

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

2024年5月24日

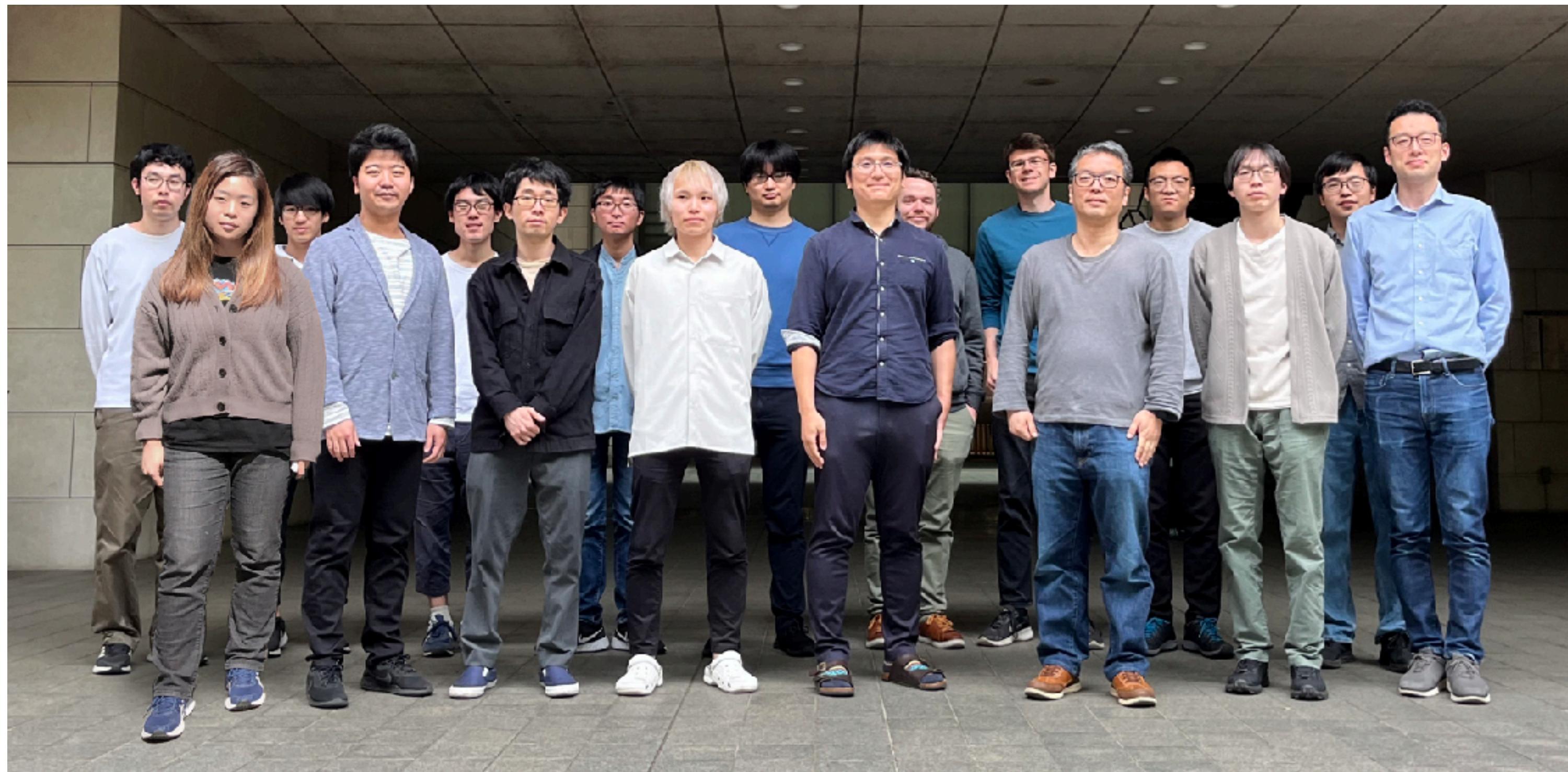
中島 康博 (なかじま やすひろ)

Email: yasuhiro.nakajima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

居室: 理学部1号館6階 601b

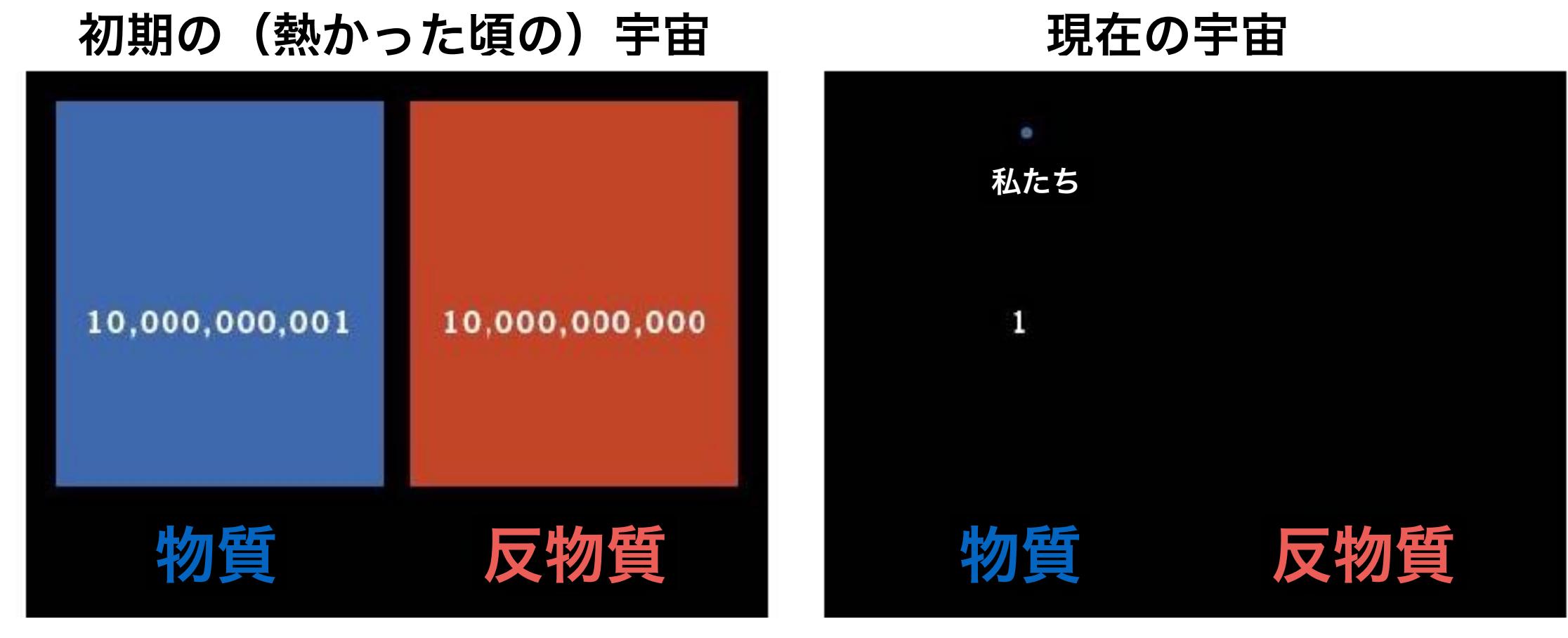
2021年4月にスタートした
比較的新しい研究室です

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



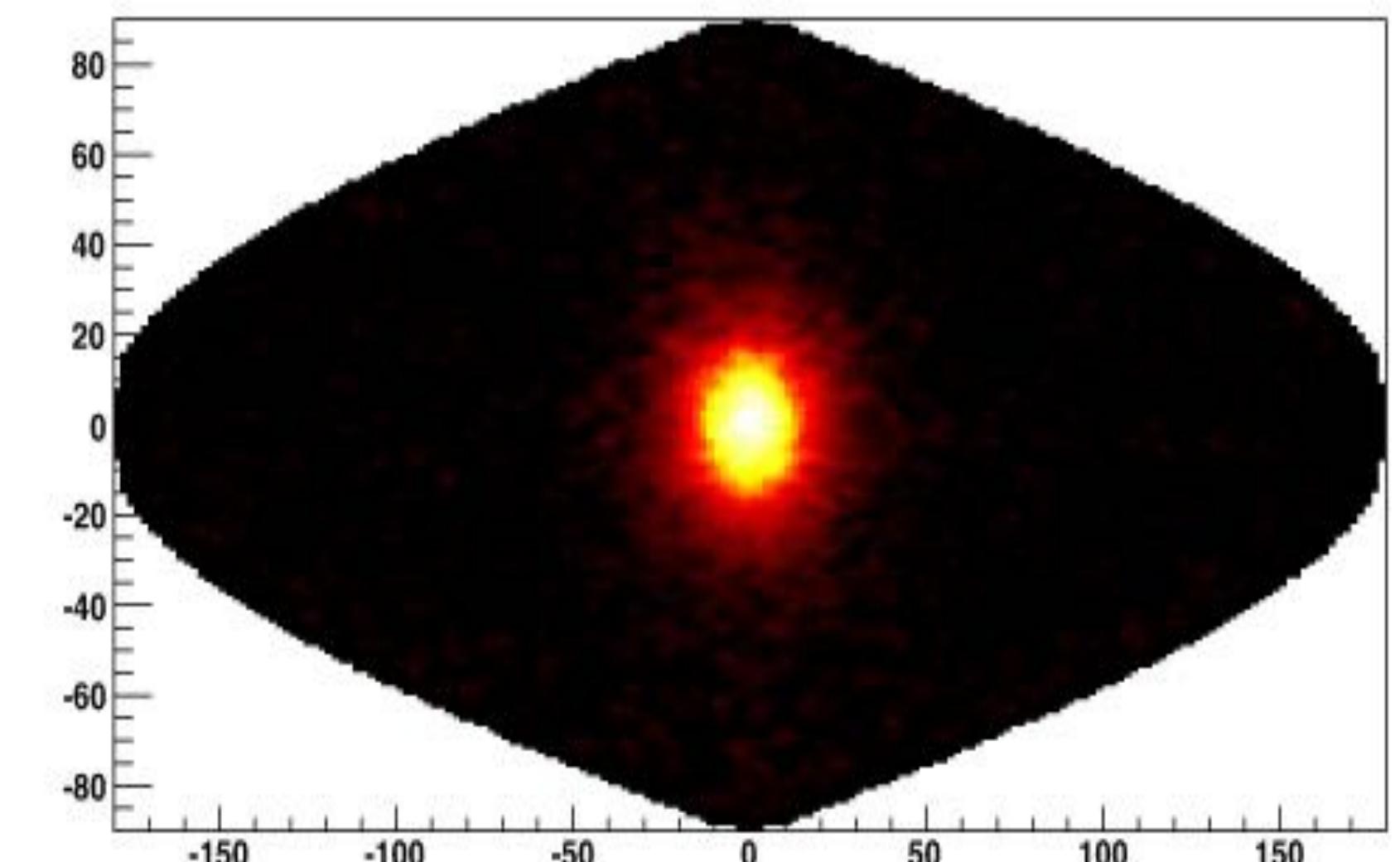
なぜニュートリノを研究するか

- 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



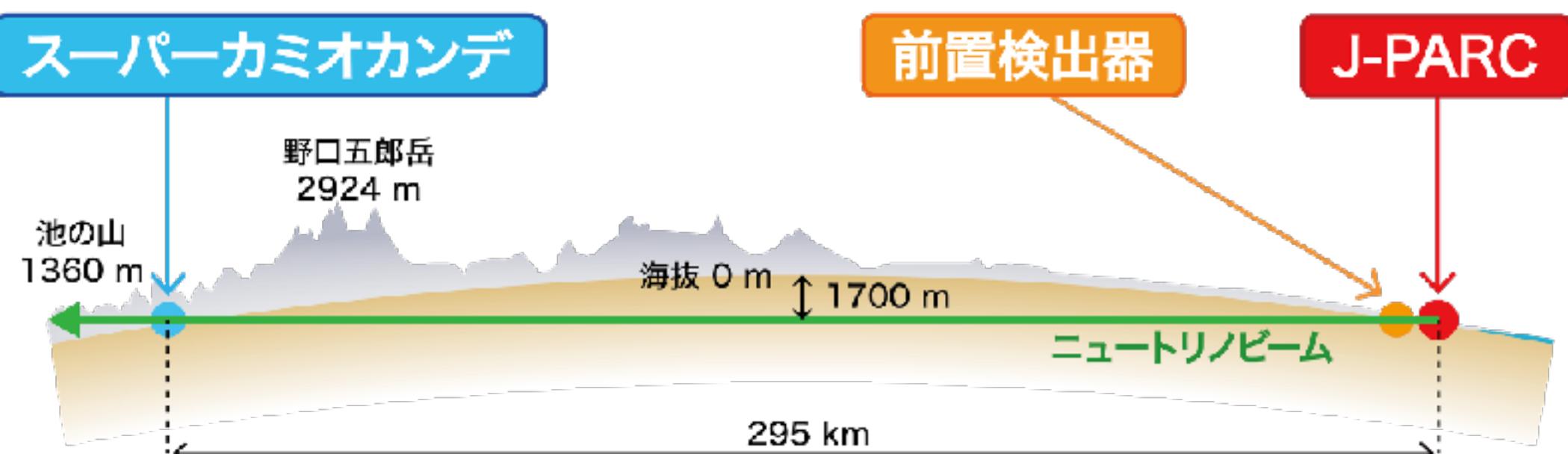
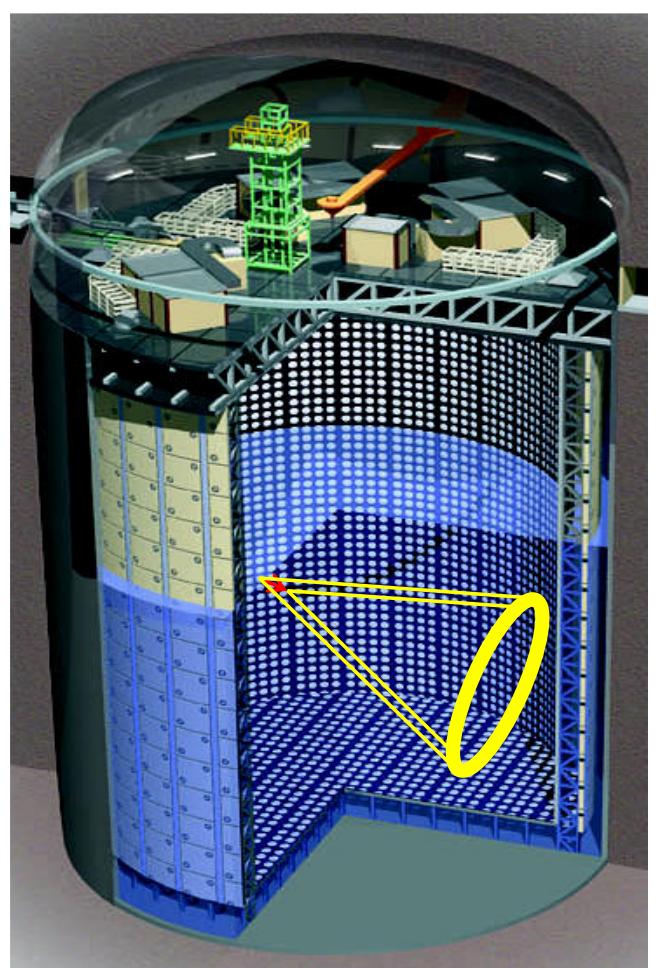
H. Murayama

ニュートリノで見た太陽



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*

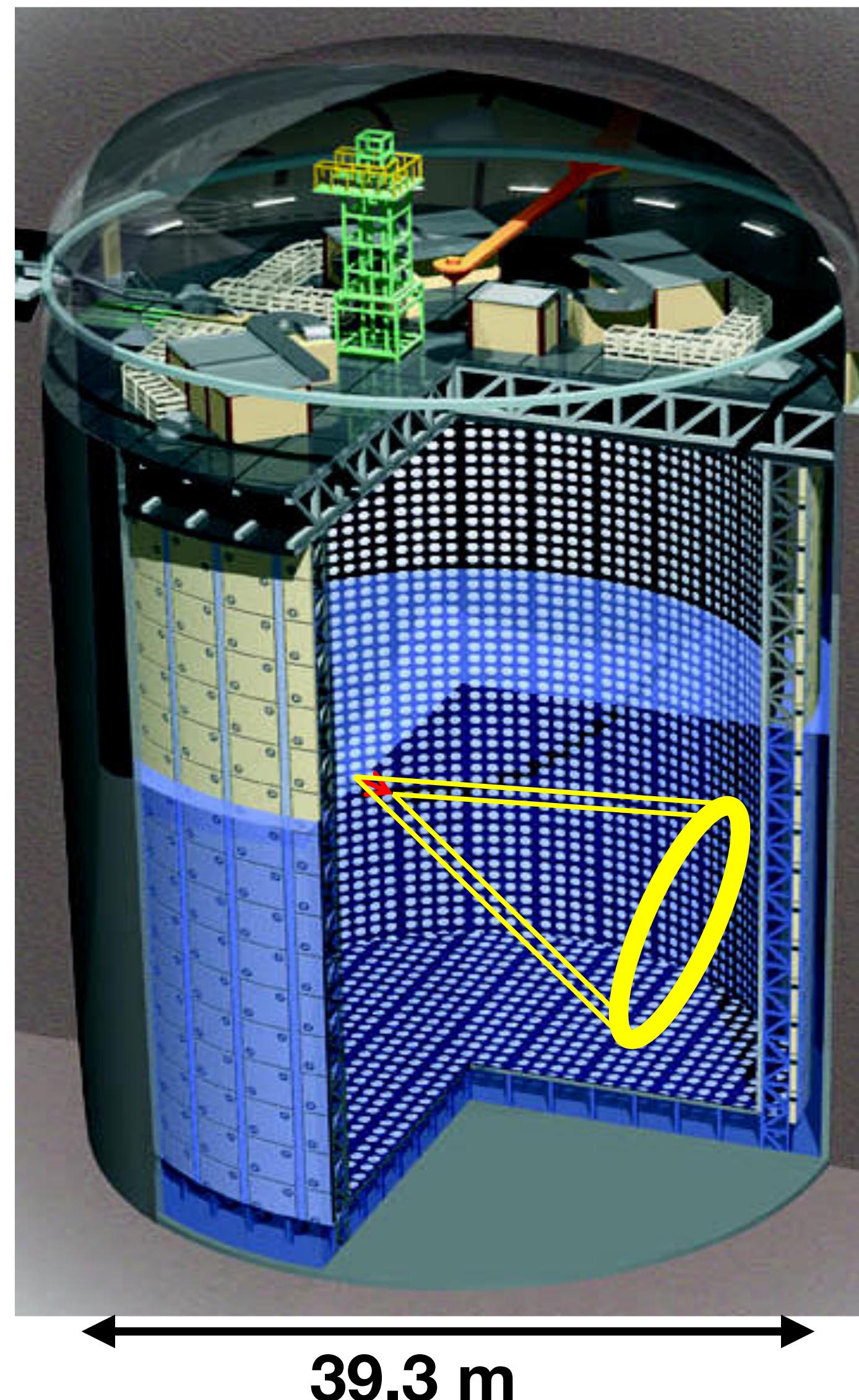


ハイパーカミオカンデ用光電子増倍管の評価（渡辺・中島研OB）

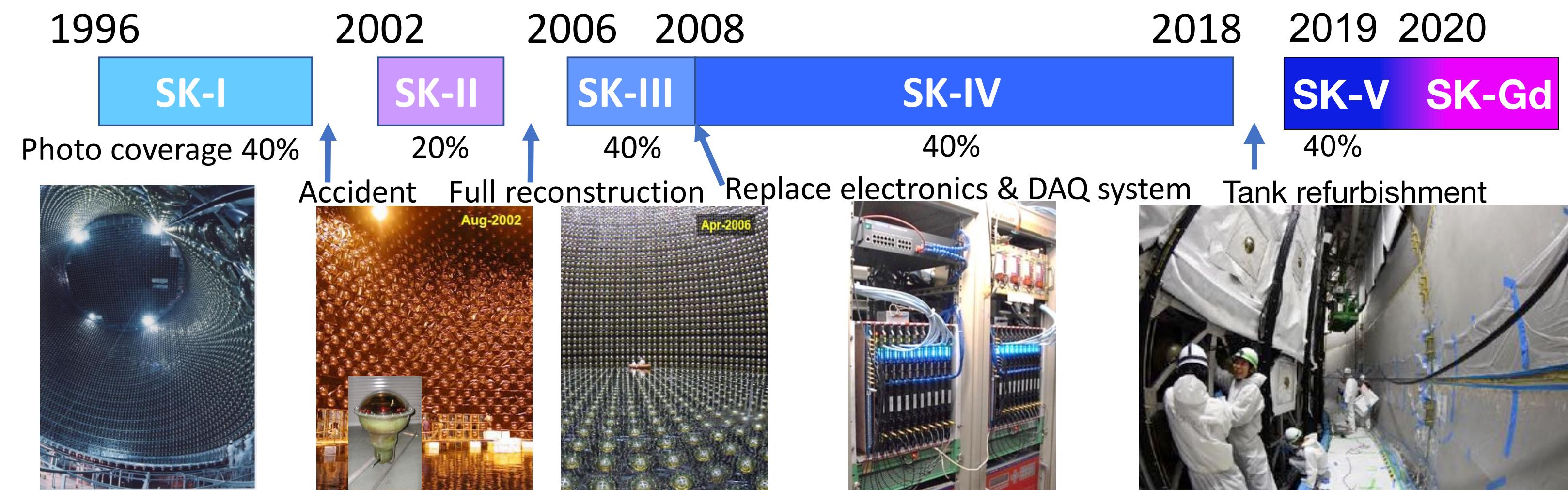


*をつけたトピックについて今日は紹介します

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**

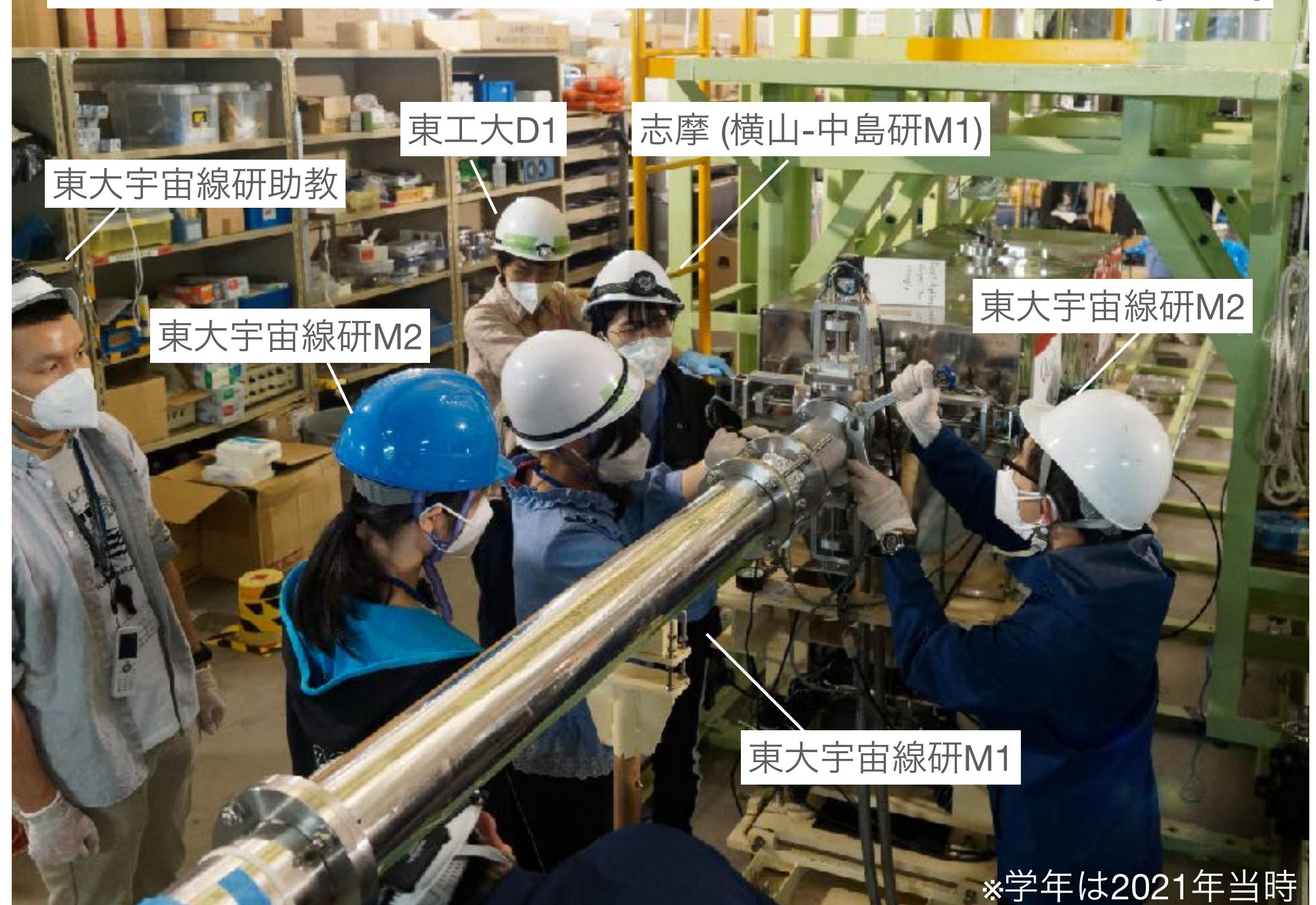




神岡総合研究棟 (2021年完成)



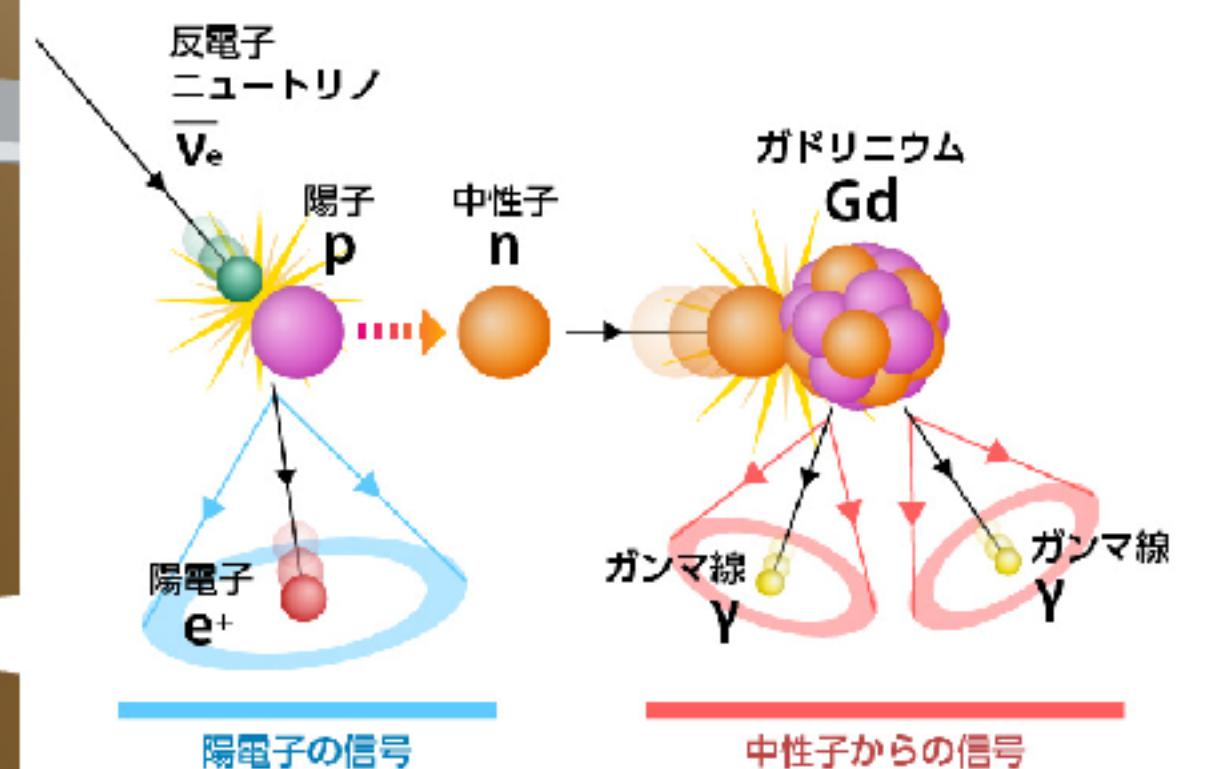
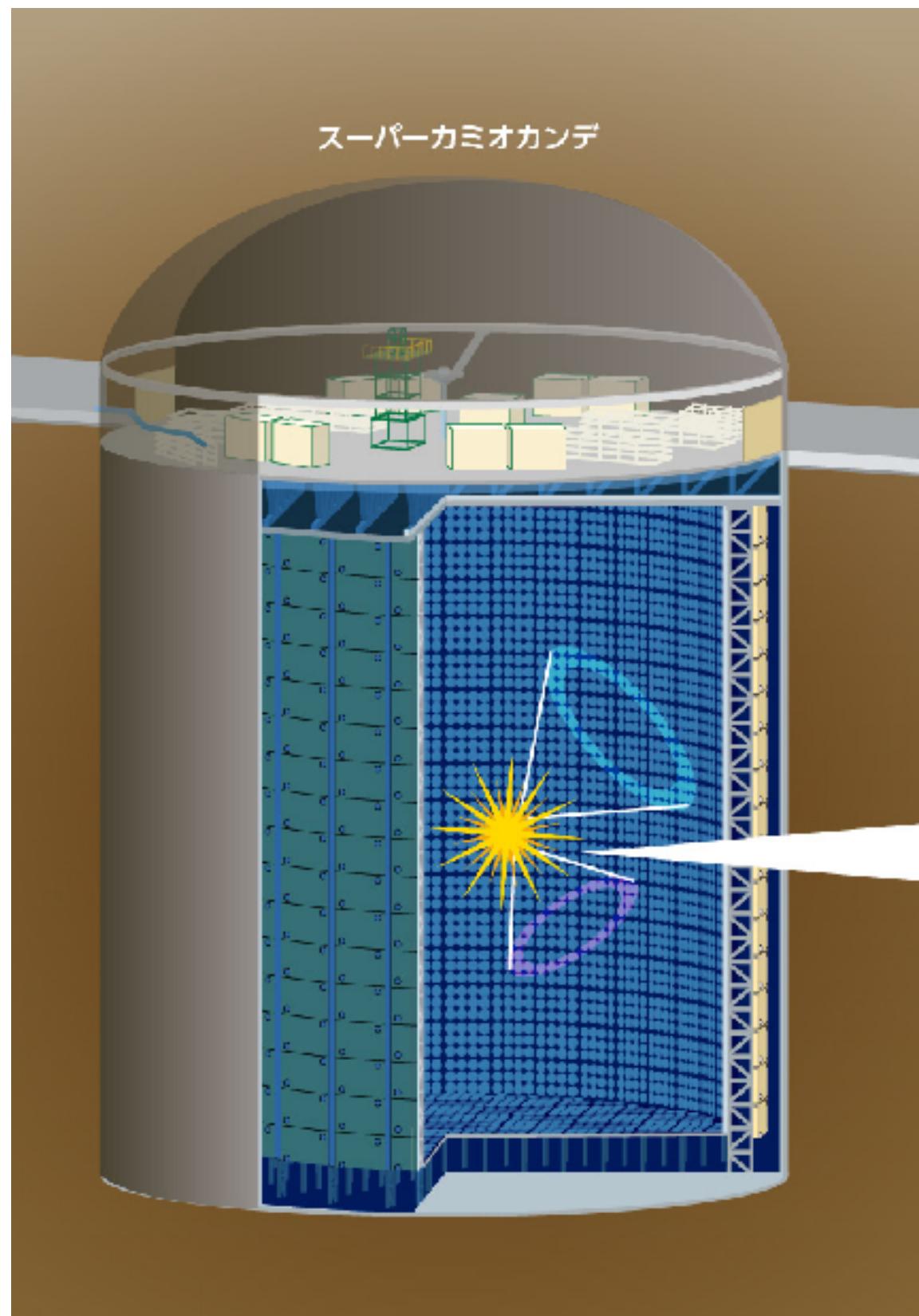
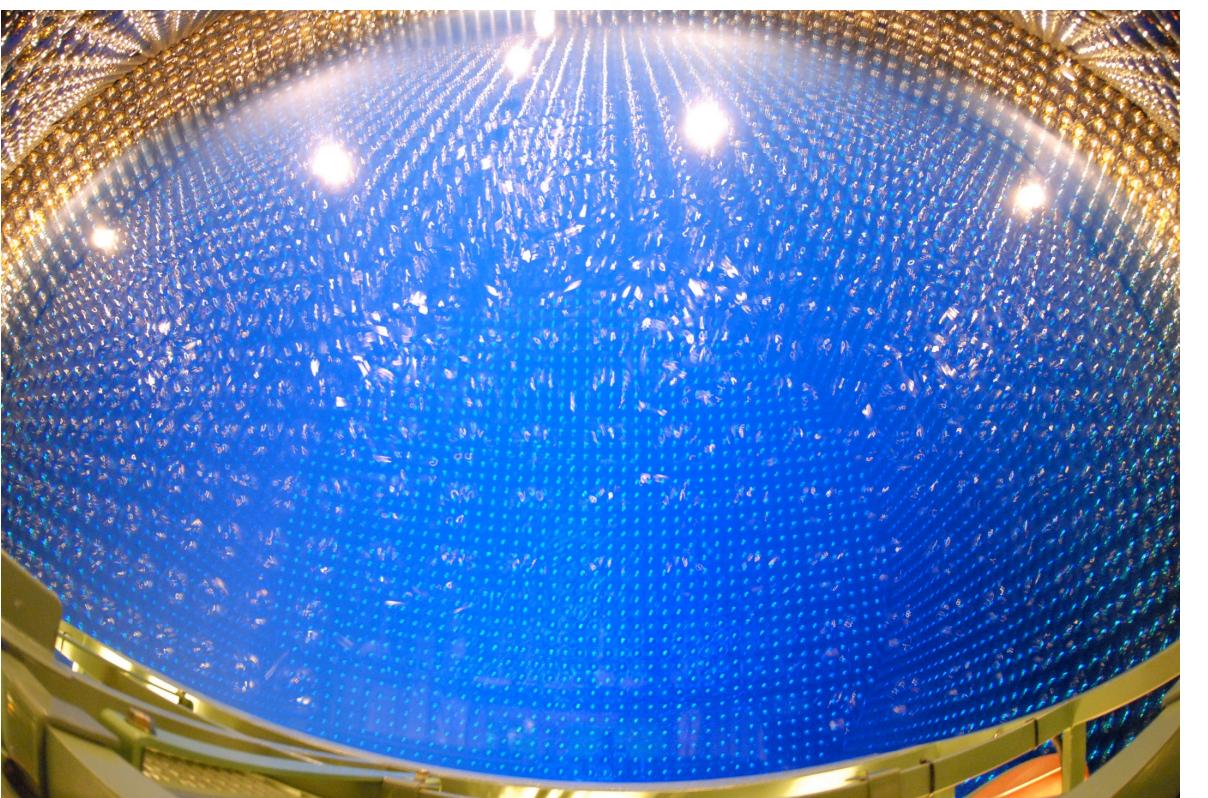
電子線形加速器を使ったスーパークミオカンデの較正実験 (2021)



*学年は2021年当時

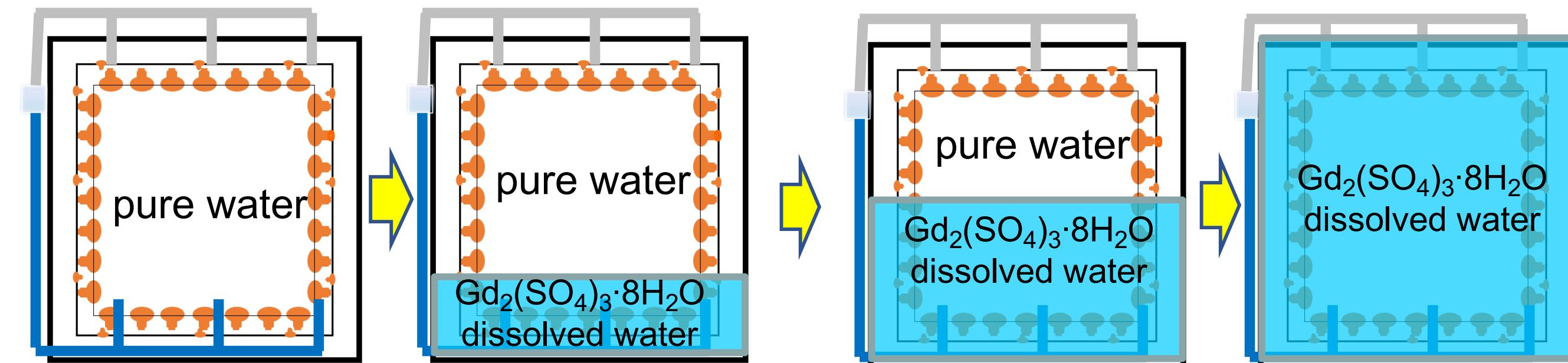
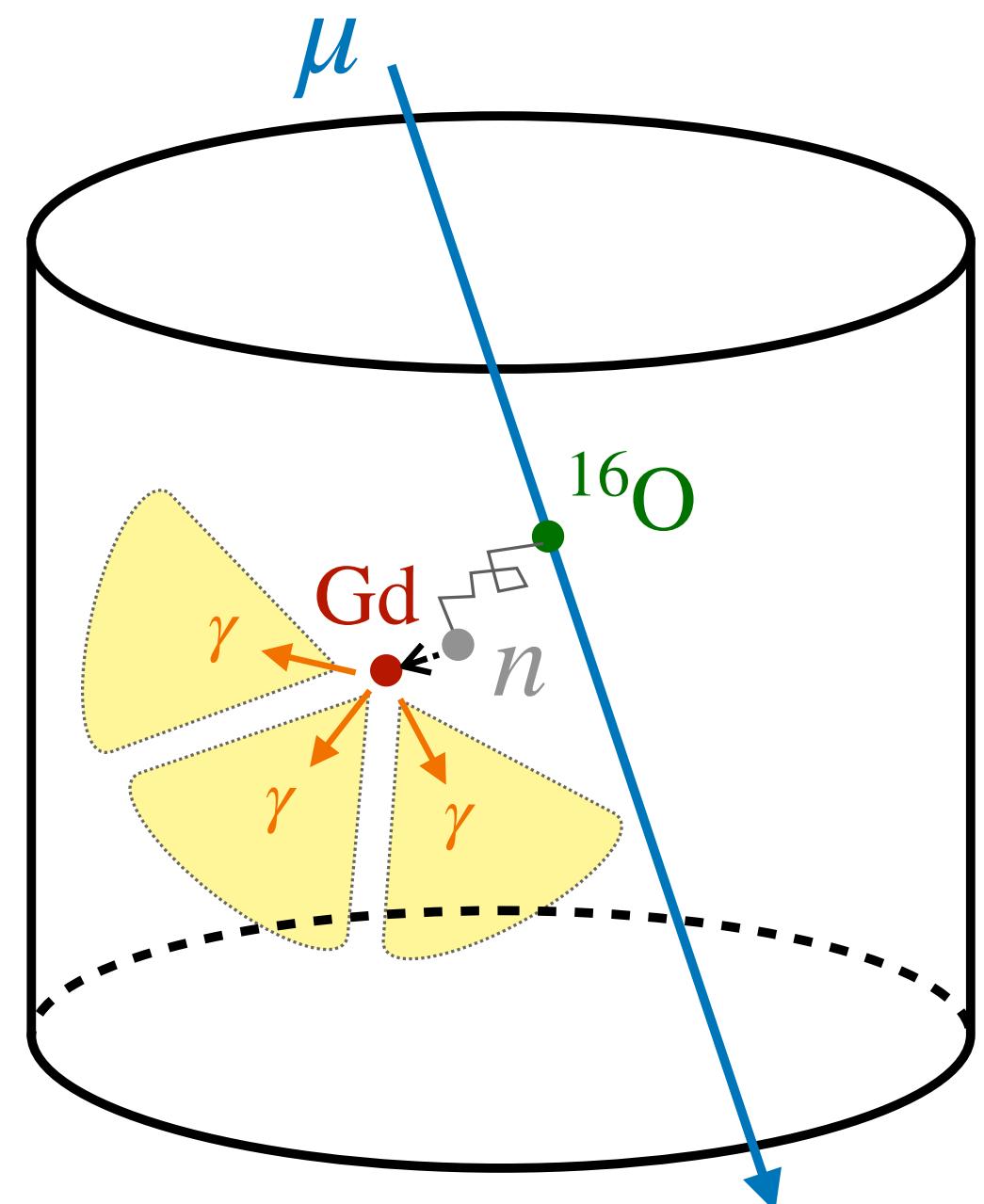
スーパー・カミオカンデ・ガドリニウム (SK-Gd)

- 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



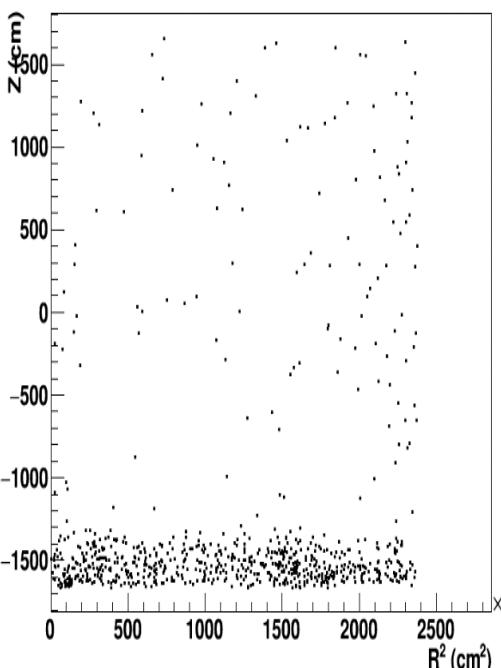
Gd in Super-Kamiokande!

- 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

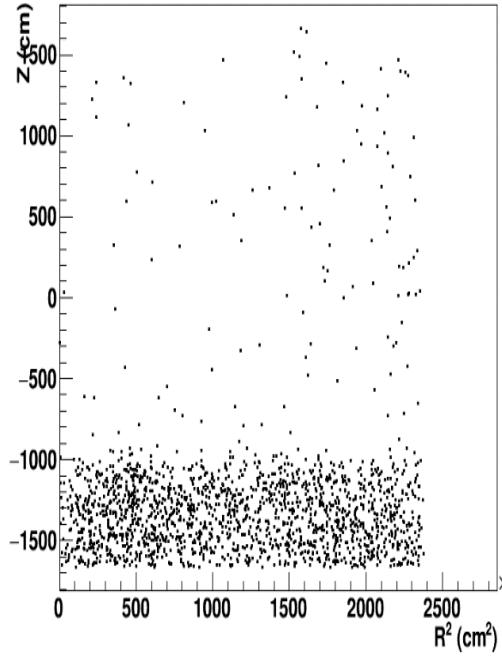


2020年

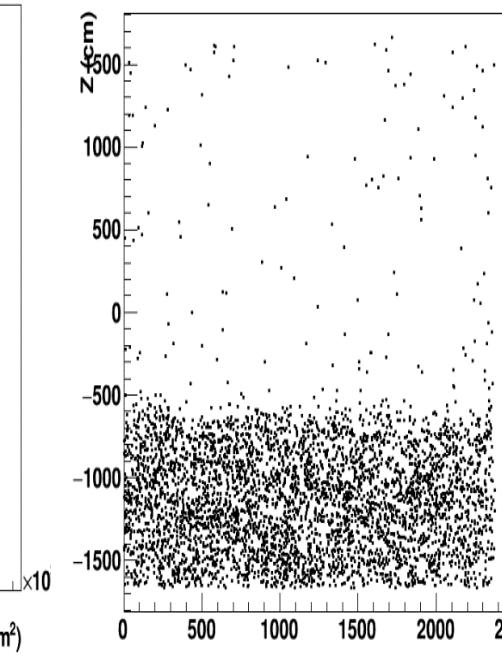
7/18



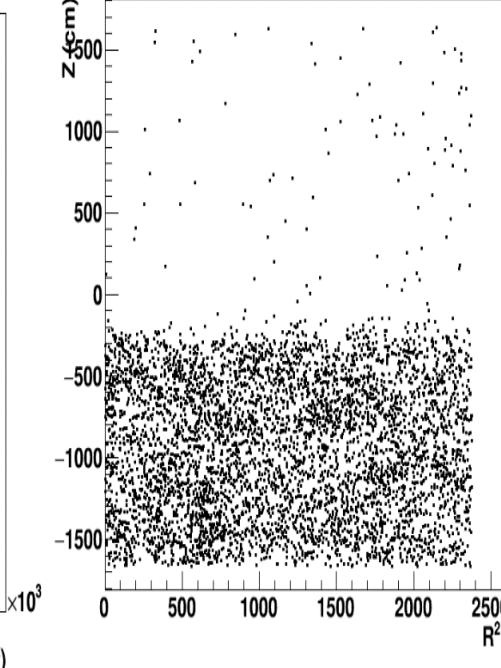
7/21



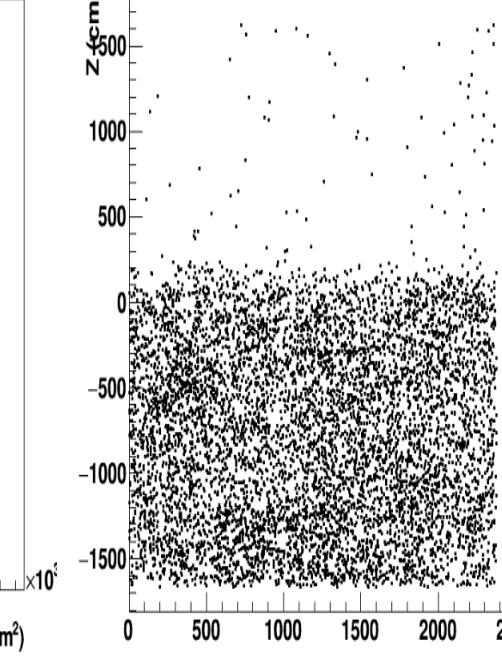
7/24



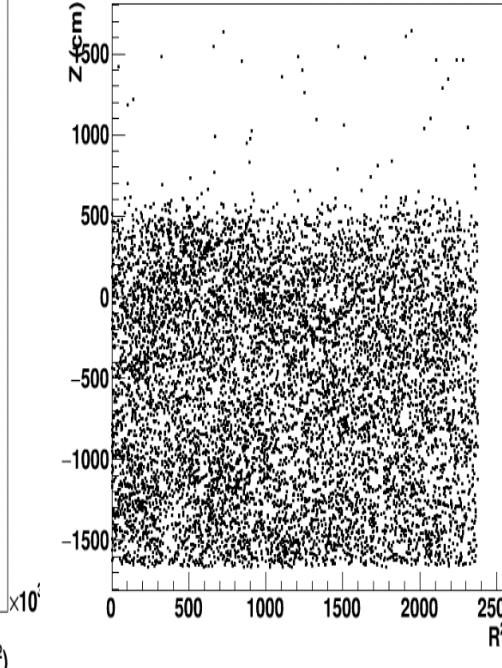
7/27



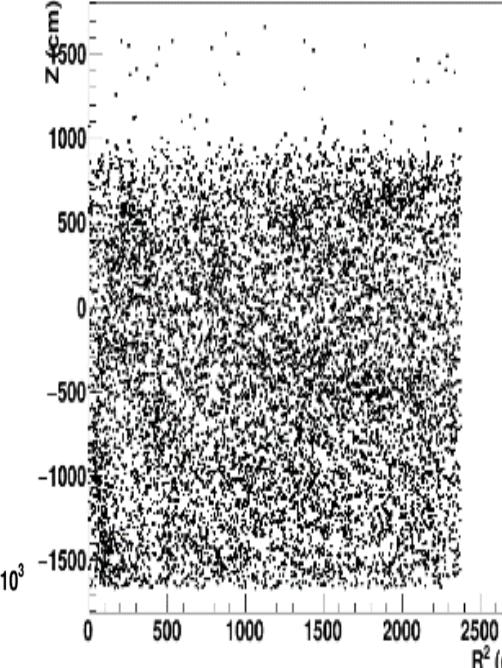
7/30



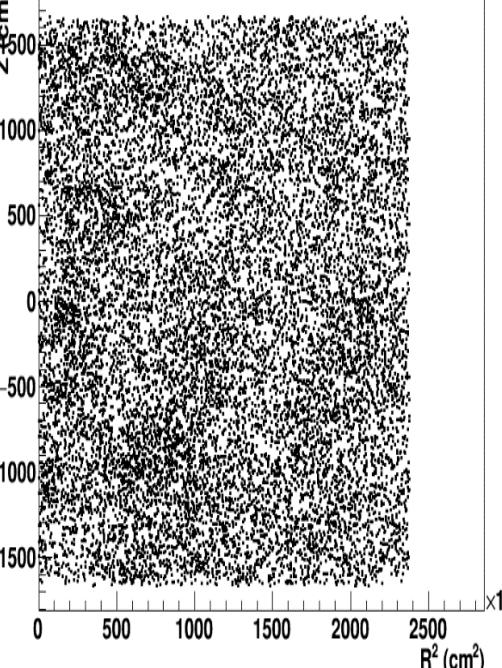
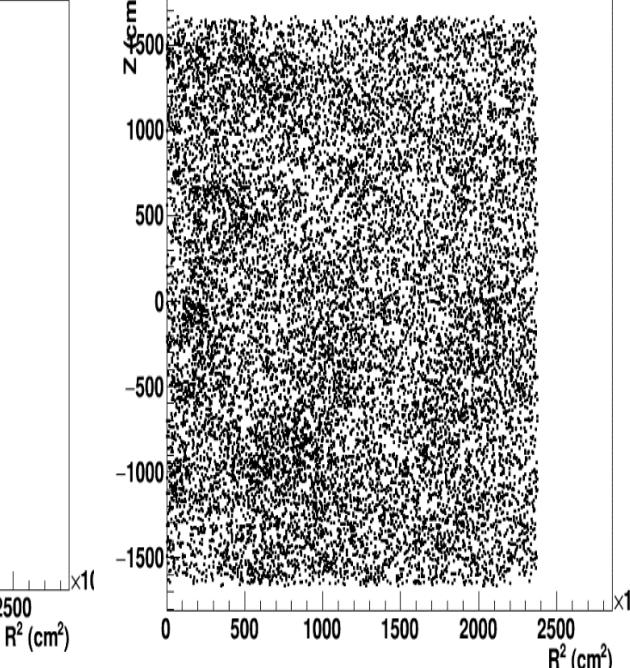
8/2



8/5



8/8



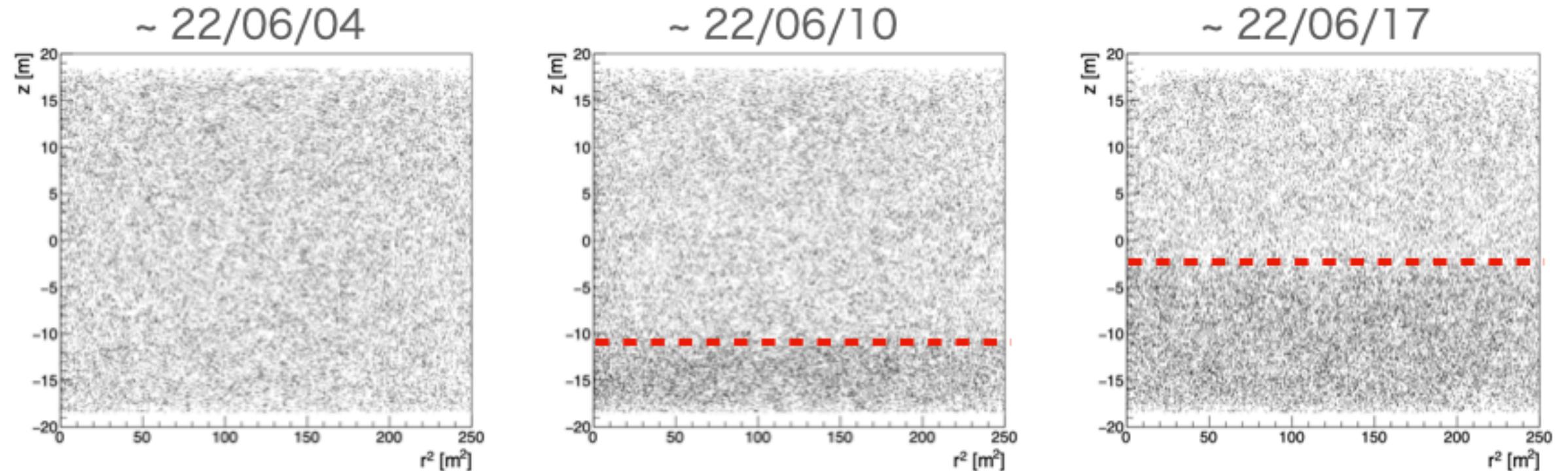
ガドリニウムでとらえた、宇宙線によって生成された中性子の反応点分布

Gd in Super-Kamiokande!

志摩さん(横山・中島研OG)

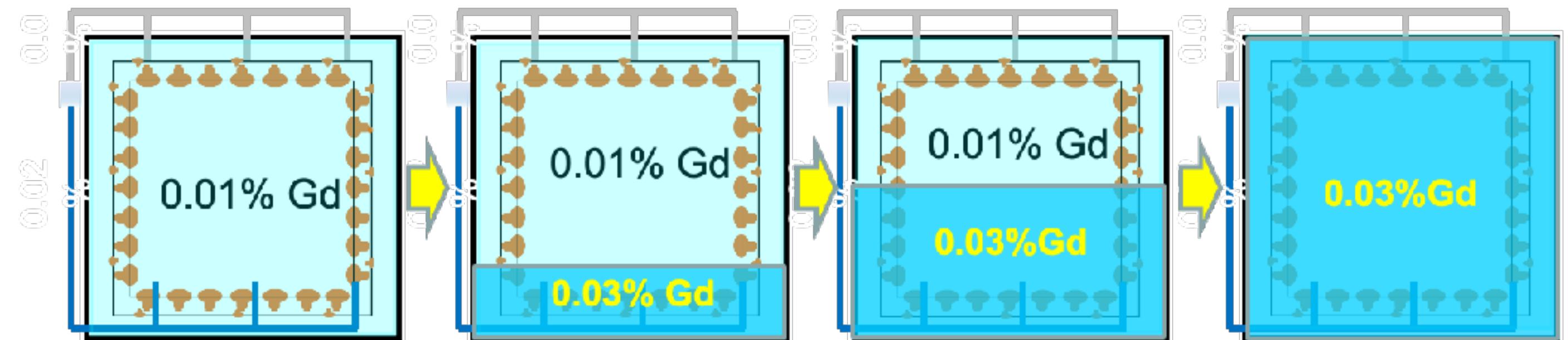
→現M2の室さんが、中性子を用いた研究を継続中

- 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

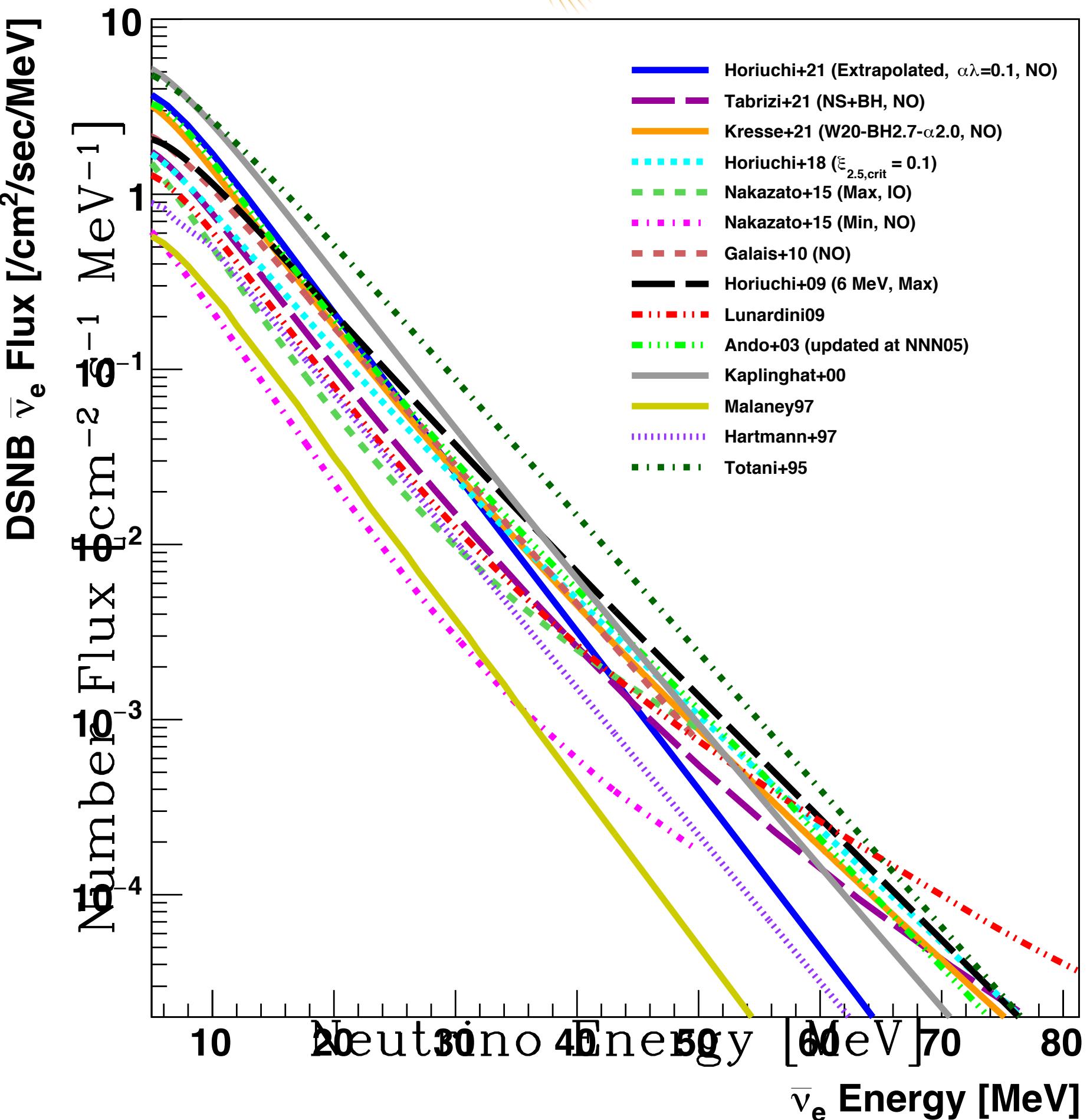
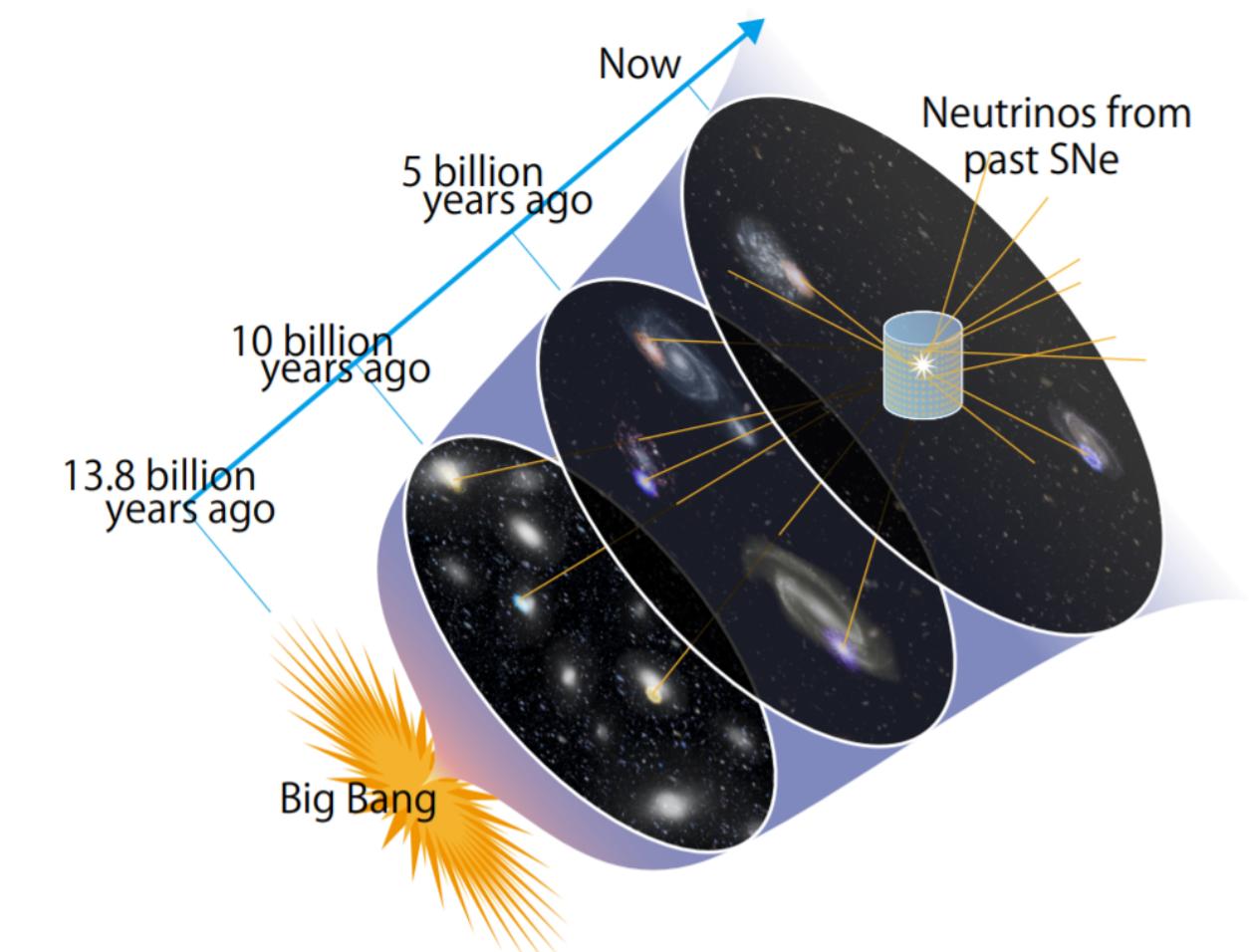
- 過去の超新星爆発で作られ、現在の宇宙に蓄積していると考えられるニュートリノ

**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(10¹⁸)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

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

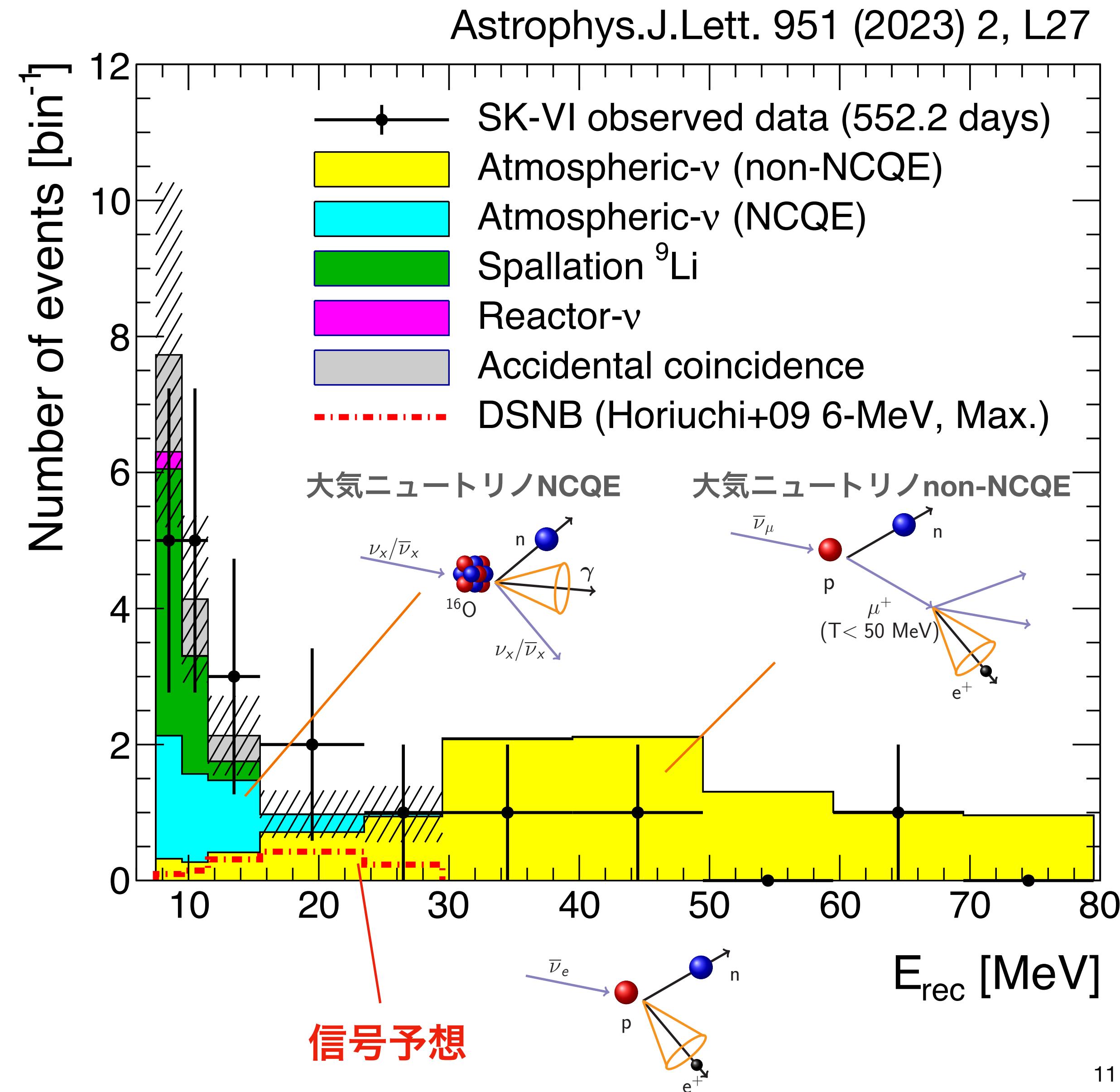
- 多くの物理モデルが存在
 - 星形成の歴史
 - 超新星爆発のメカニズム
 - ニュートリノ自身の性質



超新星背景ニュートリノ 最新の探索結果

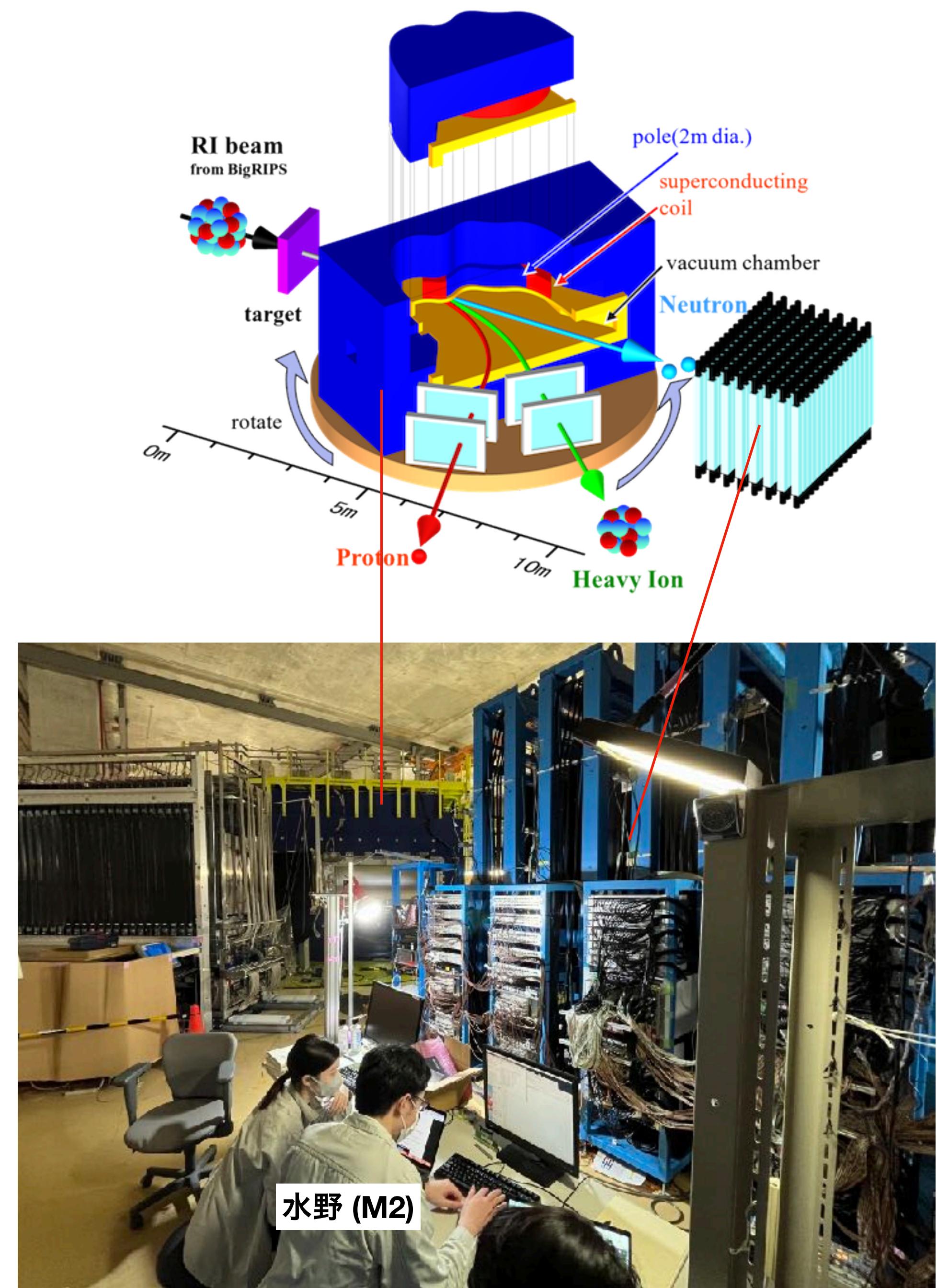
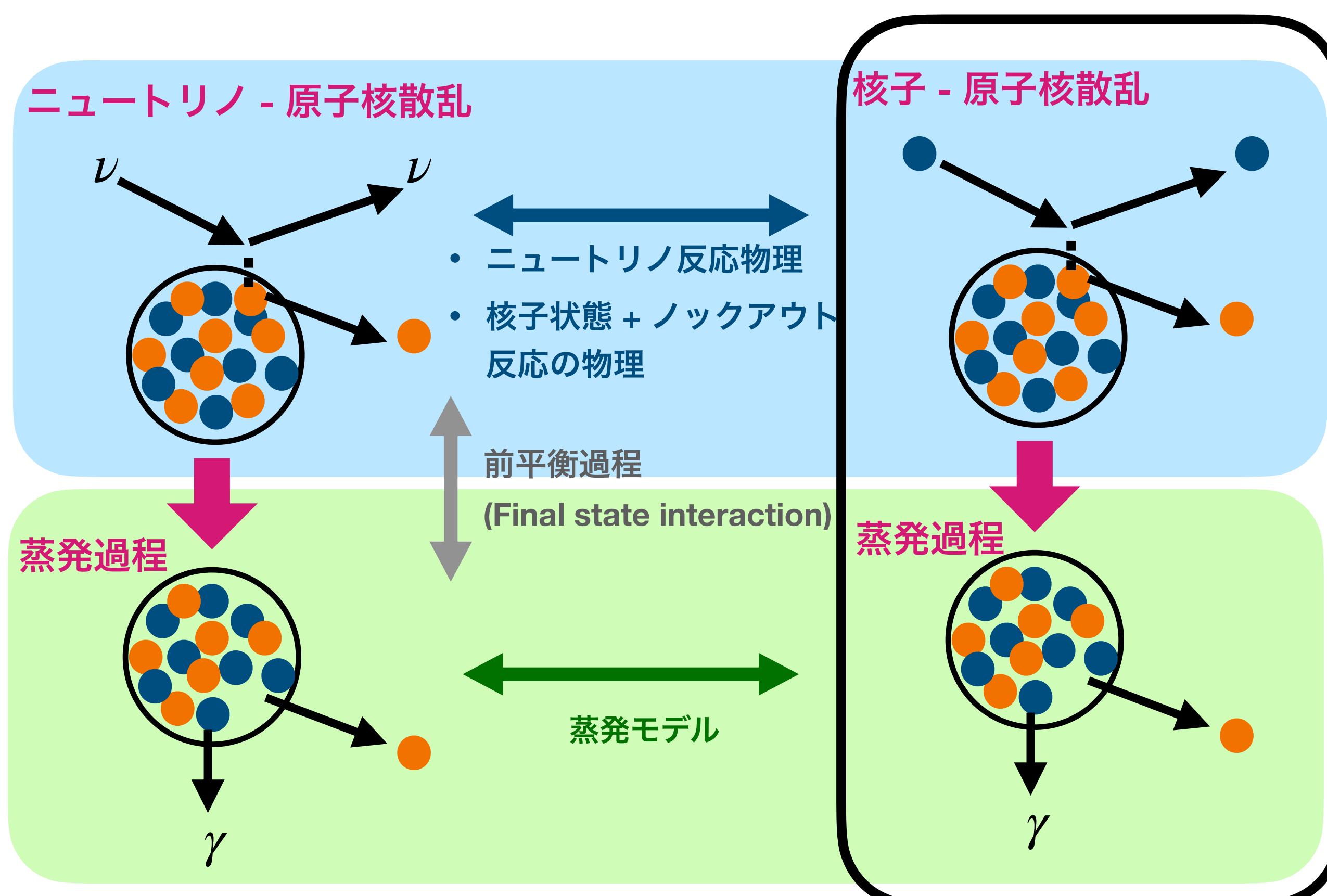
- 信号: 反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
- ガドリニウム導入後1.5年間のデータ(0.01% Gd)で純水での約10年分のデータに匹敵する感度を既に達成
- 現在は0.03%ガドリニウム濃度での観測を継続中 (すでにこの結果の倍以上の感度)
- 一部のモデルの予想には感度到達。
- いよいよ初観測が間近！？**
 - 一方で、「発見」のために背景事象のより良い理解が必須



ニュートリノ反応を理解するための原子核実験

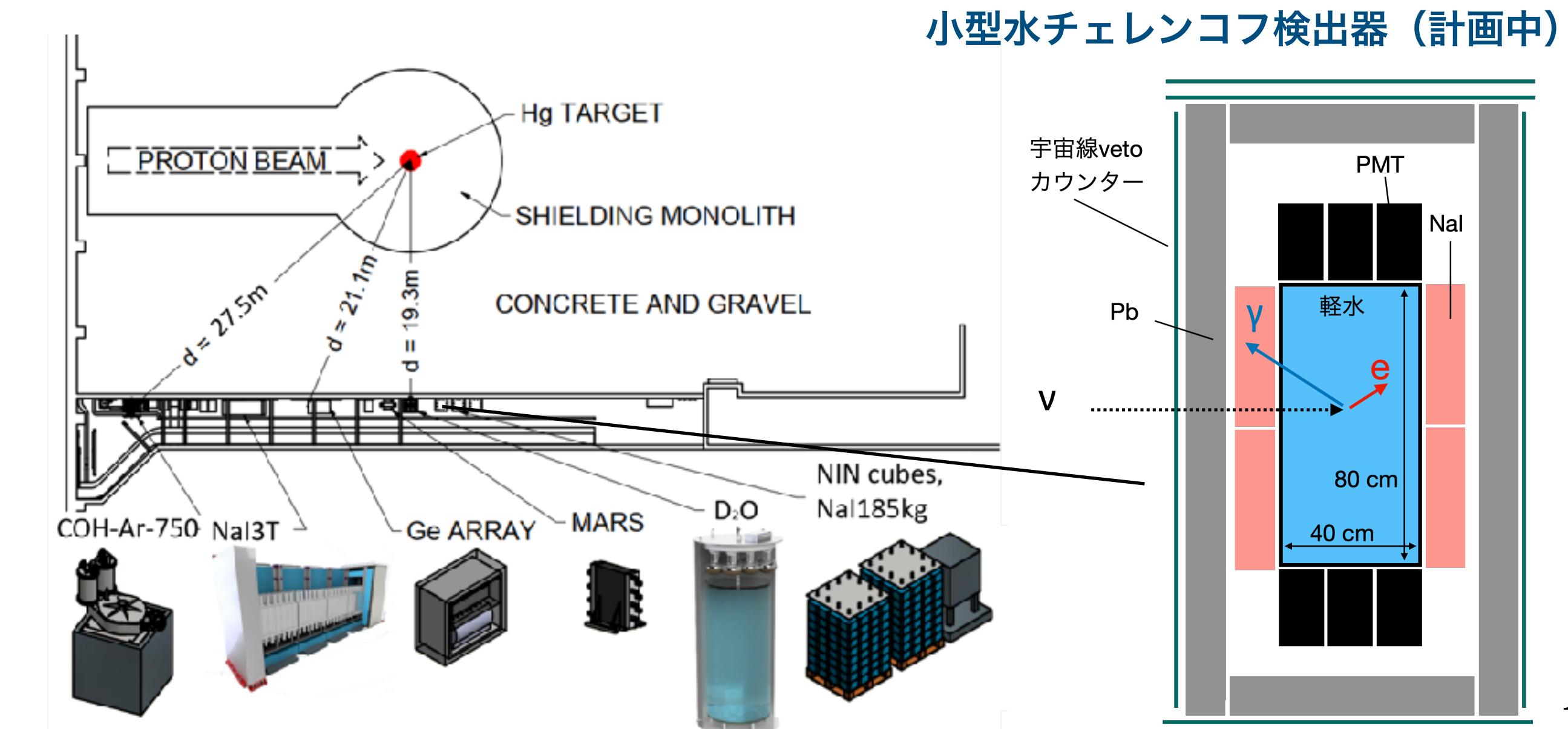
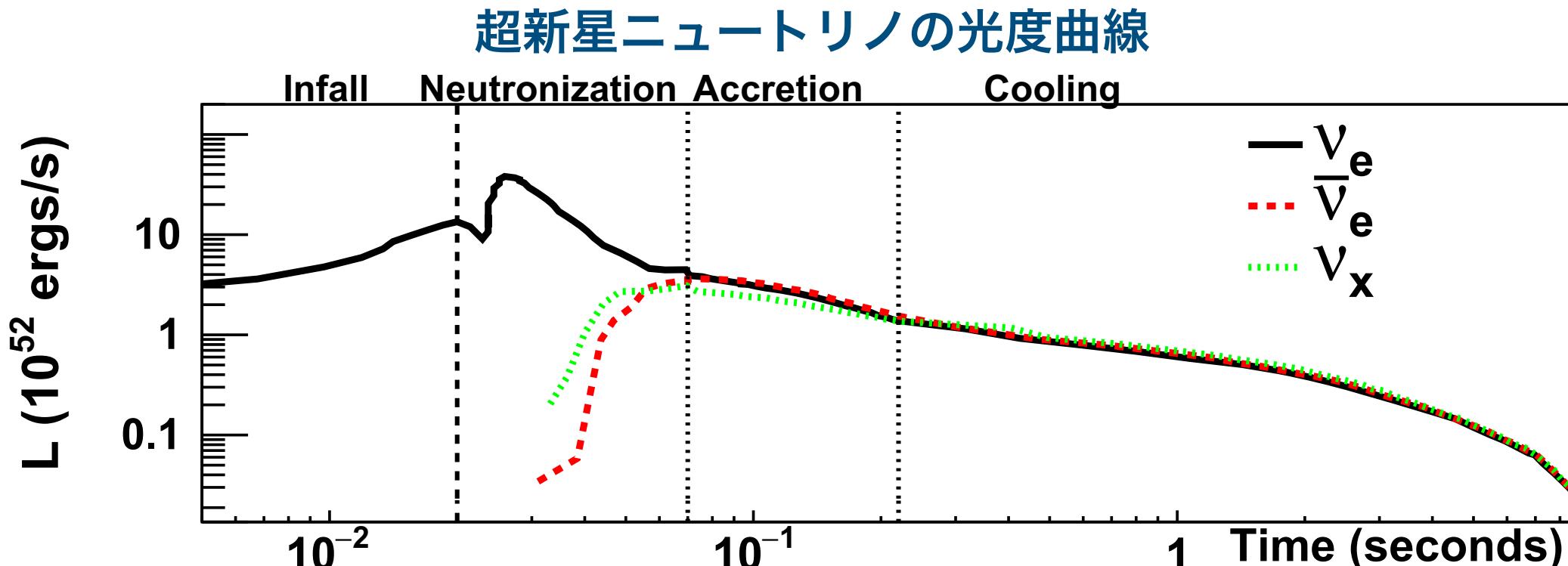
- ニュートリノ反応を精密に理解するための原子核実験を理化学研究所RIビームファクトリーで計画中
- 超新星背景ニュートリノの最大のバックグラウンドである大気ニュートリノ事象の予測精度を高め、超新星背景ニュートリノの世界初観測へ！



新たな超新星ニュートリノ 観測方法の開拓

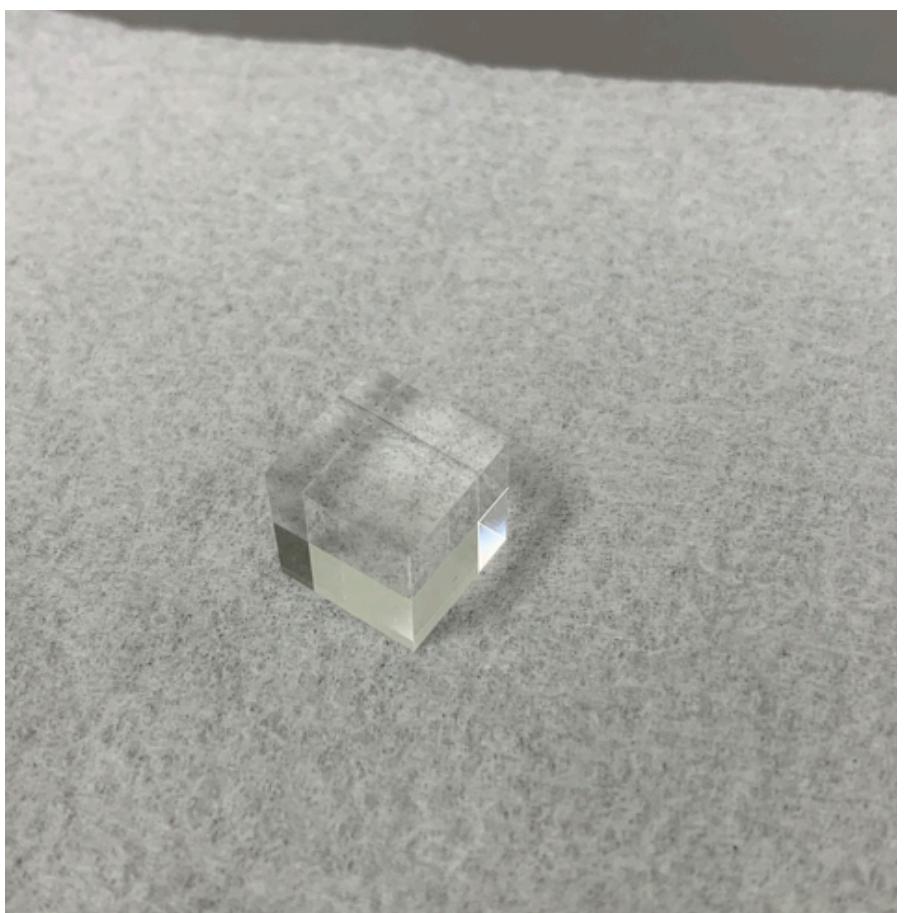
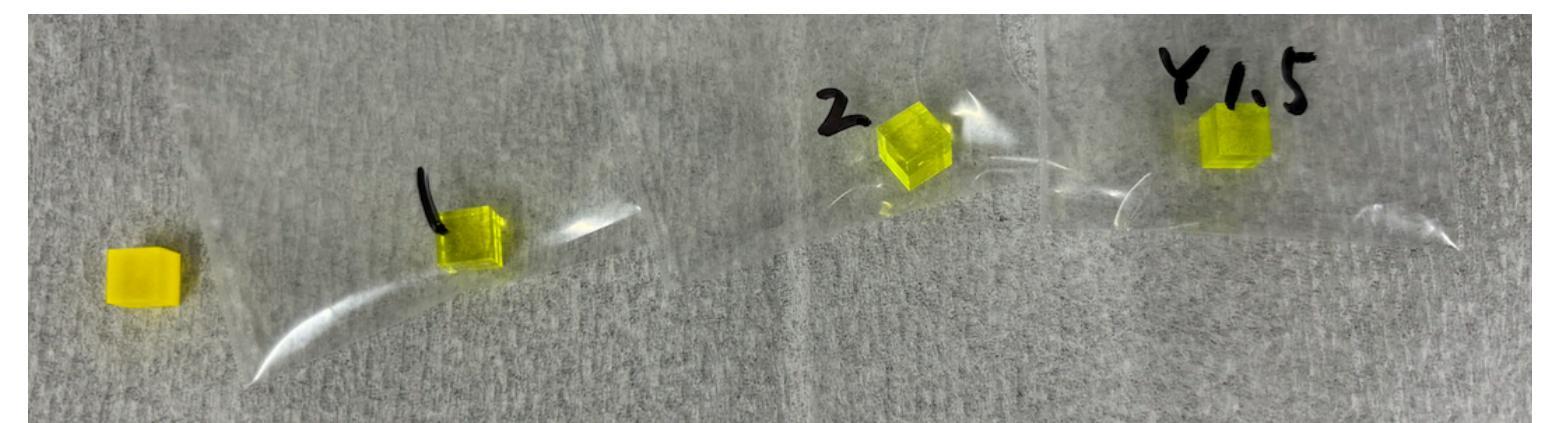
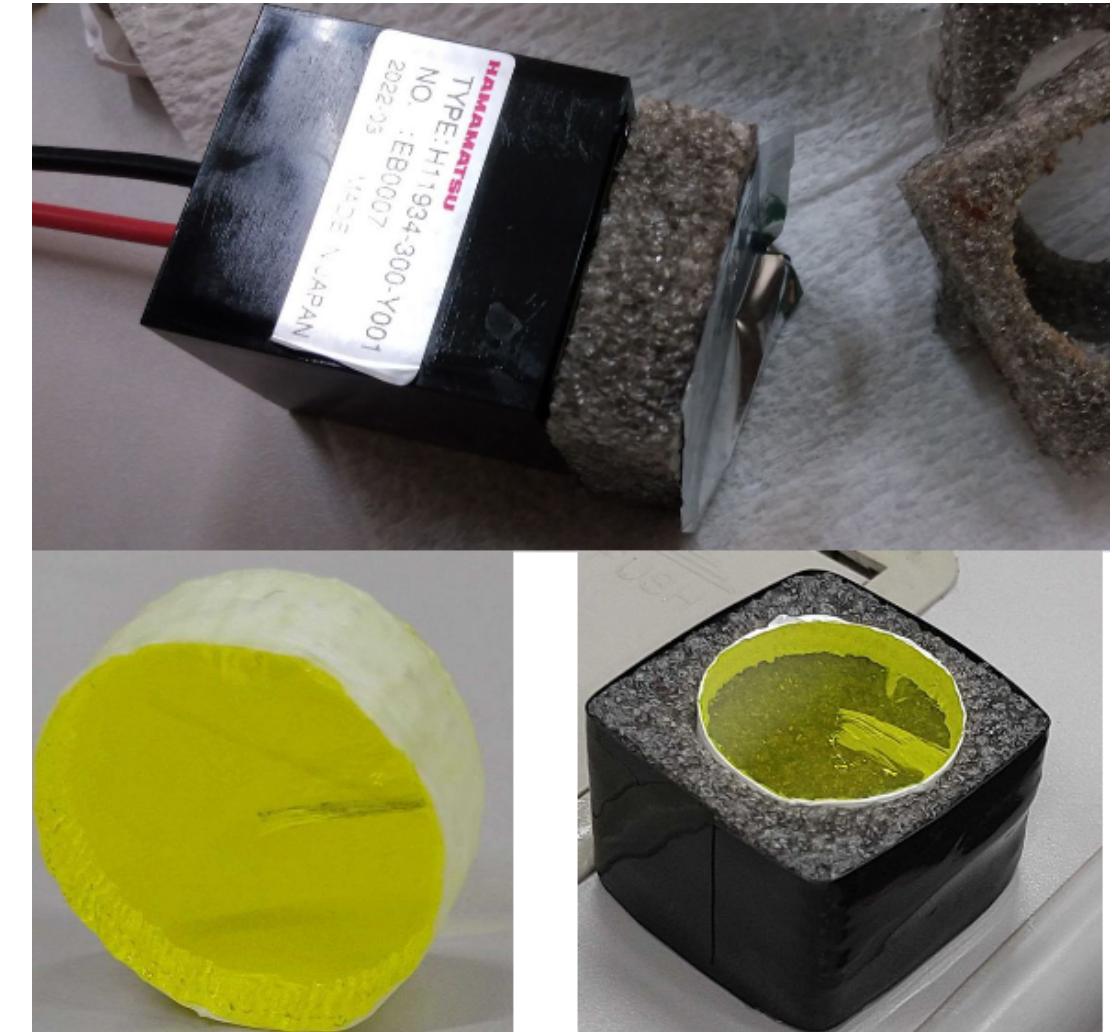
- 銀河系内など近傍で超新星爆発が起こった時、短い時間に大量(数1000)のニュートリノが観測にかかる
- SKでの主な信号は反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) (~90%)
- 酸素原子核との反応($\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}^*$)(数%)を使って、
電子ニュートリノも測りたい！

- でもこの反応はよく理解されていない。
- 米国のオークリッジ国立研究所での電子ニュートリノ測定実験を計画中！



スピノンオフ・プロジェクト: 二重ベータ崩壊の探索

- 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}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も開発・評価中



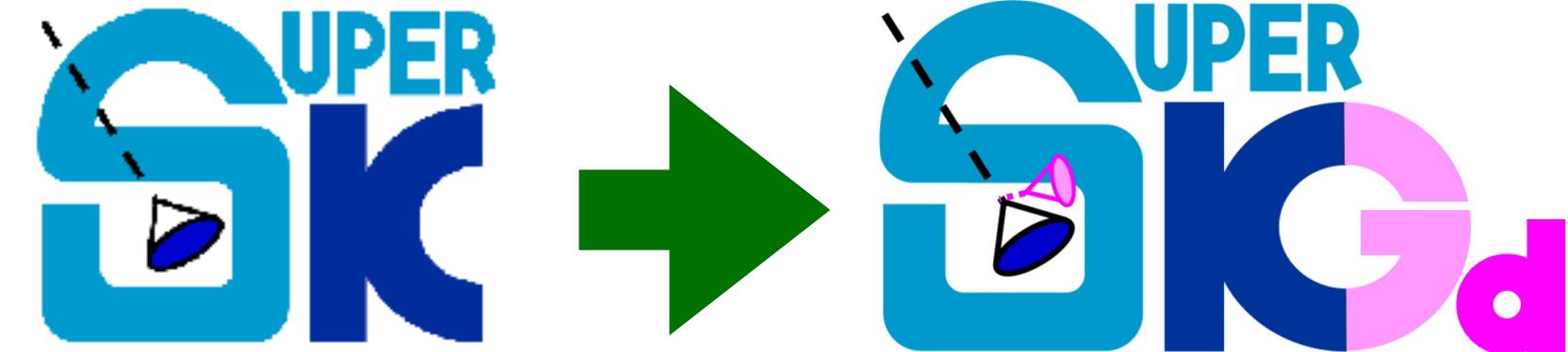
大型プロジェクトの中での研究

- ・ 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！



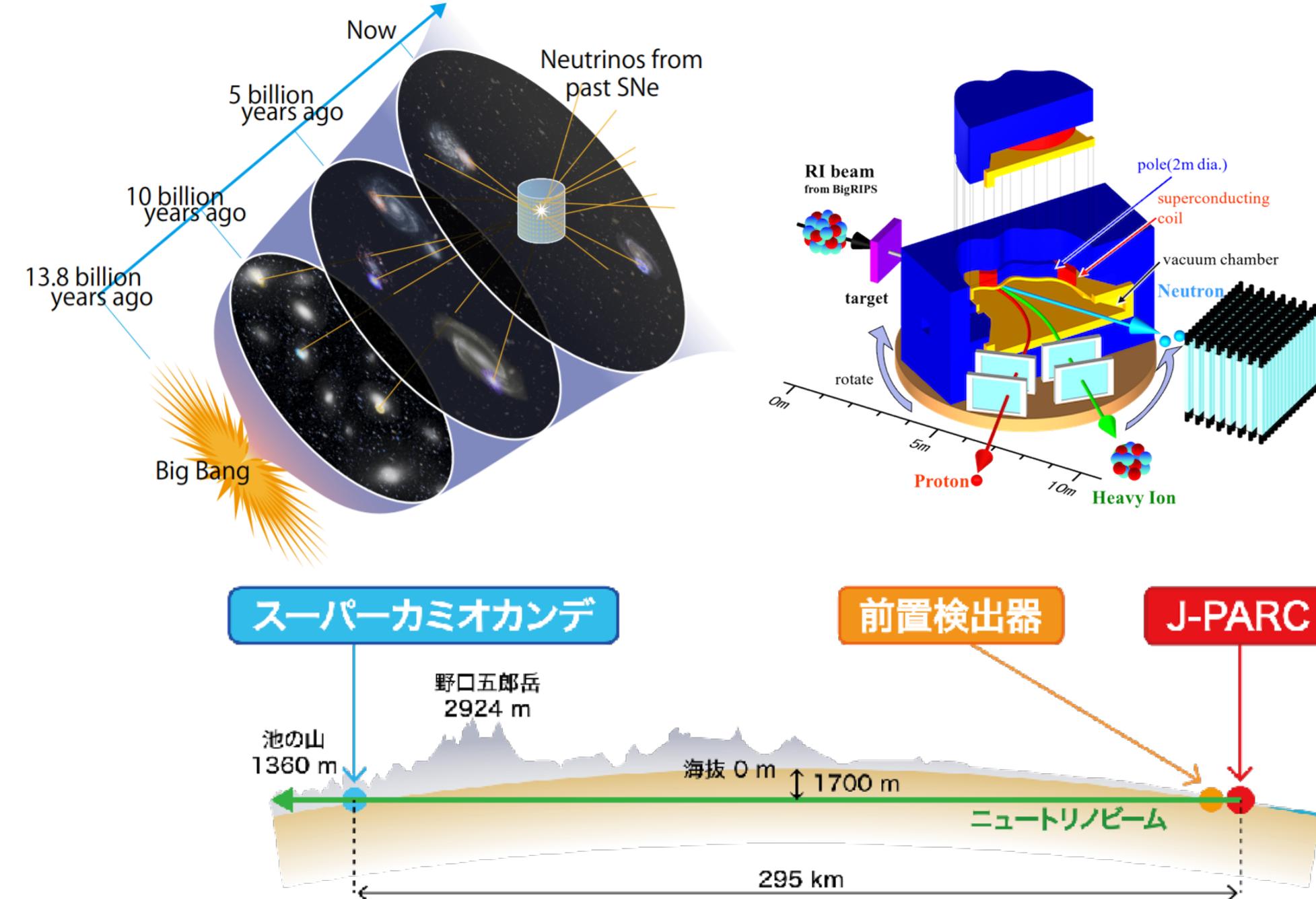
まとめ

- ニュートリノを用いた素粒子実験・宇宙観測軸に、様々な研究を行なっています
- 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精密較正の研究



(1996-2020)

(2020-)



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: 5/25（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: 5月28日（火）17:00～18:30（対面+Zoom）
J-PARC現地見学会: 6/9（土）本郷キャンパス発着・無料

詳しくは: <https://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/openlab2024/>

