

# ニュートリノで宇宙の成り立ちを探る

中島 康博 (A2サブコース)

物理学専攻入試ガイダンス

2025年5月30日

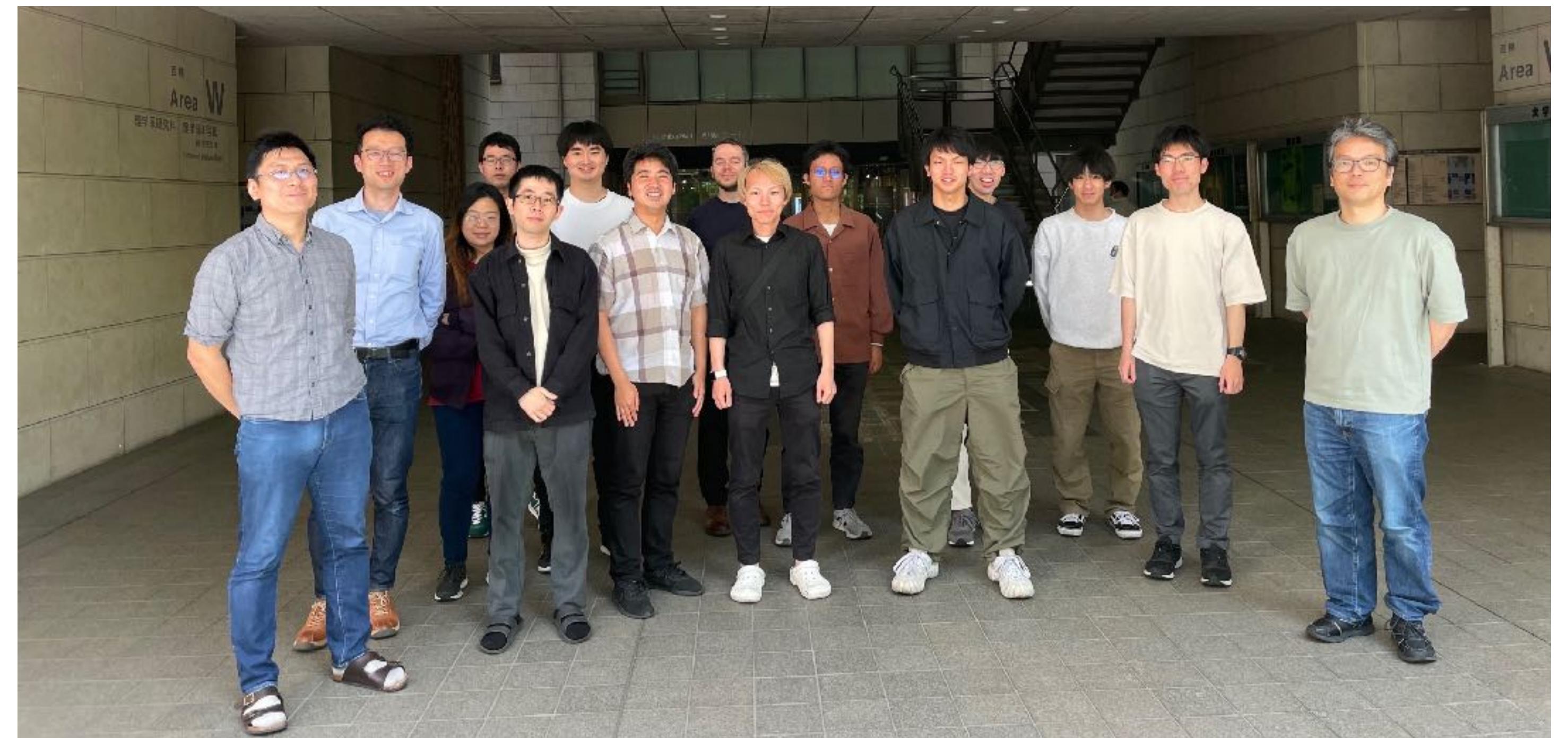
# 中島 康博 (なかじま やすひろ)

Email: [yasuhiro.nakajima@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:yasuhiro.nakajima@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

居室: 理学部1号館6階 601b

2021年4月にスタートした  
比較的新しい研究室です

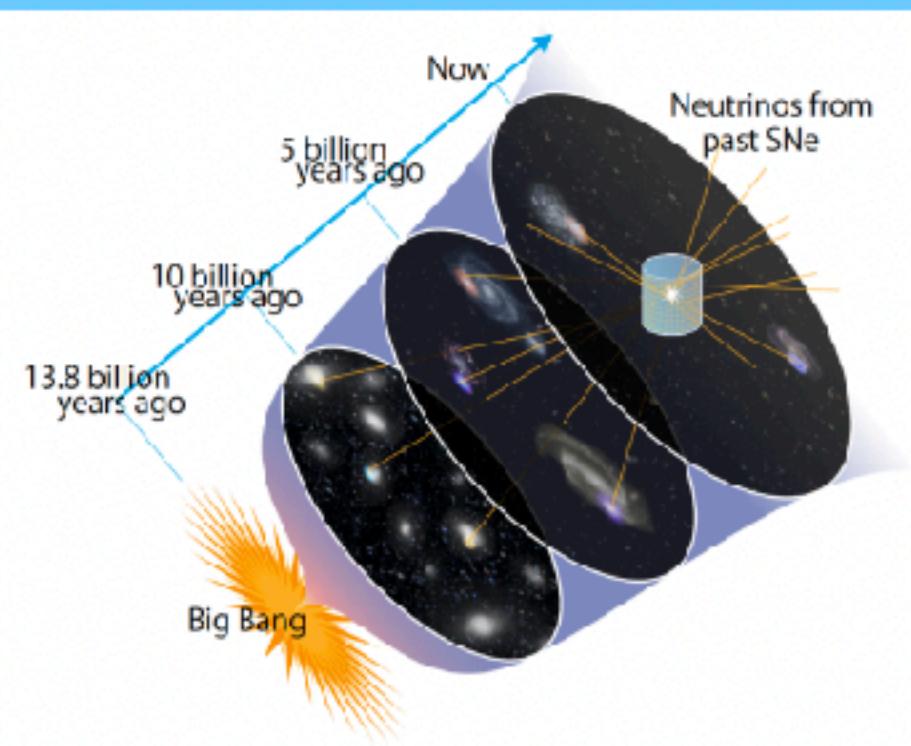
横山(将)研究室と協力し、  
横山・中島研究室として  
活動しています  
ニュートリノを用いた  
素粒子実験・宇宙観測  
がテーマです



中島研



## スーパーカミオカンデ アップグレード



## 超新星ニュートリノ 太陽ニュートリノ

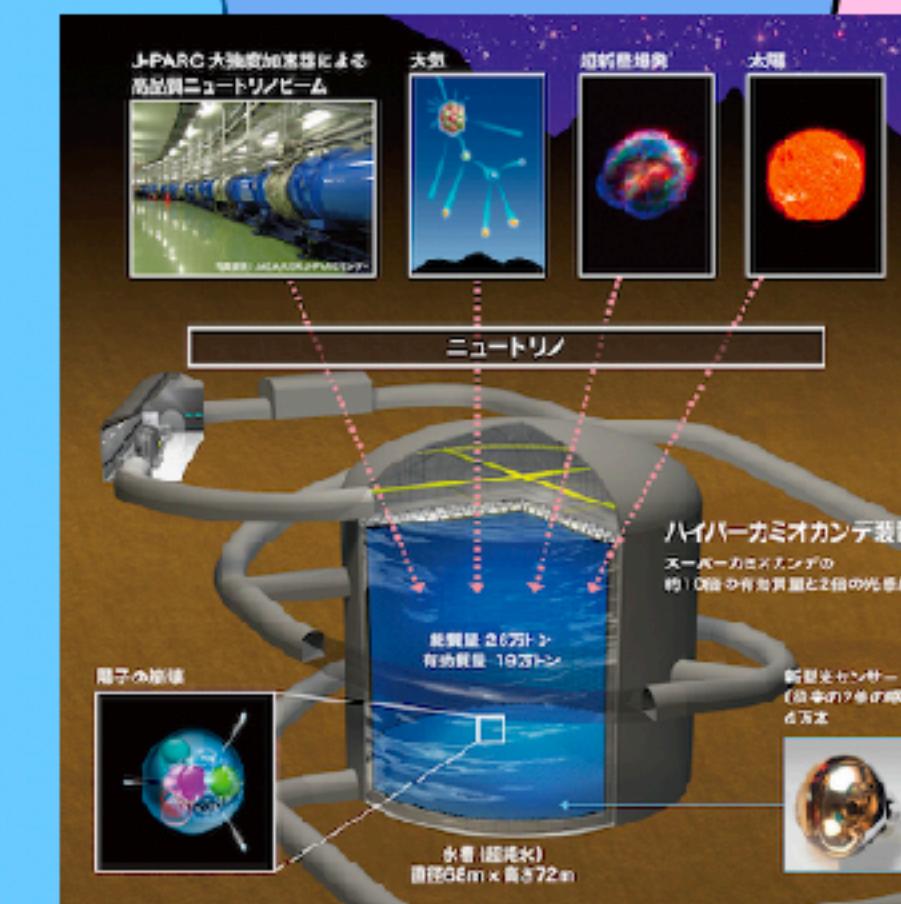
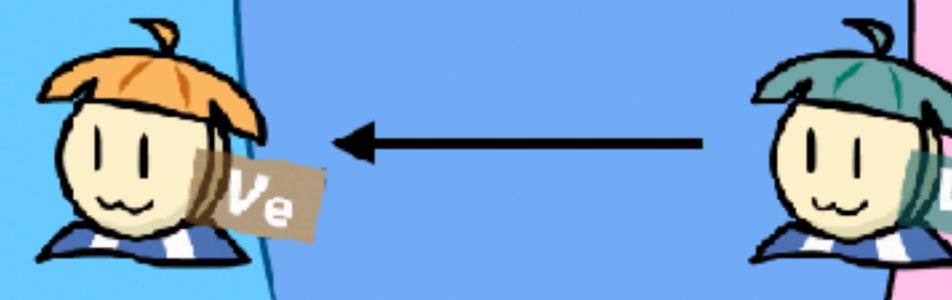
新検出器開発



## T2K実験

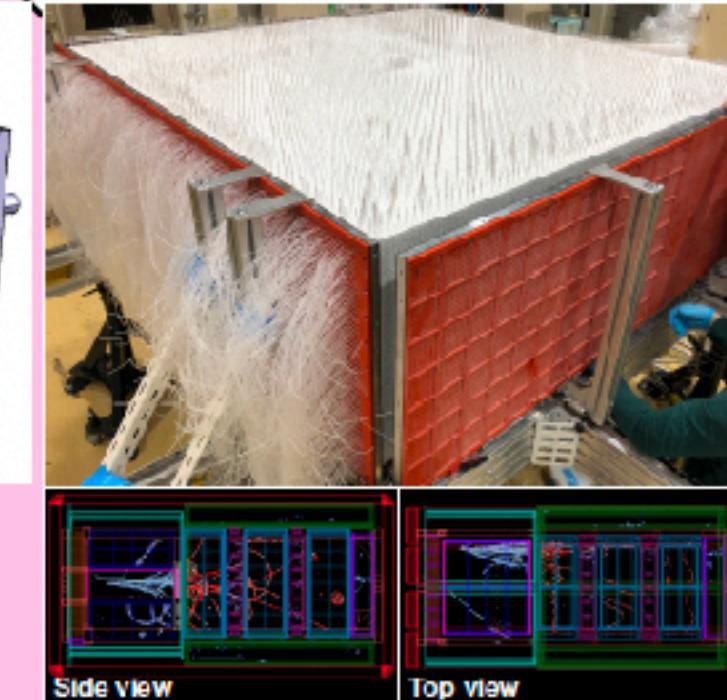
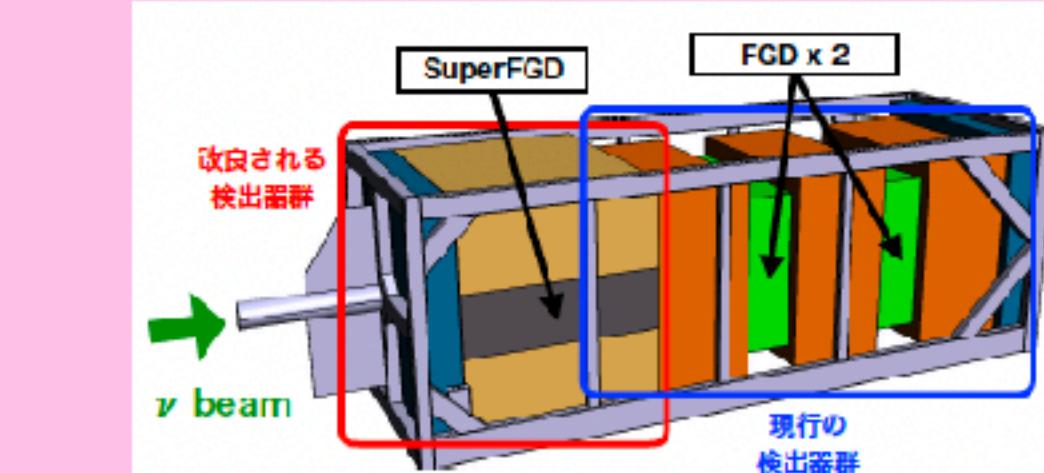


## ニュートリノ振動

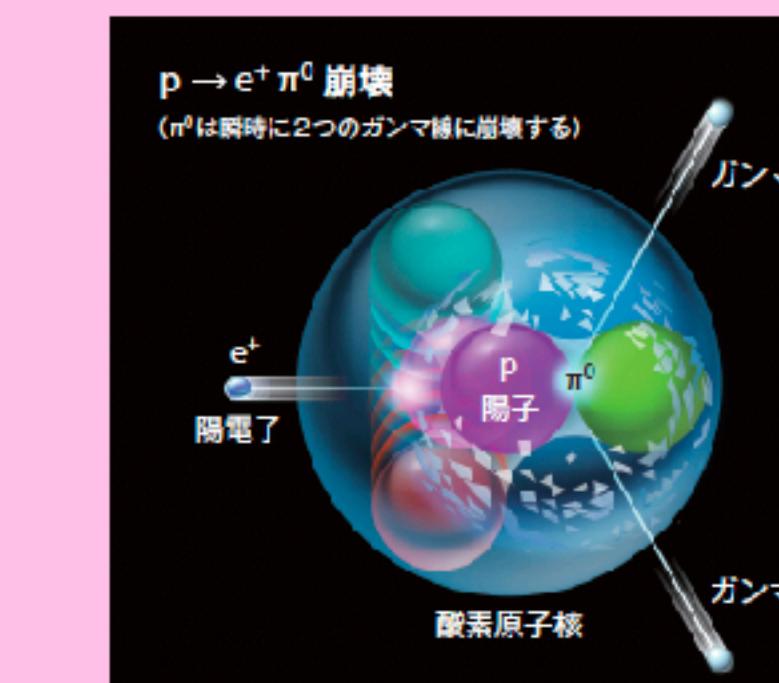


## ハイパーカミオカンデ

T2K前置検出器アップグレード



横山研



陽子崩壊

# ニュートリノについて知りたいこと

# ニュートリノを使って知りたいこと

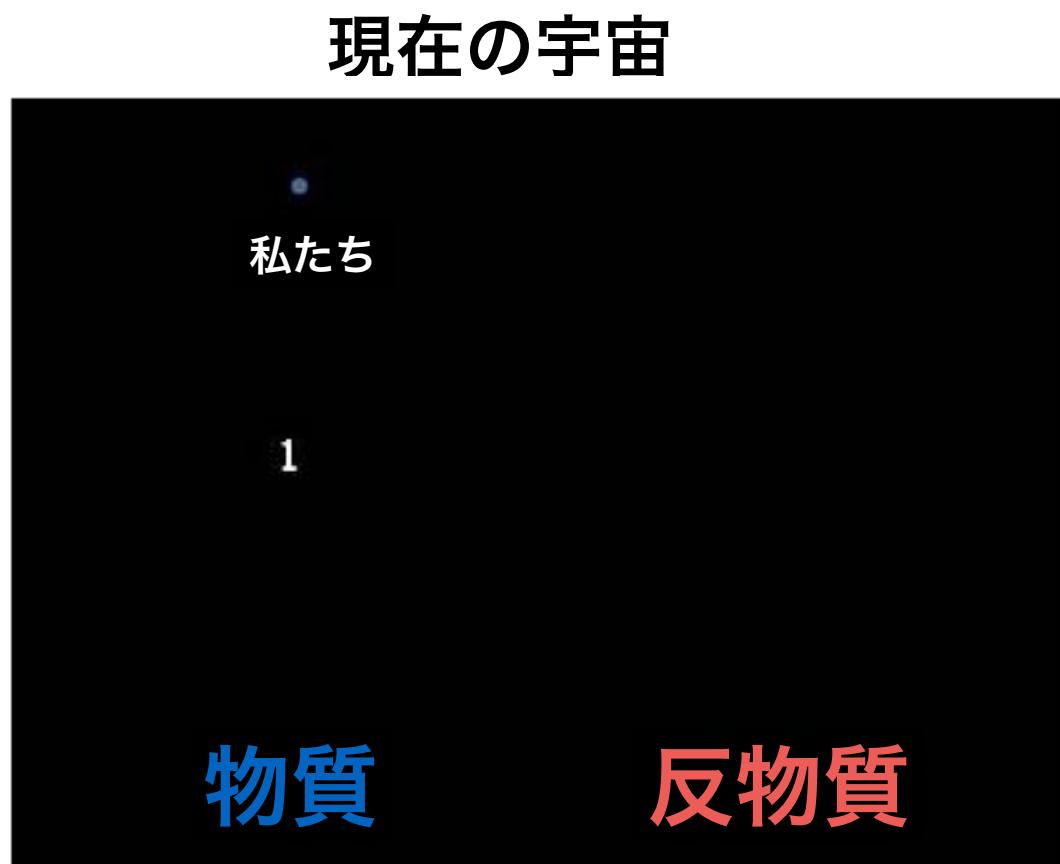
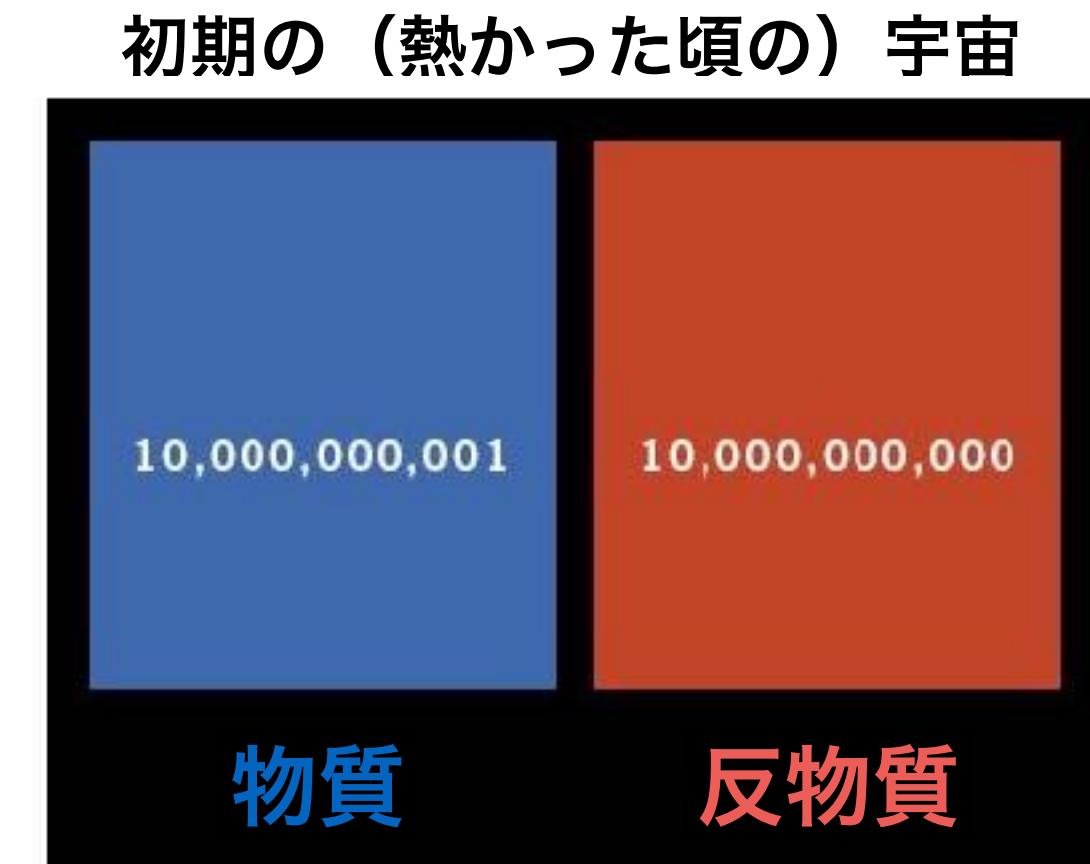
- 素粒子としてのニュートリノの性質の解明

- 質量はいくつか？どう理論的に記述できるか？
- 物質・反物質の非対称性が存在するか？

現在の宇宙はほぼ物質のみで、反物質が存在しない理由をニュートリノが握っている？

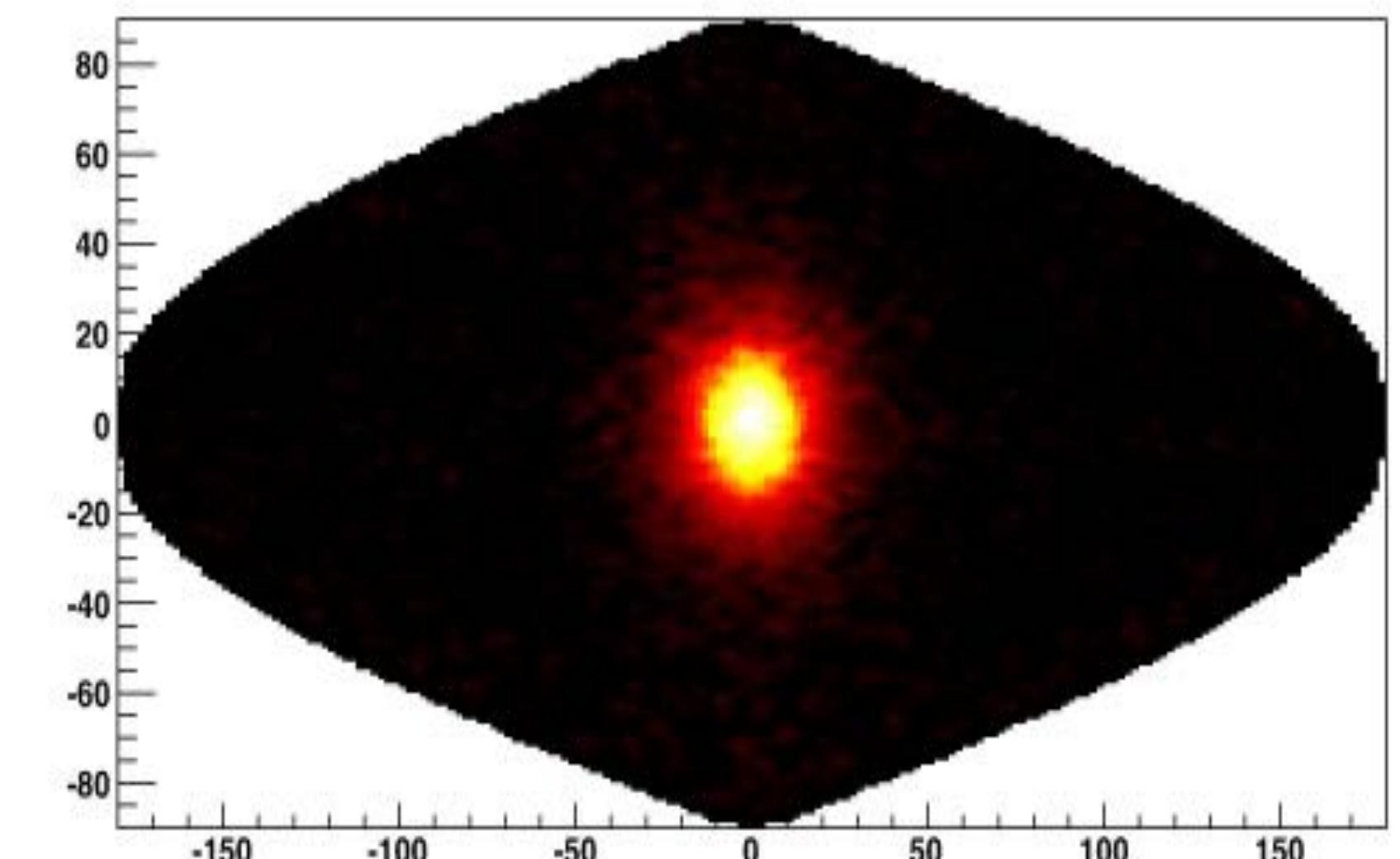
- ニュートリノを通じて宇宙や星の成り立ちを紐解く

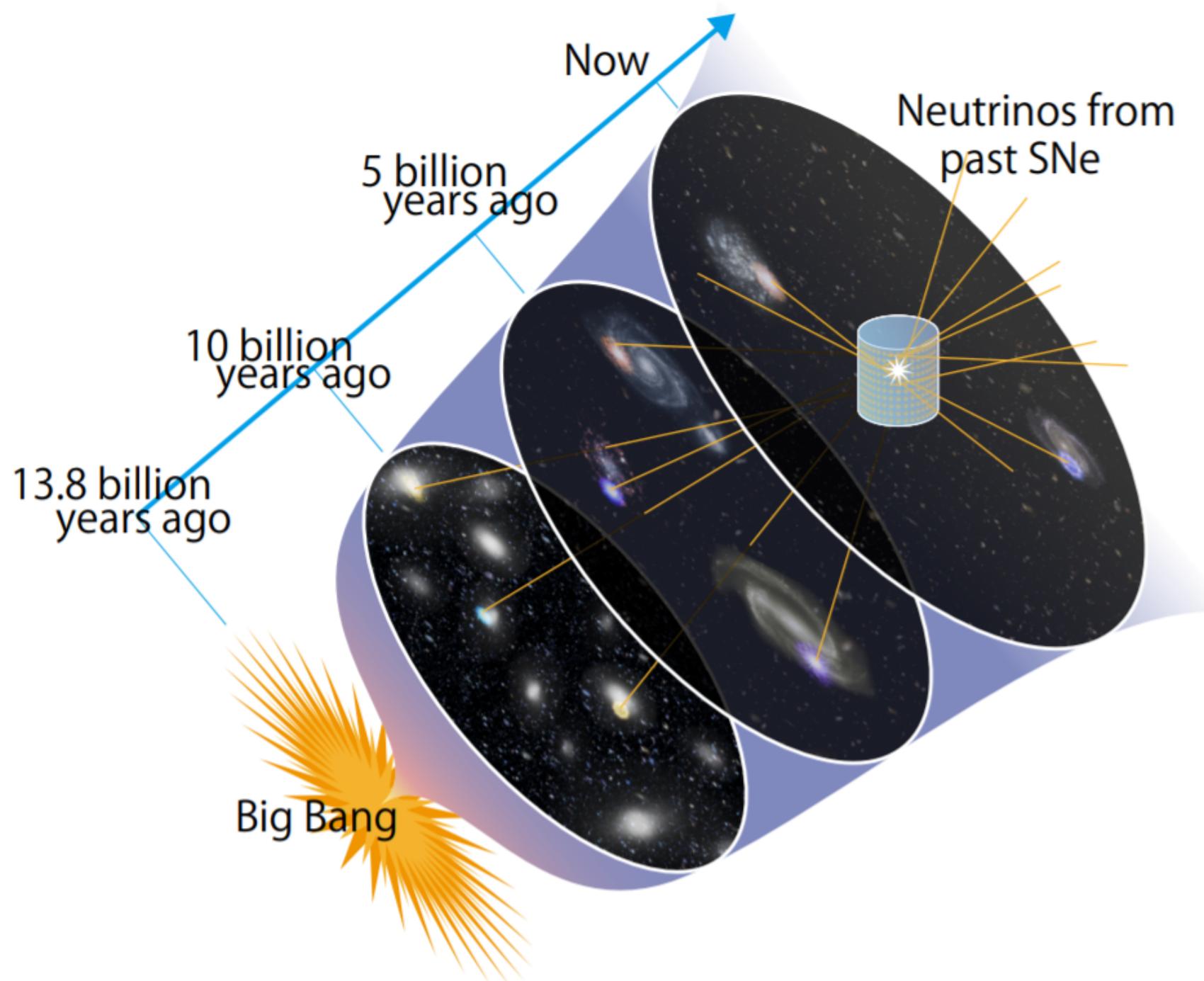
- 光が届かないところ（星の内部や宇宙超初期）からもニュートリノは届く
- 宇宙や星の成り立ちを調べる上で、重要な手がかり



H. Murayama

ニュートリノで見た太陽

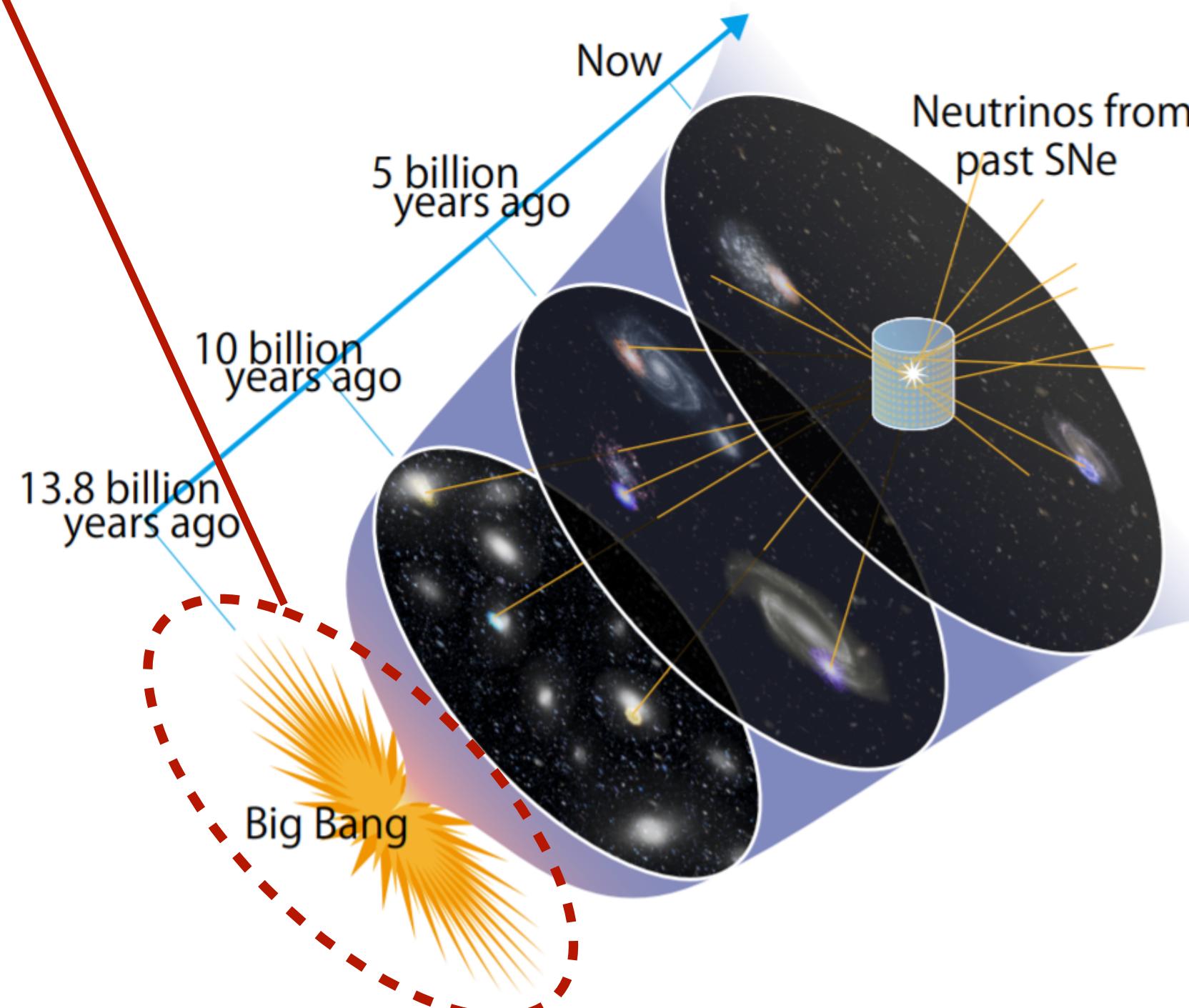
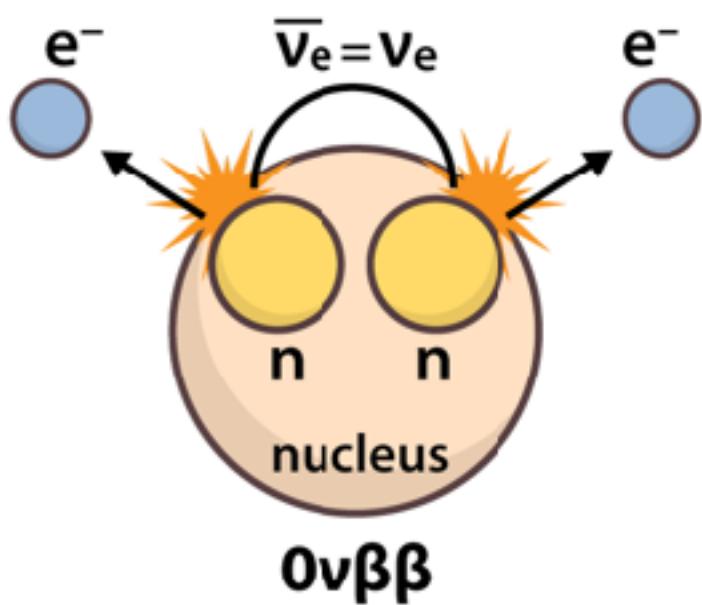




宇宙の始めにどのように  
物質・反物質非対称性が  
作り出されたか  
ニュートリノ振動の測定によ  
るCP対称性の破れの探索



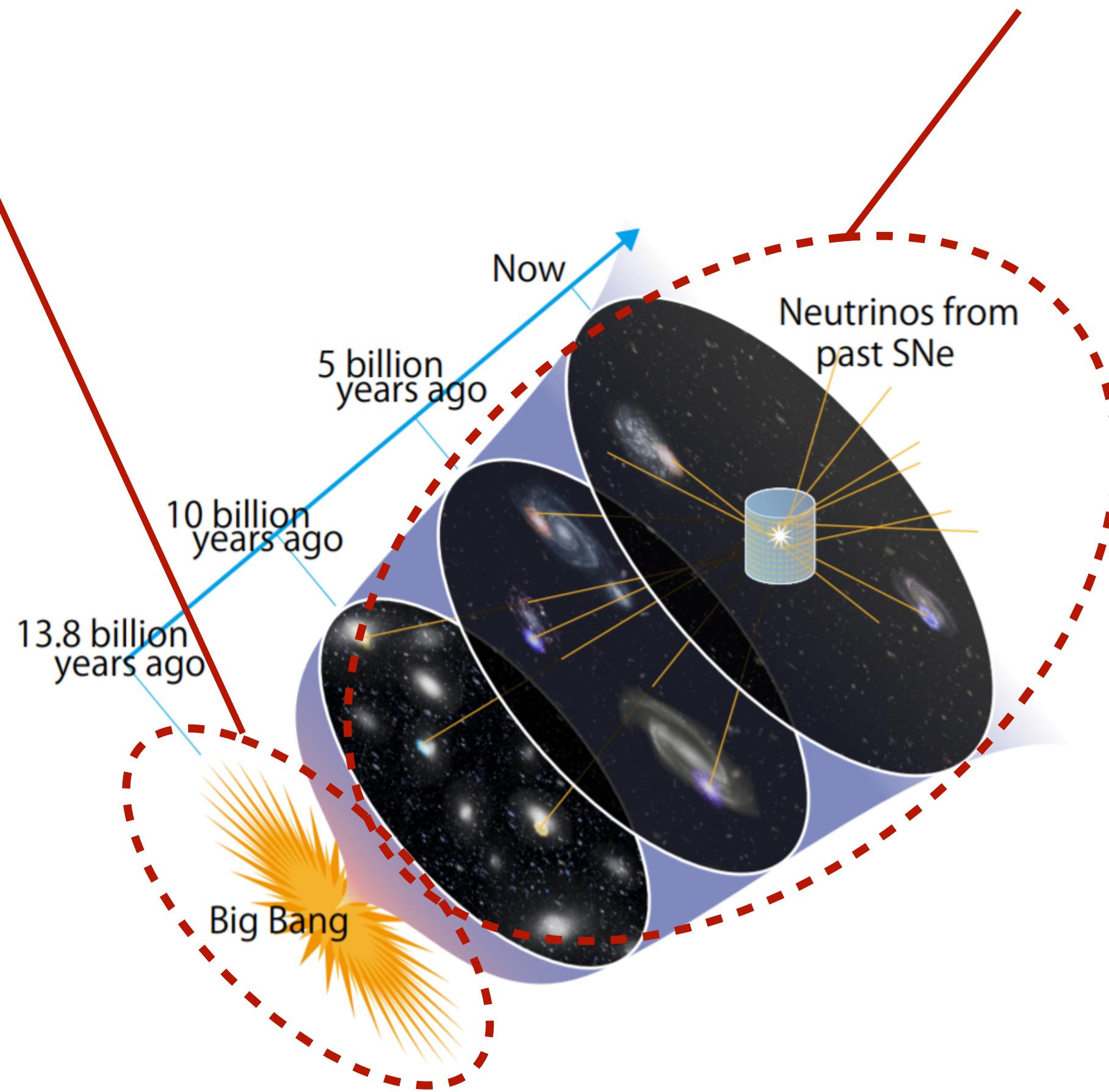
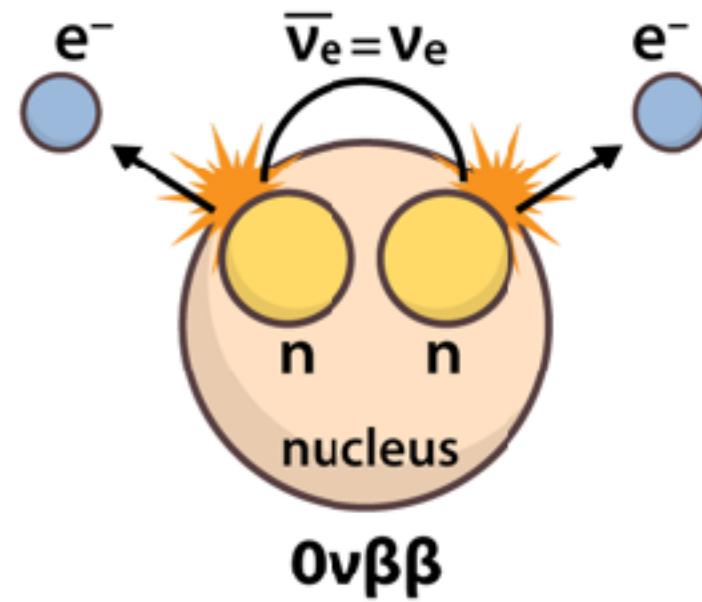
ニュートリノを伴わない  
二重ベータ崩壊



宇宙の始めにどのように  
物質・反物質非対称性が  
作り出されたか  
ニュートリノ振動の測定によ  
るCP対称性の破れの探索

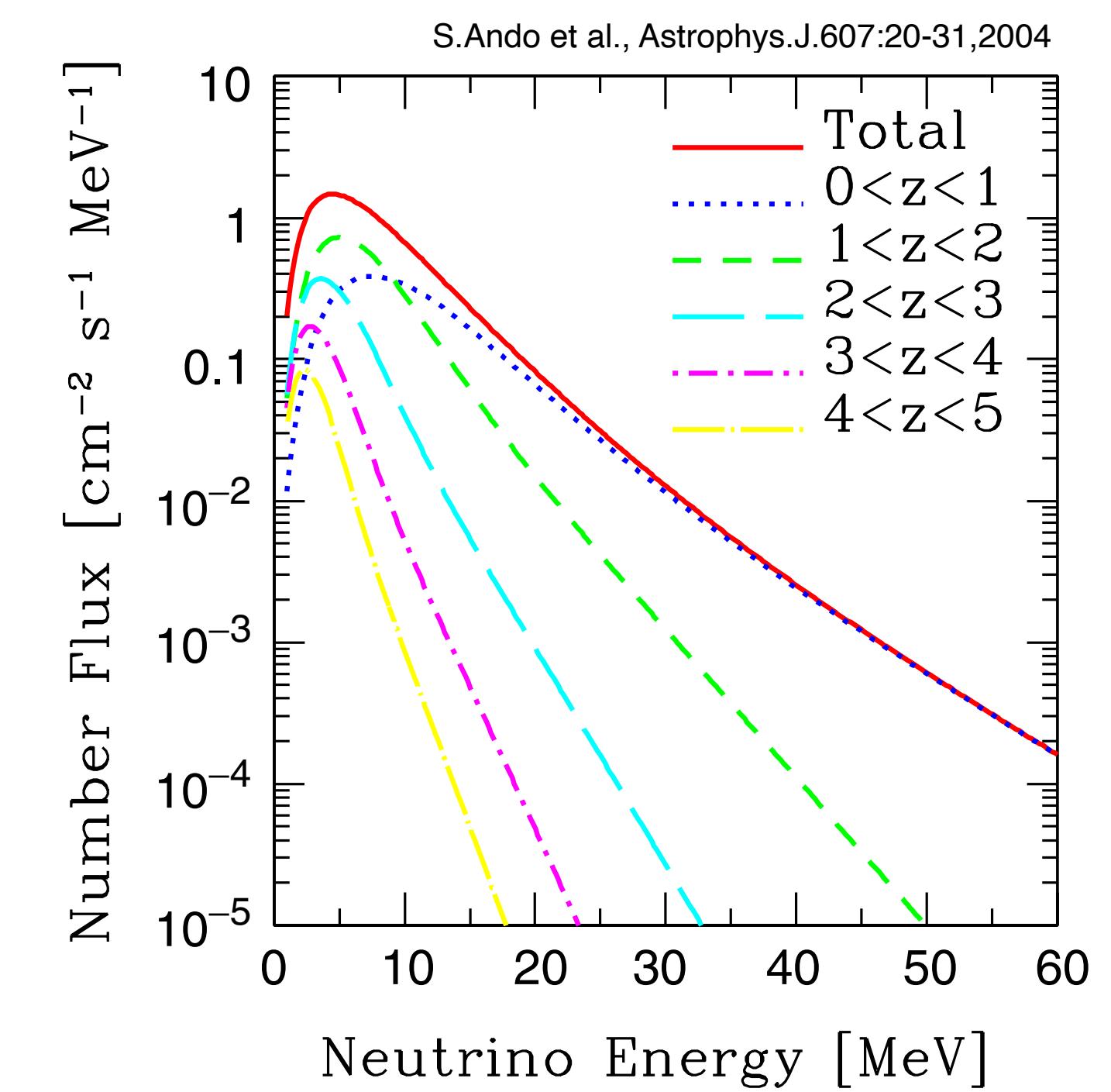


ニュートリノを伴わない  
二重ベータ崩壊



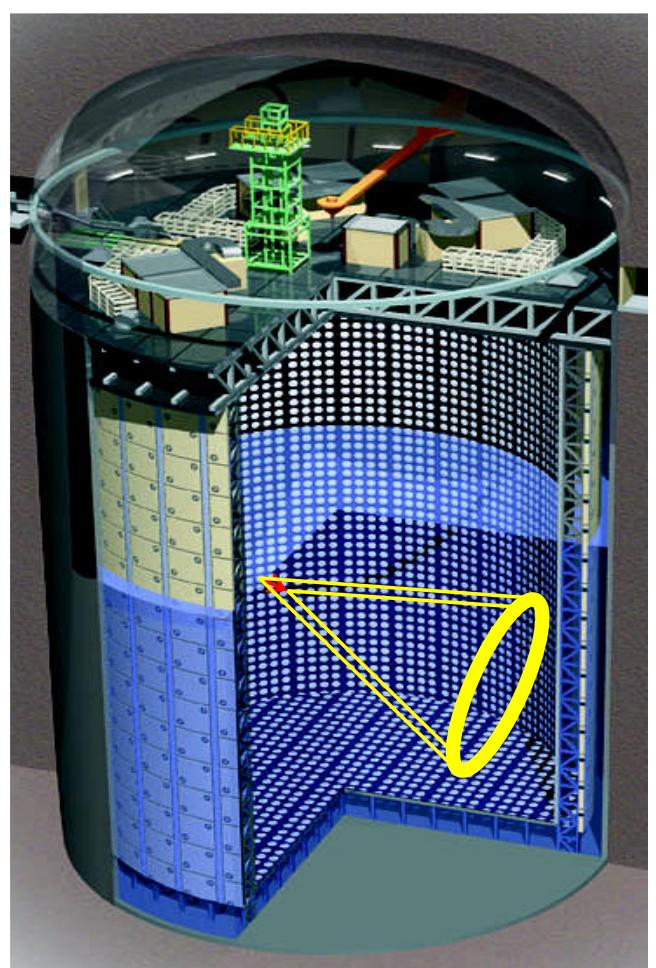
宇宙の歴史の中でどのように  
星が形成され元素合成が  
起こってきたか

過去の超新星爆発からの  
ニュートリノ  
「超新星背景ニュートリノ」

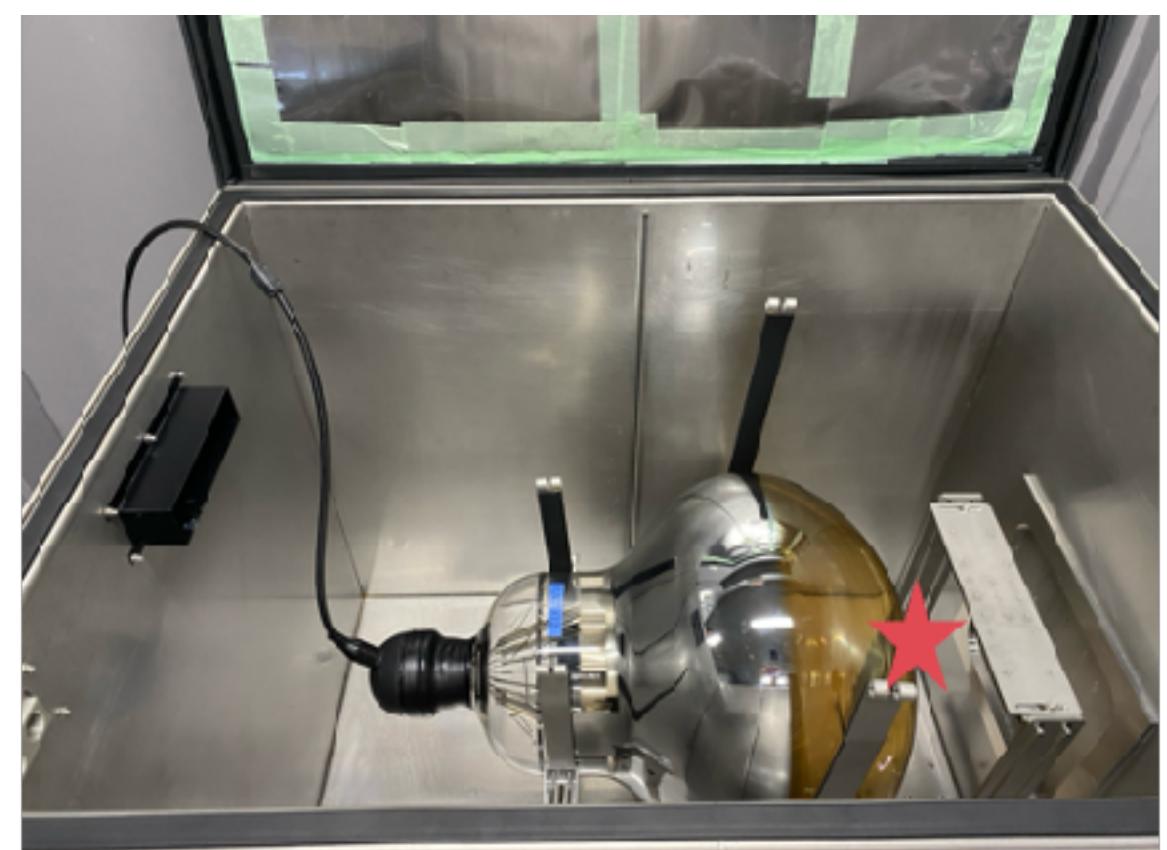


# 中島研としてやろうとしていること

- ・ ガドリニウムを加えた新生スーパー・カミオカンデを用いた、新たなニュートリノ観測
  - ・ 超新星背景ニュートリノの世界初観測\*
  - ・ 中性子を用いて背景事象除去
- ・ T2Kビームでニュートリノの物質・反物質非対称性の観測
  - ・ 中性子観測で、ニュートリノ反応測定の精度向上
- ・ ハイパーカミオカンデ実験の推進
  - ・ 光電子増倍管の精密較正
  - ・ 最初の物理結果に携われるチャンス！
- ・ ニュートリノ反応の精密評価のためのビーム実験\*
- ・ 新たなニュートリノ実験・測定器の研究\*

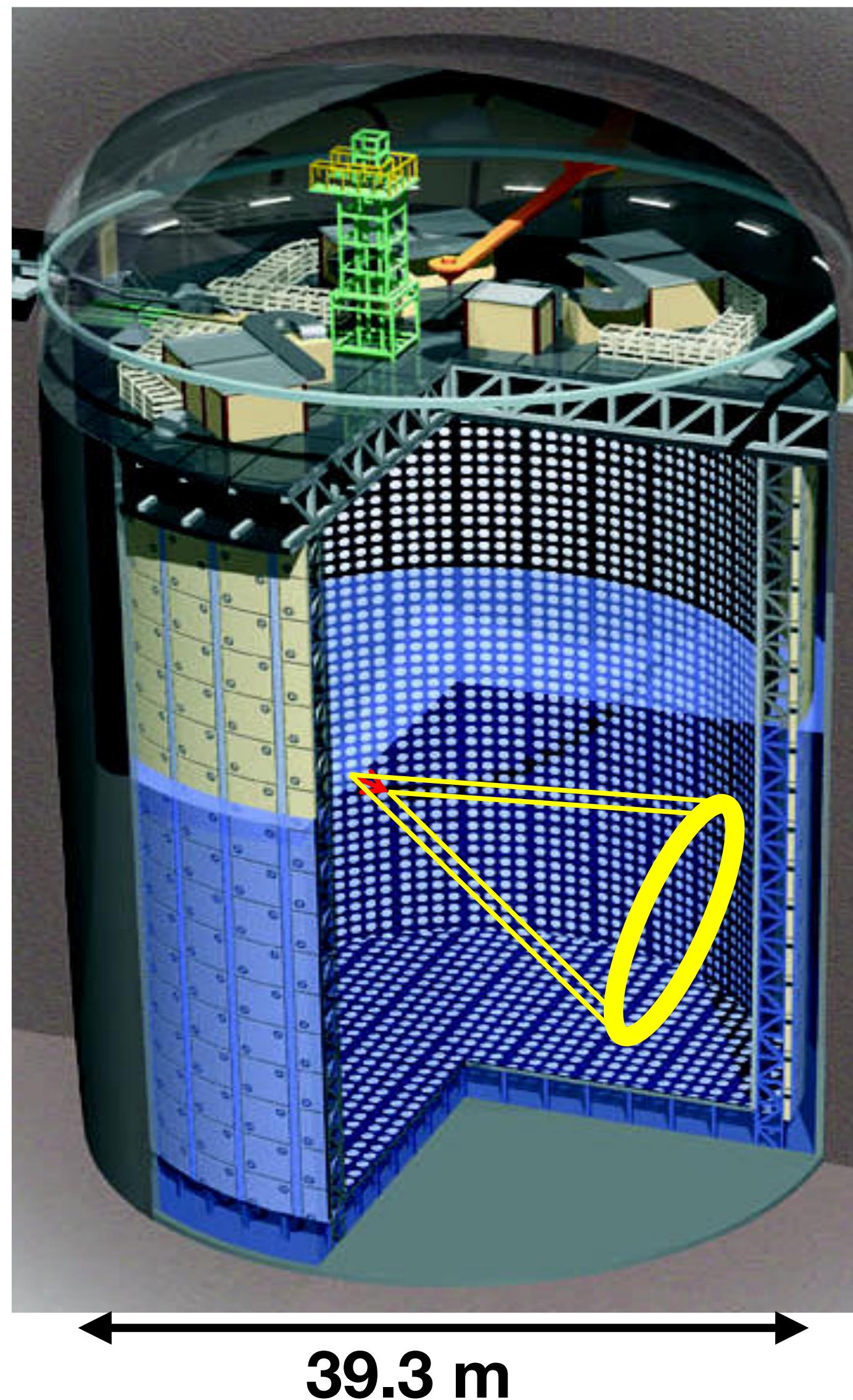


ハイパーカミオカンデ用光電子増倍管の評価（渡辺・中島研OB）

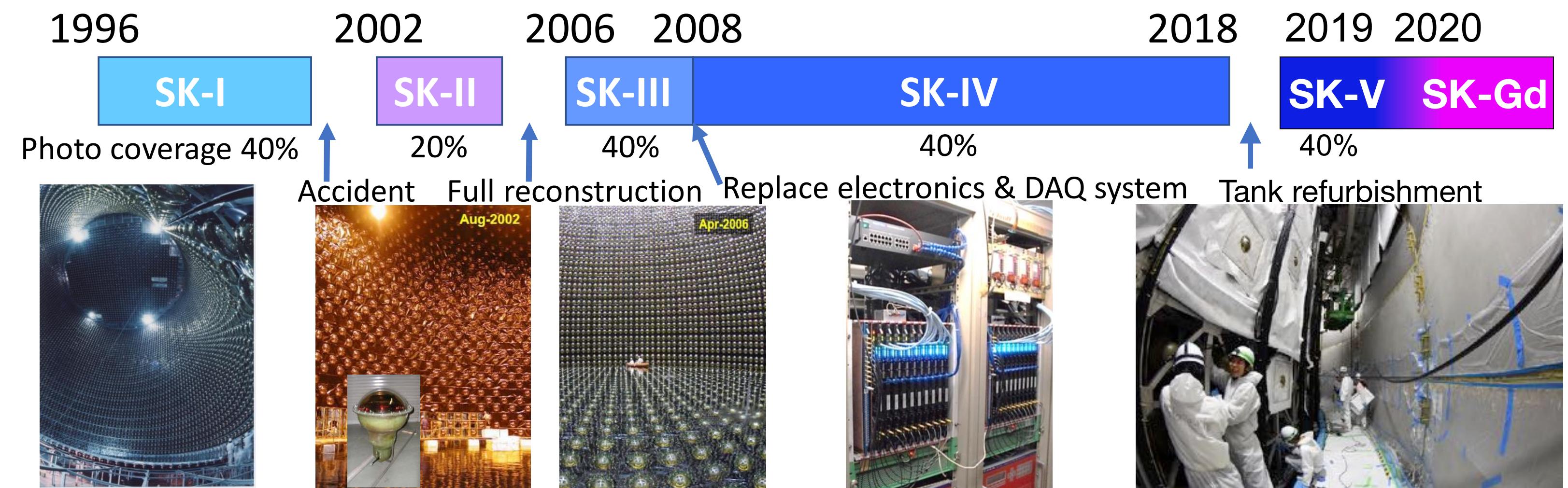


\*をつけたトピックについて今日は紹介します

# スーパーカミオカンデ



- 5万トンの水を用いた、世界最大の地下ニュートリノ観測装置
- 11000本以上の 50 cm 光電子増倍管を壁面に設置
- 様々なニュートリノが観測可能
  - 太陽ニュートリノ
  - 超新星ニュートリノ
  - 大気ニュートリノ
  - 加速器ニュートリノ
- 1996年に運転開始
- **2020年にガドリニウムを加え、新生スーパーカミオカンデへ**





神岡総合研究棟 (2021年完成)



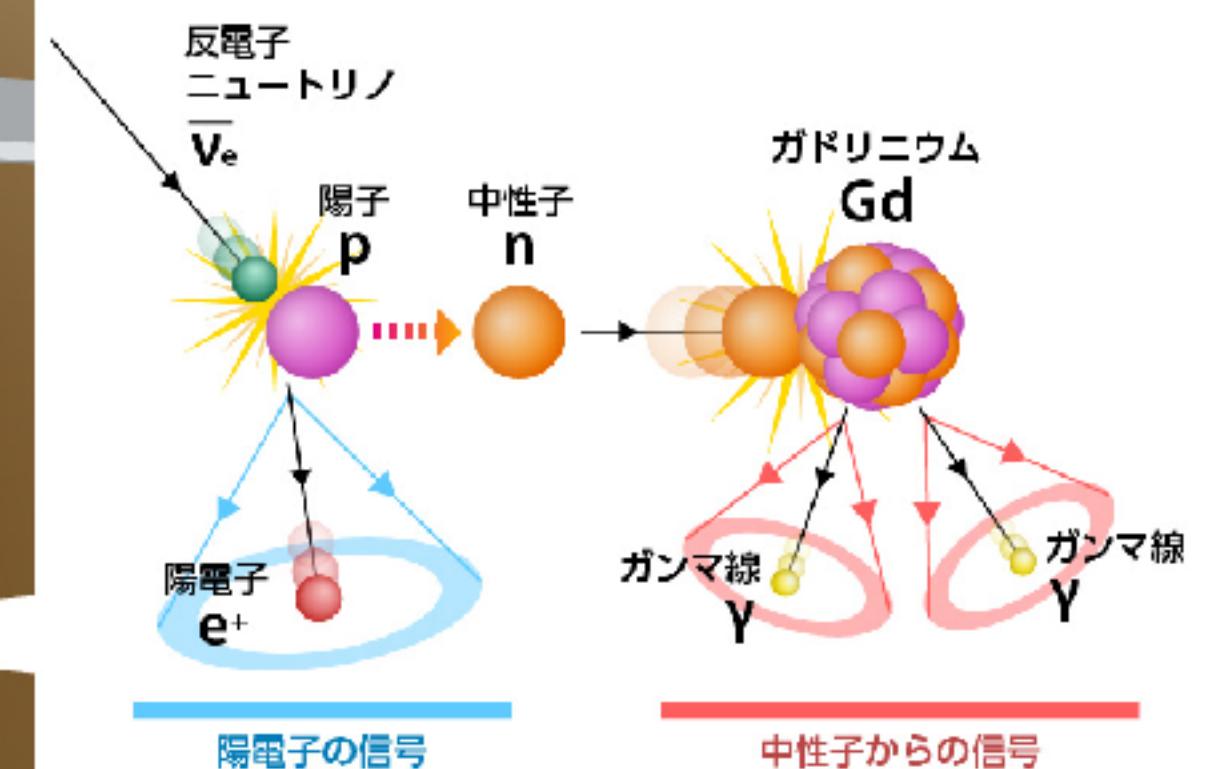
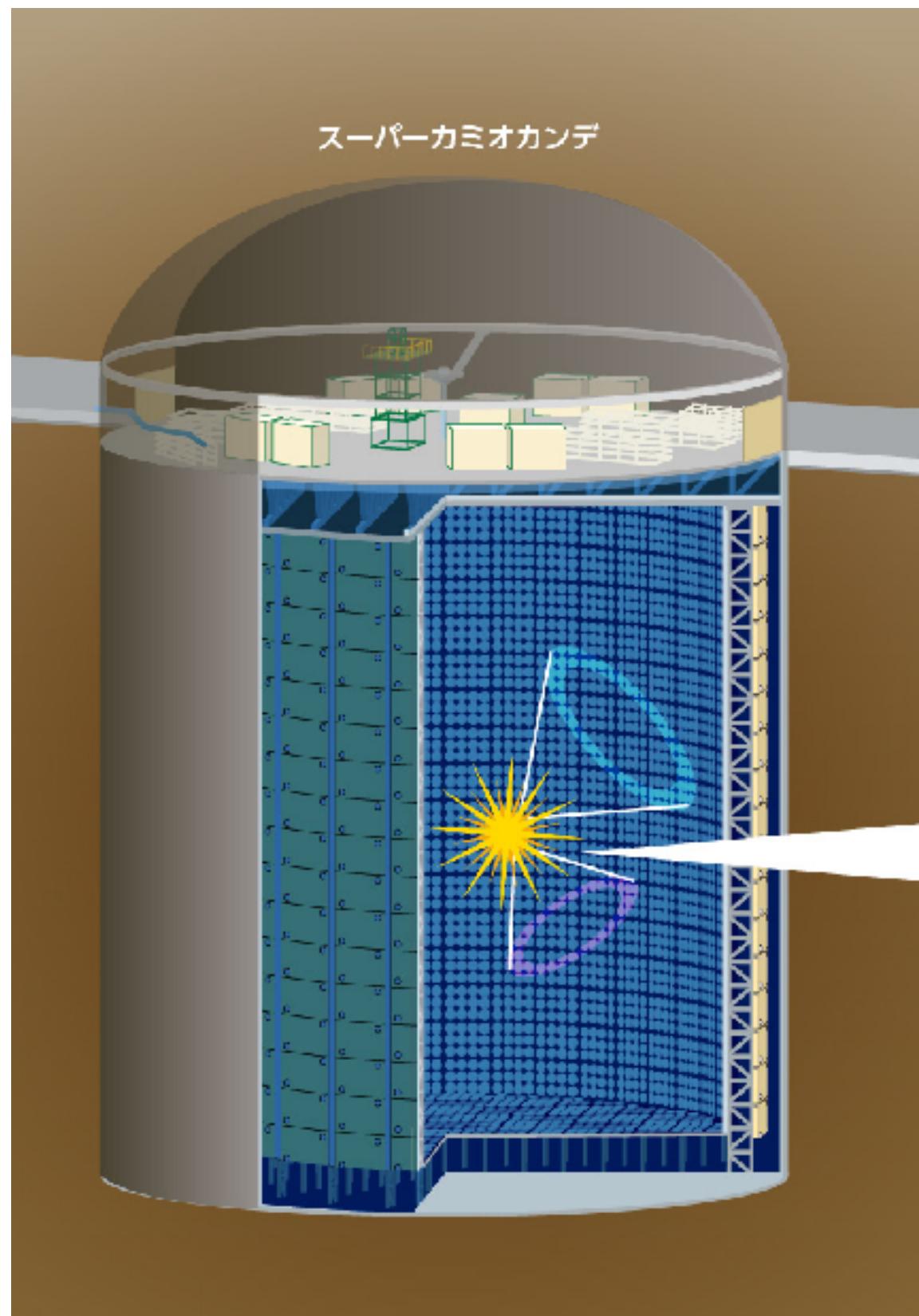
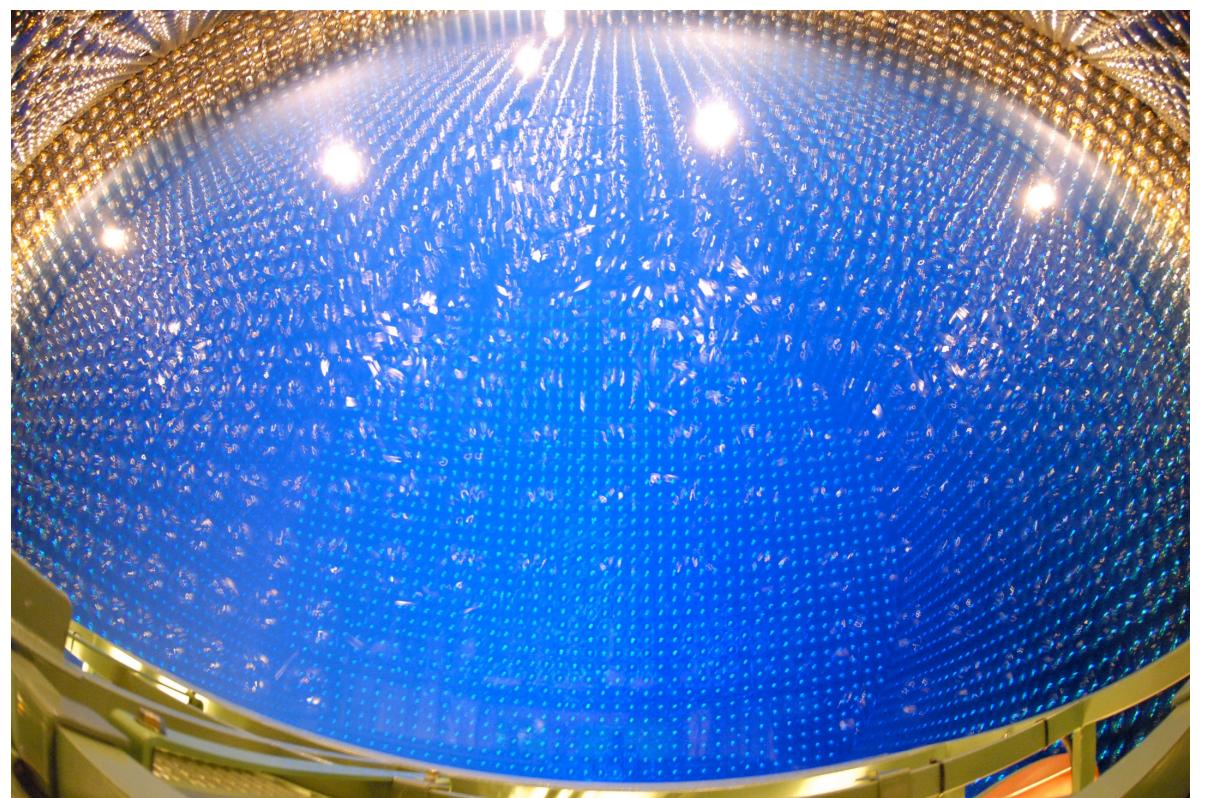
電子線形加速器を使ったスーパーカミオカンデの較正実験 (2021)



\*学年は2021年当時

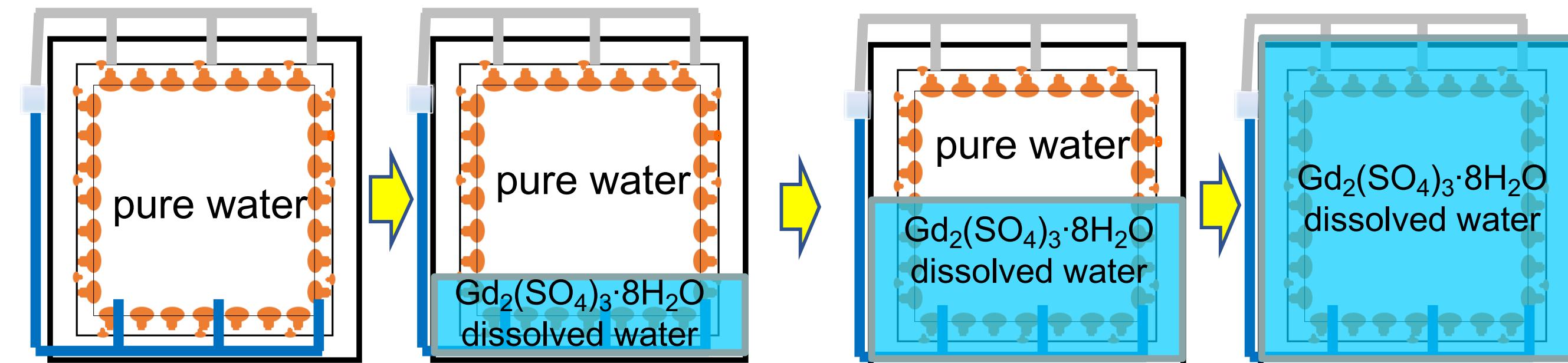
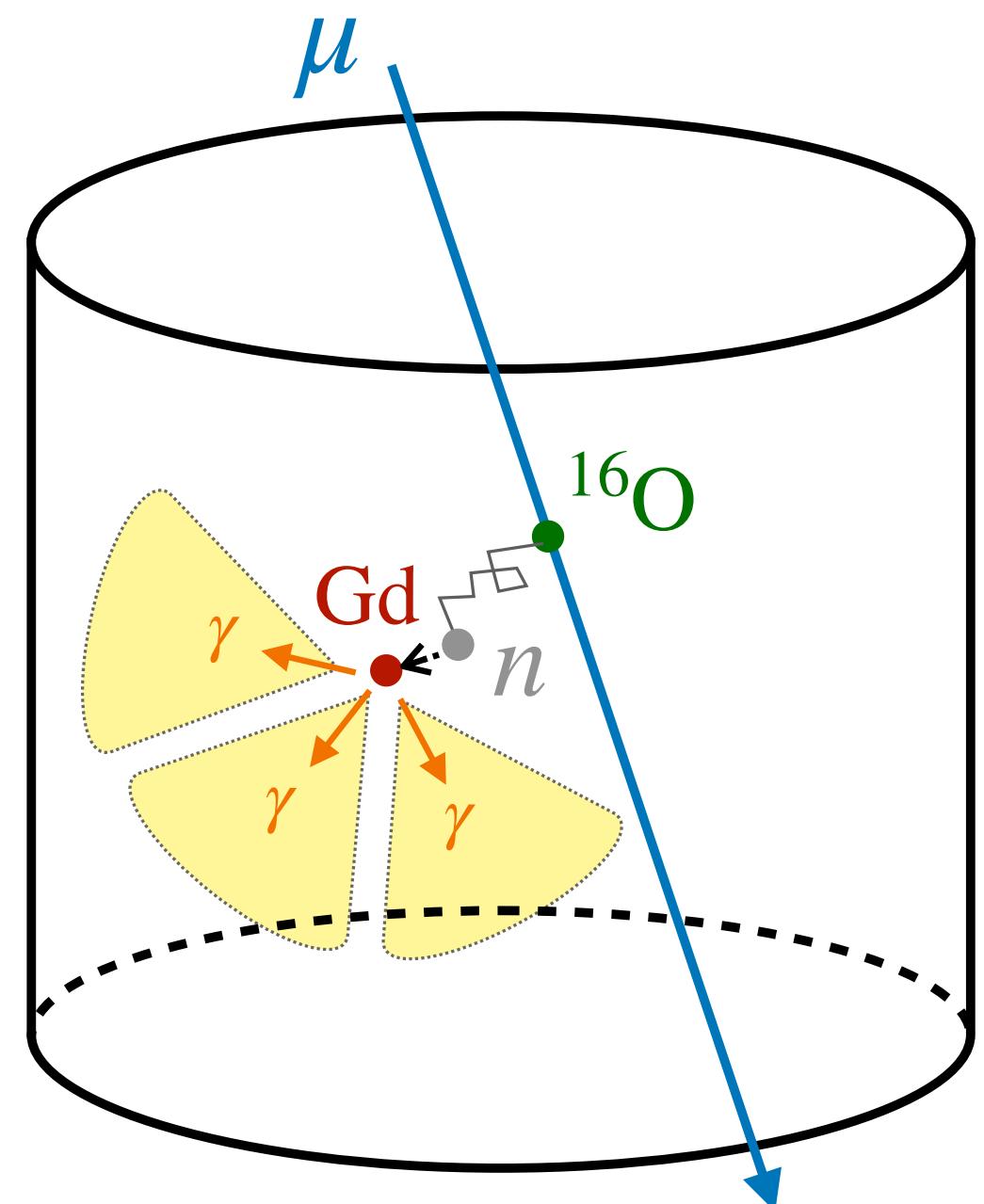
# スーパー・カミオカンデ・ガドリニウム (SK-Gd)

- 2020年から2022年にかけてガドリニウム(Gd)を水中に溶解し、中性子検出効率を飛躍的に高めた
  - Gdは非常に高い断面積で熱中性子を吸収し、SKで容易に観測できる~8MeVのガンマ線を放出
- $n + {}^N\text{Gd} \rightarrow {}^{N+1}\text{Gd} + \gamma s (\sim 8 \text{ MeV})$
- スーパーカミオカンデ始まって以来の大改造
- 中性子を最大限に利用した宇宙素粒子観測が今後の大目標
  - **超新星背景ニュートリノの世界初観測**
  - 中性子を用いた大気・加速器ニュートリノ観測の高精度化
  - 原子炉ニュートリノの観測
  - などなど



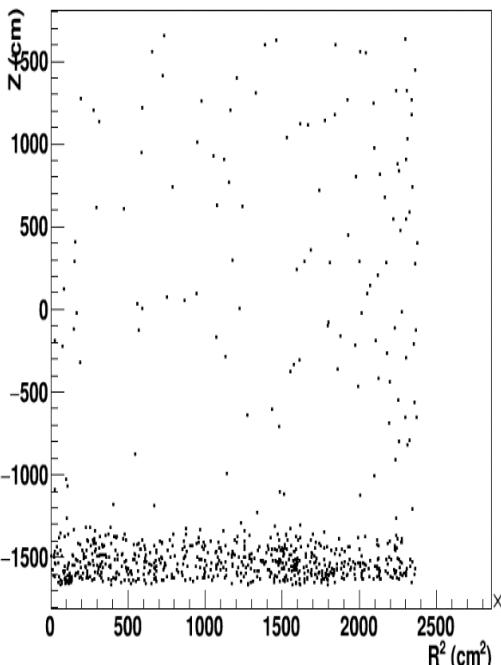
# Gd in Super-Kamiokande!

- 2020年、13トンの $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を溶解 (Gd重量濃度0.01%)
- 水の動きに沿って、Gdによる中性子捕獲事象の分布が上に伸びてゆく様子を確認

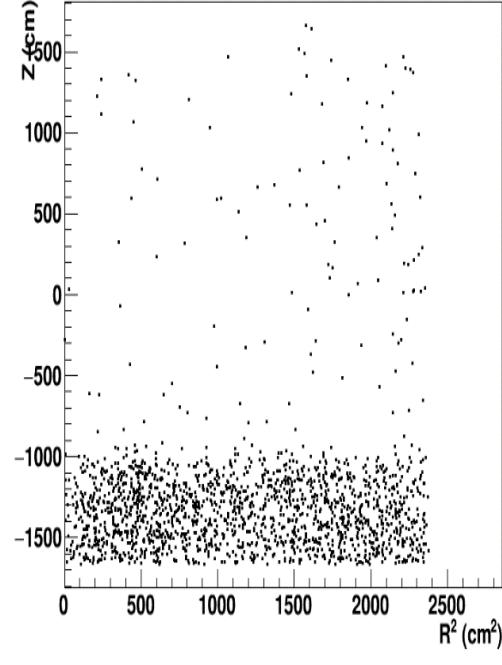


2020年

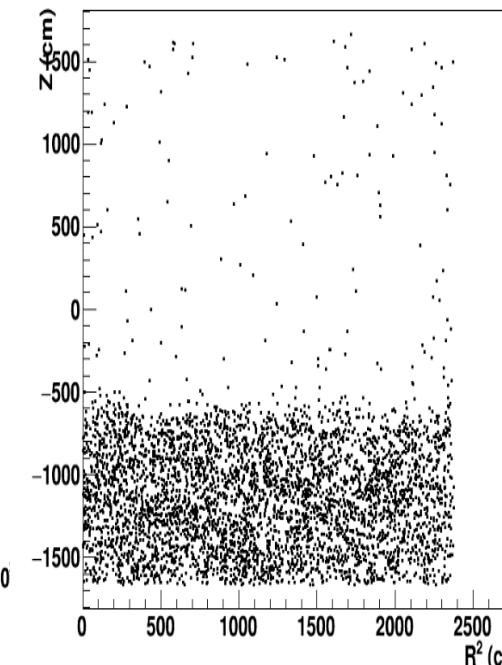
7/18



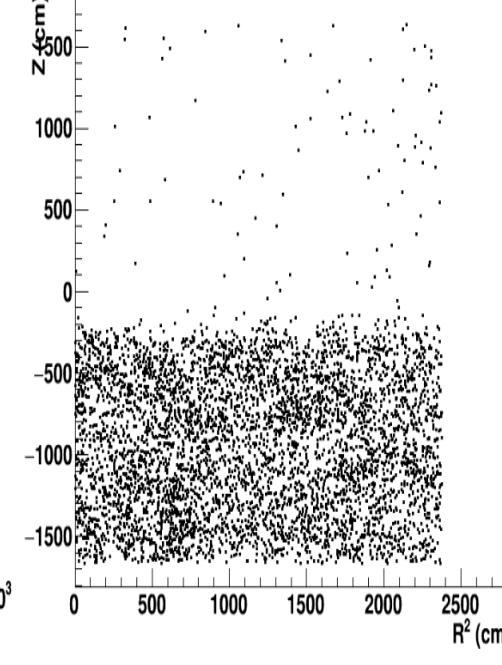
7/21



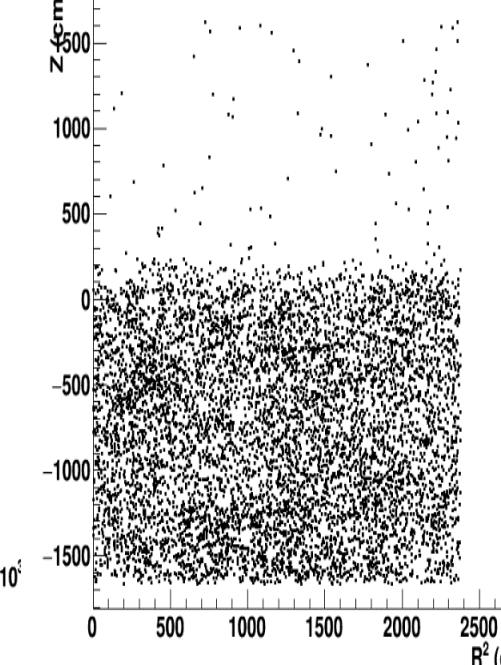
7/24



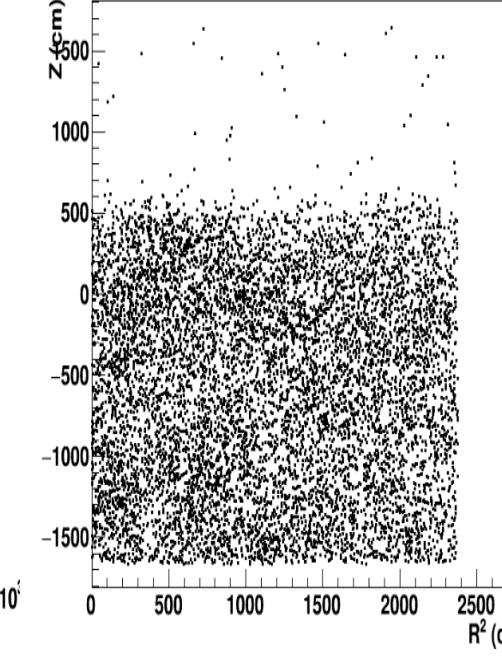
7/27



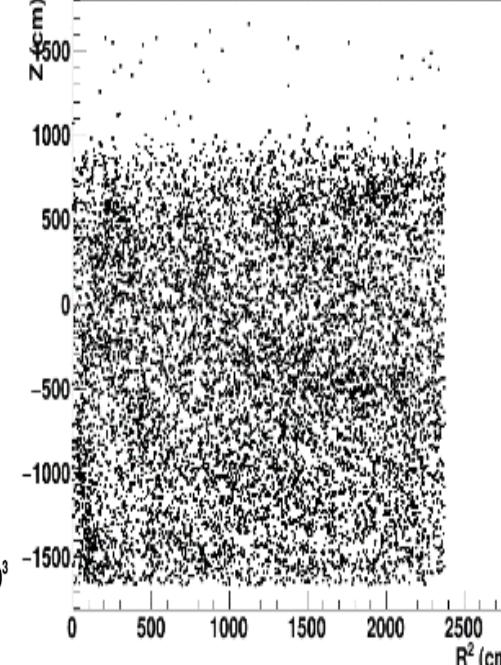
7/30



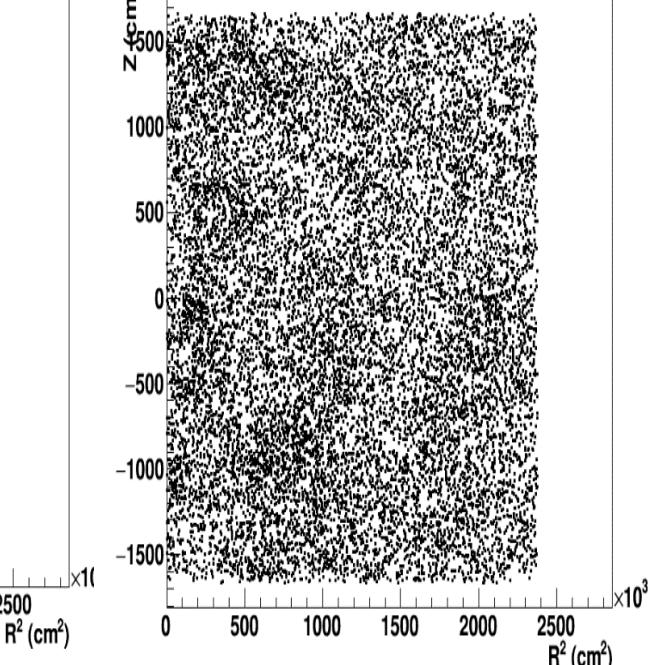
8/2



8/5



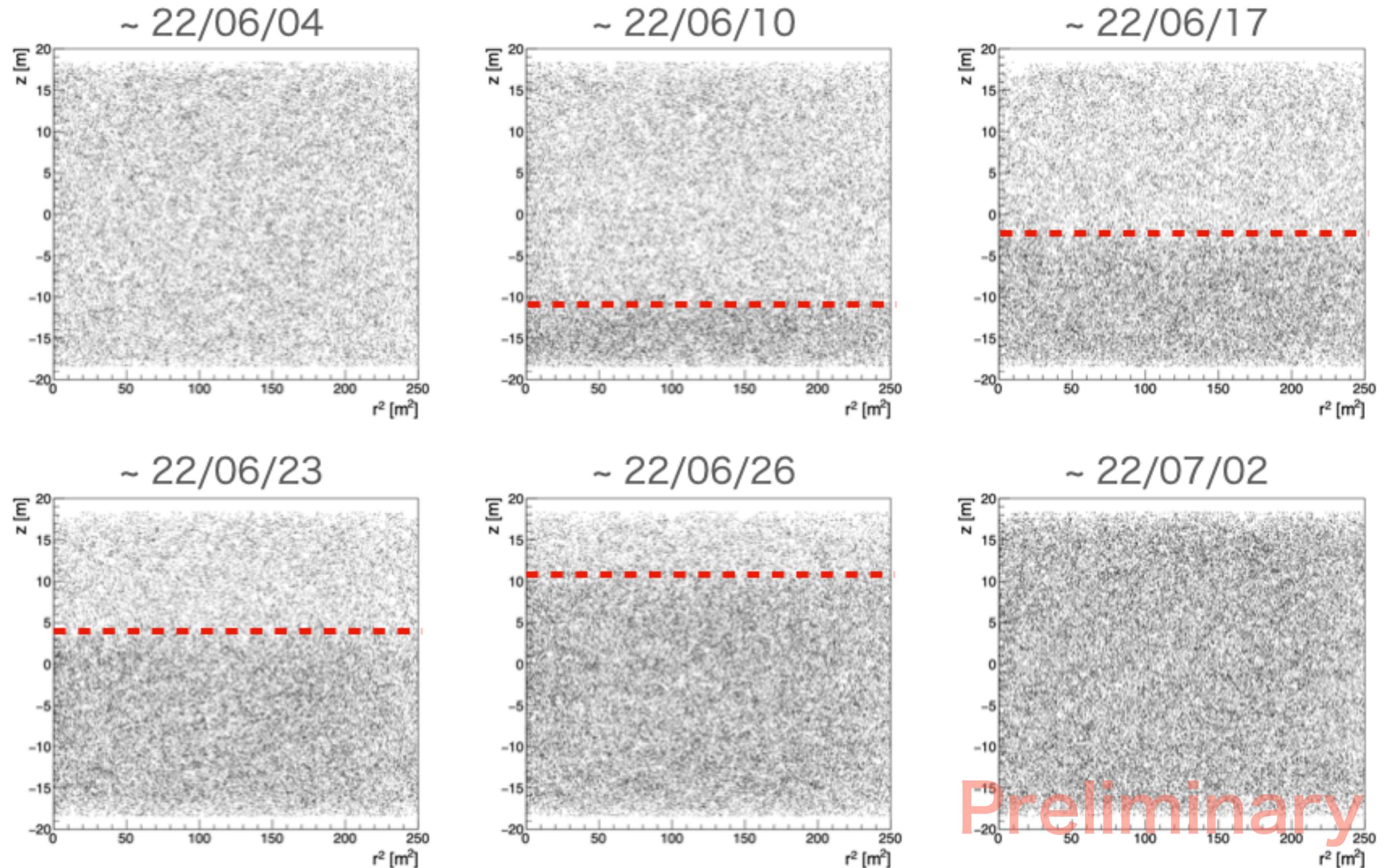
8/8



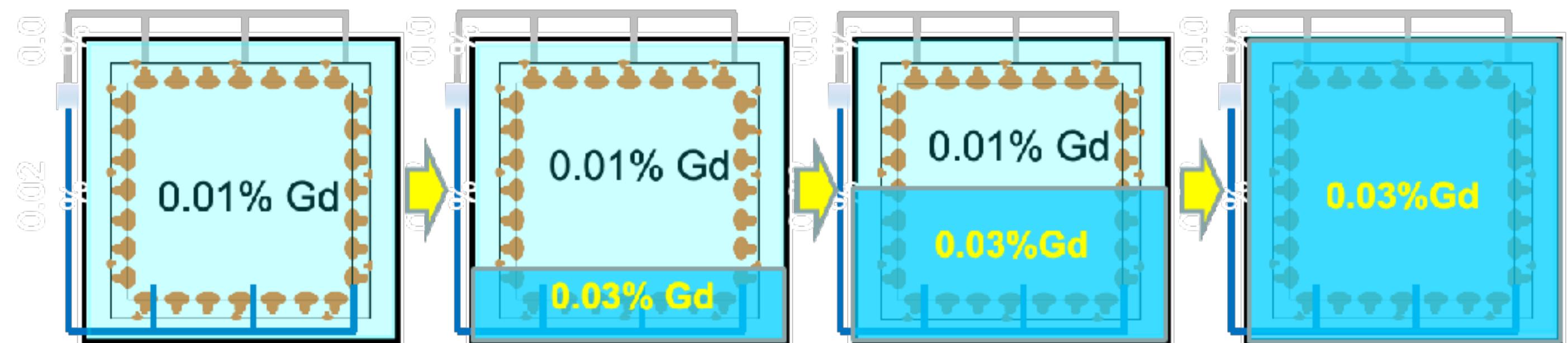
# Gd in Super-Kamiokande!

志摩さん(横山・中島研OG)  
中島研学生が関連した研究を継続中

- 2022年、さらに26トンの  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  を溶解
  - Gd重量濃度: 0.03%
  - 75%の中性子がGdに捕獲されるように



新生スーパーカミオカンデがスタート  
超新星背景ニュートリノの  
「発見」を目指しています



# 超新星「背景」ニュートリノ

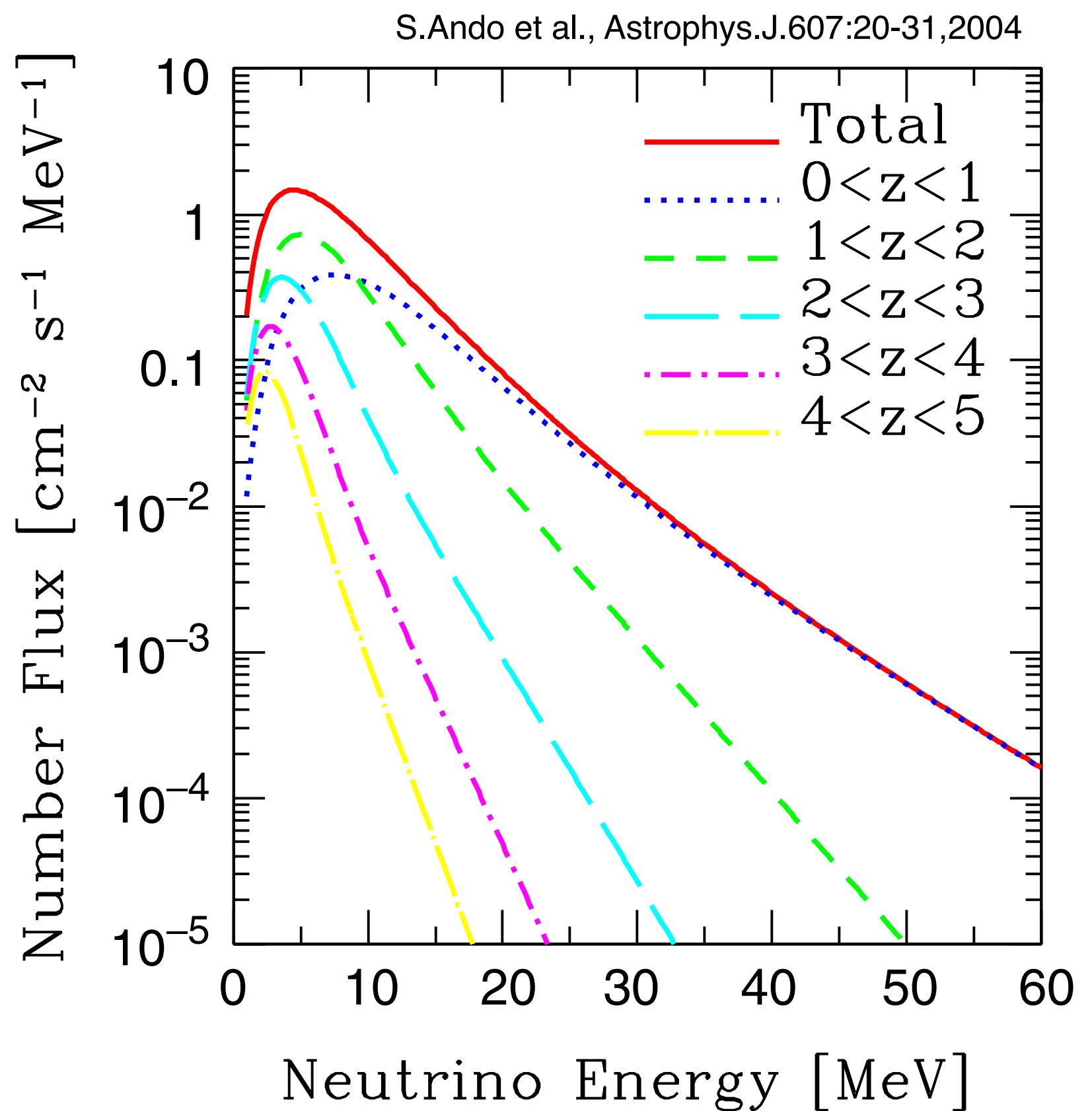
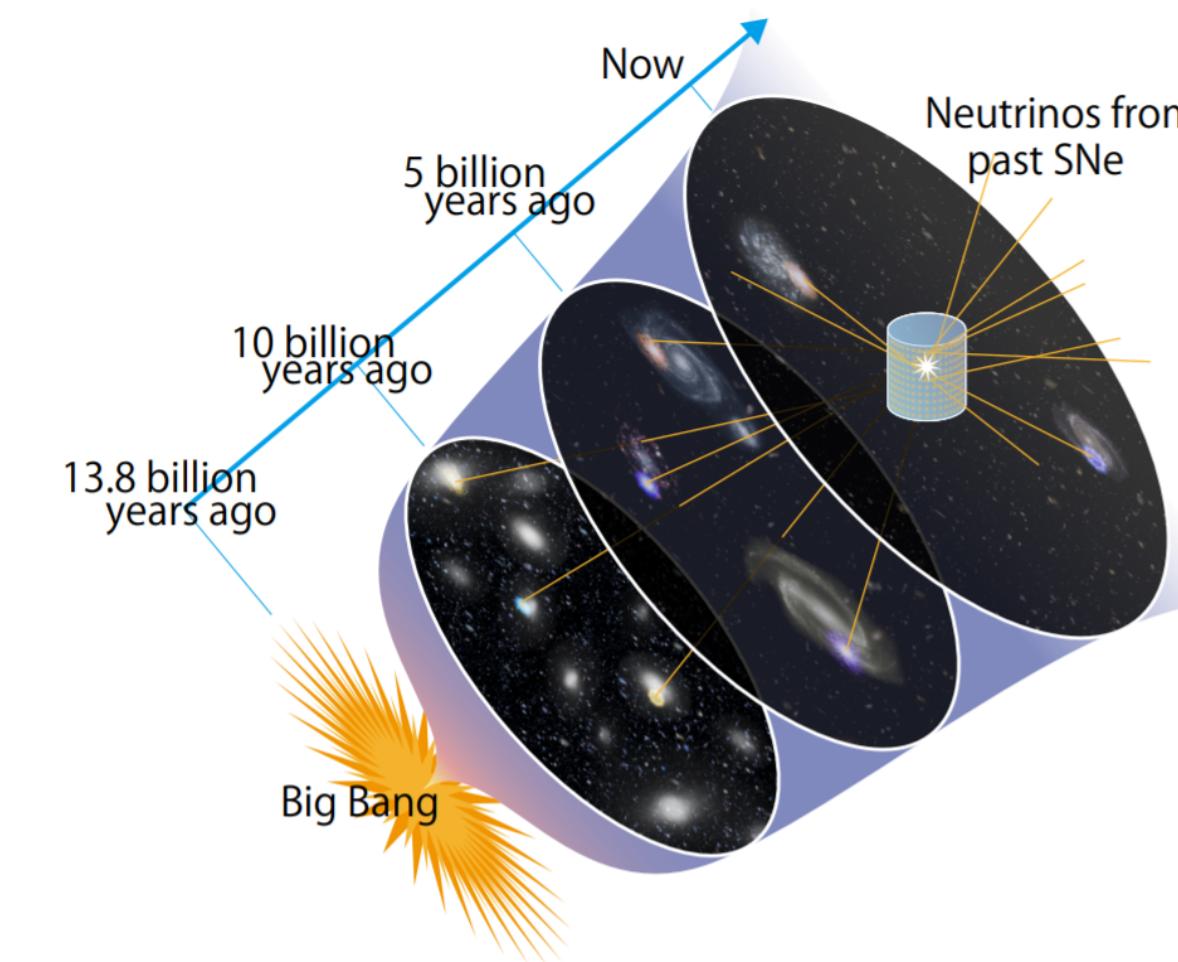
- 過去の超新星爆発で作られ、現在の宇宙に蓄積していると考えられるニュートリノ

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

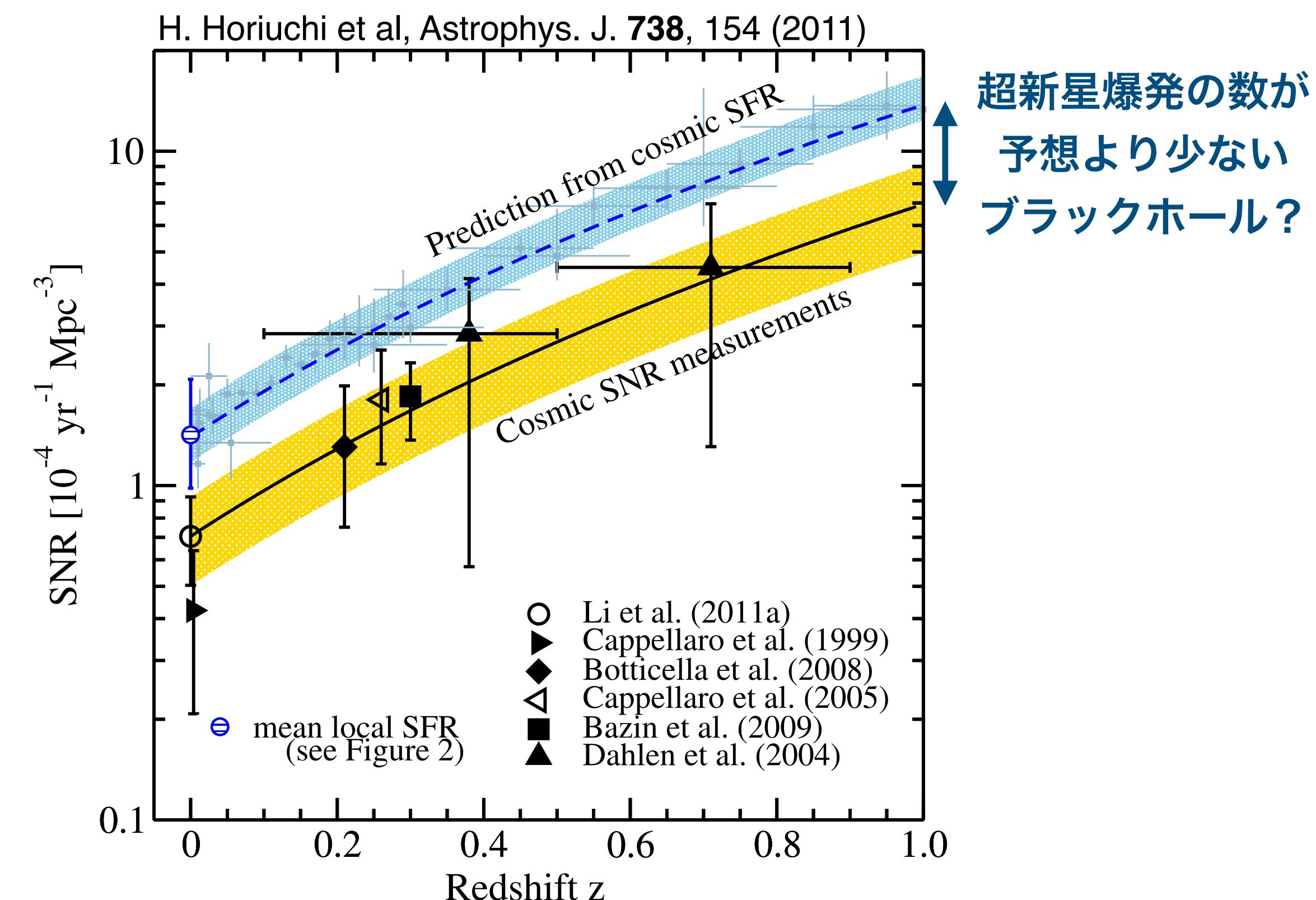
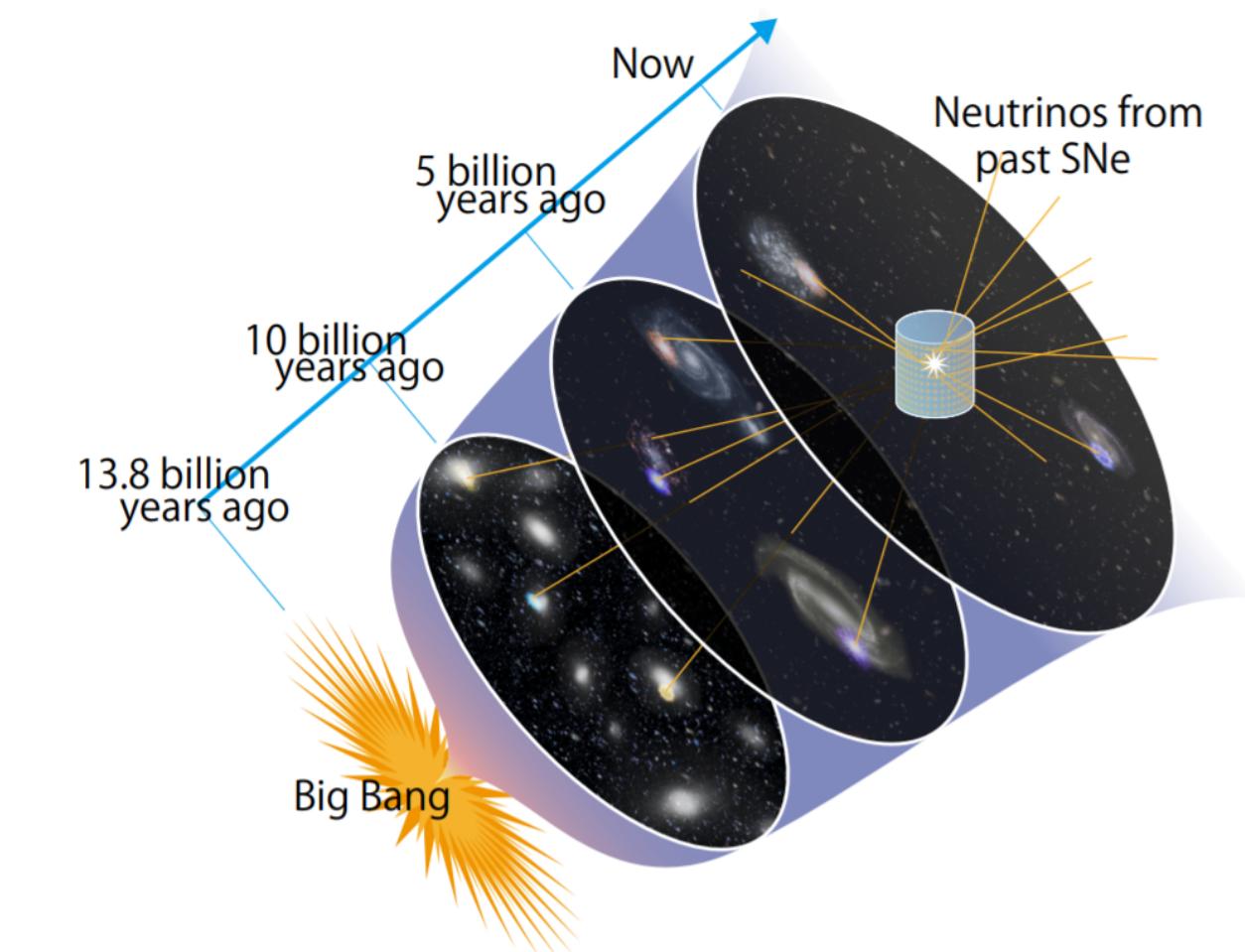
- 過去の超新星爆発で作られ、現在の宇宙に蓄積していると考えられるニュートリノ

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

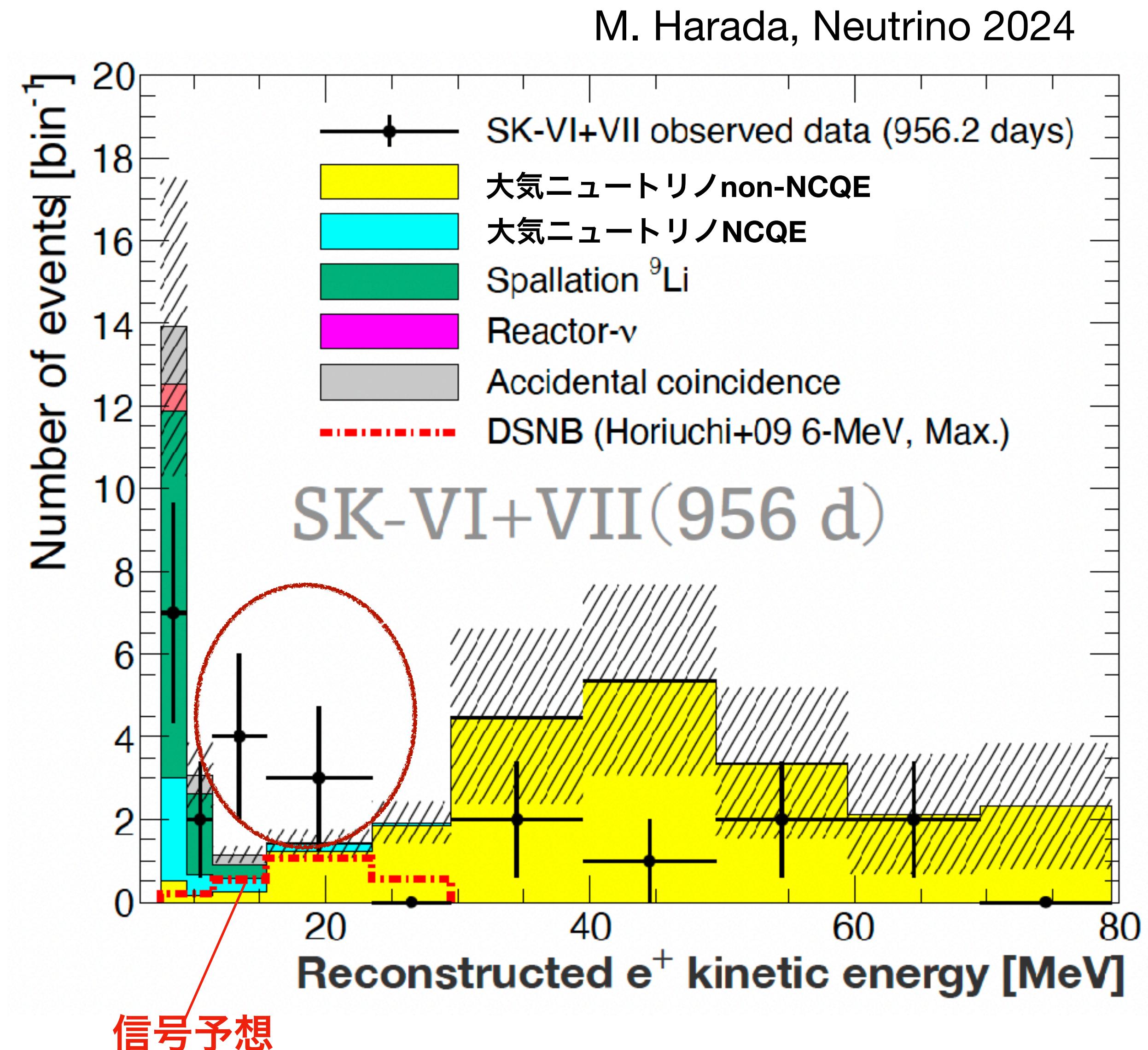
$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

- 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 最新の探索結果

- 信号: 反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊  
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- SK-Gdのデータを使った最新結果（昨年のNeutrino 2024国際会議で発表）ではわずかな信号の超過が見られた
- 超新星背景ニュートリノの信号を捉えつつある！？
- 一方で、「発見」のためには大気ニュートリノ背景事象のより精密な理解が必須



# 超新星背景ニ

- 信号: 反電子ニュートリノ  
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ +$
- SK-Gdのデータを使った  
のNeutrino 2024国際会議  
ずかな信号の超過が見ら
- 超新星背景ニュートリノ  
つある！？
- 一方で、「発見」のため  
トリ背景事象のより精密

nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾ Subscribe

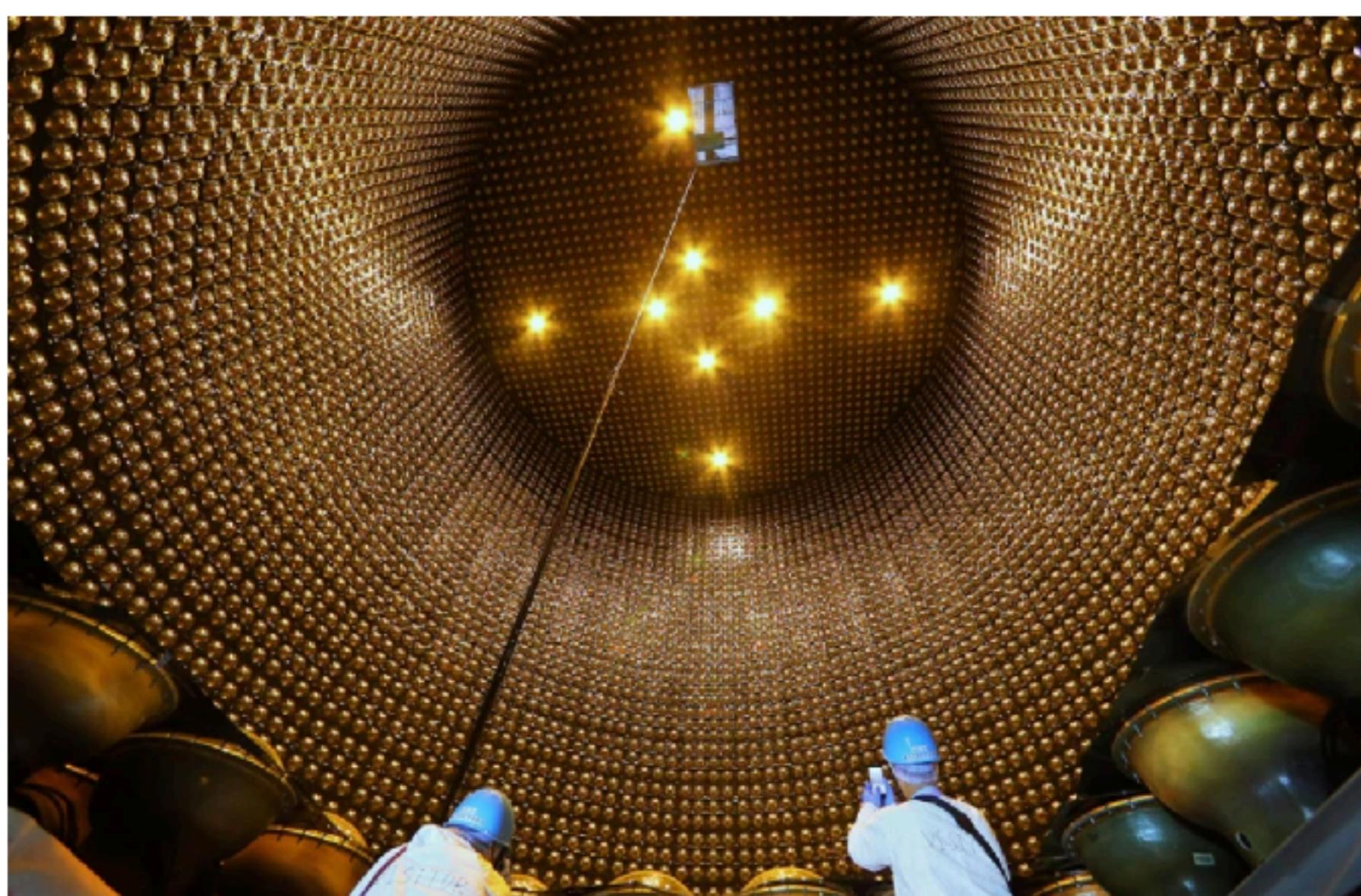
nature > news > article

NEWS | 09 July 2024

## Huge neutrino detector sees first hints of particles from exploding stars

Japan's Super-Kamiokande observatory could be seeing evidence of neutrinos from supernovae across cosmic history.

By [Davide Castelvecchi](#)



The image shows the interior of the Super-Kamiokande detector, a large cylindrical tank filled with water and numerous light sensors (photomultiplier tubes) arranged in a grid pattern on the walls and ceiling. A few bright light spots are visible, likely from particle interactions. A person in a white protective suit and blue hard hat is standing in the foreground, providing a sense of scale to the enormous detector.

# 探索結果

M. Harada, Neutrino 2024

SK-VI+VII observed data (956.2 days)

大気ニュートリノnon-NCQE

大気ニュートリノNCQE

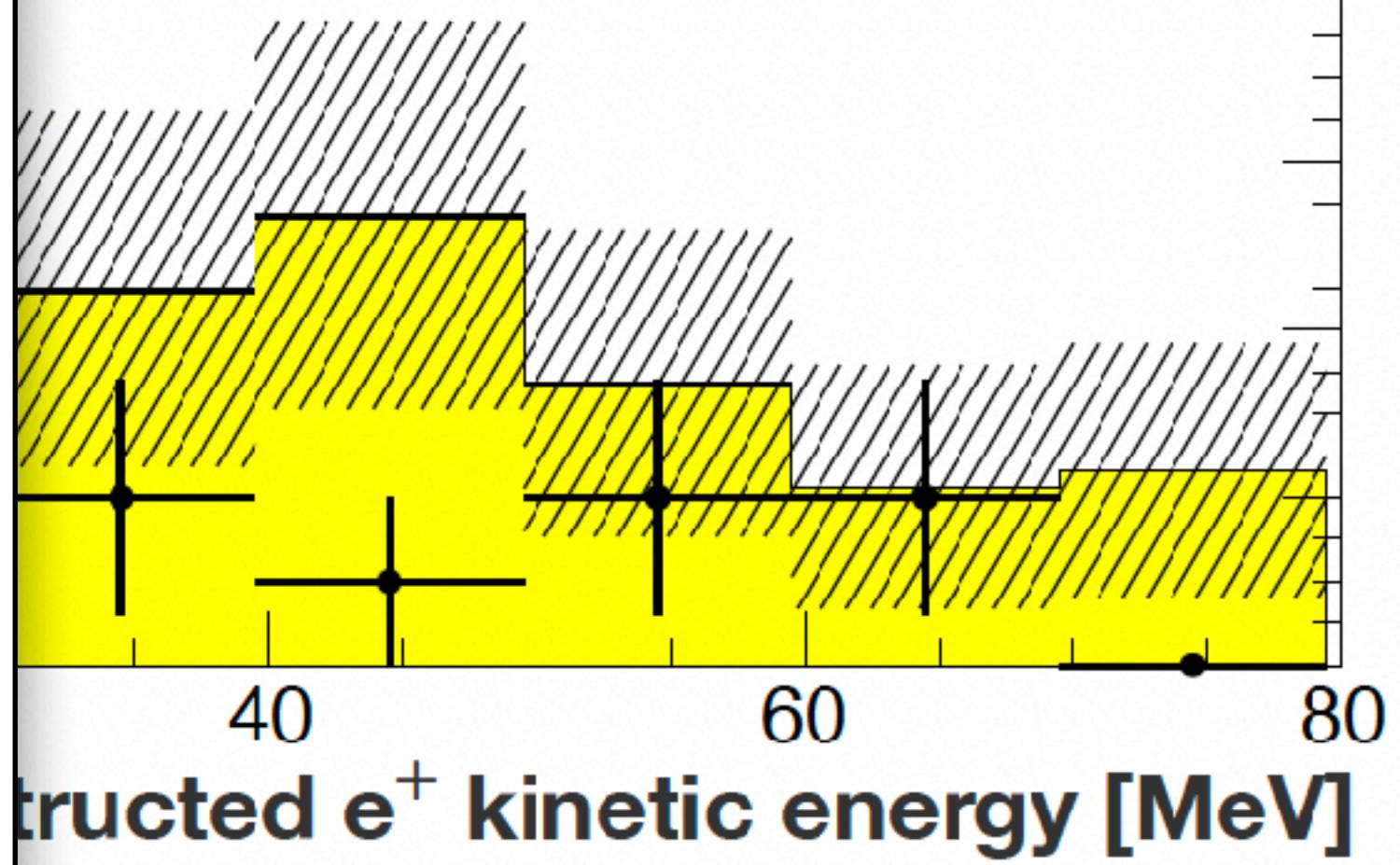
Spallation  ${}^9\text{Li}$

Reactor- $\nu$

Accidental coincidence

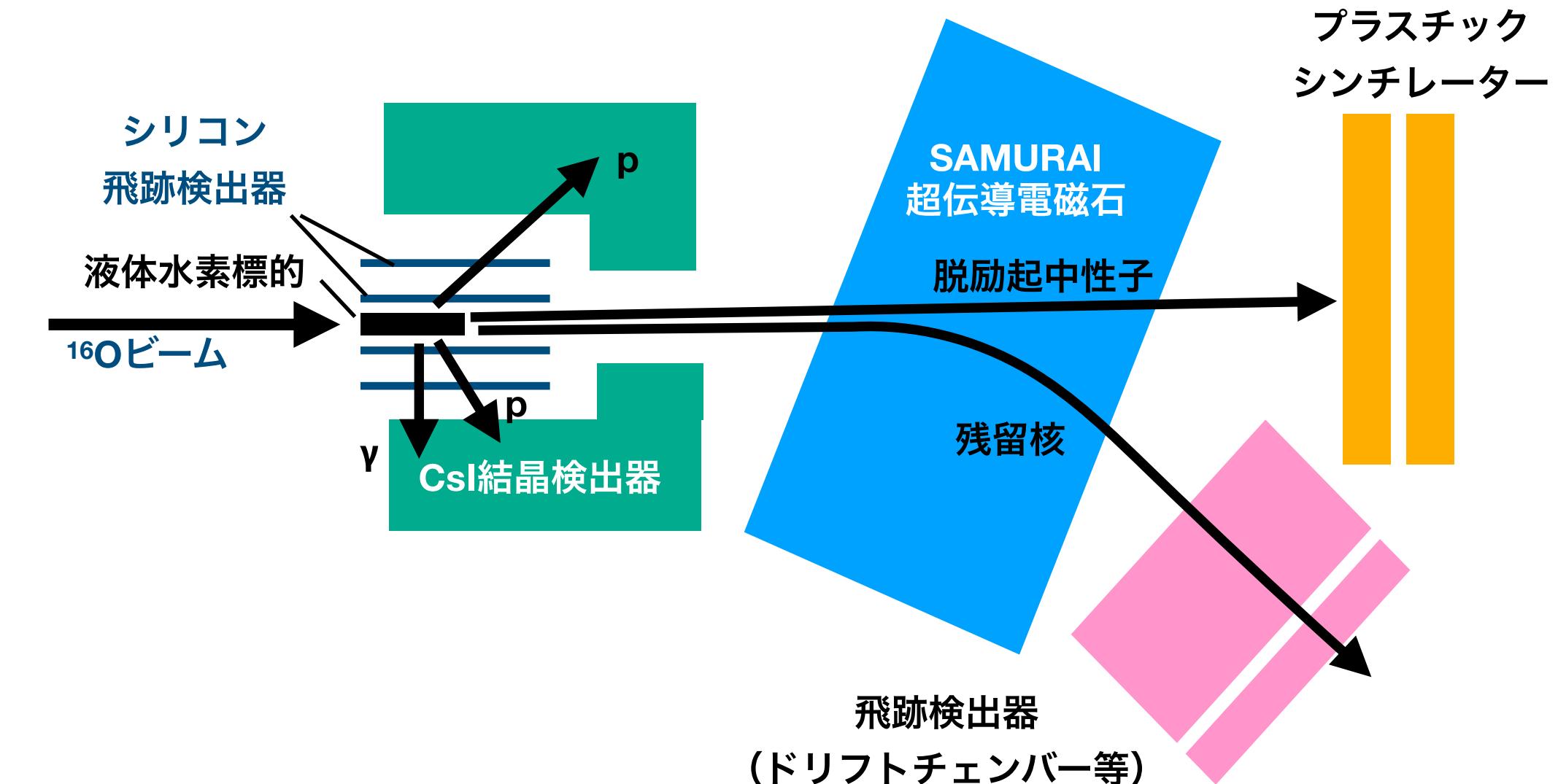
DSNB (Horiuchi+09 6-MeV, Max.)

VI+VII(956 d)



# ニュートリノ反応を理解するための原子核実験

- SK-Gdの能力を最大限発揮するには、原子核の脱励起過程で出てくる中性子の理解が鍵
- 理化学研究所RIビームファクトリーでの酸素原子核反応実験を準備中 (SAMURAI-79実験)



ここがあまりよく分かっていない。  
→自分たちで実験してデータをとる！

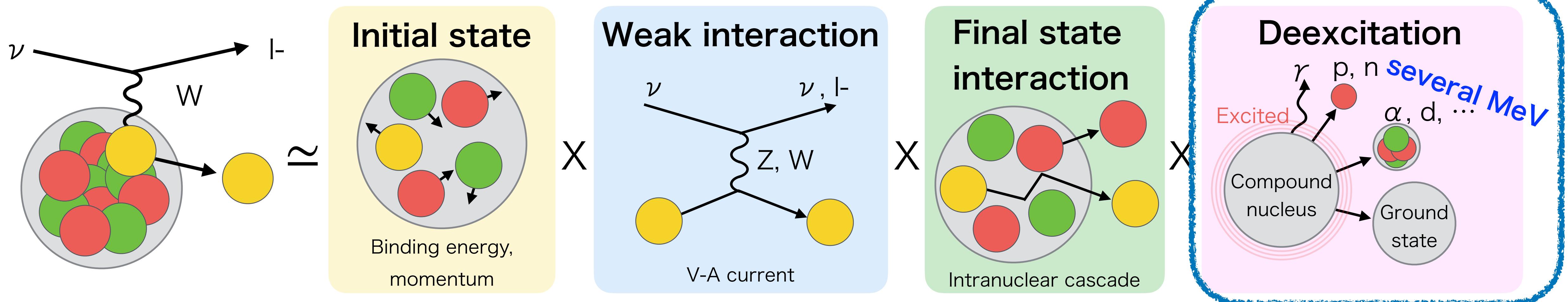
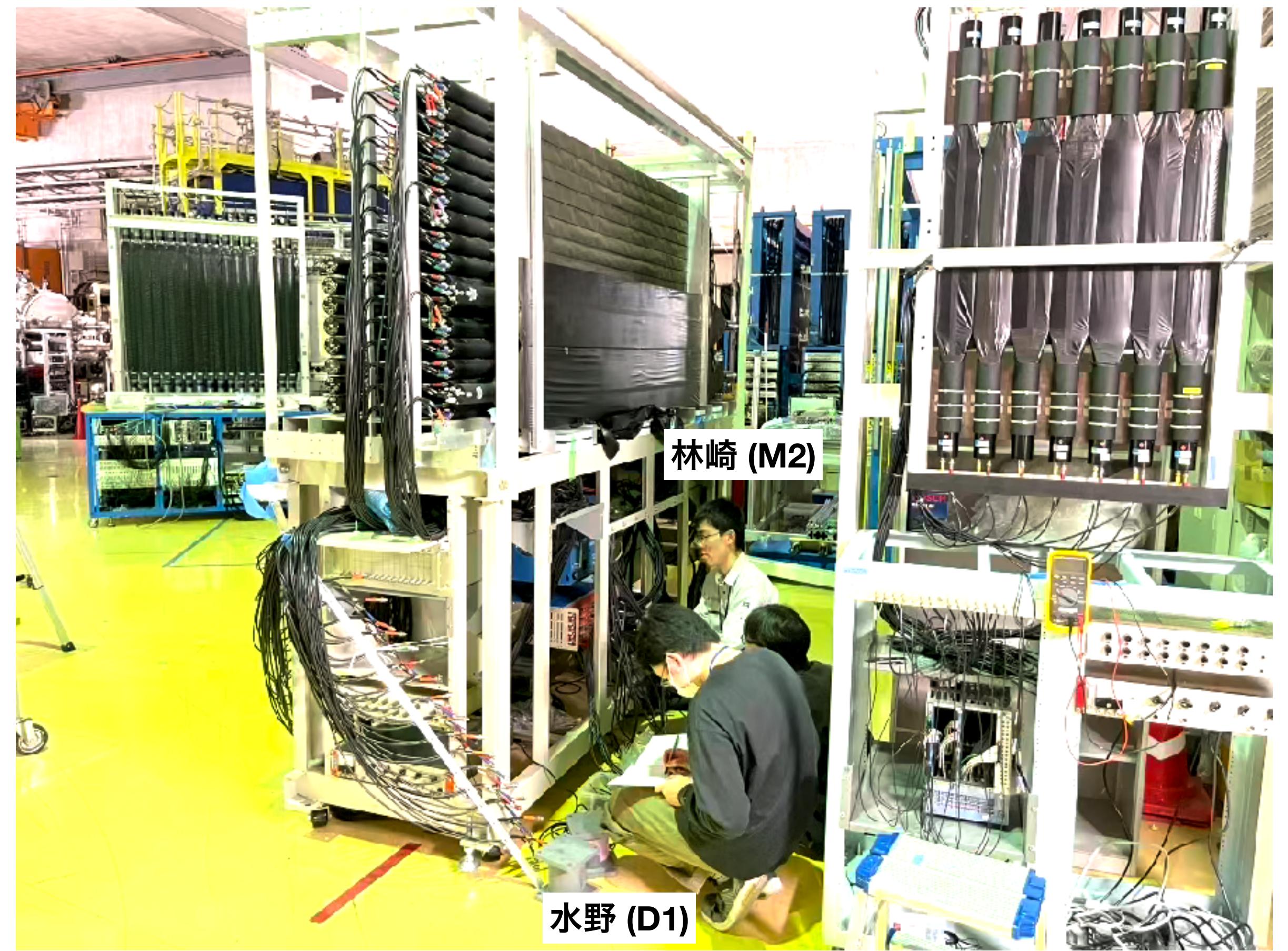
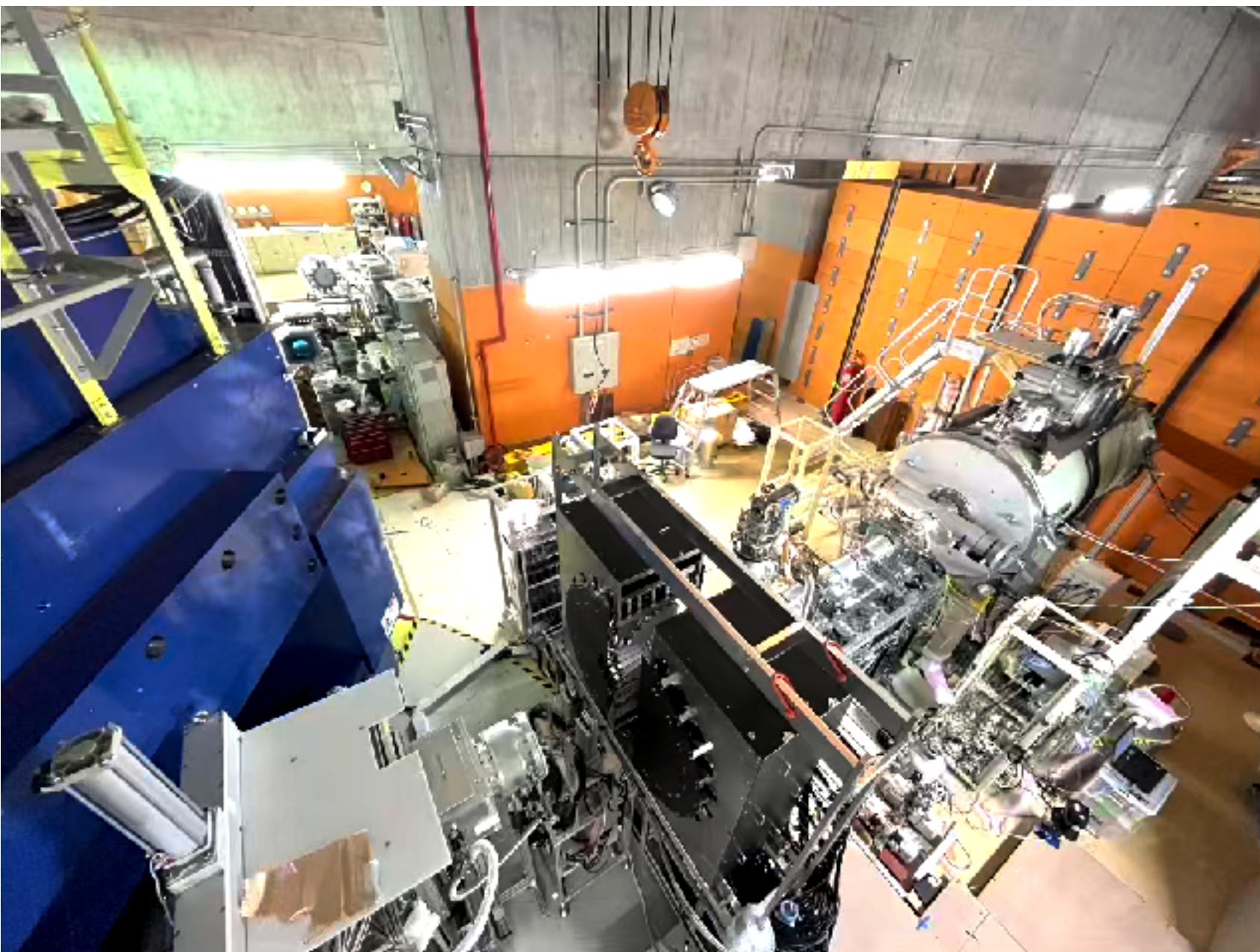


Figure by S. Abe

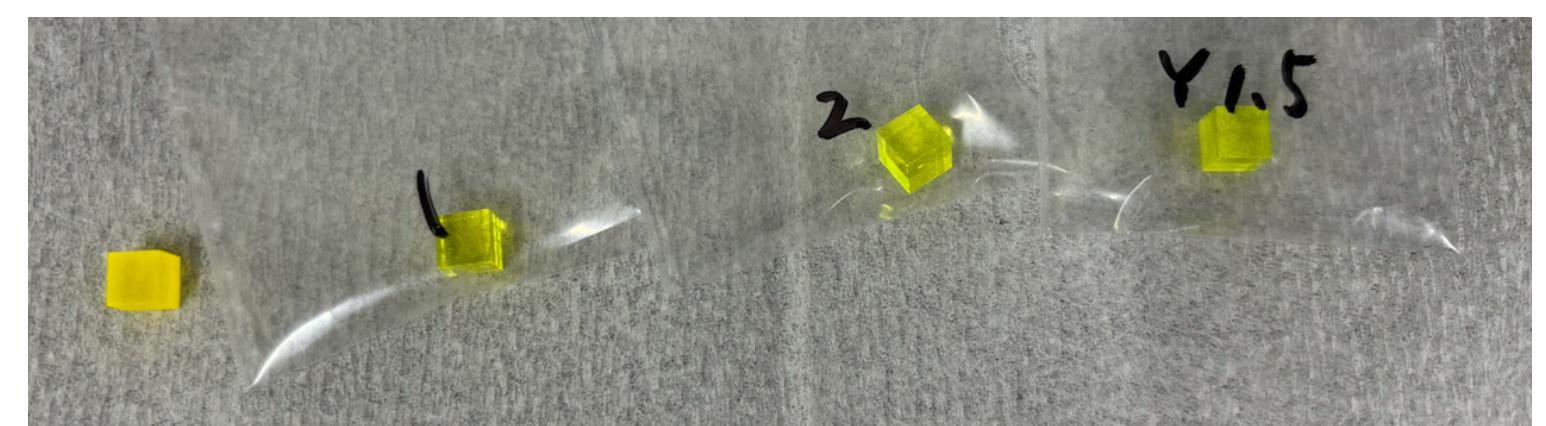
# ニュートリノ反応を理解するための原子核実験

- 2024年12月の理化学研究所の原子核実験課題審査委員会で採択
  - 素粒子実験分野からの提案としては初めて
- 2025年から2026年のデータ取得を目指して準備中



# 二重ベータ崩壊の探索のための検出器開発

- ・ニュートリノはマヨラナ粒子か？
- ・マヨラナ粒子なら
  - ・ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が起こる
  - ・宇宙初期の物質・反物質を非対称性を作り出すメカニズムが説明可能？
- ・SK-Gdのために高純度のGdを精製
  - ・他にも高純度ガドリニウムを生かせる用途は無いか？
- ・ $^{160}\text{Gd}$ からの二重ベータ崩壊のためのガドリニウムを含んだ高純度無機結晶を開発・評価中



# 大型プロジェクトの中での研究

- ・ スーパーカミオカンデ、T2K、ハイパーカミオカンデは、200~600名程度の研究者で行っている国際プロジェクト
- ・ 世界中の研究者がそれぞれ得意分野を持ち寄って、協力し大きなことを成し遂げるという面白さ
- ・ 実験への貢献は、装置の製作・較正、解析手法の開発など多種多様
  - ・ それぞれの要素を見ると、大学院生1-2名で成り立っていたりする
  - ・ 大学院生一人の貢献が、実験全体に大きな影響をもたらす
- ・ 並行して、小・中規模のプロジェクトもたくさんやっています！

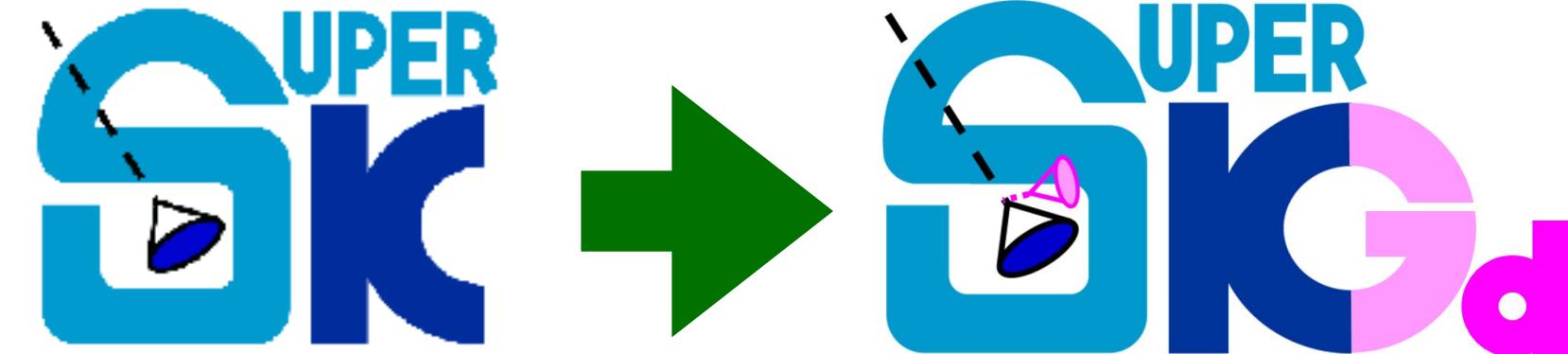


# まとめ

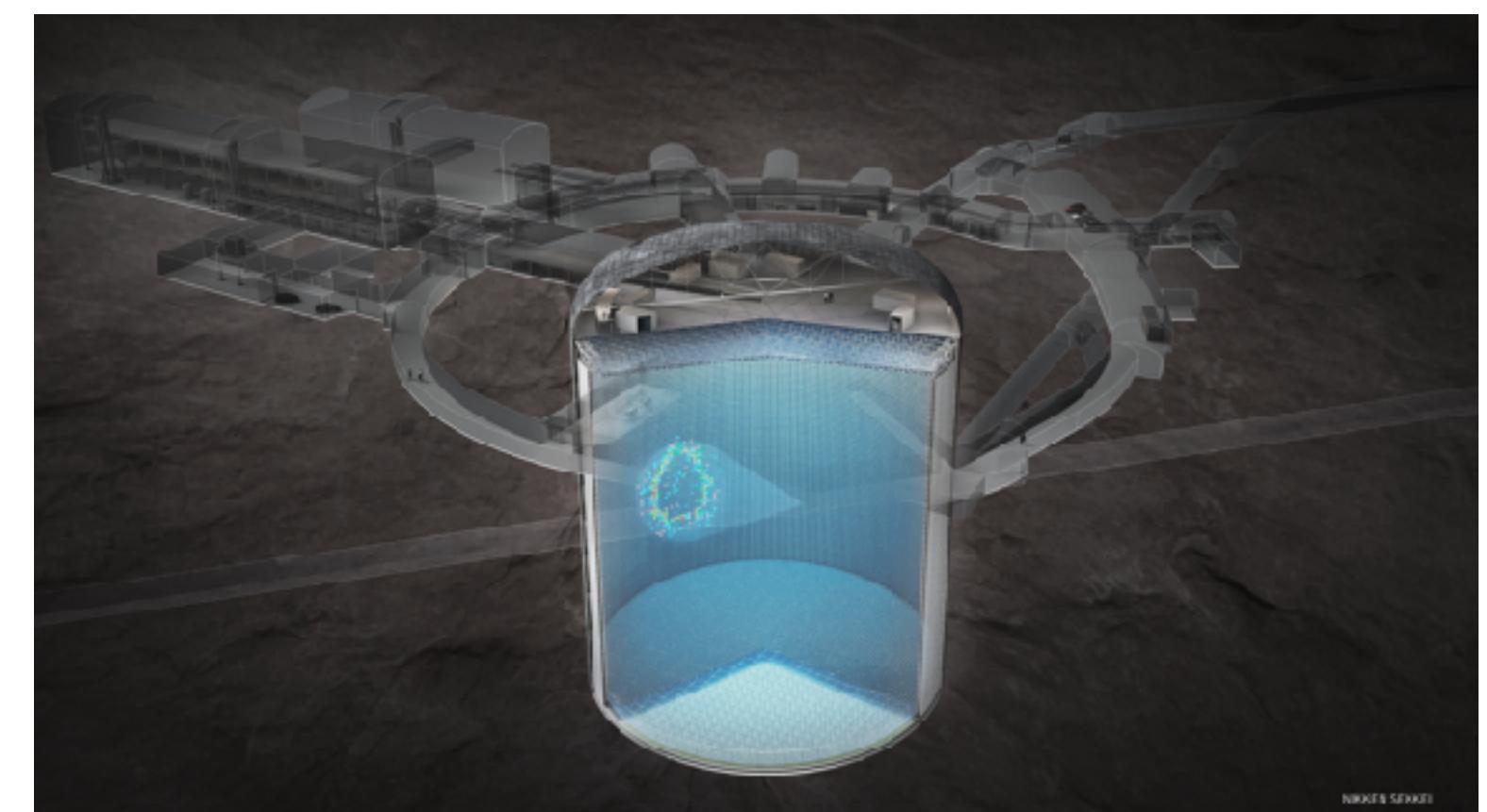
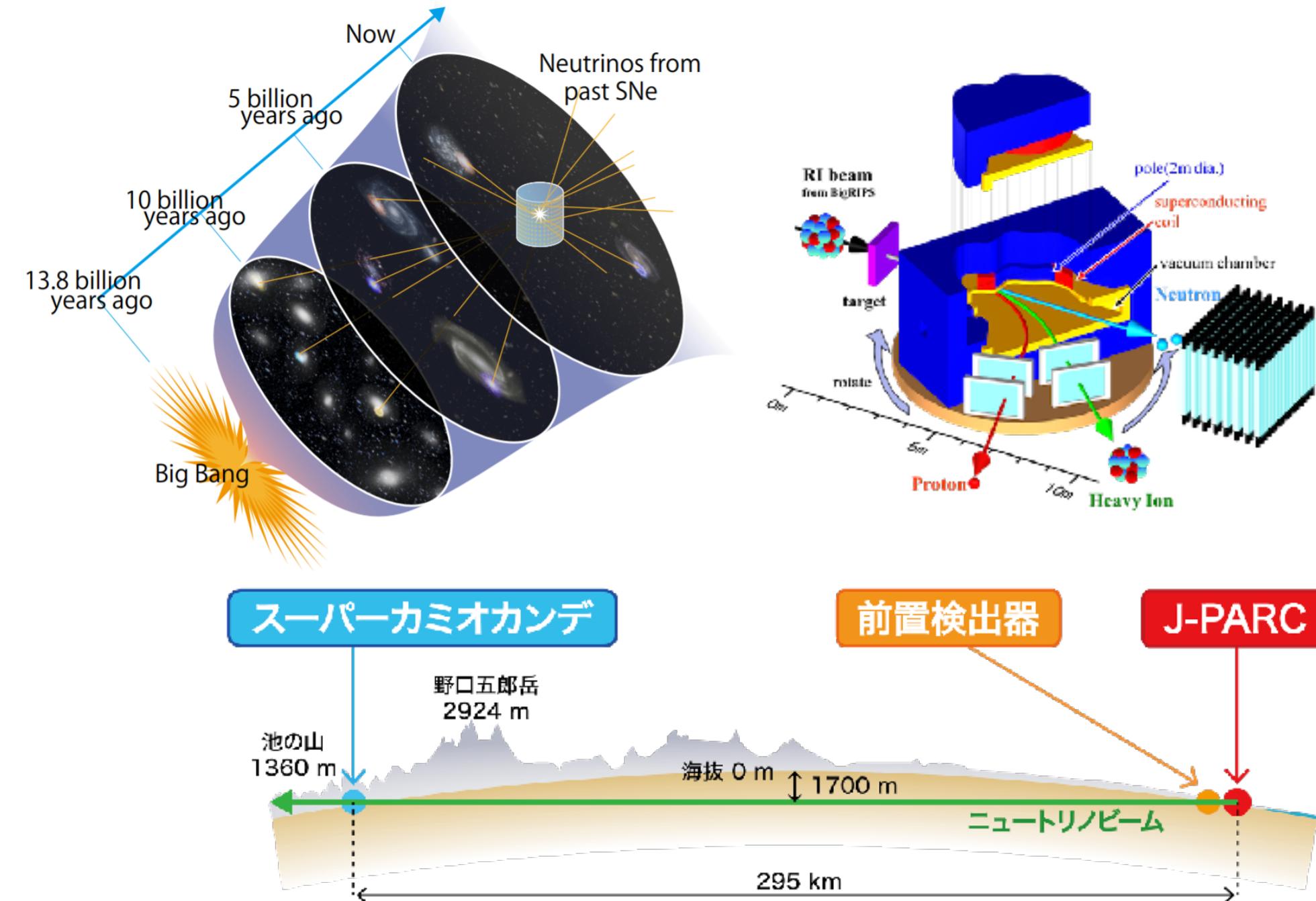
- ニュートリノを用いた素粒子実験・宇宙観測を通じ、宇宙の成り立ちを解明することを目指しています
- ガドリニウムを加えた新生スーパーカミオカンデを用いた実験**
  - 超新星背景ニュートリノの世界初観測
  - ニュートリノ・反ニュートリノ非対称性の観測（T2Kビーム）
- ニュートリノ反応を理解するためのビーム実験**
  - 新たな検出器開発
  - ハイパーカミオカンデ**の推進
    - 光電子増倍管の精密較正など

より詳しく話を聞きたい方、以下もぜひご参加ください

横山（将）研・中島研オープンラボ: 5/31（土）15:30-17:30（13:30頃からいます）  
A2サブコース大学院入試ガイダンス: 6/4（水）16:00～18:00（対面+Zoom）



(1996-2020) (2020- )



詳しくは: <https://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/guidance2025/>