

# Probing non-standard neutrino interactions with a light boson from next galactic and diffuse supernova neutrinos

Kensuke Akita (IBS-CTPU)

in collaboration with

Sang Hui Im (IBS-CTPU) and Mehedi Masud (IBS-CTPU)

[arXiv:2206.06852](https://arxiv.org/abs/2206.06852)



基研研究会 素粒子物理学の進展 2022

2/22

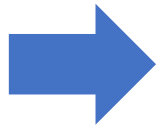
# Introduction

# Introduction

- ニュートリノ振動実験はニュートリノが小さな質量を持つことを明らかにした

$$\Delta m_{21}^2 \simeq (8.6 \text{ meV})^2 \quad |\Delta m_{31}^2| \simeq |\Delta m_{32}^2| \simeq (50 \text{ meV})^2$$

しかし他の既知の素粒子より極端に小さい質量の起源は不明...



ニュートリノは非自明な相互作用(新物理)を持つかもしれない

- 今回は(マヨラナ)ニュートリノとボソンとの相互作用を考える  $\phi$  :

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{\alpha\beta} \phi \bar{\nu}_\alpha \nu_\beta$$

\*スカラー場を考えるが、ベクトル場の場合も以降の反応率の計算のオーダーは同じ

# Introduction

- $\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  は自発的対称性の破れを伴う See-saw機構でニュートリノ質量を説明する Majoron model において実現される:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = y_1 \Phi \bar{N}^C N + y_2 \bar{L} \tilde{H} N + \text{h.c.}$$

Right-handed neutrinos
SM lepton doublet

Higgs
Majoron

$$\Phi = \frac{v_\chi + \chi + i\phi}{\sqrt{2}}$$

$\mathcal{L}_\phi = \phi \bar{\nu}_i (h_{ij} + i\lambda_{ij}\gamma^5) \nu_j + \text{h.c.} \quad (i, j = 1, \dots, 6)$

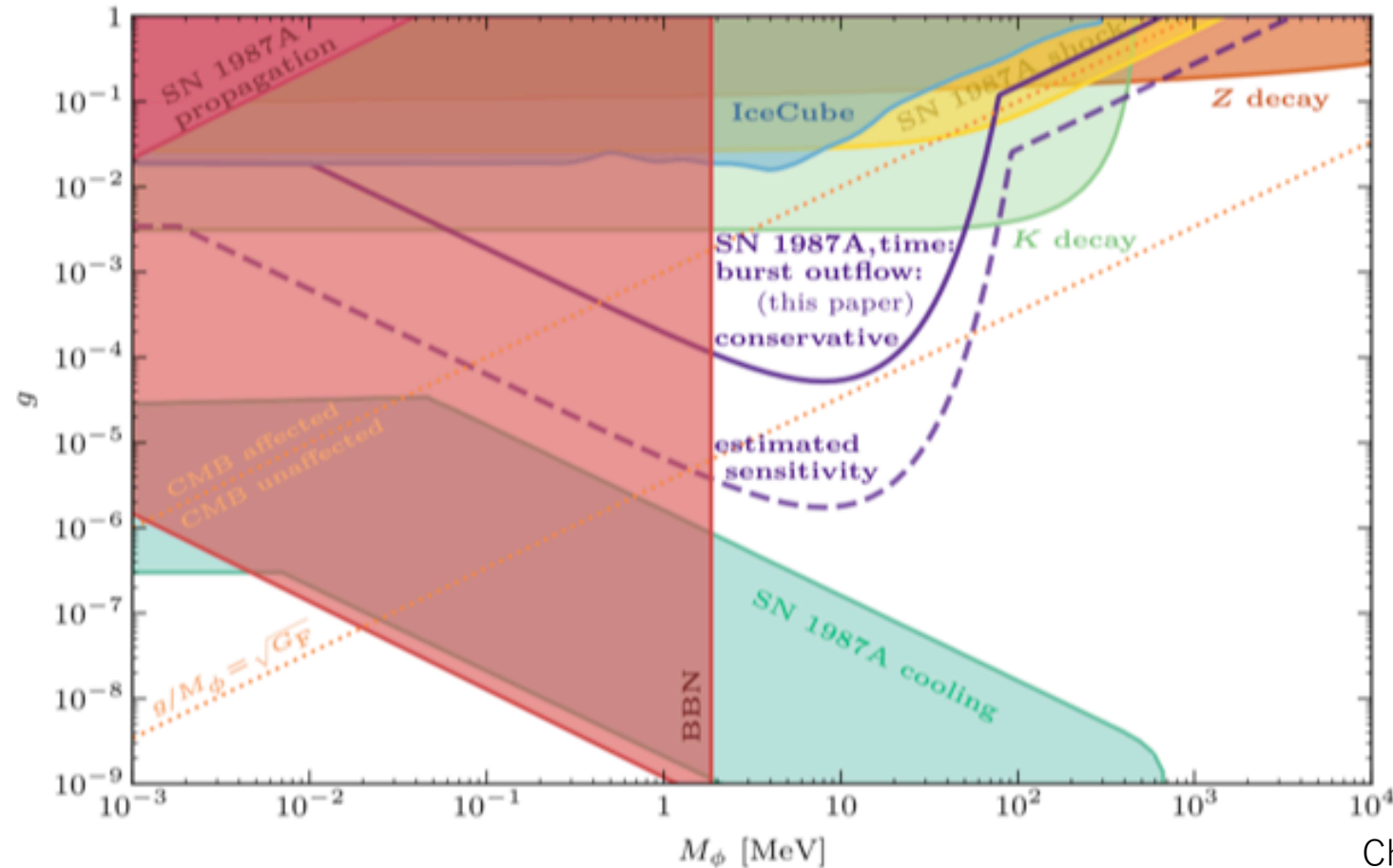
Diagonalizing the mass matrix

- このような相互作用は muon g-2 や Hubble tension などの anomaly を緩和するモデルにもしばしば登場する。 Baek et al. hep-ph/0104141      Escudero et al. 1901.02010

e.g.)  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$  model:  $L \supset g Z'_\alpha (\bar{\mu} \gamma^\alpha \mu + \bar{\nu}_\mu \gamma^\alpha P_L \nu_\mu - \bar{\tau} \gamma^\alpha \tau - \bar{\nu}_\tau \gamma^\alpha P_L \nu_\tau)$

このような相互作用のシグナルを観測することが可能か?

# Current constraints on $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$ ( $g_{\alpha\beta} \sim g$ )



- 多くの実験・観測が  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  に制限を課しているが信頼できるシグナルはなし...
- 将来の超新星ニュートリノの観測から  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  の感度を向上させることは可能か?

6/22

# Supernovae (SNe)

- コア崩壊型超新星爆発: 星の最後の状態の一つ,  
 $\mathcal{O}(10^{58})$  neutrinos and anti-neutrinosを放出  
→ニュートリノの性質をテストできるかもしれない

- 一年間で数百個の超新星爆発を観測している  
→ 一つの銀河あたりで100年に1,2個の超新星爆発を観測.

- 天の川銀河における超新星爆発が起こる地球までの平均的な距離: 10 kpc.

Mirizzi et al. astro-ph/0604300

近い将来、天の川銀河内で超新星爆発が起こるかもしれない



before

after

SN 1987A

Rozwadowska et al. 2009.03438

# Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)

- 超新星背景ニュートリノは過去の全ての超新星爆発の重ね合わせ
- 将来の超新星爆発と異なり爆発を待つ必要がない
- そのFluxは非常に小さくまだ観測されていないが、次世代ニュートリノ検出機 (Super/Hyper-Kamiokande with Gadolinium, JUNO, DUNE)での検出が期待されている。

$$\text{DSNB flux: } \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu} = c \int R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu}{dE'_\nu}(E'_\nu)(1+z) \left| \frac{dt}{dz} \right| dz \quad E'_\nu = E_\nu(1+z)$$

SN rate
Mean neutrino flux per one SN
redshift

天の川銀河内由来の超新星ニュートリノと超新星背景ニュートリノから  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  への Sensitivity を改善することは可能か？

8/22

# Outline

- Introduction
- Modifications of supernova neutrino flux by  $\phi \rightarrow \nu\nu$
- Discovery potential of neutrino experiments
- Conclusion
- Future work



# Modifications of SN neutrino flux by $\phi \rightarrow \nu\nu$

- 軽いボソンが超新星コアで  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  相互作用を通じて生成  
高密度領域

$$\nu\nu \rightarrow \phi$$

- $\phi$  が再びニュートリノに崩壊

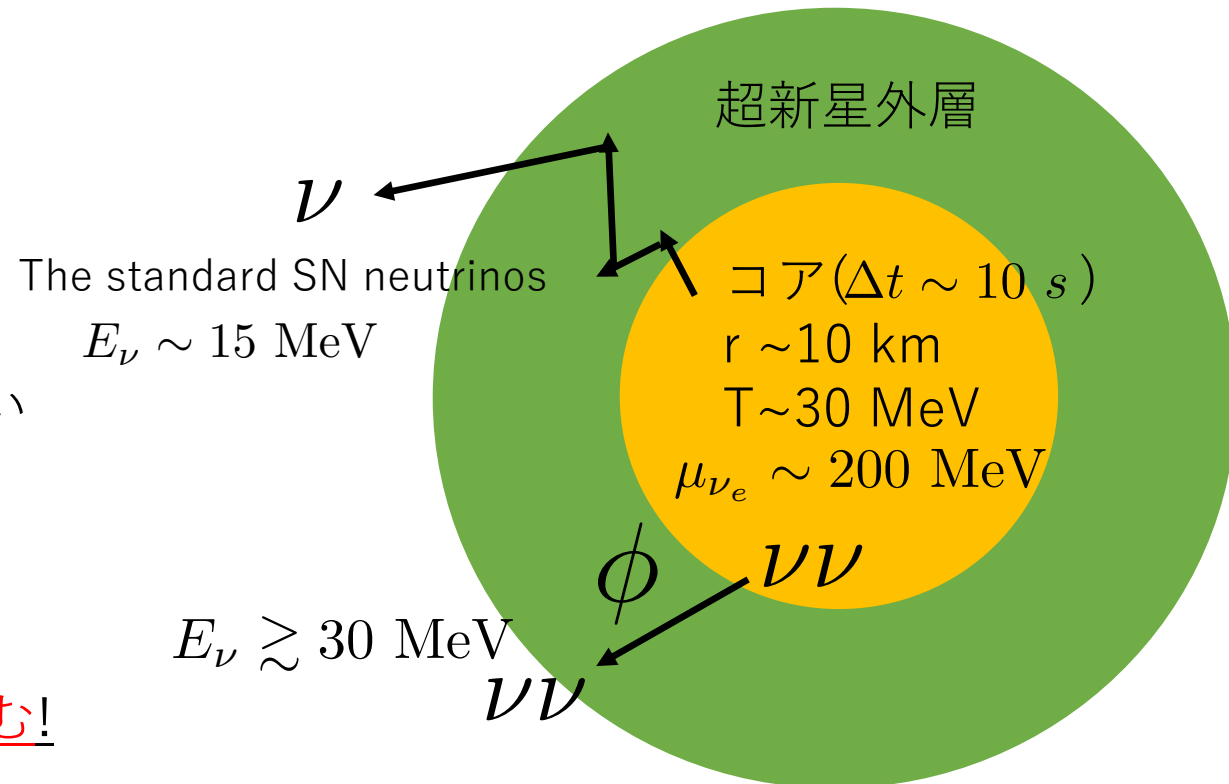
$$\phi \rightarrow \nu\nu$$

- 寿命(飛距離)が長ければ低密度領域で生成されたニュートリノはthermalizeされない

高エネルギーのニュートリノが生成

$$E_{\nu_\alpha} \sim T \text{ or } m_\phi \text{ or } \mu_{\nu_e}$$

➡ SN neutrino fluxの高エネルギー側が歪む!



# Production rate for $\phi$ in the SN core: $\nu\nu \rightarrow \phi$

- The emission rate of the number of  $\phi$  per volume in the core (the Boltzmann eq.):

$$\frac{dn_\phi}{dt} = \sum_\nu \int d\Pi_\phi d\Pi_1 d\Pi_2 S |\mathcal{M}|_{\nu\nu \rightarrow \phi}^2 (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - p_\phi) f_\nu(p_1) f_\nu(p_2)$$

Phase space

- The core during  $\Delta t \sim 10$  s Borrow et al. 1986

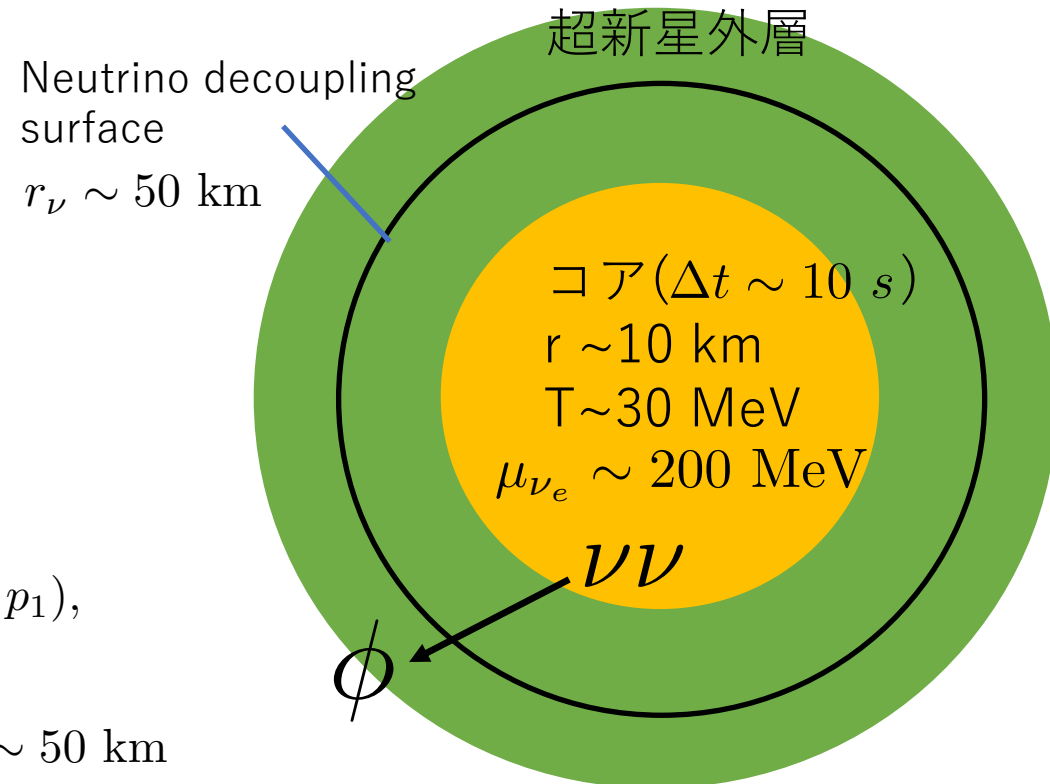
$$r \sim 10 \text{ km}, T \sim 30 \text{ MeV}$$

$$f_\nu = \frac{1}{e^{\frac{p_\nu - \mu_\nu}{T}} + 1} \quad \begin{array}{l} \mu_{\nu_e} \sim -\mu_{\bar{\nu}_e} \sim 200 \text{ MeV} \\ \mu_{\nu_x} \sim 0 \end{array}$$

- Total emission number per energy in the core:

$$\frac{dN_\phi}{dE_\phi} = V \Delta t \sum_\nu \frac{g^2 m_\phi^2}{64\pi^3} \underbrace{e^{-\Gamma_\phi r_\nu / \gamma}}_{\text{Survival probability outside } r_\nu \sim 50 \text{ km}} \int_{p_1^{\min}}^{p_1^{\max}} dp_1 f_\nu(p_1) f_\nu(E_\phi - p_1),$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r_c^3$$



11/22

# Subsequent decay $\phi \rightarrow \nu\nu$

- After the emission of  $\phi$ , their decays produce neutrino flux:

$$\frac{dN_{\nu\alpha}}{dt dE_\nu} = \int d\cos\theta \int dE_\phi \underbrace{\frac{1}{3\tau} \exp\left[-\frac{\gamma(1+\beta\cos\theta)t}{\tau}\right]}_{\text{Production rate per time}} \underbrace{\frac{dN_\phi(0, E_\phi)}{dE_\phi}}_{\phi \text{ flux}} \underbrace{f_{\nu\alpha}\left(\frac{E_\nu}{\gamma(1+\beta\cos\theta)}, \cos\theta\right)}_{\text{Distribution probability of emitted energy and angle}}.$$

Lorentz factors

Emitted angle at the rest frame of  $\phi$

$$f_{\nu\alpha}(\omega_\nu, \cos\theta) = \frac{1}{2} \delta\left(\omega_\nu - \frac{m_\phi}{2}\right).$$

Neutrino energy at the rest frame of  $\phi$

$$E_\nu = \gamma(1 + \beta \cos\theta)\omega_\nu$$

Neutrino energy at the observer frame

12/22

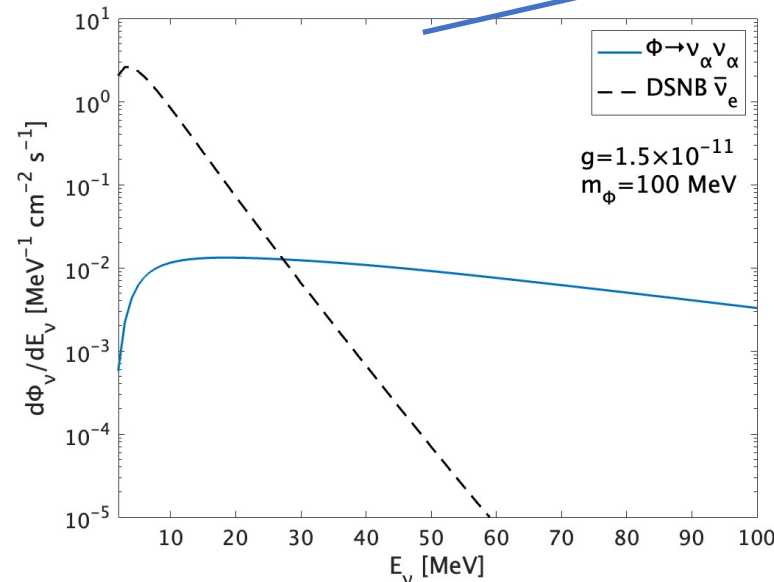
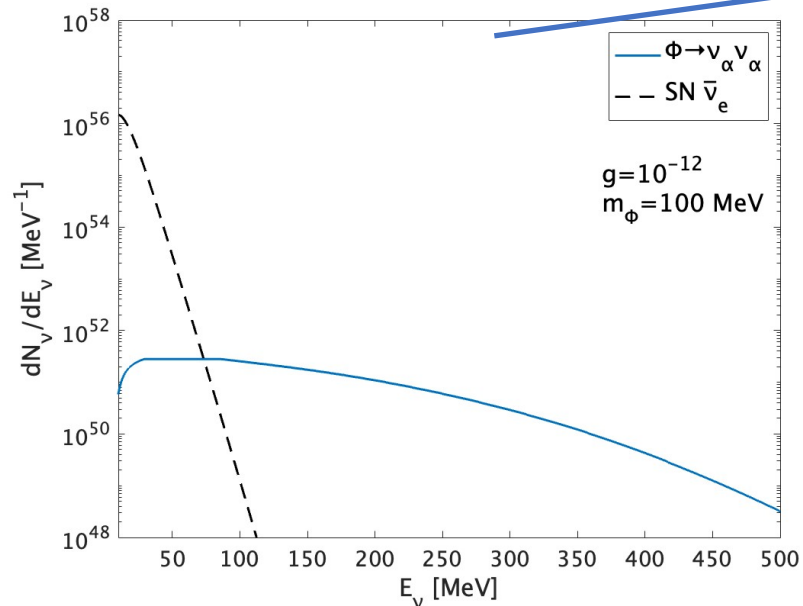
# Neutrino flux from $\phi \rightarrow \nu\nu$

- 簡単のため flavor に依存しない以下の相互作用を考える

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{\alpha\beta} \phi \bar{\nu}_\alpha \nu_\beta$$

$g_{ee} = g_{\mu\mu} = g_{\tau\tau} = g$  and the others are zeros

- Neutrino fluxes by  $\phi \rightarrow \nu\nu$  from a next galactic SN and all the past SNe



ニュートリノフラックスの  
高エネルギー側がenhance  
される

# Outline

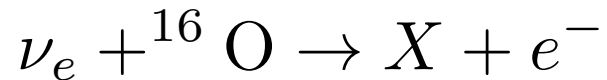
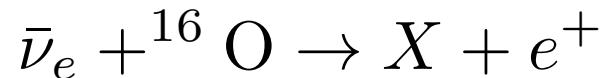
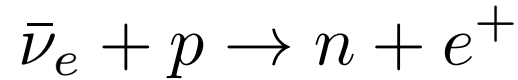
- Introduction
- Modifications of supernova neutrino flux by  $\phi \rightarrow \nu\nu$
- Discovery potential of neutrino experiments
- Conclusion
- Future work

Next galactic supernova neutrinos  
with  $d_{\text{SN}} = 10 \text{ kpc}$

The distance between the Earth and a supernova

# Event rate for Super-Kamiokande (SK)

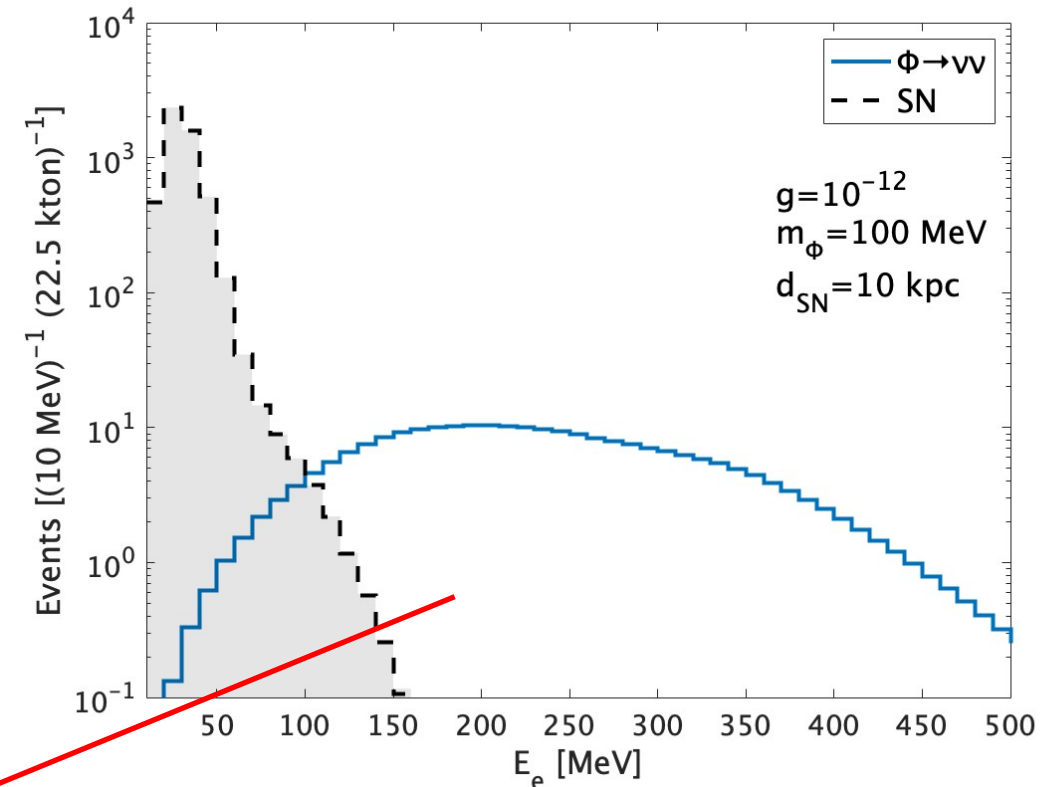
- SKにおける主要な検出過程:



$\nu_\mu$  イベントなどは簡単のため/保守的な評価のため無視

$m_\phi = 100 \text{ MeV}, g = 10^{-12}$  の場合(右図)、

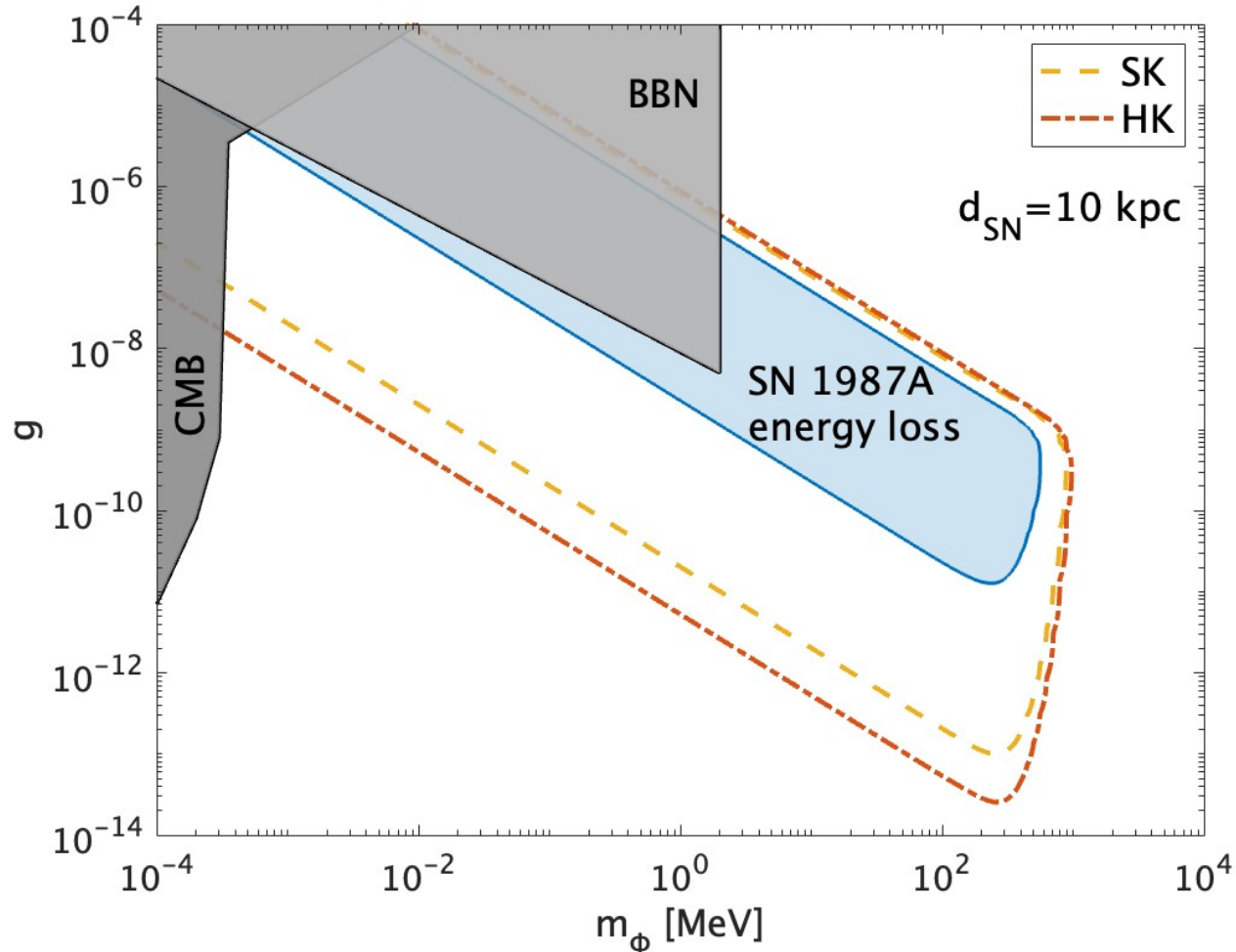
100イベント以上がBGと区別して検出可能



高エネルギー領域では散乱断面積が大きくなるので、  
Event rateはさらにenhanceされる

Next galactic supernova neutrinos

# Discovery potential of SK (22.5 kton) and HK (374 kton)



$g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  のsensitivityは  
keV~sub-GeV領域で数桁改善できる!

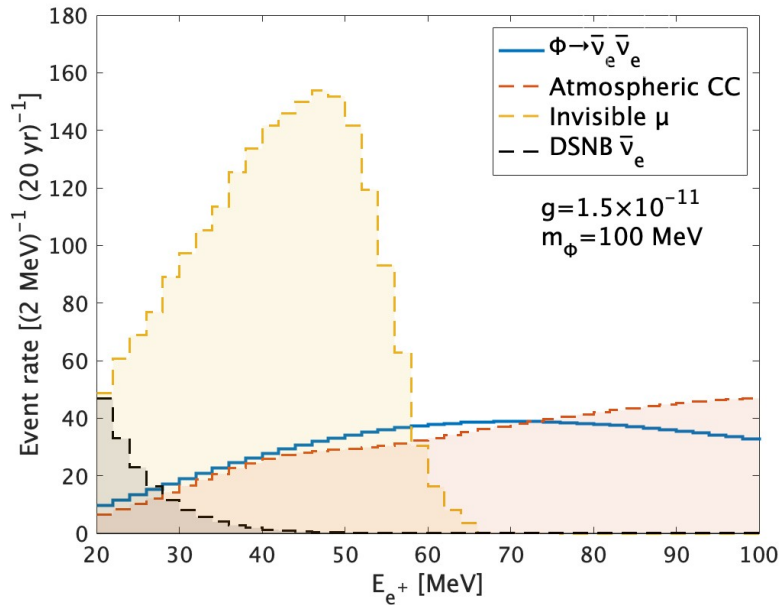
主な改善の理由:

- SK/HKはKamiokandeと比べて巨大なDetector
- 高エネルギー領域のfluxのenhancementを見ており、より大きな散乱断面積で反応
- 高エネルギー領域をみているので、standard SN neutrinoのとの区別が容易  
(BGとそのsystematic/theoretical uncertaintyをあまり考えなくて良い)

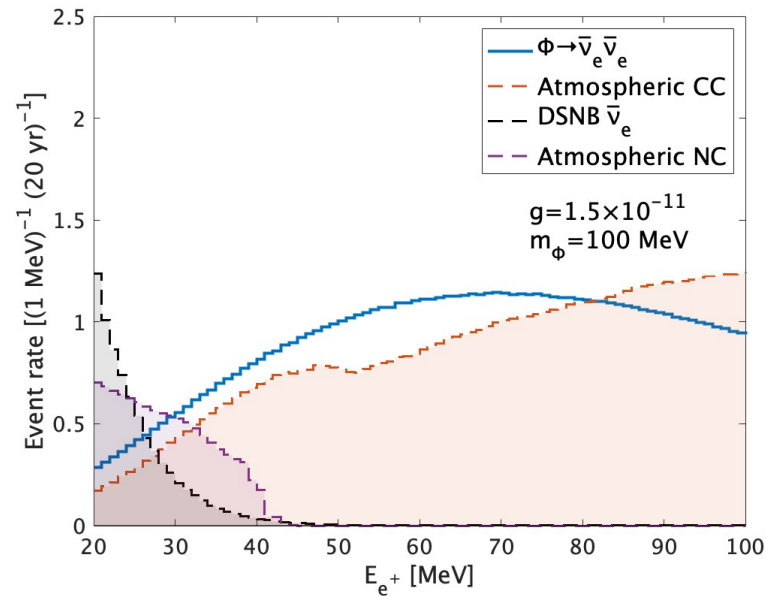


Neutrinos from all the past SNe

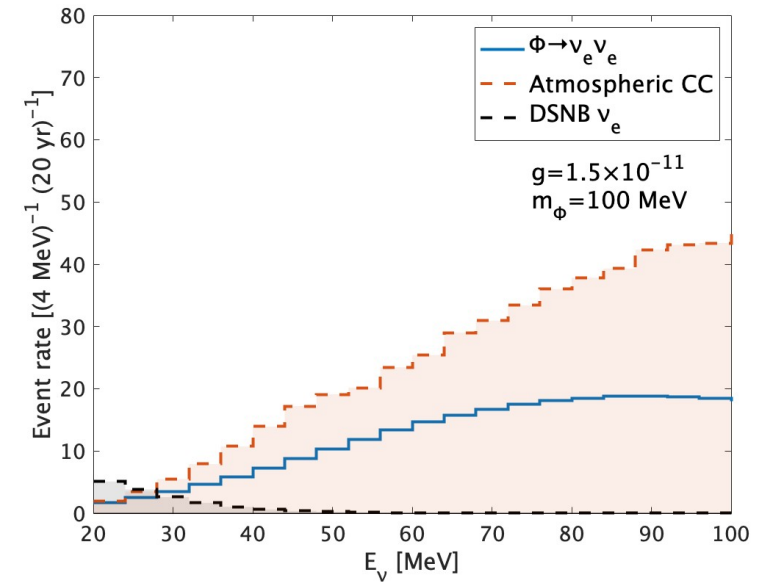
# Event rate for HK with Gd, JUNO and DUNE



HK with Gadolinium (Gd)



JUNO

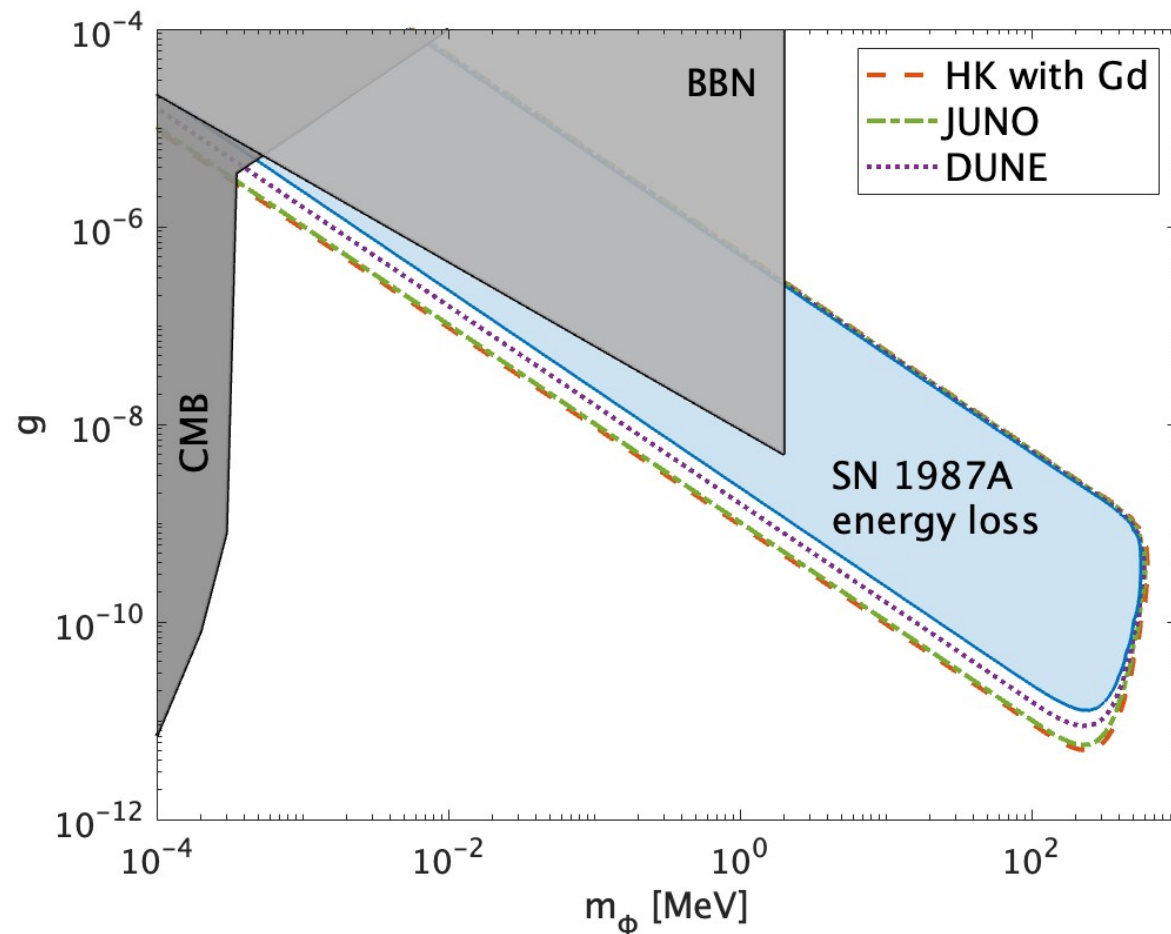


DUNE

We show event rates for 20 years data-taking.

$g = 1.5 \times 10^{-11}$  and  $m_\phi = 100 \text{ MeV}$  is not excluded by the current observations.

# Discovery potential of HK with Gd, JUNO and DUNE



Discovery potential at 90 % C.L.

$g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  のsensitivityは  
 ファクター2程度改善できるだろう

しかし、私たちの計算は基本的に  
 オーダー評価のみなので、ファクター2以上  
 の不定性が含まれているかもしれない

# Outline

- Introduction
- Modifications of supernova neutrino flux by  $\phi \rightarrow \nu\nu$
- Discovery potential of neutrino experiments
- Conclusion
- Future work

# Conclusion

- $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  相互作用における軽いボソンは超新星コアで生成されうる

- この軽いボソンの生成後の崩壊はSN neutrino fluxを歪める

$$(g_{ee} = g_{\mu\mu} = g_{\tau\tau} = g)$$

- 天の川銀河内で超新星爆発が起きた場合、SK/HKは  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  の結合定数へのsensitivityをSN 1987Aからの制限と比べて、**数桁改善が可能**

$$(g_{ee} = g_{\mu\mu} = g_{\tau\tau} = g)$$

- HK, JUNOとDUNEにおける将来の超新星背景ニュートリノの観測は  $g_{\alpha\beta}\phi\bar{\nu}_\alpha\nu_\beta$  へのsensitivityはSN 1987Aからの制限と比べて**ファクター2程度**改善可能かもしれない

# Future work

## 1. Flavor依存した相互作用への制限 (e.g. $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ modelなど)

- 本研究ではFlavor-independentな相互作用を仮定 ( $g_{ee} = g_{\mu\mu} = g_{\tau\tau} = g$ )
- 上記はsimple/naturalな仮定であると共にニュートリノ振動を無視できる仮定
- Flavor依存した相互作用では、 $\phi \rightarrow \nu_\alpha \nu_\alpha$ で生成されるfluxにおいて**振動の考慮**が必要

## 2. Heavy neutral leptonへの応用

- 同様に  $\nu_4 \rightarrow \nu_\alpha \nu_\beta \bar{\nu}_\beta$  などのprocessからSN neutrino fluxが修正が期待される
  - コアで生成されたHeavy neutral lepton

- ただし、 $\nu_4 \rightarrow \nu_\alpha e^- e^+$  などのprocessも起こり、 $\gamma$ 線観測からも制限がついている  
Calore et al. 2112.08382
- これと比べて良い/相補的な制限が将来課せるかはわからない

Thank you!

Backup

# Dirac neutrino

- For Dirac neutrinos, we can consider the two types of the interaction Lagrangians:

Chang et al. 2206.12426

$$\mathcal{L}^1 = g_{\alpha\beta} \bar{\nu}_\alpha^c \nu_\beta \phi + \text{h.c.}, \quad L_\phi = 2$$

$$\mathcal{L}^2 = g_{\alpha\beta} \bar{\nu}_\alpha \nu_\beta \phi, \quad L_\phi = 0$$

Due to lepton number conservation,

- For the first type, the production process of  $\phi$  is  $\nu\nu \rightarrow \phi^*$  and  $\bar{\nu}\bar{\nu} \rightarrow \phi$ .  
→ We can apply the results of the Majorana neutrino case up to  $\mathcal{O}(1)$  factors.

- For the second type, the production process of  $\phi$  is  $\nu\bar{\nu} \rightarrow \phi$ .  $\nu_L\bar{\nu}_L$  OR  $\nu_R\bar{\nu}_R$

→ Due to helicity conservation, the above process is suppressed in the SN core  
(Future work).



# Analysis for a next galactic SN

- We introduce a cut-off energy  $E_{\text{cut}}$  as

Asai et al. 2203.01519

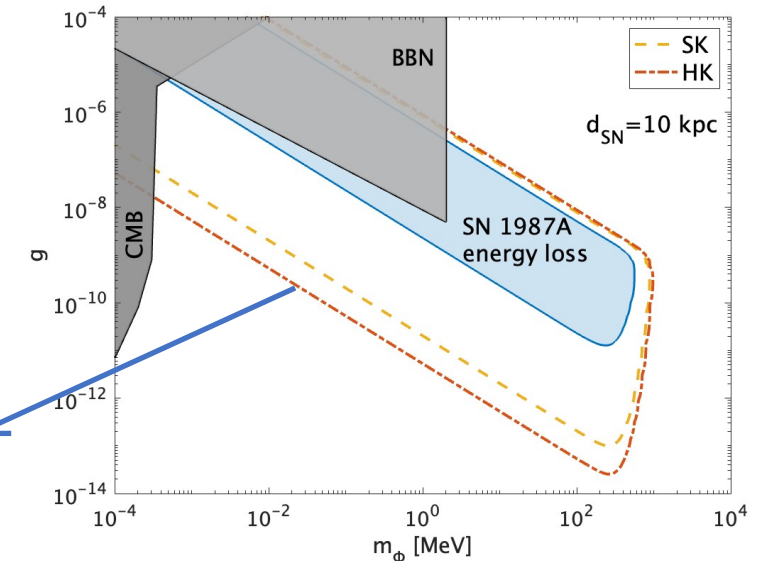
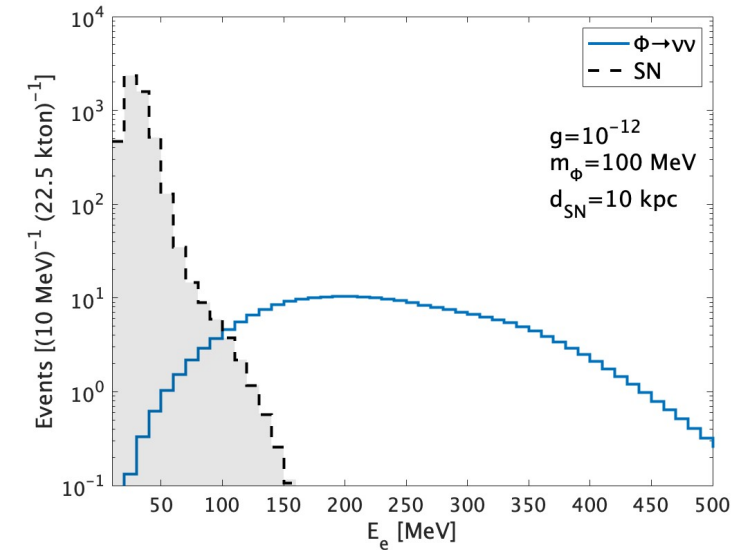
$$\int_{E_{\text{cut}}}^{\infty} dE_e \frac{d\tilde{N}^{\text{BG}}}{dE_e} = 1,$$

The standard SN neutrino event  
(black dashed line)

- We introduce the number of the signal:

$$N_{\text{signal}} = \int_{E_{\text{cut}}}^{\infty} dE_e \frac{d\tilde{N}}{dE_e}$$

- We regard  $N_{\text{signal}} = 9$  as 99.7% C.L. limit on the parameters



# Analysis for DSNB at HK

- We define a  $\chi^2$  function:

$$\chi^2 = \min_{a,b,c} \left[ -2 \sum_i \ln \frac{L_{0,i}}{L_{1,i}} + \frac{a^2}{\sigma_a^2} + \frac{b^2}{\sigma_b^2} \right]$$

$$L_{x,i} = \frac{\lambda_{x,i}^{k_i} \exp(-\lambda_{x,i})}{k_i!}$$

The number of event  
within an energy bin

$$\lambda_{0,i} = (1+b)N_{\text{BG},i}, \quad \lambda_{1,i} = k_i = (1+a)N_{\text{signal},i} + (1+b)N_{\text{BG},i}$$

$\sigma_a = 30\%$  : The uncertainty of the diffuse SN flux (mainly the SN rate)

$\sigma_b = 25\%$  : The uncertainty of the atmospheric neutrino BG

- We consider an energy range:  $60 \text{ MeV} < E_{e^+} < 100 \text{ MeV}$   
and an energy bin:  $\Delta_i = 2 \text{ MeV}$  at HK.

