

なぜ宇宙は物質でできているのか？ ーハイパーカミオカンデが挑む素粒子 物理の最前線

地盤工学会中部支部 第35調査・設計・施工技術報告会

2026年6月5日(金)

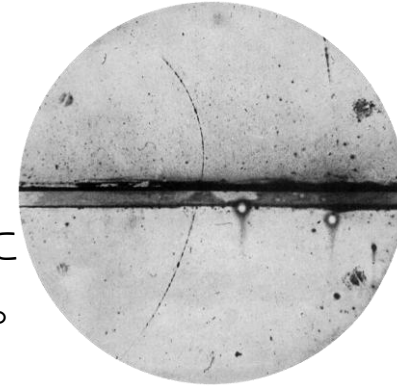
竹田 敦 (東京大学 宇宙線研究所)

for Hyper-Kamiokande Collaboration

物質(粒子)と反物質(反粒子)

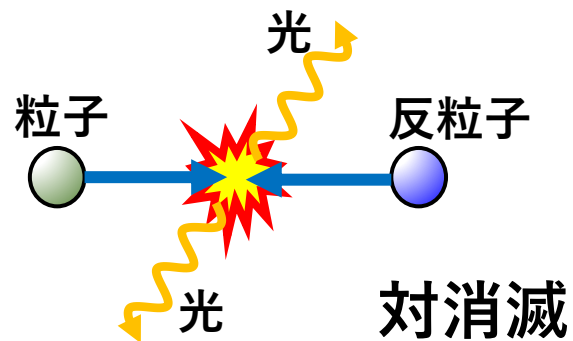
- 物質を構成する素粒子には、電荷の符号が反対の他は全く同じ性質をもつ反粒子が存在する。
 - (例) 電子(e^-)の反粒子は、プラス電荷をもつ陽電子(e^+)。

陽電子(e^+): 1932年にアンダーソンが宇宙線の中に霧箱を用いて発見。人類が初めて発見した反物質。

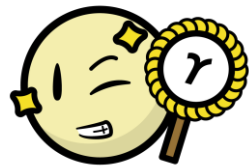


Carl D. Anderson. "The Positive Electron". Physical Review 43 (6): 491-494.
[DOI:10.1103/PhysRev.43.491](https://doi.org/10.1103/PhysRev.43.491)

- 宇宙誕生時の高密度・高エネルギー状態においては、同じ数の粒子と反粒子が対になって生成されては衝突して消滅するということが繰り返されていた。物質と反物質が対称であれば、膨張した現在の宇宙は光子ばかりの世界になってしまう。
- 物質にあふれた現在の宇宙を説明するためには、物質と反物質の対称性が破れている必要がある。



宇宙は光(光子・ガンマ線)ばかりになってしまう



©HiggsTan 2012-2026,
<http://higgstan.com/>

粒子と反粒子に
1/10億 (10^{-9}) の
差があると、現
在の物質優勢を
説明できる。



物質優勢宇宙の謎をとくために

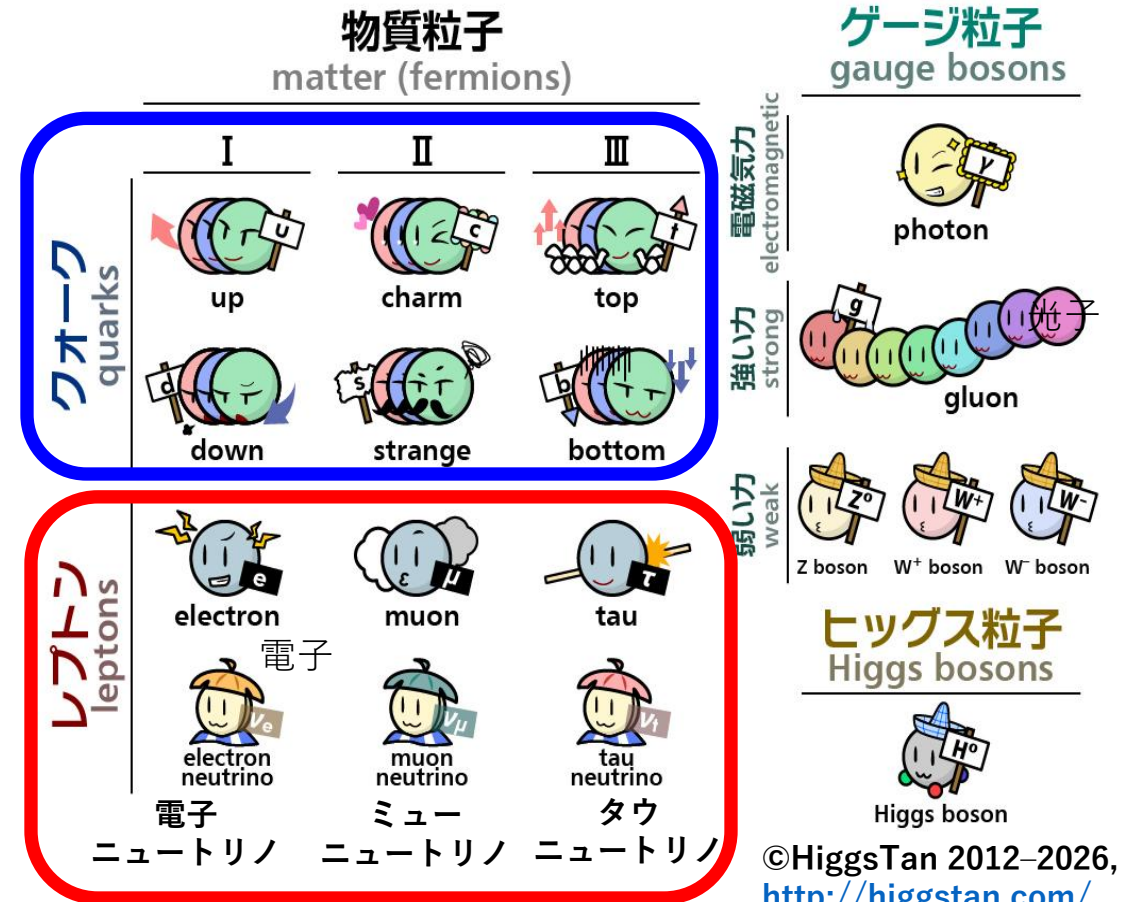
- 我々の宇宙に物質があふれている事実は、実は自明ではなく、粒子と反粒子の対称性の破れが重要になる (電荷共役 Charge conjugation (C)の破れ+パリティ(P)を合わせたCPの破れが条件の一つ)。

- 物質粒子(素粒子)は、**クォーク**と**レプトン**に大きく分類される(右図参照)が、クォークの粒子・反粒子の対称性が破れていることはすでに発見されている。

- **1964:** ジェームズ・クロニンとヴァル・フィッチがK中間子の崩壊からCPの破れを発見
- **1973:** 小林・益川による CKM機構の構築
- **2001:** Belle/BaBar 実験がCKM機構を実証

- しかし、確立されたクォークの粒子・反粒子対称性の破れは、物質優勢宇宙を説明できる大きさではないというものだった。

- しかしながら、**レプトンであるニュートリノには物質優勢宇宙を説明できる大きさの対称性の破れがある可能性があり、その発見が期待されている。**



©HiggsTan 2012-2026, <http://higgstan.com/>

↑ 素粒子の分類

コンテンツ

1. ニュートリノとは？

- 素粒子・ニュートリノについて
- ニュートリノと物質の反応

2. ハイパーカミオカンデでせまる物質優勢宇宙の解明

- カミオカンデの歴史
- ハイパーカミオカンデ計画
- 物質・反物質の違いの調べ方
- 建設状況

3. おわりに

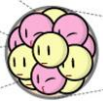
1. ニュートリノとは？

ニュートリノとは？

- ニュートリノは素粒子のなかま
- 素粒子とは、物質を構成する最小単位でもうそれ以上は分割できない(と考えられている)もの

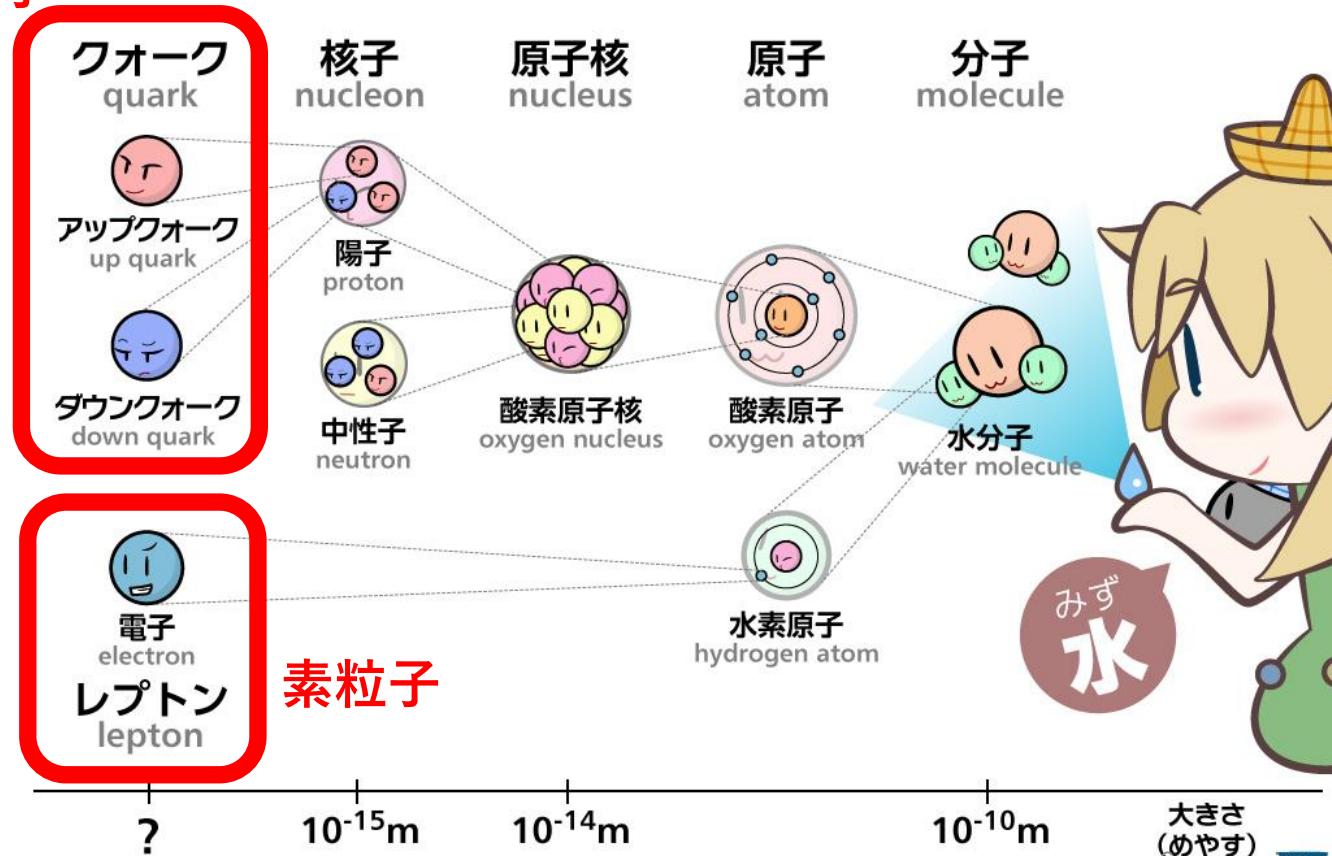
例えば水分子(H₂O)  は、**酸素原子1個と水素原子2個**からできている。

原子  は、**原子核と電子**からできていて、**電子  は素粒子**に分類される。

原子核  は、さらに**核子**と呼ばれる陽子と中性子からできていて、**核子はクォーク**からできている。

クォーク   は素粒子に分類される。

素粒子 小さい ————— 大きい



素粒子ニュートリノとは？

素粒子は「物質粒子」・「ゲージ粒子」・「ヒッグス粒子」に分類され、物質粒子の一員にニュートリノがある。

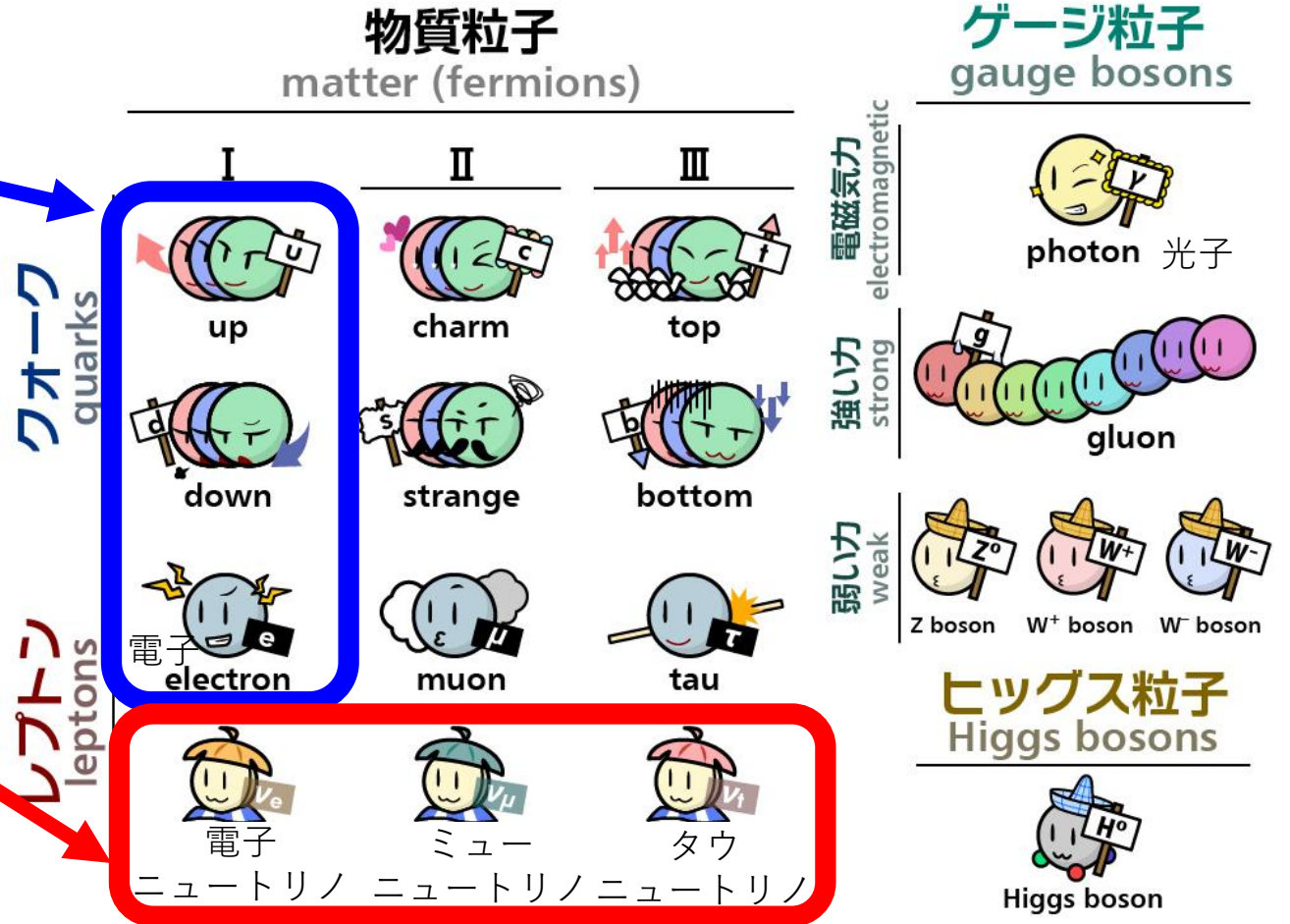
身の回りの物質を構成

水分子を形成している水素原子は、アップクォーク2つとダウンクォーク1つからなる陽子からなる原子核と、電子からできている。

ニュートリノ

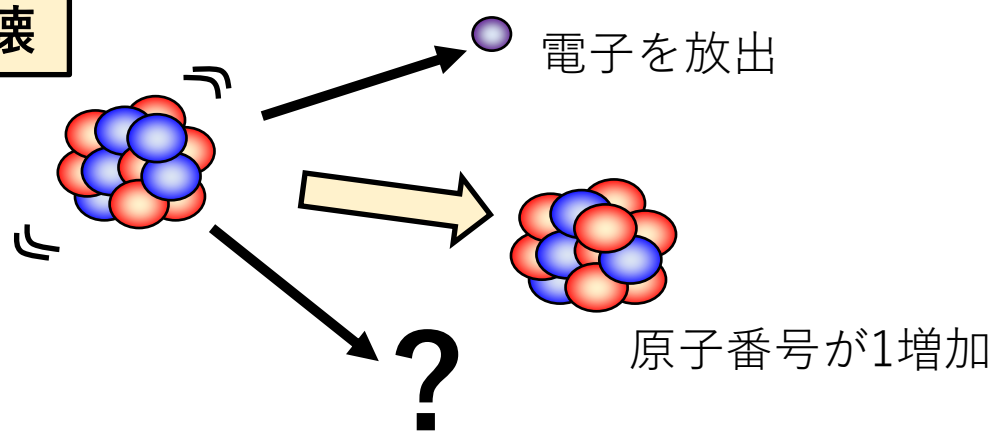
電子と同じレプトンに属し、3種類あることが知られている。

- 電子ニュートリノ (ν_e)
- ミューニュートリノ (ν_μ)
- タウニュートリノ (ν_τ)



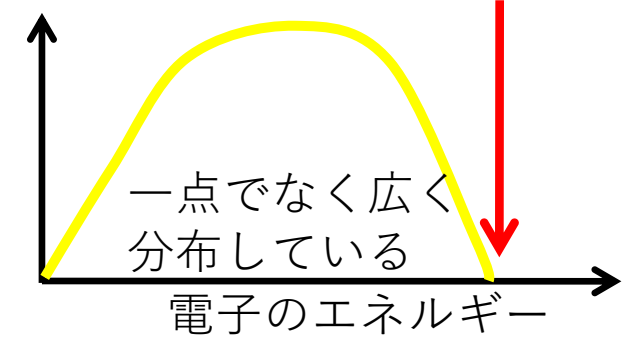
ニュートリノの発見

ベータ崩壊



ベータ崩壊における電子のエネルギー分布

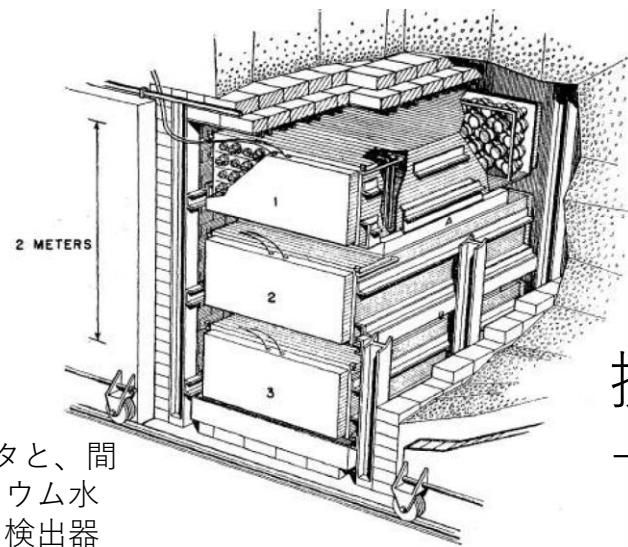
本来ならばここにピークとして立つはず。



1930年に、オーストリアの物理学者パウリが、当時知られていた原子核が電子を1個放出して原子番号が1増加する現象 (ベータ崩壊) においてエネルギーが保存されていないように見えるのは、**電気を持たない中性の粒子**がエネルギーを持ち去っているから”と考えた。



1933年、イタリアの物理学者フェルミが崩壊を説明する理論を構築し、中性の粒子に**ニュートリノ**と名付けた。



3層の液体シンチレータと、間に置かれた塩化カドミウム水と鉛のシールドによる検出器

1956年、アメリカの物理学者ライネスとコーワンが、原子炉から出てくるニュートリノを検出。

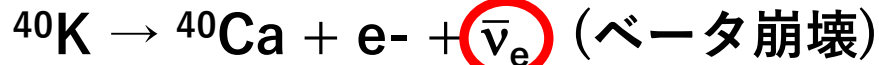
提唱から20年以上たったの検出
→ **検出が非常に難しい粒子**

人体もニュートリノを出している

- 人体には、体重の約0.2%程度のカリウムがふくまれている。
- カリウム中には、放射性同位体の ^{40}K が微量（自然存在比:0.012%）含まれており、 ^{40}K は半減期 12.8億年 (1.28×10^9 年) でベータ崩壊または電子捕獲反応を起こす。
- ベータ崩壊・電子捕獲反応が起こると、反ニュートリノやニュートリノが放出される。

^{19}K
カリウム

人体に不可欠の電解質
ニューロンの情報伝達に
重要な役割



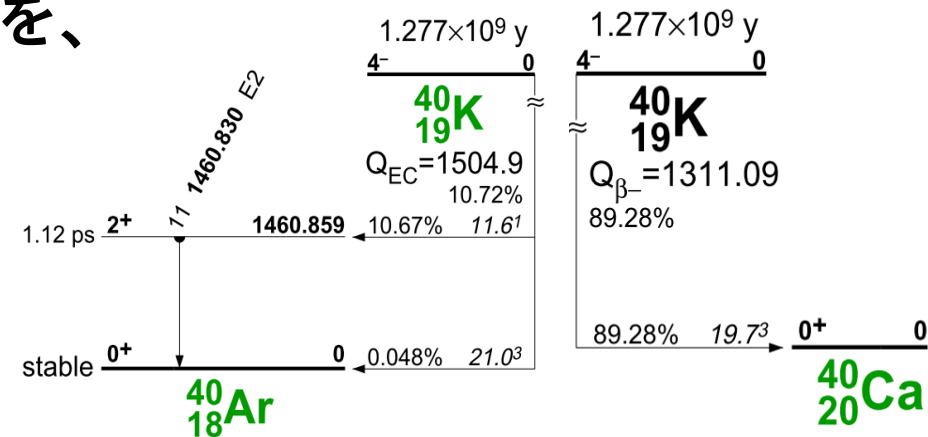
→ 体重50kg の人は、ニュートリノ・反ニュートリノを、
1秒あたり約3000個放出している。

(簡単な計算式)

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} N(t) = 0.693 \div (4.0 \times 10^{16}) \times (1.8 \times 10^{20}) = 3119 \approx 3000$$

$$N(t) : 50000(\text{g}) \times 0.002 \times 0.00012 \div 40 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.8 \times 10^{20} \text{ 個 } (^{40}\text{A})$$

$$T_{1/2} : 12.8\text{億年} = 4.0 \times 10^{16} \text{ 秒}$$

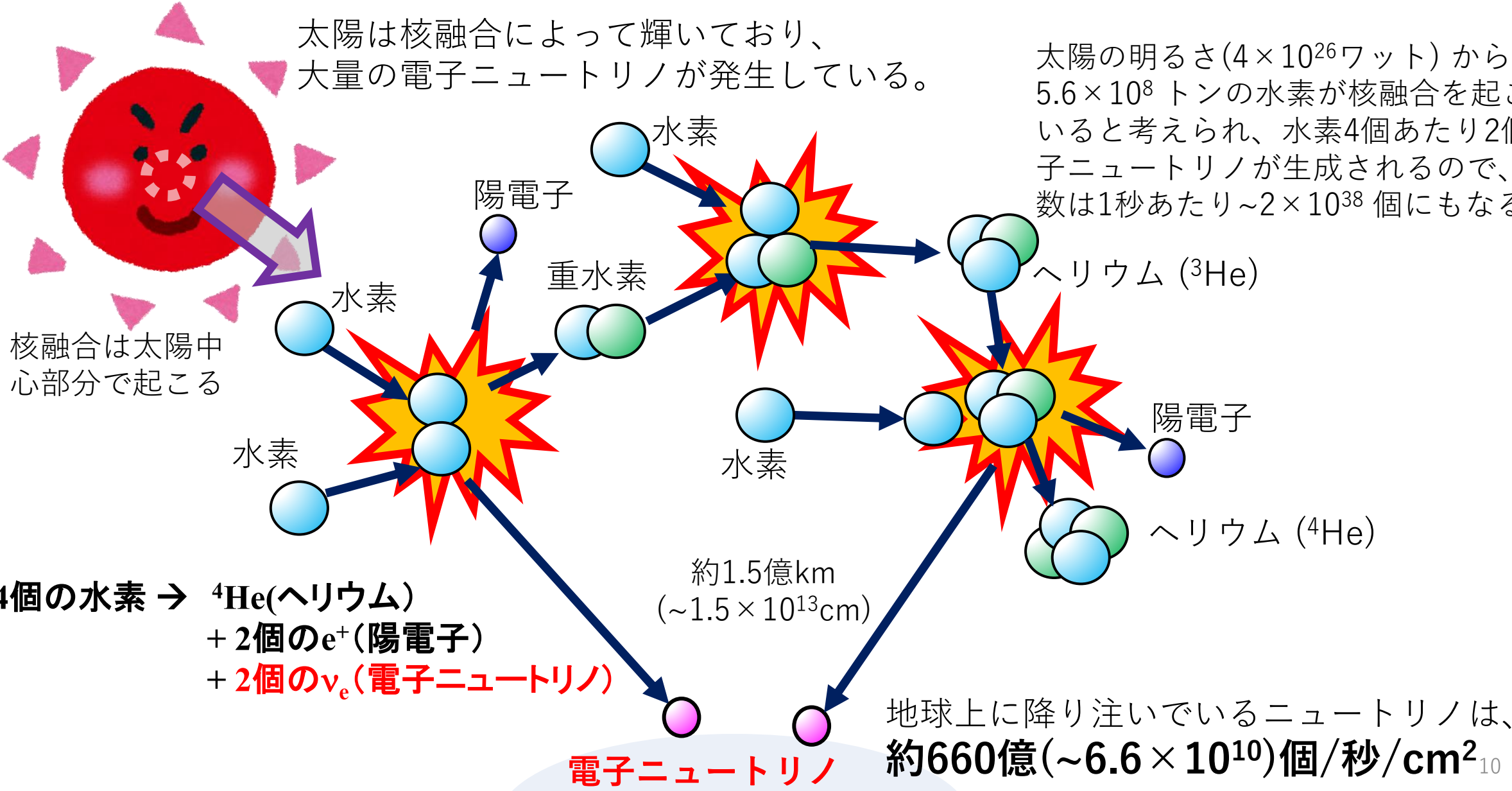


出典: Table of isotopes

太陽でもニュートリノは作られている

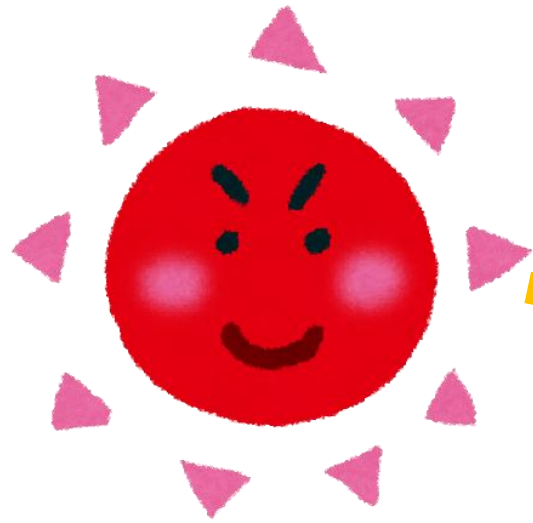
太陽は核融合によって輝いており、
大量の電子ニュートリノが発生している。

太陽の明るさ(4×10^{26} ワット) から、毎秒
 5.6×10^8 トンの水素が核融合を起こして
いると考えられ、水素4個あたり2個の電
子ニュートリノが生成されるので、その
数は1秒あたり $\sim 2 \times 10^{38}$ 個にもなる。



4個の水素 → ^4He (ヘリウム)
+ 2個の e^+ (陽電子)
+ 2個の ν_e (電子ニュートリノ)

身の回りにはあるニュートリノ



太陽からくる
ニュートリノ

約660億個/秒/cm²

一次宇宙線



大気で作られる
ニュートリノ
約1~10個/秒/cm²



人体から放出される
ニュートリノ

約3000個/秒

(体重50kg 1名)

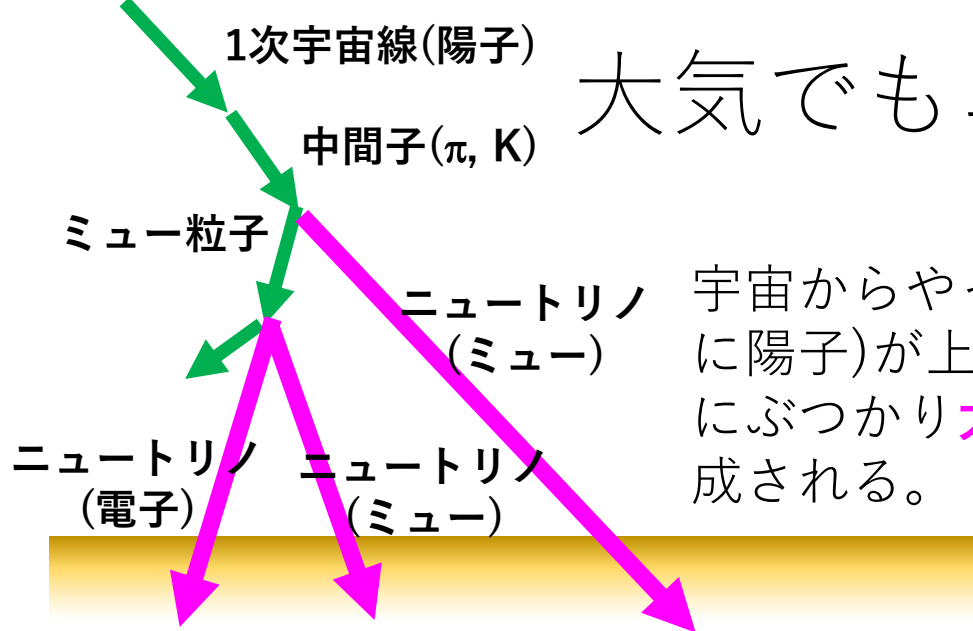
≈約 0.00001 個/秒/cm²
(地球全体の人口・面積で平均)

地球から放出される
ニュートリノ 約500万個/秒/cm²

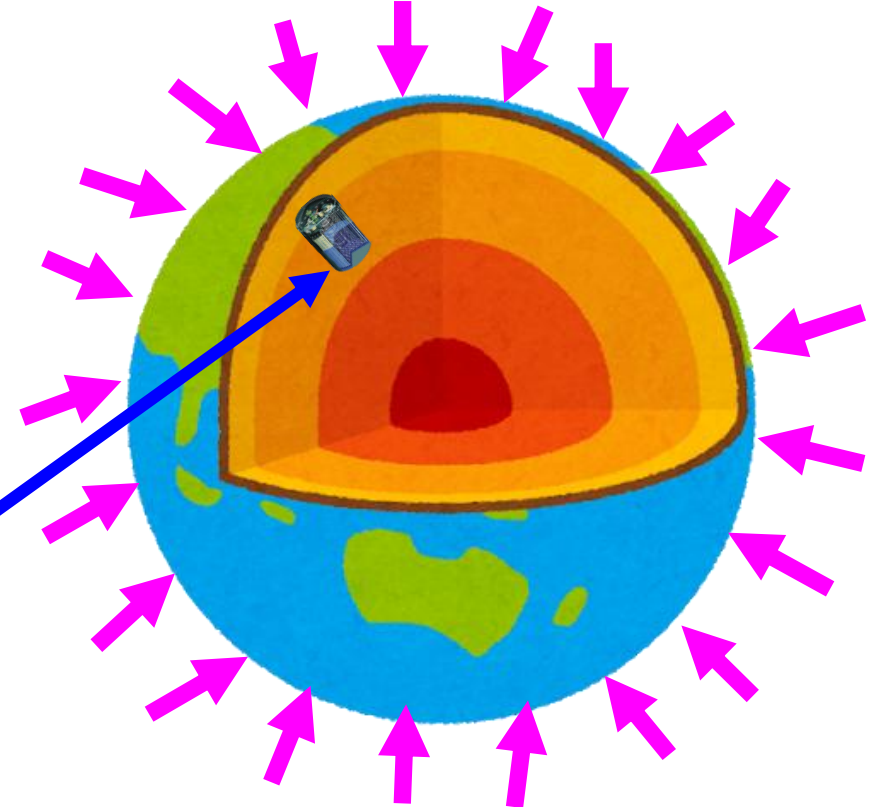
地球

- 太陽からくるニュートリノがとても多い。
- 大気中でもニュートリノが作られる。
- 地球中には⁴⁰Kの他にも、²³⁸Uや²³²Thといった崩壊系列の中でニュートリノを出す核種が存在する。

大気でもニュートリノが作られる 大気ニュートリノ



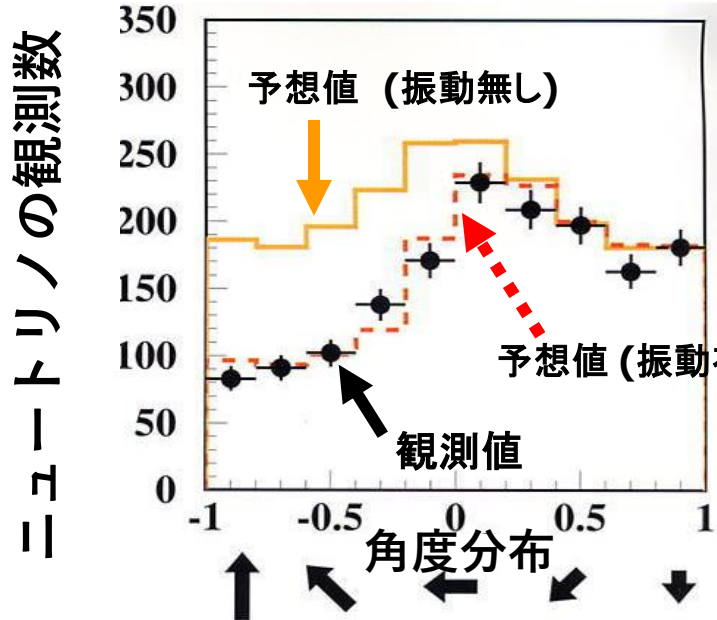
宇宙からやってくる1次宇宙線(主に陽子)が上空 10~30 km で大気にぶつかり大気ニュートリノが生成される。



スーパーカミオカンデ

- 大気ニュートリノは地球をすり抜けるので、スーパーカミオカンデから見ると、四方八方から等しい数がかかるはず。
- 実際には、真上からくる数に比べて下からくるミューニュートリノの数が少なかった。

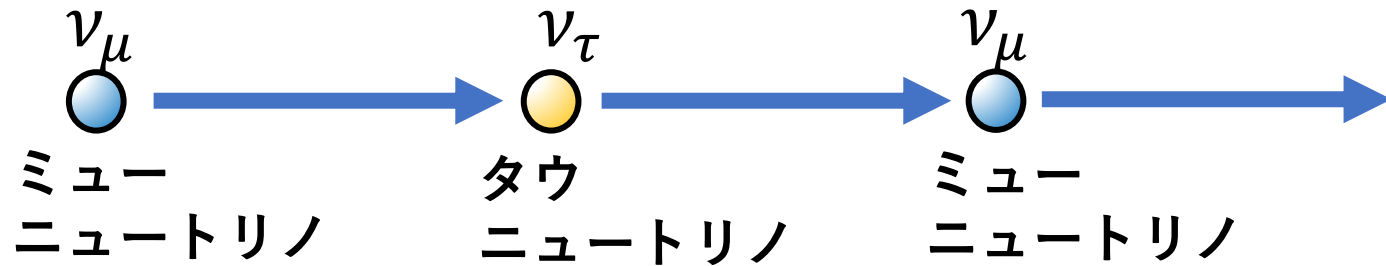
ミューニュートリノ観測数の角度分布



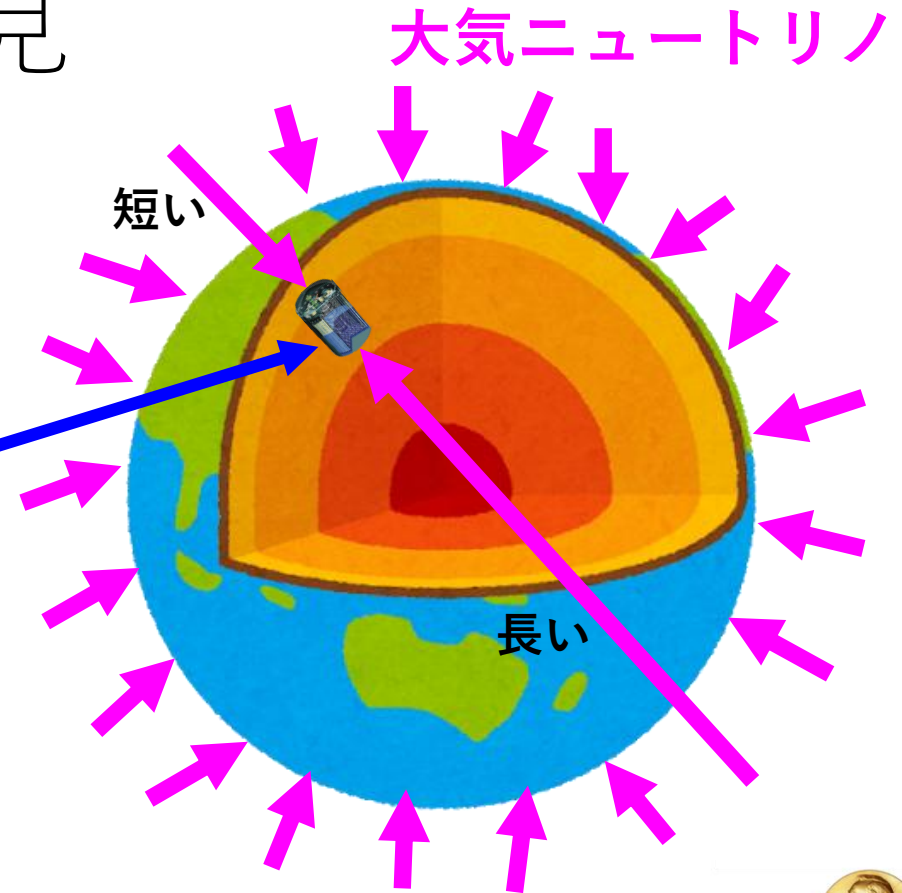
地球の裏側からくるニュートリノ (左側)
真上からくるニュートリノ (右側)

ニュートリノ振動の発見

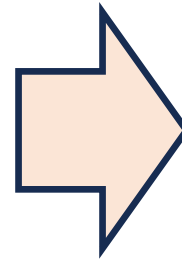
- 上からくるミュウニュートリノと、下(地球の裏側)からくるミュウニュートリノの違いは、大気で生成されてからスーパーカミオカンデに到達するまでの**飛行距離**。



スーパー
カミオカンデ



- これは、**ミュウニュートリノが、長距離を飛行中に別の種類のタウニュートリノに変化した**と考えるとつじつまが合った。
- 振動するためには、**ニュートリノにゼロでない質量が必要**なことが分かった。

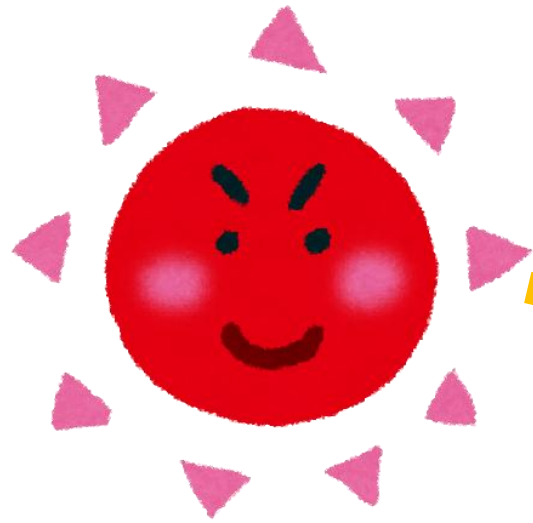


ニュートリノ振動の発見によりニュートリノが質量をもつことを示した(1998年)

2015年 梶田博士のノーベル物理学賞



ニュートリノの観測



太陽からくる
ニュートリノ

約660億個/秒/cm²

一次宇宙線



大気で作られる
ニュートリノ
約1~10 個/秒/cm²



エネルギー・
量ともに
低すぎて
観測できない



地球

人体から放出され
るニュートリノ

約3000個/秒
(体重50kg 1名)

≈約 10⁻⁵ 個/秒/cm²
(地球全体の人口・面積で平均)

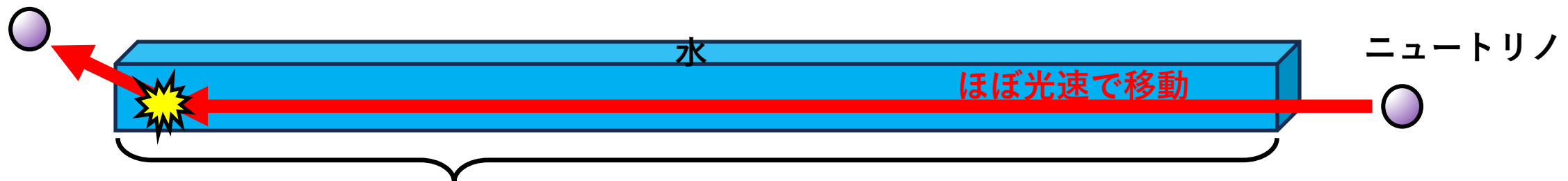
水チェレンコフ型検出器では
エネルギーが低く観測が難しい

地球から放出される
ニュートリノ 約500万個/秒/cm²

- ニュートリノ観測を行っているスーパーカミオカンデ(SK)では、太陽からくるニュートリノが、毎秒~10¹⁸個、1日あたりだと~10²³個も通過している。
 - しかし、~10²³個のうち、実際に1日あたりに観測される個数は、約10個しかない。それ以外は、検出器はもちろん地球もすり抜けていく。
- ニュートリノは、物質と反応する確率が非常に低いいため、検出がとても難しい。

ニュートリノの性質 (まとめ)

- 素粒子のレプトンに属し、電子ニュートリノ・ミューニュートリノ・タウニュートリノの**3種類ある**ことが知られている。
- 素粒子標準理論では、質量がゼロとされていたが、1998年にスーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見により**質量をもつ**ことが分かった。ただし、その質量はとても小さく、**ほぼ光速**で動いている。
- 電氣的に中性で、**他の粒子と反応する確率が極端に小さい**ため、例えば地球をも簡単に突き抜けてしまう。たとえば、水を厚さ~1000光年分用意してなんとか1回反応するレベル (※)。



1000光年 ~ 10^{19} m ~ 1億mの1億倍のさらに1000倍

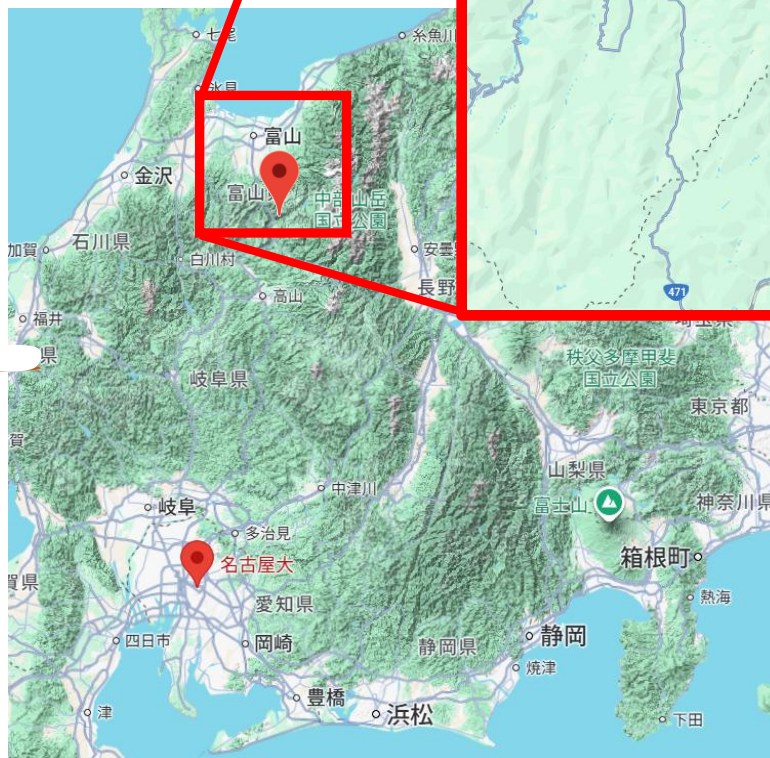
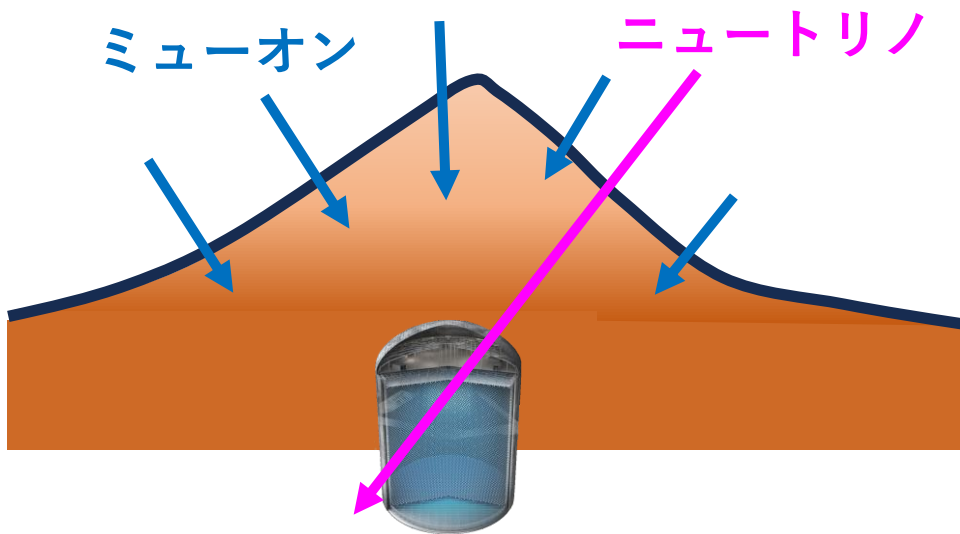
1000光年は、光が1000年かかって進む距離

(※)例えば、 ^{40}K から出てきたエネルギー約1MeVの電子ニュートリノを仮定し、エネルギーが低いため電子散乱を起こすとして計算¹⁵

2. ハイパーカミオカンデでせまる物質優勢宇宙の解明

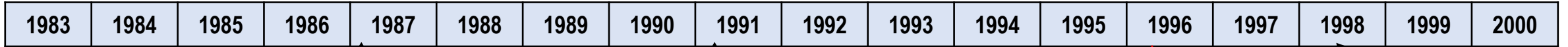
場所

- 岐阜県飛騨市神岡町の地下坑内。
- 地下坑内で観測する理由は、宇宙線ミューオンの影響を減らすため。
- スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデは直線距離で約8km離れている。



地上では観測の邪魔になるミュオンを岩盤で遮蔽している。

カミオカンデ実験の歴史



カミオカンデ実験開始



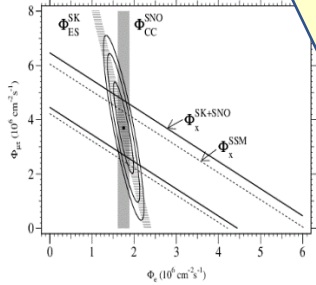
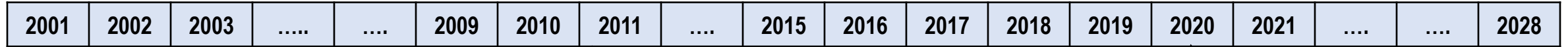
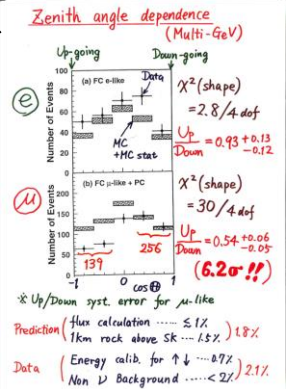
超新星1987Aからのニュートリノ観測

スーパーカミオカンデ (SK) 建設スタート

SK実験スタート 1996年4月



大気ニュートリノ振動の発見



太陽ニュートリノ振動の発見

小柴先生ノーベル賞



共同通信社

T2K実験が第3の振動モードを発見

J-PARCからの人工ニュートリノ実験: T2K実験 (東海 to 神岡)

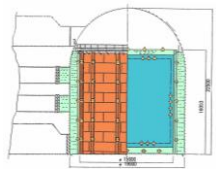
梶田先生ノーベル賞



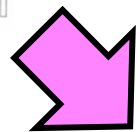
Nobel Media AB 2015
Photo: Pi Frisk

純水にガドリニウムを溶かしたSK-Gdスタート

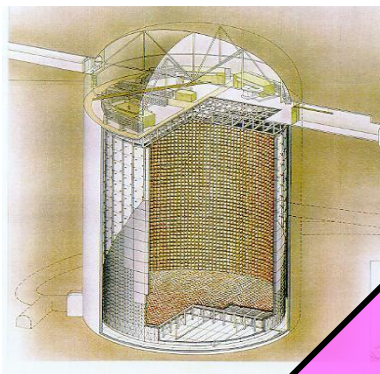
ハイパーカミオカンデ観測開始予定



カミオカンデ: 880 m³ 有効体積 (3000 m³ 全容積), (1983~1996)
直径: 16 m, 高さ: 16 m

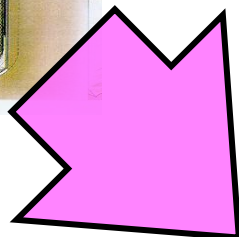


× ~25 倍

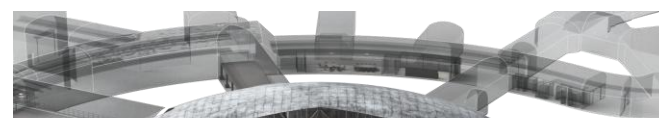


スーパーカミオカンデ: 2.25万トン 有効体積
(5万トン 全容積), **現在稼働中(1996/4~)**
直径: 40 m, 高さ: 42 m

ニュートリノを
観測することで
宇宙の物質進化
の謎にせまる。



× ~10 倍



ハイパーカミオカンデ:

19万トン 有効体積
(26万トン 全容積)

直径: 68 m

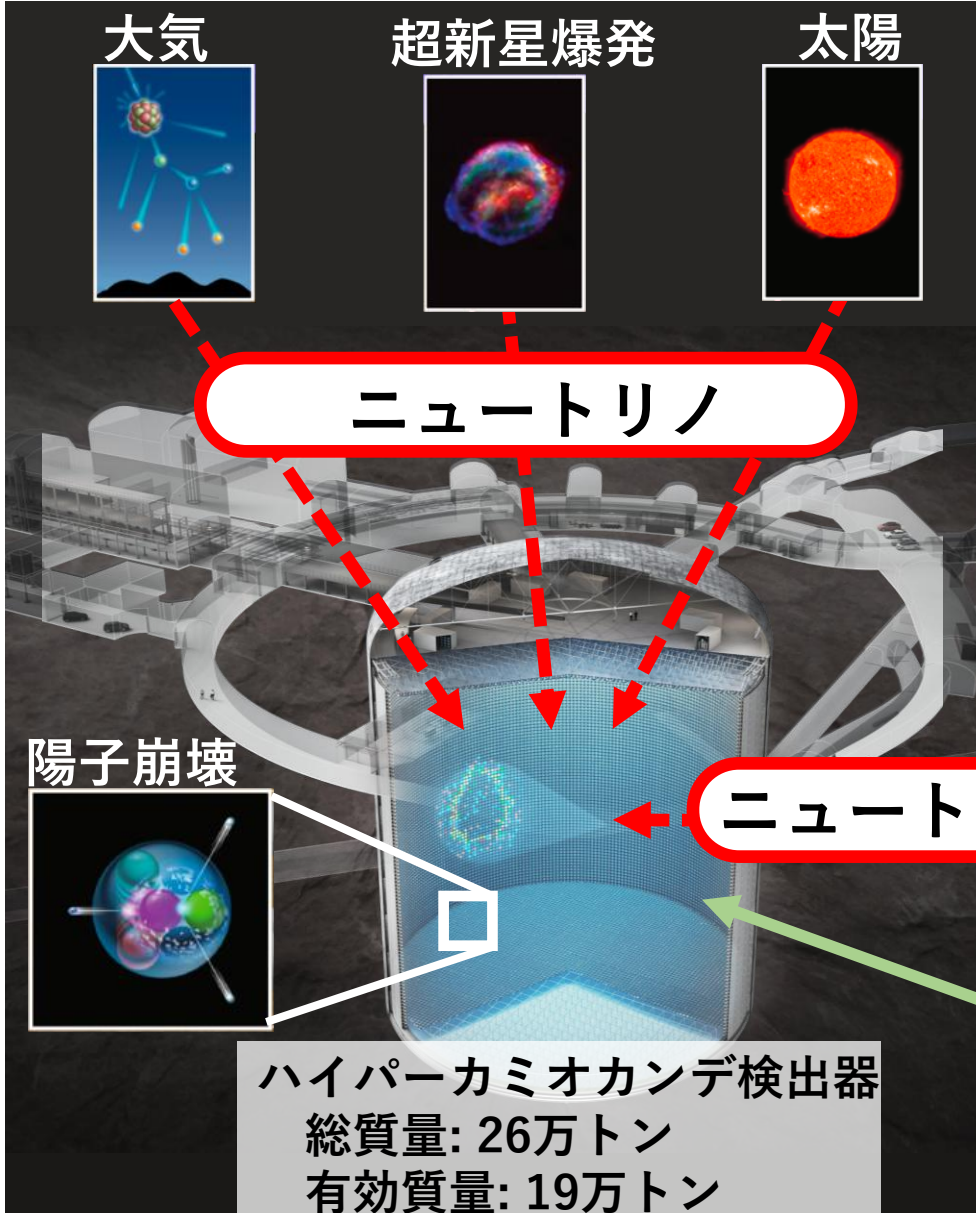
高さ: 71 m

71 m

68 m

**2028年から
観測開始 (予定)**

ハイパーカミオカンデ計画



ハイパーカミオカンデ検出器
総質量: 26万トン
有効質量: 19万トン

● ハイパーカミオカンデ検出器

- スーパーカミオカンデの約8倍の有効体積
- 2倍の感度を持つ光電子増倍管

● J-PARCの高強度ニュートリノビーム

- 現行強度の約3倍に増強

- ニュートリノ・反ニュートリノの違いを調べることで、物質・反物質の非対称の謎にせまる。
- 超新星爆発の機構解明にせまる。
- 陽子崩壊の探索
- ニュートリノ反応の精密測定

295 km



茨城県東海村J-PARCからの
大強度・高品質ニュートリノ
ビーム



新開発光センサー
(従来の2倍の感度)

物質・反物質の非対称性の調べ方

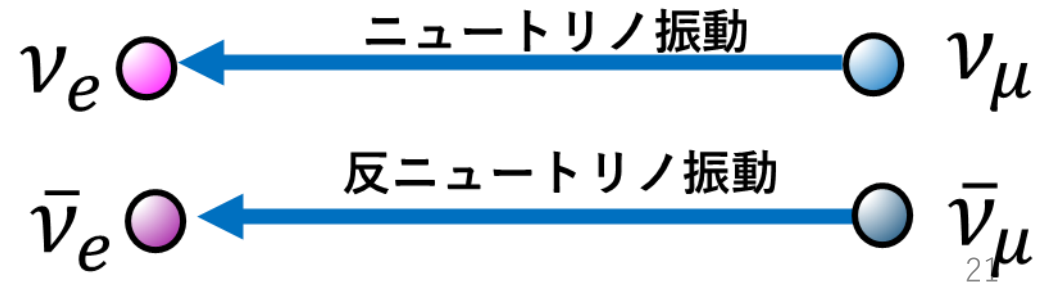
打ち込まれるニュートリノは、約**0.001秒**で神岡に到達

- 約**295 km** 離れた茨城県・東海村にある **J-PARC** で生成されたニュートリノビームをスーパーカミオカンデやその後継のハイパーカミオカンデに向かって打ち込む。



- 295 km を飛行中に、**ミューニュートリノ**が**電子ニュートリノ**に、**反ミューニュートリノ**が**反電子ニュートリノ**に振動する確率を測定し、その違いを調べる。

この2つに違いはあるのか？

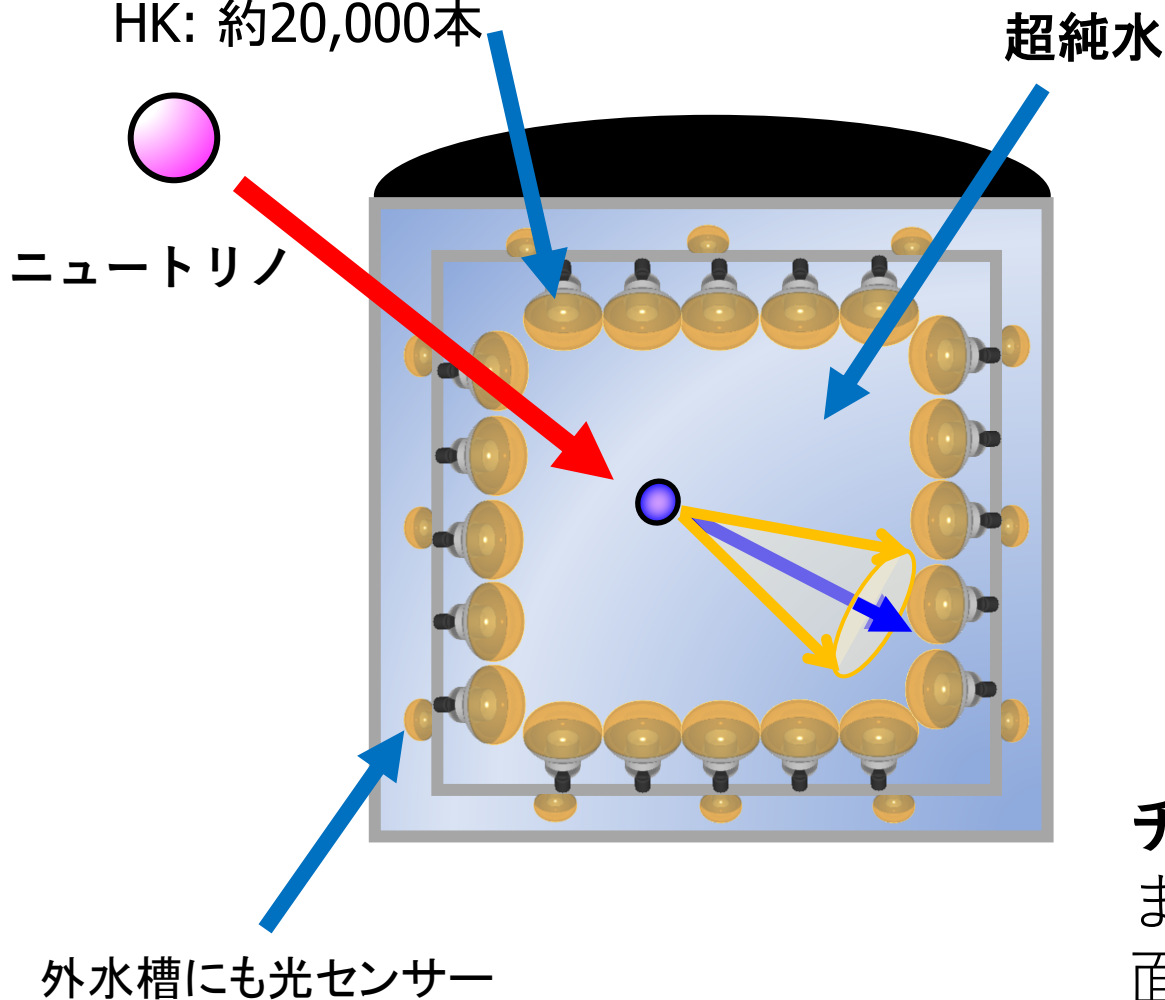


検出器の構造と検出原理

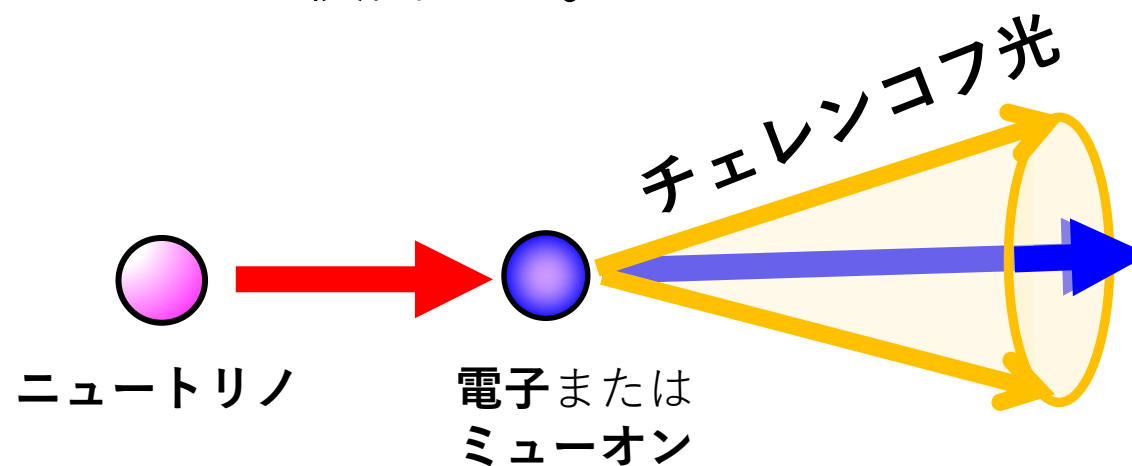
内水槽に直径50cm の光センサー

SK: 約11,000本

HK: 約20,000本



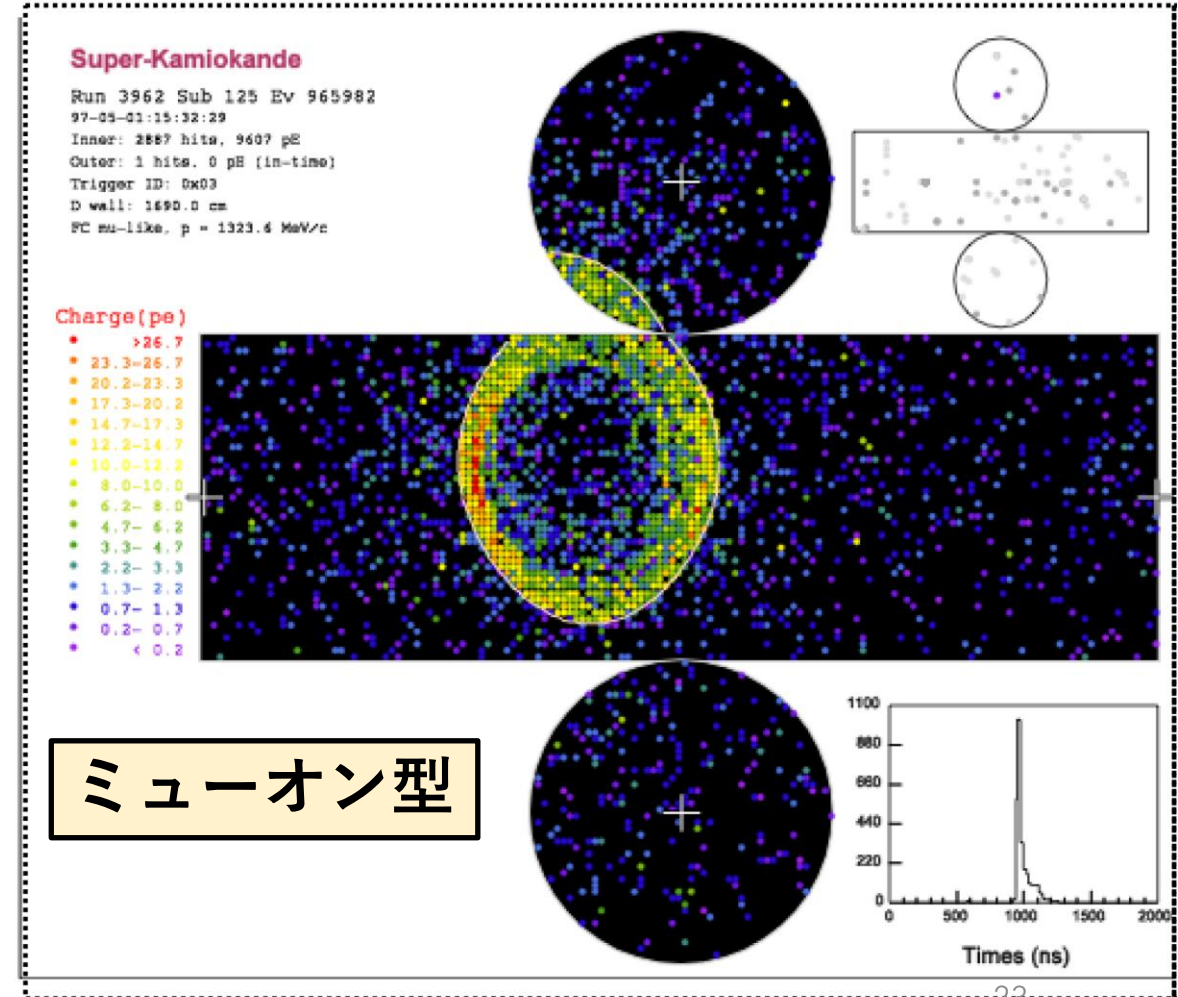
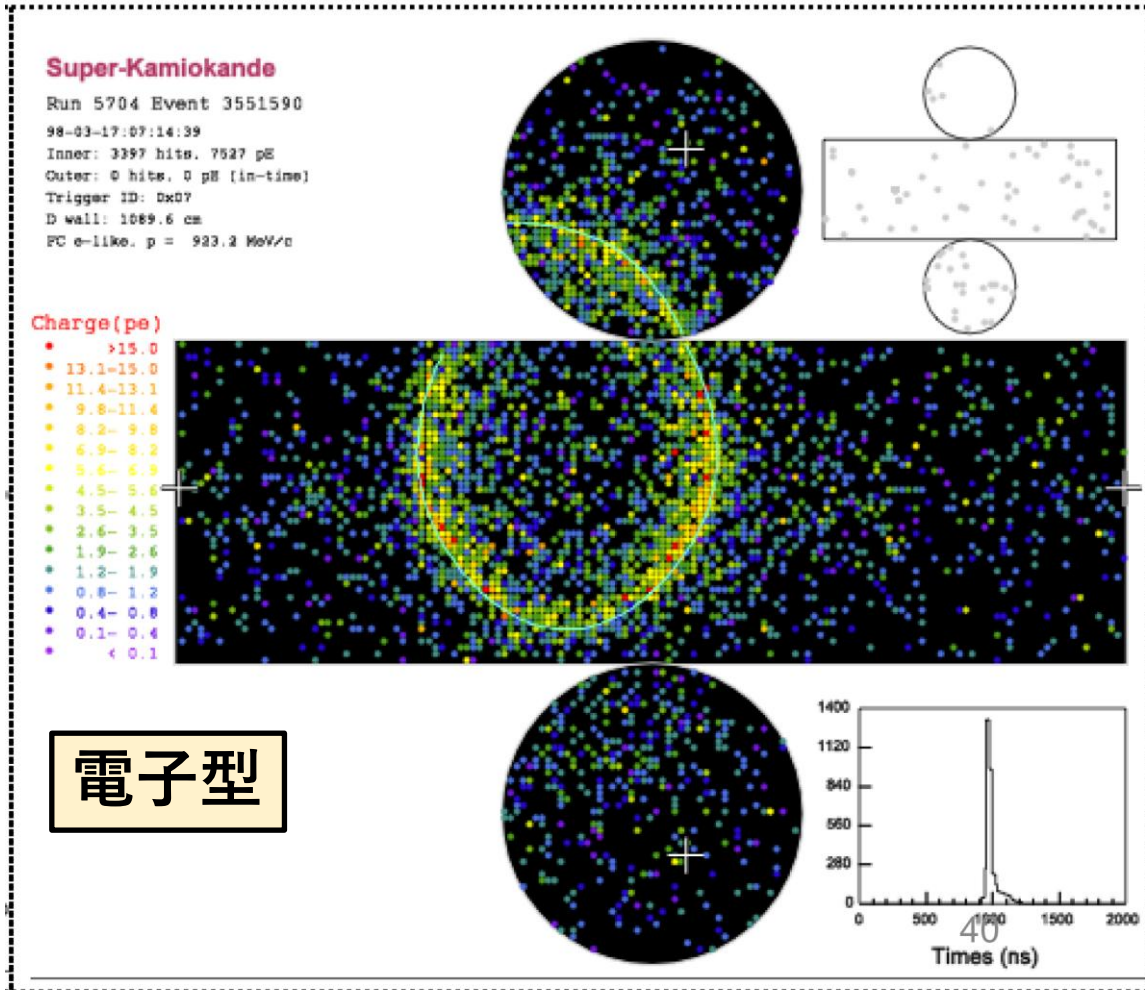
ニュートリノが、水中で反応し、たたき出された**電子**または**ミュオン**が、水中を走る時に出す**チェレンコフ光**を光センサーで検出する。



チェレンコフ光は、水の屈折率に応じた決まった角度(約42度)で放出され、光センサー面でリング状に検出される。

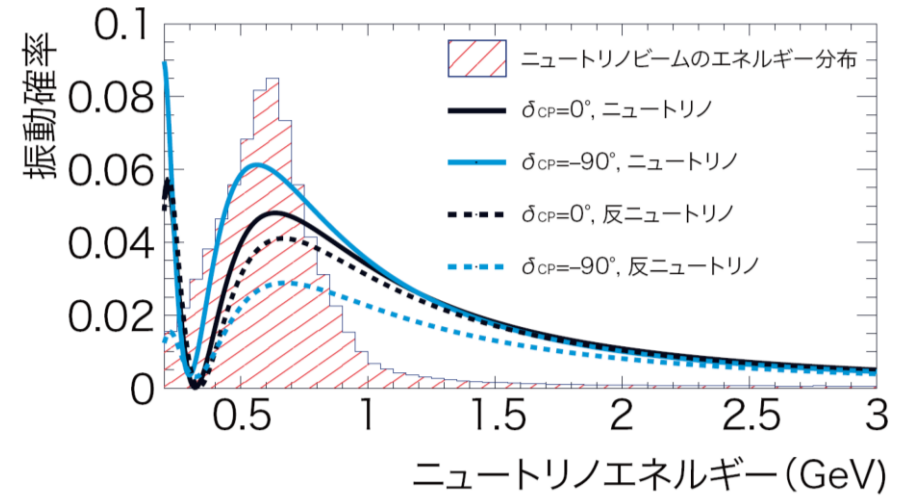
電子型事象とミュー型事象の弁別

- 下図はスーパーカミオカンデによるもの。リングのぼやけ具合から電子型事象とミュー型事象を区別できる。
- 電子は、水中で多重散乱・電磁シャワーを起こすのでぼやけたリングになる。



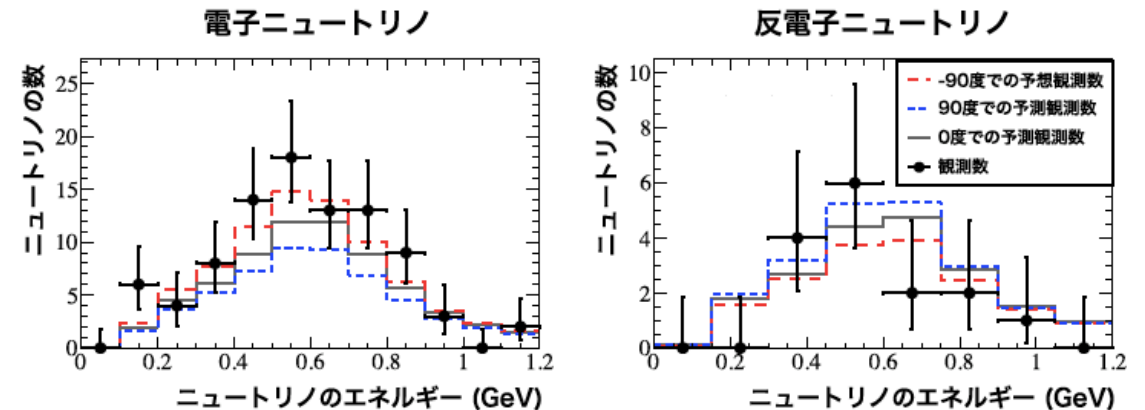
ニュートリノ・反ニュートリノの振動確率

- 右図は、観測が期待される振動確率を表す(横軸はニュートリノのエネルギー)。
- ニュートリノのエネルギーは振動確率が最大となる 0.6 ギガ電子ボルト (GeV) にピークがくるように調整されている。
- 対称性の破れが最大の場合 ($\delta_{CP} = -90^\circ$)、ニュートリノ (青実線)と反ニュートリノ (青点線)の違いが大きくなっている様子が分かる。



- 現在までに、J-PARCからのビームをスーパーカミオカンデで測定する T2K 実験において、ニュートリノが反ニュートリノに比べて振動確率が高い ($\delta_{CP} = -90^\circ$ に近い) という兆候が95% (2σ)の信頼度で観測されている。
- ただし、対称性破れの発見を主張するには、99.99995% (5σ)の信頼度が必要。

→ **統計を1桁以上増やす必要がある。**
HKにより、同じ観測時間で20倍以上の統計増加を実現し発見を目指す。

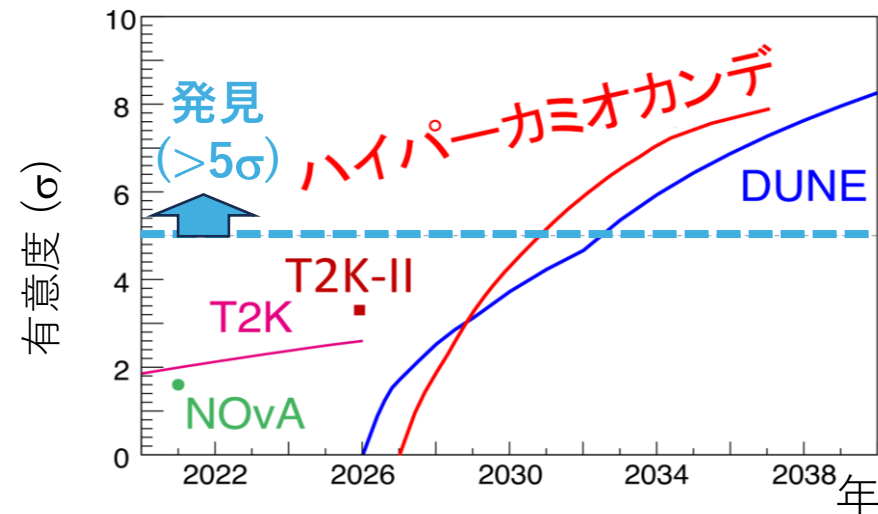


	観測数	予測される観測数	
		-90度の場合	90度の場合
電子ニュートリノ	90	82	56
反電子ニュートリノ	15	17	22

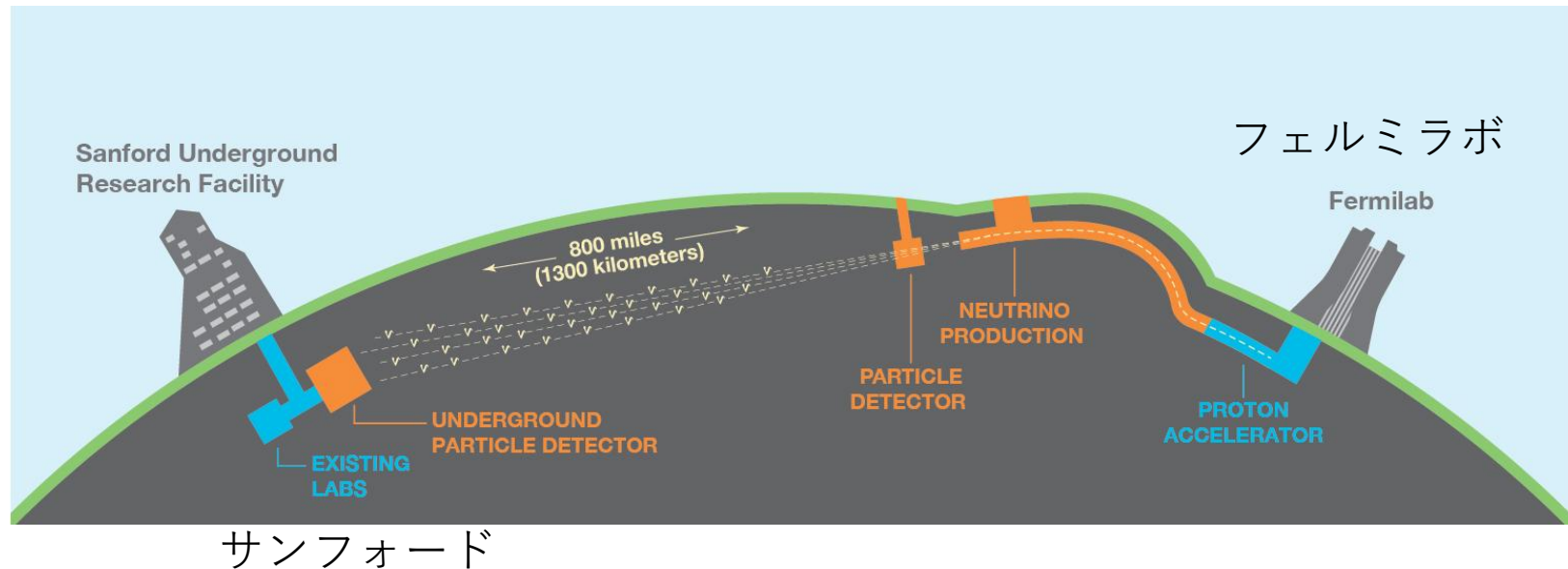
競合実験: DUNE (1/2)

- Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)。
- アメリカ・フェルミ国立加速器研究所で加速したビームを、約 1300 km 離れたところにあるサンフォード地下実験施設に建設中の検出器で測定する。
- 2017年にアメリカエネルギー省(DOE)により、施設の建設予算が措置された。
- 検出器 (17,000トン×4基)は、液体アルゴン・タイムプロジェクションチェンバー (TPC) の技術を用いている。
- ハイパーカミオカンデとは、物理目標の多くが重なっており熾烈な競争関係にある。一方で相補的な観測結果も期待されている。

<https://www.dunescience.org/>



物質・反物質対称性の破れに対する感度変化 (効果最大の場合)



競合実験: DUNE (2/2)

- 最新(2026年5月7日)のプレスリリースによると、検出器用の巨大鋼構造物(総重量約4500トン)の地下(1500m)への搬入が開始されたとのこと。
- 公式スケジュールによると、2031年に最初のニュートリノビームを DUNE に打ち込む予定となっている。

https://news.fnal.gov/2026/05/fermilab-marks-major-milestone-for-world-leading-dune-experiment/?utm_source=chatgpt.com

PRESS RELEASE

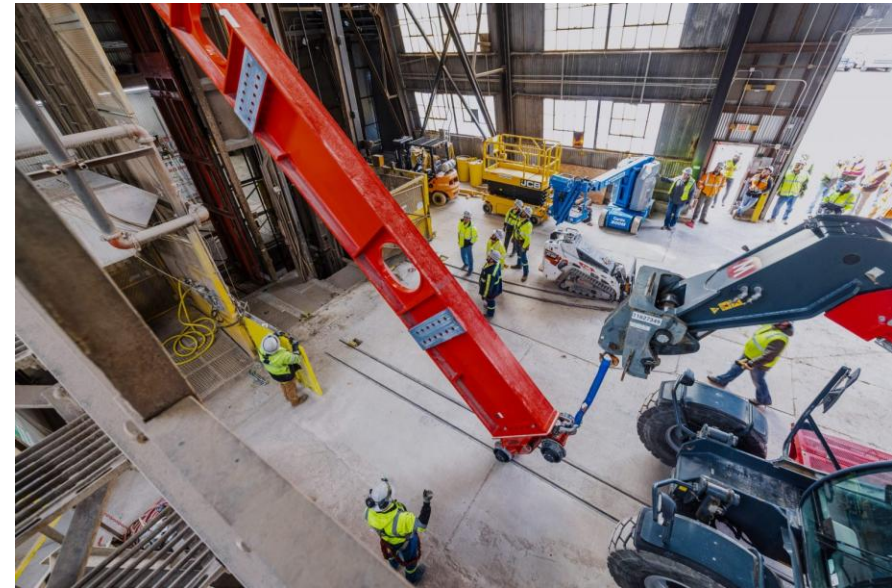
Fermilab marks major milestone for world-leading DUNE experiment

May 7, 2026

Tags: [cryogenics](#) [DUNE](#) [LBNF/DUNE](#) [milestone](#)

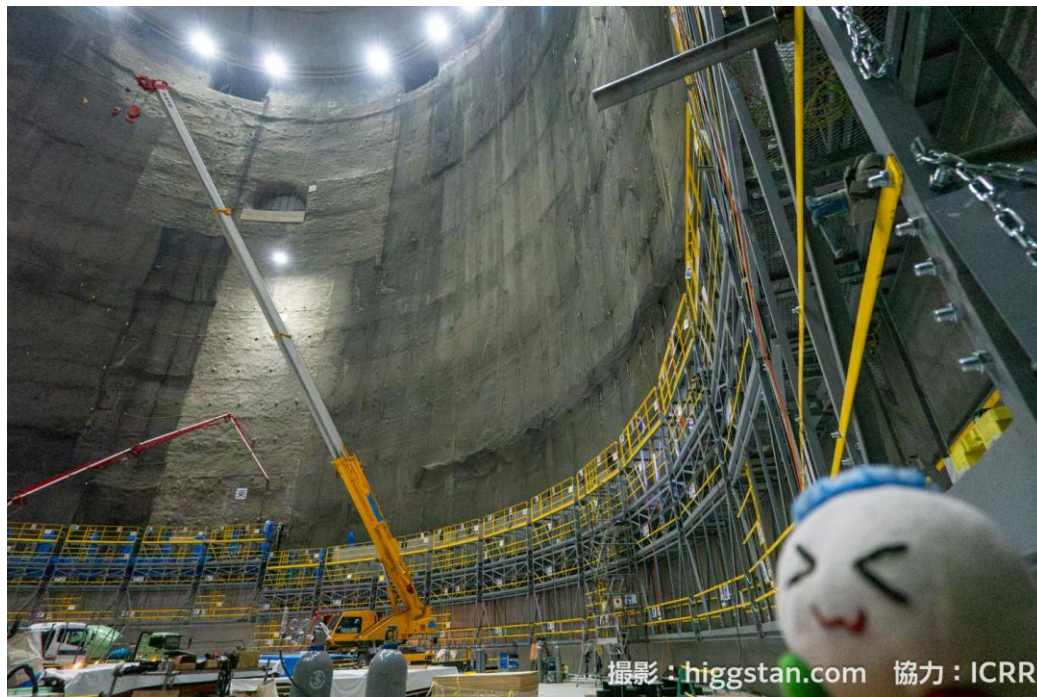
[Newsroom](#) | [News and features](#) | [Press releases](#) | [Fermilab in the news](#) | [Fact sheets](#) | [Contact us](#) | [Q](#)

An event at the far site of the Deep Underground Neutrino Experiment at the Sanford Underground Research Facility in South Dakota marked the start of steel beams being lowered underground to house DUNE's massive particle detectors. The event was attended by senior leaders from the Department of Energy; members of Congress; Fermilab, CERN and SURF leadership; and members of the local community, all of whom had the chance to sign one of the steel beams being installed.



CERN提供の鋼構造物の地下への輸送の様子。
(Photo credit: Matthew Kapust, SURF)

ハイパーカミオカンデの建設状況



【HKちゃん成長日記 08】ハイパーカミオカンデの水槽を造りはじめた【AD】

<https://higgstan.com/hk-construction-08/>



2021年5月28日 着工記念式典



これまでの建設状況

2022年3月7日

アクセストンネル(全長約2km)掘削完了



2022年6月23日 空洞ドーム中心部に到達



2023年10月3日 掘削で最も困難な本体空洞ドーム部(直径69m、高さ21m)がついに完成。

地下空洞完成！

2025年7月31日

【プレスリリース】ハイパーカミオカンデ計画：超巨大空洞の掘削を完了

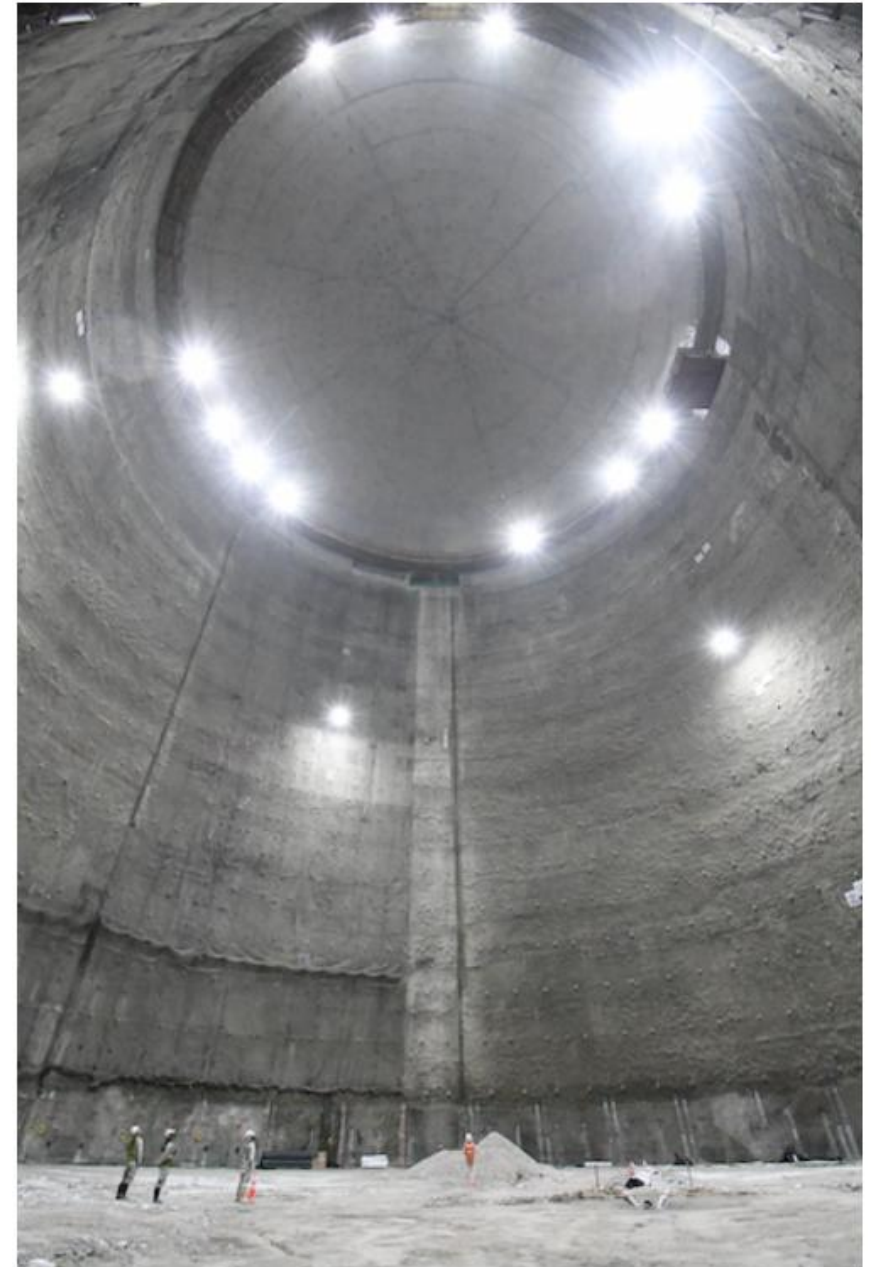
2025年8月5日

ニュース

<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/detail/1836/>

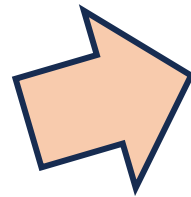
2025年7月31日

空洞掘削完了
(直径69m、ドーム
頂部までの高さ
94m)



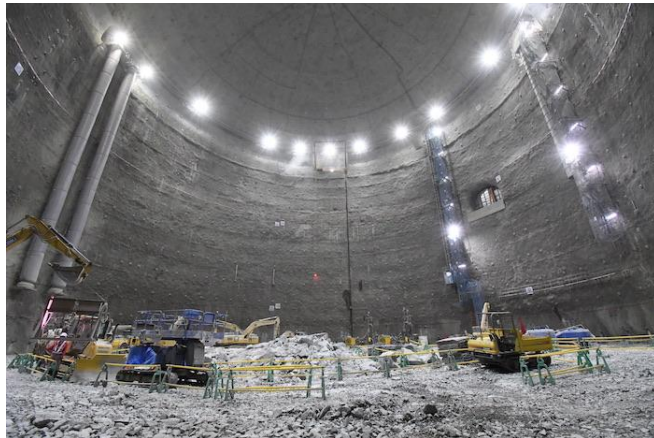
2023年10月3日

本体空洞ドーム部
(直径69m、高さ
21m) が完成。



2025年3月

円筒部を約60m掘
り下げたところ。



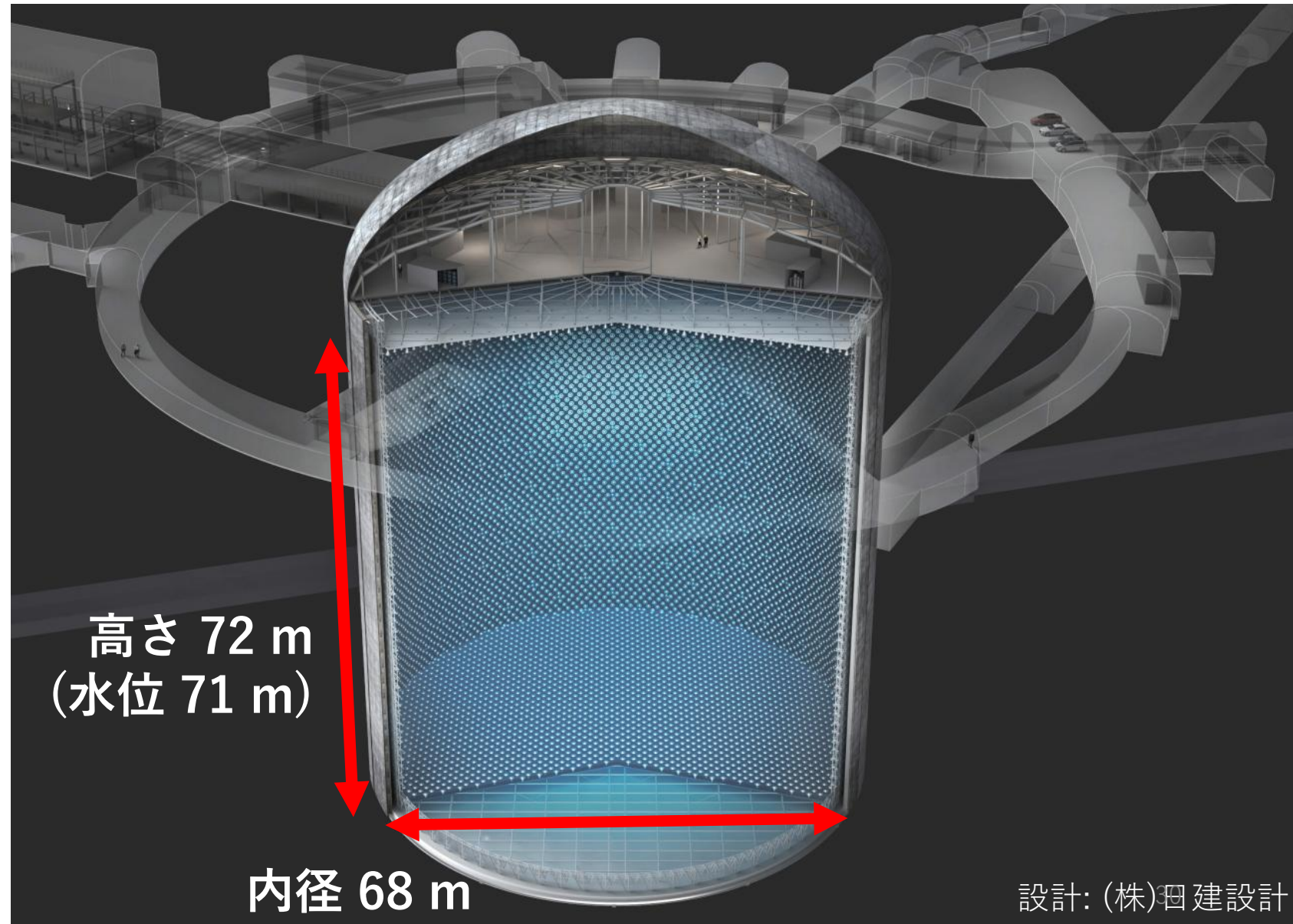
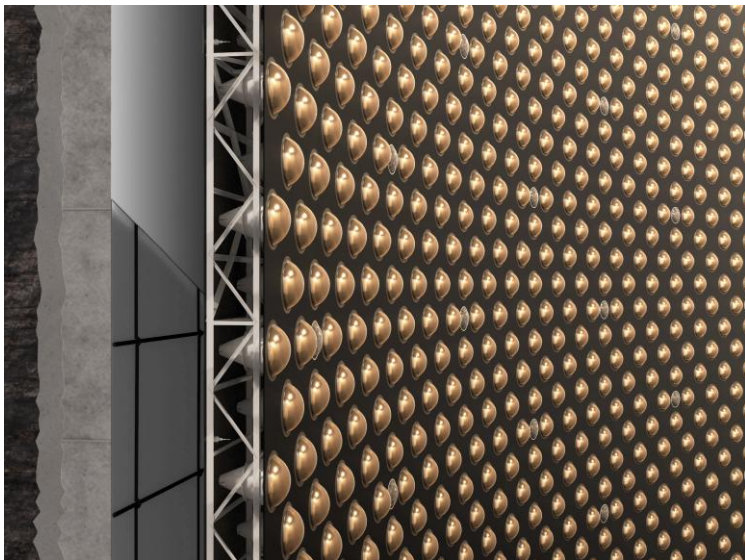
水槽・光センサー支持架構のデザイン

実施設計:

検出器性能・工期・コストの観点から最適な設計が、(株)日建設計により、東京大学、想定施工者との綿密な議論を経て完成。

現地施工:

2025年8月より、(株)熊谷組による現地施工が開始された。

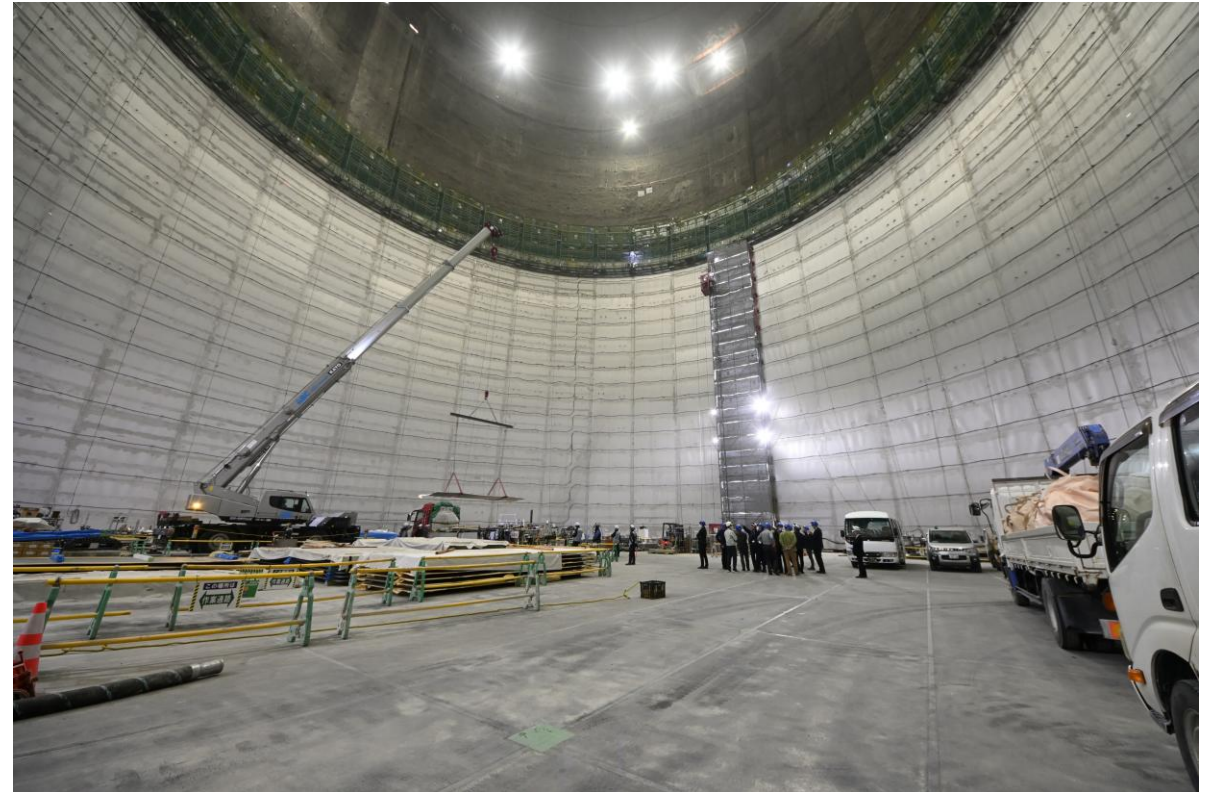


水槽の建設状況

- (株) 熊谷組による、厚さ4 mm のステンレス(SUS304) 板を突合せ溶接により側面に敷き詰める工事が順調にスケジュール通り進行中。
- 2026年6月5日現在で、床上60m まで (全高72m) の敷設が完了予定。
- 水槽内に設置される光センサーの地磁気による影響を打ち消すための地磁気補償コイルケーブルをステンレス板表面に敷設する作業、水槽内に超純水を出し入れするための配管を敷設する作業等も同時進行中。



HK official photo (2026/3/15)



HK official photo (2026/4/22)

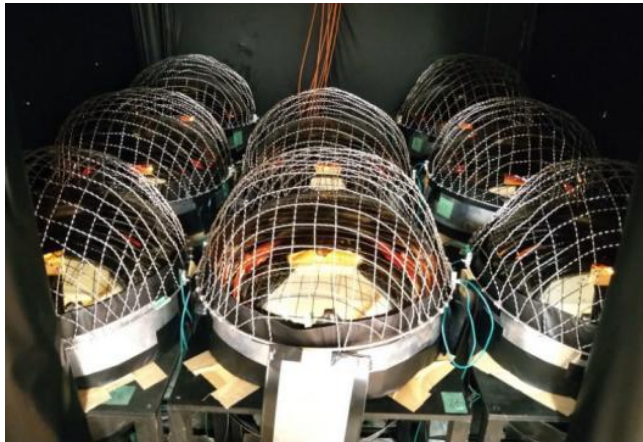
検出器構成機器の開発・生産・品質チェック等

- 2027年1月頃から予定されている支持架構への光センサー等検出器部品の設置に向けて、世界中で準備が進められている。

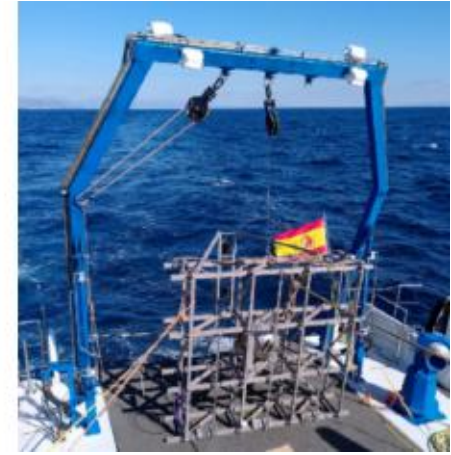
機器設置モックアップ試験 (日本)



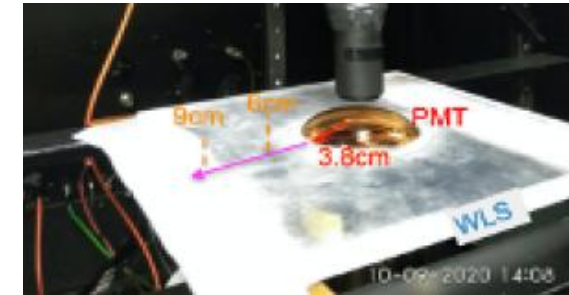
PMT品質チェック (日本)



PMTカバー防爆試験 (スペイン)



外水槽PMT (イギリス)



マルチPMT
(カナダ・ポーランド・イタリア・チェコ・メキシコ)

光センサーの設置試験の様子

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/15085/>



ハイパーカミオカンデと同じ設計の試験フレームへの光センサー取り付けのようす 宇宙線研究所・北棟1階の共同実験室で



手動のリフターを使って読み出し用の電子回モジュールを設置



フレームへの電子回路モジュールの設置方法を再検討

光センサーの動作試験の様子

<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/detail/1614/>



暗室での100本測定



試作品の外水槽用光センサーを試験用のホルダーに設置

おわりに

ハイパーカミオカンデは、人類の基本的な疑問である

- 「物質のある宇宙」がどうしてできたのか？

という問いに、ニュートリノという切り口でせまる壮大なプロジェクトであり、これまでに、ニュートリノ質量の発見等で世界をリードしてきたカミオカンデ・スーパーカミオカンデの一連の流れの集大成となっています。

ハイパーカミオカンデでは、上記のテーマだけでなく

まだ知られていない未知の現象・謎が出てくることも期待されています。
ハイパーカミオカンデからの新しい報告を楽しみにしていただきます。