

(一般シンポジウム) 新生スーパーカミオカンデがもたらす超新星研究の新展開  
**SK-Gdにおける超新星観測の現状と展望**

東大理 中島康博

2021年9月17日

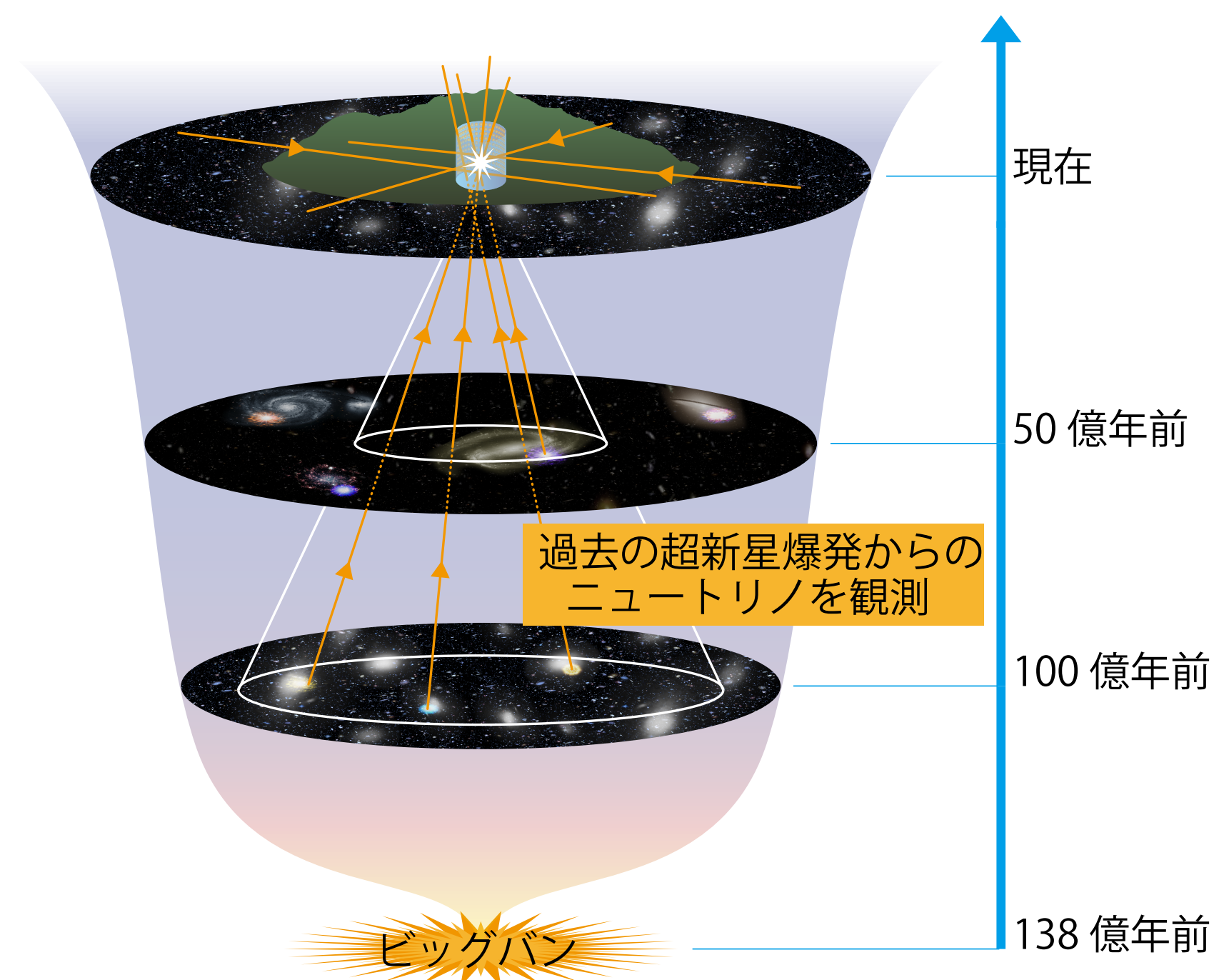
日本物理学会 2021年秋季大会



# SK-Gdにおける超新星ニュートリノ観測

## 超新星背景ニュートリノ

Diffuse Supernova Neutrino Background  
(Supernova Relic Neutrino)



## 超新星前兆ニュートリノ

Supernova Precursor  
(Si-burning neutrino)

## 超新星爆発ニュートリノ

Supernova Burst Neutrino

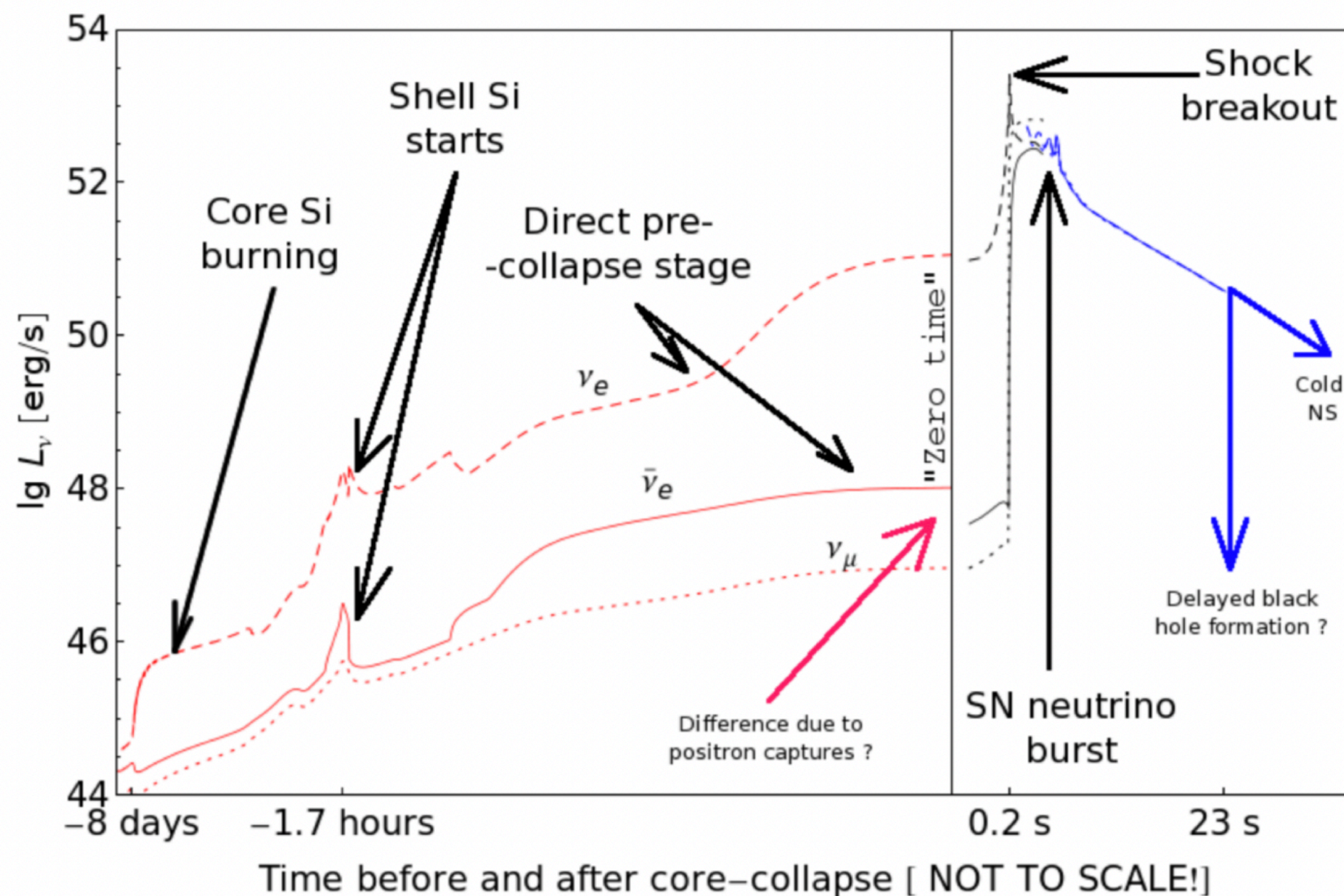


Figure from Odrzywolek & Heger, 2010

# 超新星背景ニュートリノ

# 超新星背景ニュートリノ

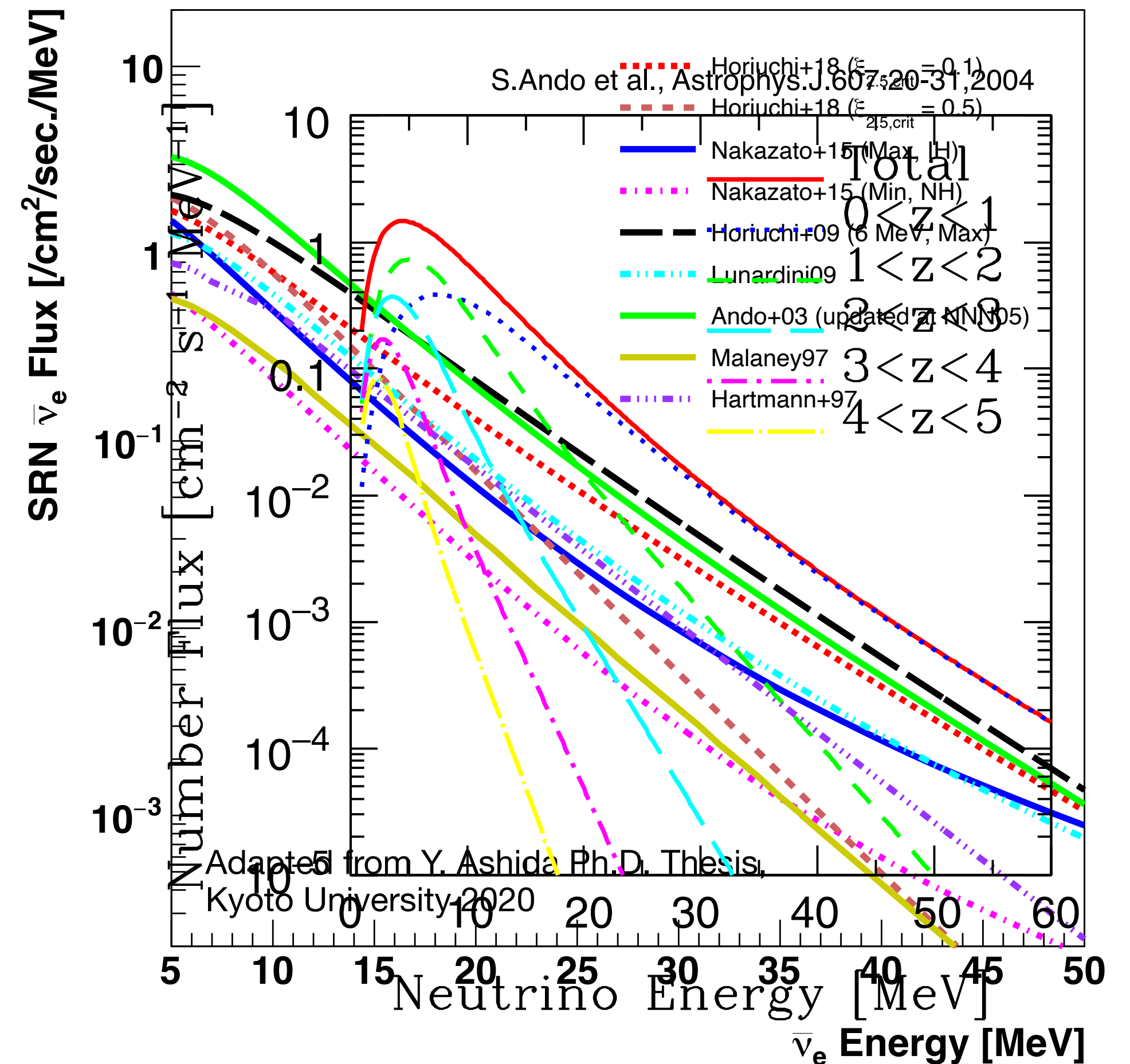
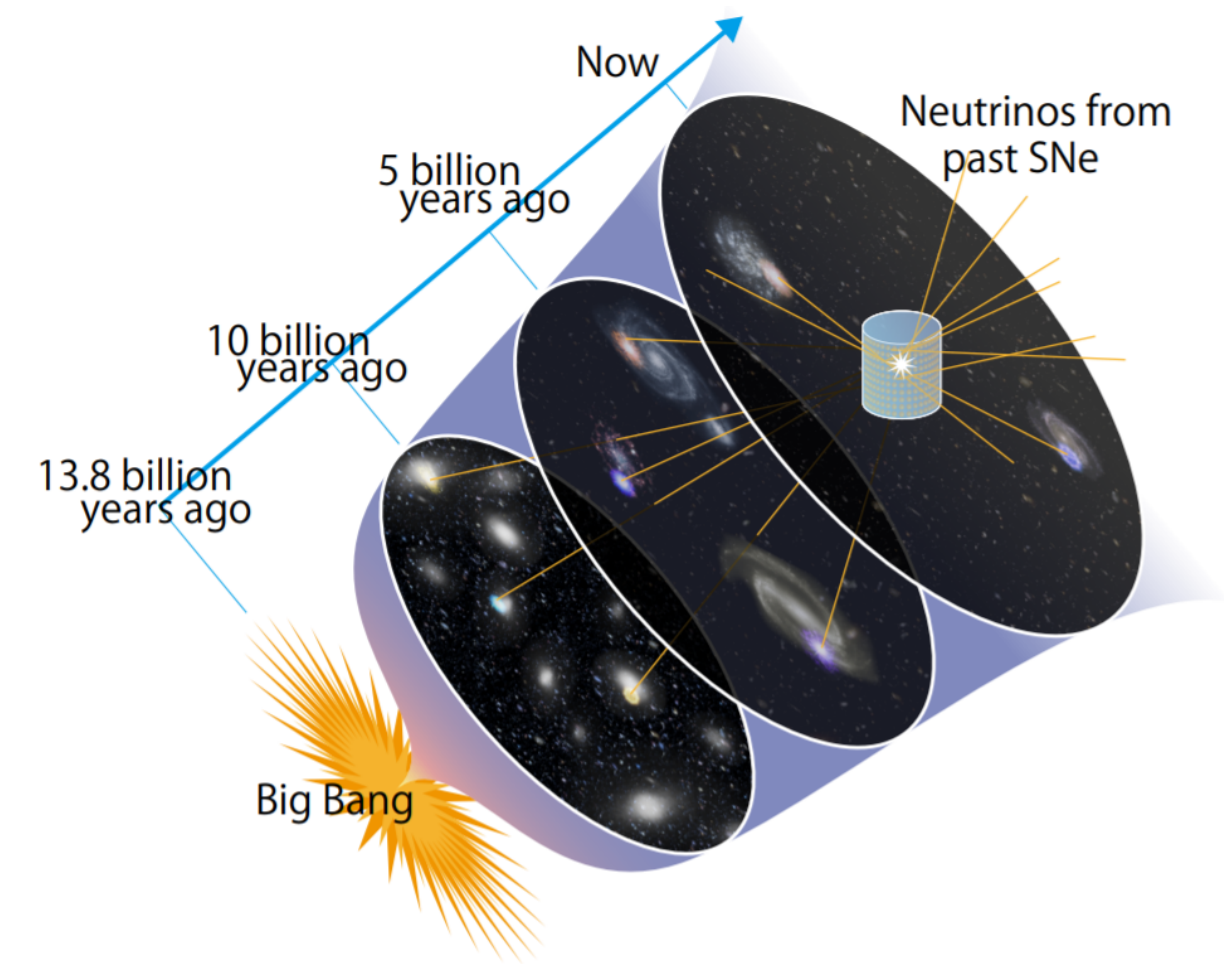
- 過去の超新星爆発で作られ、現在の宇宙に蓄積していると考えられるニュートリノ

宇宙のどこかで、毎秒数個の超新星爆発が起こっている  
これまでの宇宙の歴史では $O(10^{18})$ 回の爆発があったはず

- 爆発が起こった時期によって赤方偏移したスペクトルの重ね合わせ

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

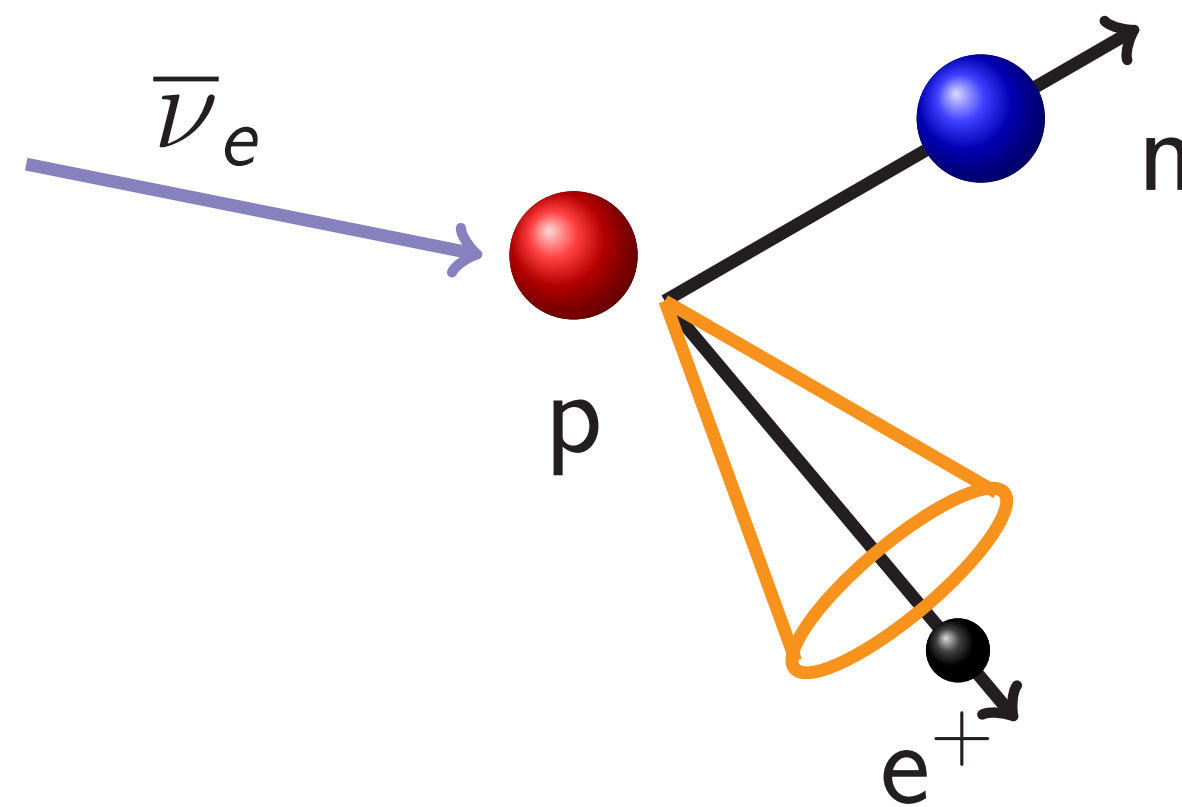
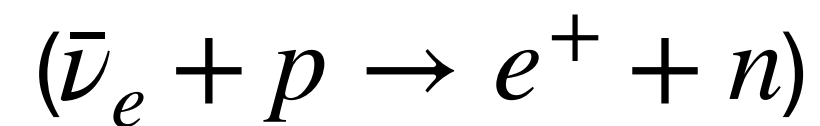
- 多くの物理モデルが存在
  - 星形成の歴史
  - 超新星爆発のメカニズム
  - ニュートリノ自身の性質



# 超新星背景ニュートリノの信号

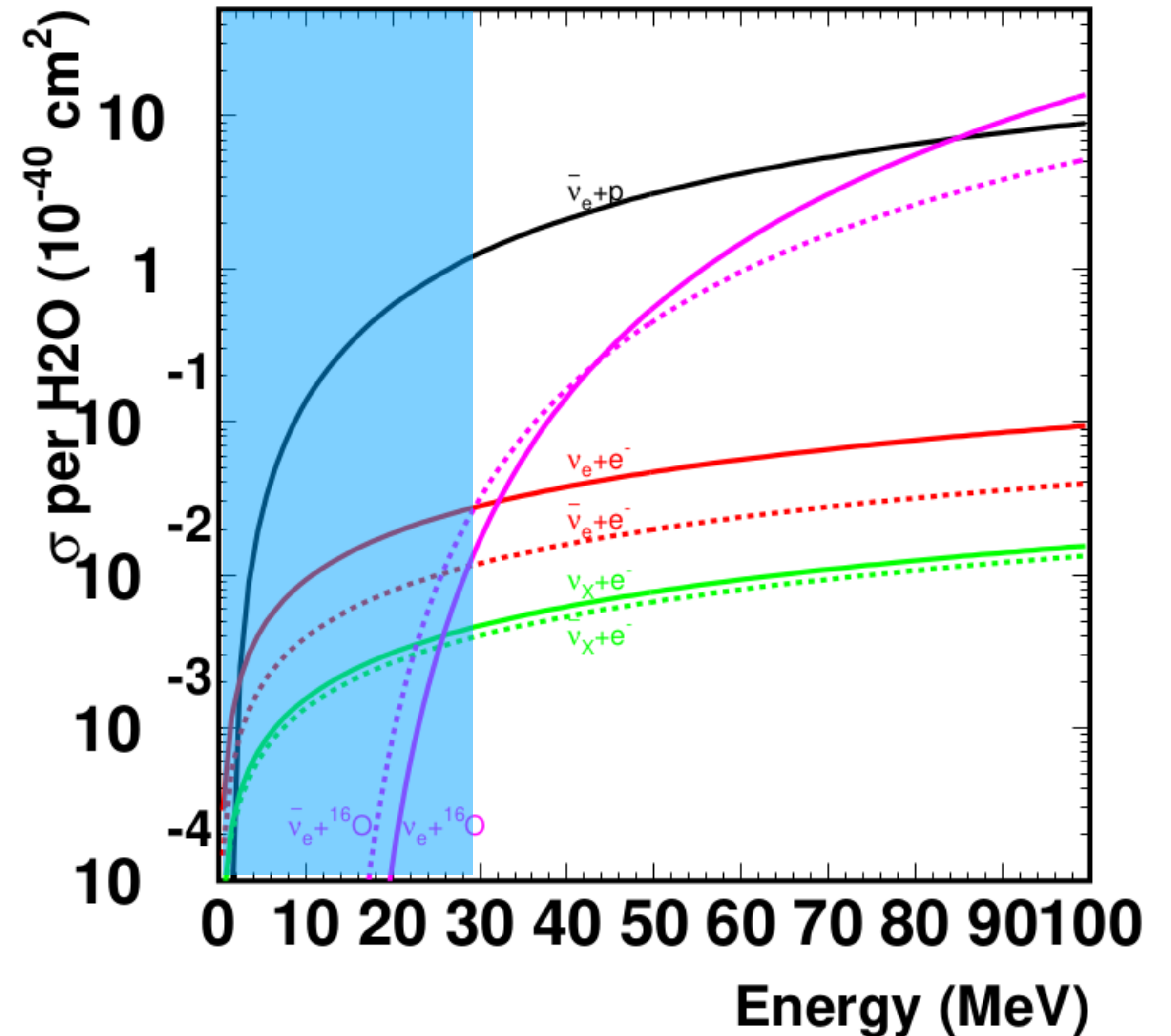
非常に稀な信号: a few interactions / year / SK

- 信号事象: 逆ベータ崩壊 (Inverse Beta Decay)



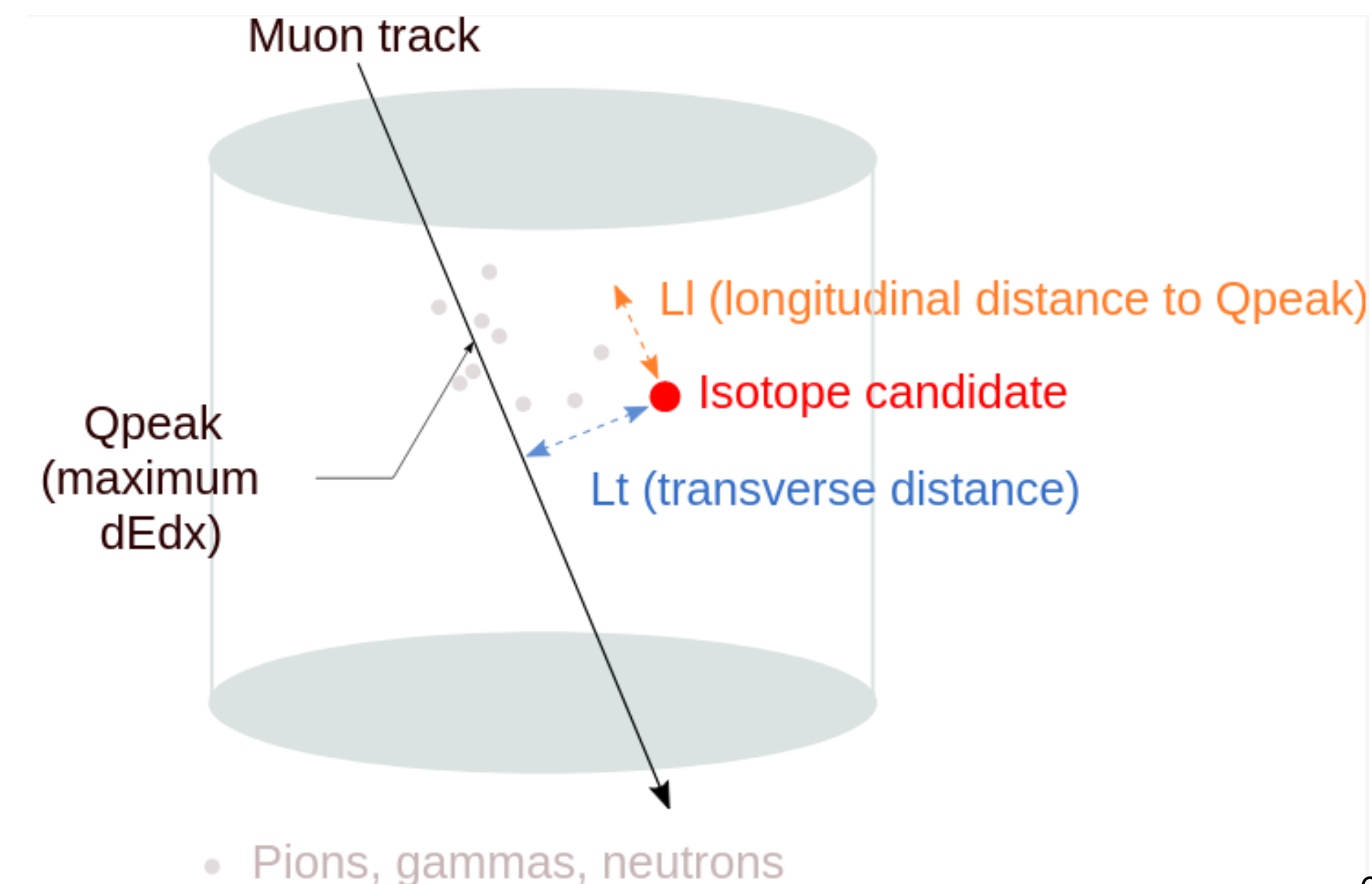
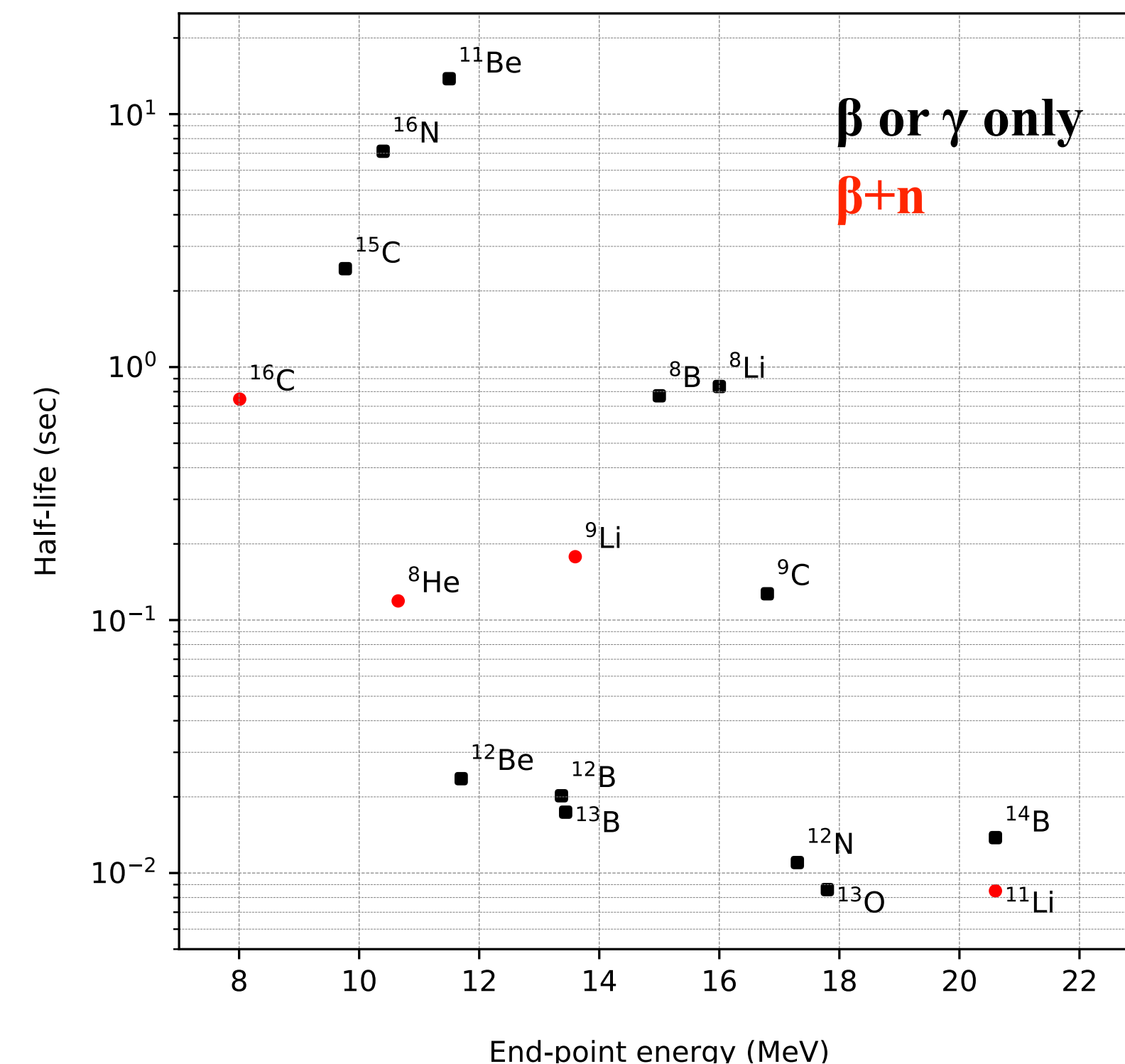
## イベント選択

- 宇宙線による核破碎事象のカット
- 陽電子選別: チェレンコフリングの「電子らしさ」
- 中性子タグ



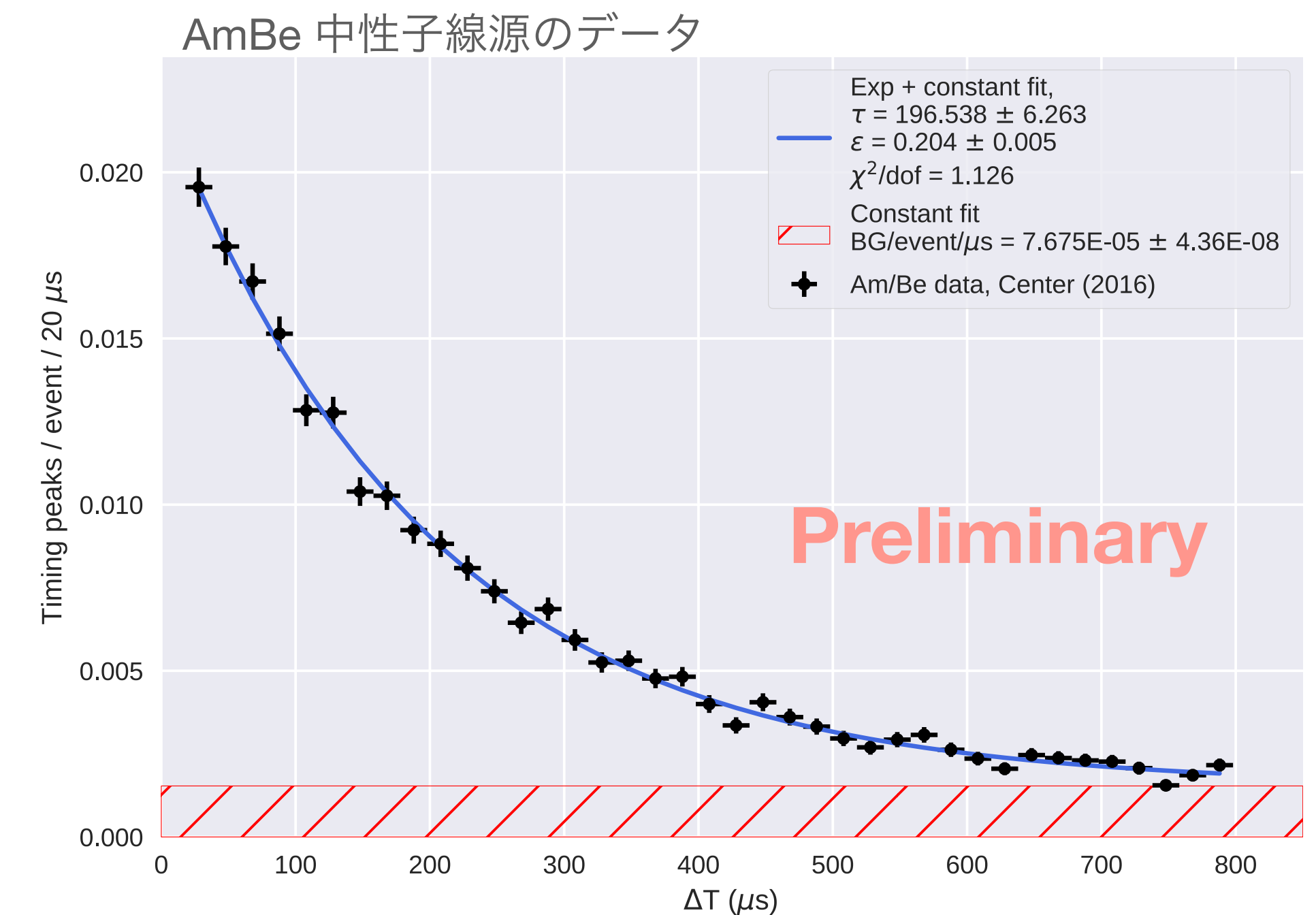
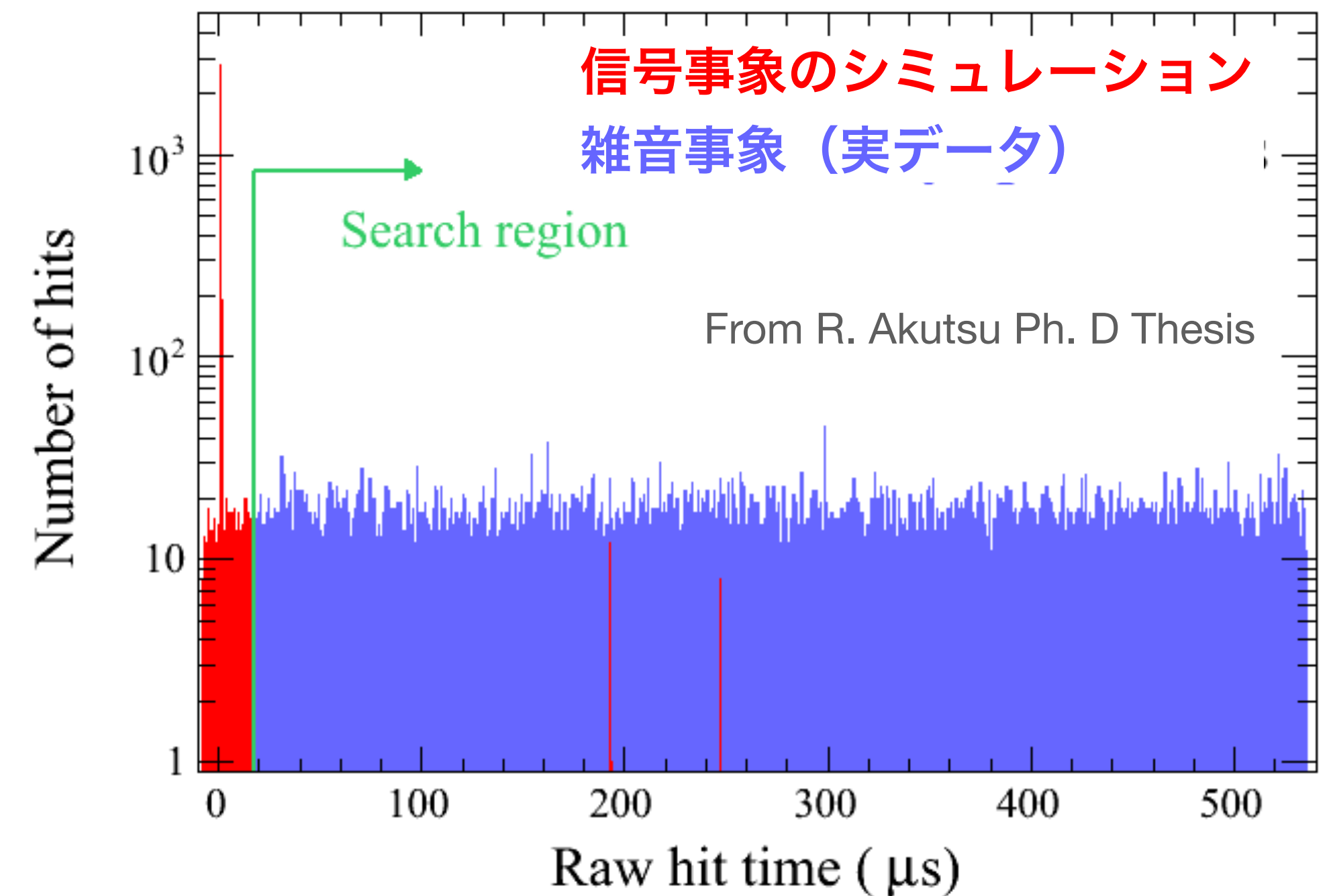
# 核破砕事象の削減

- スーパーカミオカンデ: 約2 Hzで宇宙線が検出器内を通過
- 核破砕(spallation)反応により、バックグラウンドとなるベータ崩壊核種を作る
- 10 MeV付近では一番「ありふれた」イベント
- 中性子を伴わない崩壊をする核種 (>99%)
  - ➡ ミューオンとの相関と中性子タグの合わせ技で落とす
- 中性子を伴う崩壊をする核種 ( ${}^9\text{Li}$ など, < 1%)
  - ➡ ミューオンとの相関で落とすしかない
- 実際のデータを元に、ミューオンとの距離・時間差・シャワーの情報などを用いたカットを開発
  - 核破砕事象の除去率: > 90%
  - Signal efficiency: 50-90% (エネルギーによる)

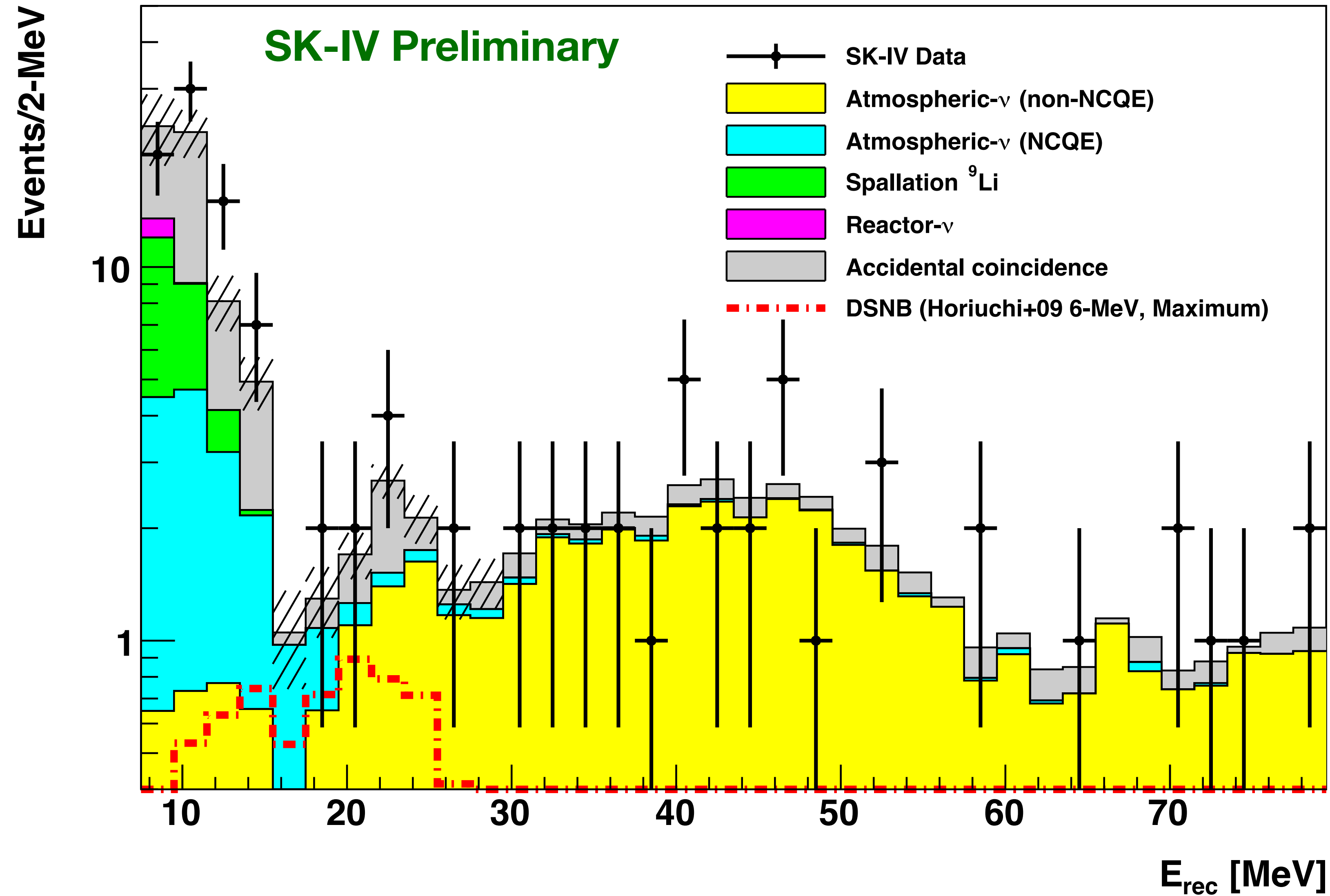


# 純水中での中性子検出

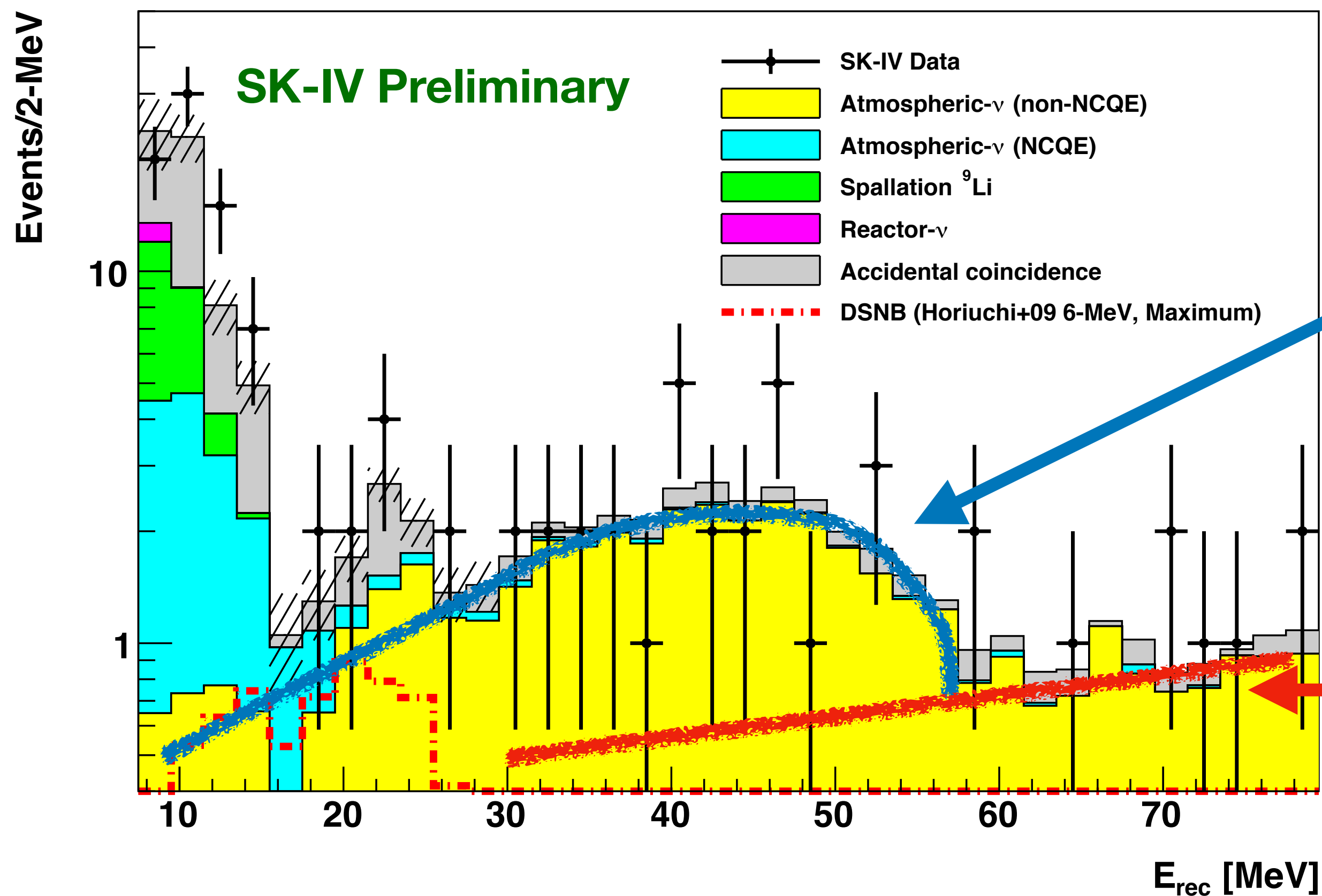
- スーパーカミオカンデ(純水中)での中性子の信号：
  - 中性子の水素原子核による吸収:  
$$n + H \rightarrow D + \gamma(2.2 \text{ MeV})$$
    - 平均7PMTヒット (11,000本中)
    - 環境放射線等のノイズに埋もれている
- ~9 MeV以上のイベントがあった場合、その後約500 usの間の全てのヒットを記録
- 機械学習を使った、中性子選択アルゴリズムを開発
  - 18-30%の信号検出効率と0.2-3%の誤検出率を達成



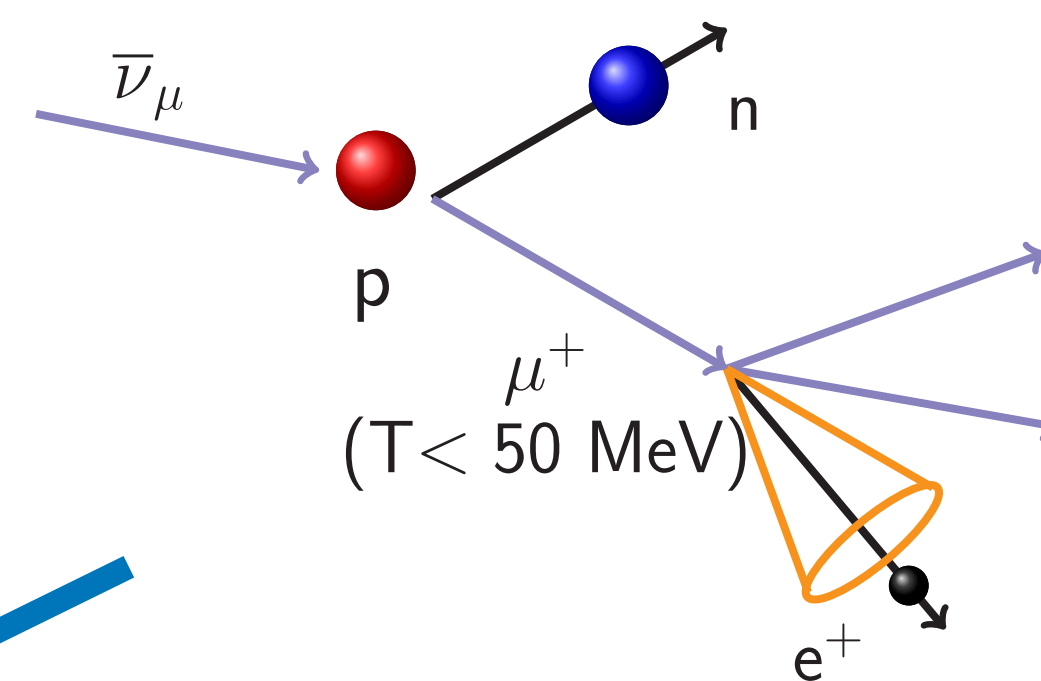
# SK-IV(純水) での探索結果



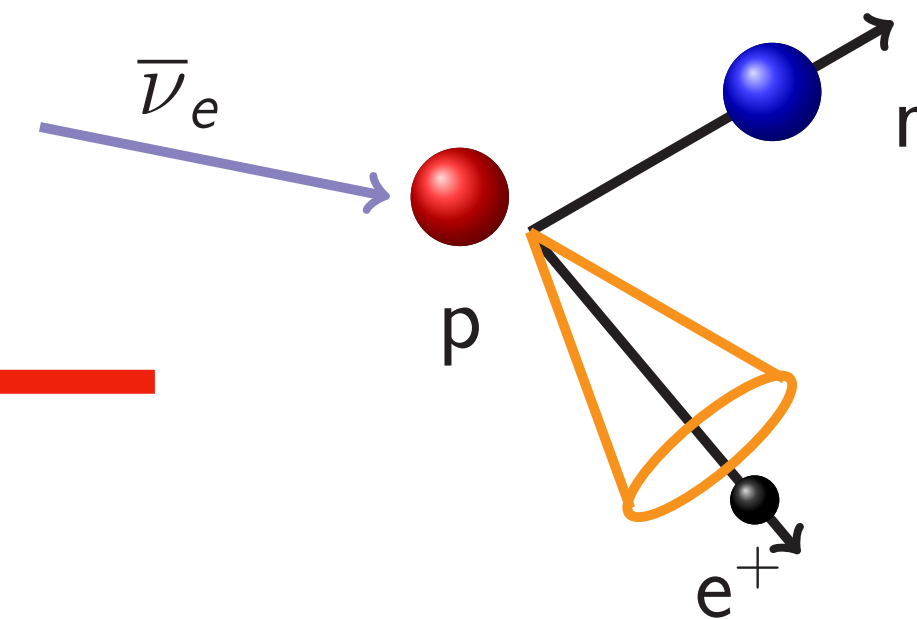
# バックグラウンド: 大気ニュートリノCC反応



$\nu_\mu$  CC



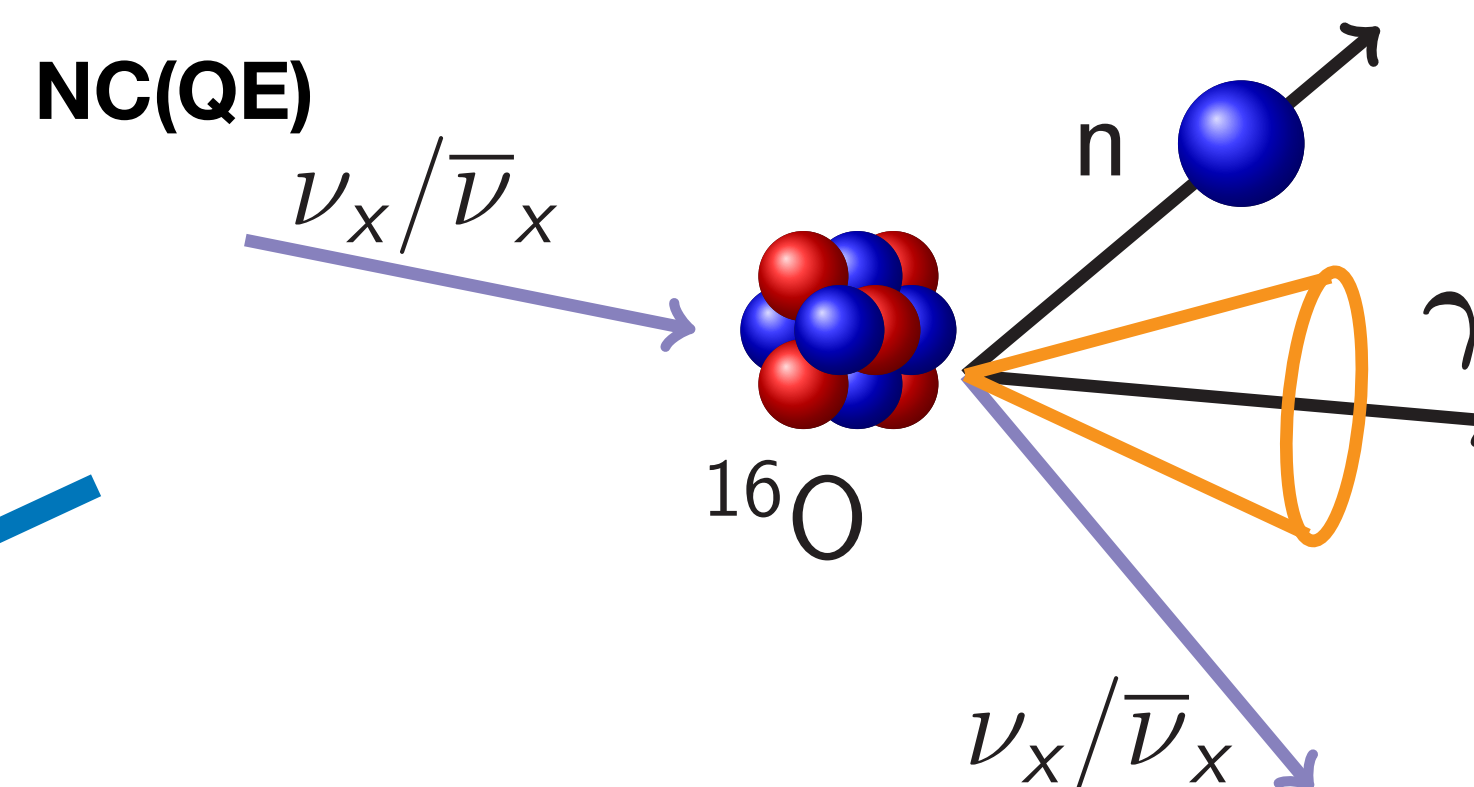
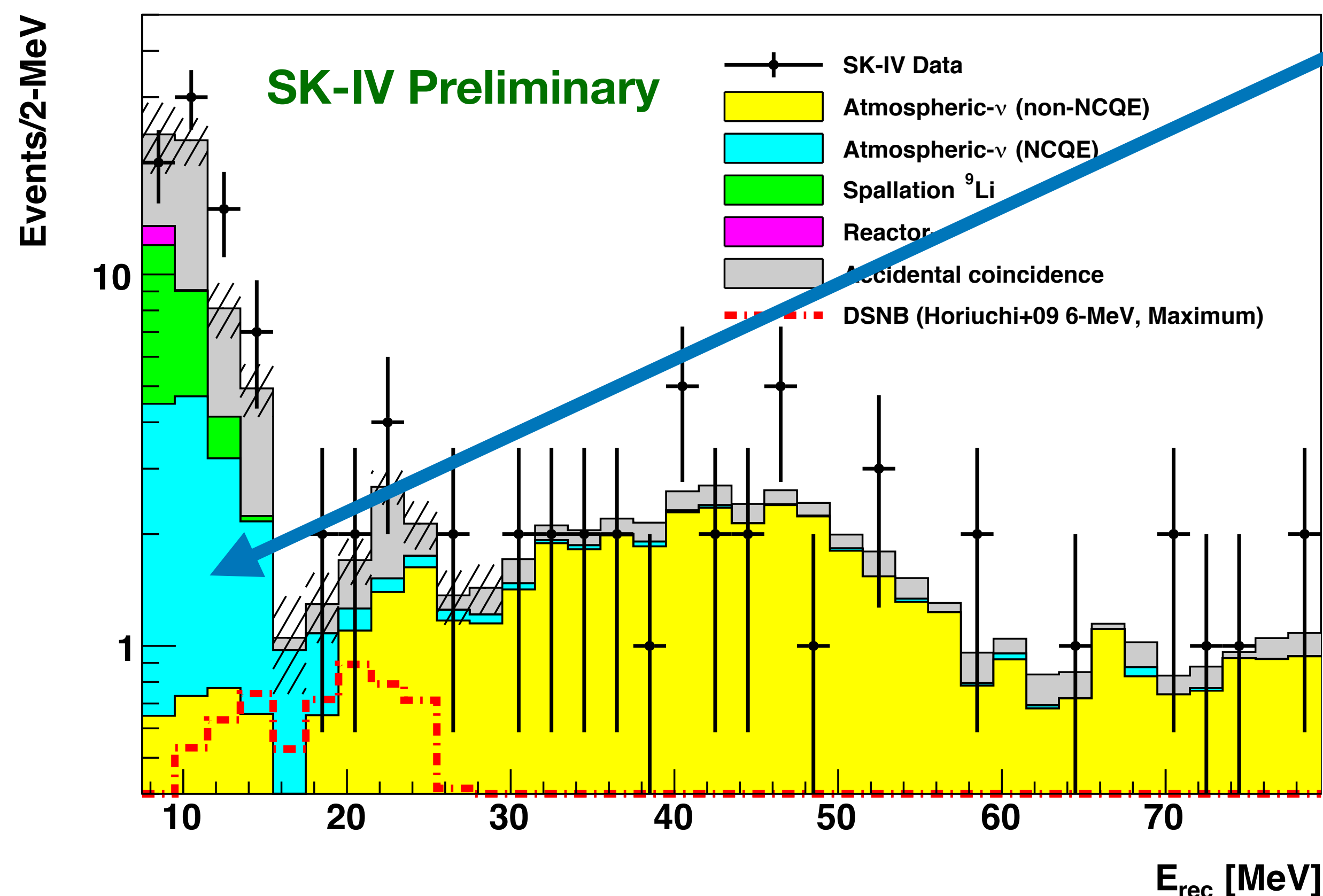
$\nu_e$  CC



- ミューオンがチェレンコフ閾値以下で見えず崩壊電子のみが観測される
- エネルギー分布はよく知られたMichael spectrumになる
- 50 MeV以上の主要な成分
- DSNB領域の寄与は小さい

これらのバックグラウンドを  
30 MeV以上のイベントを用いて制限  
系統誤差: ~20%

# バックグラウンド: 大気ニュートリノNC反応



- 反応数やスペクトルに大きな不定性

## 不定性の要素:

(大気ニュートリノフラックス)

X (NCQE 反応断面積) ← T2K実験の測定から制限

X (中性子生成数) ← T2K実験のCC測定から評価

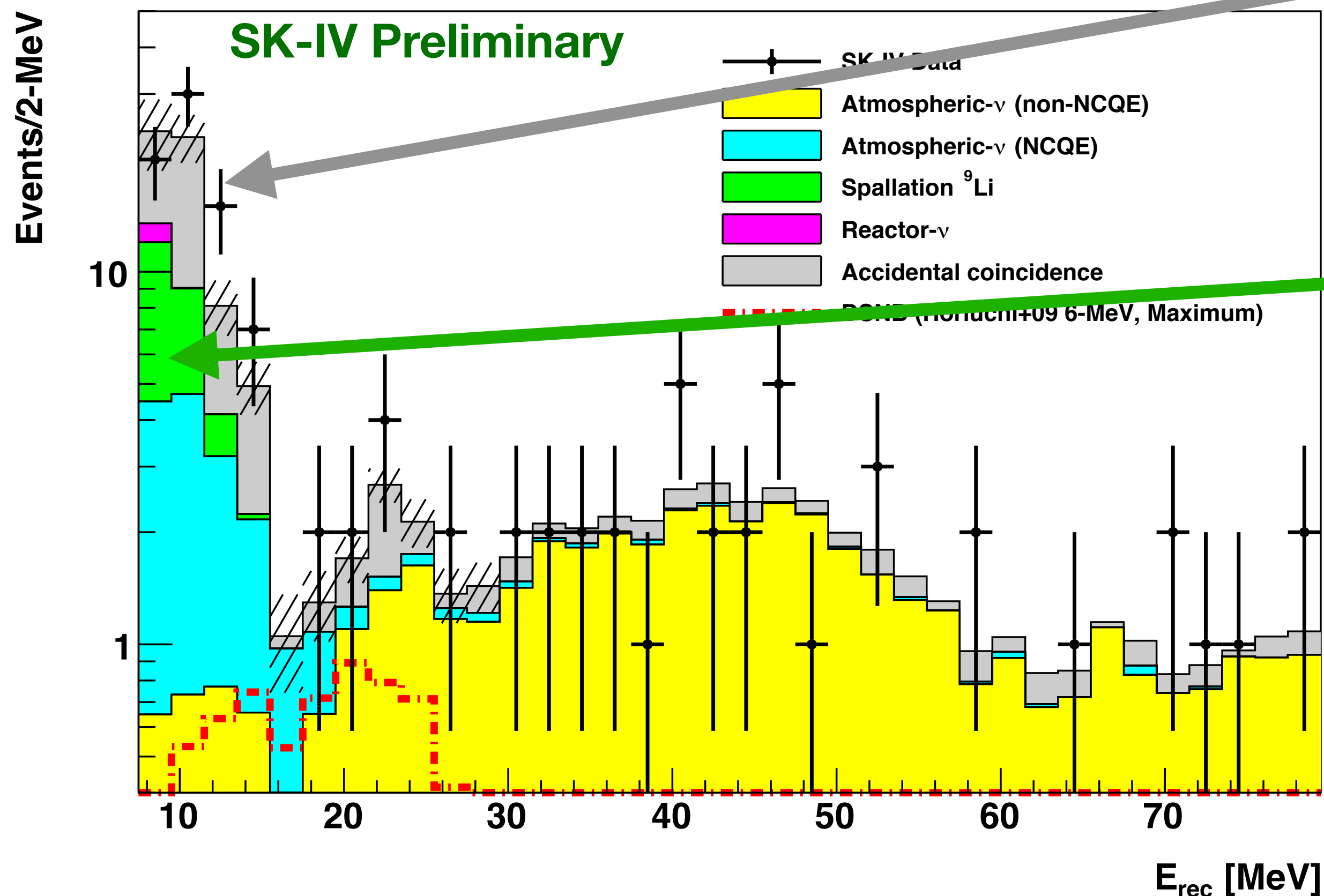
X (中性子検出効率) ← AmBe中性子線源を用いた  
測定結果から評価

**系統誤差: 60-80% (エネルギーに依存)**

これを理解して削減することが今後の最大の課題

詳しくは次の小汐さんの講演で

# バックグラウンド: AccidentalとSpallation

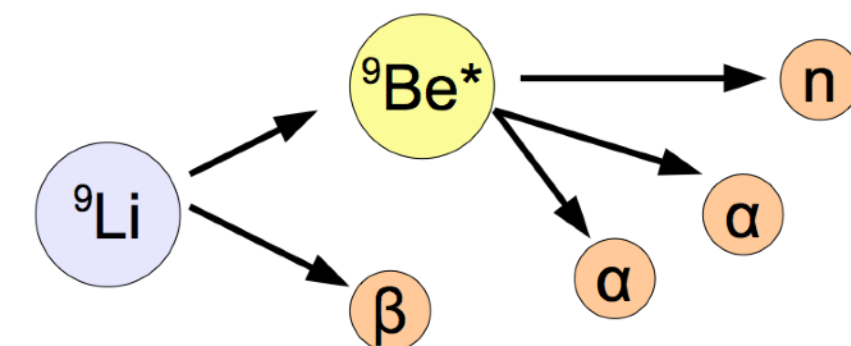


- **Accidental:**

- 主に(中性子を伴わない) 核破碎事象 + fake neutron

- **Spallation  ${}^9\text{Li}$ :**

- Beta + n崩壊をするので信号とトポロジーが同じ
- Spallation cutのみが武器

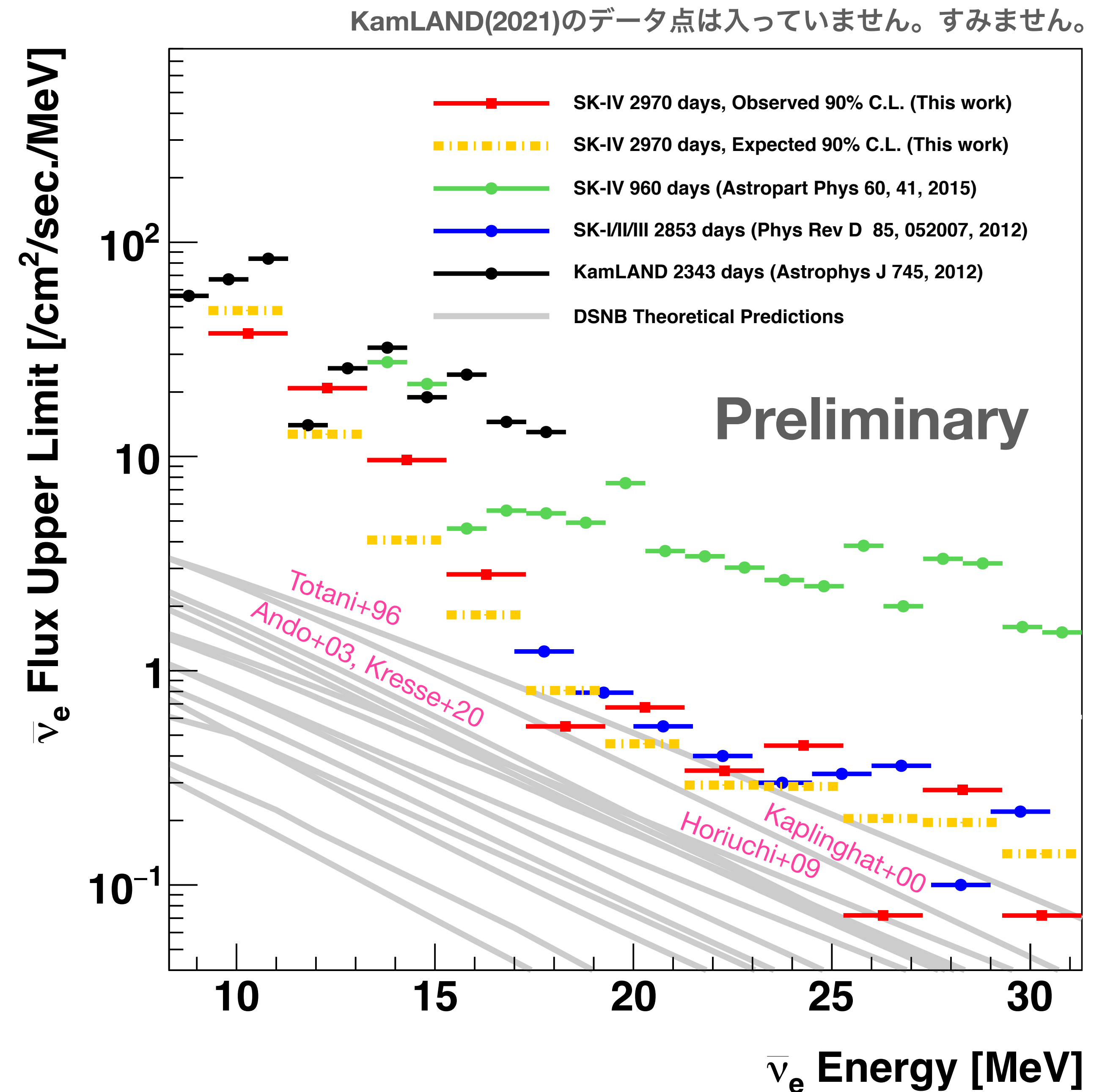


いずれもSpallation cutと中性子検出条件を厳しく設定することで減らすことができるが  
信号事象の検出効率とのトレードオフ

→エネルギー毎にカット条件を最適化

# Model-independent limit

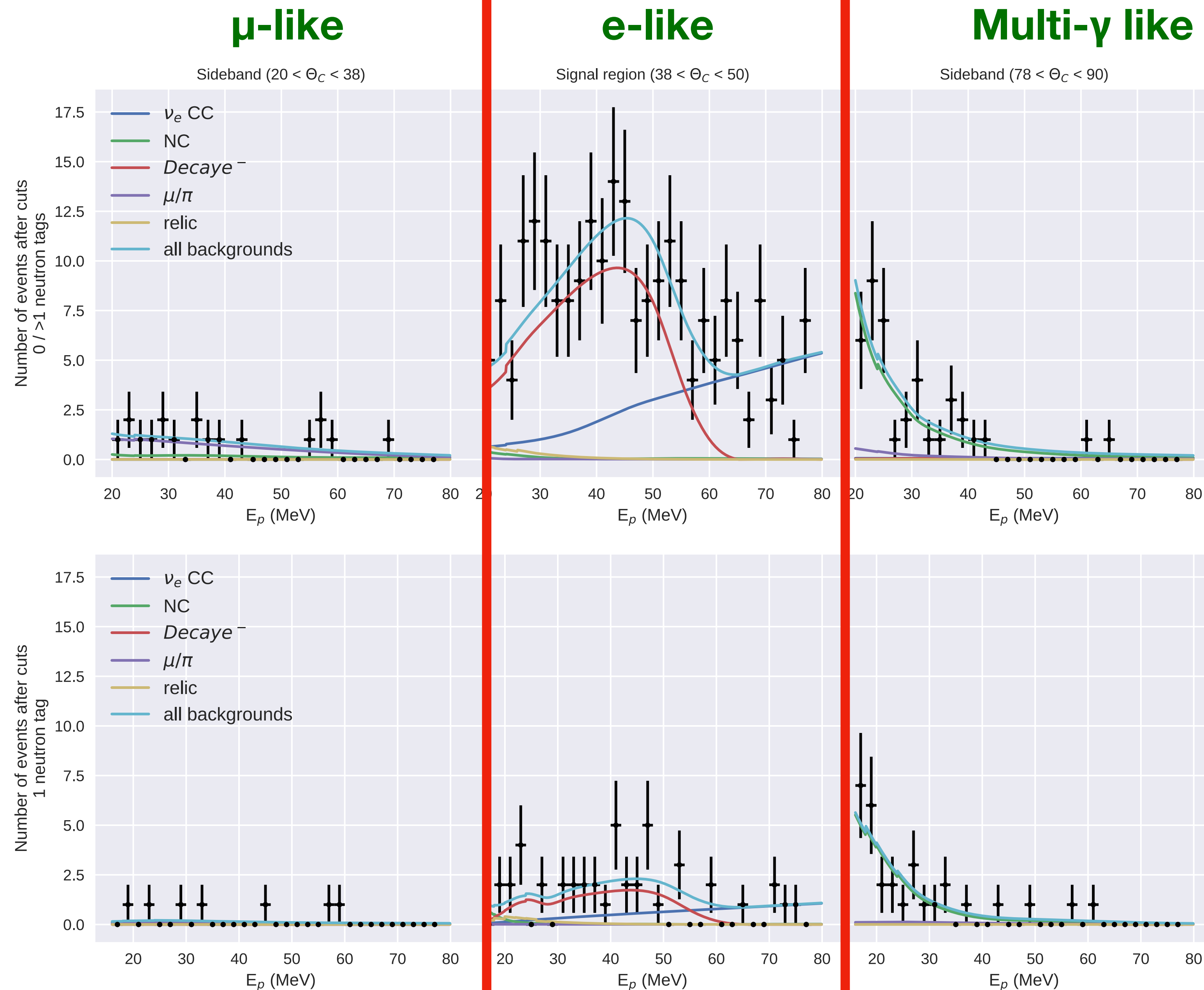
- $E_\nu > 13$  MeVで最も強い制限
- いくつかのモデルに既に感度が到達



# Spectrum analysis

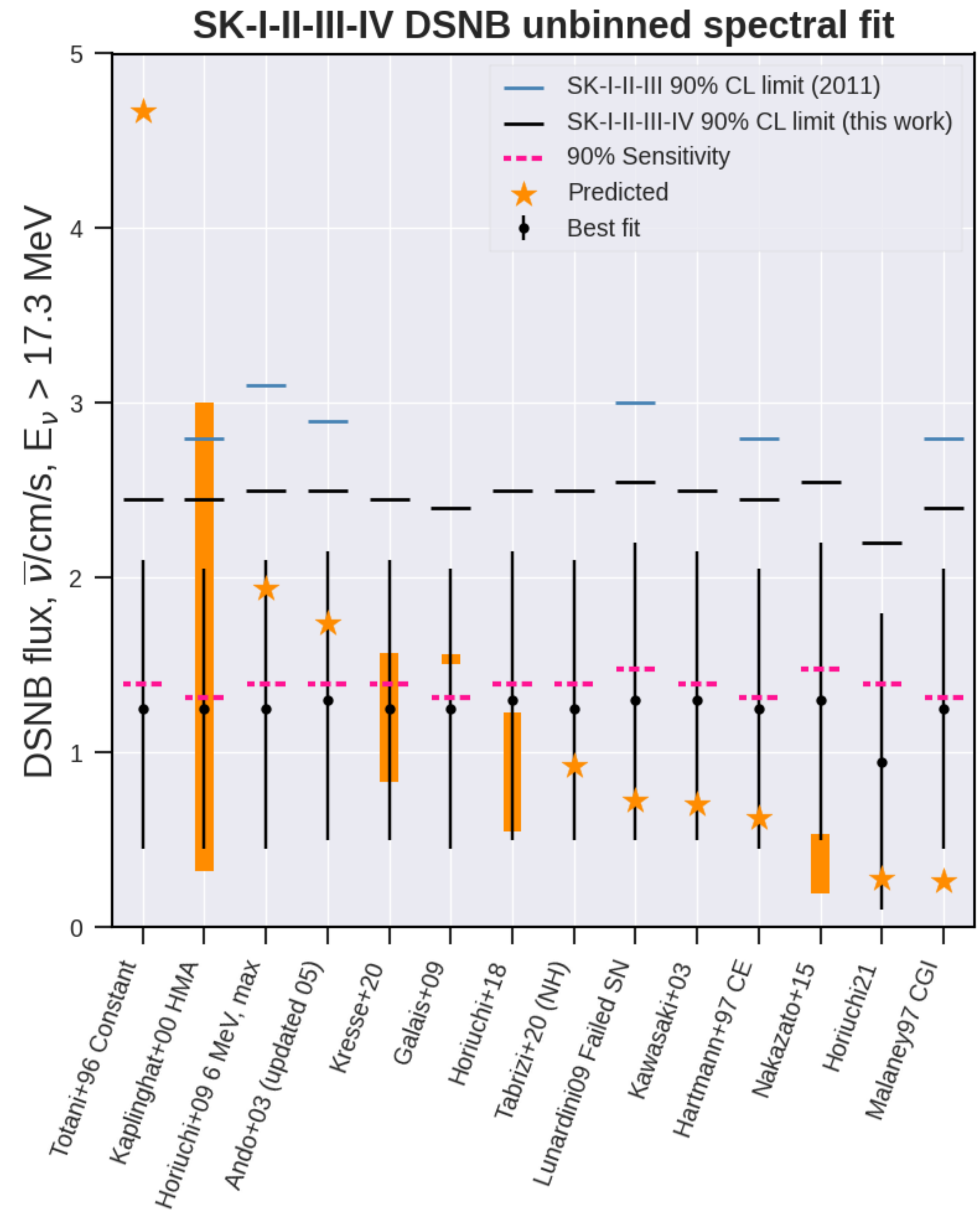
- モデル毎にエネルギースペクトルをフィットし超新星背景ニュートリノのフラックスを検証
- チェレンコフ光のリングパターンを用いて分離したside-band領域を同時にフィット

信号領域

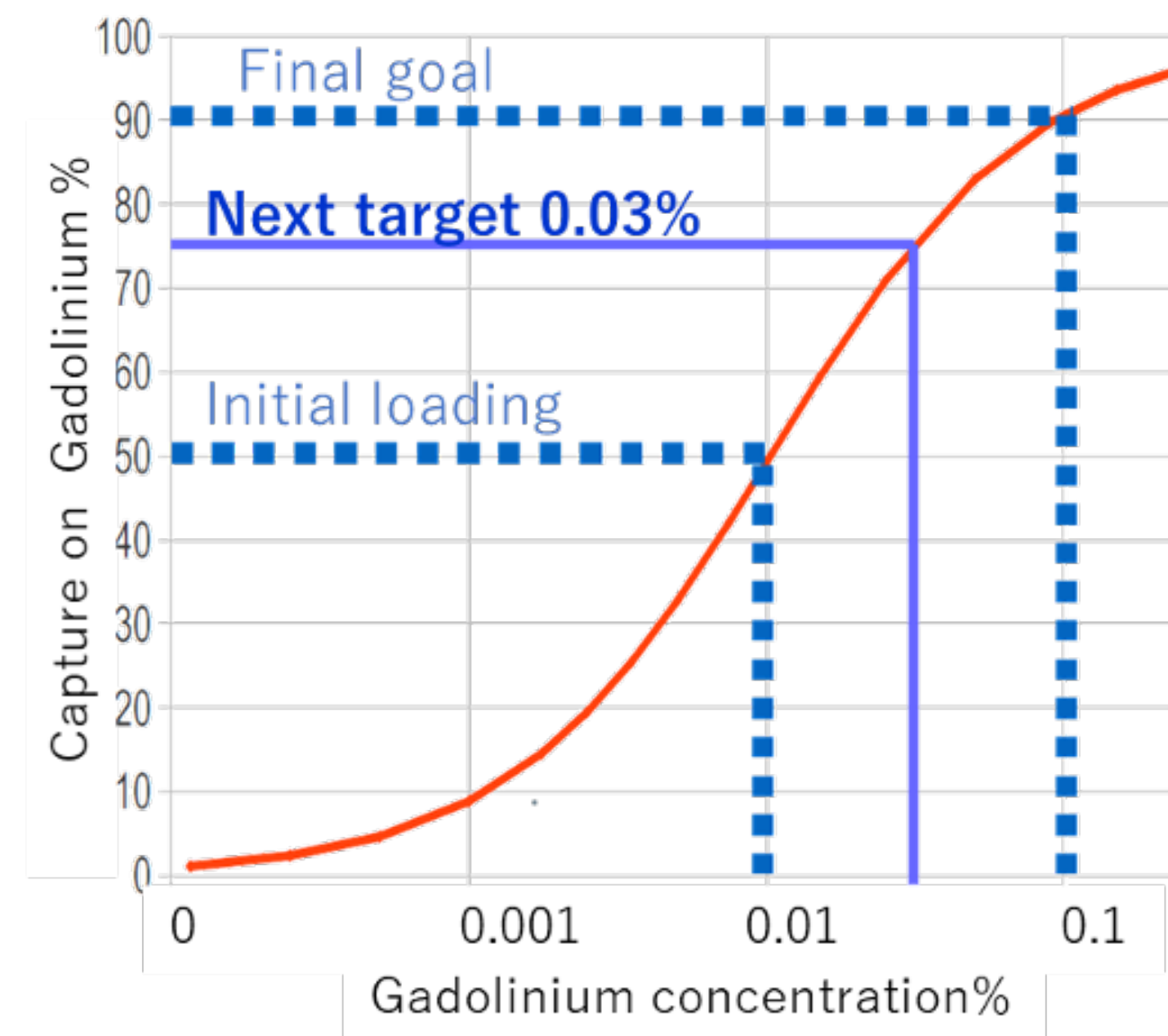
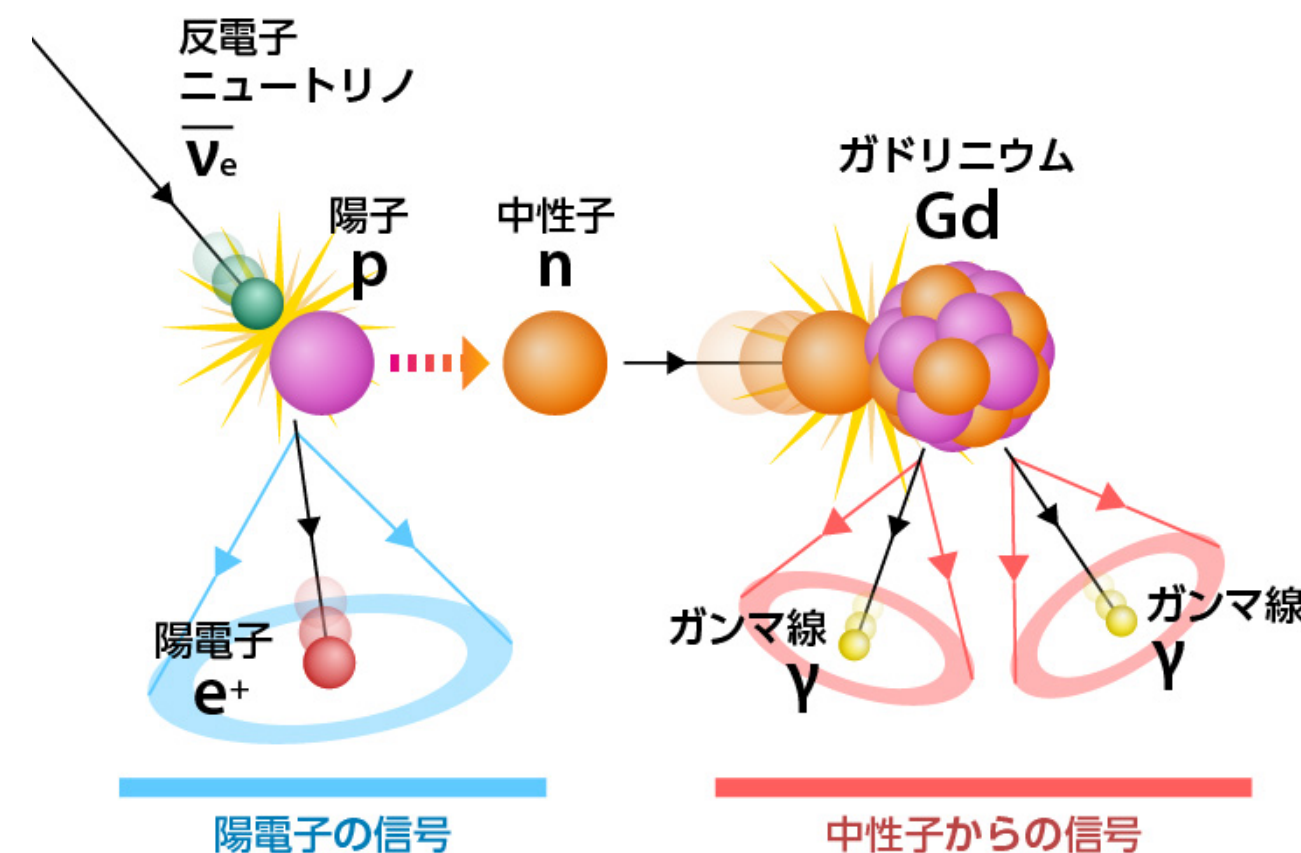
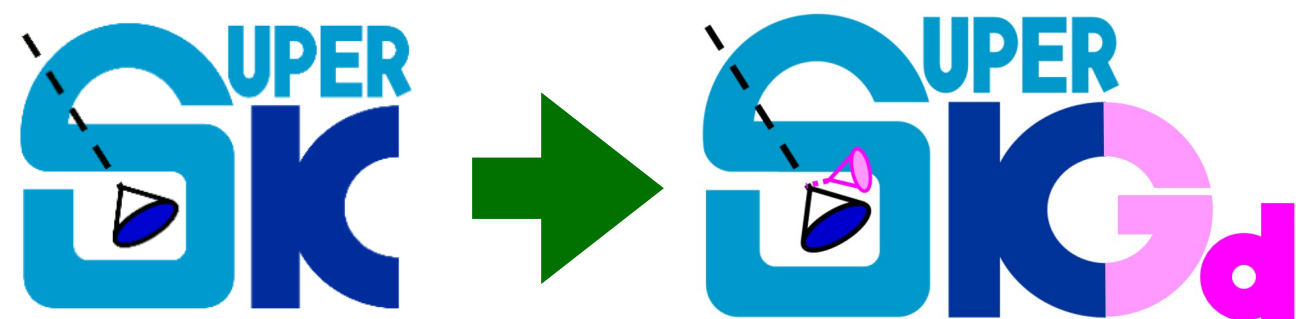


# Spectrum fit による制限

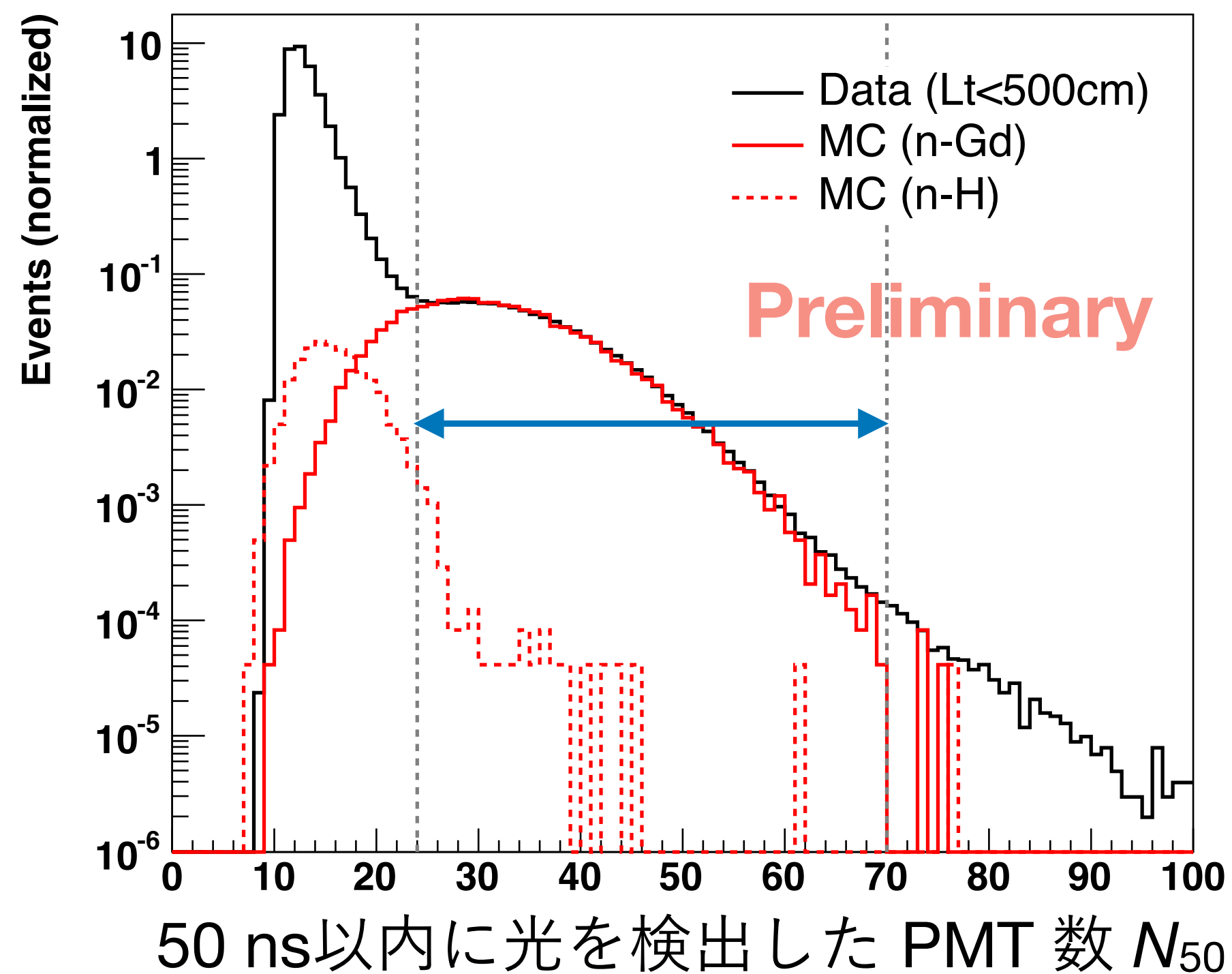
- 90% CL sensitivityは複数のモデル予想より下に到達
- バックグラウンドに対し観測数が約1 $\sigma$ 多く Sensitivityに比べ、リミットは悪くなっている
- 今後、SK-Gdの観測で大半のモデルが検証可能に
- 超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指す



# SK-Gd 開始 (2020 - )

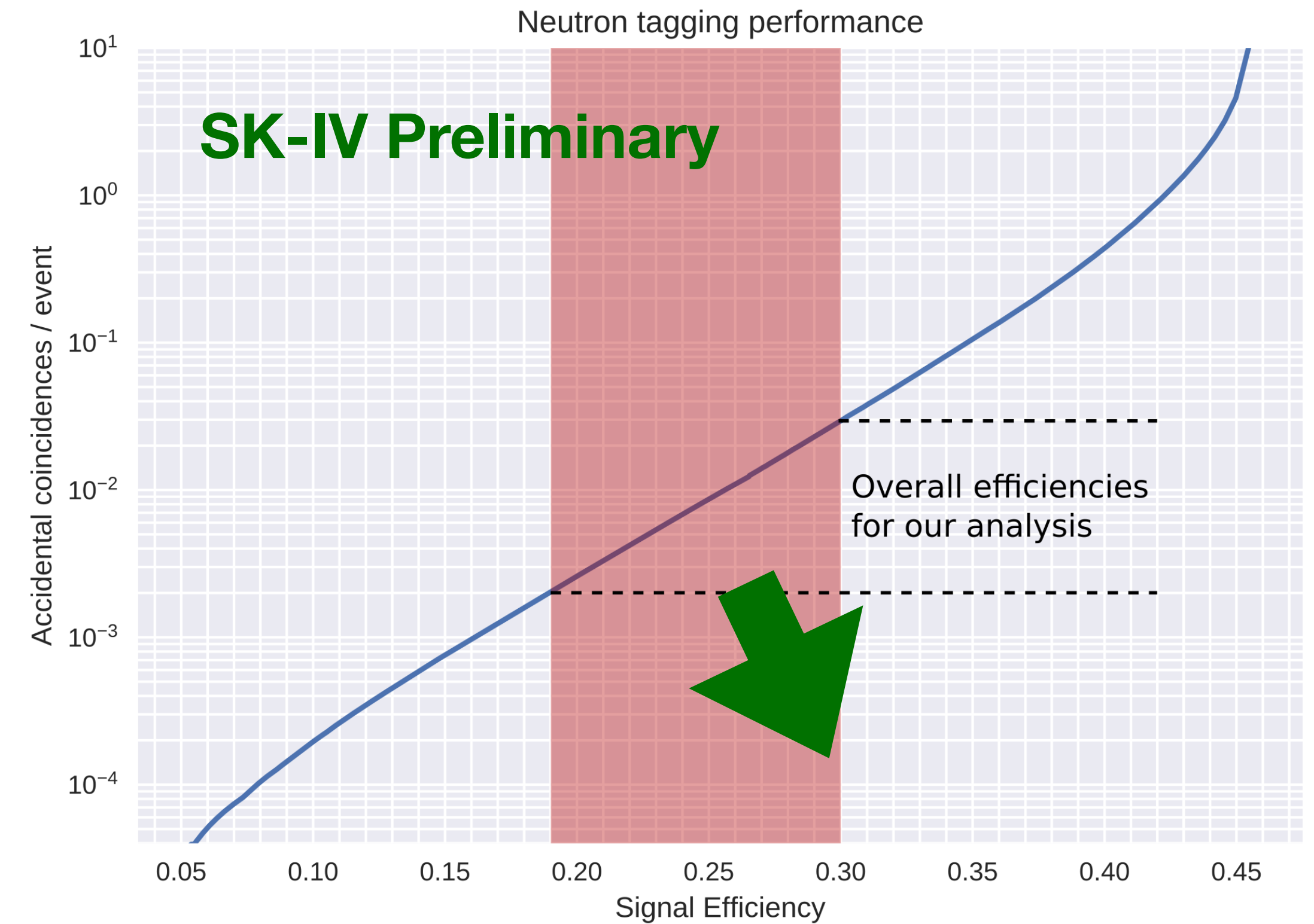
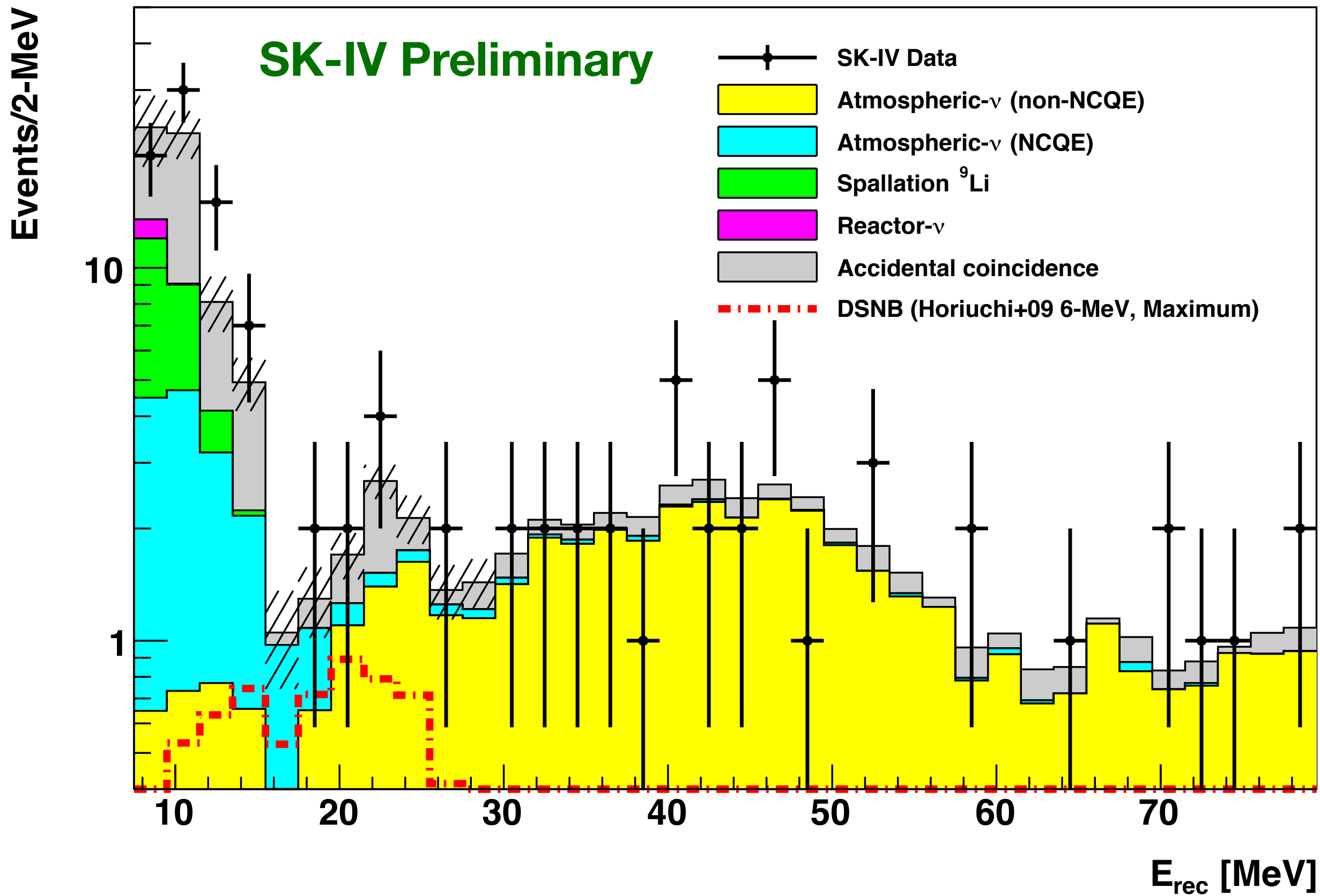


宇宙線核破碎により生じた中性子のヒット数



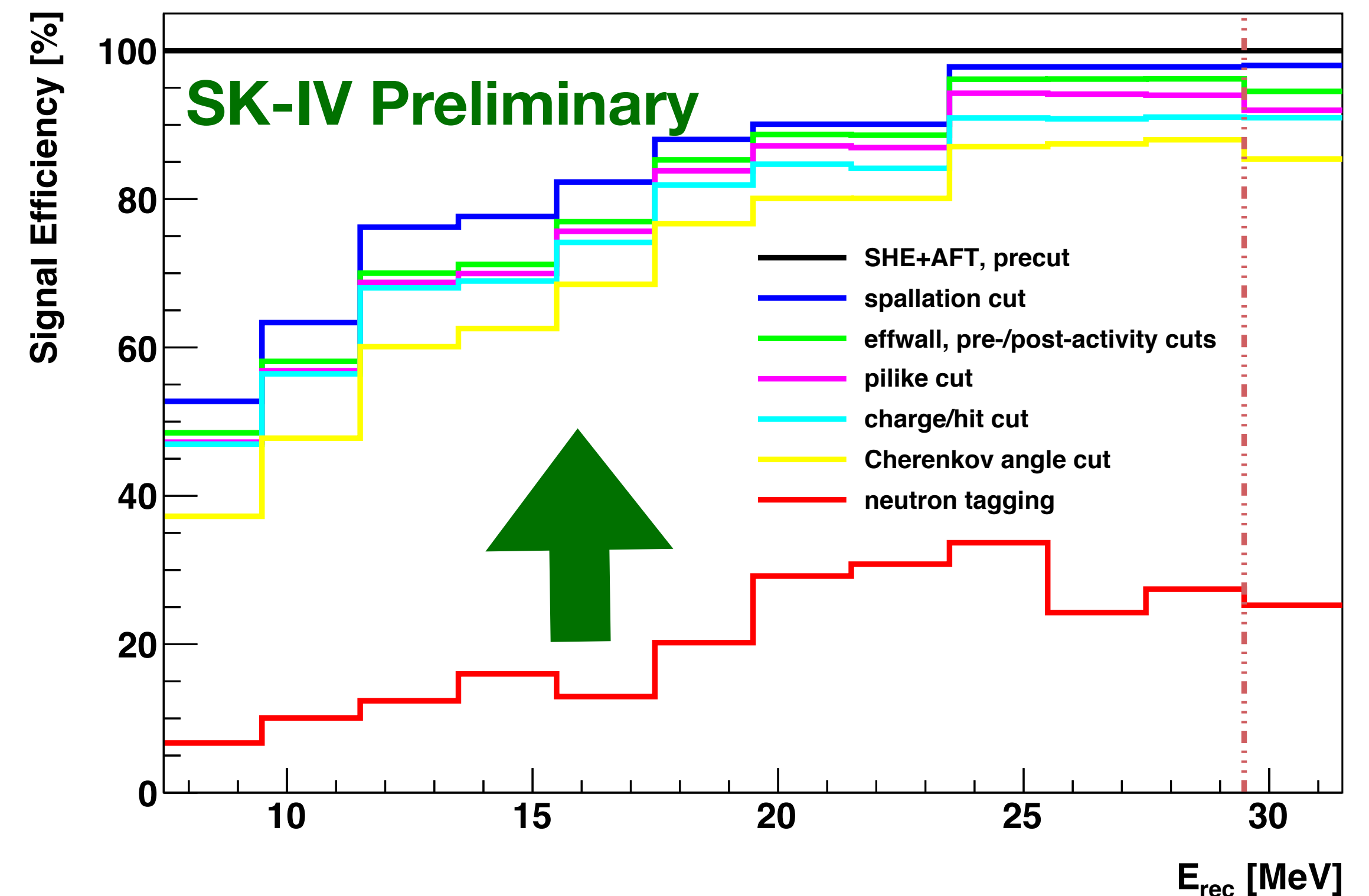
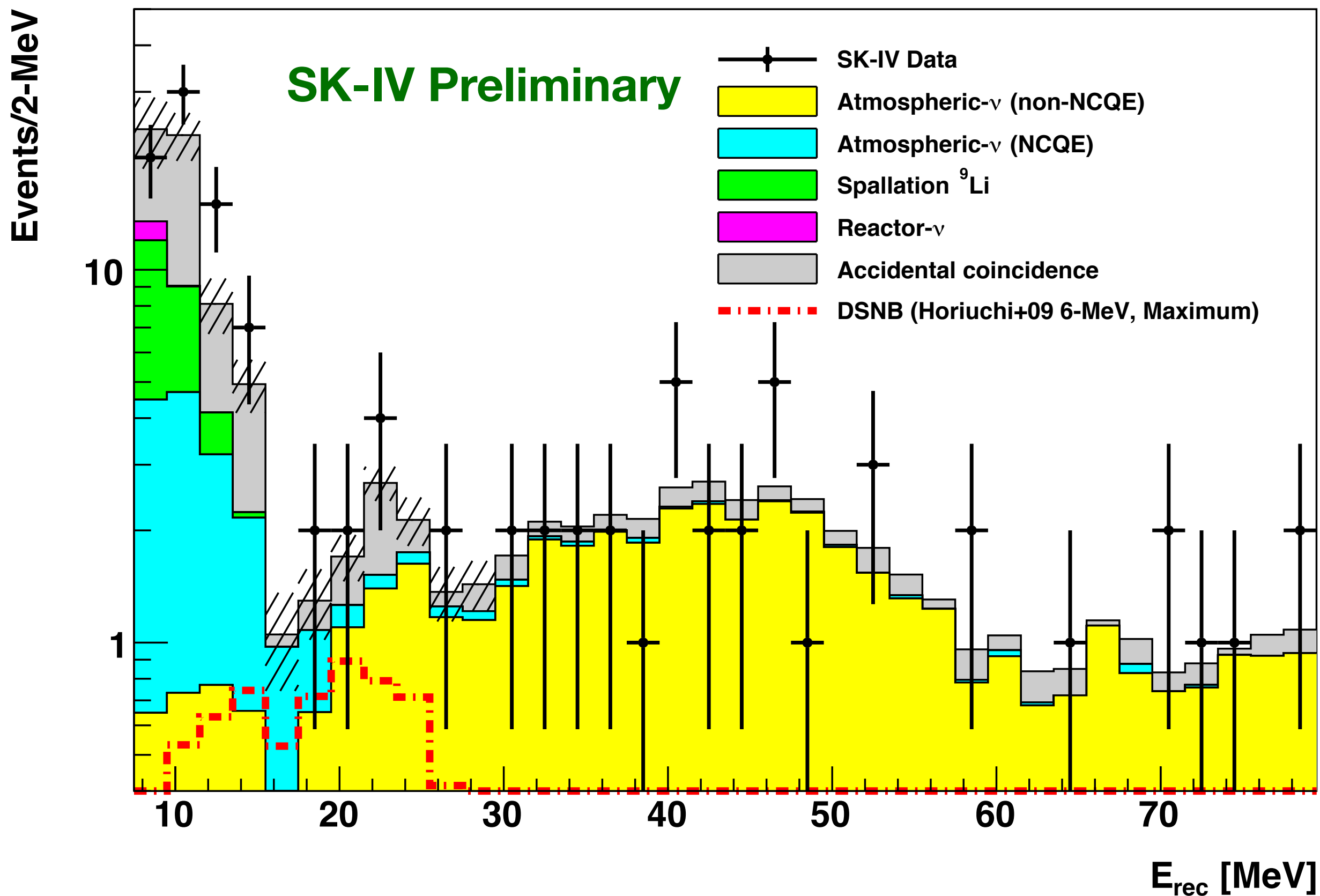
- 2020年、0.011%のGdを導入
- 2022年0.03%程度まで追加導入予定
- Gdに中性子捕獲反応からの合計~8MeVの $\gamma$ 線を捉える
  - 環境放射線との分離がはるかに容易に
  - 中性子の検出効率が飛躍的に向上

# SK-Gdの展望 (1)



- 純水では、中性子を誤検出することによるAccidental coincidenceが無視できない量残っていた
- Gdにより、検出効率を高く保ったまま、Accidentalの大幅な削減が可能に (およそ1/10以下)

# SK-Gdの展望 (2)



- Accidental backgroundの大幅な削減 (およそ1/10 以下)
- 中性子検出効率の増加による信号事象の統計量の増加 (数倍程度)
- あとは、残った大気ニュートリノ事象を理解・削減できれば信号が見えるはず→小汐さんの講演

SK-Gdからの結果にご期待ください

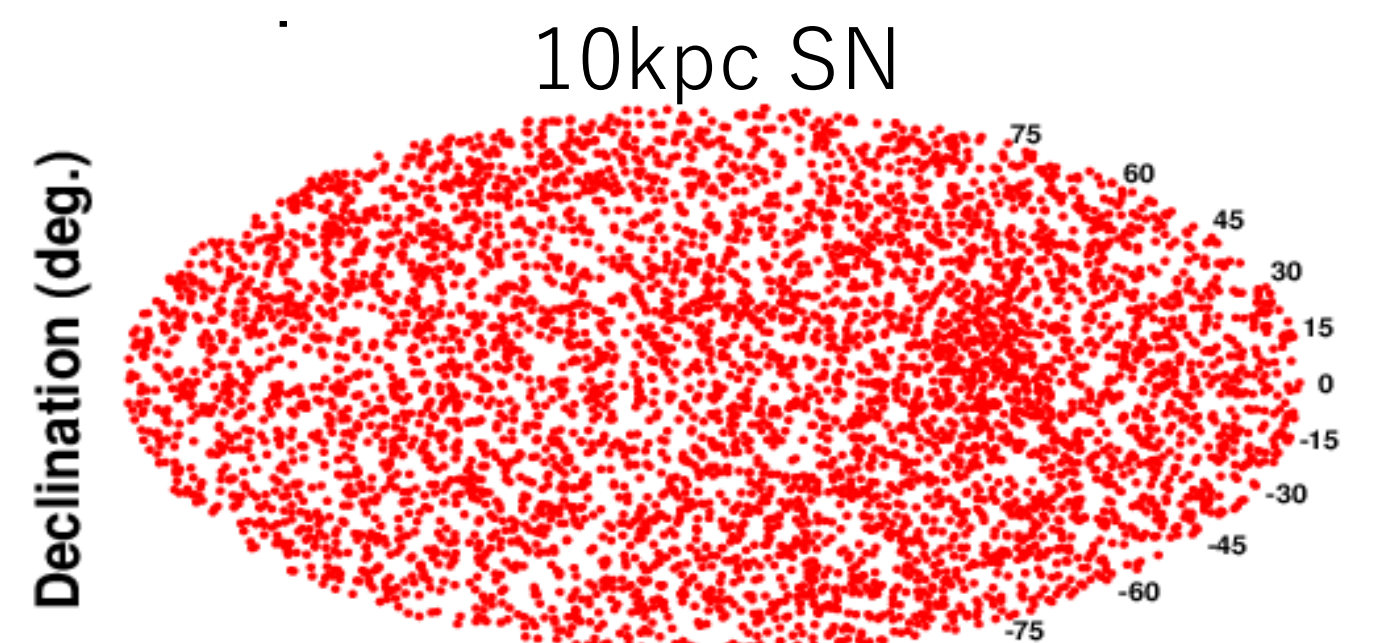
超新星爆発ニュートリノ

# 超新星爆発ニュートリノの方向再構成の向上

中性子タグを用いて、方向情報を持たない逆ベータ反応を除去し  
電子散乱選び出すことで方向精度を向上

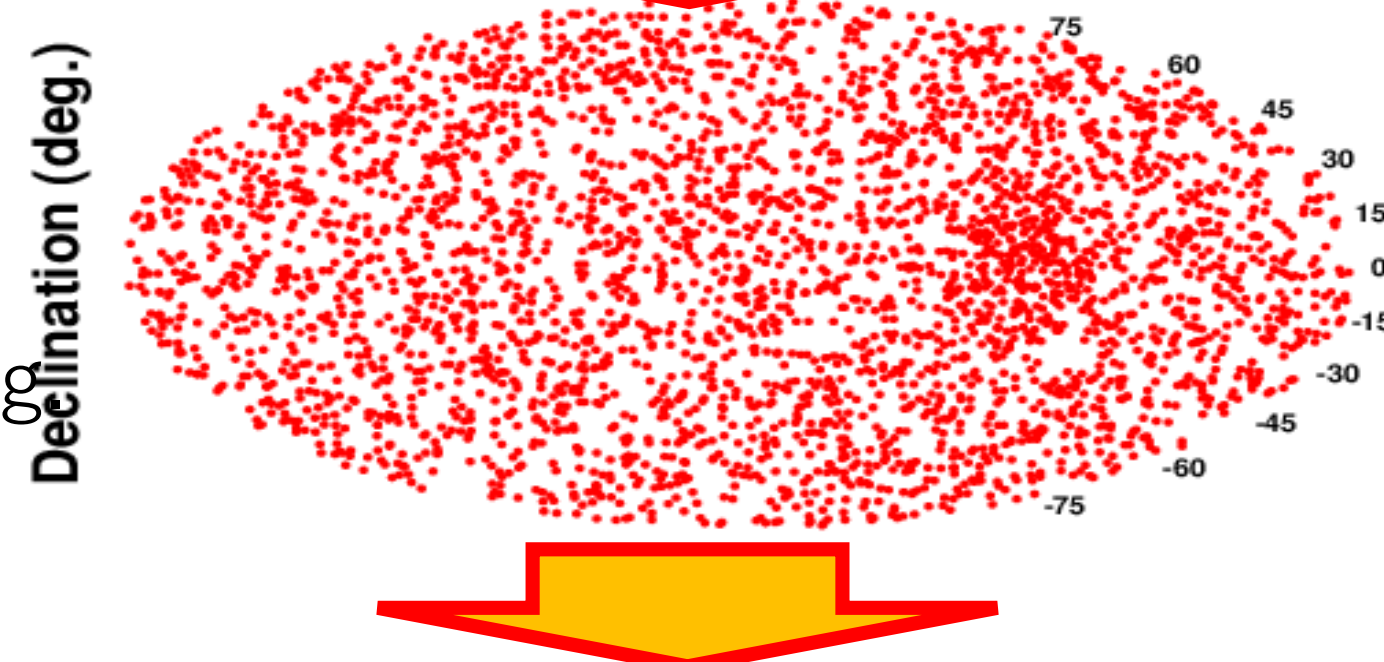
No Gd

Pointing accuracy  
at 10kpc SN :4deg  
(N.H case)



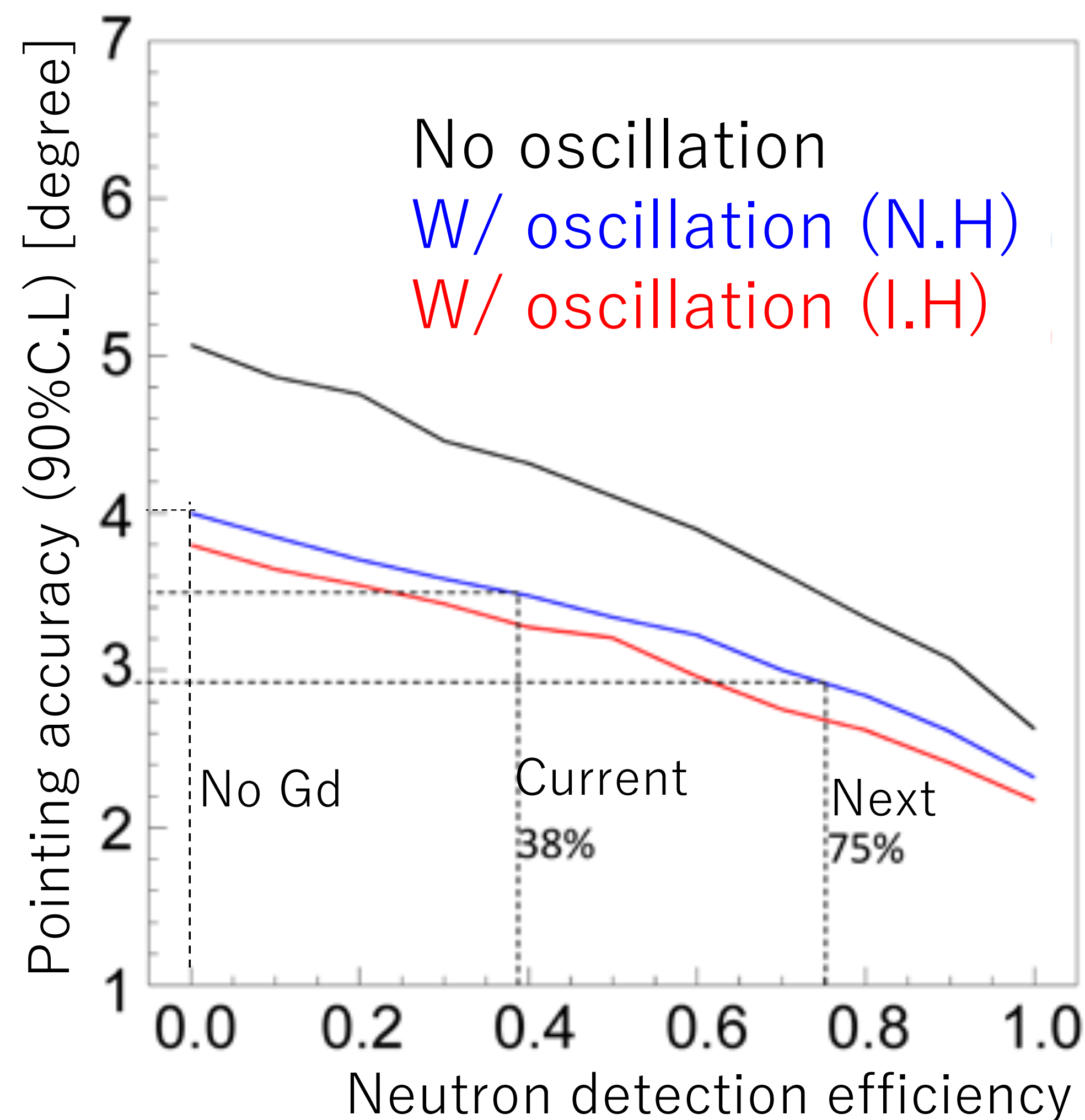
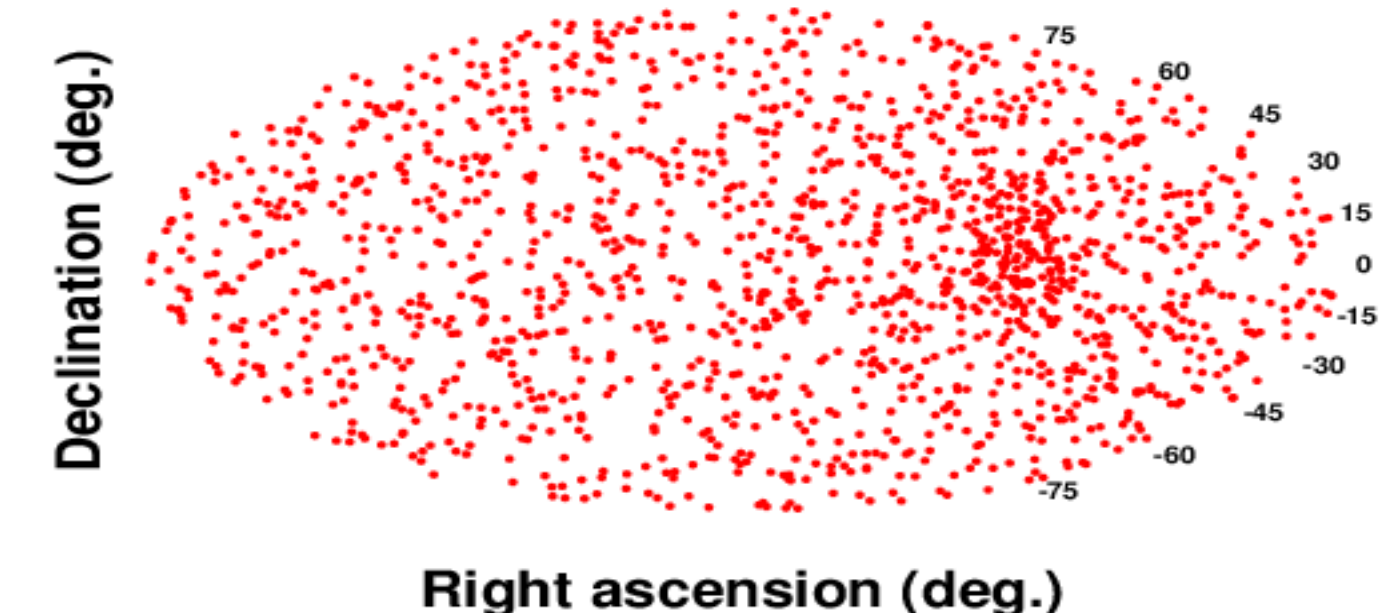
Current 3.5deg

(0.01%Gd,  
Search for delayed sig  
with current trigger  
threshold)

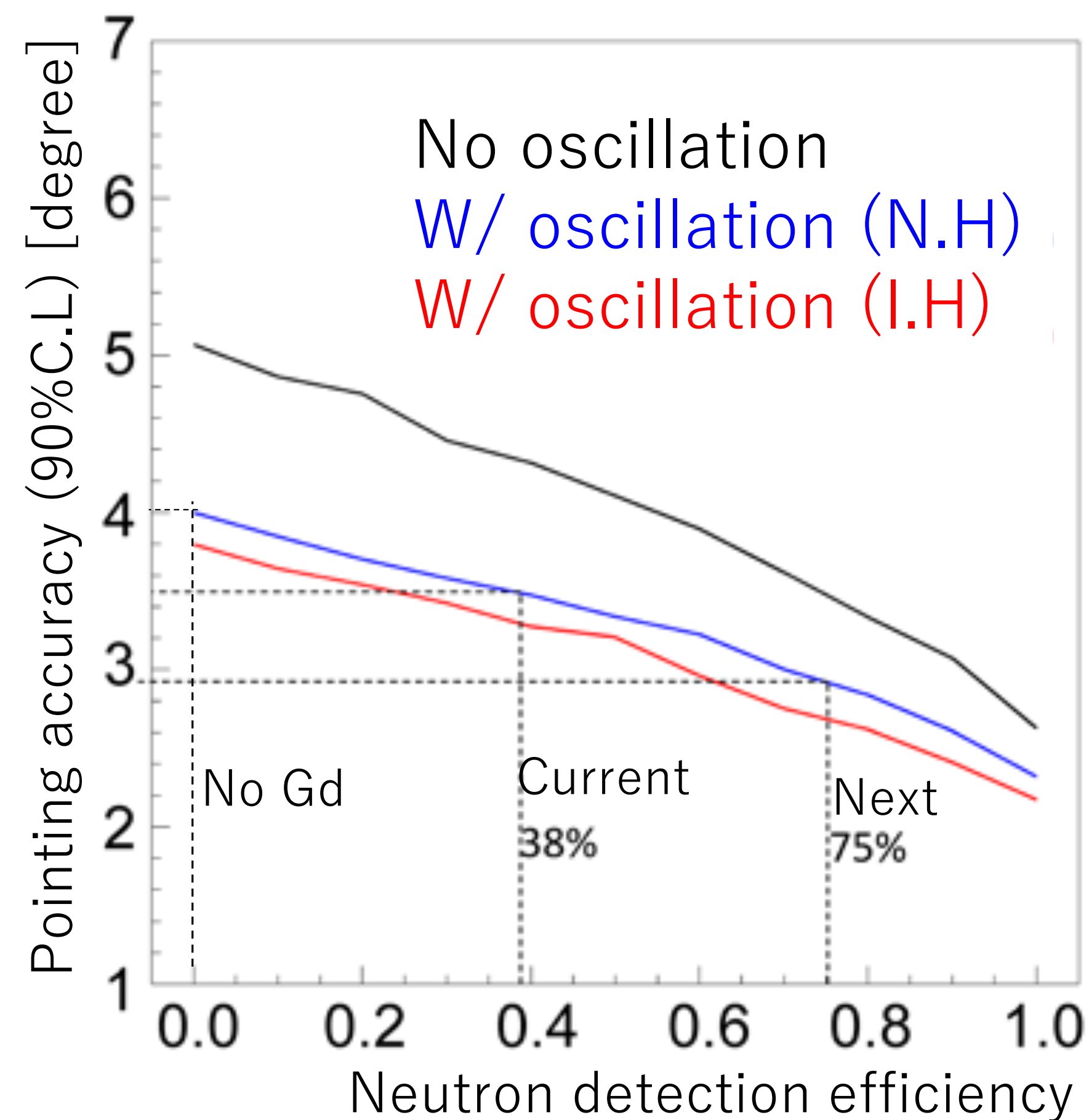
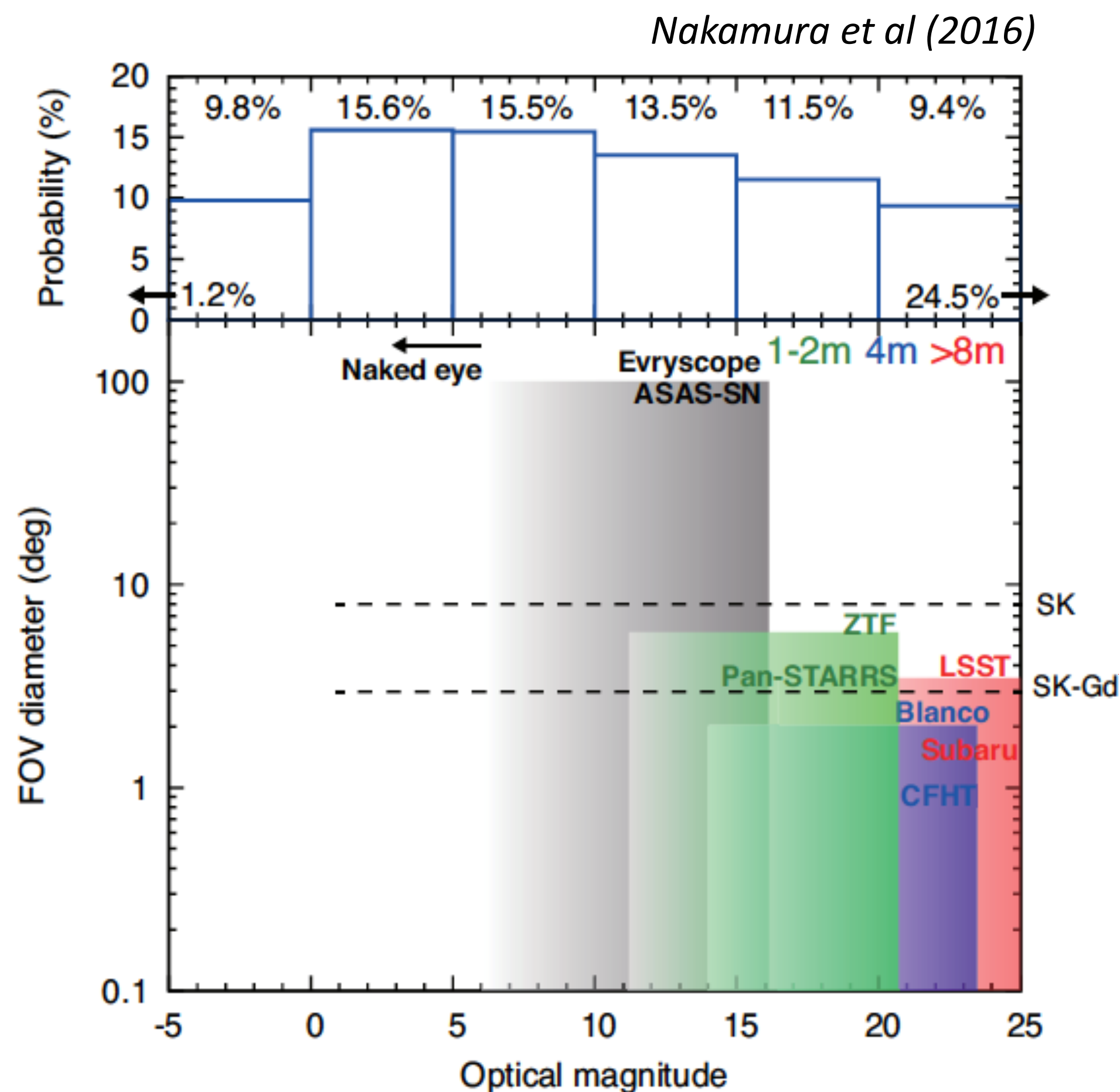


Next 2.9 deg

(0.03%Gd,  
lowering threshold)



# 超新星爆発ニュートリノの方向再構成の向上



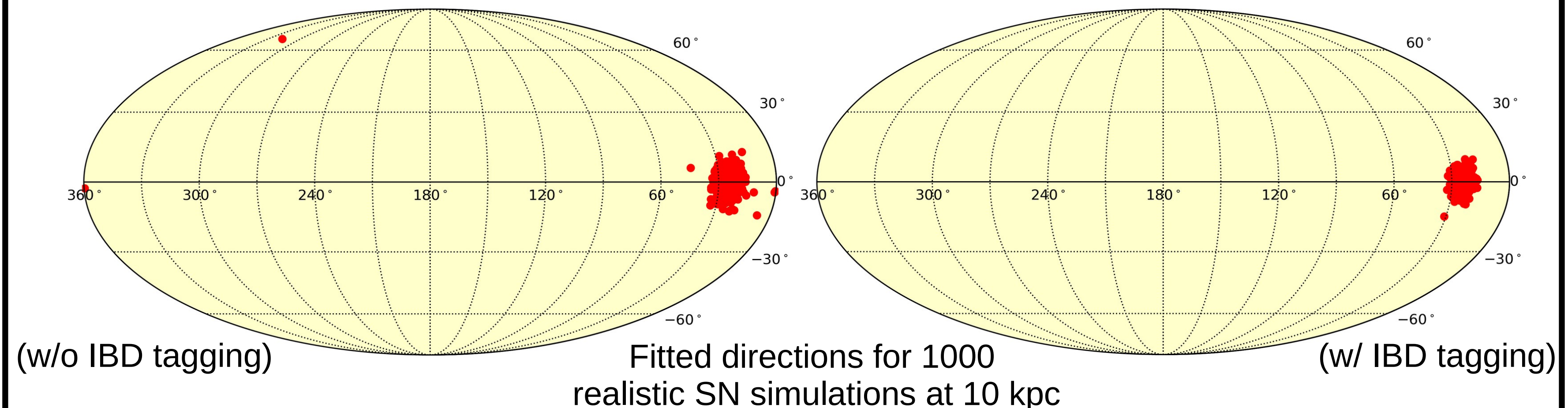
- 0.03%のGd導入後は約3度の精度で超新星爆発の方向を決めることが可能に
- LSST等大型望遠鏡の視野に納まる

# オンライン モニターの 開発

- 中性子情報を用いた  
オンラインの方向再  
構成を開発中
- 詳しくは、本学会の  
G. Pronost の  
(14aW1-7)講演で

## Preliminary results

- ▶ We tested the updated SNWatch with 1000 realistic SN simulations (distance 10kpc)
- ▶ The IBD selection efficiency with the current IBD selection online algorithm is estimated to **~65%** (Preliminary) for **IBD with Gd-n** (~90% Prompt selection efficiency, ~76% Gd-n selection efficiency, ~95% correlation selection efficiency)  
→ **~33%** IBD tagging when considering the current Gd loading of SK (will be improved)
- ▶ SN direction fitter gives a better accuracy when IBD tag is used (Preliminary)
- ▶ For 10kpc SN realistic simulations, the processing time, including IBD tagging and fit, up to the alarm notification to SK experts is **~5 minutes**. For higher rate, the processing time becomes longer, ex: 3kpc SN takes ~20 minutes. → Improvements are on-going

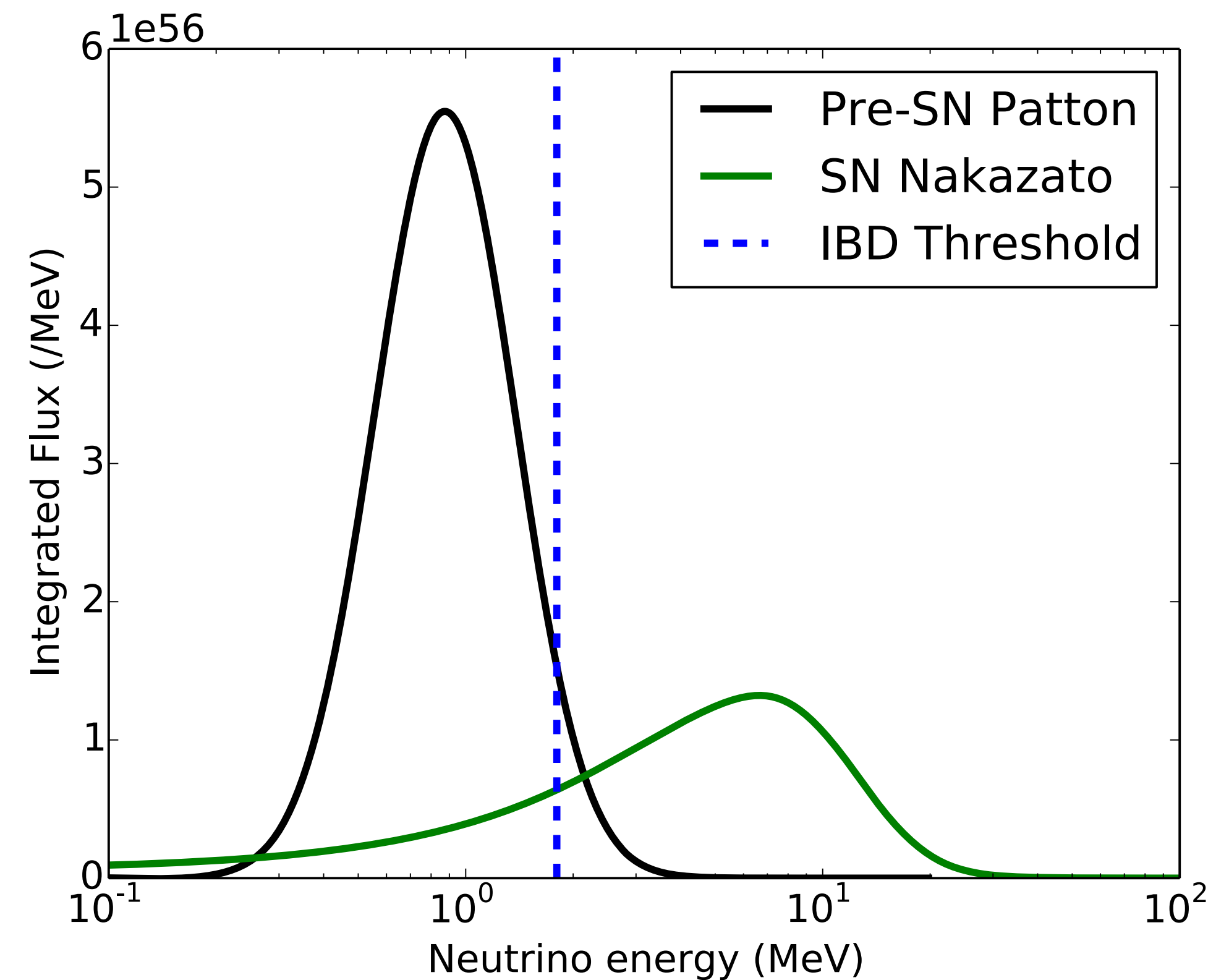
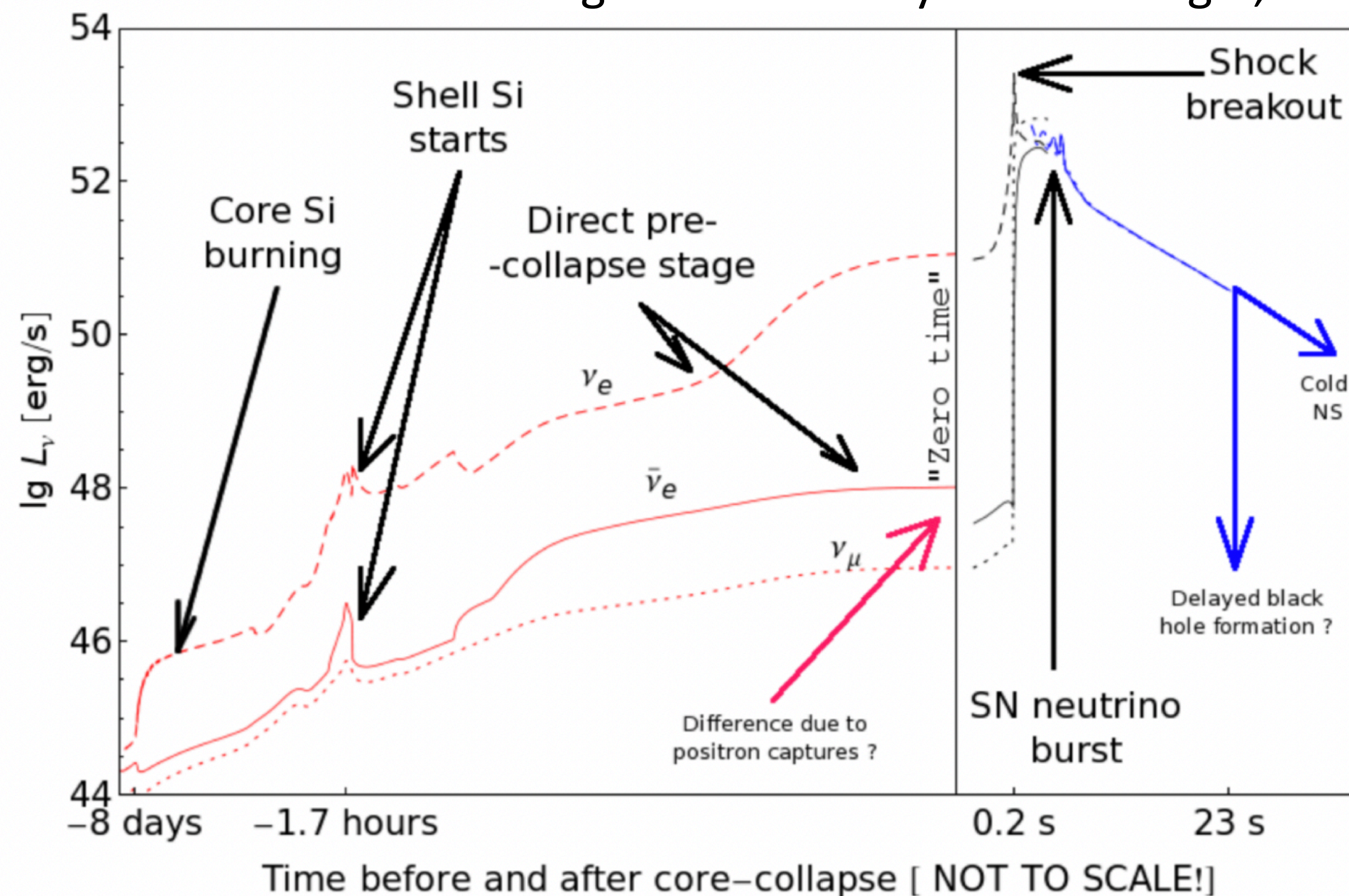


超新星前兆ニュートリノ

# 超新星前兆ニュートリノ

- 超新星爆発前のSi-buriningからのニュートリノ検出の検討
- エネルギーが低いが、中性子検出と組み合わせることで近傍の超新星 (e.g. ベテルギウス, 200 pc) については検出できる可能性

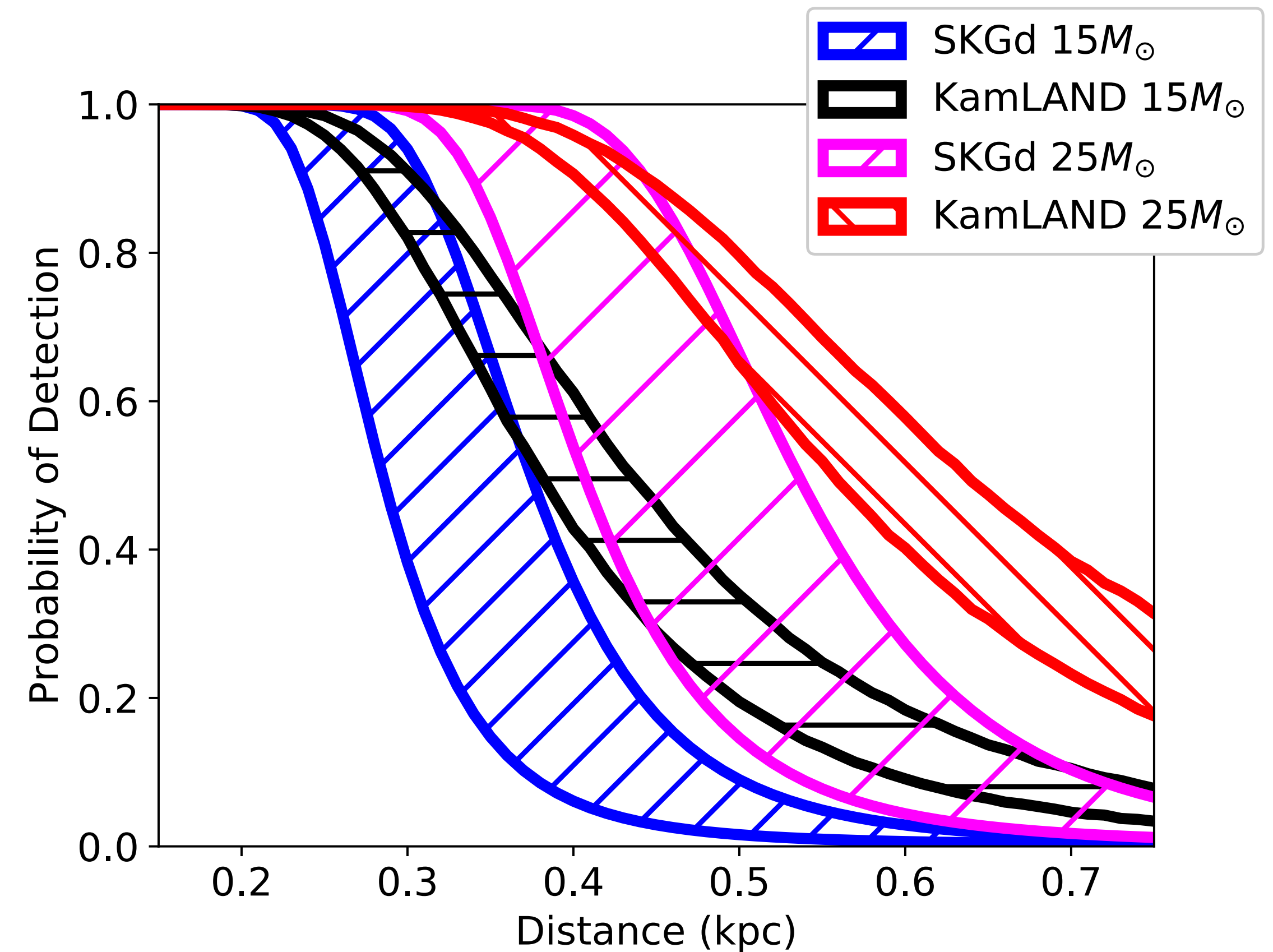
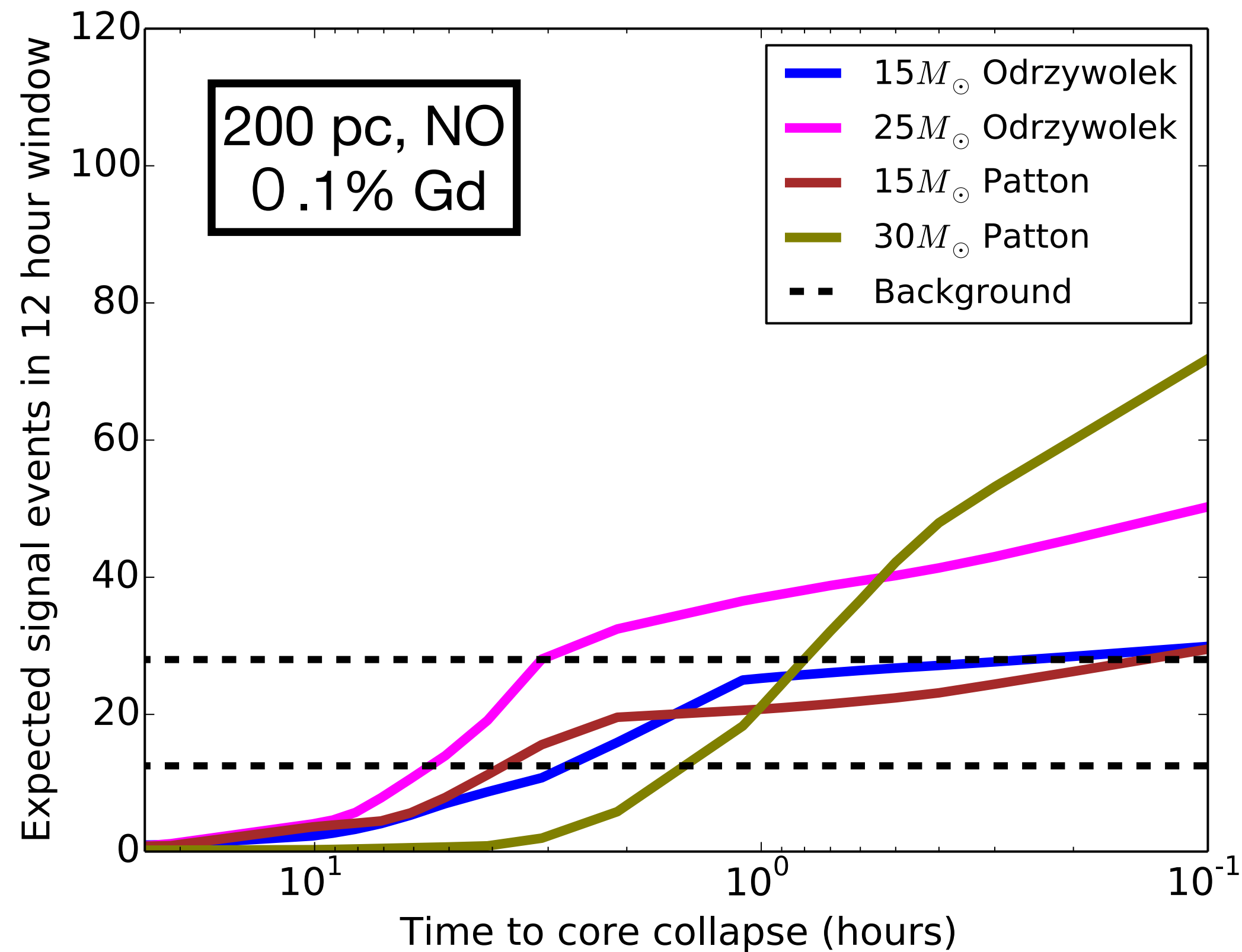
Figure from Odrzywolek & Heger, 2010



C. Simpson et al [Super-Kamiokande Collaboration]  
Astrophys. J. **885**, 133 (2019)

# 超新星前兆ニュートリノ

C. Simpson et al [Super-Kamiokande Collaboration]  
Astrophys. J. **885**, 133 (2019)



(c) NO, 3  $\sigma$ /48 hours FPR equivalent

- 順階層性の場合には、ベテルギウスからのSi-burningの信号を有意に検出可能
- 超新星前兆モニターとしての運用を目指している

# まとめ

- 2020年、スーパーカミオカンデはガドリニウムを導入し、SK-Gdとして新たな観測をスタート
- Gdにより中性子の検出効率が飛躍的に向上
- 超新星背景ニュートリノ探索
  - 信号の検出効率向上・バックグラウンドの除去効率向上
  - これまでの純水のデータで、既に感度が最も高いフラックスを予想するモデルに到達
  - SK-Gdでは大半のモデルの検証が可能に
  - 世界初観測を目指す
- 超新星爆発ニュートリノ
  - 超新星の方向決定精度が向上
  - オンラインモニターを開発中
- 超新星前兆ニュートリノ
  - ベテルギウスからのSi-burningが捉えられると期待

**今後のSK-Gdからの結果にご期待ください**