



**Super-Kamiokande
LowE/astro group**

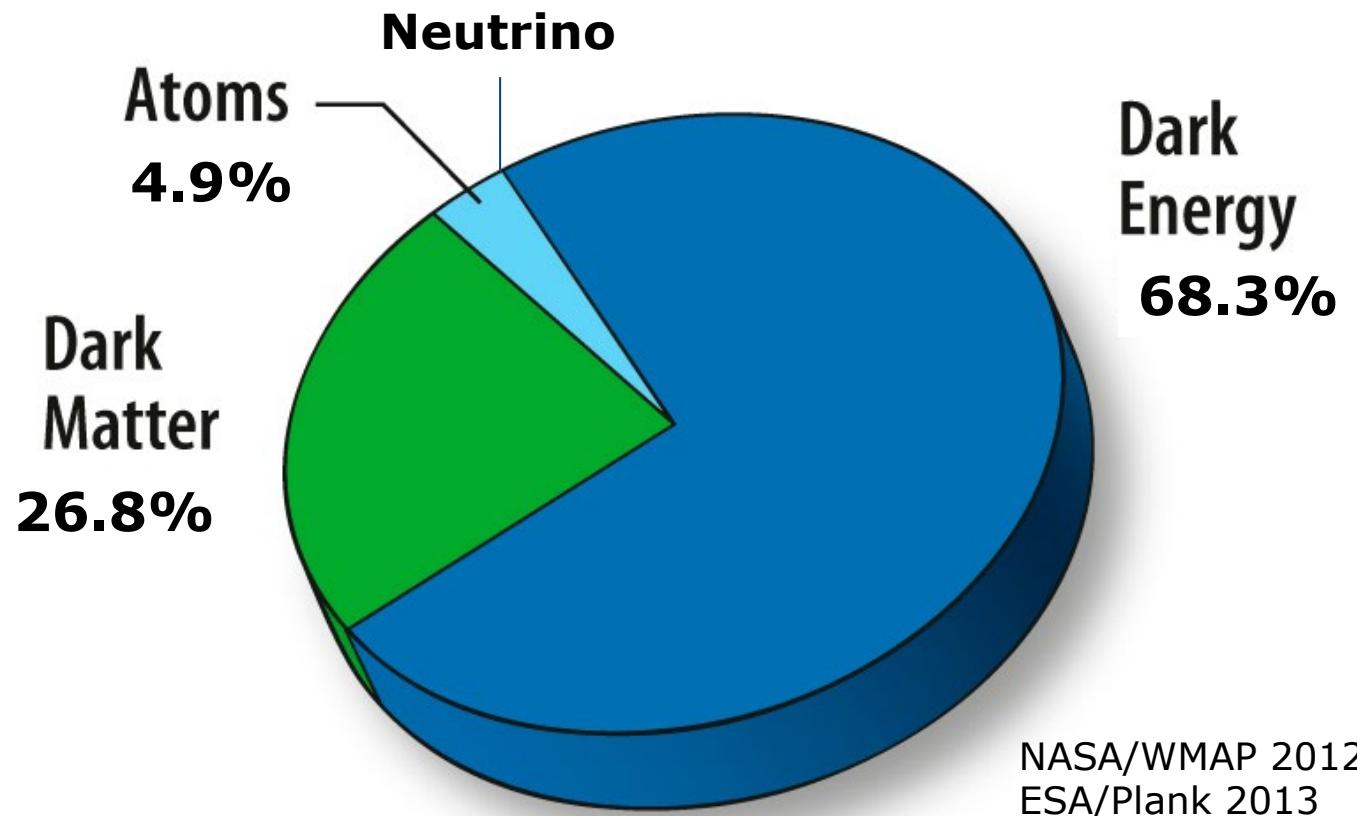
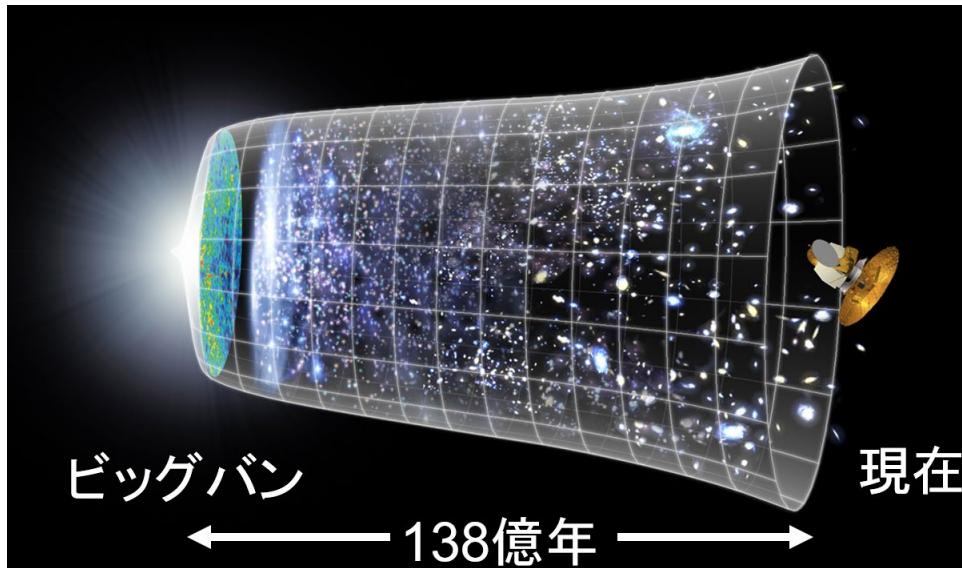


宇宙線研究所 宇宙ニュートリノ研究部門
関谷洋之

宇宙ニュートリノ研究部門

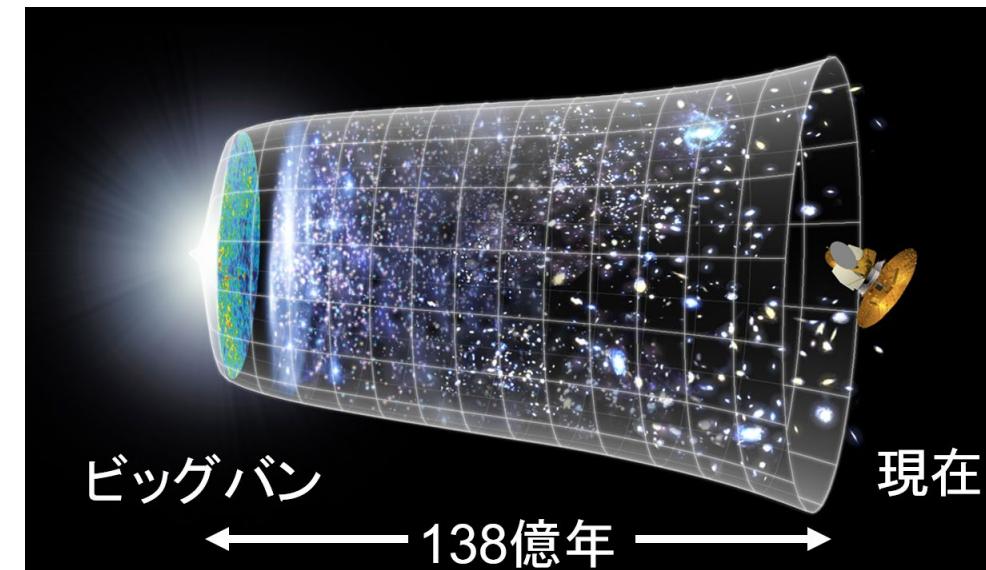
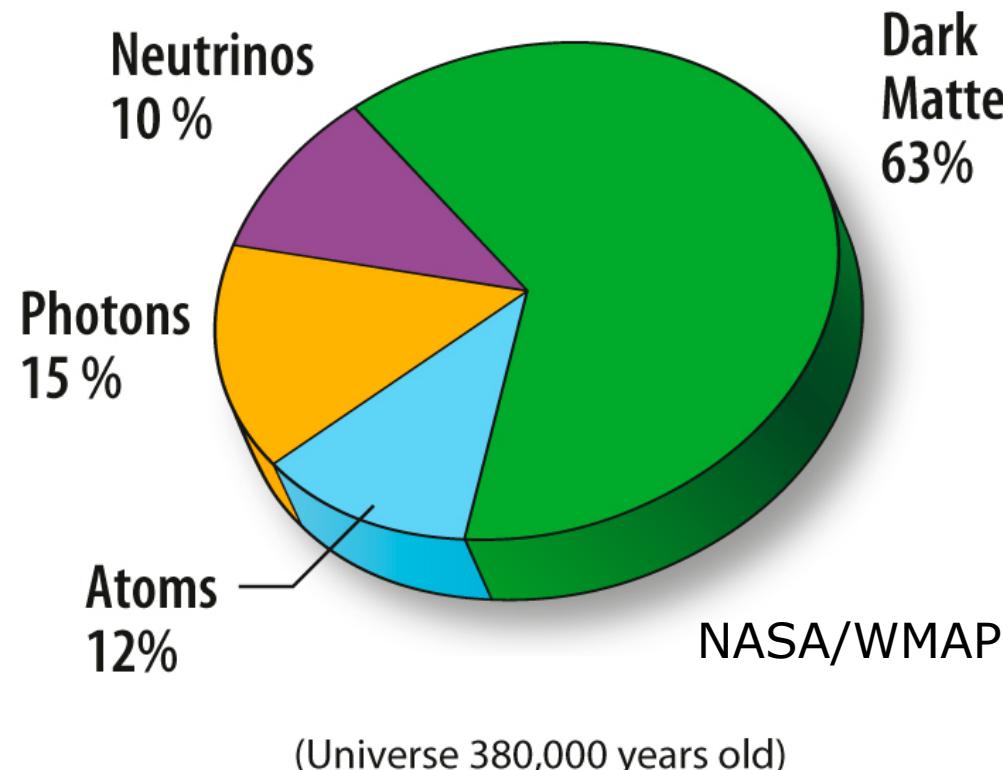
目的 ニュートリノや他の素粒子を通して宇宙・素粒子物理学の謎を解明する

- 宇宙は何でできているのか



宇宙ニュートリノ研究部門

- 目的 ニュートリノや他の素粒子を通して宇宙・素粒子物理学の謎を解明する
- ・ニュートリノや暗黒物質が決定的な役割を果たしているはず



具体的な実験
Super-Kamiokande、T2K、暗黒物質直接探索
Hyper-Kamiokande

宇宙ニュートリノ部門の教員と主な研究内容

A8サブコース
6名の教授/准教授

- **神岡宇宙素粒子研究施設**

塩澤 SK atm/pd T2K HK

森山 SK atm/pd 暗黒物質 HK

早戸 SK atm/pd T2K HK

関谷 SK LowE 暗黒物質 HK

中山 SK atm/pd T2K HK



塩澤



森山



早戸



関谷

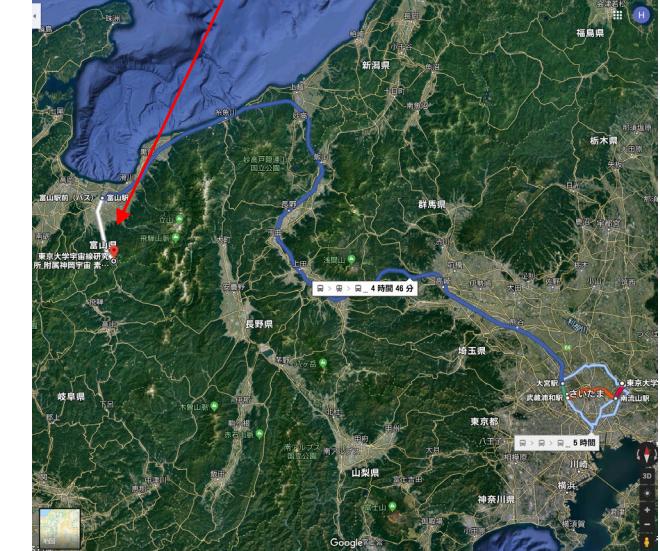


中山



奥村

神岡宇宙素粒子研究施設



- 修士は柏が本拠地
神岡に「通う」

- **柏宇宙ニュートリノ観測情報融合センター**

奥村 SK atm/pd T2K HK



神岡宇宙素粒子研究施設の地上設備



No. 1/2



大学院生室(個人のブース)は柏と神岡の両方にあります。

【令和6(2024)年6月 献立表】

※都合により予定無く変更する場合があります。



日	曜日	朝食	昼 食	夕 食
1	土	○	マーボーナス 切干大根の煮物 春雨サラダ	天ぶら マカロニサラダ 小松菜ときのこの卵とじ
2	日	○		
3	月		アジフライ 厚揚げのうま辛煮 コーンとツナのサラダ	鶏肉と野菜の味噌炒め じゃがいもとさつま揚げの煮物 わかめときゅうりの酢の物
4	火	○	鶏肉のクリーム煮 ほうれん草とわかめの和え物 三色きんぴら	ローストンカツ 高野豆腐の煮物 小松菜とベーコンのオムレツ
5	水	○	ます寿司 ポテトサラダ 厚揚げときのこの七味煮	だし巻卵 鶏の唐揚げ 里芋の煮物

Super-Kamiokande Gd Project

スーパーカミオカンデの大幅アップグレード
2022年実施！

電子ニュートリノと反電子ニュートリノを区別可能に!
超新星ニュートリノ発見を目指す

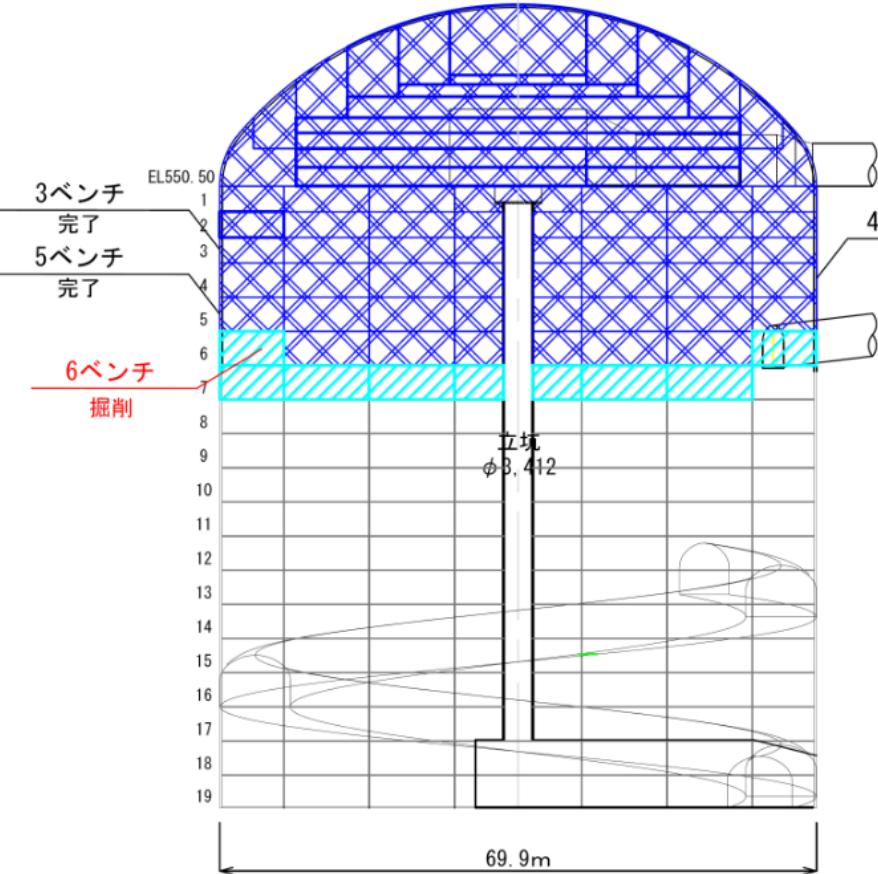
Hyper-Kamiokande

2027年開始に向け順調に建設中

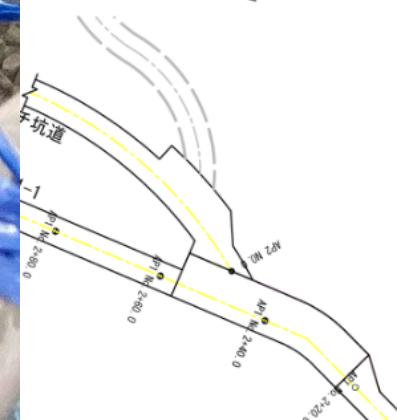


ドーム部断面図

本日までの進捗状況



凡例



- 施工完了範囲
- 掘削済範囲
- ~6/2の掘削予定範囲
- 1次吹付済範囲
- 2次吹付済範囲
- PS工完了範囲

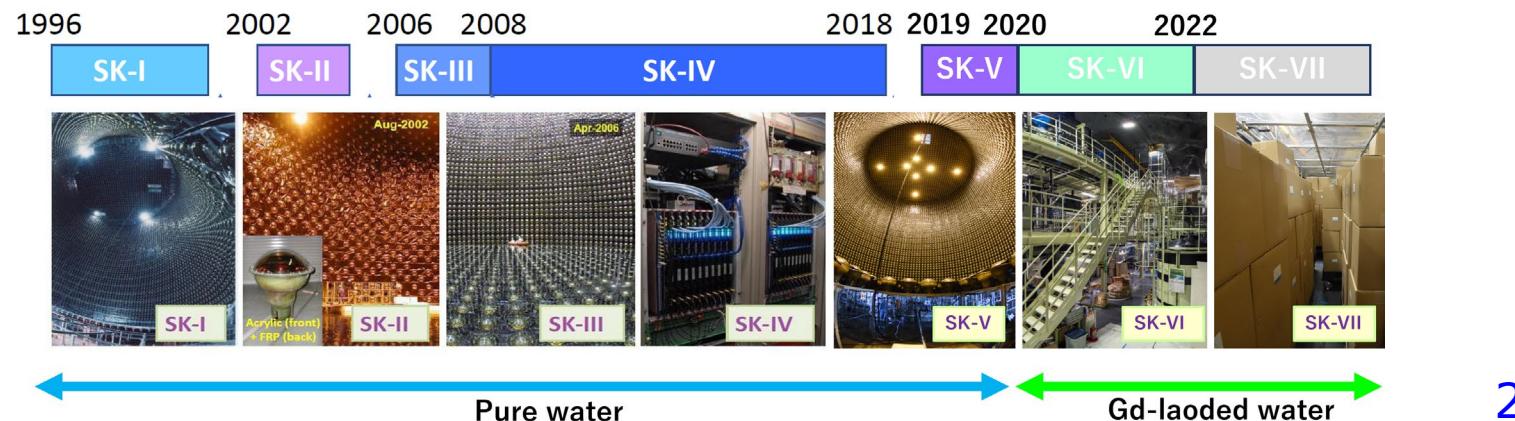


暗黒物質探索実験室(XMASS)

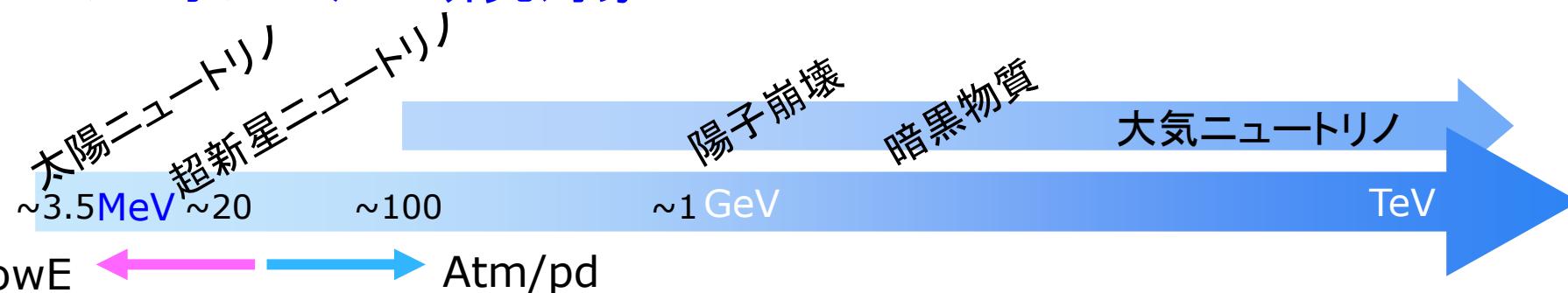
Super-Kamiokande

- 基幹プロジェクト

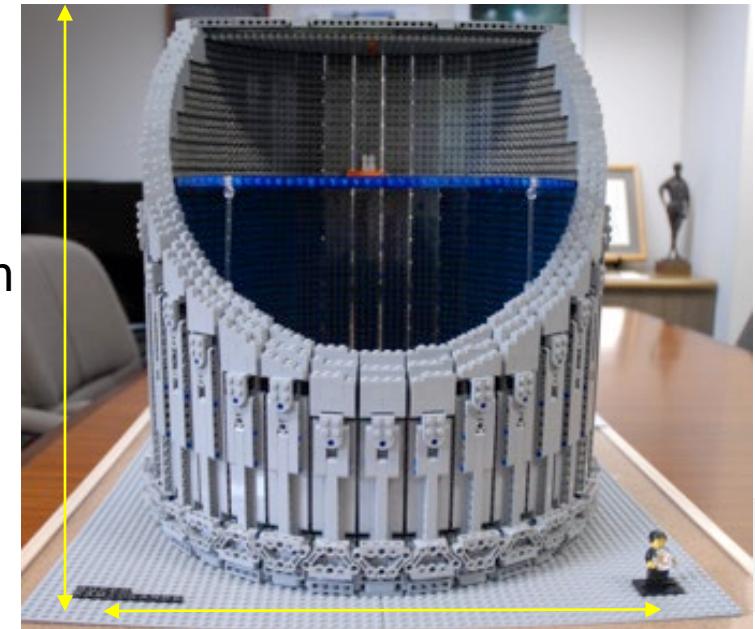
- 水をためて、光センサーで見ているだけなのに信じられないほど、重要で、数多くの物理を研究できる奇跡の検出器、しかも25年以上たった今でも常に進化している。



スーパー・カミオカンデの研究対象



東大レゴ部の作品



2022年6月1日からSK-VIIを開始

The Super-Kamiokande Collaboration



Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
RCCN, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
University Autonoma Madrid, Spain
BC Institute of Technology, Canada
Boston University, USA
BMCC/CUNY, USA
University of California, Irvine, USA
California State University, USA
Chonnam National University, Korea
Duke University, USA
Gifu University, Japan
GIST, Korea
University of Glasgow, UK
University of Hawaii, USA
IBS, Korea
IFIRSE, Vietnam
Imperial College London, UK
ILANCE, France/Japan

INFN Bari, Italy
INFN Napoli, Italy
INFN Padova, Italy
INFN Roma, Italy
Kavli IPMU, The Univ. of Tokyo, Japan
Keio University, Japan
KEK, Japan
King's College London, UK
Kobe University, Japan
Kyoto University, Japan
University of Liverpool, UK
LLR, Ecole polytechnique, France
University of Minnesota, USA
Miyagi University of Education, Japan
ISEE, Nagoya University, Japan
NCBJ, Poland
Okayama University, Japan

Osaka Electro-Communication Univ., Japan
University of Oxford, UK
Rutherford Appleton Laboratory, UK
Seoul National University, Korea
University of Sheffield, UK
Shizuoka University of Welfare, Japan
University of Silesia in Katowice, Poland
Sungkyunkwan University, Korea
Tohoku University, Japan
The University of Tokyo, Japan
Tokyo Institute of Technology, Japan
Tokyo University of Science, Japan
University of Toyama, Japan
TRIUMF, Canada
Tsinghua University, China
University of Warsaw, Poland
Warwick University, UK
The University of Winnipeg, Canada
Yokohama National University, Japan

~230 collaborators from 54 institutes in 11 countries

みんなで協力しつつ競いつつ結果を出す



日中は地下の現場でシフト（2人）
夜は世界でオンラインでデータ収集を監視する

毎週の各グループ打ち合わせもオンライン
コラボレーションミーティングは富山

SKの論文について

- 実験開始から28年経過してなお、一線級論文を継続して出版している。
 - Gdの導入により、論文量産中
 - 解析を主導した学生が書くことが多い。ちゃんと1st authorになれる！

数年後、ここに皆さんのお名前も

PHYSICAL REVIEW D 107, 092009 (2023)

Measurement of the cosmogenic neutron yield in Super-Kamiokande with gadolinium loaded water

M. Shinoki⁴⁹, K. Abe^{1,47}, Y. Nakamura¹, R. Kaneshima¹, Y. Nakano,¹ M. Nakahata,^{1,47} S. M. Shiozawa,¹ Y. Sonoda,¹ T. Yano,¹ S. Han,² T. Kajita,² P. Fernandez,⁴ L. Labarga,⁴ N. J. Bian,⁷ N. J. Grishevich,⁷ W. H. Hill,⁸ S. H. Lee,⁹ D. H. L. Bernard,¹¹ A. Caffani,¹¹ O. B. Quilain,¹¹ T. Ishizuka,¹² D. Martin,¹⁸ M. Scott,¹⁸ A. A. Langella,²⁰ L. N. Machado,²³ M. Gonin,²³ G. Pronost,²³ C. T. Ishida,²⁵ T. Kobayashi,²⁵ M. T. Sekiguchi,²⁵ T. Tsukamoto,²⁵ T. Katori,²⁶ J. Migenda,²⁶ M. T. Bronner,²⁷ J. Feng,²⁸ T. I. McCauley,²⁹ P. Mehta,²⁹ A. S. M. Lakshmi,³³ M. Mani,³³ M. J. Wilking,³⁴ C. Yanagisawa,³⁵ S. Sakai,³⁵ G. Barr,³⁶ D. Barrow,³⁷ J. Yoo,³⁸ J. E. P. Fannon,³⁹ L. H. Okazawa,⁴⁰ S. B. Kim,⁴¹ K. Nishijima,⁴⁴ M. Kos,⁴⁴ M. Yokoyama,^{46,47} K. Marte,⁴⁷ M. Ishitsuka,⁴⁹ H. Ito,⁴⁹ T. K. Kameda,^{2,51} Y. Kanemura¹, R. Kaneshima¹, Y. Kashiwagi¹, Y. Kataoka^{1,52}, S. Miki¹, S. Mine,^{2,4} M. Miura^{2,3}, S. Moriyama^{2,3}, Y. Nakano^{2,5}, M. Nakahata^{2,5}, S. Nakayama^{2,5}, Y. Noguchi^{2,5}, K. Okamoto², K. Sato², H. Sekiya^{2,3}, H. Shiba², K. Shimizu², M. Shiozawa^{2,3}, Y. Sonoda², Y. Suzuki², A. Takeda^{2,3}, Y. Takemoto^{2,3}, A. Takenaka², H. Tanaka^{2,3}, S. Watanabe,² T. Yano^{2,5}, S. Han,⁵, T. Kajita^{3,5,6}, K. Okumura^{3,5,6}, T. Tashiro⁶, T. Tomiya⁵, X. Wang⁵, S. Yoshida⁵, G. D. Megias⁷, P. Fernandez⁸, L. Labarga⁸, N. Ospina⁸, B. Zaldivar⁸, B. W. Piontor^{9,10}, E. Kearns^{3,11}, J. L. Raaf¹¹, L. Wan¹⁴, T. Wester¹¹, J. Bian,⁴ N. J. Grishevich⁴, S. Locke⁴, M. B. Smy^{3,4}, H. W. Sobel^{3,4}, V. Takhistov^{4,12}, A. Yankelevich⁴, J. Hill¹³, S. H. Lee¹⁴, D. H. Moon¹⁴, R. G. Park¹⁴, B. Bodur¹⁵, K. Scholberg¹⁵, C. W. Weber¹⁵, A. Beauchene¹⁶, O. Drapier¹⁶, A. Giampaolo¹⁶, Th. A. Mueller¹⁶, D. A. Santo¹⁶, P. Paganini¹⁶, B. Quilain¹⁶, T. Ishizuka¹⁷, T. Nakamura¹⁸, J. S. Jang¹⁹, J. G. Learned²⁰, K. Choi²¹, N. Iovine²¹, S. Cao²², L. H. V. Anthony²³, D. Martin²³, M. Scott²³, A. A. Szucs²³, Y. Uchida²³, V. Berardi²⁴, M. G. Catanesi²⁴, E. Radicacion²⁴, N. F. Calabrese²⁴, A. Langella²⁴, L. N. Machado²⁵, G. D. Rosa²⁵, G. Collazuol²⁶, F. Iacobelli²⁶, M. Lamoureux²⁶, M. Mattiazzini²⁶, L. Ludovici²⁷, M. Gonin⁶, G. Pronost⁶, C. Fujisawa²⁸, Y. Maekawa²⁸, Y. Nishimura²⁸, R. Okazaki²⁸, R. Akutsu¹², M. Friend¹², T. Hasegawa¹², T. Ishida¹², T. Kobayashi¹², M. Jakkapu¹², T. Matsubara¹², T. Nakadaira¹², K. Nakamura^{3,12}, K. Sakashita¹², T. Sekiguchi¹², T. Tsukamoto¹², N. Bhuiyan²⁹, G. The Burton²⁹, F. Di Lodovico²⁹, J. Gao²⁹, A. Goldsack²⁹, T. Katori²⁹, J. Migenda²⁹, Z. Xie²⁹, S. Szoldo^{3,29}, Y. Kotsar³⁰, H. Ozaki³⁰, A. T. Suzuki³⁰, Y. Tagaki³⁰, Y. Takeuchi^{3,30}, J. Feng³¹, L. Feng³¹, J. R. Hu³¹, Z. Hu³¹, T. Kikawa³¹, M. Mori³¹, R. A. Wendell^{3,31}, K. Yasutomo³¹, S. J. Jenkins³², N. McCauley³², P. Mehta³², A. Tarrant³², Y. Fukuda³³, Y. Itow^{33,35}, H. Menjo³⁴, K. Ninomiya³⁴, J. Lagoda³⁶, S. M. Lakshmi³⁶, M. Mandal³⁶, P. Mijkowski³⁶, Y. S. Prabhu³⁶, J. Zalipska³⁶, M. Jia³⁷, J. Jiang³⁷, C. K. Jung³⁷, M. J. Wilking³⁷, C. Yanagisawa³⁷, Y. Hino¹, H. Ishino¹, H. Kitagawa¹, Y. Kosho^{1,3}, P. Nakaniishi¹, S. Sakai^{1,3}, T. Tada¹, T. Tano¹, G. Barr³⁸, D. Barrow³⁸, L. Cook^{3,38}, S. Samani³⁸, D. Wark^{38,39}, A. Holin⁴⁰, F. Nova⁴¹, B. S. Yang⁴⁰, J. Y. Yang⁴⁰, J. Yoo⁴⁰, J. E. P. Fannon⁴², L. Kneale⁴², M. Malek⁴², J. M. McElwee⁴², M. D. Thiesse⁴², L. F. Thompson⁴², S. T. Wilson⁴², J. H. Oberauer⁴³, S. K. Kinn⁴⁴, E. Kearns⁴⁴, J. W. Sane⁴⁴, J. V. Smith⁴⁴, A. K. Ieki⁴⁵, K. D. Nakanishi⁴⁵, S. T. Wilson⁴⁵, J. H. Oberauer⁴⁵, J. V. Smith⁴⁵, A. K. Ieki⁴⁵, K. D. Nakanishi⁴⁵

昨年度学生主導の論文

A. Minamoto, H. Yamamoto, S. Sano, S. Suzuki, N. Wada and

PHYSICAL REVIEW D 109, 072014 (2024)

Atmospheric neutrino oscillation analysis with neutron tagging and an expanded fiducial volume in Super-Kamiokande I-V

T. Wester^{4,*}
 J. Kameda,
 S. Moriyama¹
 K. Shimizu¹
 S. Han² T. Ka
 N. Ospina³
 S. Locke,⁶
 R. G. Park
 Th. A. Mu
 J. G. Learne
 A. A. Sztu
 G. De Rosa,¹⁹
 Y. Maekawa,²
 M. Jakkap
 T. Tsukamoto
 R. Ramsden,²⁴
 J. R. Hu²⁷
 S. J. Jenkins¹⁰
 J. Lagoda,³²S.
 W. Shi,³³M. J
 S. Sakai¹⁰,T.
 D. Warl
 J. M. McEl
 J. W. Seo¹⁰
 K. Nakagi
 S. Fujita¹⁰,K.
 M. Ishitsubo
 V. Gousby-Lub
 S. B. Boyd,⁵⁰

PHYSICAL REVIEW D 109, L011101 (2024)

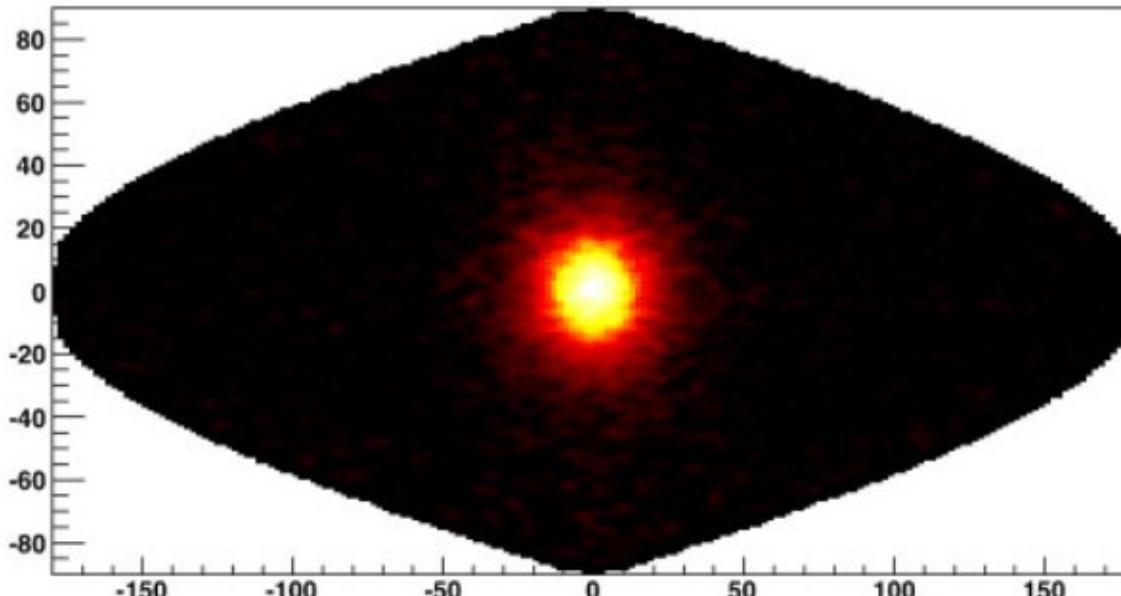
Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross section using atmospheric neutrinos in the SK-Gd experiment

S. Sakai,³⁴ K. Abe,^{1,46} C. Bronner,¹ Y. Hayato,^{1,46} K. Hiraide,^{1,46} K. Hosokawa,¹ K. Ieki,^{1,46} M. Ikeda,^{1,46} J. Kameda,^{1,46} Y. Kanemura,^{1,46} R. Kaneshima,^{1,46} Y. Kashiwagi,¹ Y. Kataoka,^{1,46} S. Miki,¹ S. Mine,^{1,6} M. Miura,^{1,46} S. Moriyama,^{1,46} Y. Nakano,^{1,46} M. Nakahata,^{1,46} S. Nakayama,^{1,46} Y. Noguchi,^{1,46} K. Sato,^{1,46} H. Sekiya,^{1,46} H. Shiba,¹ K. Shimizu,¹ M. Shiozawa,^{1,46} Y. Sonoda,¹ Y. Suzuki,¹ A. Takeda,^{1,46} Y. Takemoto,^{1,46} H. Tanaka,^{1,46} T. Yano,¹ S. Han,² T. Kajita,^{2,46,22} K. Okumura,^{2,46} T. Tashiro,² T. Tomiya,² X. Wang,² S. Yoshida,² P. Fernandez,³ L. Labarga,³ N. Ospina,³ B. Zaldívar,³ B. W. Pointon,^{5,49} E. Kearns,^{4,46} J. L. Raaf,⁴ L. Wan,⁴ T. Wester,⁴ J. Bian,⁶ N. J. Griskevich,⁶ S. Locke,⁶ M. B. Smy,⁶ H. W. Sobel,^{6,46} V. Takhistov,^{6,24} A. Yankelevich,⁶ J. Hill,⁷ M. C. Jang,⁸ S. H. Lee,⁸ D. H. Moon,⁸ R. G. Park,⁸ B. Bodur,⁹ K. Scholberg,^{9,46} C. W. Walter,^{9,46} A. Beauchêne,¹⁰ O. Drapier,¹⁰ A. Giampaolo,¹⁰ Th. A. Mueller,¹⁰ A. D. Santos,¹⁰ P. Paganini,¹⁰ B. Quilain,¹⁰ T. Nakamura,¹¹ J. S. Jang,¹² L. N. Machado,¹³ J. G. Learned,¹⁴ K. Choi,¹⁵ N. Iovine,¹⁵ S. Cao,¹⁶ L. H. V. Anthony,¹⁷ D. Martin,¹⁷ N. W. Prouse,¹⁷ M. Scott,¹⁷ A. A. Szutcz,¹⁷ Y. Uchida,¹⁷ V. Berardi,¹⁸ N. F. Calabria,¹⁸ M. G. Catanei,¹⁸ E. Radicioni,¹⁸ A. Langella,¹⁹ G. De Rosa,¹⁹ G. Collazuol,²⁰ F. Iacob,²⁰ M. Mattiazzoli,²⁰ L. Ludovici,²¹ M. Gonin,²² G. Pronost,²² C. Fujisawa,²³ Y. Maekawa,²³ Y. Nishimura,²³ R. Okazaki,²³ R. Akutsu,²⁴ M. Friend,²⁴ T. Hasegawa,²⁴ T. Ishida,²⁴ T. Kobayashi,²⁴ M. Jakku,²⁴ T. Matsubara,²⁴ T. Nakadaira,²⁴ K. Nakamura,²⁴ Y. Oyama,²⁴ K. Sakashita,²⁴ T. Sekiguchi,²⁴ T. Tsukamoto,²⁴ N. Bhuiyan,²⁵ G. T. Burton,²⁵ F. Di Lodovico,²⁵ J. Gao,²⁵ A. Goldsack,²⁵ T. Katori,²⁵ J. Migenda,²⁵ R. M. Ramsden,²⁵ Z. Xie,²⁵ S. Zsoldos,^{25,46} A. T. Suzuki,²⁶ Y. Takagi,²⁶ H. Zhong,²⁶ Y. Takeuchi,^{26,46} J. Feng,²⁷ L. Feng,²⁷ J. R. Hu,²⁷ Z. Hu,²⁷ M. Kawaue,²⁷ T. Kikawa,²⁷ M. Mori,²⁷ T. Nakaya,²⁷ R. A. Wendell,^{27,46} K. Yasutome,²⁷ S. J. Jenkins,²⁸ N. McCauley,²⁸ P. Mehta,²⁸ A. Tarant,²⁸ Y. Fukuda,²⁹ Y. Itow,^{30,31} H. Menjo,³⁰ K. Ninomiya,³⁰ Y. Yoshioka,³⁰ J. Lagoda,³² S. M. Lakshmi,³² M. Mandal,³² P. Mijakowski,³² Y. S. Prabhu,³² J. Zalipska,³² M. Jia,³³ J. Jiang,³³ C. K. Jung,³³ W. Shi,³³ M. J. Wilking,³³ C. Yanagisawa,^{33*} M. Harada,³⁴ Y. Hino,³⁴ H. Ishino,³⁴ Y. Koshio,^{34,46} F. Kanishihi,³⁴ T. Tada,³⁴ T. Tano,³⁴ T. Ishizuka,³⁵ G. Barr,³⁶ D. Barrow,³⁶ L. Cook,^{36,46} S. Samani,³⁶ D. Wark,^{36,41} A. Holin,³⁷ F. Nova,³⁷ S. Jung,³⁸ B. S. Yang,³⁸ J. Y. Yang,³⁸ J. Yoo,³⁸ J. E. P. Fannon,³⁹ L. Kneale,³⁹ M. Malek,³⁹ J. M. ElClewe,³⁹ M. D. Thiesse,³⁹ L. F. Thompson,³⁹ S. T. Wilson,³⁹ H. Okazawa,⁴⁰ S. B. Kim,⁴² E. Kwon,⁴² J. W. Seo,⁴² I. Yu,⁴² A. K. Ichikawa,⁴³ K. D. Nakamura,⁴³ S. Tairafune,⁴³ K. Nishijima,⁴⁴ A. Eguchi,⁴⁵

- 太陽ニュートリノ

- 我々が使える最も強度の強いニュートリノ源
 - 地球の位置でも約660億個/cm²/s
- ニュートリノ振動研究のきっかけ

SKでとらえた⁸Bニュートリノによる太陽内部写真



- 依然として数多くの謎(研究対象)がある

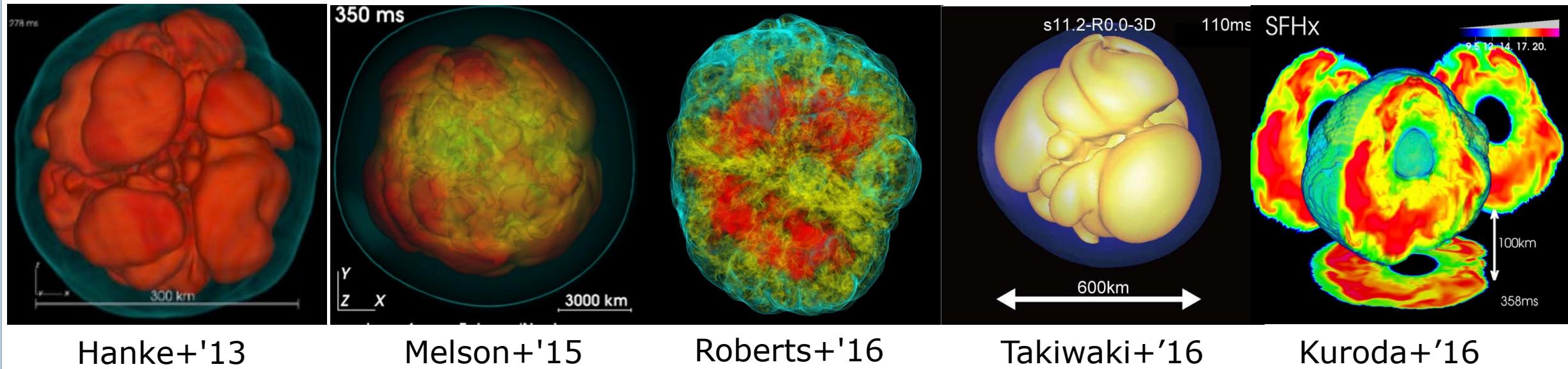
- 超新星ニュートリノ

- 1987年に13秒間でKamiokandeが11現象、IMBが8現象捉えたのみ。
- 19現象では爆発の詳細なメカニズムがわからなかつた。
- 我々を構成する元素の起源を探る
 - 「私たちは星のかけらだった」



超新星爆発はニュートリノが引き起こす

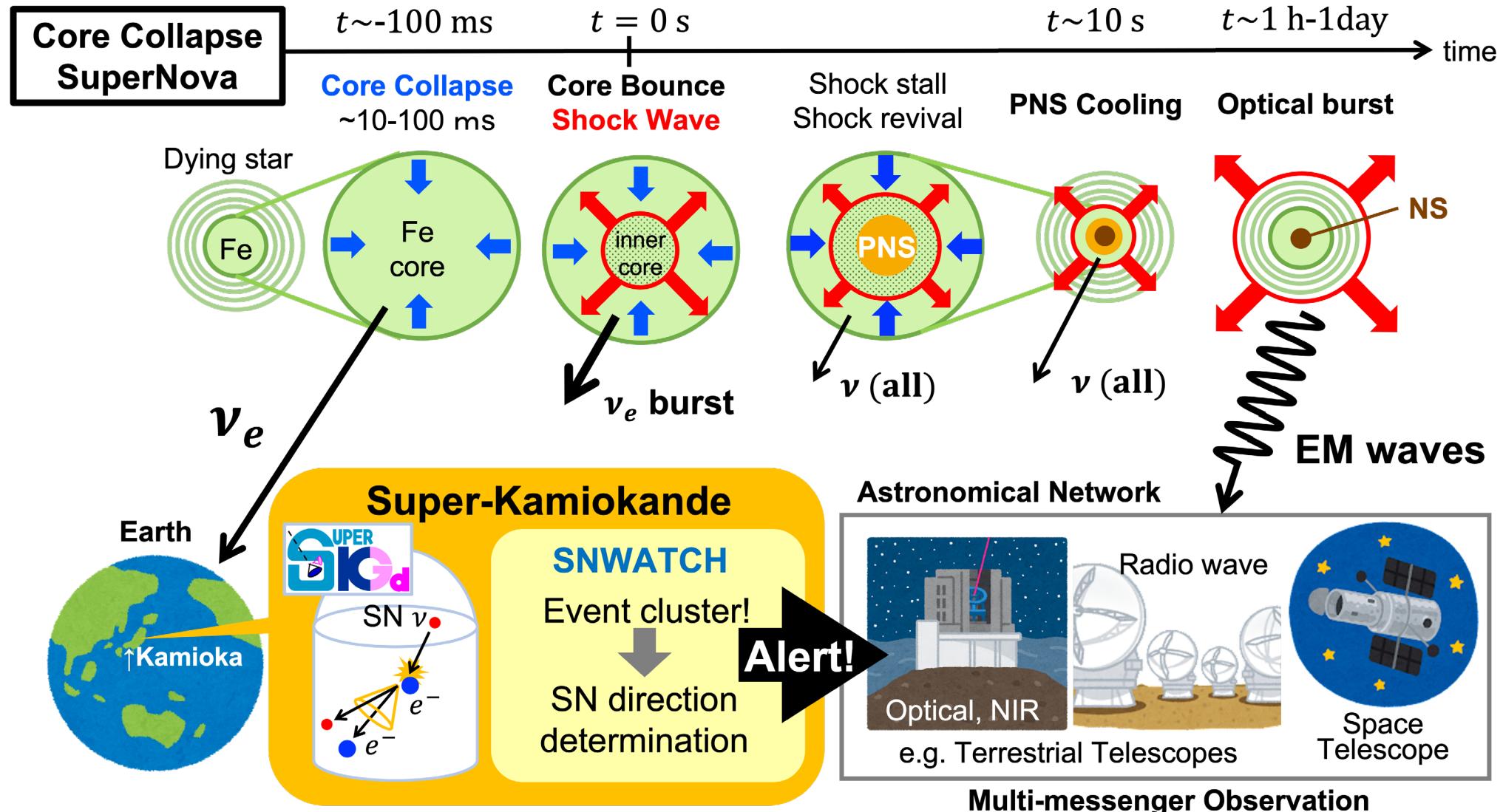
- 爆発のシミュレーション→ニュートリノによるエネルギー輸送



- モデルを作るには1987Aのデータはものすごく重要。ニュートリノによる衝撃波の再加熱をいれることで、最近ようやく爆発"できるように"なった。
- とにかくデータが必要 エネルギーや時間の情報が要る。

SKの唯一無二の役割

光で爆発の前にニュートリノで方向を決定する

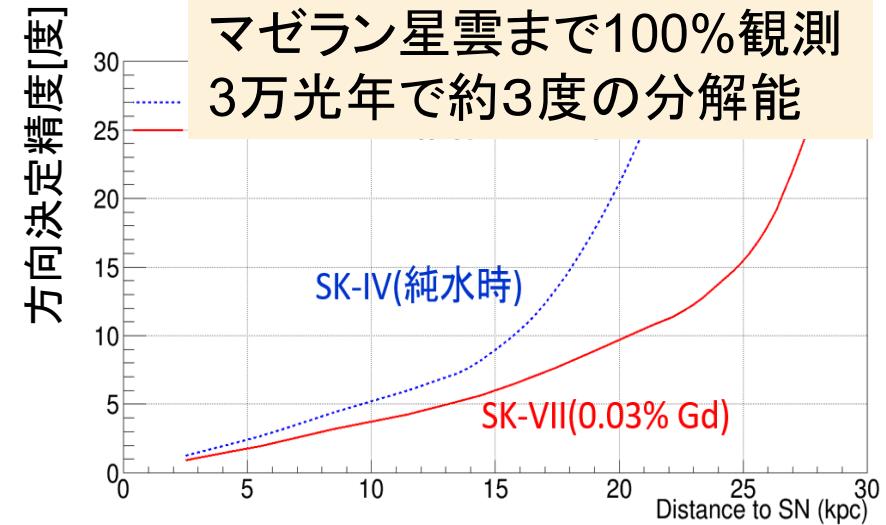
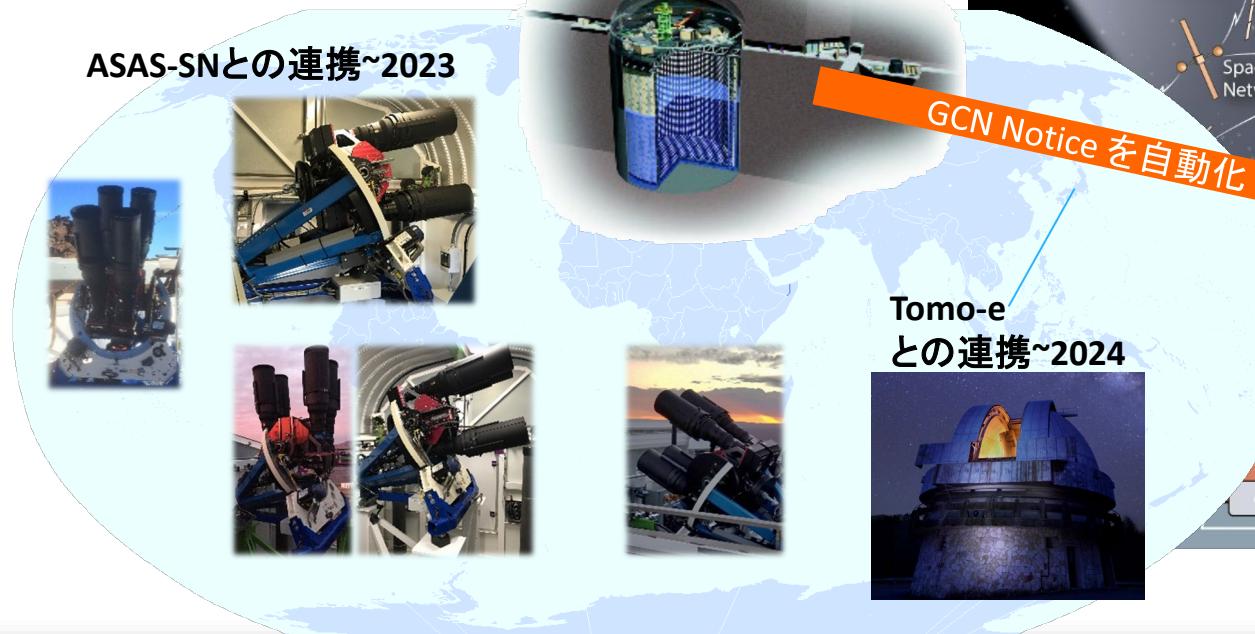


マルチメッセンジャー天文学の推進

Gd信号を用い自動情報発信システムを稼働～1分で発信

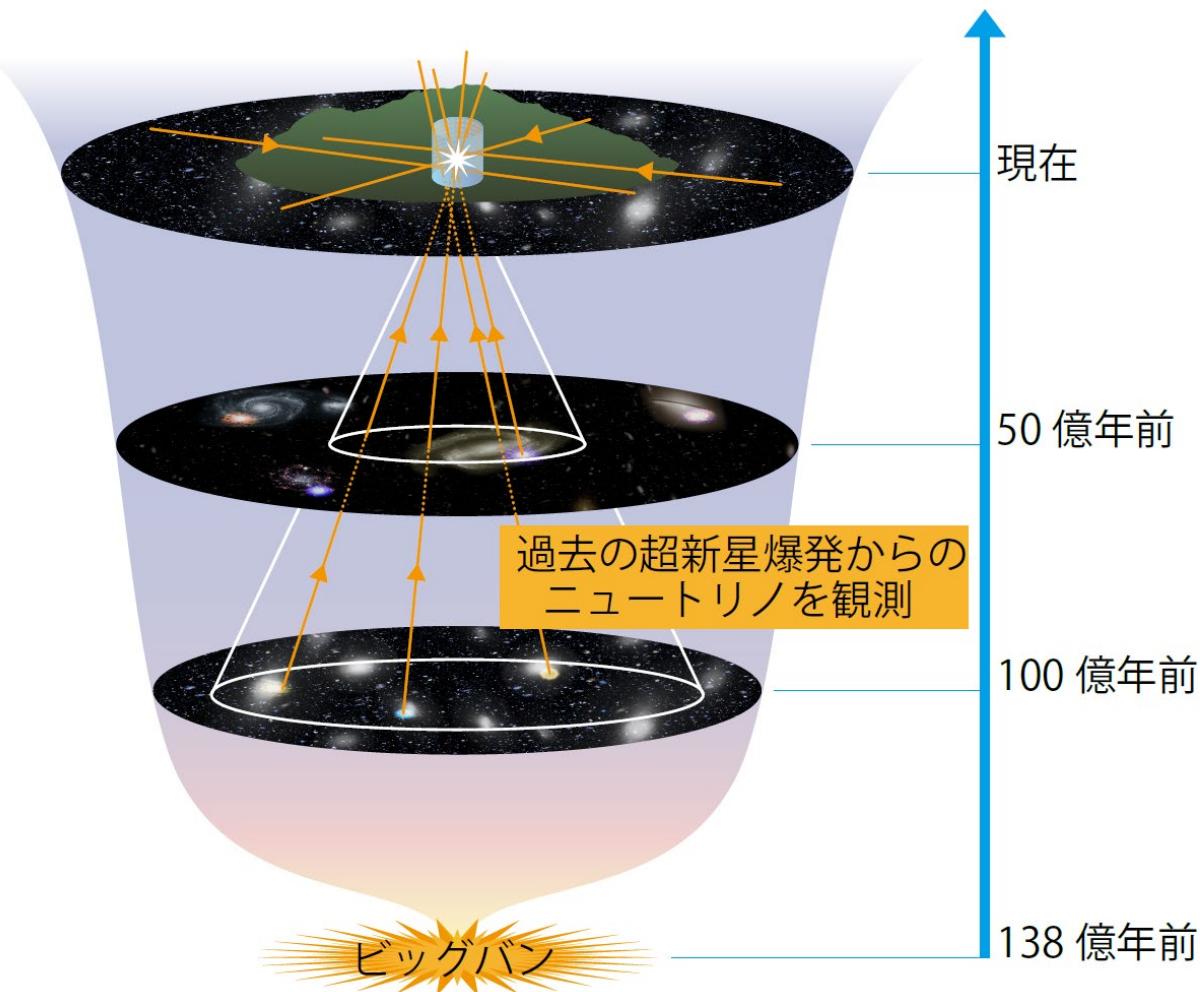
- ・さらなる高速化
- ・さらなる高精度化

を目指し開発をすすめている



マゼラン星雲まで100%観測
3万光年で約3度の分解能

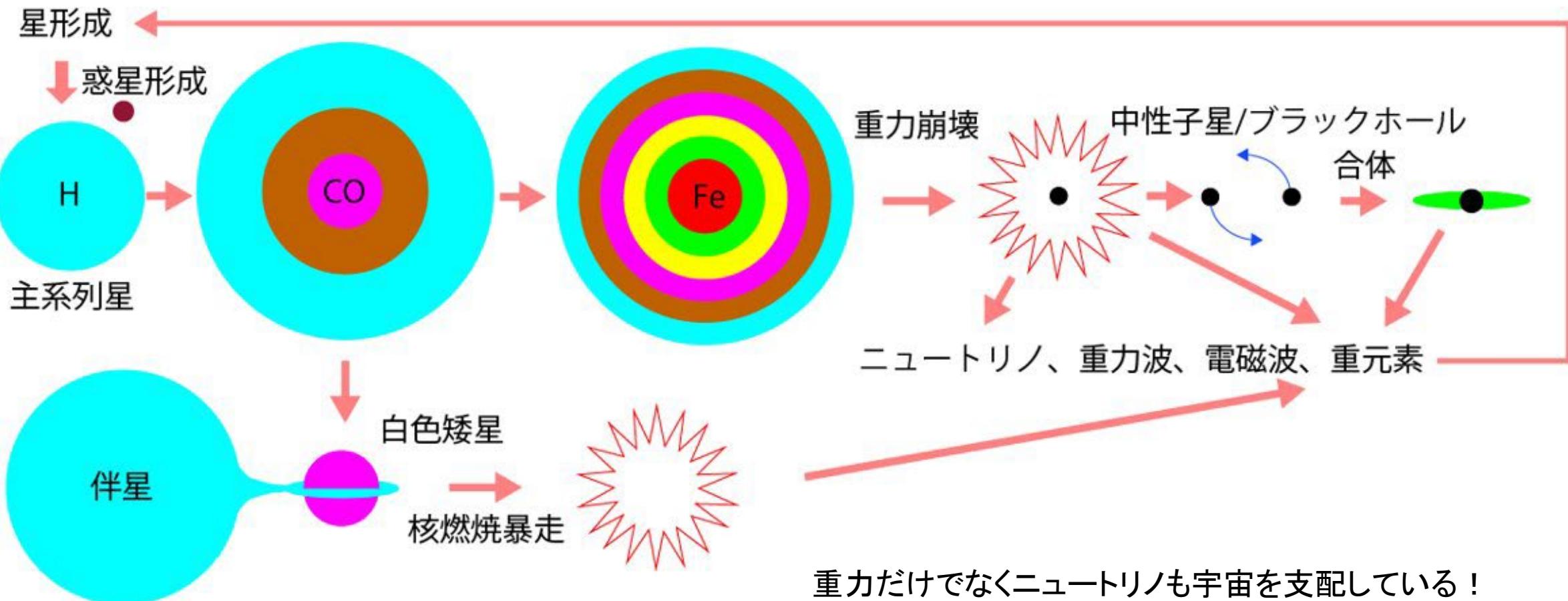
待つだけでなく、超新星背景ニュートリノを捕まえにいく



- 宇宙には 10^{22-23} 個の恒星（～ 10^{11} 個の銀河～ 10^{11-12} 恒星/銀河）
- 現時点では宇宙の開闢からの 10^{17} 個の超新星爆発からのニュートリノを受けていることになる。
- それにともなって放出されたニュートリノが宇宙に満ちている。
- 確実に「ここ」にある。
- 超新星背景ニュートリノを観測すれば宇宙の初めからの重元素合成の歴史を探ることが出来る！

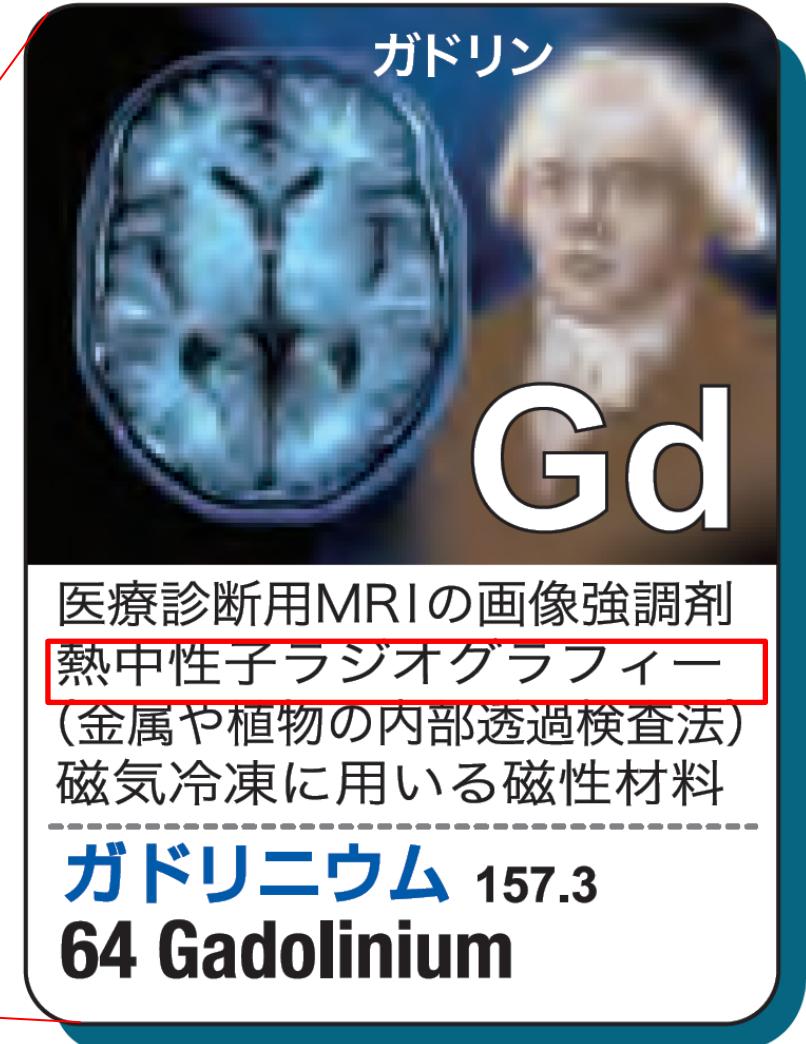
ブラックホールや中性子星連星だってもとは超新星

- とにかく超新星爆発が先に起きないと始まらない！
 - 超新星爆発の歴史を調べる重要性



118個の元素(武器)の中に使えるものはないか？

◆ ガドリニウムは中性子吸収してガンマ線を出す



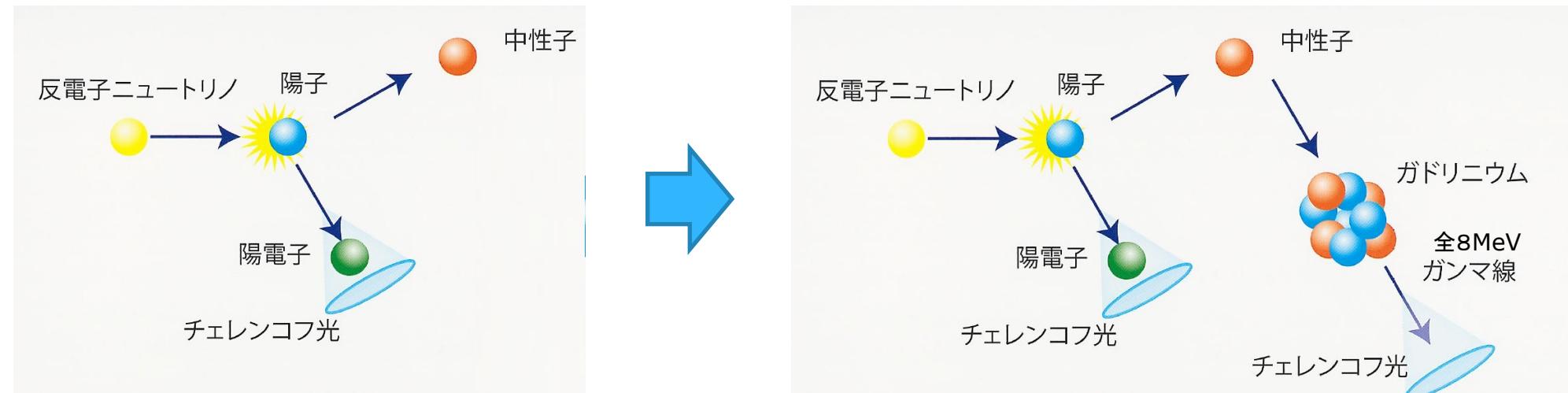
SK-Gd

硫酸ガドリニウム8水和物

- $\bar{\nu}_e$ の判別するため、ガドリニウムを加えた。
- Gdの熱中性子に対する断面積は48.89kb
- 中性子吸収後、全8MeVのガンマ線をだす。
- 種々の研究により硫酸ガドリニウムを溶かす
- 超新星背景ニュートリノだけでなく、そのほかの物理にも！



水チェレンコフ検出器の性能を飛躍的に高める



- ◆ ガドリニウムを入れることで反電子ニュートリノは2つ目のチエレンコフ光を出す
- ◆ ガドリニウムの中性子捕獲反応は大きく、0.03%濃度で75%の効率となる

2022年0.03%Gd濃度達成

- 2020年 26個の500kgフレコン



- 2022年 1350箱の20kg入り段ボール



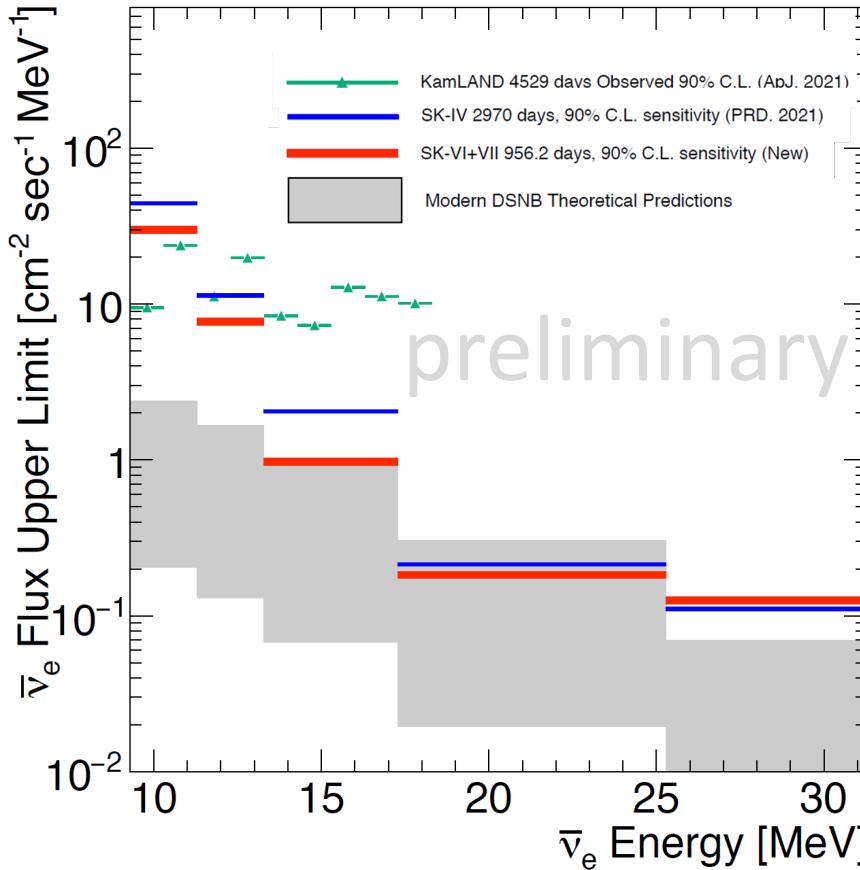
- 溶解装置



高純度の硫酸ガドリニウムを開発
Gd0.03% = 40トン

超新星背景ニュートリノ観測の現状

超新星背景ニュートリノのフラックス



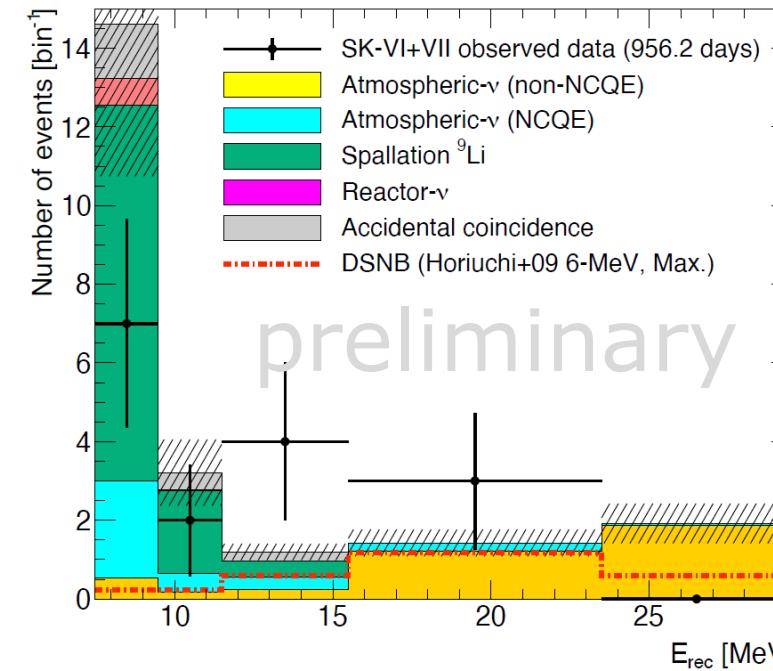
←2023年9月までの観測感度

SK-IV 10年（純水）

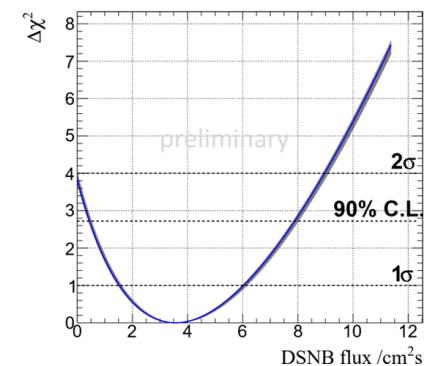
SK-VI+VII 2.5年（Gd 0.01%と 0.03%）

理論予想

これまでのデータ

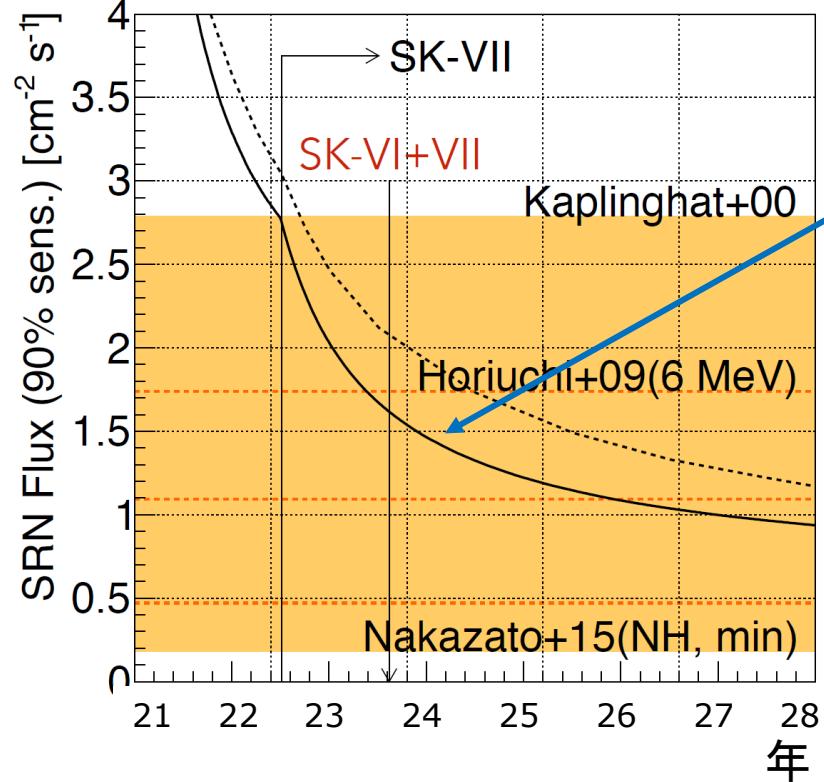


兆候？



超新星背景ニュートリノ観測

超新星背景ニュートリノのフラックス



SK-Gdの感度

理論予想の範囲

- “兆候”を確認し数年の観測で発見をめざす！

Super-Kamiokande LowE Group

- ニュートリノを使って天文、宇宙物理をする
- 天体を素粒子研究のためのニュートリノ源と考え実験する

SK史上最大のアップグレード完了
これから新しいデータが！
2~5年で大発見を目指す



関谷

午後は 宇宙線研6F大セミナー室にて

大きい実験でも、小さい実験と同じ
神岡：現場で装置を把握して、データをとって、論文を書く

