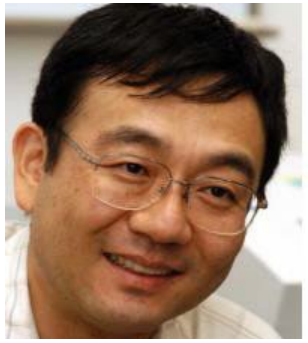
Super-Kamiokande (LowE) グループ

宇宙線研究所　宇宙ニュートリノ研究部門
関谷洋之

宇宙ニュートリノ部門の受入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(修士のみ)
  - 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

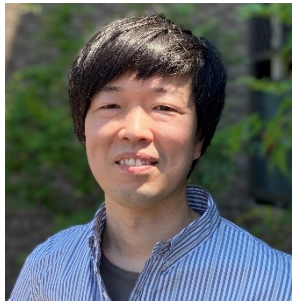

中畑

塩澤

森山

早戸

関谷


中山

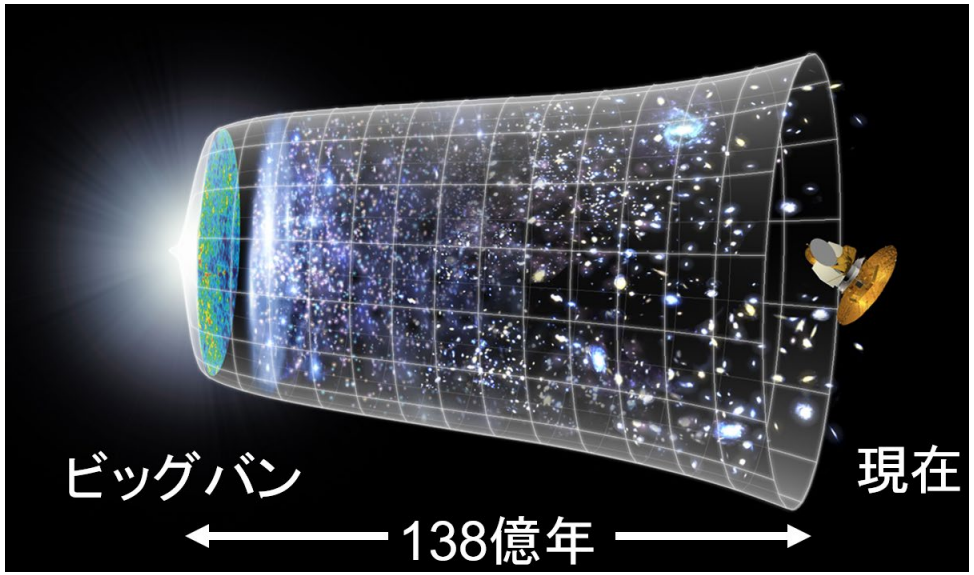
梶田

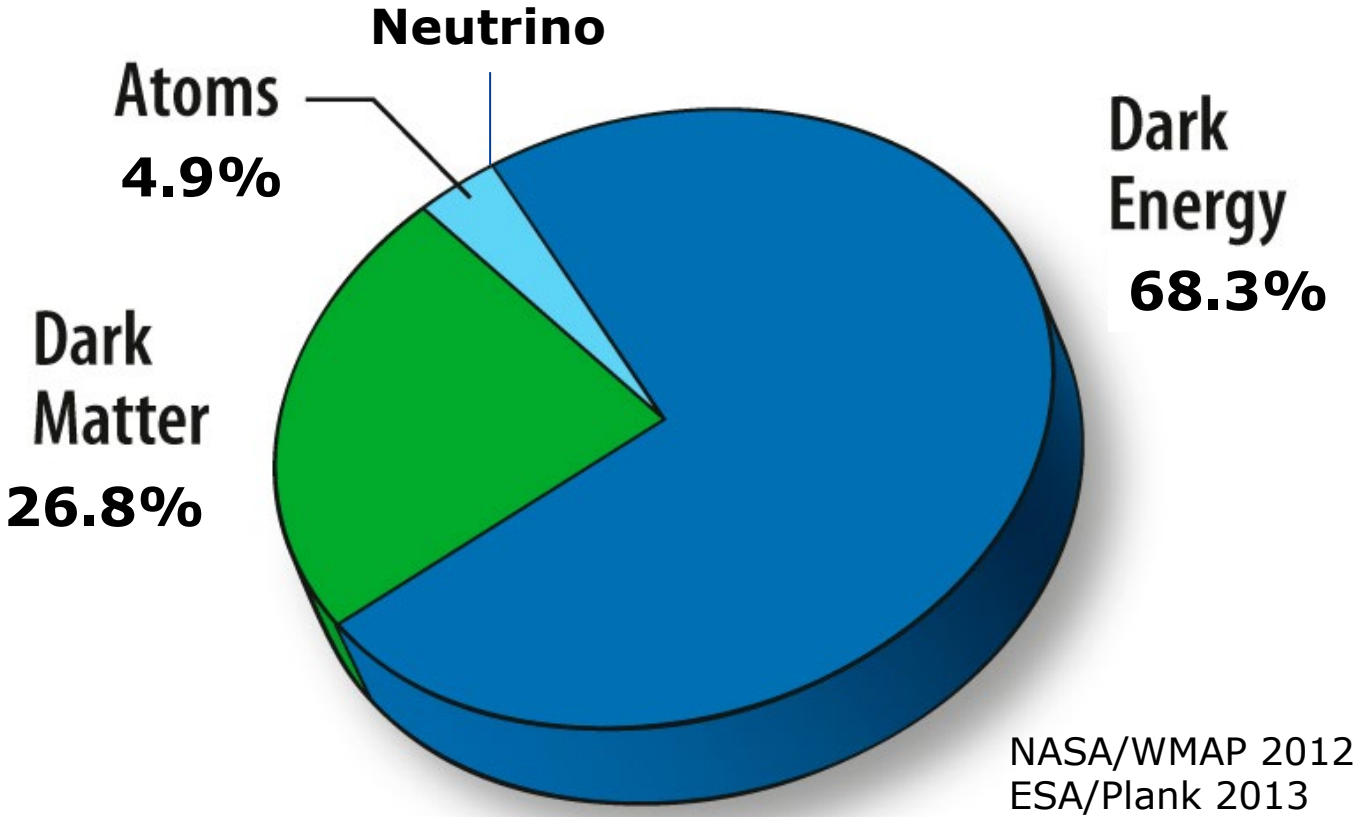
奥村

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



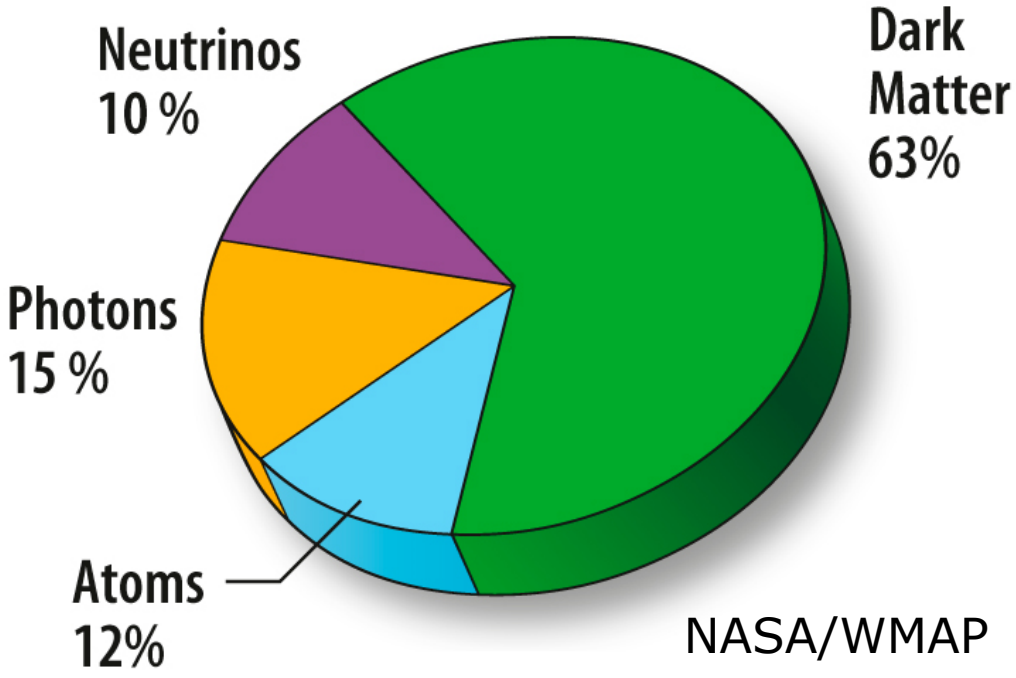


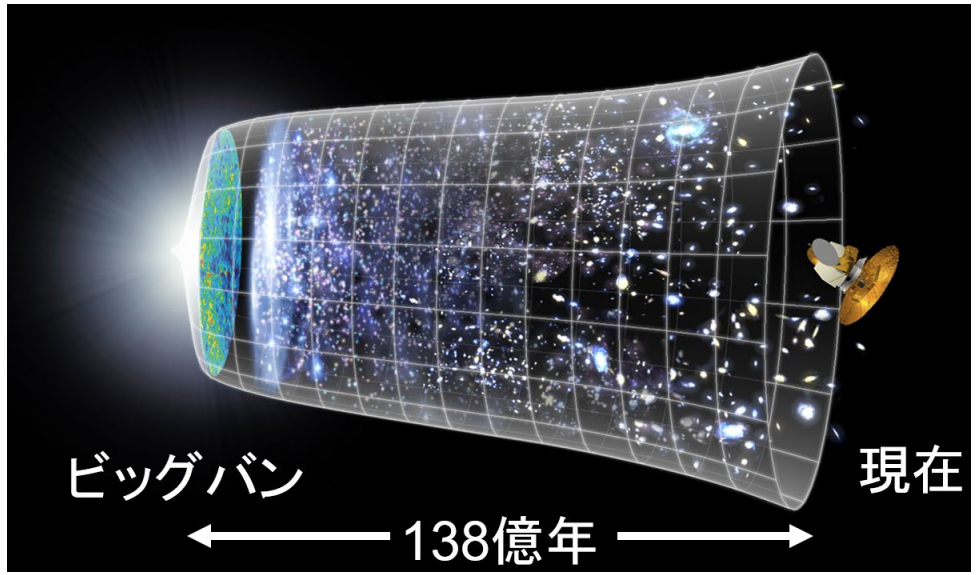
NASA/WMAP 2012
ESA/Plank 2013

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

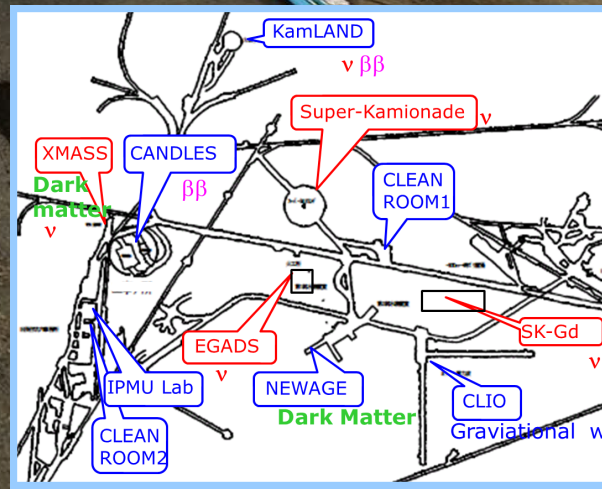
大学院生の状況

神岡宇宙素粒子研究施設

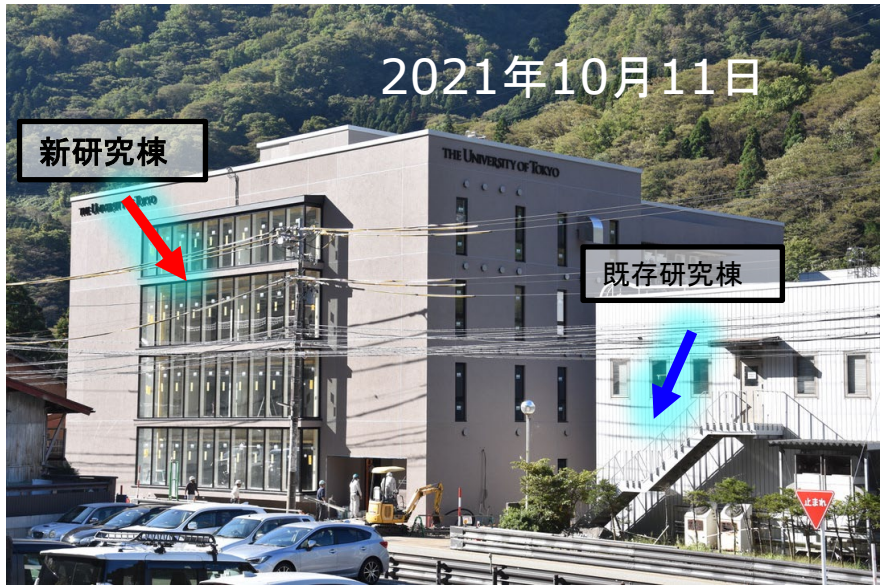
- 現在13名の大学院生
  - 神岡　修士　6人　　博士　2人
  - 柏　修士　3人　　博士　2人
- 共同利用の国内外大学の大学院生も多数

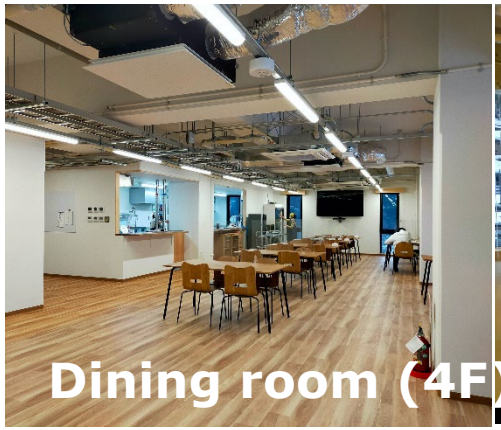
- 修士は柏が本拠地で神岡に「通う」
- コロナ対策をしつつ対面での研究活動
- 修士で就活する人は半数位
- 博士に進学すると
  - `塩澤、森山、早戸、関谷、中山研
    - 神岡に常駐して研究を進める
  - 奥村研
    - 柏を本拠に研究を進める

VR
http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/panorama/SKXMASS/



神岡宇宙素粒子研究施設の地上設備





大学院生室(個人のブース)は柏と神岡の両方にあります。

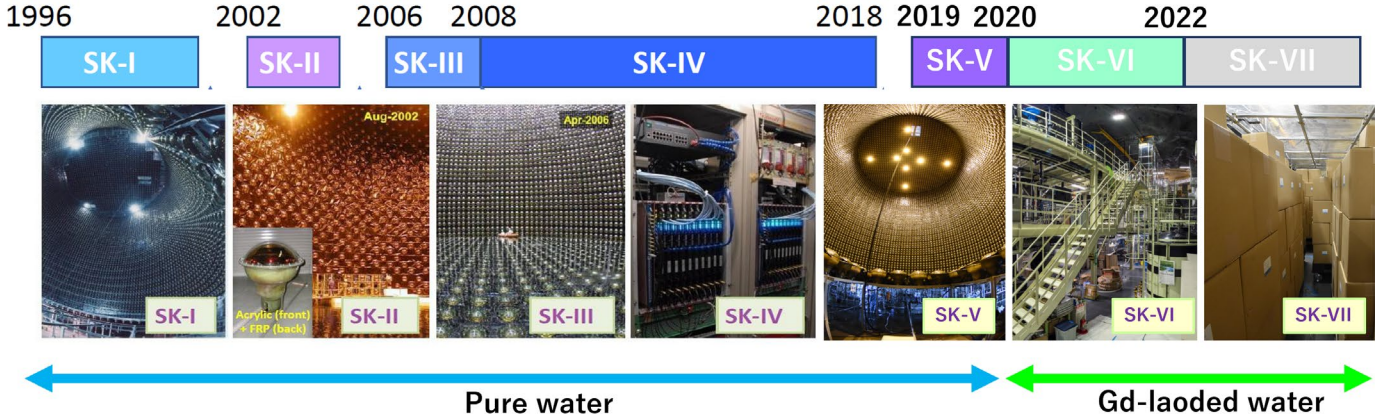
【令和4(2022)年6月　献立表】

※都合により予定無く変更する場合があります。

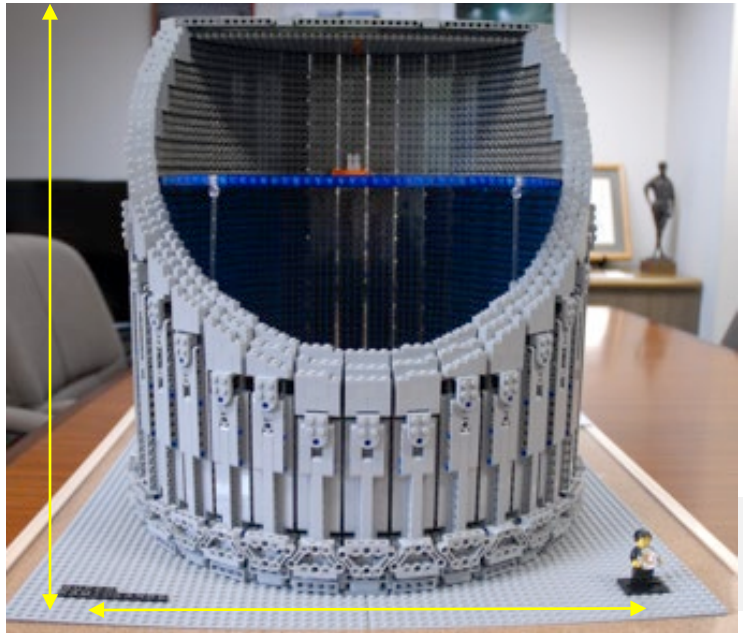
日	曜日	朝食	昼　食	夕　食
1	水	○	マーボーナス 切干大根の煮物 春雨サラダ	ローストンカツ マカロニサラダ 青菜ときのこの卵とじ
2	木	○	イカ香味揚げ・肉詰めいなり 厚揚げのうま辛煮 コーンとツナのサラダ	豚肉と野菜の味噌炒め じゃがいもとさつま揚げの煮物 わかめときゅうりの酢の物
3	金	○	鶏肉のクリーム煮 青菜とわかめの和え物 三色きんぴら	カニ足天ぷら・レンコンの磯辺揚げ こも豆腐の含め煮 小松菜とちくわの卵炒め
4	土	○	ます寿司 ポテトサラダ 厚揚げときのこの七味煮	だし巻き卵 鶏肉の南蛮酢 カニ風味の酢の物
5	日	○		
6	月		牛肉コロッケ 豚肉とじゃがいものカレー煮 スパゲッティサラダ	ししゃもフライ もやしとハムの中華風 大根と揚げのけんちん煮
7	火	○	カレーライス 煮奴 野菜サラダ	ハムカツ おでん 青菜のゴマ和え

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。

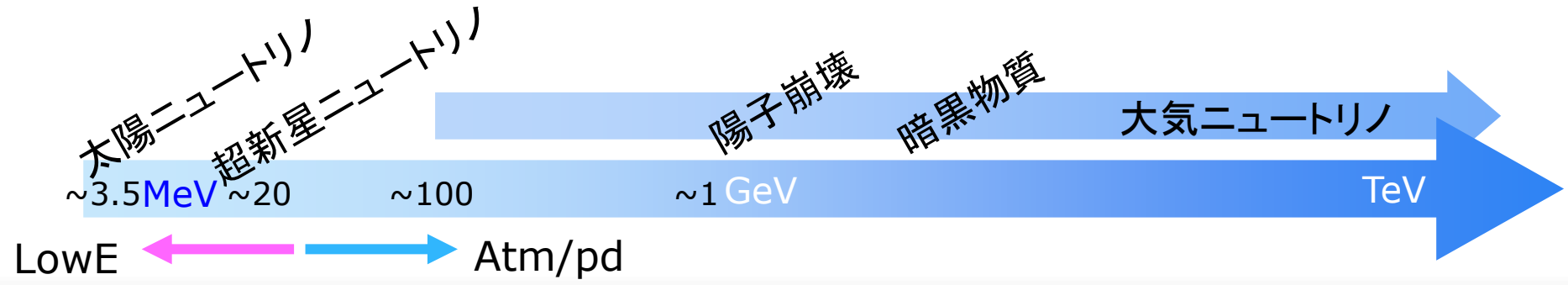


東大レゴ部の作品



2022年6月1日からSK-VIIを開始
現在アップグレード中！

スーパーカミオカンデの研究対象



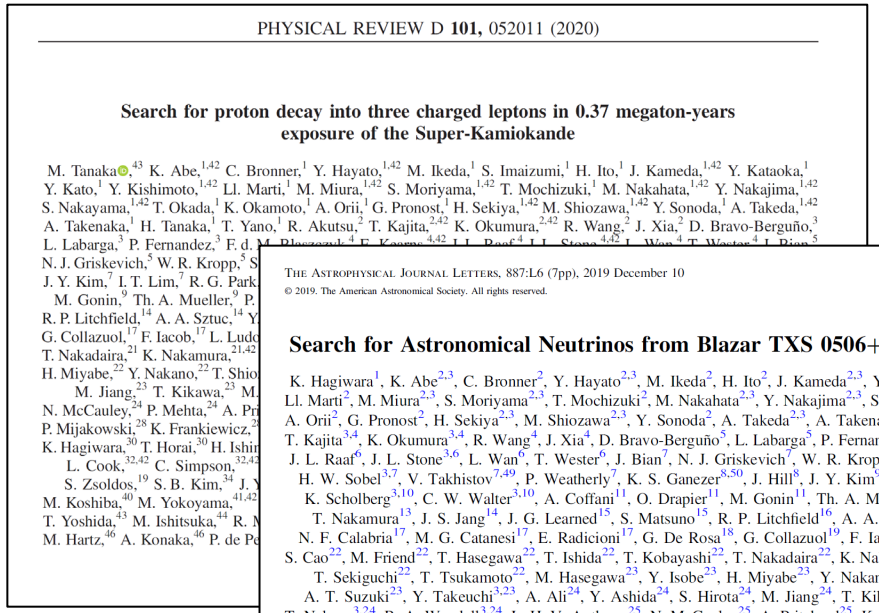
The Super-Kamiokande Collaboration

～180名の研究者
日本人：～80人、外国人：～100人
45研究機関 10ヶ国
現在は、24時間世界からデータ収集を監視する
神岡グループは現場！

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
21:00-24:00

SKの論文について

- 実験開始から25年経過してなお、年間約5編の一線級論文がpublishされている!
- 解析を主導した学生が博士論文と合わせて書くことが多い。ちゃんと1stになれる！

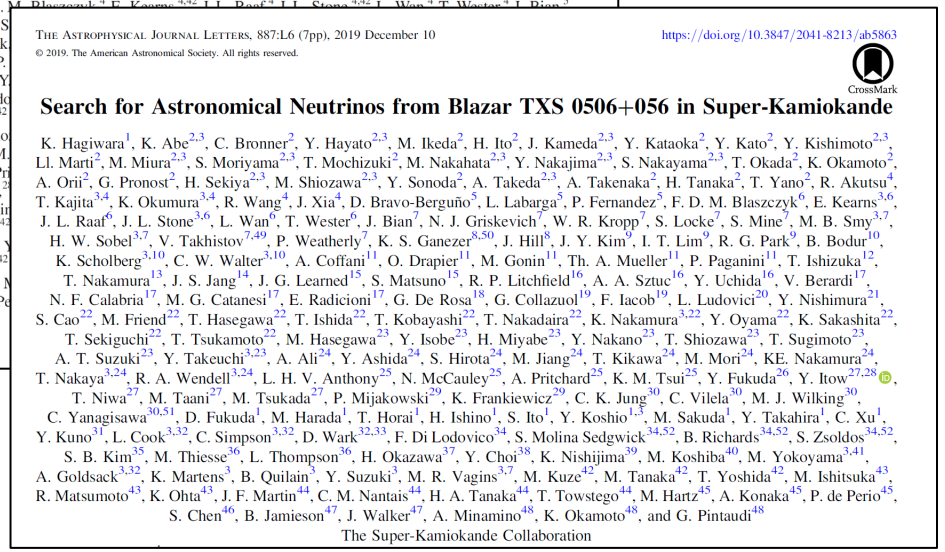


PHYSICAL REVIEW D **101,** 052011 (2020)

Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande

M. Tanaka,[43] K. Abe,[1,42] C. Bronner,[1] Y. Hayato,[1,42] M. Ikeda,[1] S. Imaizumi,[1] H. Ito,[1] J. Kameda,[1,42] Y. Kataoka,[1] Y. Kato,[1] Y. Kishimoto,[1,42] Ll. Marti,[1] M. Miura,[1,42] S. Moriyama,[1,42] T. Mochizuki,[1] M. Nakahata,[1,42] Y. Nakajima,[1,42] S. Nakayama,[1,42] T. Okada,[1] K. Okamoto,[1] A. Orii,[1] G. Pronost,[1] H. Sekiya,[1,42] M. Shiozawa,[1,42] Y. Sonoda,[1] A. Takeda,[1,42] A. Takenaka,[1] H. Tanaka,[1] T. Yano,[1] R. Akutsu,[2] T. Kajita,[2,42] K. Okumura,[2,42] R. Wang,[2] J. Xia,[2] D. Bravo-Berguño,[3] L. Labarga,[3] P. Fernandez,[3] F. d. M. Blaszczyk,[4,42] E. Kearns,[4,42] J. L. Raaf,[4] J. L. Stone,[4,42] L. Wan,[4] T. Wester,[4] J. Bian,[5] N. J. Griskevich,[5] W. R. Kropp,[5] S. Locke,[5] S. Mine,[5] M. B. Smy,[5,42] H. W. Sobel,[5,42] V. Takhistov,[6,*] J. Y. Kim,[7] I. T. Lim,[7] R. G. Park,[7] M. Gonin,[9] Th. A. Mueller,[9] P. Paganini,[9] T. Ishizuka,[10] T. Nakamura,[11] J. S. Jang,[12] J. G. Learned,[12] S. Matsuno,[12] R. P. Litchfield,[13] A. A. Sztuc,[13] Y. Uchida,[13] V. Berardi,[14] N. F. Calabria,[14] M. G. Catanesi,[14] E. Radicioni,[14] G. De Rosa,[15] G. Collazuol,[16] F. Iacob,[16] L. Ludovici,[17] Y. Nishimura,[18] S. Cao,[19] M. Friend,[20] T. Hasegawa,[20] T. Ishida,[20] T. Kobayashi,[20] T. Nakadaira,[20] K. Nakamura,[20,21] Y. Oyama,[20] K. Sakashita,[20] T. Sekiguchi,[20] T. Tsukamoto,[20] M. Hasegawa,[21] Y. Isobe,[21] H. Miyabe,[21] Y. Nakano,[21] T. Shiozawa,[21] T. Sugimoto,[21] A. T. Suzuki,[21] Y. Takeuchi,[21,22] A. Ali,[22] Y. Ashida,[22] S. Hirota,[22] M. Jiang,[22] T. Kikawa,[22] M. Mori,[22] K. E. Nakamura,[22] T. Nakaya,[20,22] R. A. Wendell,[20,22] L. H. V. Anthony,[23] N. McCauley,[23] A. Pritchard,[23] K. M. Tsui,[23] Y. Fukuda,[24] Y. Itow,[25,26] T. Niwa,[25] M. Taani,[25] M. Tsukada,[25] P. Mijakowski,[27] K. Frankiewicz,[27] C. K. Jung,[28] C. Vilela,[28] M. J. Wilking,[28] C. Yanagisawa,[28,51] D. Fukuda,[1] M. Harada,[1] T. Horai,[1] H. Ishino,[1] S. Ito,[1] Y. Koshio,[1,3] M. Sakuda,[1] Y. Takahira,[1] C. Xu,[1] Y. Kuno,[31] L. Cook,[3,32] C. Simpson,[3,32] D. Wark,[32,33] F. Di Lodovico,[34] S. Molina Sedgwick,[34,52] B. Richards,[34,52] S. Zsoldos,[34,52] S. B. Kim,[35] M. Thiesse,[36] L. Thompson,[36] H. Okazawa,[37] Y. Choi,[38] K. Nishijima,[39] M. Koshiba,[40] M. Yokoyama,[3,41] A. Goldsack,[3,32] K. Martens,[3] B. Quilain,[3] Y. Suzuki,[3] M. R. Vagins,[3,7] M. Kuze,[42] M. Tanaka,[42] T. Yoshida,[42] M. Ishitsuka,[43] R. Matsumoto,[43] K. Ohta,[43] J. F. Martin,[44] C. M. Nantais,[44] H. A. Tanaka,[44] T. Towstego,[44] M. Hartz,[45] A. Konaka,[45] P. de Perio,[45] S. Chen,[46] B. Jamieson,[47] J. Walker,[47] A. Minamino,[48] K. Okamoto,[48] and G. Pintaudi[48]

The Super-Kamiokande Collaboration



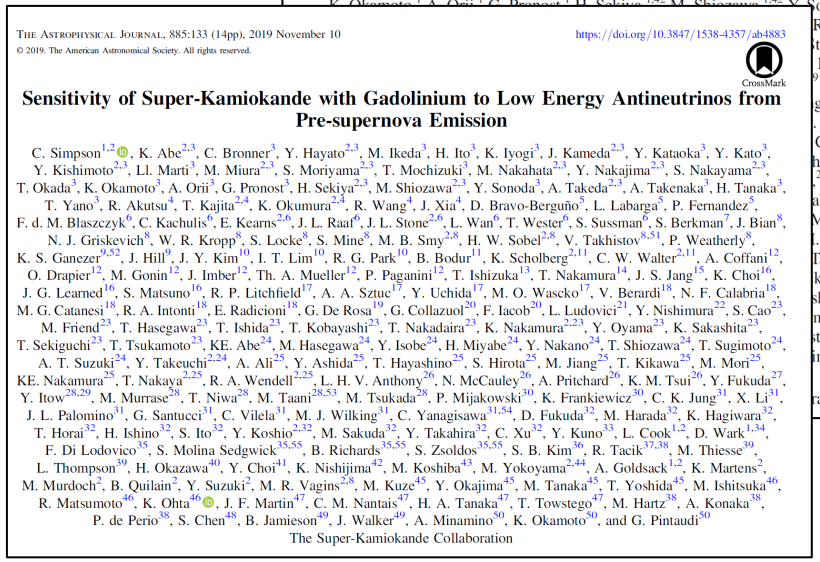
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 887:L6 (7pp), 2019 December 10 https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab5863

© 2019. The American Astronomical Society. All rights reserved.

Search for Astronomical Neutrinos from Blazar TXS 0506+056 in Super-Kamiokande

K. Hagiwara[1], K. Abe[2,3], C. Bronner[2], Y. Hayato[2,3], M. Ikeda[2], H. Ito[2], J. Kameda[2,3], Y. Kataoka[2], Y. Kato[2], Y. Kishimoto[2,3], Ll. Marti[2], M. Miura[2,3], S. Moriyama[2,3], T. Mochizuki[2], M. Nakahata[2,3], Y. Nakajima[2,3], S. Nakayama[2,3], T. Okada[2], K. Okamoto[2], A. Orii[2], G. Pronost[2], H. Sekiya[2,3], M. Shiozawa[2,3], Y. Sonoda[2], A. Takeda[2,3], A. Takenaka[2], H. Tanaka[2], T. Yano[2], R. Akutsu[4], T. Kajita[3,4], K. Okumura[3,4], R. Wang[4], J. Xia[4], D. Bravo-Berguño[5], L. Labarga[5], P. Fernandez[5], F. D. M. Blaszczyk[6], E. Kearns[3,6], J. L. Raaf[6], J. L. Stone[3,6], L. Wan[6], T. Wester[6], J. Bian[7], N. J. Griskevich[7], W. R. Kropp[7], S. Locke[7], S. Mine[7], M. B. Smy[3,7], H. W. Sobel[3,7], V. Takhistov[7,49], P. Weatherly[7], K. S. Ganezer[8,50], J. Hill[8], J. Y. Kim[9], I. T. Lim[9], R. G. Park[9], B. Bodur[10], K. Scholberg[3,10], C. W. Walter[3,10], A. Coffani[11], O. Drapier[11], M. Gonin[11], Th. A. Mueller[11], P. Paganini[11], T. Ishizuka[12], T. Nakamura[13], J. S. Jang[14], J. G. Learned[15], S. Matsuno[15], R. P. Litchfield[16], A. A. Sztuc[16], Y. Uchida[16], V. Berardi[17], N. F. Calabria[17], M. G. Catanesi[17], E. Radicioni[17], G. De Rosa[18], G. Collazuol[19], F. Iacob[19], L. Ludovici[20], Y. Nishimura[21], S. Cao[22], M. Friend[22], T. Hasegawa[22], T. Ishida[22], T. Kobayashi[22], T. Nakadaira[22], K. Nakamura[3,22], Y. Oyama[22], K. Sakashita[22], T. Sekiguchi[22], T. Tsukamoto[22], M. Hasegawa[23], Y. Isobe[23], H. Miyabe[23], Y. Nakano[23], T. Shiozawa[23], T. Sugimoto[23], A. T. Suzuki[23], Y. Takeuchi[3,23], A. Ali[24], Y. Ashida[24], S. Hirota[24], M. Jiang[24], T. Kikawa[24], M. Mori[24], KE. Nakamura[24], T. Nakaya[3,24], R. A. Wendell[3,24], L. H. V. Anthony[25], N. McCauley[25], A. Pritchard[25], K. M. Tsui[25], Y. Fukuda[26], Y. Itow[27,28], T. Niwa[27], M. Taani[27], M. Tsukada[27], P. Mijakowski[29], K. Frankiewicz[29], C. K. Jung[30], C. Vilela[30], M. J. Wilking[30], C. Yanagisawa[30,51], D. Fukuda[1], M. Harada[1], T. Horai[1], H. Ishino[1], S. Ito[1], Y. Koshio[1,3], M. Sakuda[1], Y. Takahira[1], C. Xu[1], Y. Kuno[31], L. Cook[3,32], C. Simpson[3,32], D. Wark[32,33], F. Di Lodovico[34], S. Molina Sedgwick[34,52], B. Richards[34,52], S. Zsoldos[34,52], S. B. Kim[35], M. Thiesse[36], L. Thompson[36], H. Okazawa[37], Y. Choi[38], K. Nishijima[39], M. Koshiba[40], M. Yokoyama[3,41], A. Goldsack[3,32], K. Martens[3], B. Quilain[3], Y. Suzuki[3], M. R. Vagins[3,7], M. Kuze[42], M. Tanaka[42], T. Yoshida[42], M. Ishitsuka[43], R. Matsumoto[43], K. Ohta[43], J. F. Martin[44], C. M. Nantais[44], H. A. Tanaka[44], T. Towstego[44], M. Hartz[45], A. Konaka[45], P. de Perio[45], S. Chen[46], B. Jamieson[47], J. Walker[47], A. Minamino[48], K. Okamoto[48], and G. Pintaudi[48]

The Super-Kamiokande Collaboration



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 885:133 (14pp), 2019 November 10 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4883

© 2019. The American Astronomical Society. All rights reserved.

Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission

C. Simpson[1,2], K. Abe[2,3], C. Bronner[3], Y. Hayato[2,3], M. Ikeda[3], H. Ito[3], K. Iyogi[3], J. Kameda[2,3], Y. Kataoka[3], Y. Kato[3], Y. Kishimoto[2,3], Ll. Marti[3], M. Miura[2,3], S. Moriyama[2,3], T. Mochizuki[3], M. Nakahata[2,3], Y. Nakajima[2,3], S. Nakayama[2,3], T. Okada[3], K. Okamoto[3], A. Orii[3], G. Pronost[3], H. Sekiya[2,3], M. Shiozawa[2,3], Y. Sonoda[3], A. Takeda[2,3], A. Takenaka[3], H. Tanaka[3], T. Yano[3], R. Akutsu[4], T. Kajita[2,4], K. Okumura[2,4], R. Wang[4], J. Xia[4], D. Bravo-Berguño[5], L. Labarga[5], P. Fernandez[5], F. d. M. Blaszczyk[6], C. Kachulis[6], E. Kearns[2,6], J. L. Raaf[6], J. L. Stone[2,6], L. Wan[6], T. Wester[6], S. Sussman[8], S. Berkman[7], J. Bian[8], N. J. Griskevich[8], W. R. Kropp[8], S. Locke[8], S. Mine[8], M. B. Smy[2,8], H. W. Sobel[2,8], V. Takhistov[8,51], P. Weatherly[8], K. S. Ganezer[9,52], J. Hill[9], J. Y. Kim[10], I. T. Lim[10], R. G. Park[10], B. Bodur[11], K. Scholberg[2,11], C. W. Walter[2,11], A. Coffani[12], O. Drapier[12], M. Gonin[12], J. Imber[12], Th. A. Mueller[12], P. Paganini[12], T. Ishizuka[13], T. Nakamura[14], J. S. Jang[15], K. Choi[16], J. G. Learned[16], S. Matsuno[16], R. P. Litchfield[17], A. A. Sztuc[17], Y. Uchida[17], M. O. Wascko[17], V. Berardi[18], N. F. Calabria[18], M. G. Catanesi[18], R. A. Intonti[18], E. Radicioni[18], G. De Rosa[19], G. Collazuol[20], F. Iacob[20], L. Ludovici[21], Y. Nishimura[22], S. Cao[23], M. Friend[23], T. Hasegawa[23], T. Ishida[23], T. Kobayashi[23], T. Nakadaira[23], K. Nakamura[2,23], Y. Oyama[23], K. Sakashita[23], T. Sekiguchi[23], T. Tsukamoto[23], KE. Abe[24], M. Hasegawa[24], Y. Isobe[24], H. Miyabe[24], Y. Nakano[24], T. Shiozawa[24], T. Sugimoto[24], A. T. Suzuki[24], Y. Takeuchi[2,24], A. Ali[25], Y. Ashida[25], T. Hayashino[25], S. Hirota[25], M. Jiang[25], T. Kikawa[25], M. Mori[25], KE. Nakamura[25], T. Nakaya[2,25], R. A. Wendell[2,25], L. H. V. Anthony[26], N. McCauley[26], A. Pritchard[26], K. M. Tsui[26], Y. Fukuda[27], Y. Itow[28,29], M. Murrase[28], T. Niwa[28], M. Taani[28,53], M. Tsukada[28], P. Mijakowski[30], K. Frankiewicz[30], C. K. Jung[31], X. Li[31], J. L. Palomino[31], G. Santucci[31], C. Vilela[31], M. J. Wilking[31], C. Yanagisawa[31,54], D. Fukuda[32], M. Harada[32], K. Hagiwara[32], T. Horai[32], H. Ishino[32], S. Ito[32], Y. Koshio[2,32], M. Sakuda[32], Y. Takahira[32], C. Xu[32], Y. Kuno[33], L. Cook[1,2], D. Wark[1,34], F. Di Lodovico[35], S. Molina Sedgwick[35,55], B. Richards[35,55], S. Zsoldos[35,55], S. B. Kim[36], R. Tacik[37,38], M. Thiesse[39], L. Thompson[39], H. Okazawa[40], Y. Choi[41], K. Nishijima[42], M. Koshiba[43], M. Yokoyama[2,44], A. Goldsack[1,2], K. Martens[2], M. Murdoch[2], B. Quilain[2], Y. Suzuki[2], M. R. Vagins[2,8], M. Kuze[45], Y. Okajima[45], M. Tanaka[45], T. Yoshida[45], M. Ishitsuka[46], R. Matsumoto[46], K. Ohta[46], J. F. Martin[47], C. M. Nantais[47], H. A. Tanaka[47], T. Towstego[47], M. Hartz[38], A. Konaka[38], P. de Perio[38], S. Chen[48], B. Jamieson[49], J. Walker[49], A. Minamino[50], K. Okamoto[50], and G. Pintaudi[50]

The Super-Kamiokande Collaboration

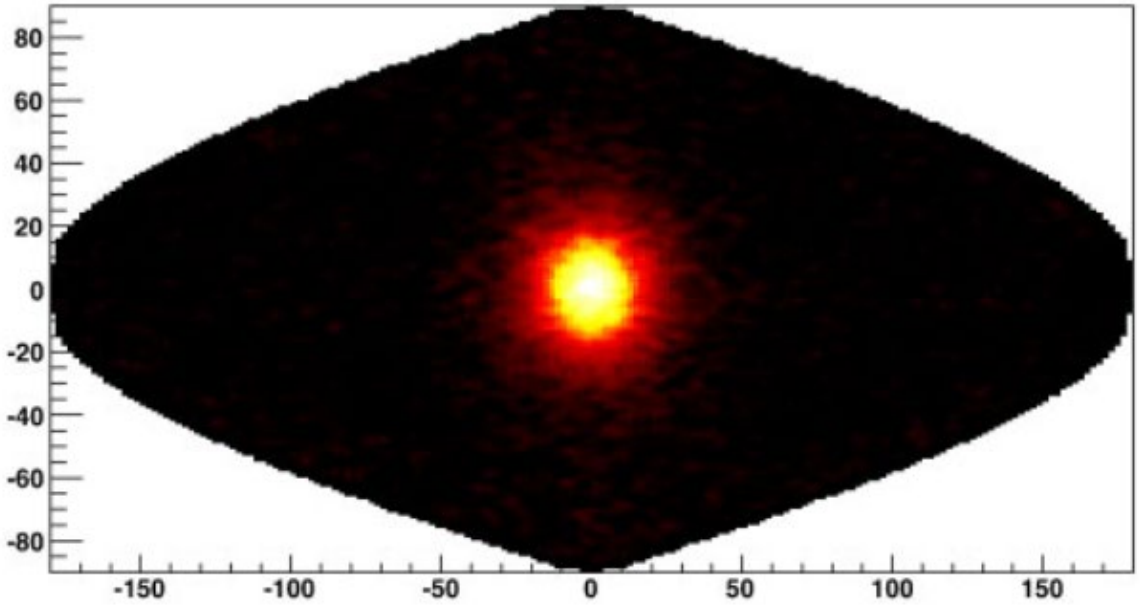
最近の学生主導の論文

数年後、ここに皆さんの名前も

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/cm^2/s
  - ニュートリノ振動研究のきっかけ

SKでとらえた^{8}Bニュートリノによる太陽内部写真



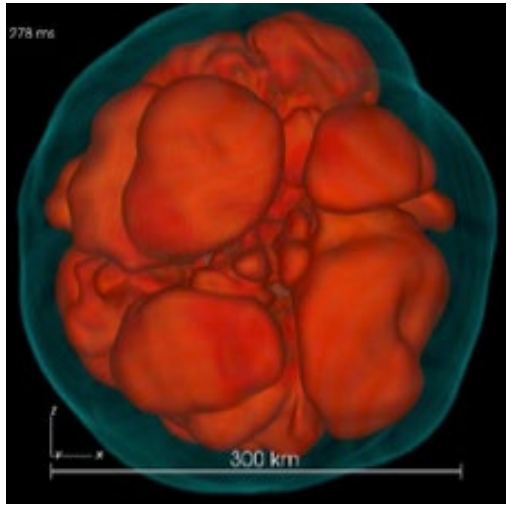
- **依然として数多くの謎(研究対象)がある**

- 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」

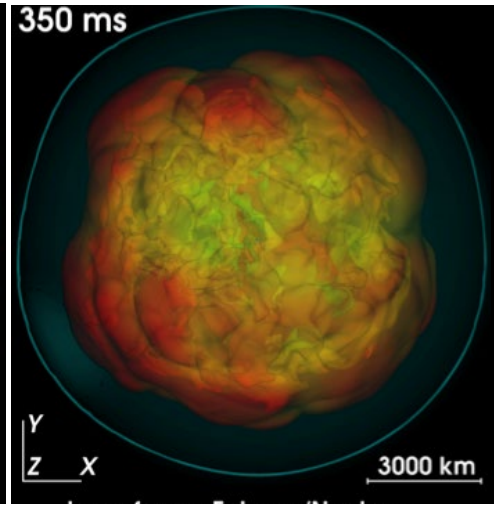
1987a

爆発はニュートリノが引き起こす

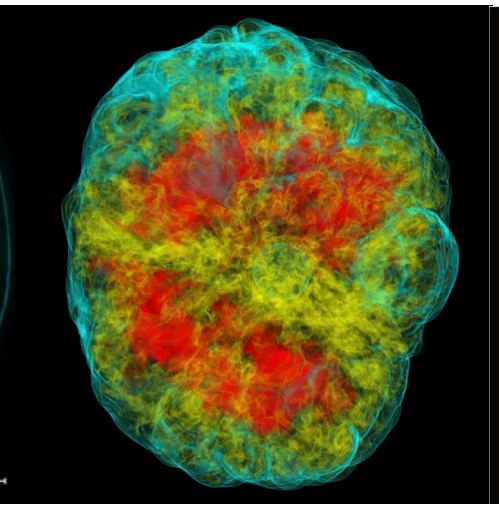
- 爆発のシミュレーション→ニュートリノによるエネルギー輸送



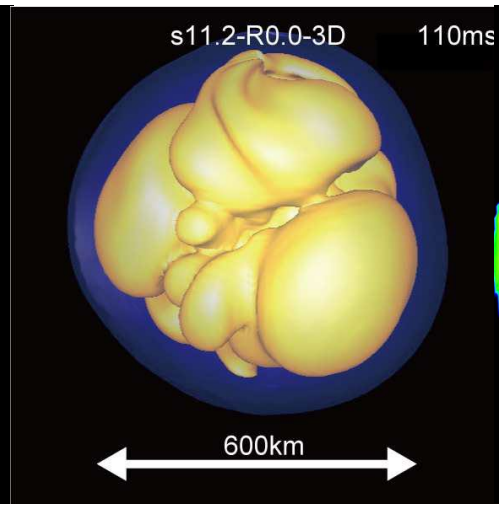
Hanke+'13



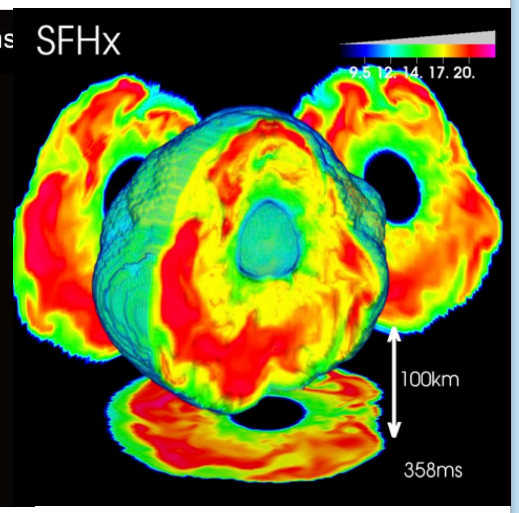
Melson+'15



Roberts+'16



Takiwaki+’16

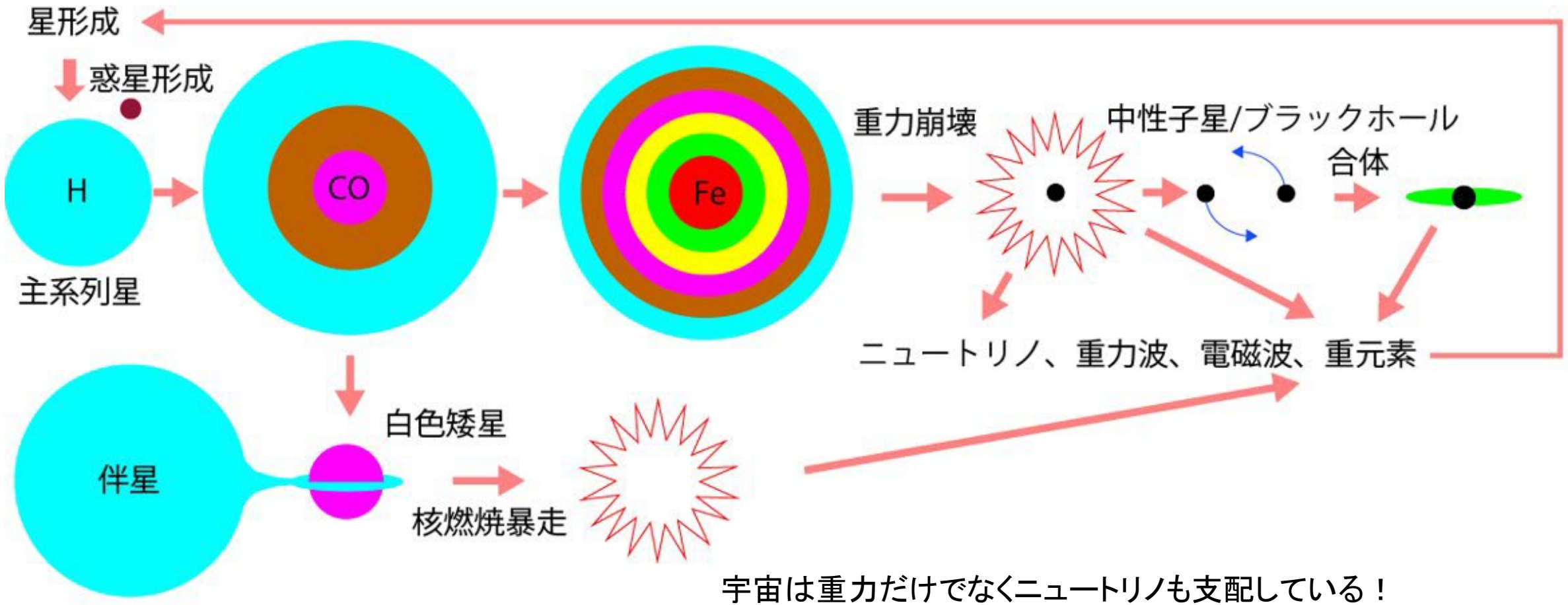


Kuroda+’16

- モデルを作るには1987Aのデータはものすごく重要。最近ようやく爆発できるようになった。ニュートリノによる衝撃波の再加熱が爆発を引き起こす！
- とにかくデータが必要 エネルギーや時間の情報が要る。

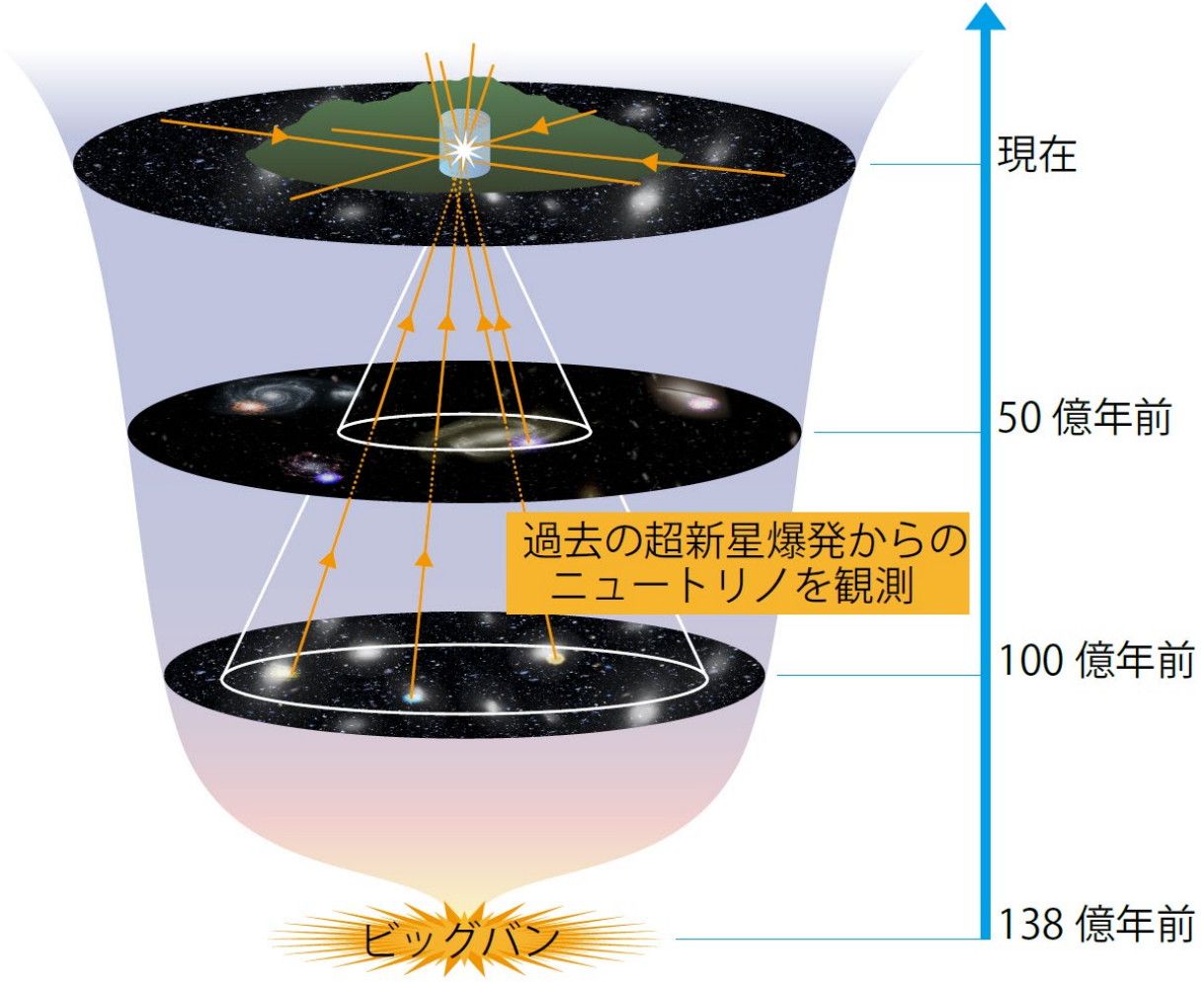
ブラックホールや中性子星連星だってもとは超新星

- 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



宇宙は重力だけでなくニュートリノも支配している！

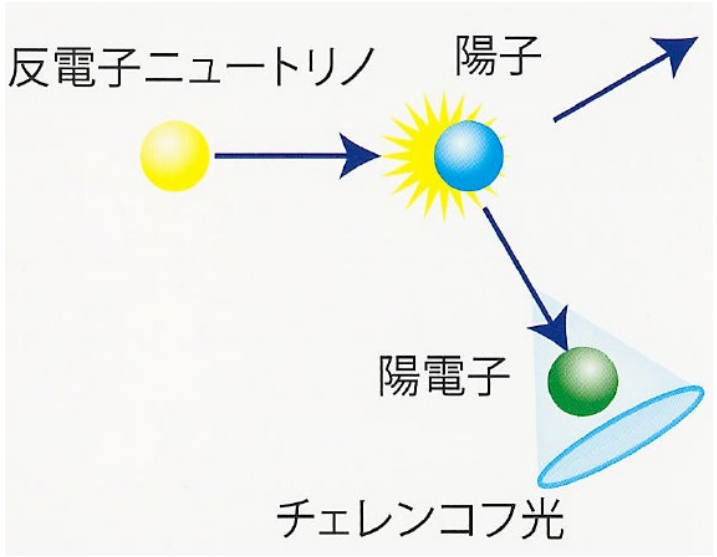
待つだけでなく、超新星背景ニュートリノを捕まえにいく



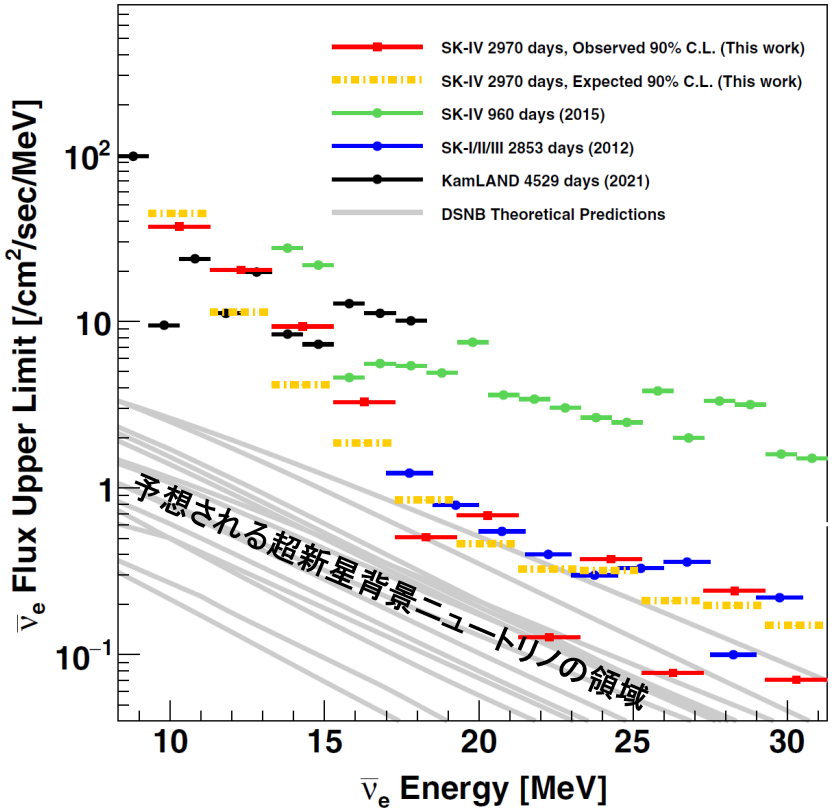
- 宇宙には$10^{22\text{-}23}$個の恒星（～10^{11}個の銀河 ~$10^{11\text{-}12}$恒星/銀河）
- 現時点では宇宙の開闢からの10^{17}個の超新星爆発からのニュートリノを受けていることになる。
- それにともなって放出されたニュートリノが宇宙に満ちている。
- 確実に「ここ」にある。
- 超新星背景ニュートリノを観測すれば宇宙の初めからの重元素合成の歴史を探ることが出来る！

純水での探索結果

- もともとSKが一番得意なのは
  反電子ニュートリノなのだけど
  電子ニュートリノと区別がつかない



- 超純水での限界
  - 世界で一番感度があるのは確かだが、大気ニュートリノやほかの反応によるバックグラウンドに埋もれている



これからの5年間で発見を目指す大切な時期

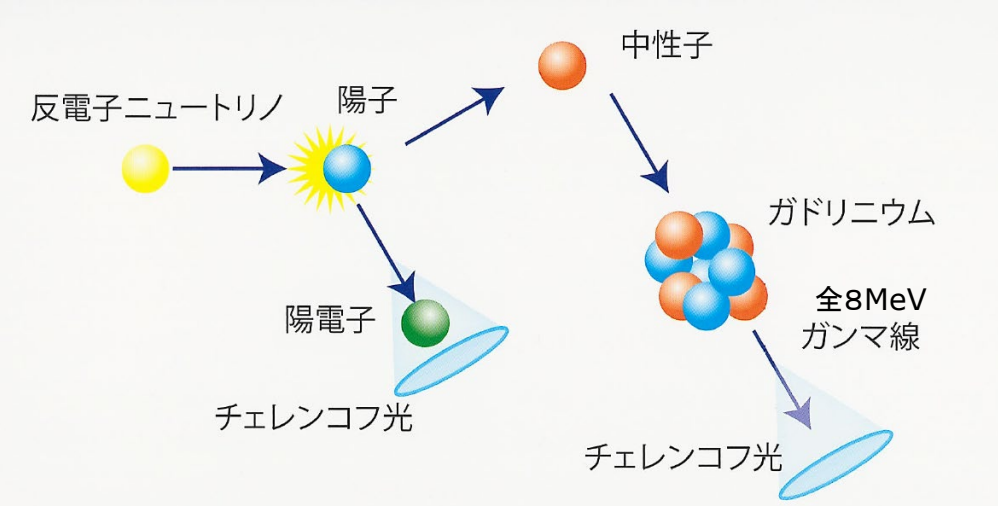
スーパーカミオカンデガドリニウムプロジェクト

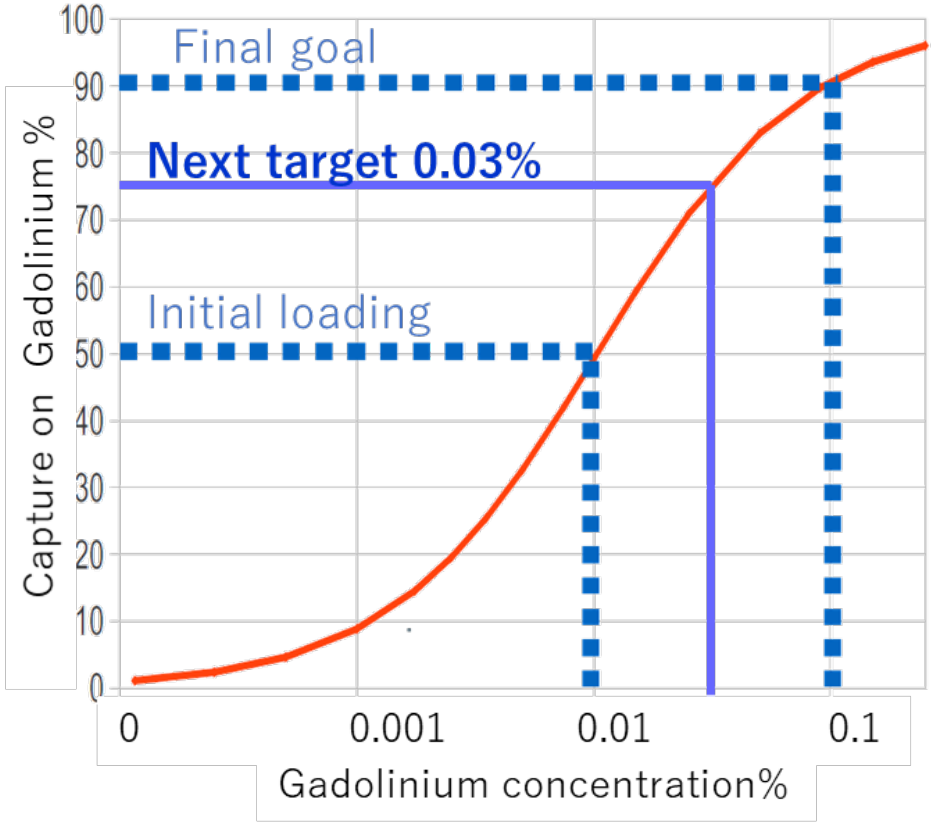
現在進行中のスーパーカミオカンデの大幅アップグレード

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

どうしたかというと

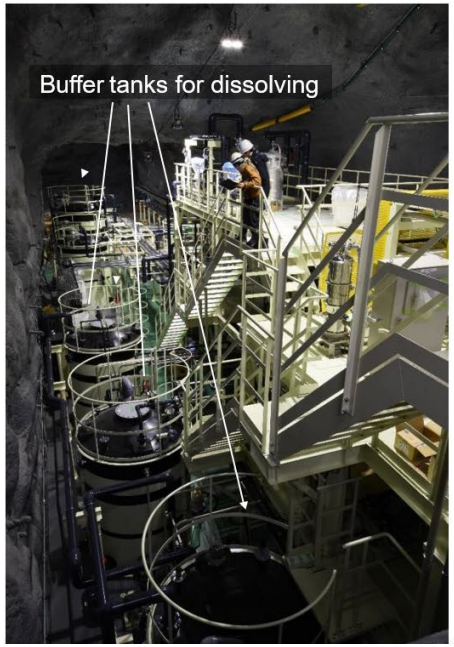
- $\overline{\nu}_e$ の判別するため、ガドリニウムを加えた。
- Gdの熱中性子に対する断面積は48.89kb
- 中性子吸収後、全8MeVのガンマ線をだす。
- 種々の研究により硫酸ガドリニウム を溶かす
- 超新星背景ニュートリノだけでなく、そのほかの物理にも！

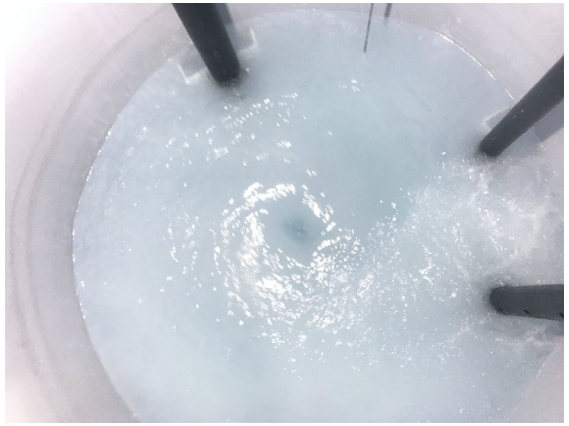




水チェレンコフ検出器の性能を飛躍的に高めることになる

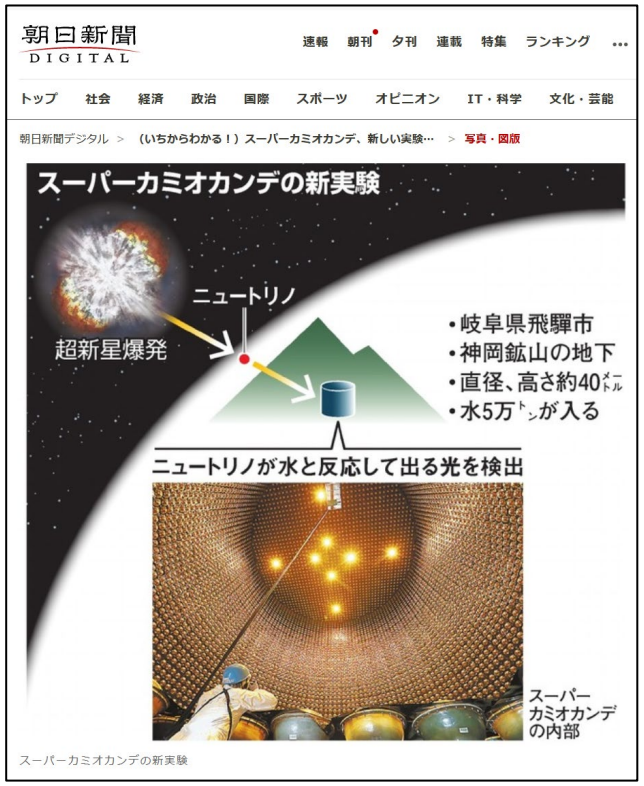
2020年7月～8月　13トンの硫酸ガドリニウム導入





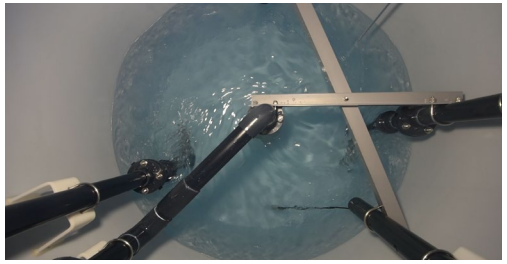
新生Super-Kamiokande！

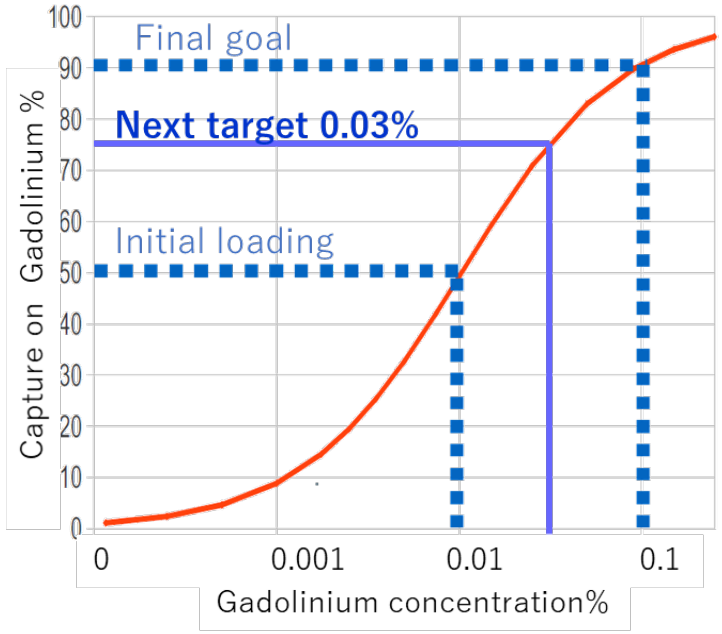
SK-Gd
2020年8月開始



現在　Gd濃度0.03%に増量中

- 6/1から26トンの硫酸ガドリニウムを追加導入中
  - これまでの1.5倍の感度で超新星背景ニュートリノを捉えることができようになる





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が進行中
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仲間を募集中

中畑教授

関谷准教授

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