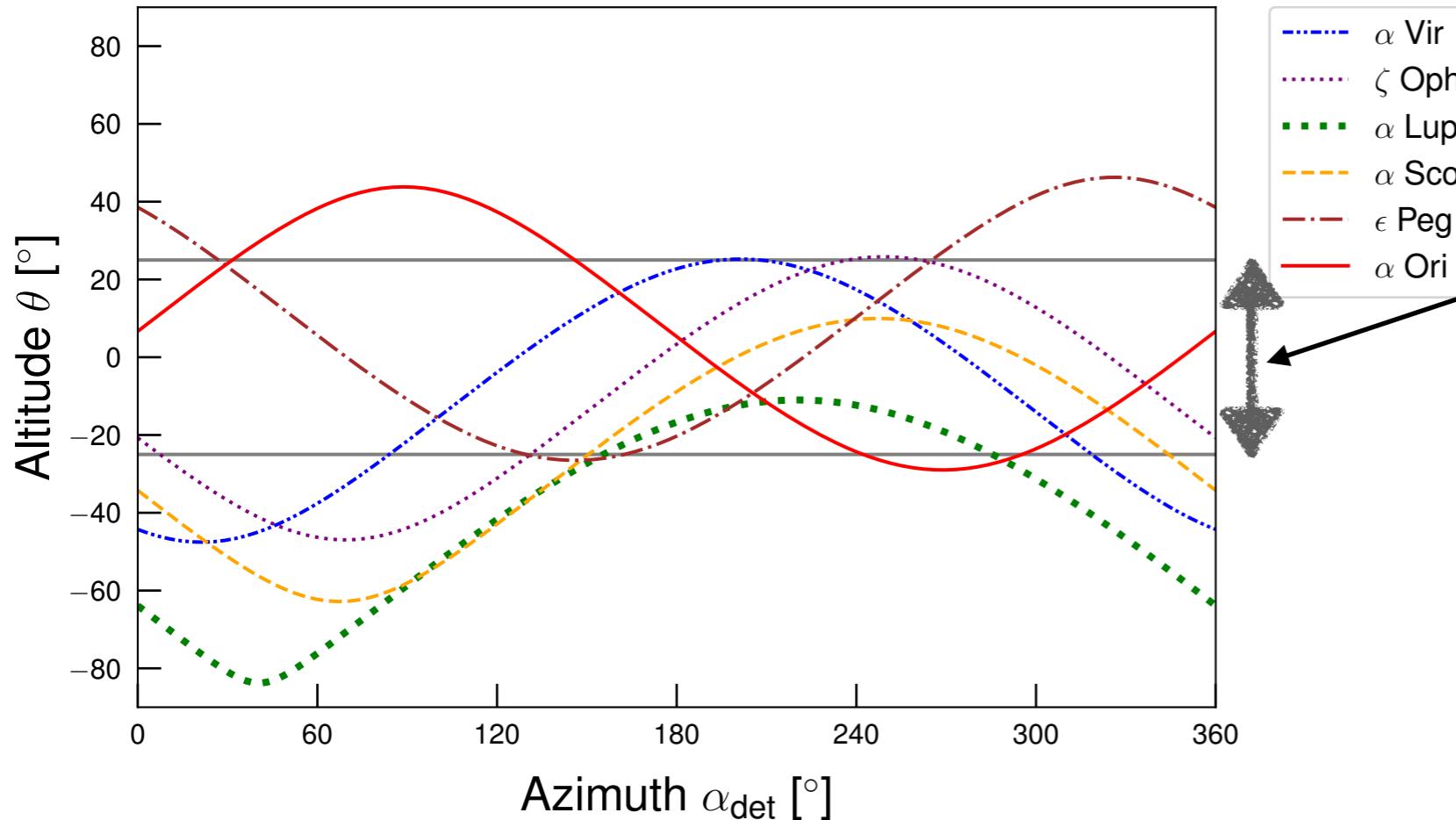
重力崩壊

アクション放出 (~10 秒間)

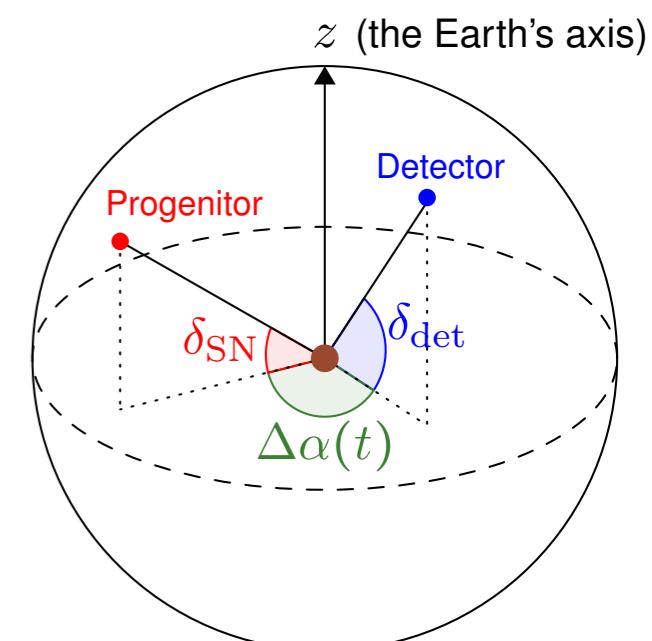
Observation time fraction

実際のところ、supernovoscopeを候補天体へと向けられそうか？

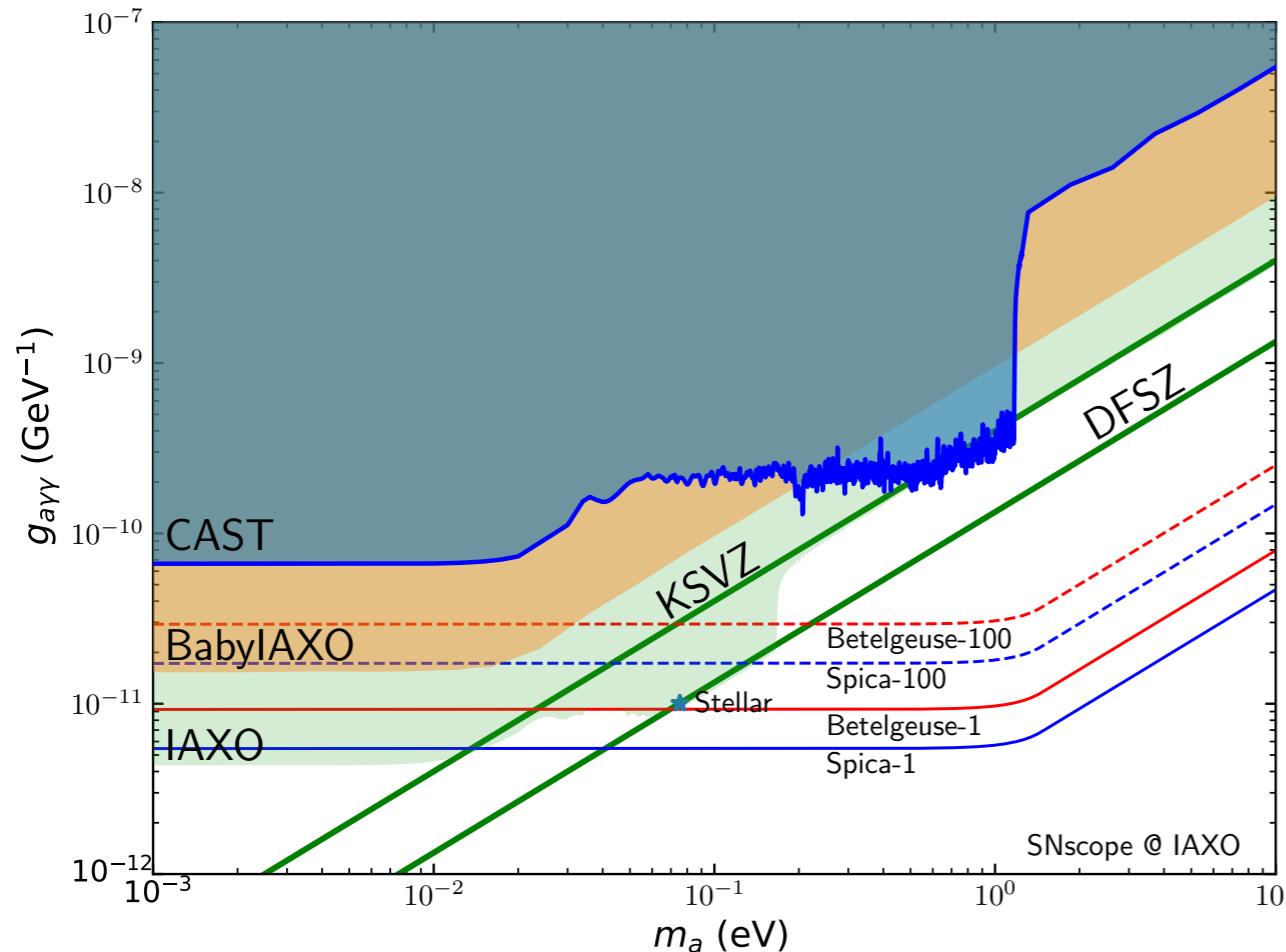
$$\delta_{\text{det}} = 53.6^\circ \text{ (DESY)}, \theta_{\max} = 25^\circ$$



- 50% 以上の確率で向けられそう (α Lupを除く)。
- 異なる地点にも検出器をおくか、 θ_{\max} を大きくすることで観測可能時間を100%にできる。



Event number



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

イベント数の見積もり

相互作用の係数はKSVZ模型に固定。

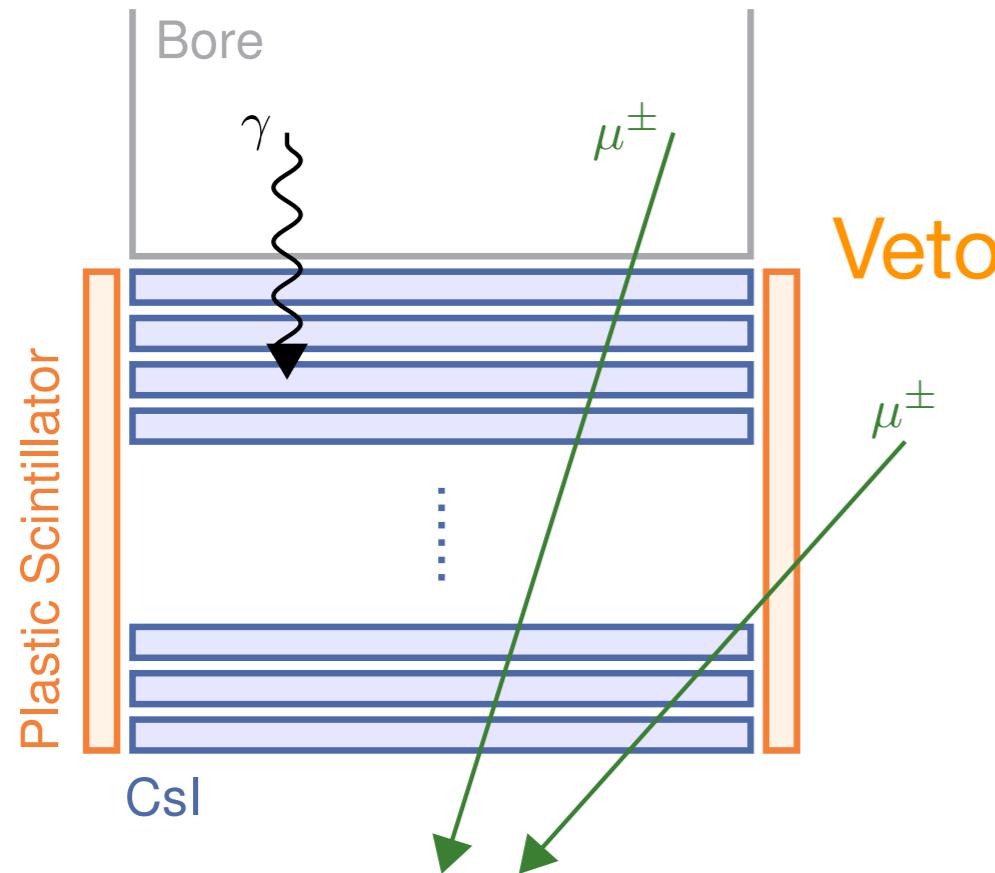
ただし、アクション質量は独立なパラメーターとした。

- 質量が比較的大きい場合、supernovoscopeの方がIAXOよりも高い感度をもつ。
- 質量が比較的小さい場合、supernovoscopeはIAXOと同程度の感度を持つ。

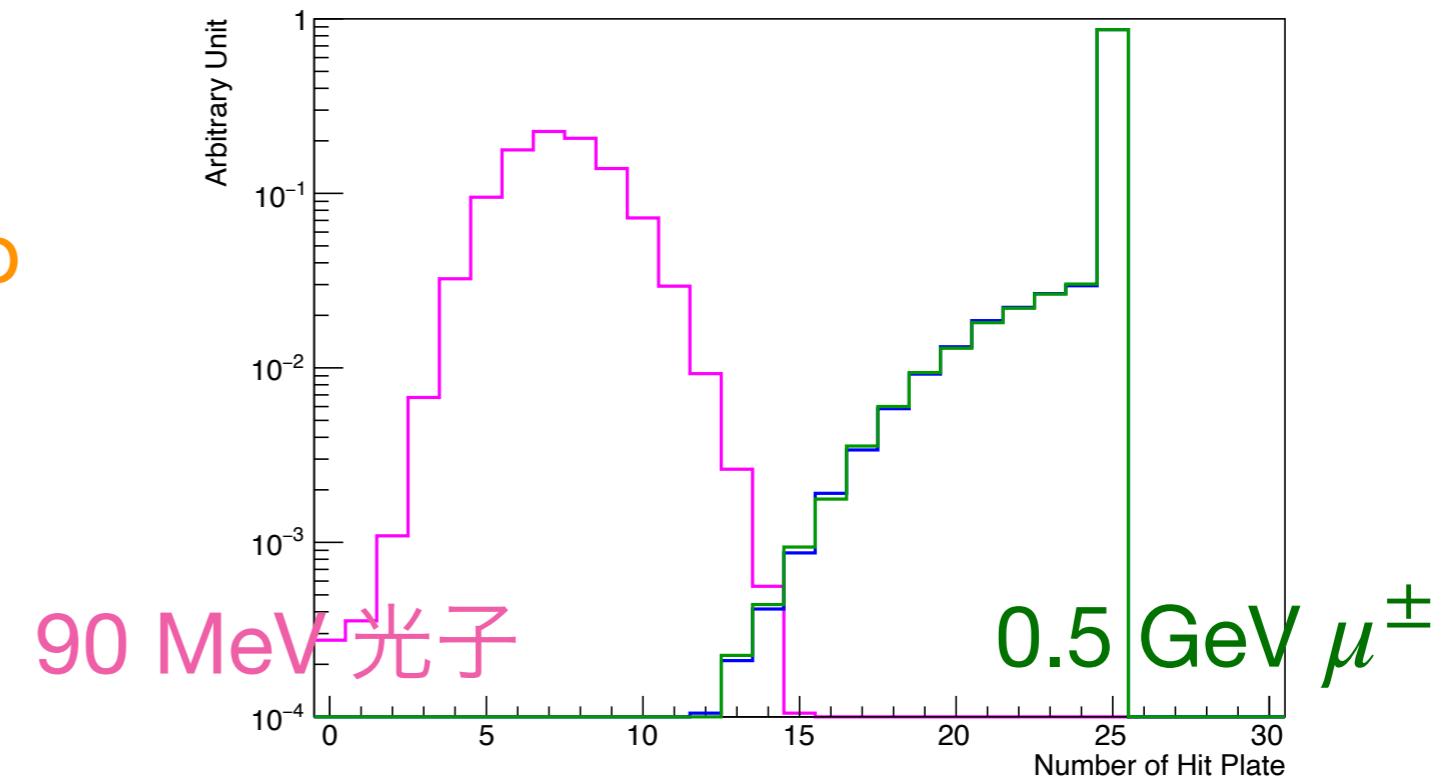
太陽アクションと超新星アクション共に検出できるかもしれない。

Background estimate

γ 線検出器の例



ヒット数 (> 1 MeV)



- 10秒間で $O(10^3)$ 個の宇宙線ミューオンが飛来。
- 光子は検出器内で止まるが、ミューオンは基本突き抜ける。
- ミューオンは光子よりも多くのエネルギーを落とす。



背景事象は除外できそう。

Conclusion

- 近傍超新星由来のアクションを、 supernovoscopeを用いて直接捉える可能性を議論した。
- 前兆ニュートリノを用いることでsupernovoscopeを超新星に予め向けうる。
- 将來のaxion helioscope実験において、この可能性も考慮して検出器設計を行うことを提案したい。

Backup

Axion-nucleon couplings

アクション・核子相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \sum_{N=p,n} \frac{C_N}{2f_a} \bar{N} \gamma^\mu \gamma_5 N \partial_\mu a$$

- KSVZ 模型: クオーケとの結合を持たない。

$$C_p = -0.47(3), \quad C_n = -0.02(3)$$

C_n が0と無矛盾であることに注意。

- DFSZ 模型: クオーケと直接結合する。

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

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

Axion-photon coupling

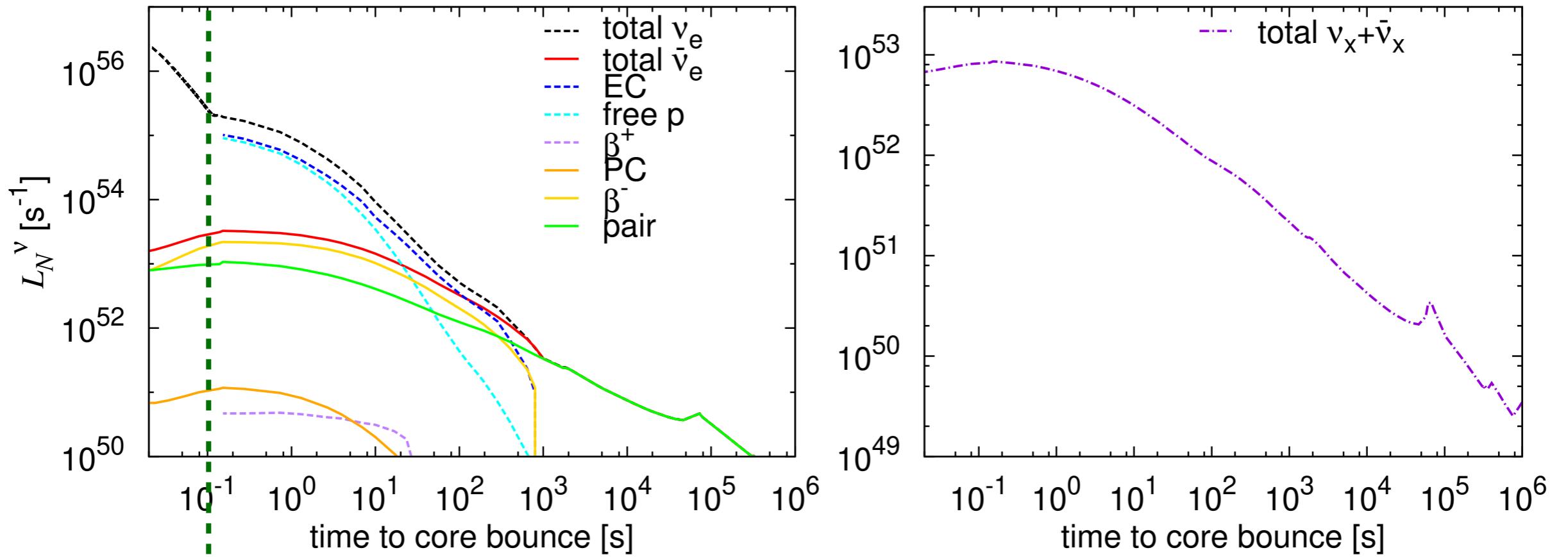
アクション・光子相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \quad g_{a\gamma\gamma} \equiv \frac{C_{a\gamma\gamma}}{f_a}$$

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_a} \left[\frac{E}{N} - \frac{2}{3} \frac{4m_d + m_u}{m_u + m_d} \right] \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} \left[\frac{E}{N} - 2.0 \right]$$

- KSVZ 模型: $E/N = 0$.
- DFSZ 模型: $E/N = 8/3$.

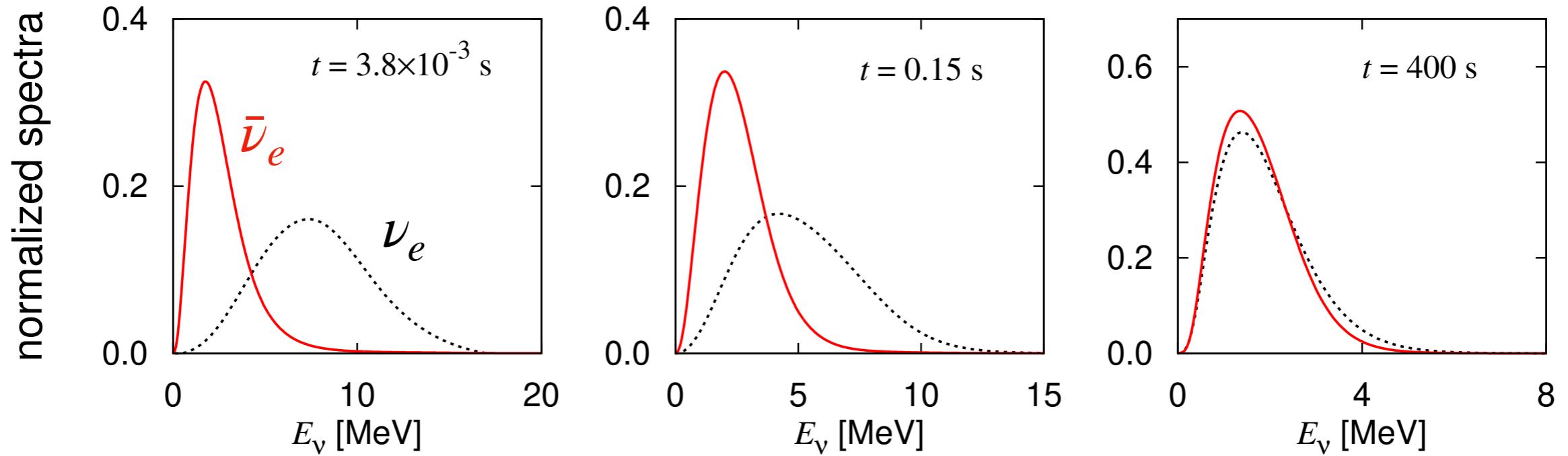
Luminosity



重力崩壊

K. Ishidohiro, C. Kato, T. Yoshida, arXiv:2006.02519.

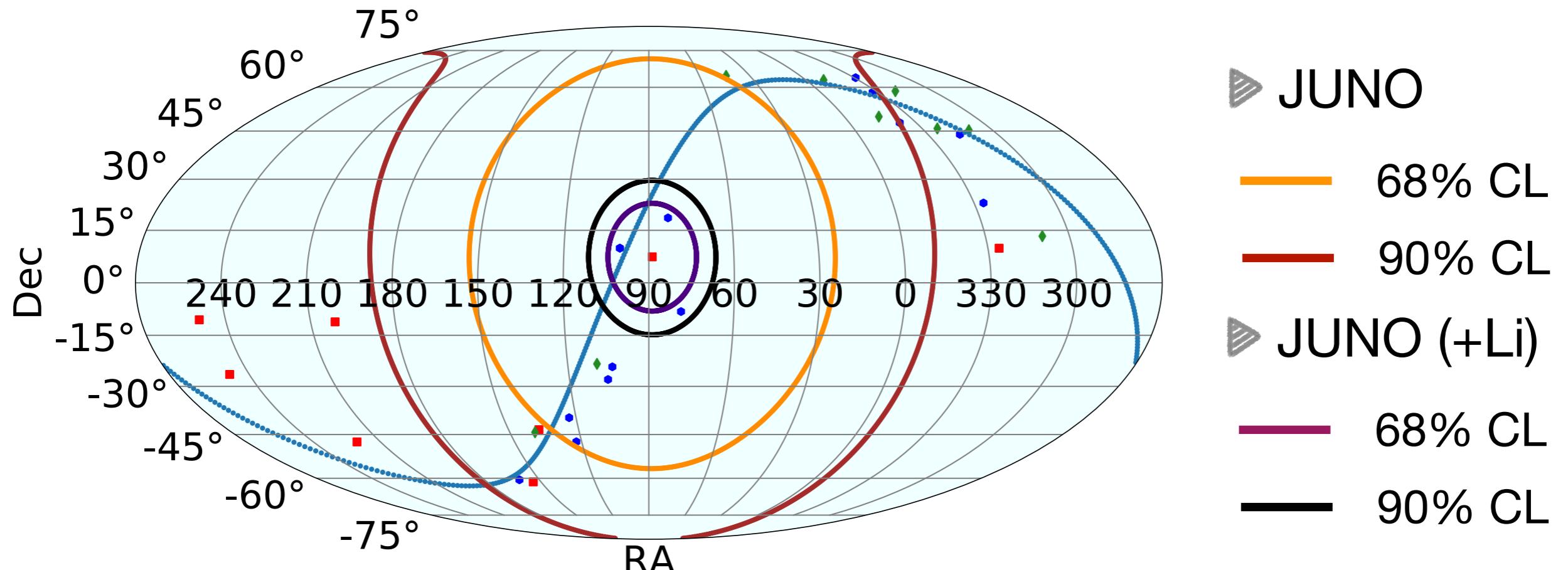
Energy spectrum



K. Ishidoshiro, C. Kato, T. Yoshida, arXiv:2006.02519.

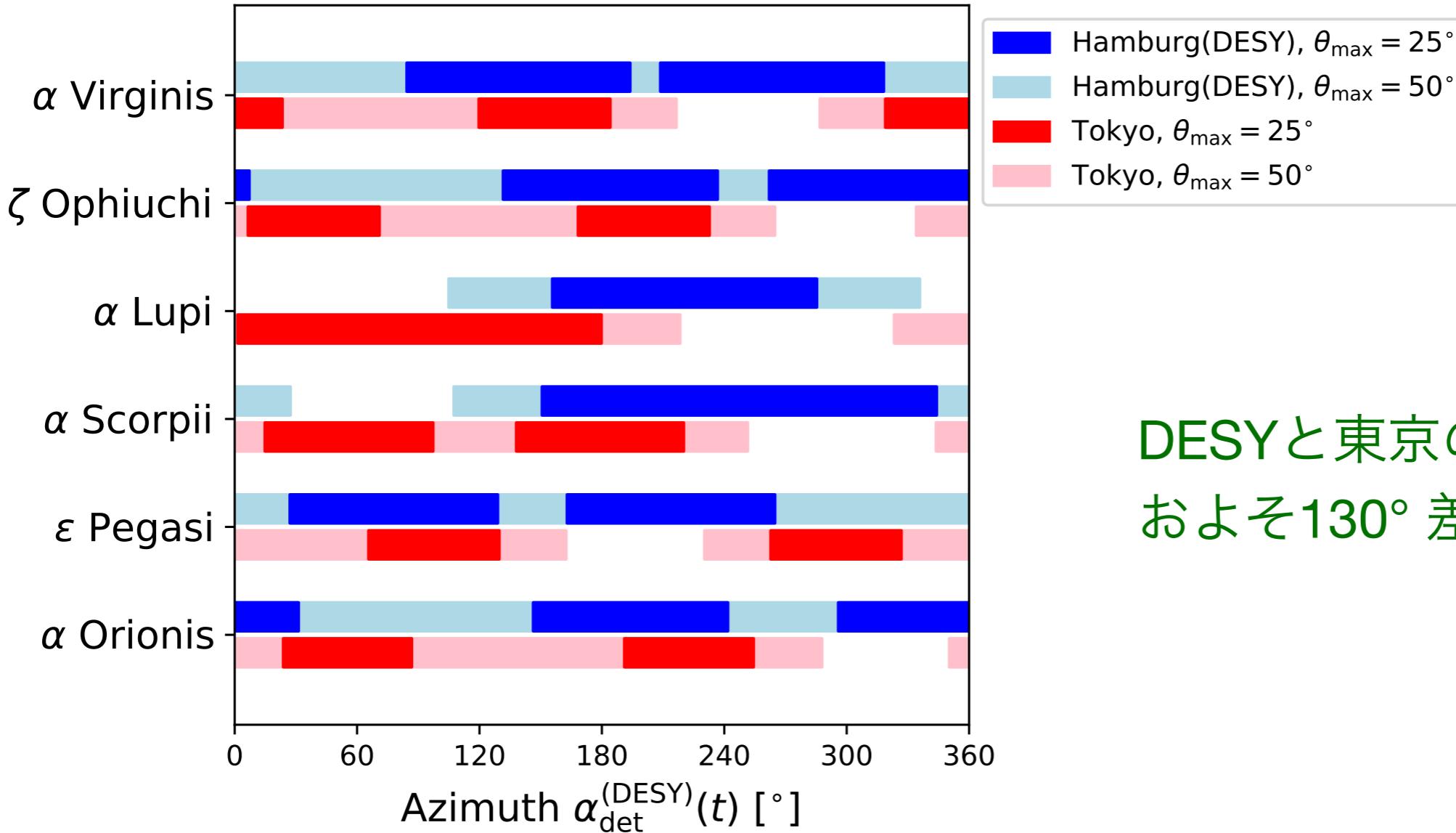
Pre-supernova neutrinos

方向角決定精度 (ベテルギウス; 1時間前)



M. Mukhopadhyay, et.al., APJ 899, 2, 153 (2020).

Observable time



DESYと東京の経度は
およそ 130° 差。

異なる地点に検出器をおくか、 θ_{max} を大きくすることで観測可能時間を100%にできる。

Axion emission rate

重力崩壊後およそ10秒間でアクシオンは大量に生成される。

制動放射



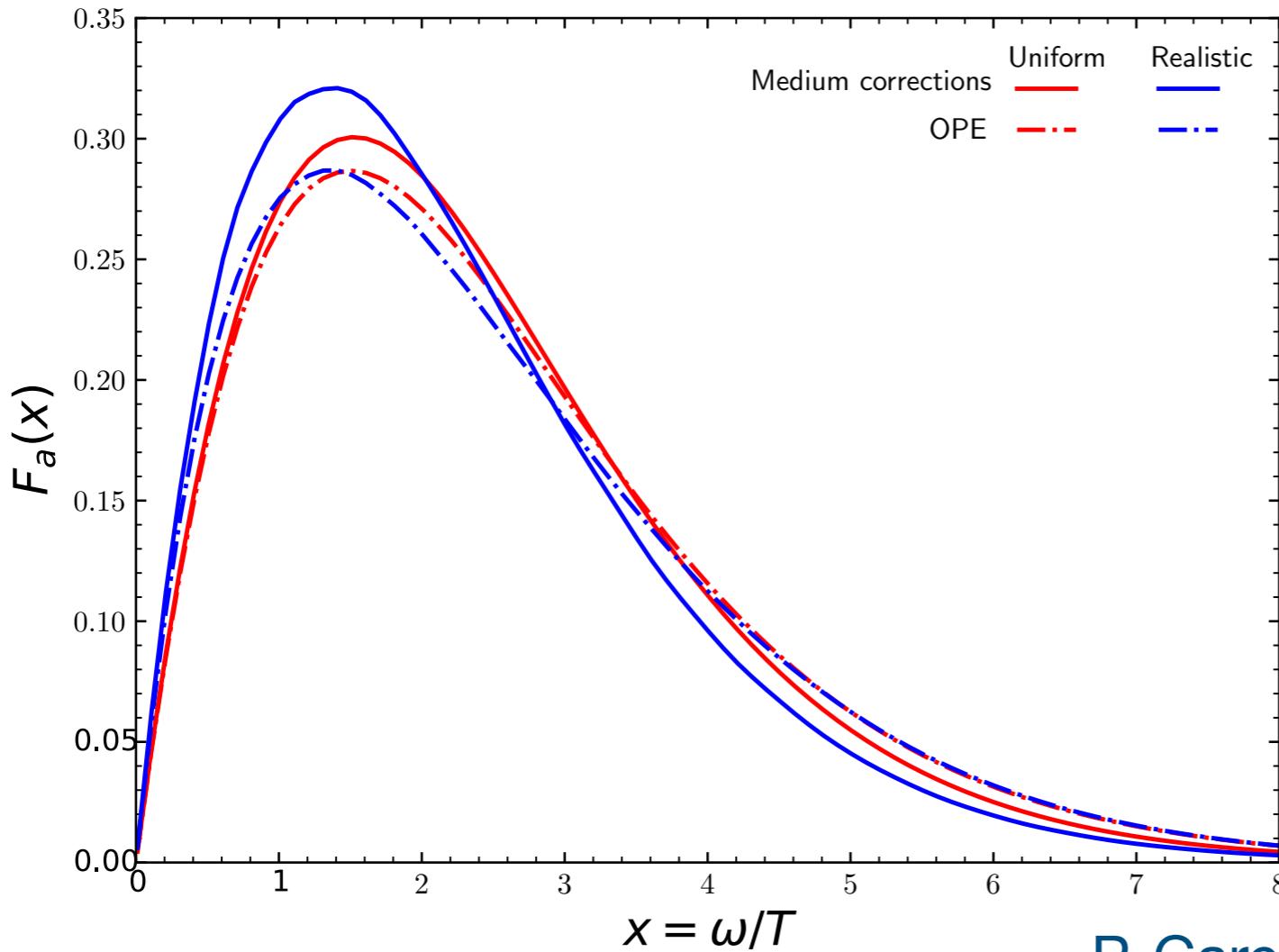
アクシオン放出率は,

$$\dot{N}_a \simeq 2.2 \times 10^{74} \text{ s}^{-1} \times \left(\frac{m_N}{f_a} \right)^2 C_{N,\text{eff}}^2$$

ただし,

$$C_{N,\text{eff}}^2 \equiv C_n^2 + 0.61C_p^2 + 0.53C_nC_p$$

Axion spectrum



P. Carenza, et al., JCAP **1910**, 016 (2019).

$$\langle \omega \rangle \simeq 2.3T$$

$$T \simeq 30 \text{ MeV}$$

Axion conversion rate

検出器内部でのアクシオン・光子遷移率:

$$P(a \rightarrow \gamma) = \frac{1}{4} (g_{a\gamma\gamma} BL)^2 \left(\frac{\sin(qL/2)}{qL/2} \right)^2$$

ただし

$$q = \frac{m_a^2}{2\omega_a}$$

m_a : アクシオン質量 ω_a : エネルギー

$$qL \ll 1$$



$$P(a \rightarrow \gamma) \simeq \frac{1}{4} (g_{a\gamma\gamma} BL)^2$$

$\propto L^2$ (干渉性)



$$m_a \lesssim \sqrt{\frac{2\omega_a}{L}}$$

Number of events

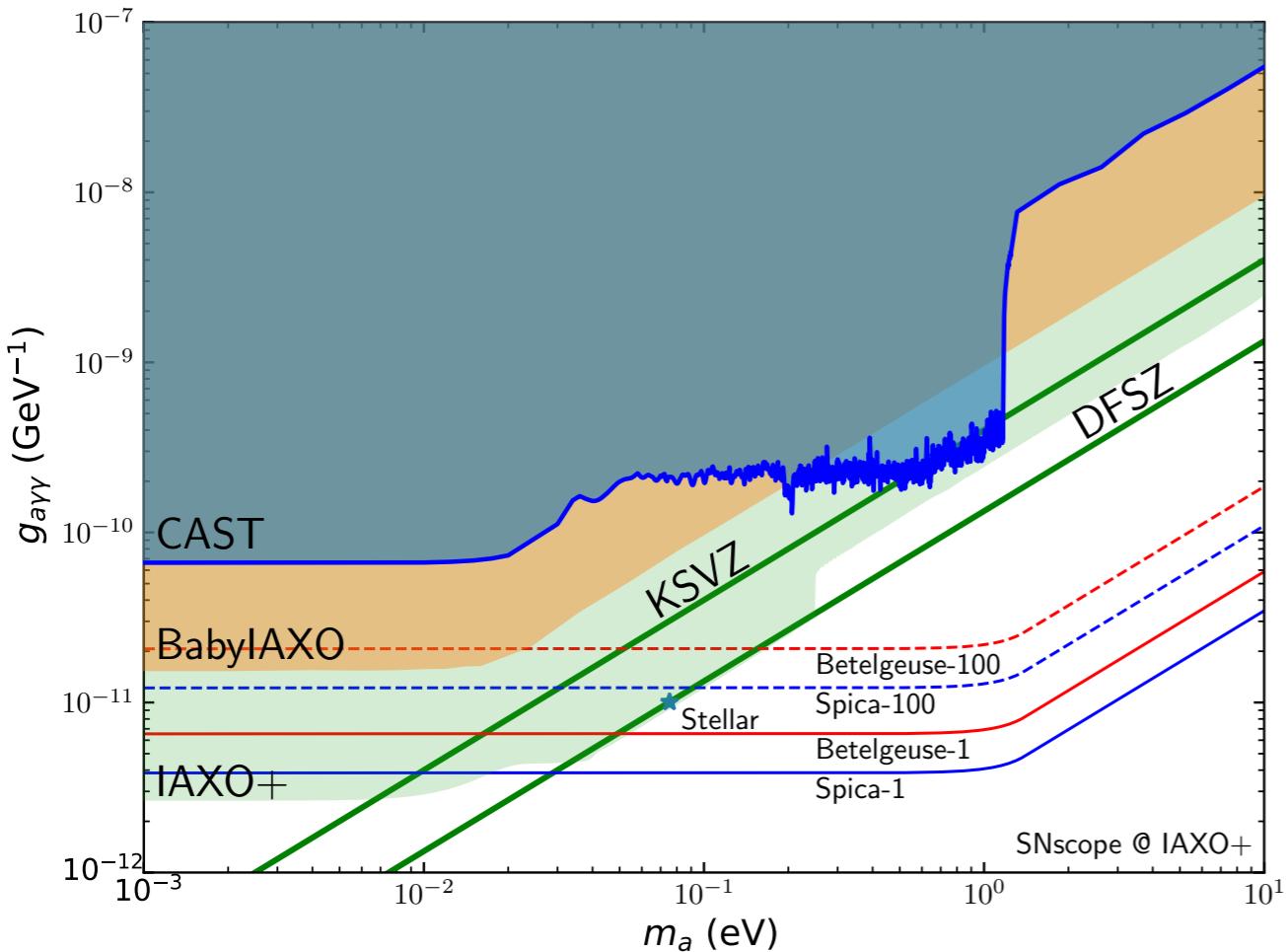
$$N \simeq P(a \rightarrow \gamma) \dot{N}_a \frac{A}{4\pi d^2} \Delta t$$
$$\simeq 1.0 \times \left(\frac{A}{2.3 \text{ m}^2} \right) \left(\frac{B}{2.5 \text{ T}} \right)^2 \left(\frac{L}{20 \text{ m}} \right)^2 \times \left(\frac{150 \text{ pc}}{d} \right)^2 \left(\frac{T}{30 \text{ MeV}} \right)^{5/2} \left(\frac{\Delta t}{10 \text{ s}} \right)$$
$$\times \left(\frac{C_{a\gamma\gamma}}{0.0023} \right)^2 \left(\frac{3 \times 10^8 \text{ GeV}}{f_a} \right)^4 \left(\frac{C_{N,\text{eff}}}{0.37} \right)^2 ,$$

$$(m_a \ll \sqrt{2\omega_a/L})$$

A: 断面積

d: 超新星までの距離

Event number (IAXO+)



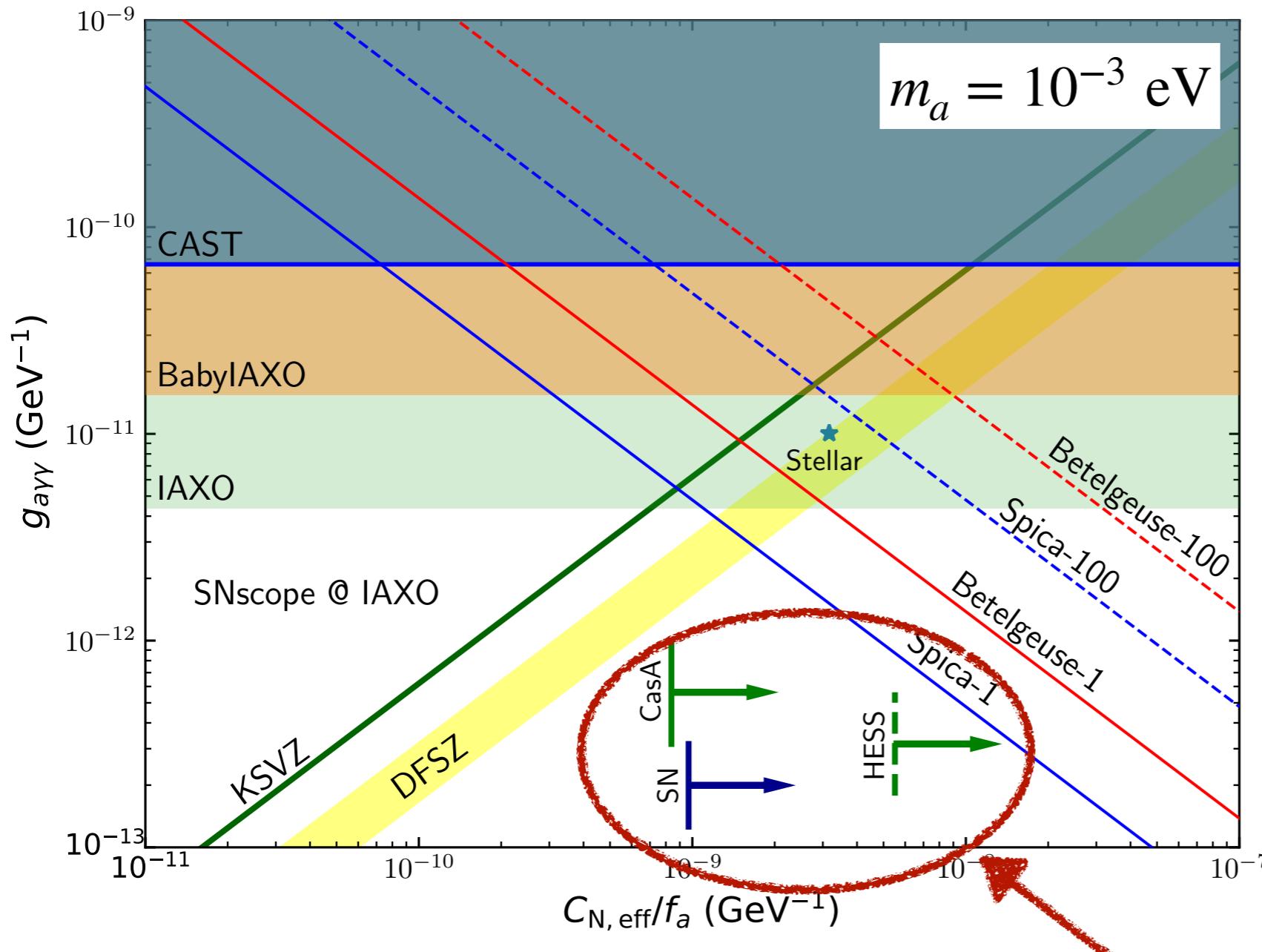
$$g_{a\gamma\gamma} \equiv \frac{C_{a\gamma\gamma}}{f_a}$$

イベント数の見積もり

相互作用の係数はKSVZ模型に固定

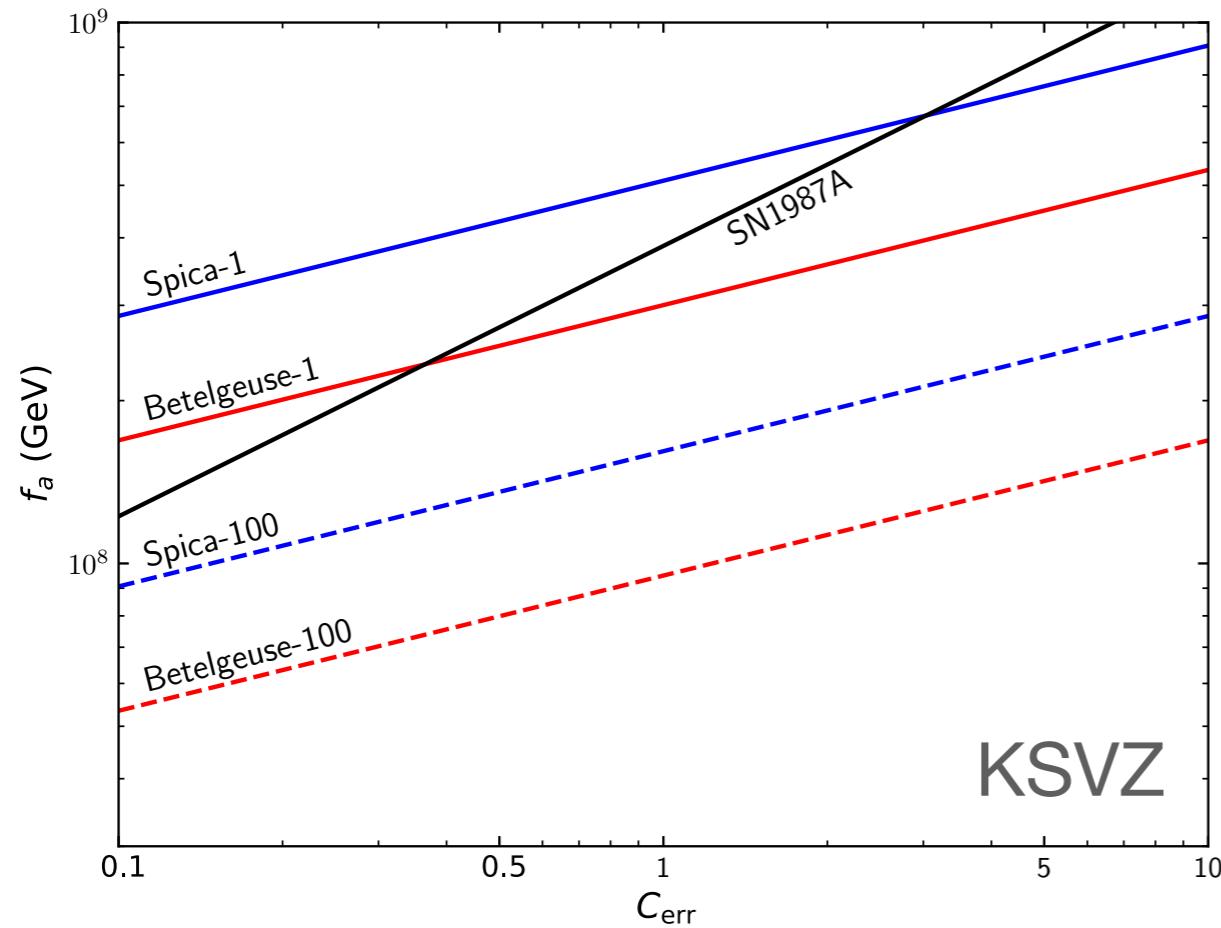
ただし、アクション質量は独立なパラメーターとした。

Event number



既存の制限 (KSVZ)

Event number vs SN1987A limit



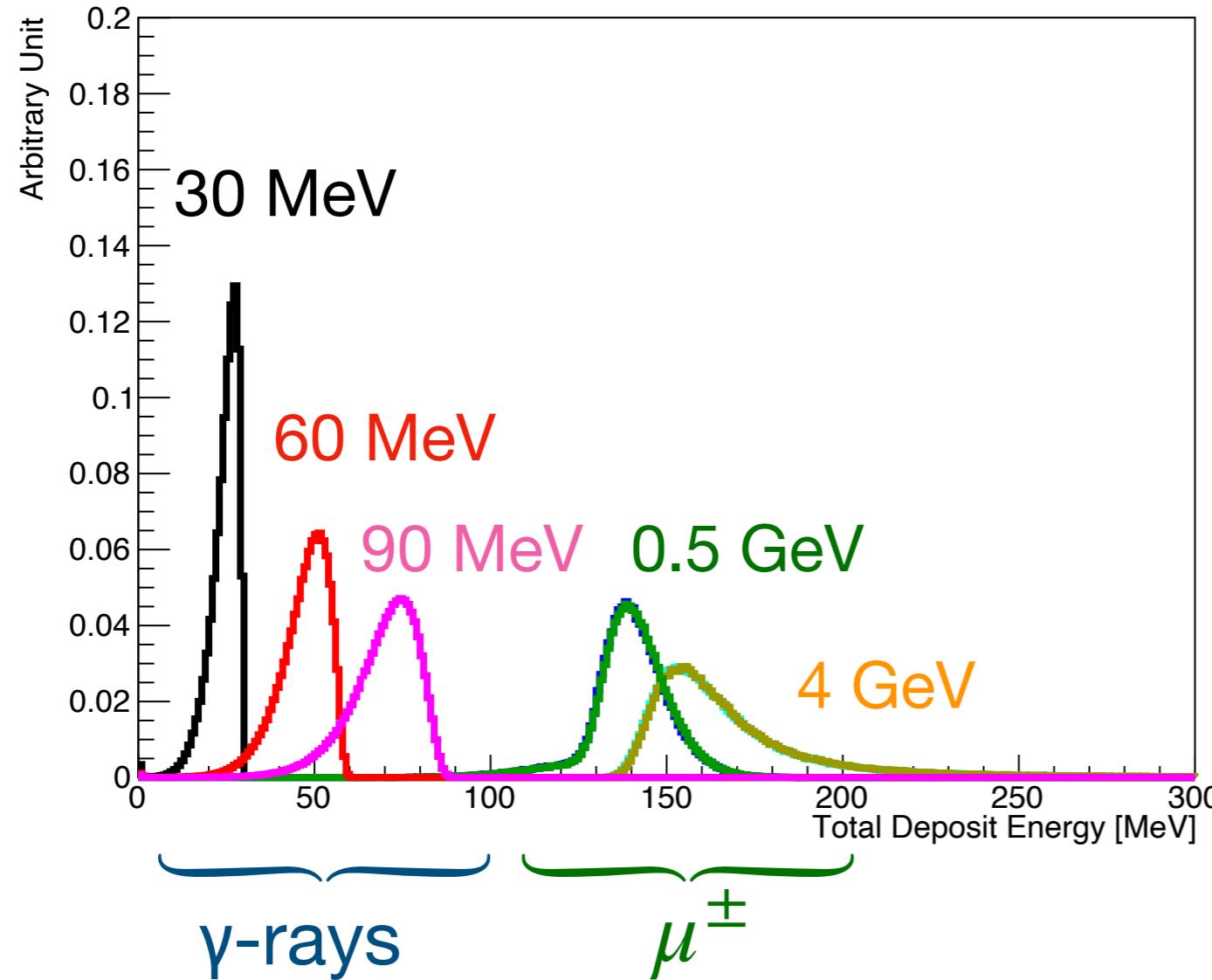
アクション・フラックスの不定性を
でパラメーター付けした。

$$C_{\text{err}} \equiv \frac{\dot{N}_{\text{true}}}{\dot{N}_{\text{calc}}}$$

\dot{N}_{true} : 真の値
 \dot{N}_{calc} : 計算値

- SN1987Aの制限, $f_a \propto C_{\text{err}}^{1/2}$
- イベント数, $f_a \propto C_{\text{err}}^{1/4}$

Total energy deposit



- 光子はエネルギーのほとんどを検出器内に落とす
- ミューオンは光子よりも多くのエネルギーを落とす