



Super-Kamiokande LowE/astro group

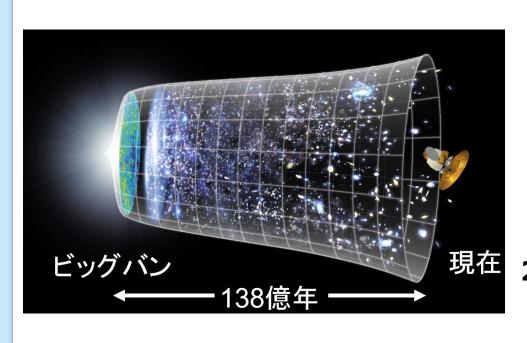


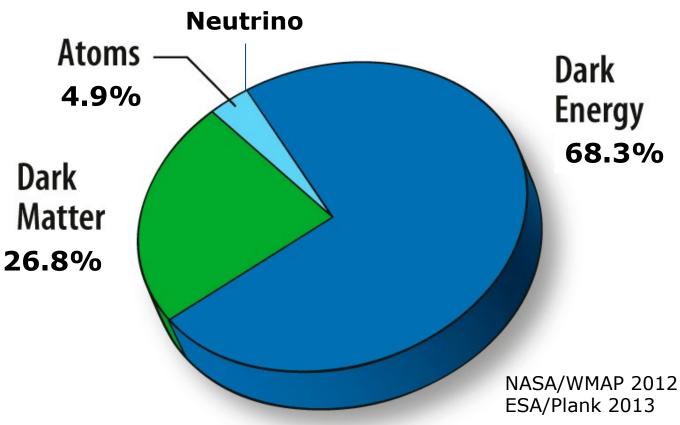
宇宙線研究所 宇宙ニュートリノ研究部門 関谷洋之

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

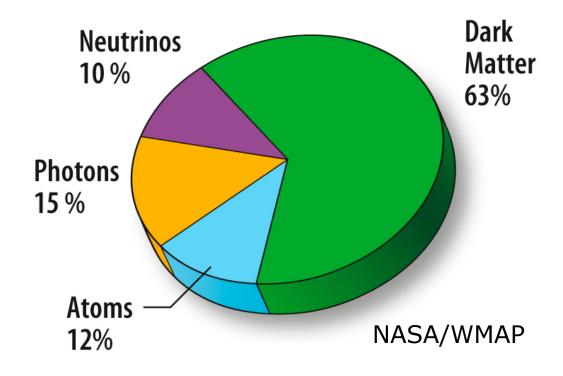




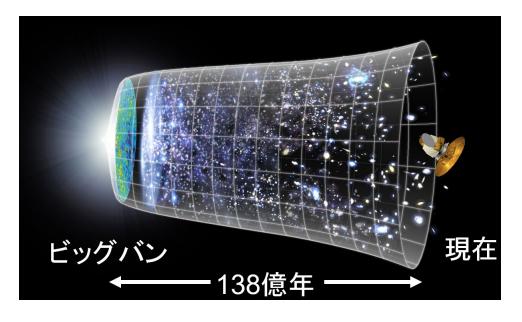
宇宙ニュートリノ研究部門

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



(Universe 380,000 years old)



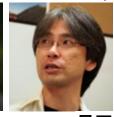
具体的な実験 Super-Kamiokande、T2K、暗黒物質直接探索 Hyper-Kamiokande

宇宙ニュートリノ部門の教員と主な研究内容

神岡6名・柏2名の教授/准教授

- 神岡宇宙素粒子研究施設
 - 中畑 SK LowE(募集無し)
 - 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
- 柏宇宙ニュートリノ観測情報融合センター 梶田 SK atm/pd T2K HK(募集無し) 奥村 SK atm/pd T2K HK

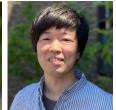












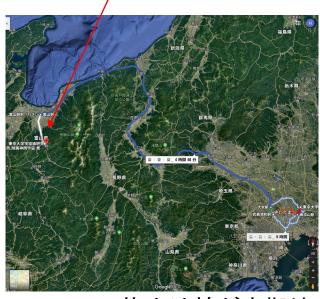




梶田



神岡宇宙素粒子研究施設



修士は柏が本拠地 神岡に「通う」

神岡宇宙素粒子研究施設の地上設備













【令和5(2023)年6月 献立表】

7	水	0	オムライス 煮奴 スパゲッティサラダ	ちくわの磯部揚げ ニラ豚卵とじ 青菜のゴマ和え
8	木	0	牛肉のしぐれ煮 コンニャクのピリ辛炒め シーザーサラダ	ささみフライ じゃがいものカレー煮 パプリカのレンジマリネ
9	金	0	もやしと豚肉の味噌炒め 高野豆腐の含め煮 大根と赤カマの和え物	ふんわり卵 厚揚げと牛肉のオイスターカレー煮 きゅうりとジャコの酢の物
10	±	0	マーボー豆腐 魚の西京焼き 切干大根とほうれん草のサラダ	油揚げ餃子 おでん ブロッコリーと新玉ねぎのサラダ

大学院生室(個人のブース)は柏と神岡の両方にあります。

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

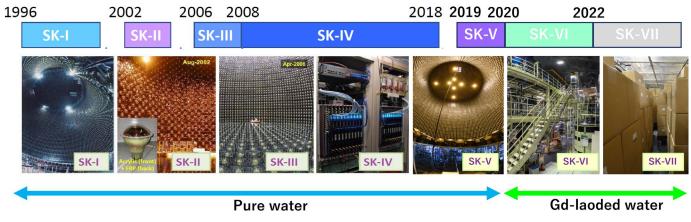


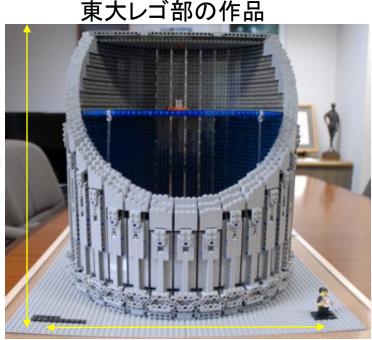


Super-Kamiokande

- 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。

41.4m





40m

2022年6月1日からSK-VIIを開始

スーパーカミオカンデの研究対象



The Super-Kamiokande Collaboration



Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan INFN Bari, Italyl RCCN, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan NFN Napoli, Italyl University Autonoma Madrid, Spain INFN Padova, Ital BC Institute of Technology, Canada INFN Roma, Ital Boston University, USA Kavli IPMU, The Viniversity of California, Irvine, USA Keio University, USA Keio University, USA Chonnam National University, Korea King's College L

Gifu University, Japan GIST, Korea University of Glasgow, UK University of Hawaii, USA IBS, Korea

Duke University, USA

IFIRSE, Vietnam Imperial College London, UK ILANCE, France INFN Bari, Italyl
NFN Napoli, Italy
INFN Padova, Italy
INFN Roma, 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
Mivadi University of Education, Japan

NCBJ, Poland Nihon University, Japan Okayama University, Japan

ISEE, Nagoya University, Japan

~230 collaborators from 53 institutes in 11 countries

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 Sungkyunkwan University, Korea Stony Brook University, USA Tohoku University, Japan Tokai University, Japan The University of Tokyo, Japan Tokyo Institute of Technology, Japan Tokyo University of Science, japan TRIUMF, Canada Tsinghua University, China University of Warsaw, Poland Warwick University, UK

The University of Winnipeg, Canada

Yokohama National University, Japan

みんなで協力しつつ競いつつ結果をだす



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27年経過してなお、年間5編以上の一線級論文が出版されている!
- 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!

PHYSICAL REVIEW D 107, 092009 (2023)

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

M. Shinoki⁰, ⁴⁹ K. Abe, ^{1,47} Y. Hayato, ^{1,47} K. Hiraide, ^{1,47} K. Hosokawa, ¹ K. Ieki, ^{1,47} M. Ikeda, ^{1,47} J. Kameda, ^{1,47}

Y. Kanemura, R. Kaneshim Y. Nakano, M. Nakahata, 1,47 S M. Shiozawa, 1,47 Y. Sonoda, T. Yano, S. Han, T. Kajita, P. Fernandez, L. Labarga, N. J. Bian, N. J. Griskevich, W. J. Hill, S. H. Lee, D. H. N L. Bernard, 11 A. Coffani, 11 O. B. Ouilain, 11 T. Ishizuka, 12 D. Martin, 18 M. Scott, 18 A. A A. Langella, 20 L. N. Machado, 2 M. Gonin, 23 G. Pronost, 23 C. T. Ishida, 25 T. Kobayashi, 25 M. T. Sekiguchi, 25 T. Tsukamoto, T. Katori,²⁶ J. Migenda,²⁶ M. C. Bronner,²⁸ J. Feng,²⁸ T. K N. McCauley, ²⁹ P. Mehta, ²⁹ A. S. M. Lakshmi, 33 M. Mand M. J. Wilking, 34 C. Yanagisay S. Sakai, 35 G. Barr, 36 D. Barrow, J. Yoo, 38 J. E. P. Fannon, 39 L. H

H. Okazawa, 40 S. B. Kim, 42

M. Yokoyama, 46,47 K. Marten:

M. Ishitsuka, 49 H. Ito, 49 T. Kir

N. W. Prouse, 51 S. Chen, 52 B. I

J. F. Martin, 50 H. A. Tanaka,

K. Nishijima.44 M. Kosh

PHYSICAL REVIEW D 106, 072003 (2022)

Search for proton decay via $p \to \mu^+ K^0$ in 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande

R. Matsumoto[•], ⁴⁹ K. Abe, ^{1,47} Y. Hayato, ^{1,47} K. Hiraide, ^{1,47} K. Ieki, ¹ M. Ikeda, ^{1,47} J. Kameda, ^{1,47} Y. Kanemura, ¹ R. Kaneshima, ¹ Y. Kashiwagi, ¹ Y. Kataoka, ^{1,47} S. Miki, ^{1,47} S. Mine, ^{1,7} M. Miura, ^{1,47} S. Moriyama, ^{1,47} Y. Nakano, ¹ M. Nakahata, ^{1,47} S. Nakayama, ^{1,47} Y. Noguchi, ¹ K. Okamoto, ¹ K. Sato, ¹ H. Sekiya, ^{1,47} H. Shiba, ¹ K. Shimizu, ¹ M. Shiozawa, ^{1,47} Y. Sonoda, ¹ Y. Suzuki, ¹ A. Takeda, ^{1,47} Y. Takemoto, ^{1,47} A. Takenaka, ¹ H. Tanaka, ^{1,47} S. Watanabe, ¹ T. Yano, S. Han, T. Kajita, A. Okumura, T. Tashiro, T. Tashiro, T. Tomiya, X. Wang, J. Xia, S. Yoshida, G. D. Megias, P. Fernandez, L. Labarga, N. Ospina, B. Zaldivar, B. W. Pointon, S. E. Kearns, J. L. Raaf, L. Wan, T. Wester, S. Wester, S. T. Wester, S. T. Wester, S. T. W J. Bian, N. J. Griskevich, W. R. Kropp, S. Locke, M. B. Smy, H. W. Sobel, A. V. Takhistov, A. Yankelevich. J. Hill, J. Y. Kim, I. T. Lim, R. G. Park, B. Bodur, K. Scholberg, C. W. Walter, L. Bernard, A. Coffani, L. O. Drapier, S. El Hedri, A. Giampaolo, Th. A. Mueller, A. D. Santos, P. Paganini, B. Quilain, T. Ishizuka, 12 T. Nakamura, ¹³ J. S. Jang, ¹⁴ J. G. Learned, ¹⁵ K. Choi, ¹⁶ S. Cao, ¹⁷ L. H. V. Anthony, ¹⁸ D. Martin, ¹⁸ M. Scott, ¹⁸ A. A. Sztuc, ¹⁸ Y. Uchida, ¹⁸ V. Berardi, ¹⁹ M. G. Catanesi, ¹⁹ E. Radicioni, ¹⁹ N. F. Calabria, ²⁰ L. N. Machado, ²⁰ G. De Rosa, ²⁰ G. Collazuol, ²¹ F. Iacob. 21 M. Lamoureux. 21 M. Mattiazzi. 21 L. Ludovici. 22 M. Gonin. 23 G. Pronost. 23 C. Fujisawa. 25 Y. Maekawa. 24 Y. Nishimura, ²⁴ M. Friend, ²⁵ T. Hasegawa, ²⁵ T. Ishida, ²⁵ T. Kobayashi, ²⁵ M. Jakkapu, ²⁵ T. Matsubara, ²⁵ T. Nakadaira, ²⁶ T. Nakadaira, ²⁶ T. Nakadaira, ²⁸ T. Nakadaira, ⁸⁸ T. K. Nakamura, 25,47 Y. Oyama, 25 K. Sakashita, 25 T. Sekiguchi, 25 T. Tsukamoto, 25 T. Boschi, 26 F. Di Lodovico, 26 J. Gao, 21 A. Goldsack, ²⁶ T. Katori, ²⁶ J. Migenda, ²⁶ M. Taani, ²⁶ Z. Xie, ²⁶ S. Zsoldos, ^{26,47} Y. Kotsar, ²⁷ H. Ozaki, ²⁷ A. T. Suzuki, ² Y. Takeuchi, 27,47 S. Yamamoto, 27 C. Bronner, 28 J. Feng, 28 T. Kikawa, 28 M. Mori, 28 T. Nakaya, 28,47 R. A. Wendell, 28,47 K. Yasutome, 28 S. J. Jenkins, 29 N. McCauley, 29 P. Mehta, 29 K. M. Tsui, 29 A. Tarrant, 29 Y. Fukuda, 30 Y. Itow, 31,32 H. Menjo, 31 K. Ninomiya, 31 J. Lagoda, 33 S. M. Lakshmi, 33 M. Mandal, 33 P. Mijakowski, 33 Y. S. Prabhu, 33 J. Zalipska, 33 M. Jia, 3 J. Jiang, ³⁴ C. K. Jung, ³⁴ M. J. Wilking, ³⁴ C. Yanagisawa, ^{34,†} M. Harada, ³⁵ H. Ishino, ³⁵ S. Ito, ³⁵ H. Kitagawa, ³⁵ Y. Koshio, ^{35,47} W. Ma, ³⁵ F. Nakanishi, ³⁵ S. Sakai, ³⁵ G. Barr, ³⁶ D. Barrow, ³⁶ L. Cook, ^{36,47} S. Samani, ³⁶ D. Wark, ^{36,41} A. Holin, ³⁷ F. Nova, ³⁷ J. Y. Yang ³⁸ M. Malek ³⁹ J. M. McElwee ³⁹ O. Stone ³⁹ M. D. Thiesse ³⁹ L. F. Thompson ³⁹ H. Okazawa ⁴⁰ S. B. Kim, ⁴²

昨年度学生主導の論

ishijima, 44 M. Koshiba, 45,8 K. Martens, 47 P. de Perio, 47 Kinoshita, 49 Y. Ommura, 49 Towstego, 50 R. Akutsu, 51 B. Zhang, 52 M. Posiadala-B. Jamieson, 55 Ll. Marti, 56

(Super-Kamiokande Collaboration)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 938:35 (13pp), 2022 October 10 © 2022. The Author(s), Published by the American Astronomical Society.

https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac8f41



OPEN ACCESS

Y. So

S. Yos

L. Be

Y. Nis

T. Naka

A. T. Si

T. Nakaya

Y. S. Prab

T. Horai³

F. Di Lodo

K. Nakag

M. Kuze

Ll. Marti⁵

Y. Omi

D. 1

A. D.

A. A. Szt

P. Fernand

J. L. Stone

V. Takhist

Searching for Supernova Bursts in Super-Kamiokande IV

M. Mori 0, K. Abe^{2,3}, Y. Hayato^{2,3}, K. Hiraide^{2,3}, K. Ieki², M. Ikeda², S. Imaizumi², J. Kameda^{2,3}, Y. Kanemura², R. Kaneshima², Y. Kashiwagi², Y. Kataoka², S. Miki², S. Mine², M. Miura², S. Moriyama^{2,3}, Y. Nagao², M. Nakahata^{2,3}, Y. Nakano², S. Nakaya

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 935:40 (14pp), 2022 August 10 © 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7f9c

OPEN ACCESS

Pre-supernova Alert System for Super-Kamiokande

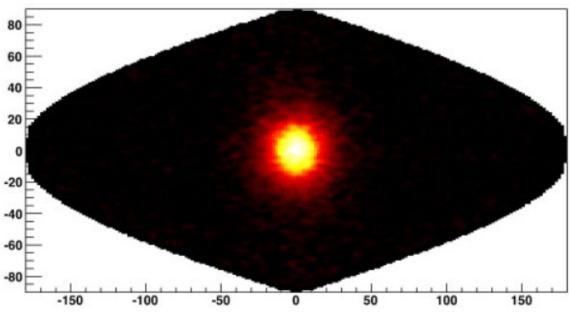
L. N. Machado¹ , K. Abe^{2,3}, Y. Hayato^{2,3}, K. Hiraide^{2,3}, K. Ieki², M. Ikeda^{2,3}, J. Kameda^{2,3}, Y. Kanemura², R. Kaneshima², Y. Kashiwagi², Y. Kataoka^{2,3}, S. Miki², S. Mine², M. Miura², S. Moriyama^{2,3}, Y. Nakano², M. Nakahata^{2,3}, S. Nakayama^{2,3}, Y. Noguchi², K. Okamoto², K. Sato², 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. Watanabe², T. Yano², P. de Perio³, K. Martens³, M. R. Vagins^{3,4}, J. Bian⁴, N. J. Griskevich⁴, W. R. Kropp^{4,56}, S. Locke⁴, M. B. Smy^{3,4}, H. W. Sobel^{3,4}, V. Takhistov^{3,4}, A. Yankelevich⁴, S. Han⁵, T. Kajita^{3,5}, K. Okumura^{3,5}, T. Tashiro⁵, T. Tomiya⁵, X. Wang⁵, J. Xia⁵, S. Yoshida⁵, G. D. Megias⁶, P. Fernandez⁷, L. Labarga⁷, N. Ospina, B. Zaldivar, B. W. Pointon, R. Akutsu, V. Gousy-Leblan, M. Hartz, A. Konaka, N. W. Prouse, E. Kearns^{3,10}, J. L. Raaf¹⁰, L. Wan¹⁰, T. Wester¹⁰, J. Hill¹¹, J. Y. Kim¹², I. T. Lim¹², R. G. Park¹², B. Bodur¹³, K. Scholberg^{3,13} C. W. Walter^{3,13}, L. Bernard¹⁴, A. Coffani¹⁴, O. Drapier¹⁴, S. El Hedri¹⁴, A. Giampaolo¹⁴, Th. A. Mueller¹⁴, A. D. Santos¹⁴ P. Paganini¹⁴, B. Quilain¹⁴, T. Ishizuka¹⁵, T. Nakamura¹⁶, J. S. Jang¹⁷, J. G. Learned¹⁸, S. Cao¹⁹, K. Choi²⁰, L. H. V. Anthony²¹ D. Martin²¹, M. Scott²¹, A. A. Sztuc²¹, Y. Uchida²¹, V. Berardi²², M. G. Catanesi²², E. Radicioni²², N. F. Calabria¹, G. De Rosa¹ G. Collazuol²³, F. Iacob²³, M. Lamoureux²³, M. Mattiazzi²³, L. Ludovici²⁴, M. Gonin²⁵, G. Pronost²⁵, C. Fuiisawa²⁶, Y. Maekawa²⁶, Y. Nishimura²⁶, R. Sasaki²⁶, M. Friend²⁷, T. Hasegawa²⁷, T. Ishida²⁷, M. Jakkapu²⁷, T. Kobayashi²⁷, T. Matsubara²⁷, T. Nakadaira²⁷, K. Nakamura^{3,27}, Y. Oyama²⁷, K. Sakashita²⁷, T. Sekiguchi²⁷, T. Tsukamoto²⁷, T. Boschi²⁸, F. Di Lodovico²⁸, J. Gao²⁸, A. Goldsack²⁸, T. Katori²⁸, J. Migenda²⁸, M. Taani²⁸, S. Zsoldos^{3,28}, Y. Kotsar²⁹, H. Ozaki²⁹ A. T. Suzuki²⁹, Y. Takeuchi^{3,29}, S. Yaamoto²⁹, C. Bronner³⁰, J. Feng³⁰, T. Kikawa³⁰, M. Mori³⁰, T. Nakaya^{3,30}, R. A. Wendell^{3,3} K. Yasutome³⁰, S. J. Jenkins³¹, N. McCauley³¹, P. Mehta³¹, K. M. Tsui³¹, Y. Fukuda³², Y. Itow^{33,34}, H. Menjo³³, K. Ninomiya³³ J. Lagoda³⁵, S. M. Lakshmi³⁵, M. Mandal³⁵, P. Mijakowski³⁵, Y. S. Prabhu³⁵, J. Zalipska³⁵, M. Jia³⁶, J. Jiang³⁶, C. K. Jung³⁶ M. J. Wilking³⁶, C. Yanagisaw S. Sakai³⁷, G. Barr³⁸, D. Barro . McElwee⁴². O. Stone⁴², M. D. Thies K. D. Nakamura⁴⁵, S. Tairafur

S. Izumiyama⁴⁸, M. Kuze⁴⁸, M. Inomoto⁴⁹, M. Ishitsuka⁴⁹, H. Ito⁴⁹, T. Kinoshita⁴⁹, R. Matsumoto⁴⁹, Y. Ommura⁴⁹, N. Shigeta⁴⁹ M. Shinoki⁴⁹, T. Suganuma⁴⁹, M. Yonenaga⁴⁹, J. F. Martin⁵⁰, H. A. Tanaka⁵⁰, T. Towstego⁵⁰, S. Chen⁵¹, B. D. Xu⁵¹, B. Zhang⁵¹, M. Posiadala-Zezula⁵², D. Hadley⁵³, M. Nicholson⁵³, M. O'Flaherty⁵³, B. Richards⁵³, A. Ali^{9,54}, B. Jamieson⁵⁴, Ll. Marti⁵⁵, A. Minamino⁵⁵, G. Pintaudi⁵⁵, S. Sano⁵⁵, S. Suzuki⁵⁵, and K. Wada⁵⁵ (The Super-Kamiokande Collaboration)

SK LowE ニュートリノ(素粒子)+天文学(宇宙)

- 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
 - □ユ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

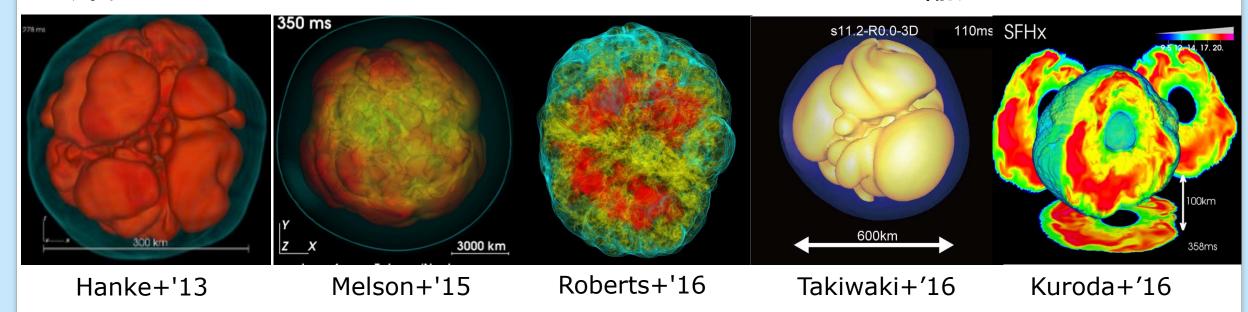
- 超新星ニュートリノ
 - 1987年に13秒間でKamiokandeが11現象、 IMBが8現象捉えたのみ。
 - 19現象では爆発の詳細なメカニズムがわからなかった。
 - 。 我々を構成する元素の起源を探る
 - 「私たちは星のかけらだった」



1987a

超新星爆発はニュートリノが引き起こす

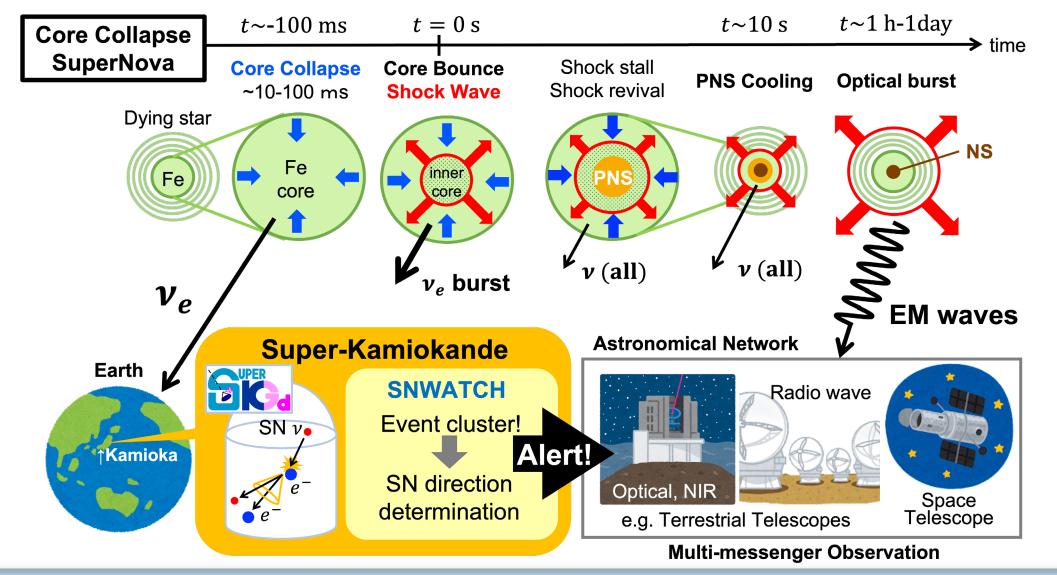
爆発のシミュレーション→ニュートリノによるエネルギー輸送



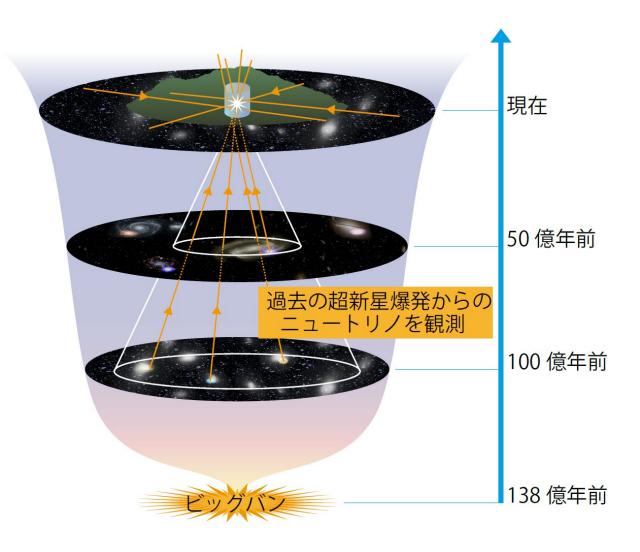
- モデルを作るには1987Aのデータはものすごく重要。ニュートリノによる衝撃波の再加熱をいれることで、最近ようやく爆発"できるように"なった。
- とにかくデータが必要 エネルギーや時間の情報が要る。

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



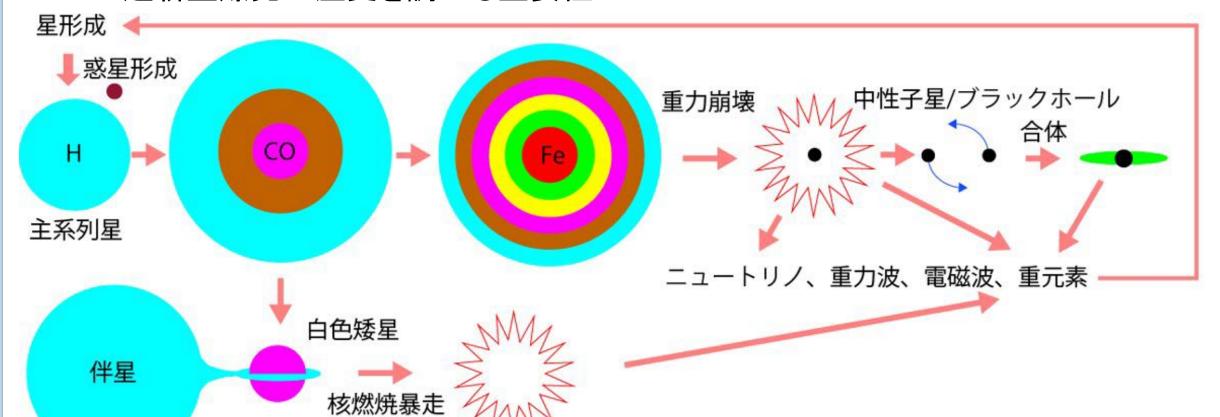
待つだけでなく、超新星背景ニュートリノを捕まえにいく



- 宇宙には10²²⁻²³個の恒星(~10¹¹個の銀河~10¹¹⁻¹²恒星/銀河)
- 現時点では宇宙の開闢からの10¹⁷ 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

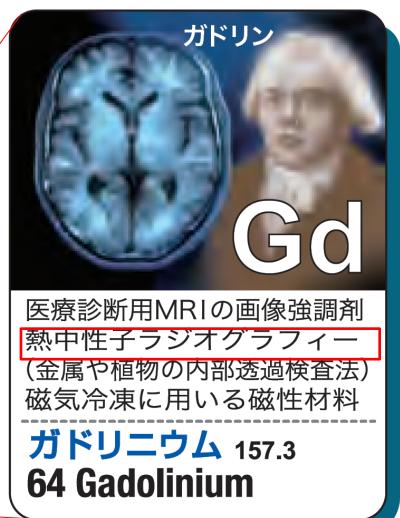


重力だけでなくニュートリノも宇宙を支配している!

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計画

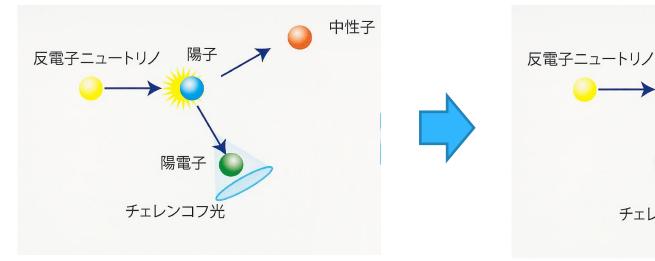
硫酸ガドリニウム8水和物

- $\bullet \overline{v}_{e}$ 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!



中性子

水チェレンコフ検出器の性能を飛躍的に高める



- 反電子ニュートリノ 陽子 ガドリニウム 全8MeV ガンマ線 チェレンコフ光
- ◈ ガドリニウムを入れることで反電子ニュートリノは2つ目のチェレンコフ光を出す
- ◈ 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

高純度の硫酸ガドリニウムを開発 Gd0.03%= 40トン

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















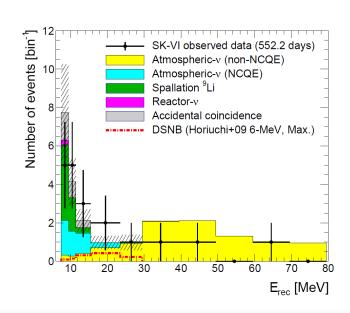
超新星背景ニュートリノ観測の現状

6月8日 ApJ LにAccepted

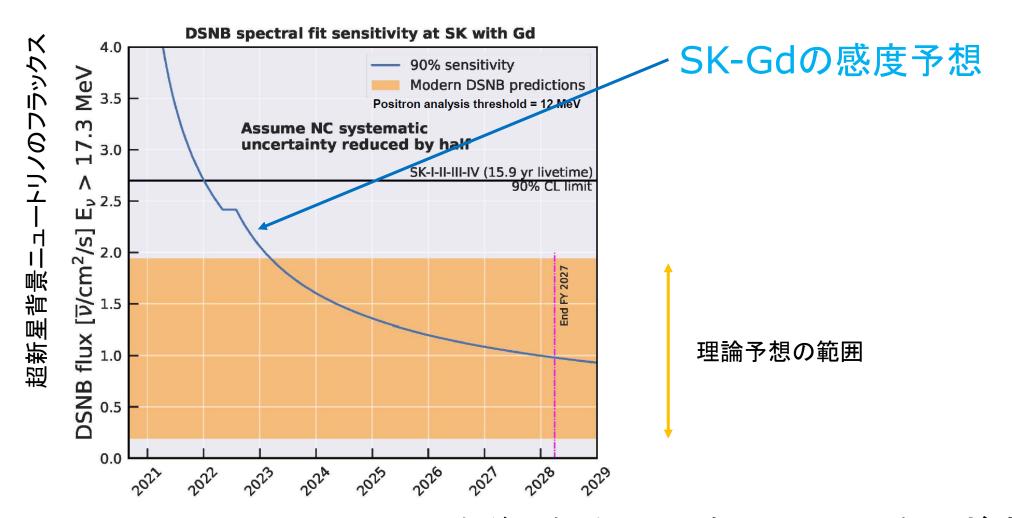
トリノのフラックス Flux Upper Limit [cm⁻² sec⁻¹ MeV⁻¹] SK-VI Observed (This work) SK-VI Expected (This work) SK-IV Observed SK-IV Expected KamLAND Observed Modern DSNB Predictions 超新星背景 0 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 \overline{v}_e Energy [MeV]

←これまでの観測結果 SK-VI 1.5年 (Gd 0.01%) SK-IV 10年(純水) これより上では見つかりませんでした

三 理論予想



超新星背景ニュートリノ観測の現状



今後5年くらい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 まさに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

