

スーパーカミオカンデにおける SN2023ixf由来の超新星ニュートリノ探索

中西史美、小汐由介、池田一得^A、Guillaume Pronost^B、関谷洋之^A、
中畑雅行^A、他Super-Kamiokande Collaboration
岡山大理、東大宇宙線研^A、ILANCEラボ(CNRS-東大)^B

日本物理学会 2024年春季大会
2024年3月20日@オンライン

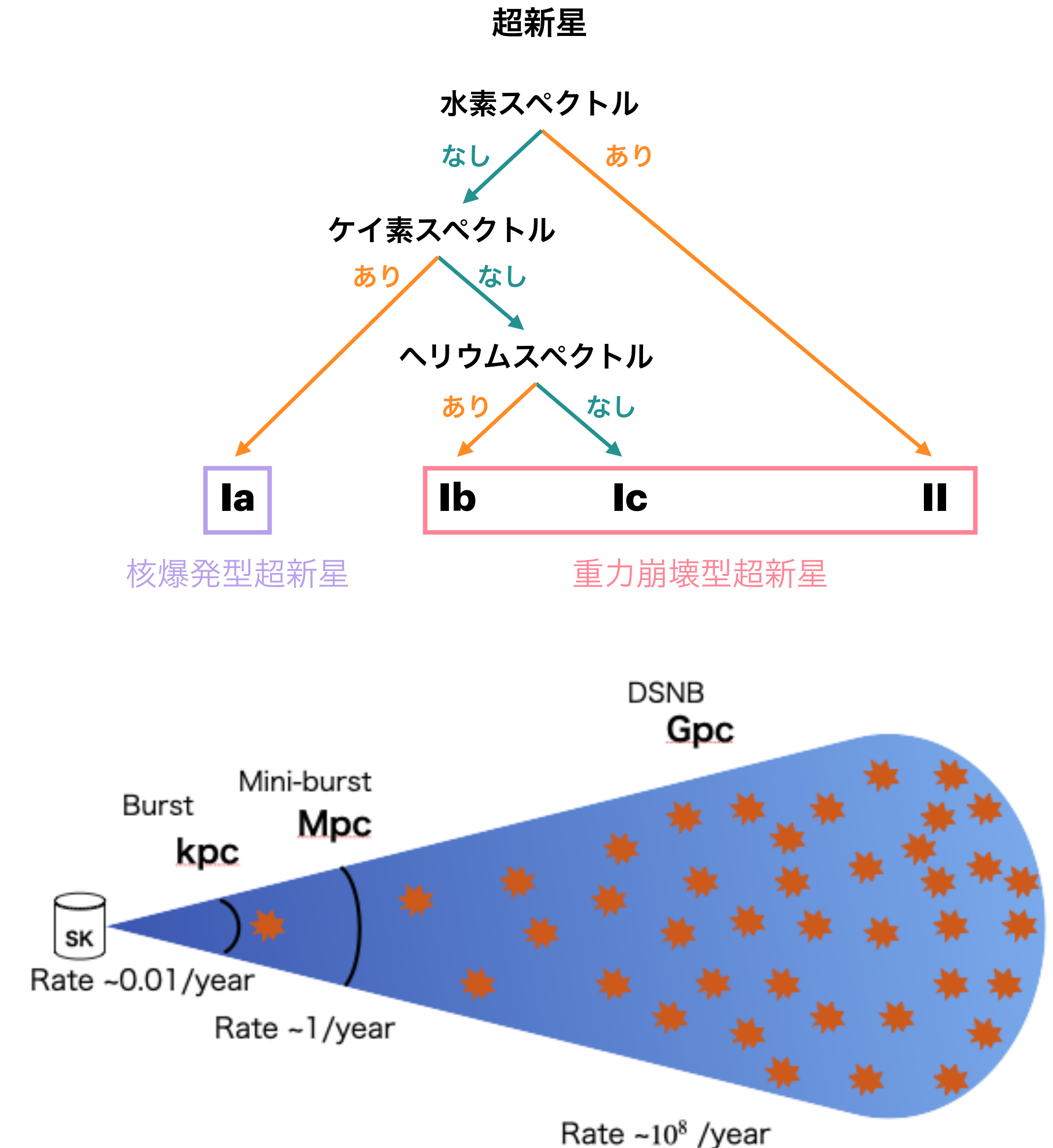
- イントロダクション
 - 超新星爆発と超新星頻度
 - スーパーカミオカンデ (SK)
 - SN2023ixf
- 解析手法と結果
 - クラスタ解析
 - 解析結果
- 今後の展望

超新星爆発

3

- $8M_{\odot}$ 以上の星が一生の最後に起こす爆発現象
- 爆発時にニュートリノを放出
→超新星ニュートリノ
- スペクトルにより複数の種類に分類
重力崩壊型超新星: ニュートリノ放出量が多い
- Mpc 領域の超新星爆発:
地球で観測される超新星ニュートリノ数が $\mathcal{O}(1)$
→“mini-burst”

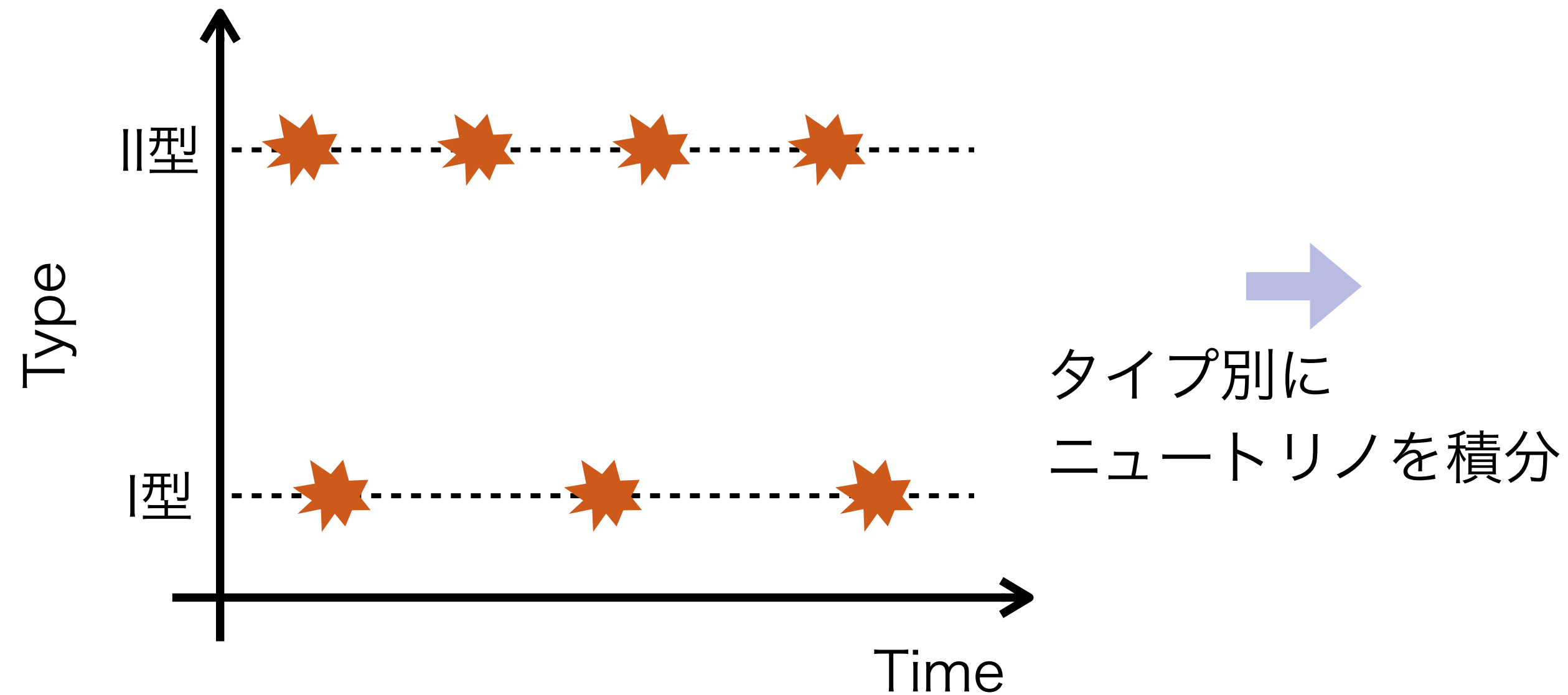
Phys.Rev.D83:123008,2011



mini-burstニュートリノ観測の利点

4

- 多数の超新星爆発の観測が可能



ニュートリノ平均エネルギーの違いなどから
爆発機構を探ることができる

- ニュートリノ加熱
- 回転・磁場駆動 etc..

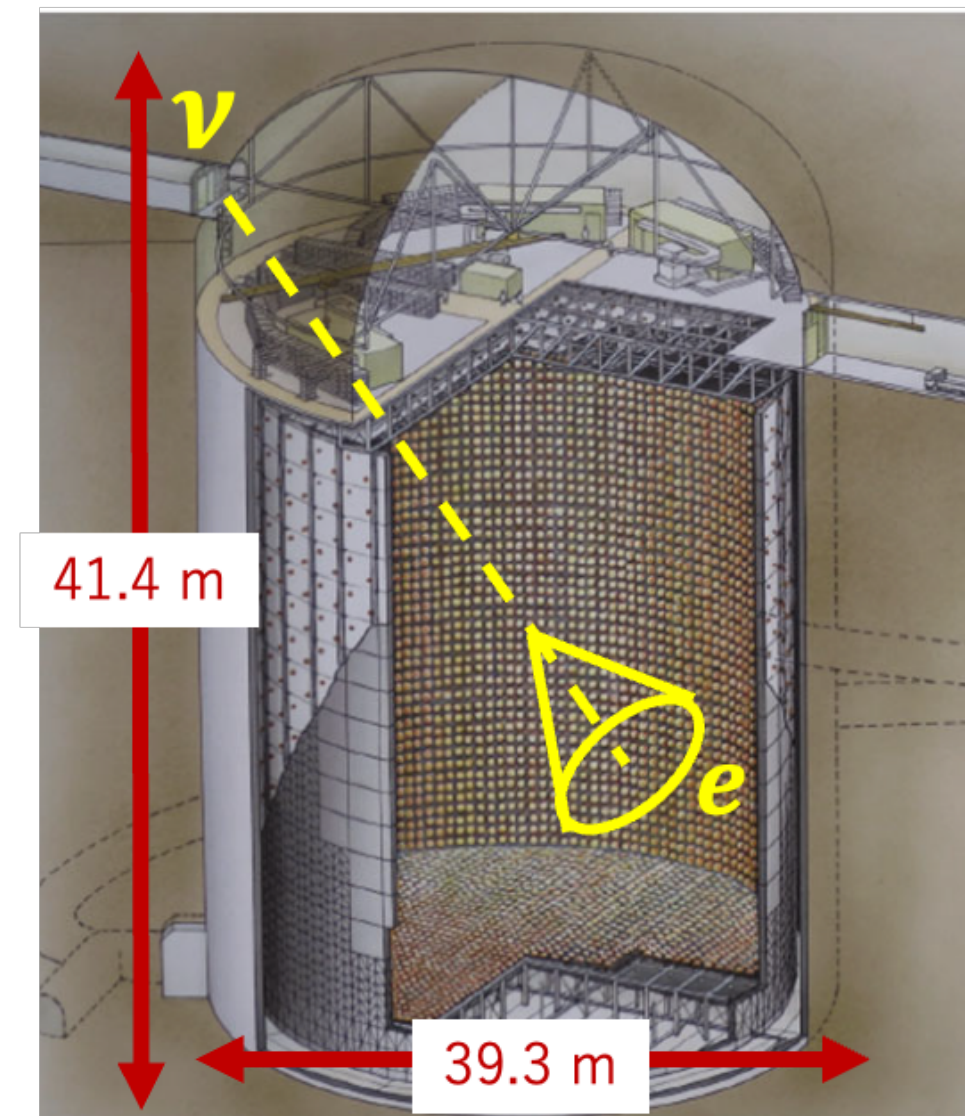
- 重力崩壊型超新星の証拠

- 光学観測では超新星爆発と断定できなかった天体由来のニュートリノを発見
→ 重力崩壊型超新星と断定することができる

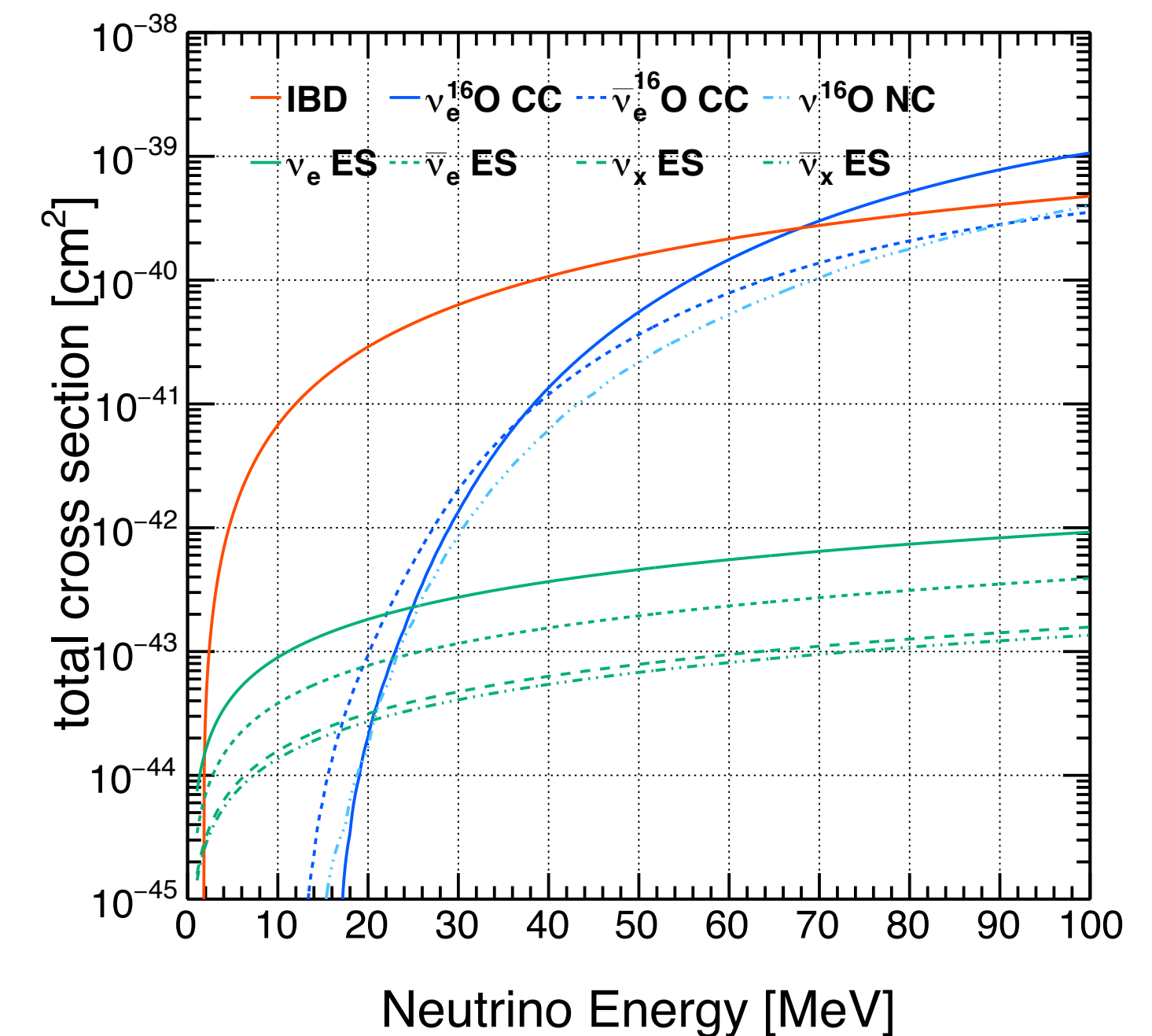
スーパーカミオカンデ (SK)

5

- 大型水チェレンコフ検出器
- 荷電粒子からのチェレンコフ光を観測



[1]Y. Suzuki, *Eur. Phys. J. C*, Vol. 79, No. 4, (2019)

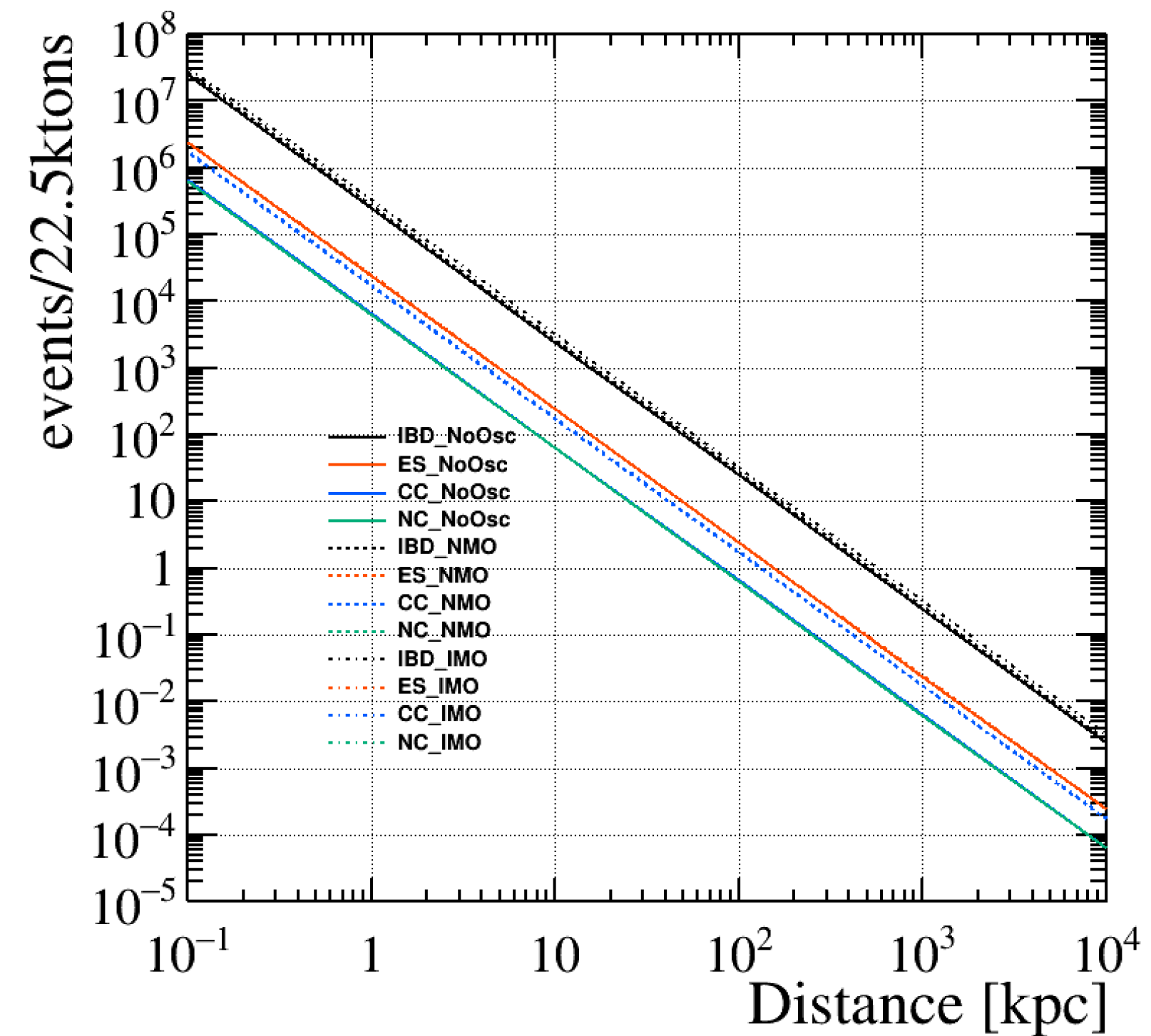
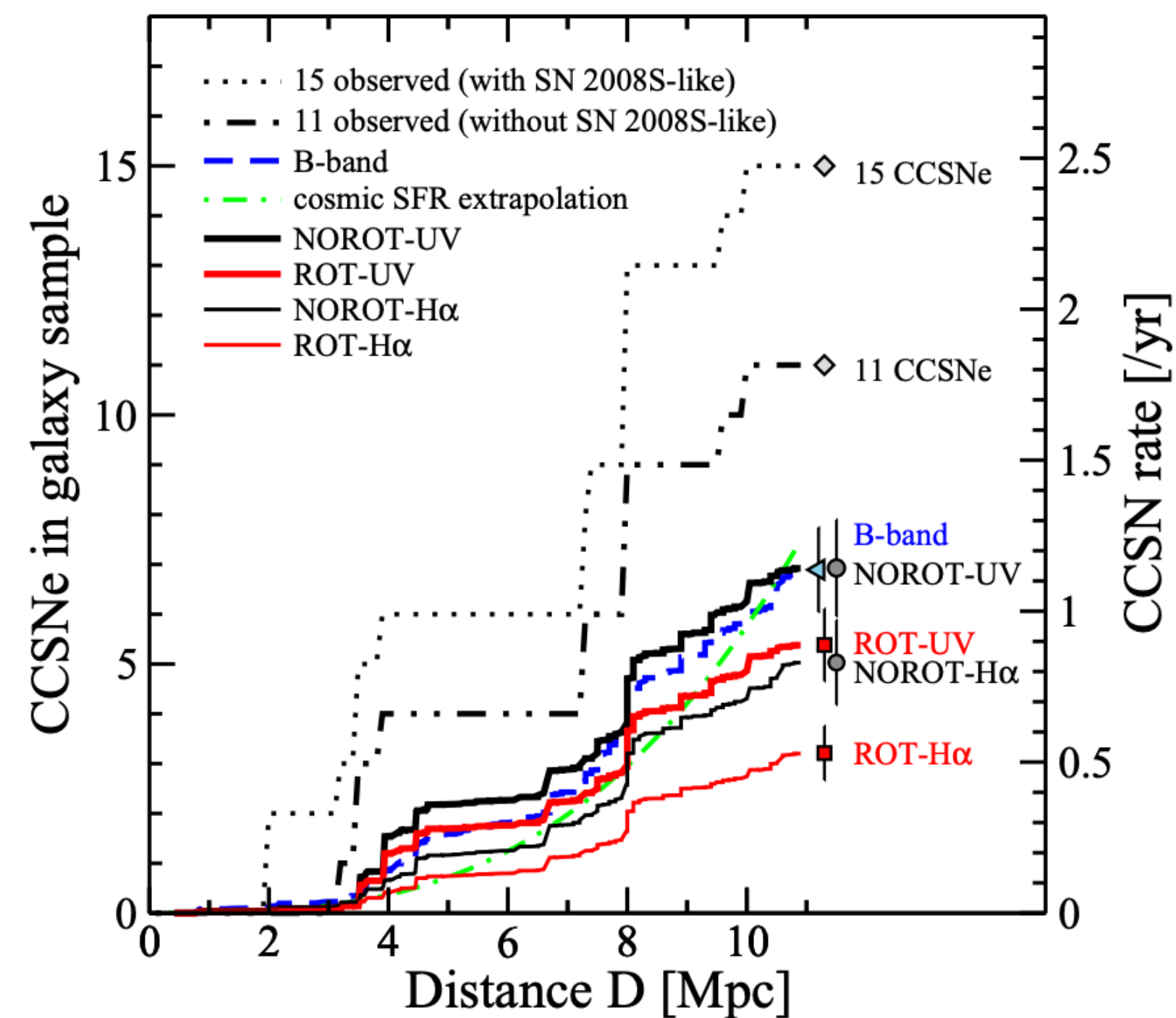


- SKで検出される超新星ニュートリノ事象
 - $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (逆ベータ崩壊 IBD)(~90%)
 - $\nu_e/\bar{\nu}_e/\nu_x + e^- \rightarrow \nu_e/\bar{\nu}_e/\nu_x + e^-$ (電子散乱 ES)(~2%)
 - $\nu_e/\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^-/e^+ + {}^{16}\text{F}/{}^{16}\text{N}$ (荷電カレント反応 ${}^{16}\text{O}$ CC)(~3%)
 - $\nu_e/\bar{\nu}_e/\nu_x + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_e/\bar{\nu}_e/\nu_x + \text{O}^*/\text{N}^* + \gamma$ (中性カレント反応 ${}^{16}\text{O}$ NC)(~5%)

SKにおける超新星ニュートリノ観測

6

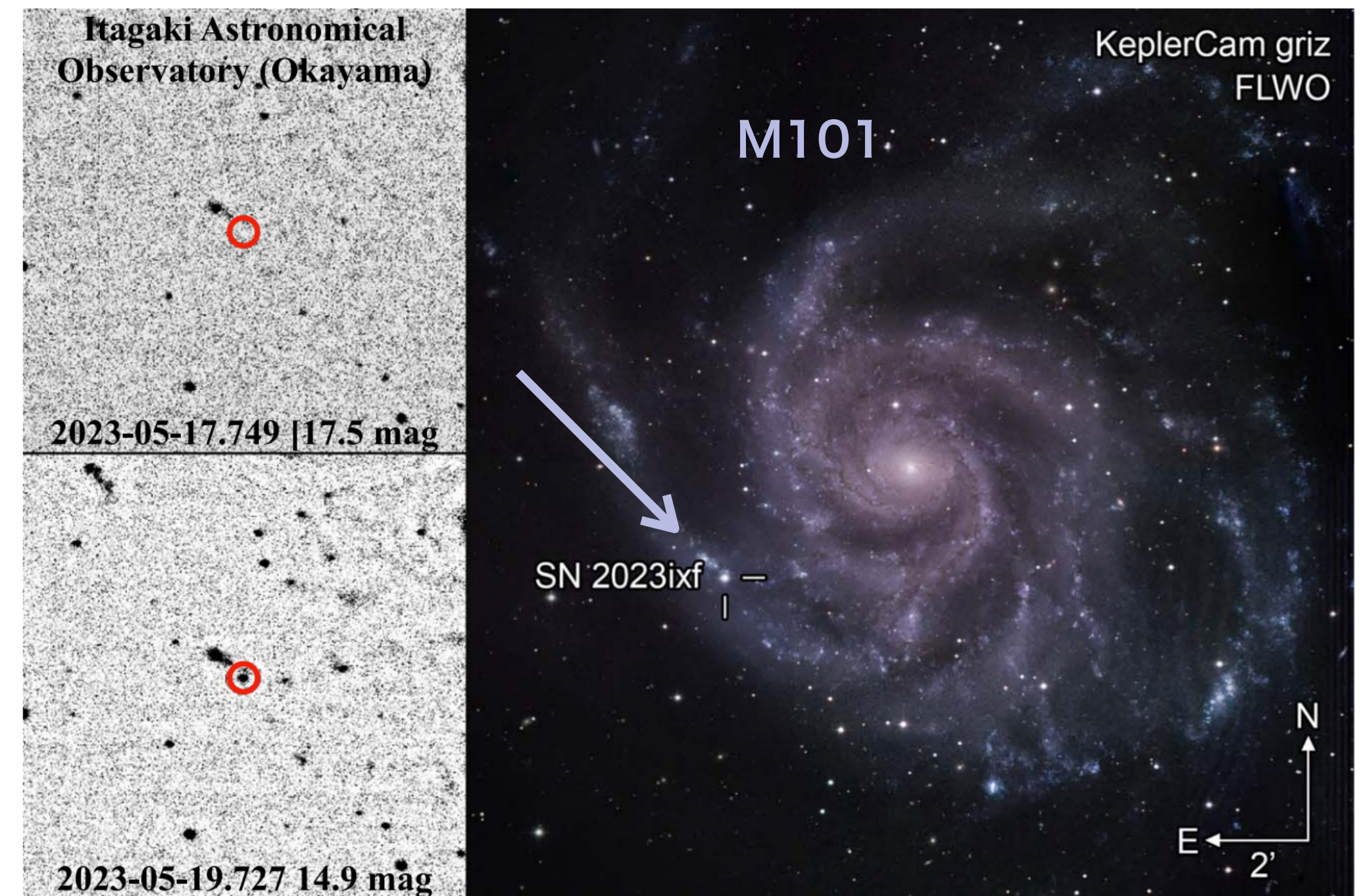
- 超新星爆発頻度
9.5 Mpc以上: 1 /year
- 超新星ニュートリノ観測期待値 (SK有効体積)
0.6 Mpc以下: $\mathcal{O}(1)$ events



SN2023ixf

7

- 2023年5月19日に光学望遠鏡で観測
<https://www.wis-tns.org/object/2023ixf>
- II型超新星
- 距離: 6.9 ± 0.1 Mpc ($z=0.0008 \pm 0.000007$)
- 半径: $\sim 10^{12}$ m
- 衝撃波速度: $\sim 10^9$ cm/s
- 星内部のニュートリノ伝播時間: ~ 1 day
- 超新星爆発レート: 0.2 - 0.5/year at 7 Mpc

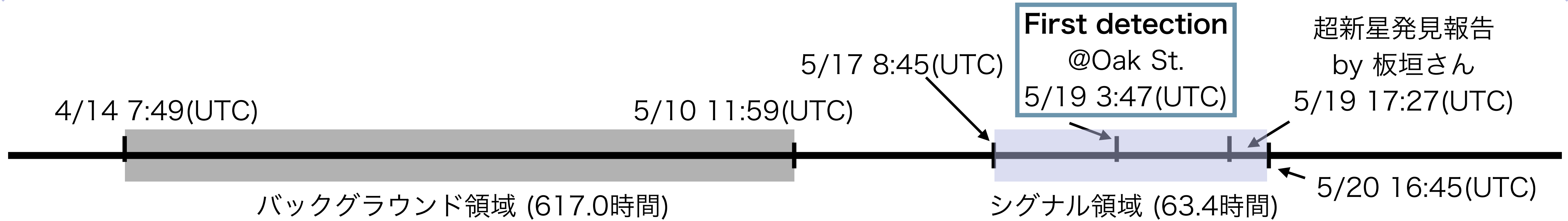


[1] D. Hiramatsu et al., ApJ letters, 955:L8 (13pp)

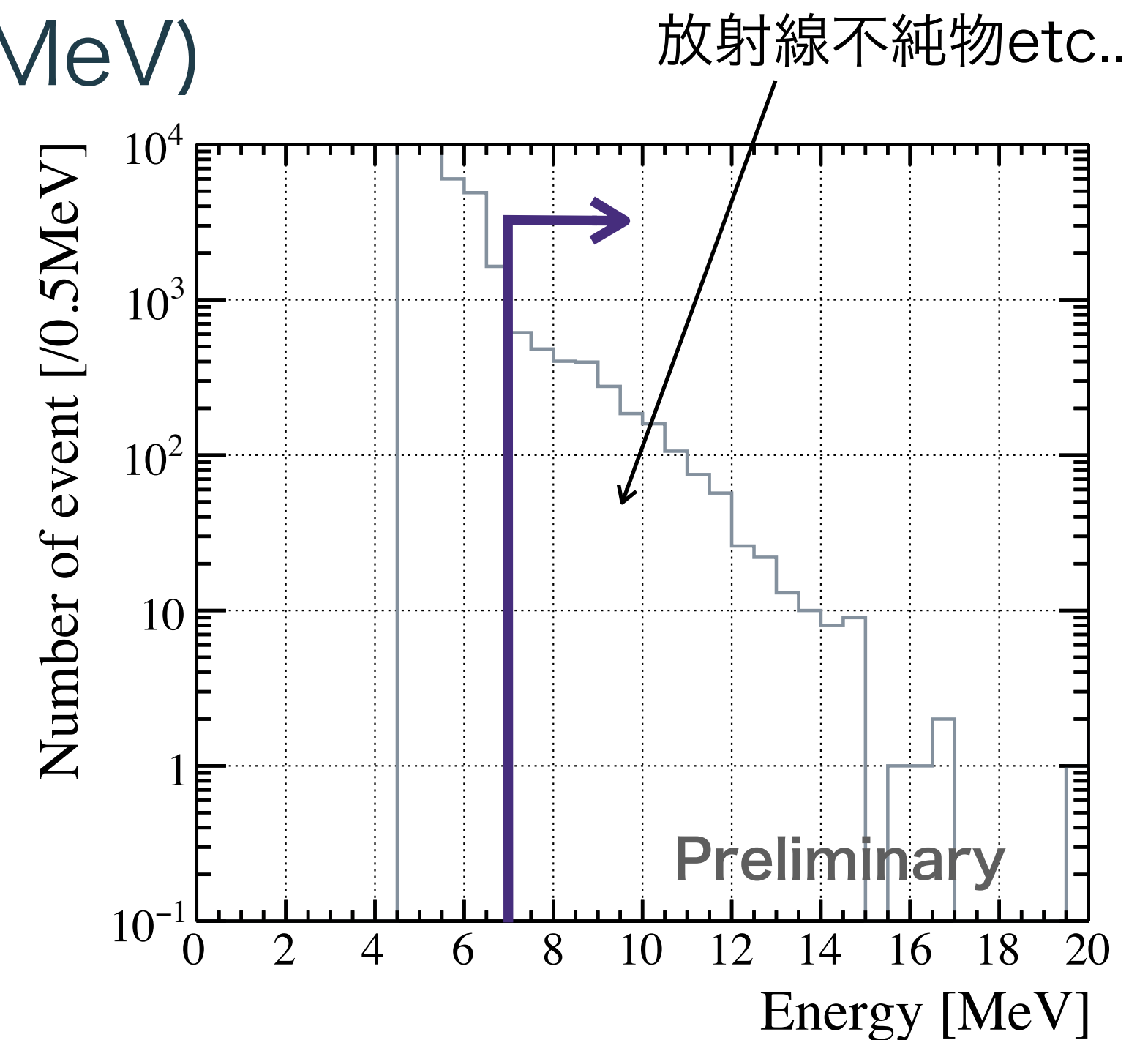
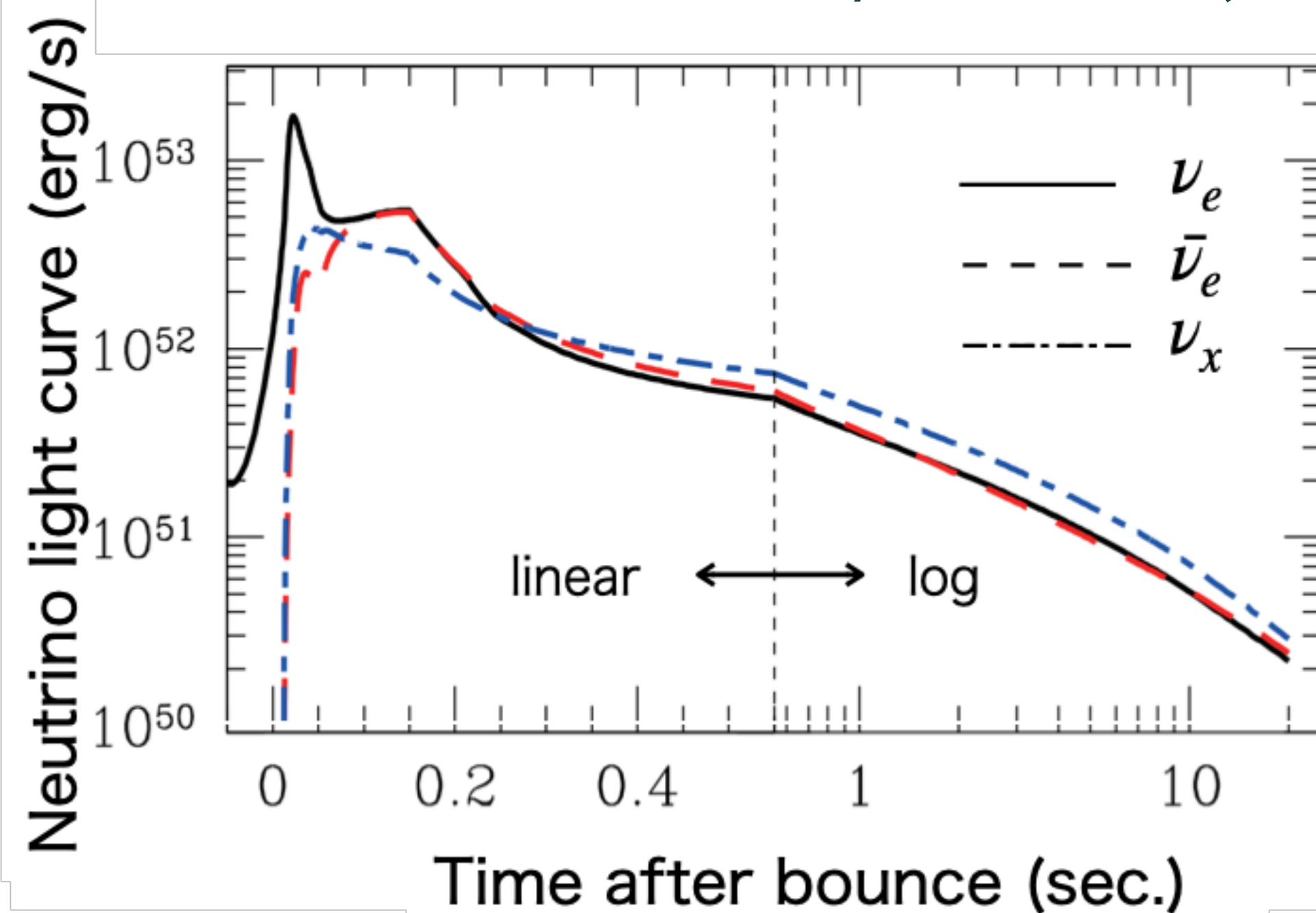
- インTRODクシヨン
 - 超新星爆発と超新星頻度
 - スーパーカミオカンデ (SK)
 - SN2023ixf
- 解析手法と結果
 - クラスタ解析
 - 解析結果
- 今後の展望

解析手法

9



- クラスター探索
→探索条件: 2イベント/10 sec. (エネルギー閾値7 MeV)

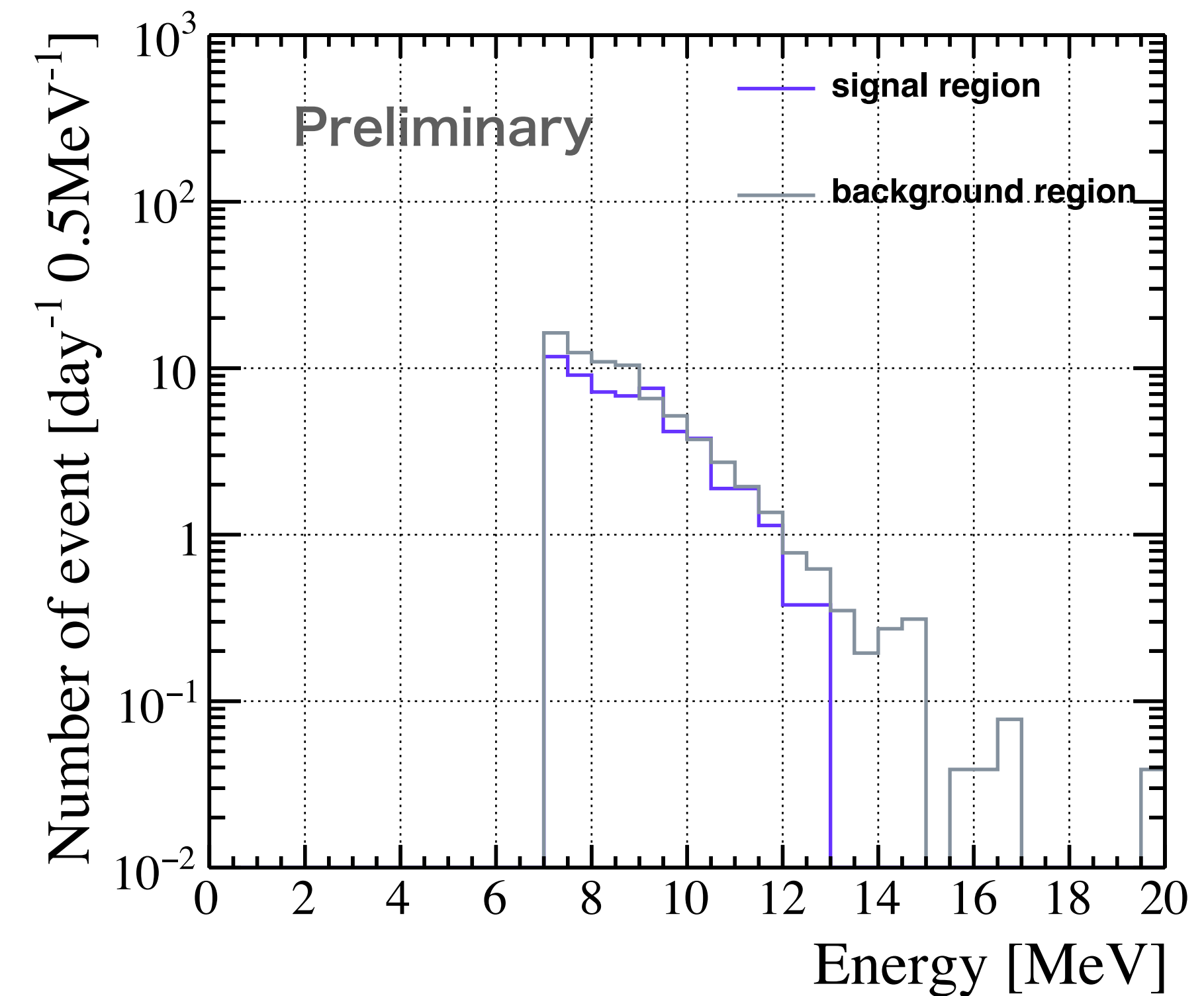
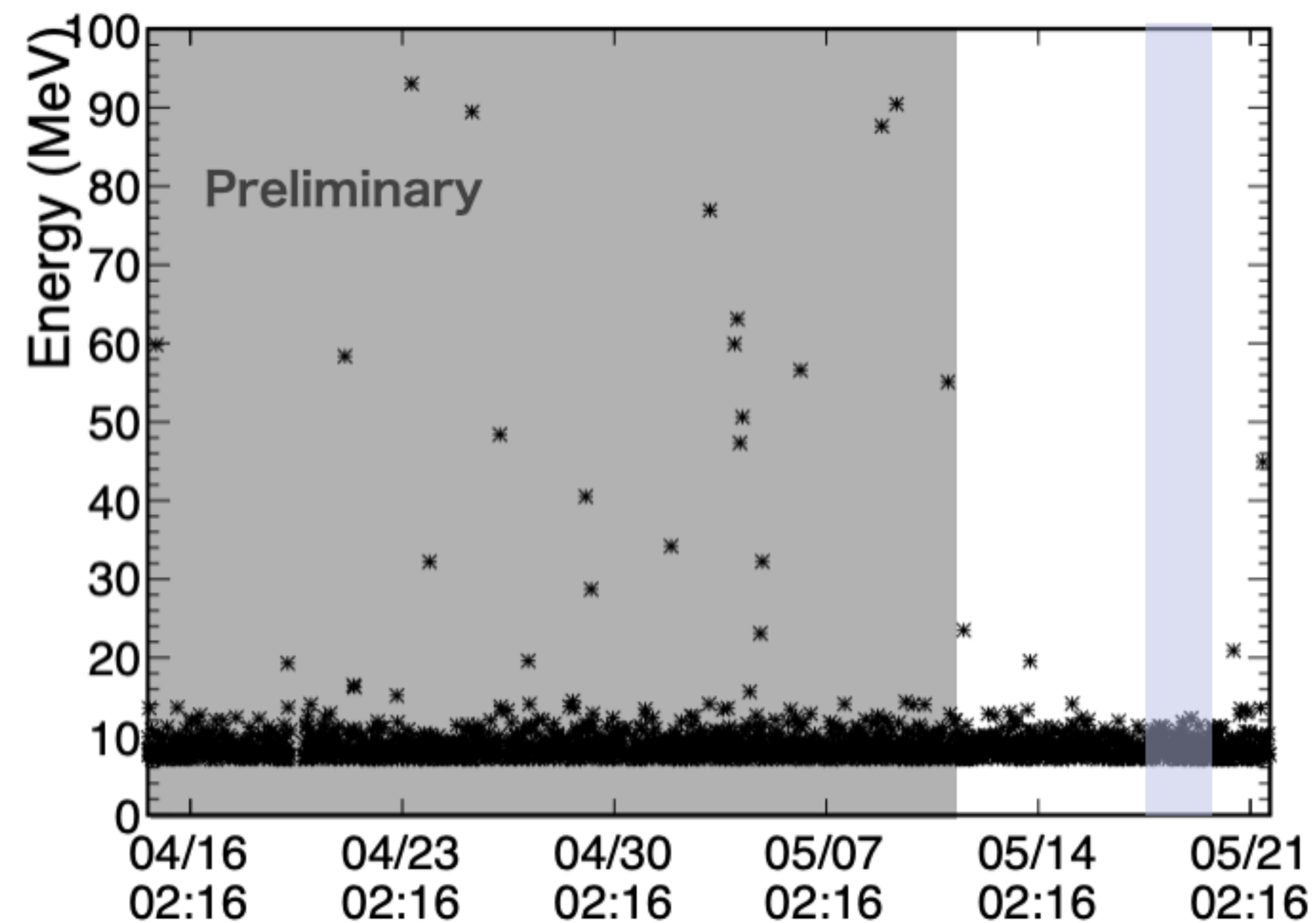


クラスター探索結果

10

クラスターは発見できなかった

- バックグラウンドイベント期待値: $6.9 \times 10^{-3} / 10 \text{ sec}$



ルミノシティ上限値

- ルミノシティ上限値を推定

Distance

d^2

Fluence upper limit
 $\mathcal{O}(10^7) - \mathcal{O}(10^8)$

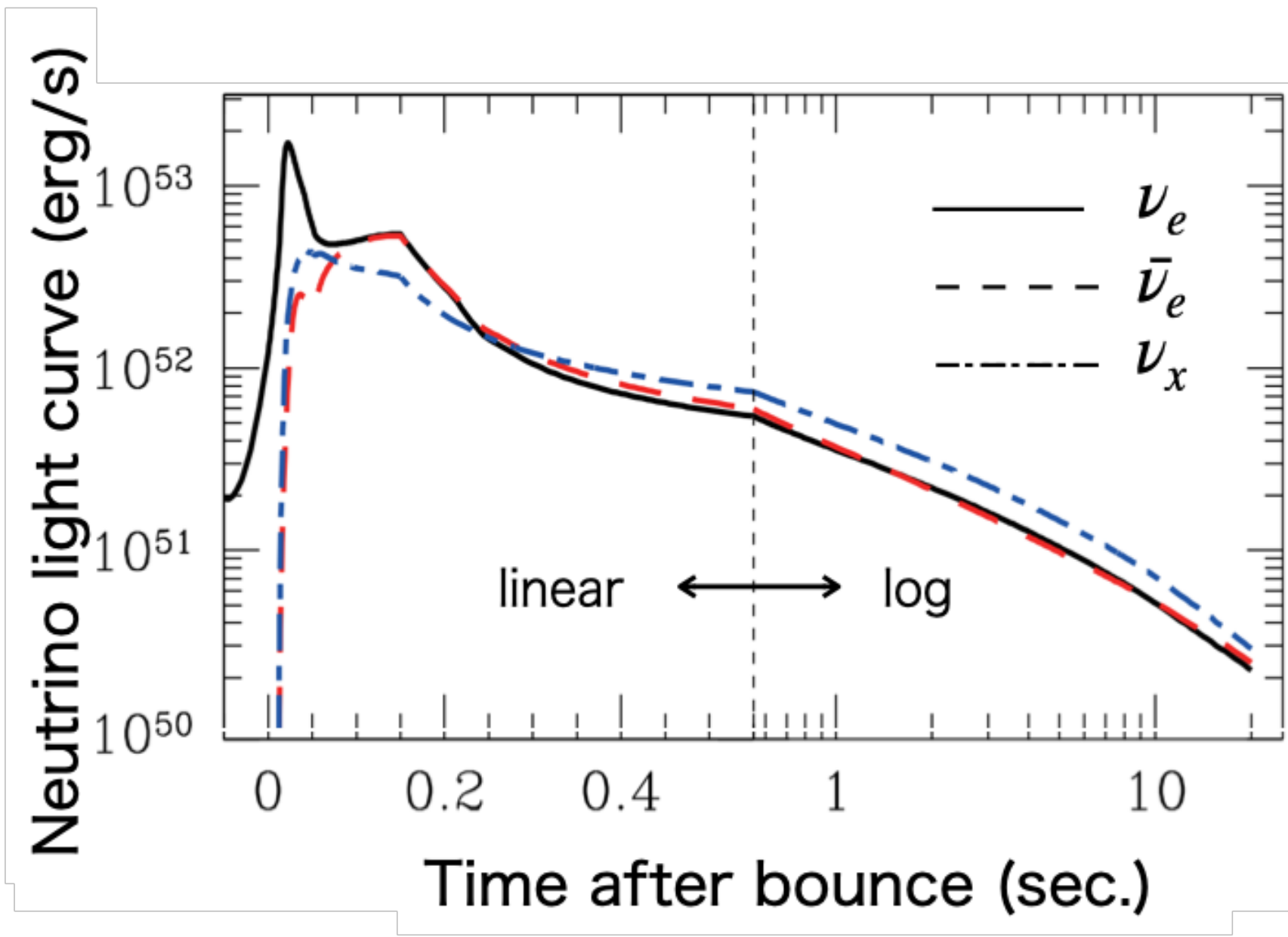
$\times$

Φ_{lowe}

$\int_{E_{min}}^{E_{max}}$

Number of density
 $\lambda(E)EdE$

- ルミノシティ上限値 $\mathcal{O}(10^{54})$



Supernova model		Luminosity upper limit [erg/s]
13M _⊙ shock revival time = 200 ms	Normal mass ordering	1.51 × 10 ⁵⁴
	Inverted mass ordering	1.34 × 10 ⁵⁴
20M _⊙ shock revival time = 200 ms	Normal mass ordering	1.54 × 10 ⁵⁴
	Inverted mass ordering	1.28 × 10 ⁵⁴

[2]Nakazato et al 2013 ApJS **205** 2

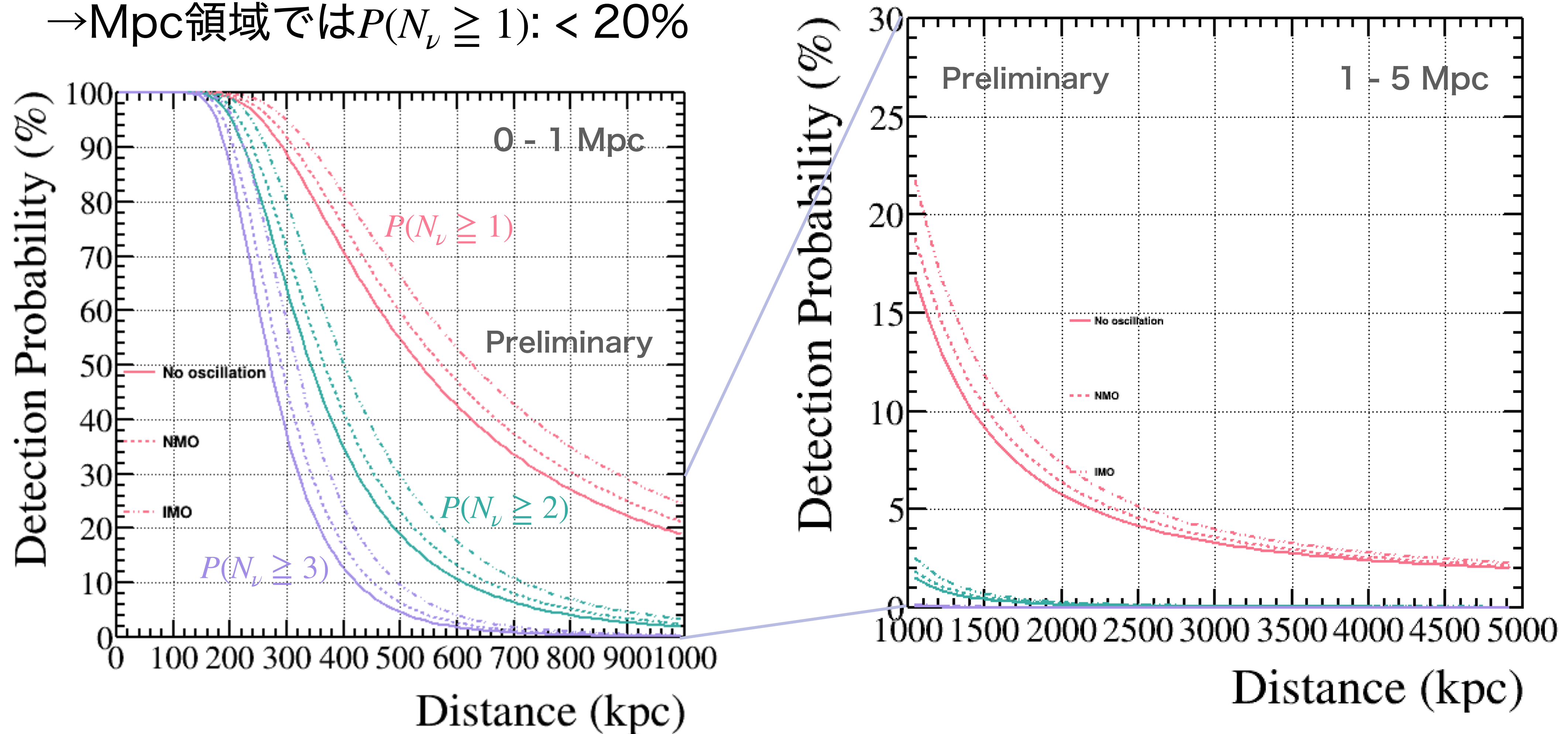
- インTRODクシヨン
 - 超新星爆発と超新星頻度
 - スーパーカミオカンデ (SK)
 - SN2023ixf
- 解析手法と結果
 - クラスタ解析
 - 解析結果
- 今後の展望

超新星ニュートリノ検出確率

13

- 爆発時刻からニュートリノ放出時間を数十秒間の精度で決定できた場合

→Mpc領域では $P(N_\nu \geq 1)$: < 20%



mini-burstニュートリノ探索

14

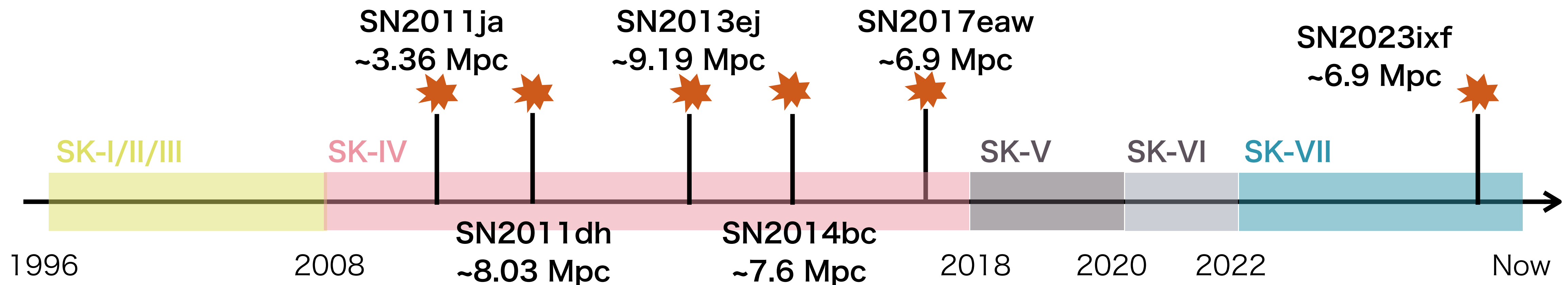
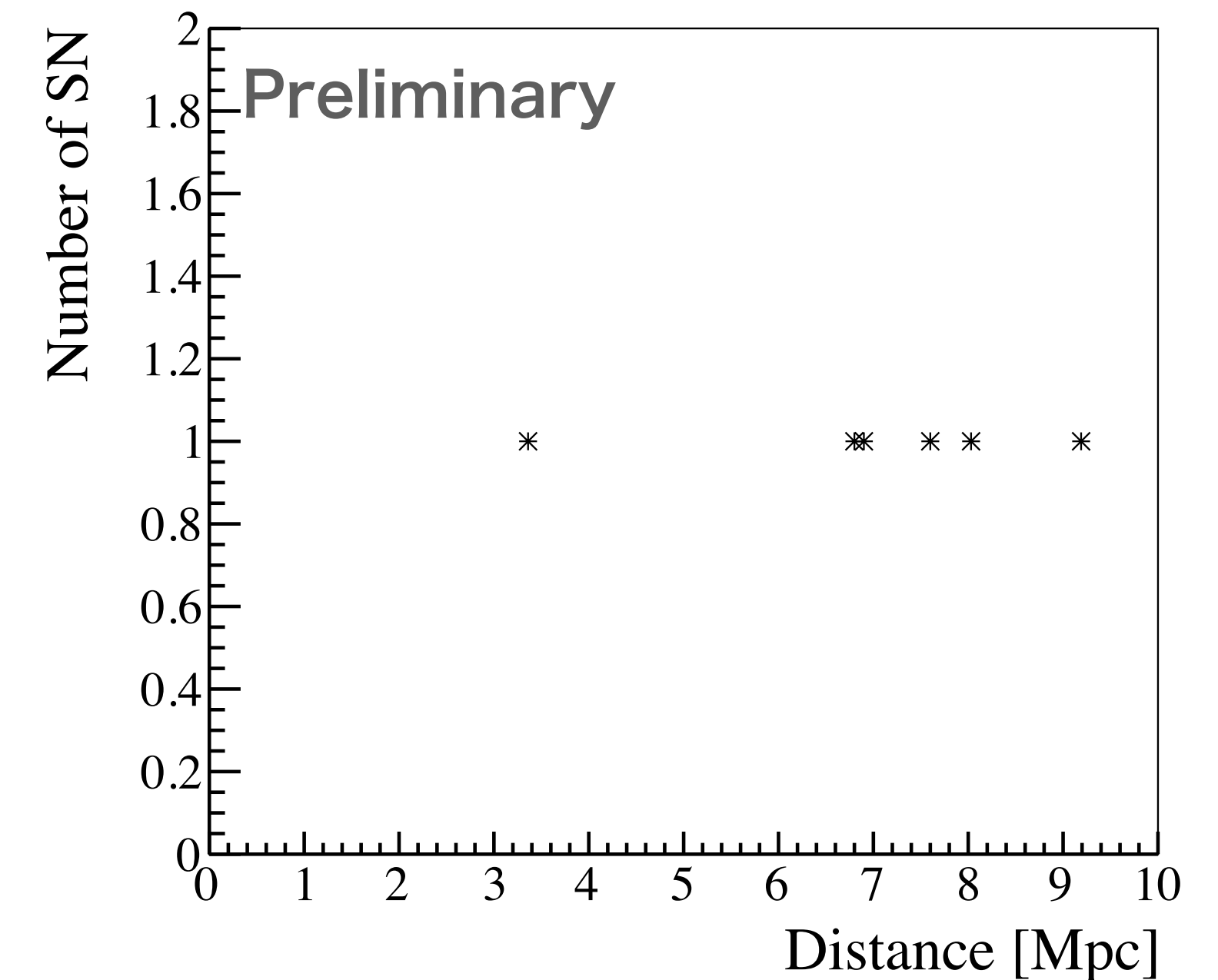
- SK稼働開始時 (1996. 4)から現在 (2023. 12)までに起きたII型超新星爆発を調査
transient name server <https://www.wis-tns.org/>

ASAS-SN https://www.astronomy.ohio-state.edu/asassn/sn_list.html

Open supernova catalog <https://github.com/astrocatalogs/supernovae>

→6つのmini-burst候補が存在

- SK稼働中に起こったmini-burst由来の
超新星ニュートリノを探索する



- 10 Mpc 以内の超新星爆発: “mini-burst”
- SN2023ixfが2023年5月19日に観測
 - 10 secの時間幅を用いたクラスター探索
→シグナルは発見できなかった
- 探索結果から..
 - ルミノシティ上限値を推定: $\mathcal{O}(10^{54})$ [erg/s]
 - SKにおけるMpc領域の検出確率を算出: $P(N_\nu \geq 1): < 20\%$

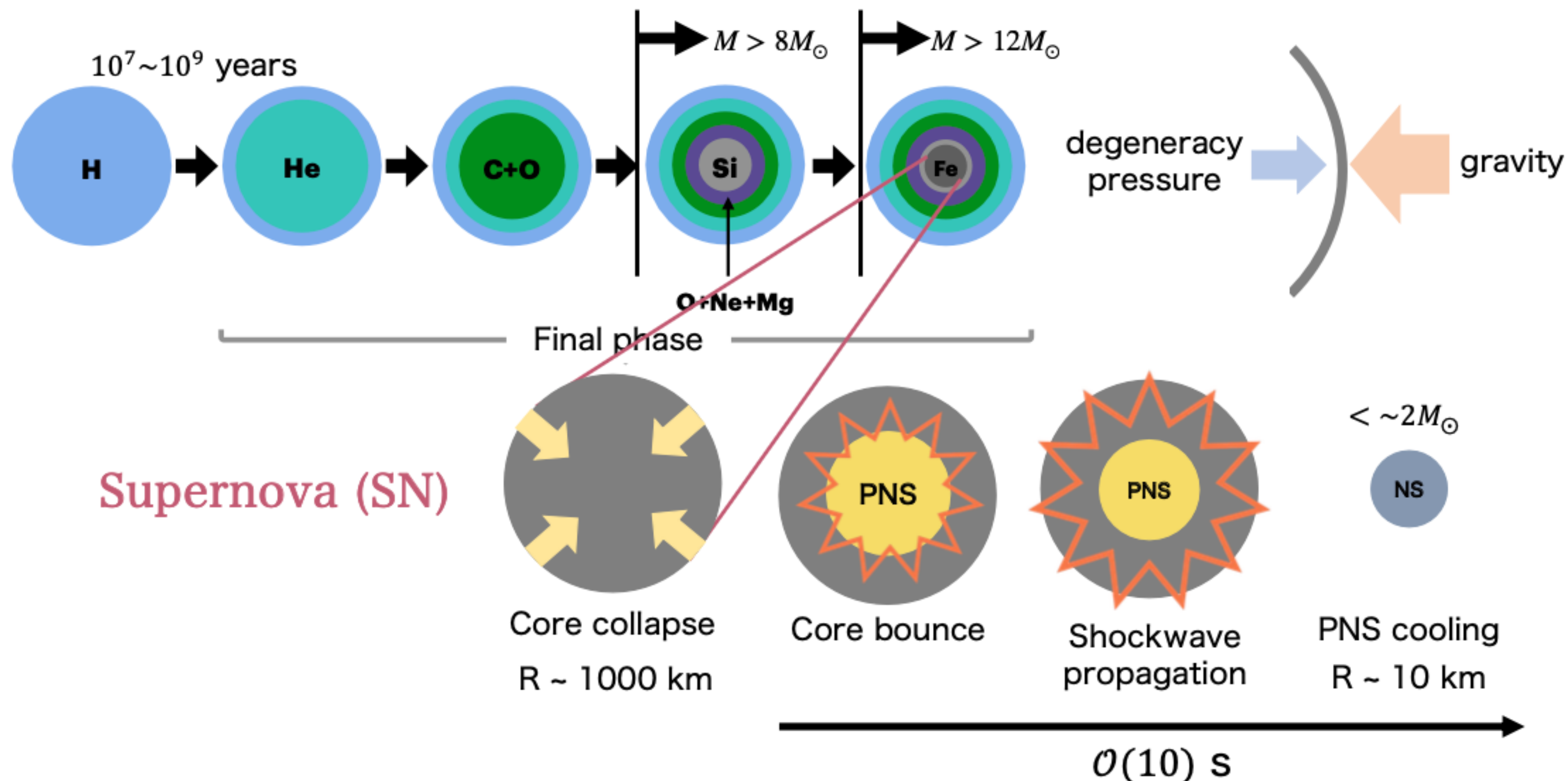
今後の展望

- SK稼働中に起こったmini-burst由来の超新星ニュートリノを探索する

Backup

超新星爆発

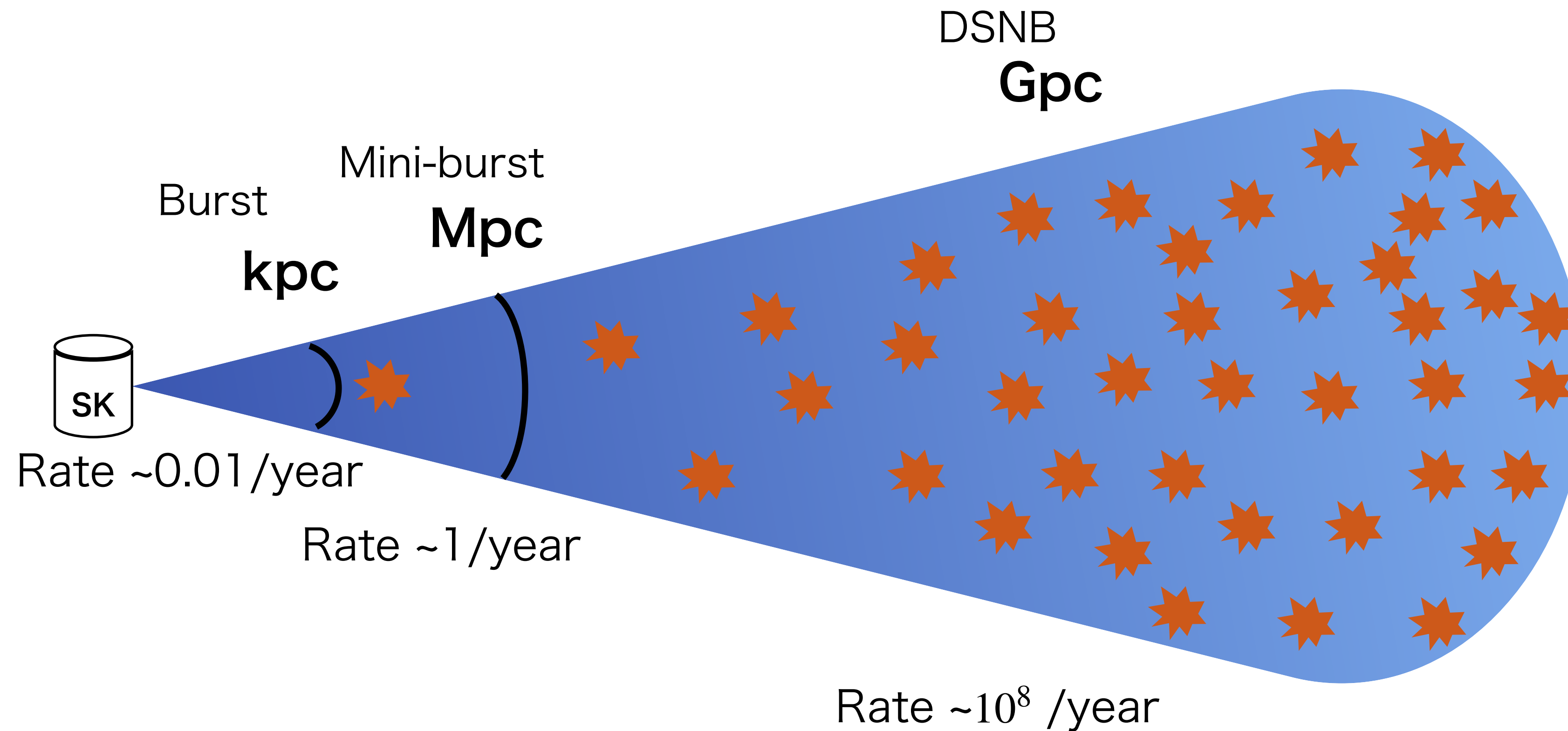
17



超新星爆発頻度

18

- 宇宙全体では頻繁に起こる現象



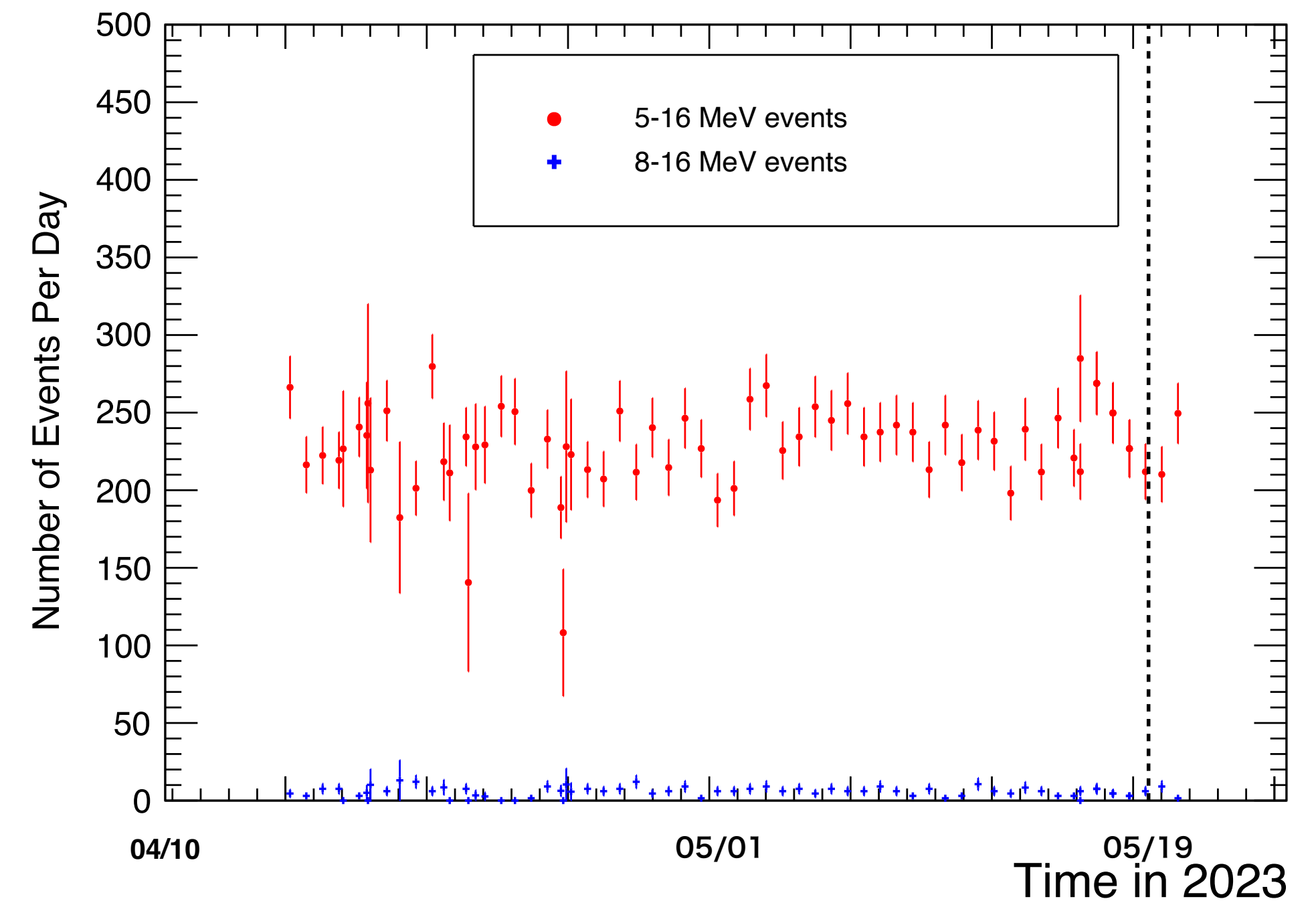
- “mini-burst”に注目

Analysis strategy

19

We use the data sample.

- Background period: Apr. 14, 2023 - May 10, 2023 (~25 days, JST)
- Signal period: May 17, 2023 - May 20, 2023 (~2 days, JST)
- Total energy criteria: 5 - 16 MeV
 - Spallation cut
 - ^{16}N cut
- Total energy criteria: 16 - 100 MeV
 - Muon reduction
 - Spallation cut

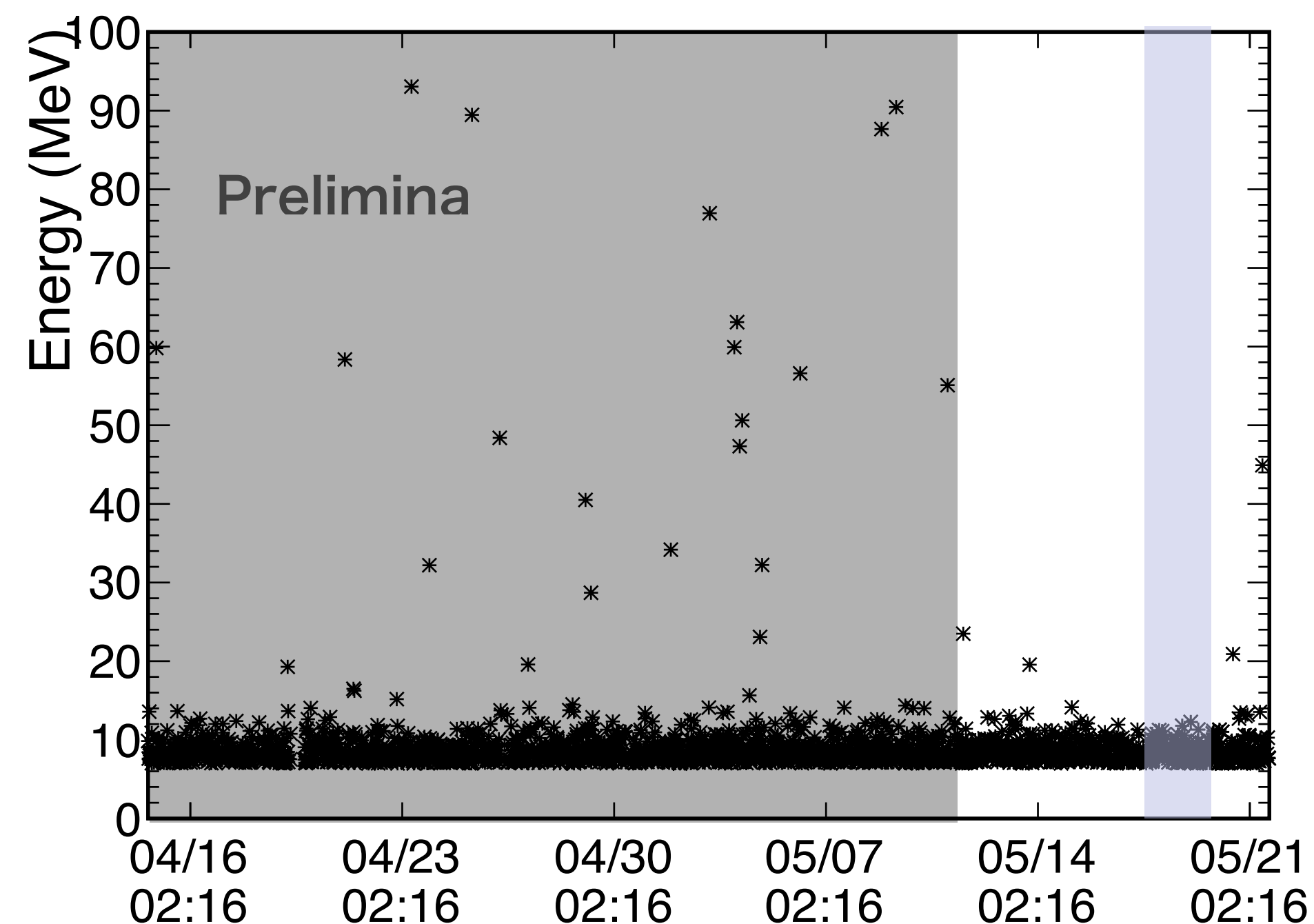
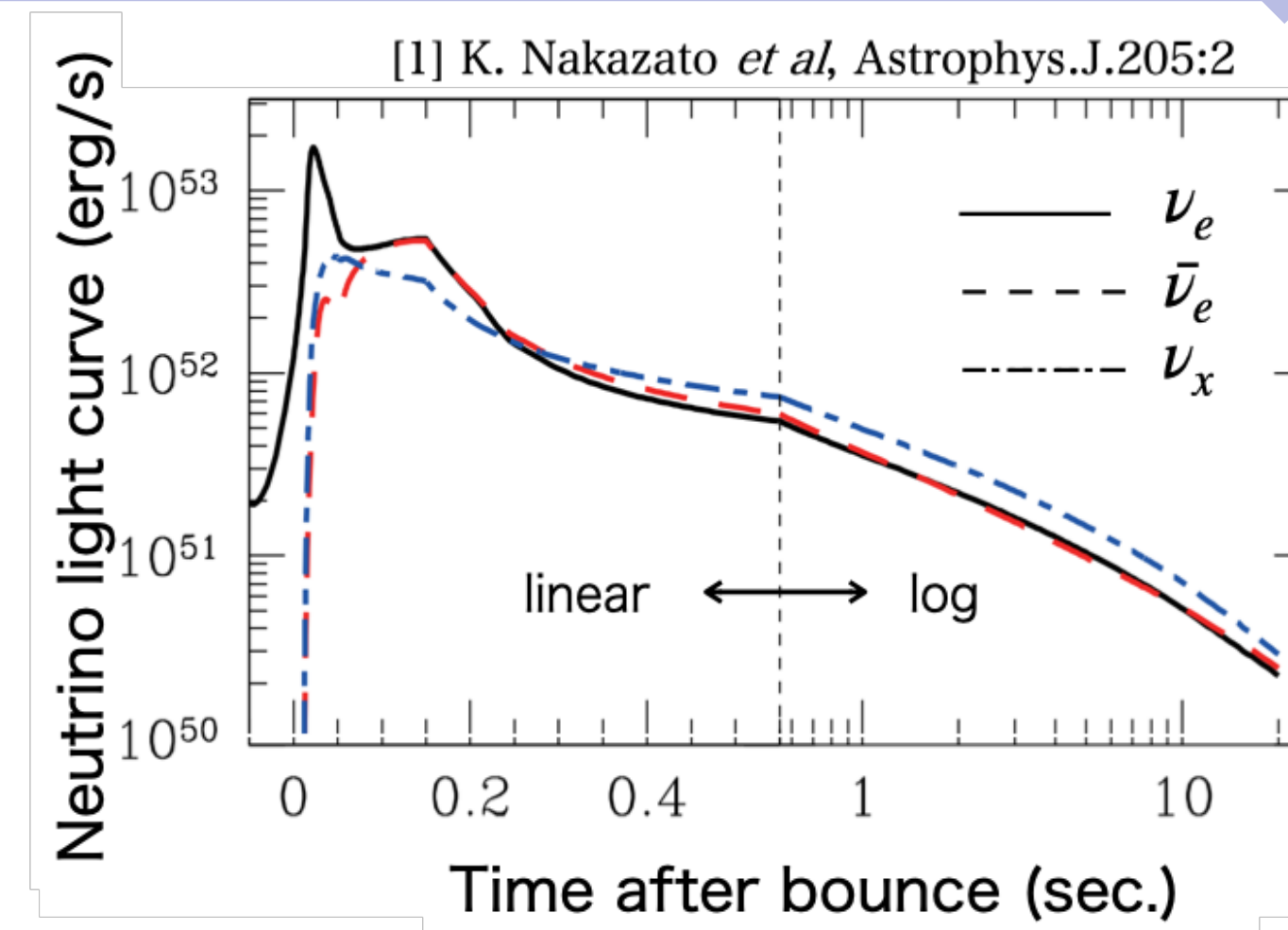


解析手法

20

SKデータを以下の領域に分け、超新星ニュートリノ信号を探索

- シグナル領域:
May 17, 2023 - May 20, 2023 (~2 days, JST)
- バックグラウンド領域:
Apr. 14, 2023 - May 10, 2023 (~25 days, JST)
- クラスター探索
→探索条件: 2イベント/10 sec.
(エネルギー閾値7 MeV)



Fluence upper limit

90% C.L. limit on neutrino events

$$\Phi_{lowe} = \frac{N_{90}}{N_T \int dE_\nu \lambda(E_\nu) \sigma(E_\nu) R(E_e, E_{vis}) \varepsilon(E_{vis})}$$

#of targets number density cross section efficiency

- Since there were no candidate neutrino events within 10 sec, we set $N_{90} = 2.3$.
- We assume the Nakazato model:
($13M_\odot$, shock revival time = 200 ms)
($20M_\odot$, shock revival time = 200 ms)

[2]Nakazato et al 2013 ApJS **205** 2

Supernova model		Fluence upper limit [/cm^2]
13M _⊙	Normal mass ordering	1.07 × 10 ⁸
	Inverted mass ordering	8.96 × 10 ⁷
20M _⊙	Normal mass ordering	1.11 × 10 ⁸
	Inverted mass ordering	7.81 × 10 ⁷

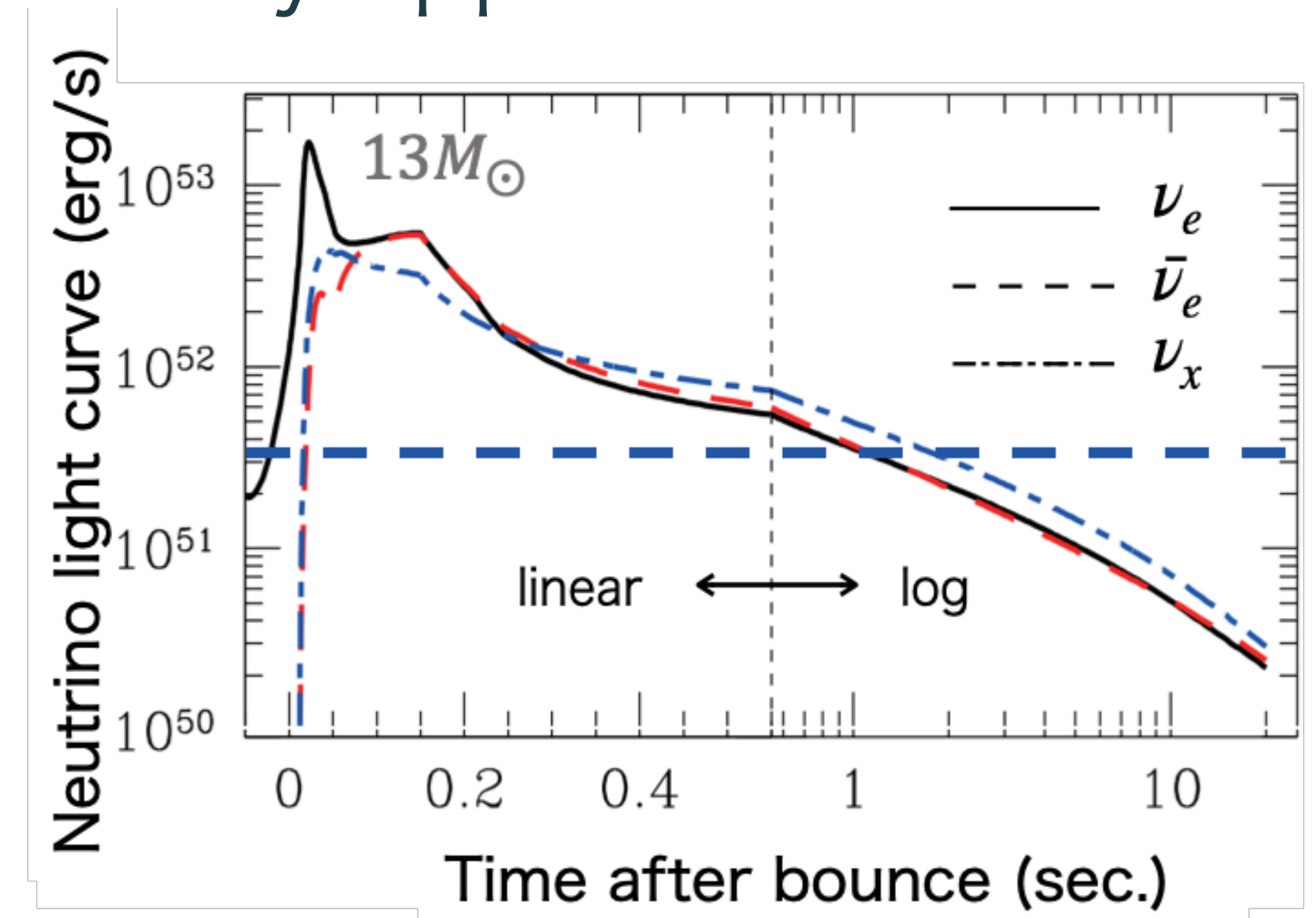
Luminosity upper limit

22

- From The fluence upper limit, we estimate the luminosity upper limit

$$E_{iso}[\text{erg/s}] = 4\pi d^2 \times \Phi_{lowe} \int_{E_{min}}^{E_{max}} \lambda(E) E dE$$

- Luminosity upper limit $\mathcal{O}(10^{54})$
 → It was not an upper limit that the model could limit.



Supernova model	Luminosity upper limit [erg/s]	Average luminosity [erg/s]
$13M_{\odot}$	Normal mass ordering	1.51×10^{54}
	Inverted mass ordering	1.34×10^{54}
$20M_{\odot}$	Normal mass ordering	1.54×10^{54}
	Inverted mass ordering	1.28×10^{54}

- 探索条件
 - 時間幅: 10 sec
 - エネルギー閾値: 7 MeV
 - SK有効体積: 22.5 kton
- 探索仮定
 - 超新星モデル: 中里モデル($20M_{\odot}$, shock revival time = 200 ms)
 - 核破砕カット: 超新星イベントを20%カット
- バックグラウンド期待値
 $6.9 \times 10^{-3} / 10 \text{ sec}$

Probability estimation

24

- Used poisson distribution $P(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$
- Calculated three probability

The probability which observe 0 event

$$P(N_{\nu} \geq 1) = 1 - \exp(- (S + B))$$

The probability which observe 1 event

$$P(N_{\nu} \geq 2) = P(N_{\nu} \geq 1) - (S + B) \times \exp(- (S + B))$$

$$P(N_{\nu} \geq 3) = P(N_{\nu} \geq 2) - (S + B)^2 \exp(- (S + B)/2)$$

The probability which observe 2 event

Notification of this report

25

- We reported to GCN circular and ATEL

<https://gcn.nasa.gov/circulars/33916>

<https://www.astronomerstelegam.org/?read=16070>

GCN Circular 33916

Subject Super-Kamiokande: Neutrino search for SN2023ixf
Date 2023-06-05T12:30:44Z (9 months ago)
From Yusuke Koshio at Super-Kamiokande <koshio@okayama-u.ac.jp>

M. Nakahata, Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research,
University of Tokyo, reports on behalf of the Super-Kamiokande collaboration:

Super-Kamiokande, a 50 ktons water Cherenkov imaging detector situated 1000 meters underground in the Kamioka mine, Gifu, Japan, has searched for neutrino signal correlated with SN2023ixf in a time window 2 days before the detection by Oak St. Observatory (2023-05-17 08:45:13 to 2023-05-19 08:45:13), during which Super-Kamiokande took data stably without dead time. In the electron total energy region between 7.0 MeV and 100 MeV within a fiducial volume of 22.5 ktons, no significant signal was observed.

- We could notify for the first time on SK!

[\[Previous](#) | [Next](#) | [ADS](#)]

Neutrino search for SN2023ixf in Super-Kamiokande

ATel #16070; *M. Nakahata (University of Tokyo) on behalf of the Super-Kamiokande collaboration*
on 2 Jun 2023; 08:44 UT
Distributed as an Instant Email Notice Supernovae
Credential Certification: H. Ishino (snconveners@km.icrr.u-tokyo.ac.jp)

Subjects: Neutrinos, Supernovae

Referred to by ATel #: 16075

✕ Post

Super-Kamiokande, a 50 ktons water Cherenkov imaging detector situated 1000 meters underground in the Kamioka mine, Gifu, Japan, has searched for neutrino signal correlated with SN2023ixf in a time window 2 days before the detection by Oak St. Observatory (2023-05-17 08:45:13 to 2023-05-19 08:45:13), during which Super-Kamiokande took data stably without dead time. In the electron total energy region between 7.0 MeV and 100 MeV within a fiducial volume of 22.5 ktons, no significant signal was observed.

Related

16075

Fermi-LAT gamma-ray observations of SN 2023ixf

16073

Chandra X-ray detection of supernova SN 2023ixf in M101

16070

Neutrino search for SN2023ixf in Super-Kamiokande

16065

SN 2023ixf continues to rise in hard X-rays

16060

Search the XMM-Newton archival data for the progenitor of SN 2023ixf

16052

uGMRT radio upper limit on Supernova SN 2023ixf in M101

16051

X-ray emission of SN 2023ixf and its progenitor

16049

NuSTAR detection of SN 2023ixf in M101

16047

Multi-Band Photometric Follow-up of SN 2023ixf

16045

Optical observations of SN 2023ixf at Teide Observatory

16043

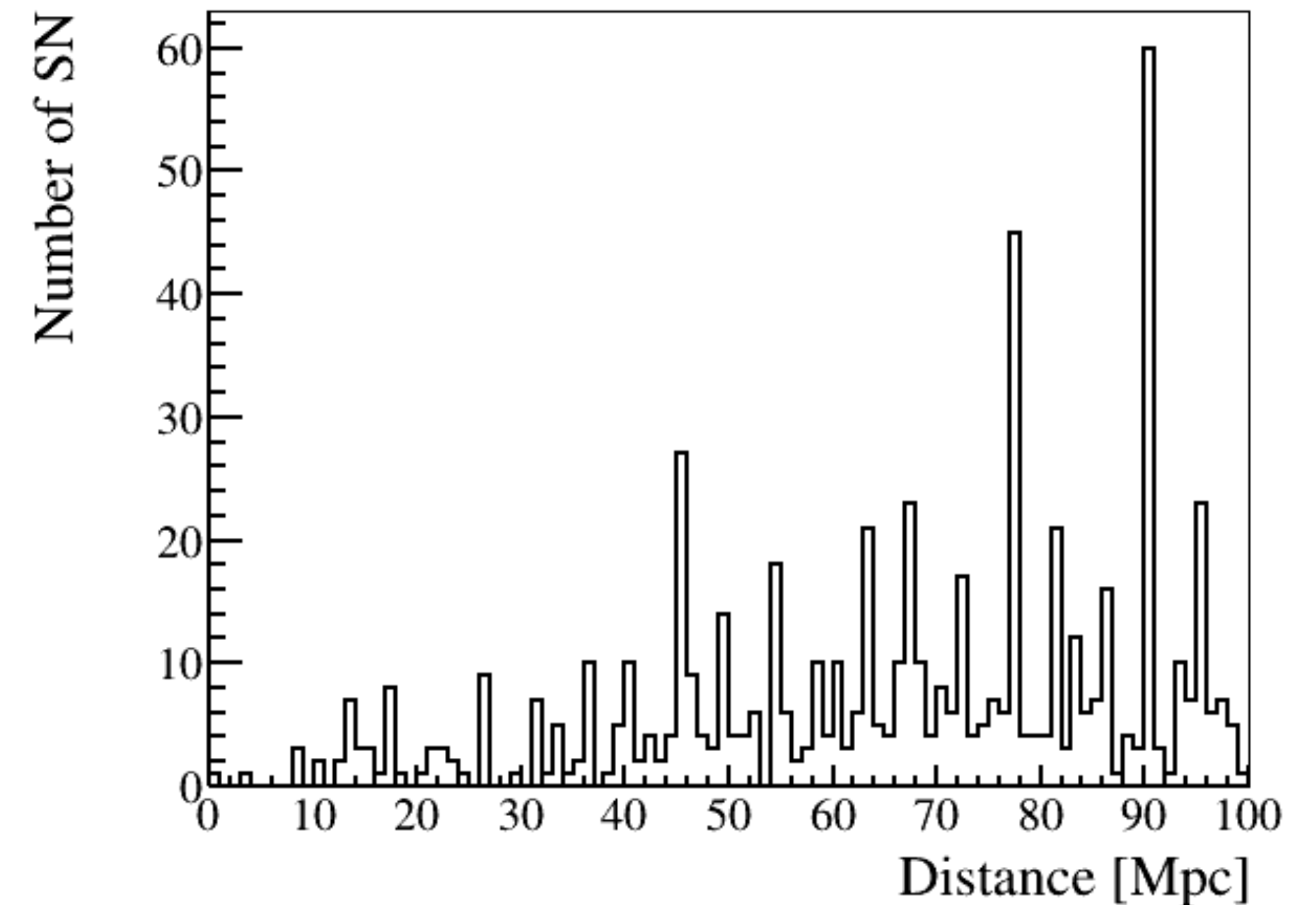
SN 2023ixf: Upper limits from a neutrino search with IceCube

mini-burstニュートリノ探索

26

- mini-burst候補のリスト

	Discovery Date	Distance (Mpc)
SN2023ixf	2023-05-19	0.0008
SN2017eaw	2017-05-14	0.00013
SN2014bc	2014-05-19	7.6 ± 0.23
SN2013ej	2013-07-25	9.19
SN2011dh	2011-05-11	8.03 ± 0.77
SN2011ja	2011-12-18	3.36 ± 0.09



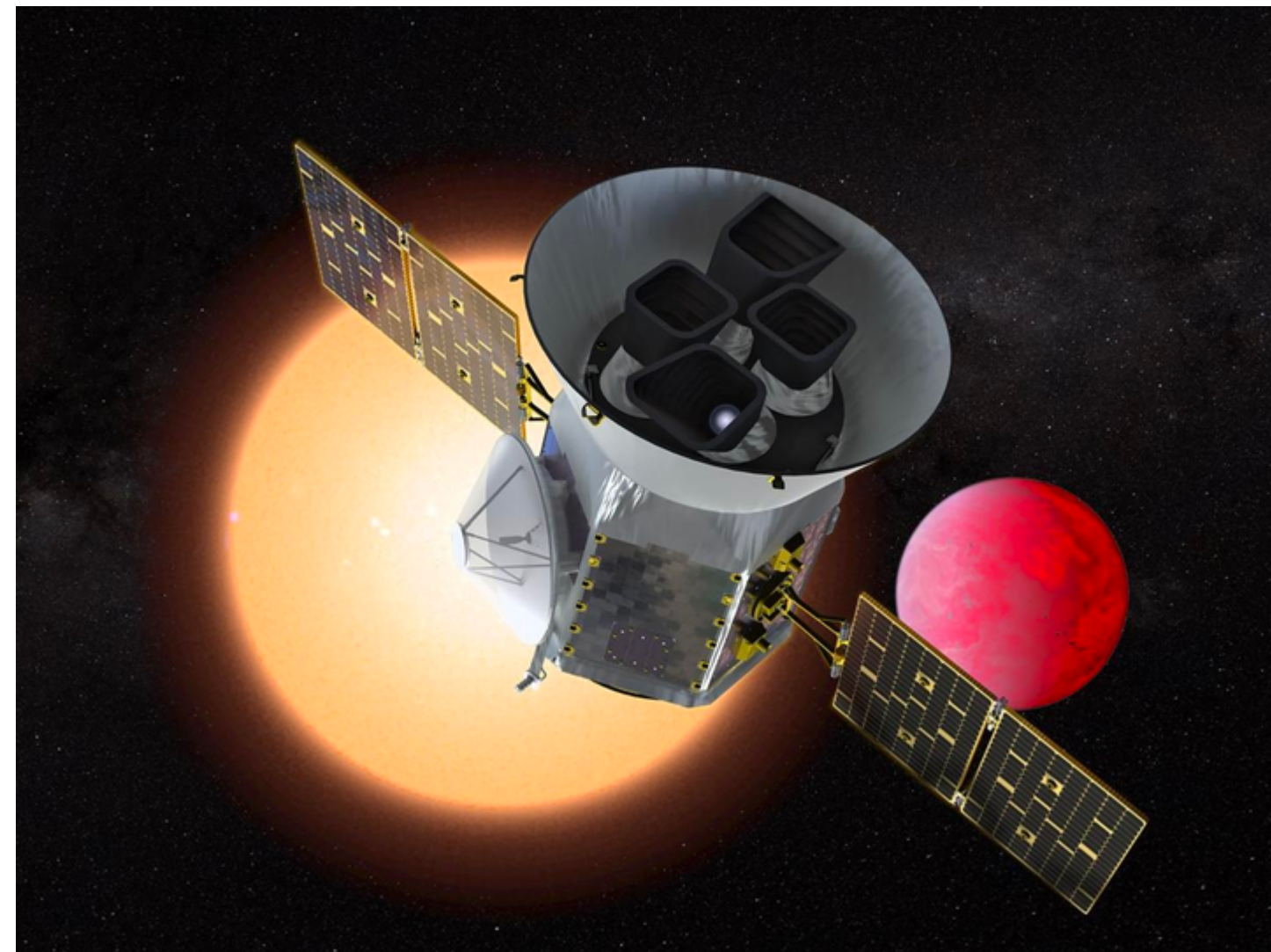
Optical telescopes

27

- Several telescopes monitor objects in the “mini-burst” region
→ Many supernovae are observed, and it is opened in their catalog

TESS

<https://tess.mit.edu/>



ASAS-SN

<https://www.astronomy.ohio-state.edu/asasn/>



- I will search the supernova neutrinos with information of the catalog