

# ハイパーカミオカンデ 計画ではじまる宇宙・ 素粒子物理学の新展開

2024年4月20日(土)

柏の葉カンファレンスセンター (千葉県柏市)

Atsushi Takeda for Hyper-Kamiokande Collaboration

# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

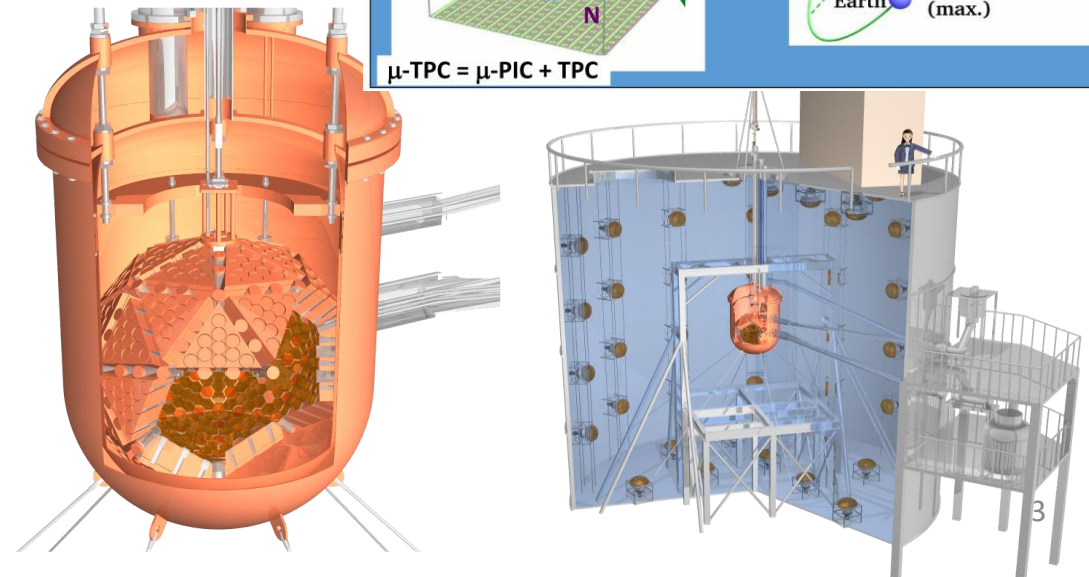
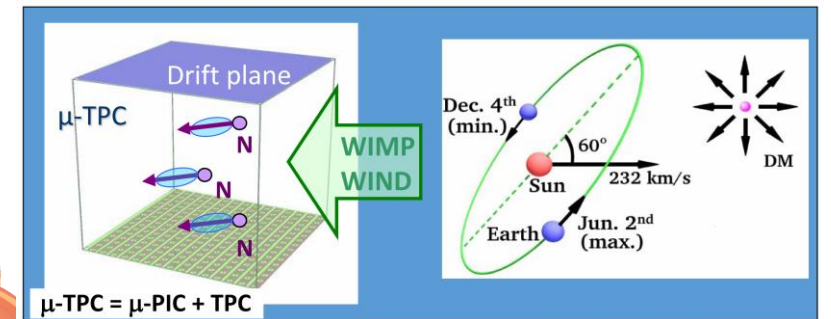
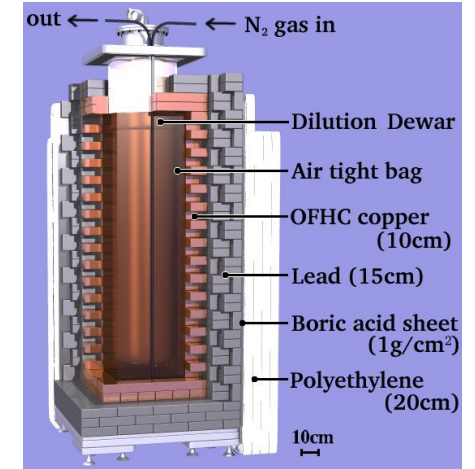
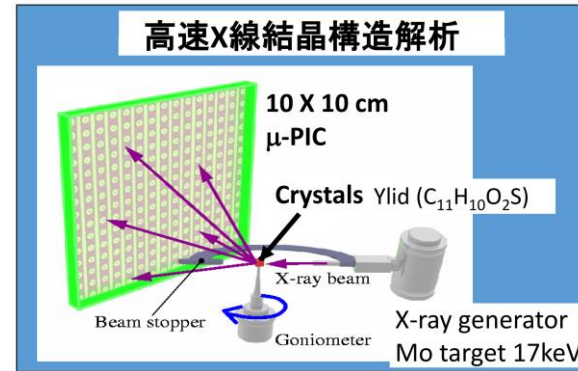
## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

# 自己紹介

- 1998年から東京大学蓑輪研で暗黒物質探索のための検出器の開発を始める。
- 2003年に京都大学宇宙線研究室で方向に感度のある暗黒物質探索の研究 (NEWAGE) に従事
- 2004年から、東京大学宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設で、スーパーカミオカンデ実験・XMASS実験に参加
  - 超新星爆発ニュートリノ探索
  - 暗黒物質探索実験
- 2018年頃から本格的にハイパーカミオカンデ実験に従事
- 2023年 XMASS最後の物理解析論文
- 2027年からのハイパーカミオカンデ観測開始に向けて、水槽・光センサー支持架構物建設に力を入れている。



# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

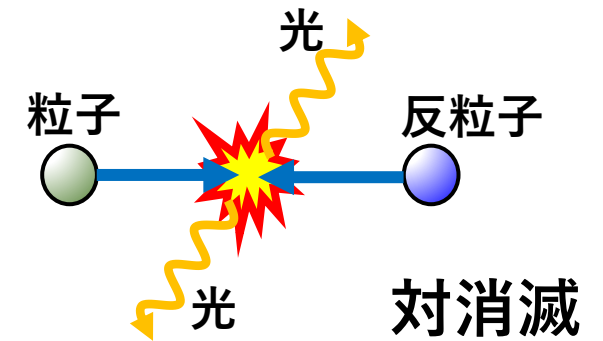
## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

# 物質のある宇宙はどうしてできたのか？

- 宇宙には私たち生命をはじめとした物質が存在しているが、「物質のある宇宙」は実は当たり前ではない。
- あらゆる物質は、素粒子からできていることが分かっている。
- 素粒子には「**粒子**」とそれと対になる「**反粒子**」があり、粒子と反粒子は出会うと消滅(**対消滅**)してしまうことが分かっている。
- ビッグバンにより宇宙創成期に同数生成されたと考えられている粒子と反粒子がお互いに対消滅をすると宇宙には光しか残らないことになり、我々が見ている現在の物質のある宇宙と矛盾する。
- 物質と反物質の性質が対称ではなく違いがあると現在の物質のある宇宙が説明できる。



→ この違いをニュートリノを使って調べる。

# 物質はどのように進化してきたのか？



SN1987A アンダロオーストラ  
リア天文台 David Malin 撮影

- ビッグバンにより宇宙が誕生したあと、膨張によって密度と温度が下がり、光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へと進化したと考えられている。
- 宇宙誕生後すぐに水素・ヘリウムといった軽元素が合成されたが、それより重い元素の生成については、その後(~4億年後)に始まった星形成が大きくかかわっている。
- 宇宙に星が形成されたあと、星内部で核融合により鉄までの重元素が生成された。
- 鉄よりも重い元素は、大質量星(太陽質量の8倍以上)が一生の最後に引き起こす重力崩壊型の超新星爆発や、中性子星同士が合体する際に元素合成されると考えられている。

→ **超新星爆発の機構を解明することで物質進化の歴史が分かる。**  
**そのためには、ニュートリノが重要な鍵になる。**

# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- **素粒子ニュートリノの性質**
- **ニュートリノ振動**

## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況




## 4. おわりに

# ニュートリノとは？

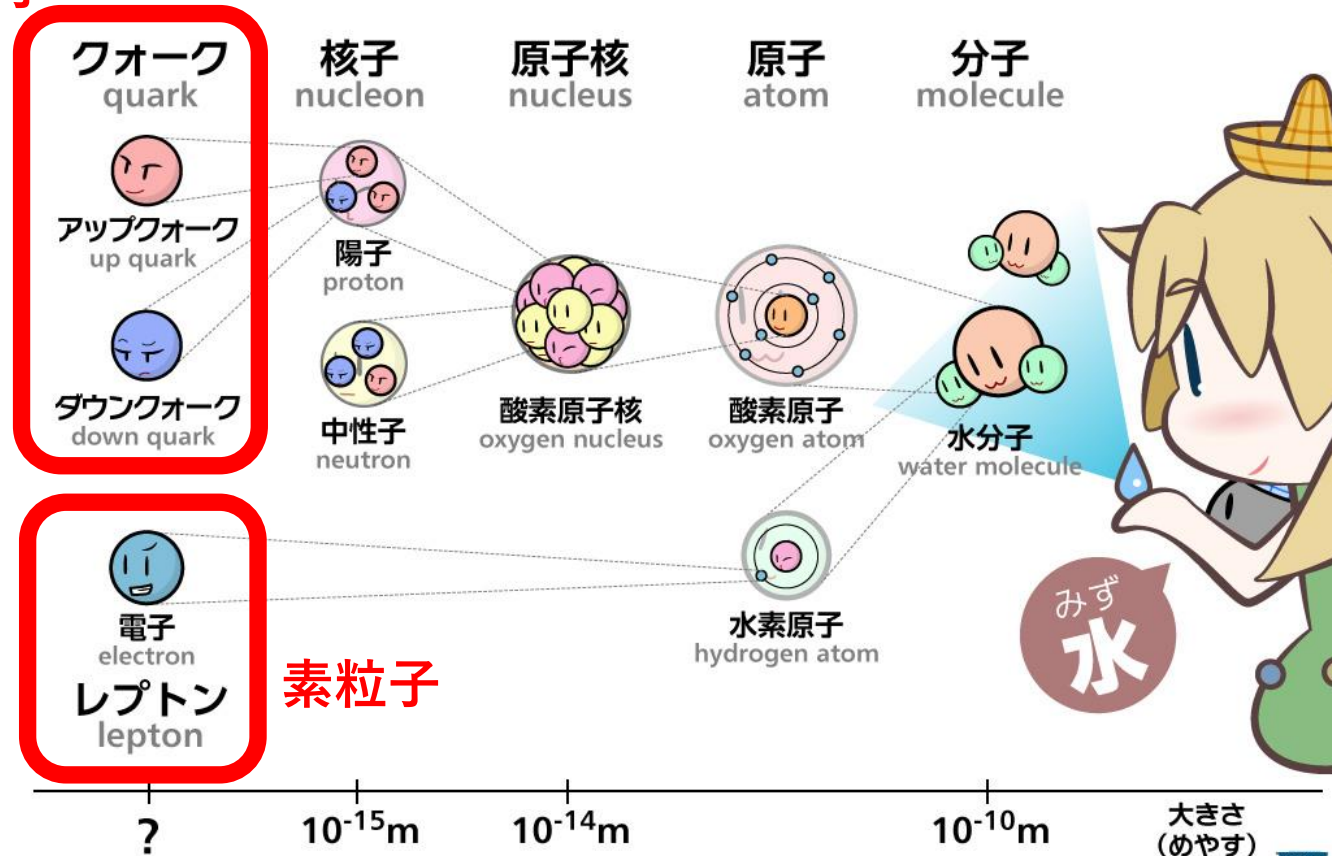
- ニュートリノは素粒子のなかま
- 素粒子とは、物質を構成する最小単位でもうそれ以上は分割できない(と考えられている)もの

例えば水分子  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。**

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。**

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」に分けられる。

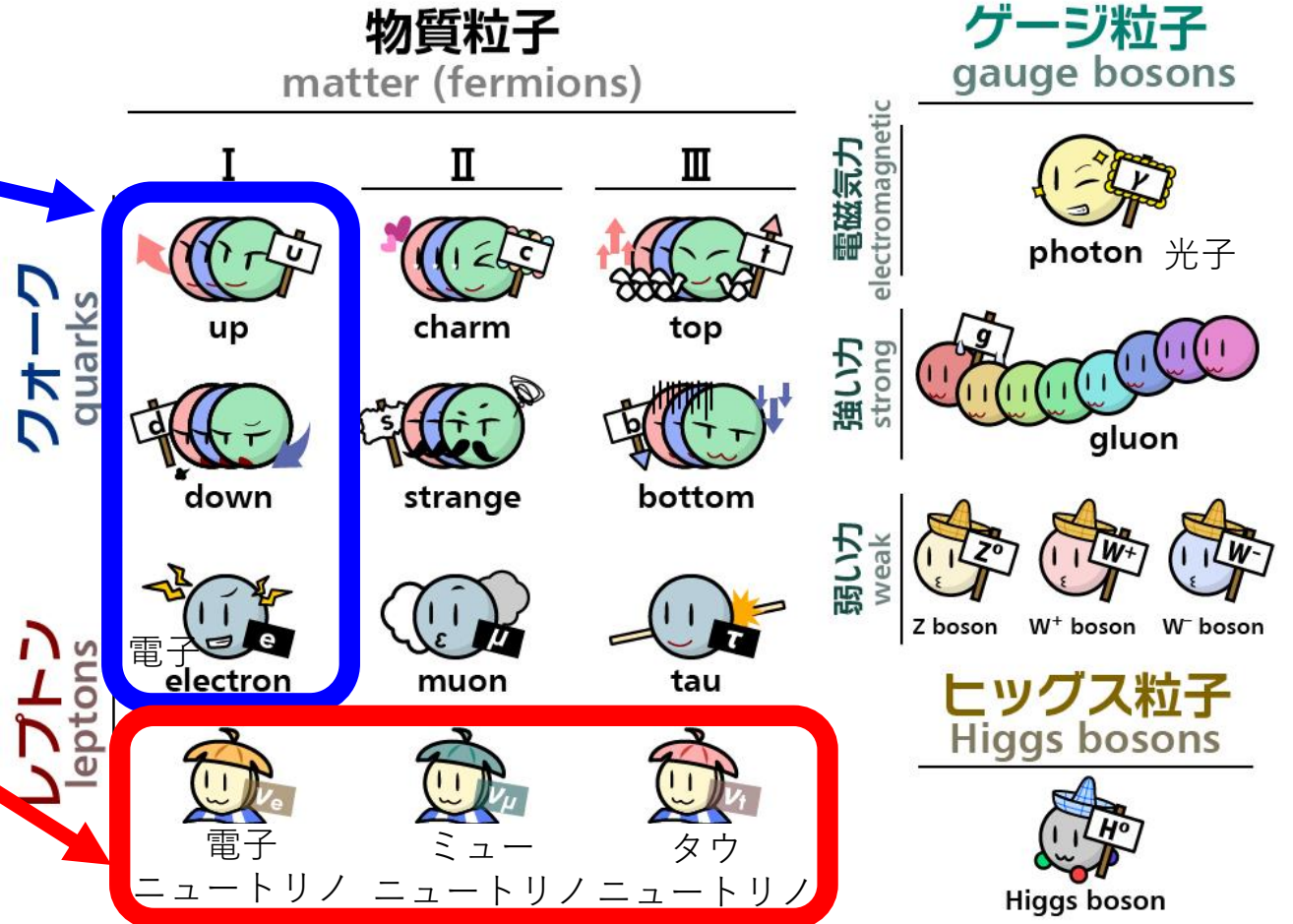
身の回りの物質を構成

水分子を形成している水素原子の原子核は、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1つと電子1つからできている。

ニュートリノ

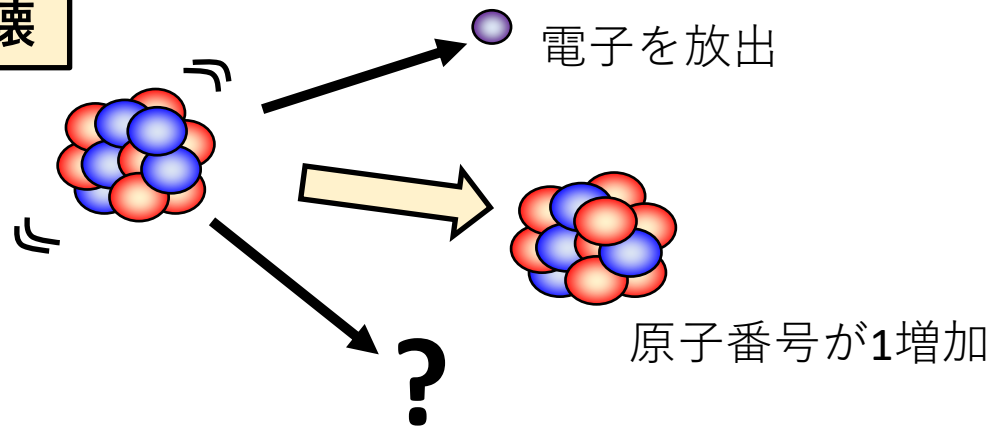
電子と同じレプトンに属し、3種類あることが知られている。

- 電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )
- ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ )
- タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ )



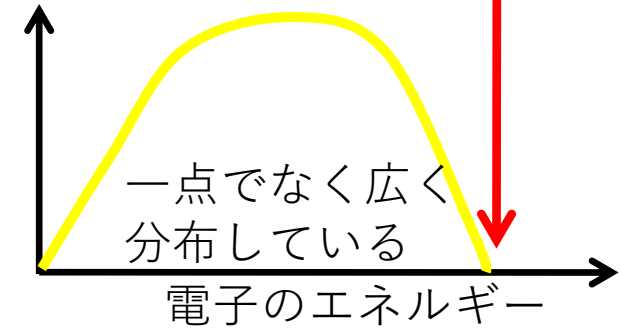
# ニュートリノの発見

ベータ崩壊



ベータ崩壊における電子のエネルギー分布

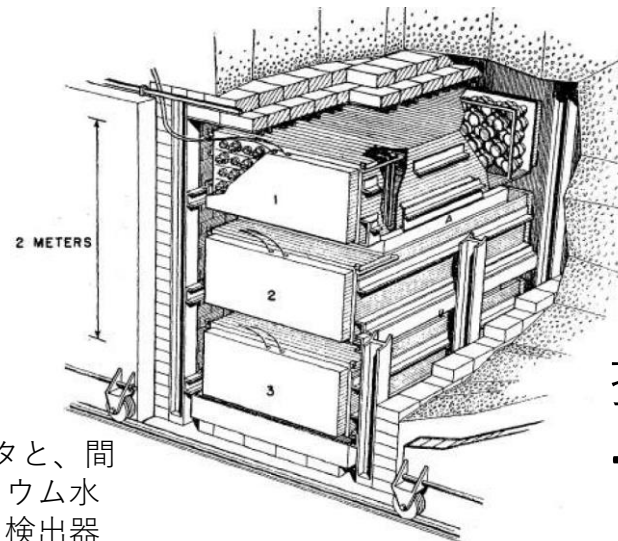
本来ならばここにピークとして立つはず。



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”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。

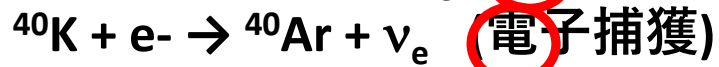
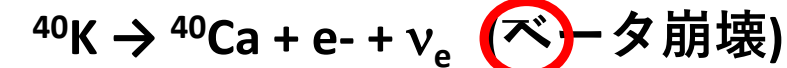
提唱から20年以上たったの検出  
→ **検出が非常に難しい粒子**

# 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  $^{40}\text{K}$  が微量 (自然存在比:0.012%) 含まれており、 $^{40}\text{K}$  は半減期 12.8億年 ( $1.28 \times 10^9$ 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。

$^{19}\text{K}$   
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

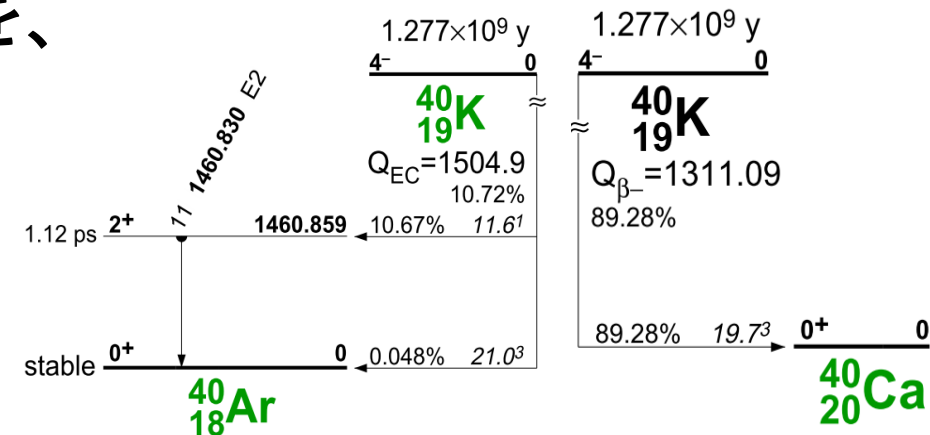


→ 体重50kg の人は、ニュートリノ・反ニュートリノを、  
1秒あたり約3000個放出している。

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

$$N(t): 50 \times 10^3 \times 0.002 \times 0.00012 \div 40 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.8 \times 10^{20} \text{ 個 } (^{40}\text{K})$$

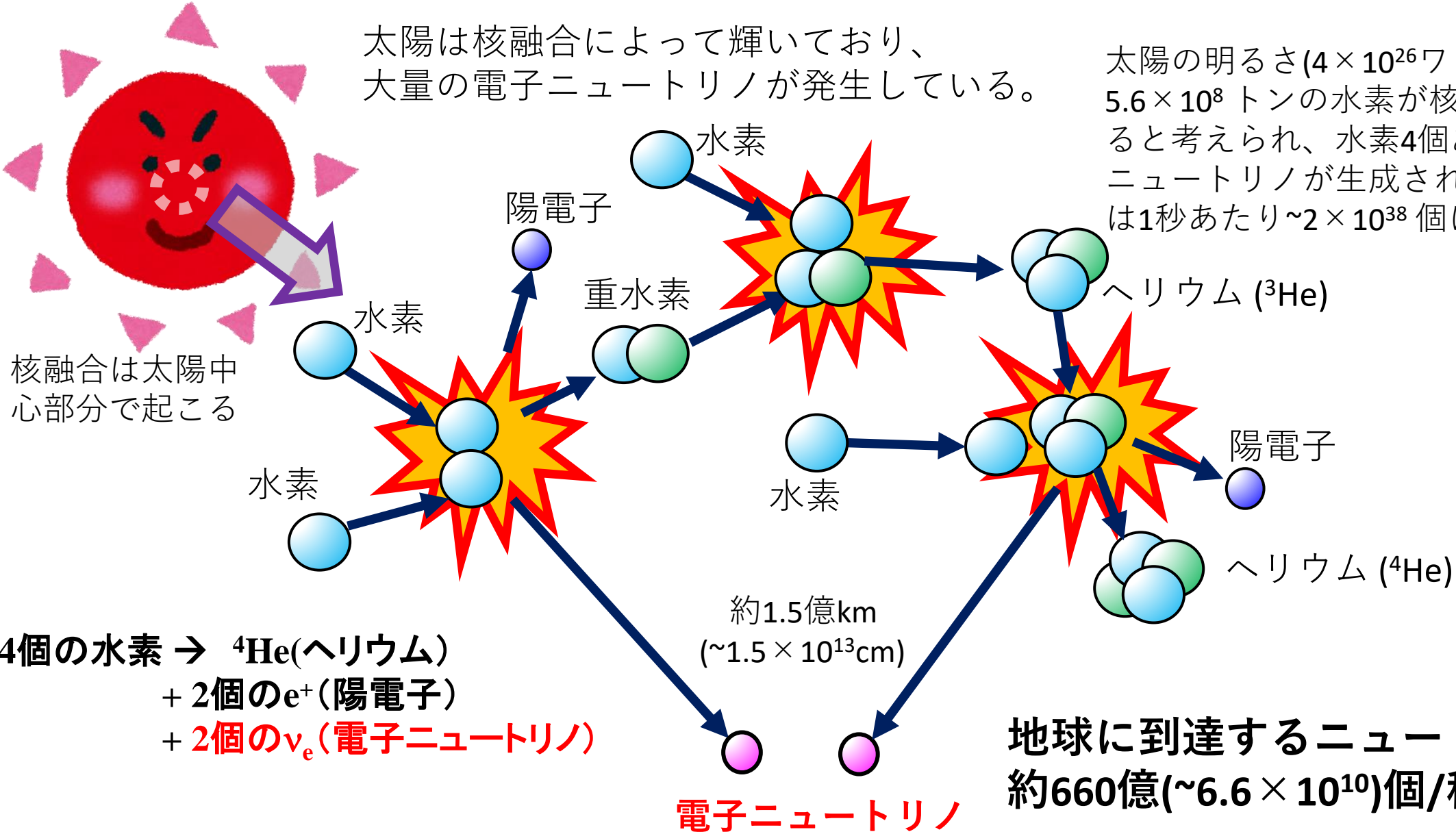
$$12.8 \text{ 億年} = 4.0 \times 10^{16} \text{ 秒}$$



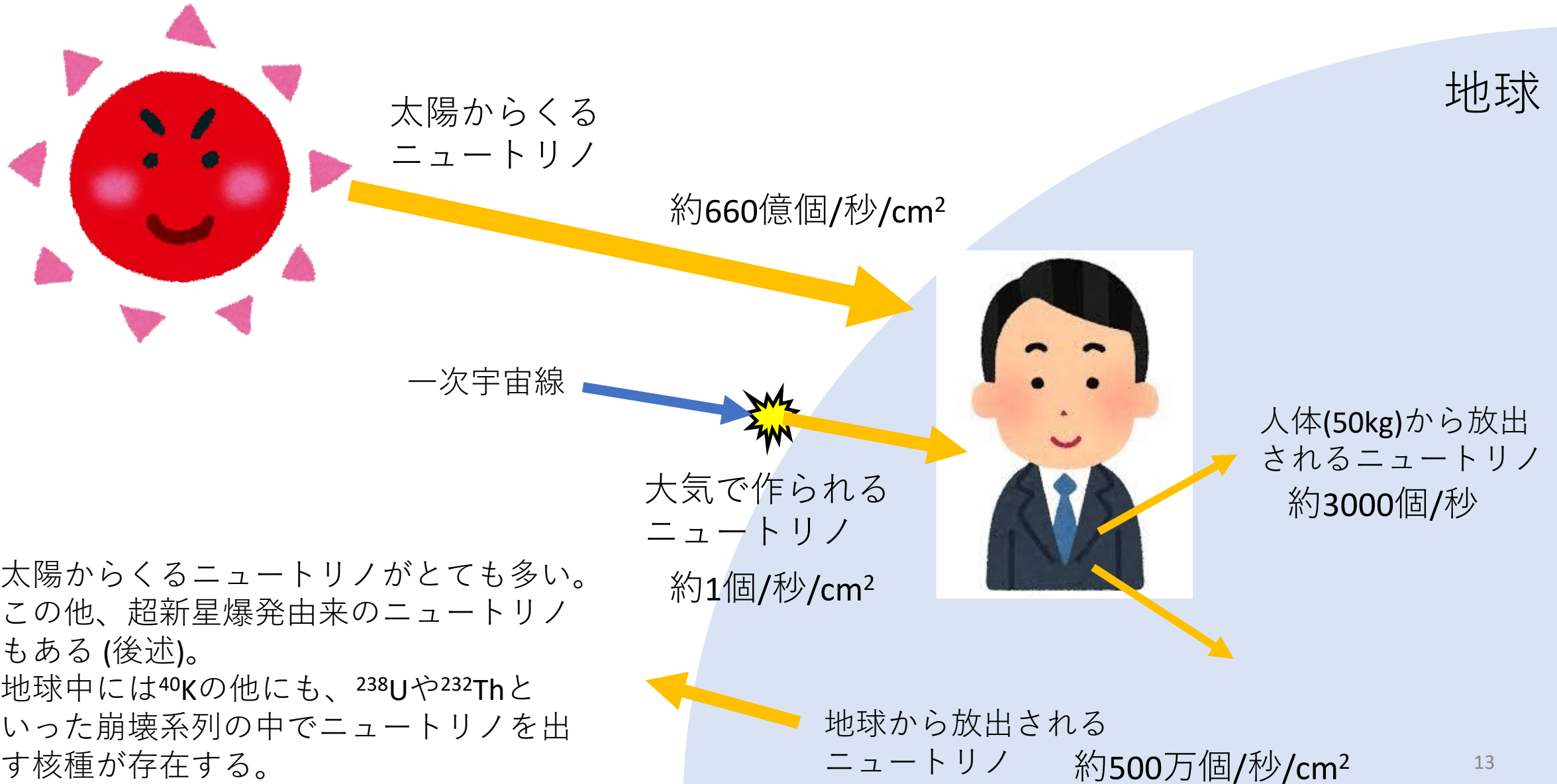
# 太陽で作られるニュートリノ

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( $4 \times 10^{26}$ ワット)から、毎秒  
 $5.6 \times 10^8$  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。



# 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がとても多い。
- この他、超新星爆発由来のニュートリノもある(後述)。
- 地球中には<sup>40</sup>Kの他にも、<sup>238</sup>Uや<sup>232</sup>Th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。

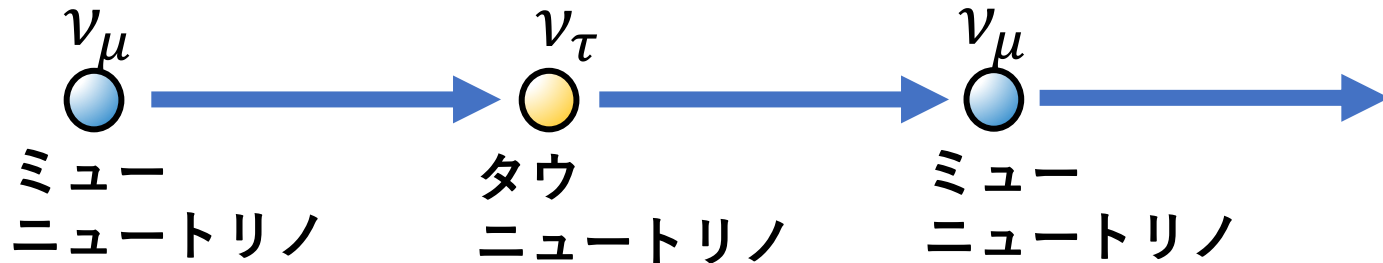
# ニュートリノの観測



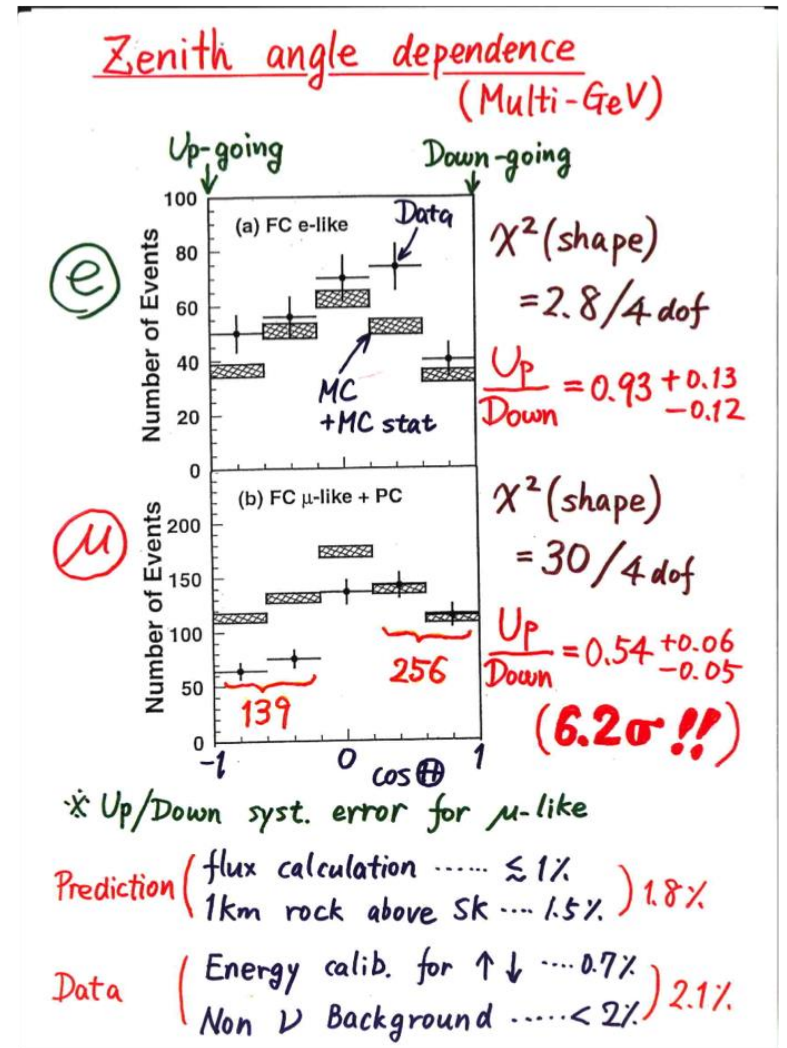
- ニュートリノ観測を行っているスーパーカミオカンデ(SK)では、太陽からくるニュートリノが、毎秒 $\sim 10^{18}$ 個、1日あたりだと $\sim 10^{23}$ 個も通過している。
  - しかし、 $\sim 10^{23}$ 個のうち、実際に1日あたりに観測される個数は、約10個しかない。それ以外は、検出器はもちろん地球もすり抜けていく。
- ニュートリノは、物質と反応する確率が非常に低いため、検出がとても難しい。

# ニュートリノ振動

- **ニュートリノ振動**: 1998年、梶田隆章博士によって発見された現象で、それまでの素粒子標準理論でゼロとされていたニュートリノの質量が、ゼロではないことから起こる。この業績により梶田隆章博士が、2005年にノーベル物理学賞を受賞。
- スーパーカミオカンデ (SK) で大気ニュートリノの観測を行い、上方向からくるもの(256個)と下方向からくるもの(139個)の個数の違いから(右図)、下方から地球を貫通して長い距離を飛行してくるミューニュートリノがSKでは観測されづらいタウニュートリノに変化していることを発見した。



- 3種類あるニュートリノは、飛行中にその種類が入れ替わる。



高山で1998年6月に開かれた国際会議 Neutrino98 での梶田隆章博士の発表トラペ (T. Kajita, "Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande & Kamiokande").



# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

## 3. ハイパーカミオカンデ計画

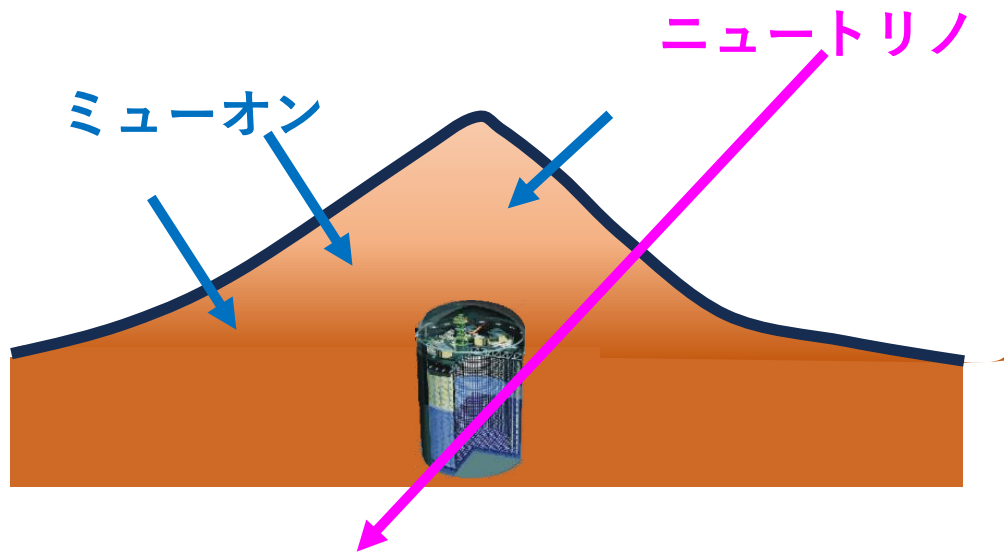
- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

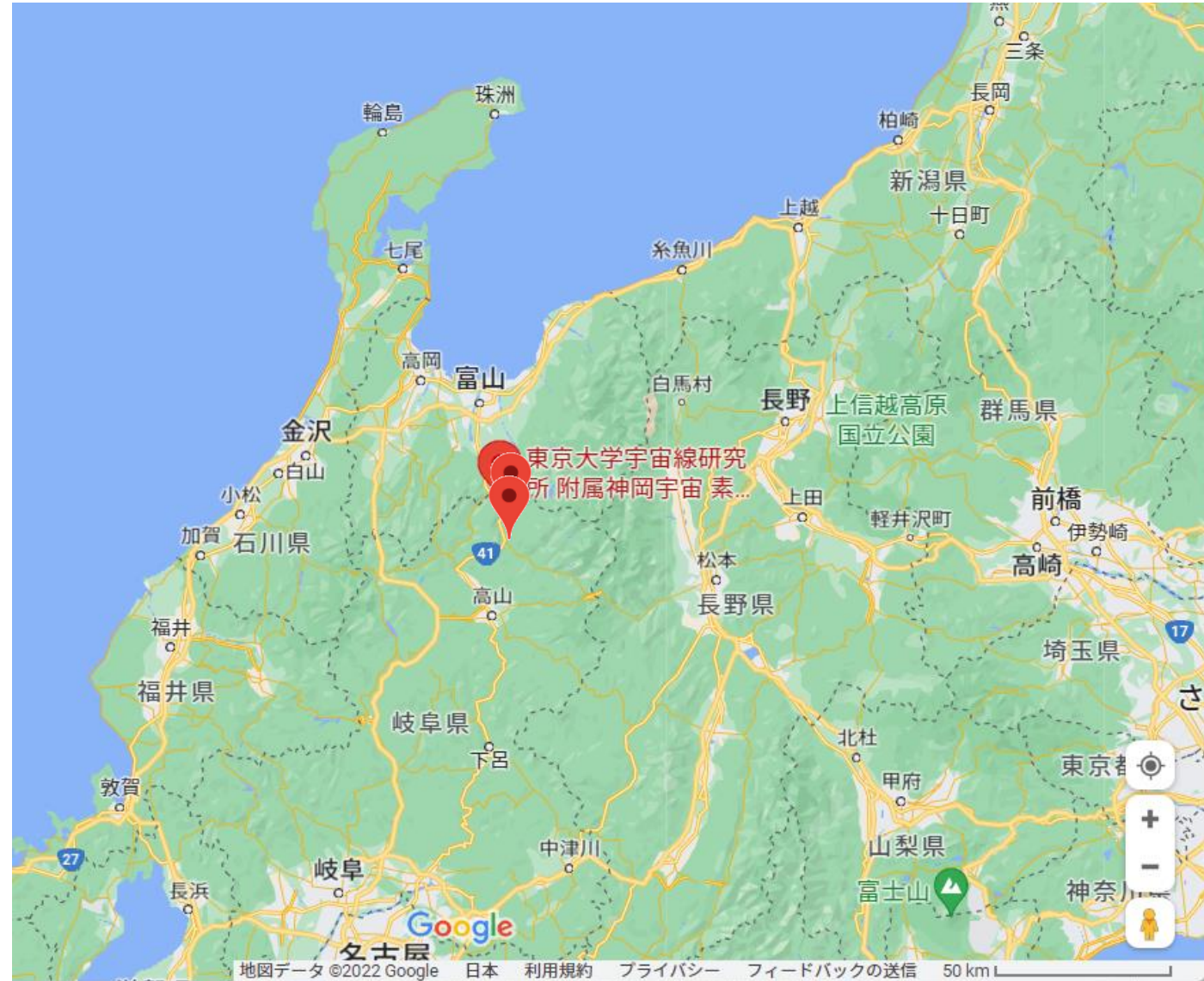


# 場所

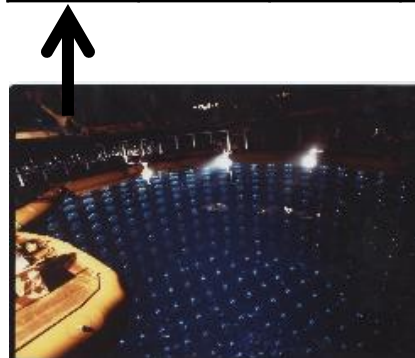
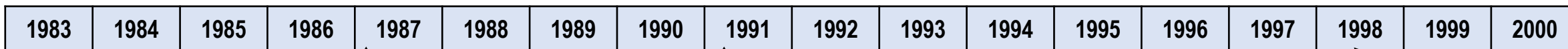
- 岐阜県飛騨市神岡町の地下坑内。
- 地下坑内で観測する理由は、宇宙線ミュオンの影響を減らすため。



岩盤厚み1000mの場合、ミュオンのレート(単位時間あたりに来る数)が約10万分の1に減る。



# カミオカンデ実験の歴史



カミオカンデ実験開始

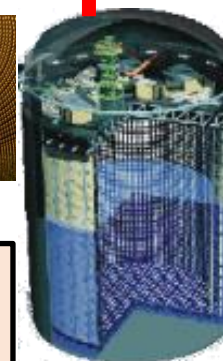


超新星1987Aからのニュートリノ観測

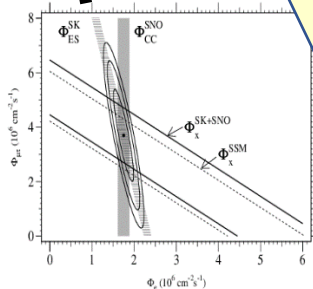
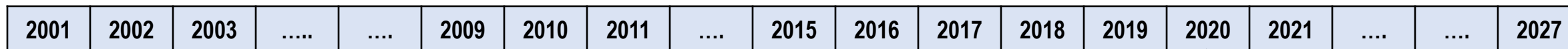
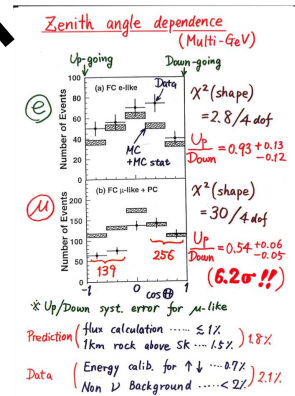
スーパーカミオカンデ (SK) 建設スタート



SK実験スタート  
1996年4月

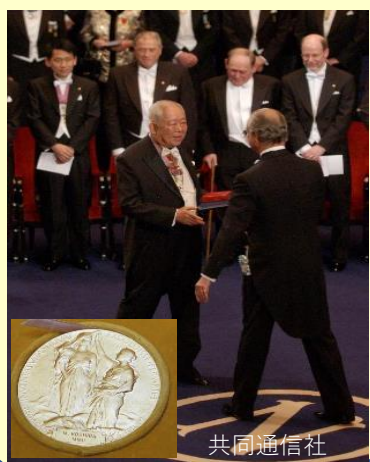


大気ニュートリノ振動の発見



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)

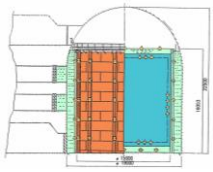
梶田先生ノーベル賞



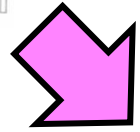
Nobel Media AB 2015  
Photo: Pi Frisk

純水にガドリニウムを溶かしたSK-Gdスタート

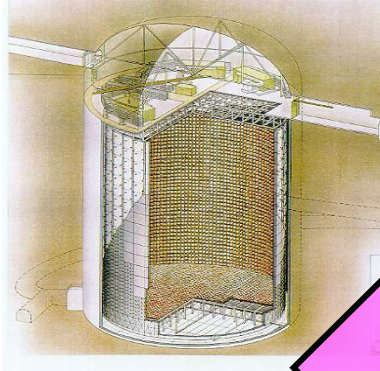
ハイパーカミオカンデ観測開始予定



**カミオカンデ:** 880 m<sup>3</sup> 有効体積 (3000 m<sup>3</sup> 全容積),  
直径: 16 m, 高さ: 16 m



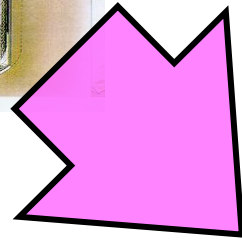
× ~25 倍



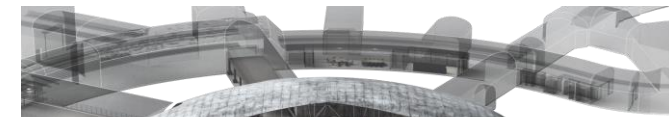
**スーパーカミオカンデ:** 2.25万トン 有効体積  
(5万トン 全容積),  
直径: 40 m, 高さ: 42 m

**稼働中(1996/4~)**

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

**2027年度から  
観測開始 (予定)**

# ハイパーカミオカンデ計画

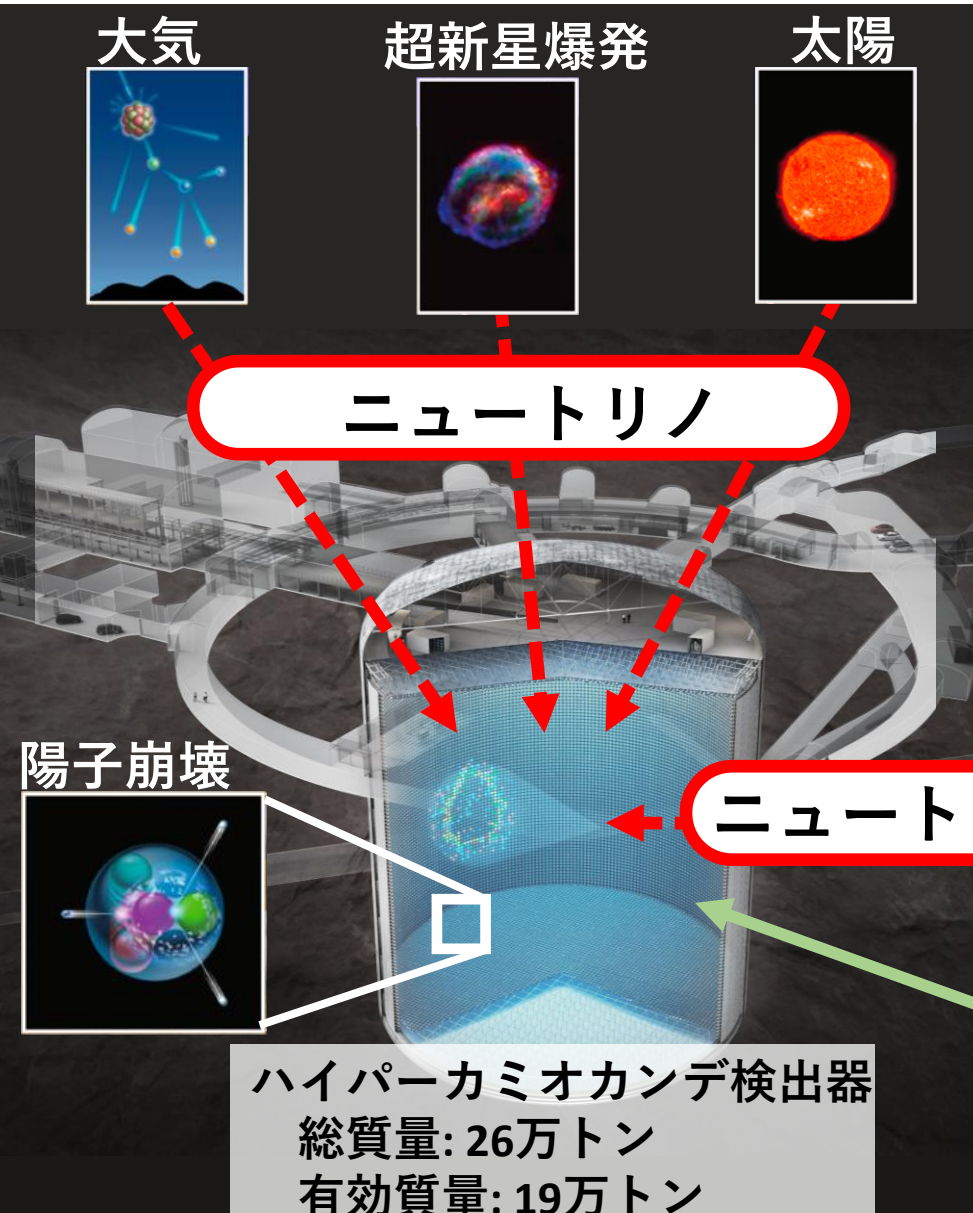
## ● ハイパーカミオカンデ検出器

- 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

- 物質・反物質の非対称性の測定
- 超新星爆発の機構解明の解明
- 陽子崩壊の探索
- ニュートリノ反応の精密測定
- 宇宙暗黒物質の間接的探索



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



写真提供: JAEA/KEK J-PARCセンター

# 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

- 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

## ● 物質・反物質の非対称性の測定

## ● 超新星爆発の機構解明の解明

- 陽子崩壊の探索
- ニュートリノ反応の精密測定
- 宇宙暗黒物質の間接的探索

← 今日はこちらに  
フォーカス

ニュートリノ

ニュートリノ

295 km

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

新開発光センサー  
(従来の2倍の感度)

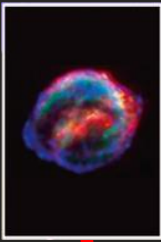
茨城県東海村J-PARCからの大  
強度・高品質ニュートリノ  
ビーム

写真提供: JAEA/KEK J-PARCセンター

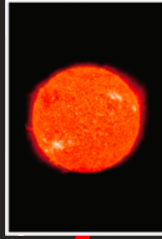
大気



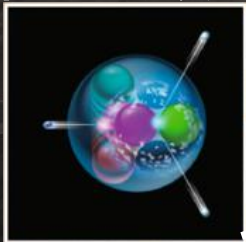
超新星爆発



太陽



陽子崩壊



# ハイパーカミオカンデコラボレーション

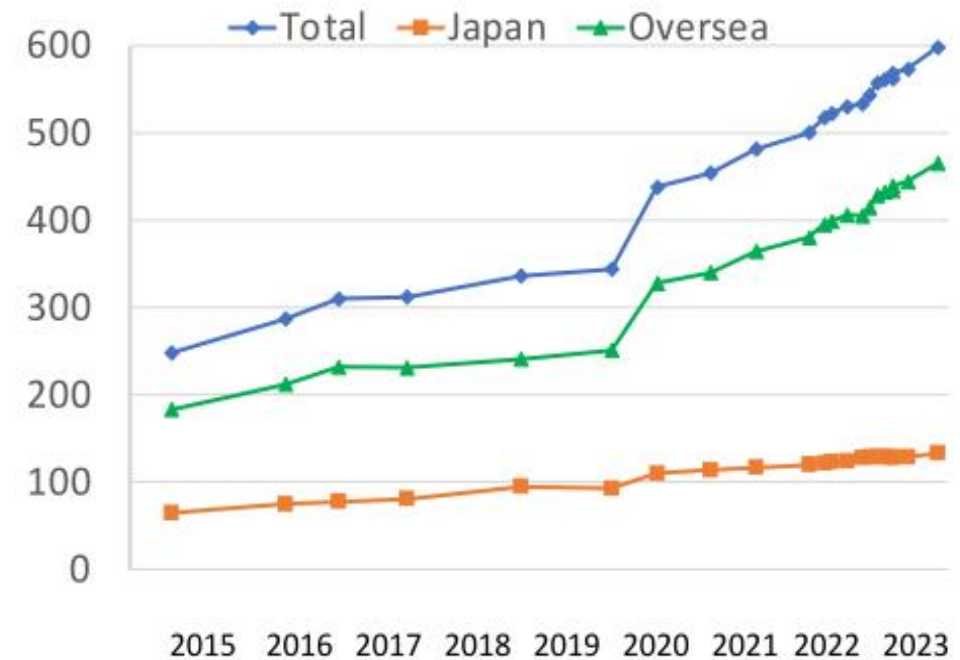
22か国、102機関、約600名による共同研究。(2023年11月時点)



Region	Members
Europe	357 members
Armenia	3
Czech	8
France	40
Germany	1
Greece	4
Italy	60
Poland	45
Russia	23
Spain	50
Sweden	5
Switzerland	16
Ukraine	4
UK	98
Americas	64 members
Brazil	3
Canada	43
Mexico	10
USA	8
Asia & Oceania	165 members
Australia	6
India	10
Korea	16
Japan	133
Africa	12 members
Morocco	12

## グループ参加者数

### NUMBER OF COLLABORATORS



# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

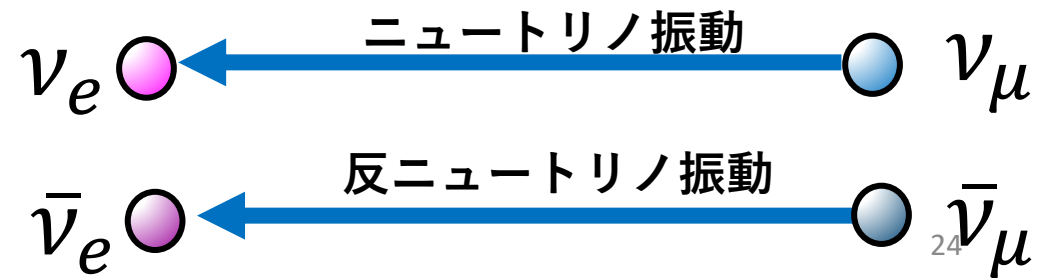
## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

# 物質・反物質の非対称性

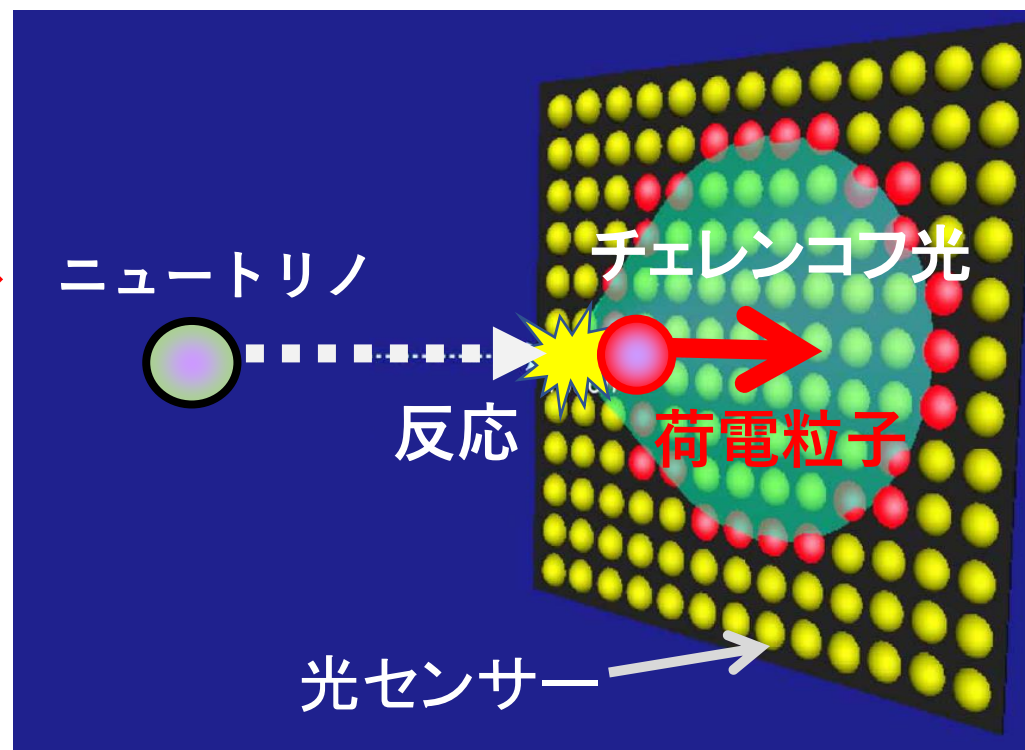
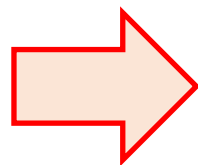
- ニュートリノ( $\nu$ )・反ニュートリノ( $\bar{\nu}$ )振動現象の精密測定から、物質・反物質の非対称性を探る。
- 茨城県・東海村にある J-PARC で生成されたニュートリノビームをハイパーカミオカンデで測定する。
- 295 km を飛行中に、ミューニュートリノが電子ニュートリノに、反ミューニュートリノが反電子ニュートリノに振動する確率を測定し、その違いを調べる。
- ミューニュートリノを打込む期間と反ミューニュートリノを打込む期間を変えて測定を行う。
- J-PARC から打込んだミュー(または反ミュー)ニュートリノの数を J-PARC 側でモニターしておき、HK で測定された電子(または反電子)ニュートリノの数を観測する。





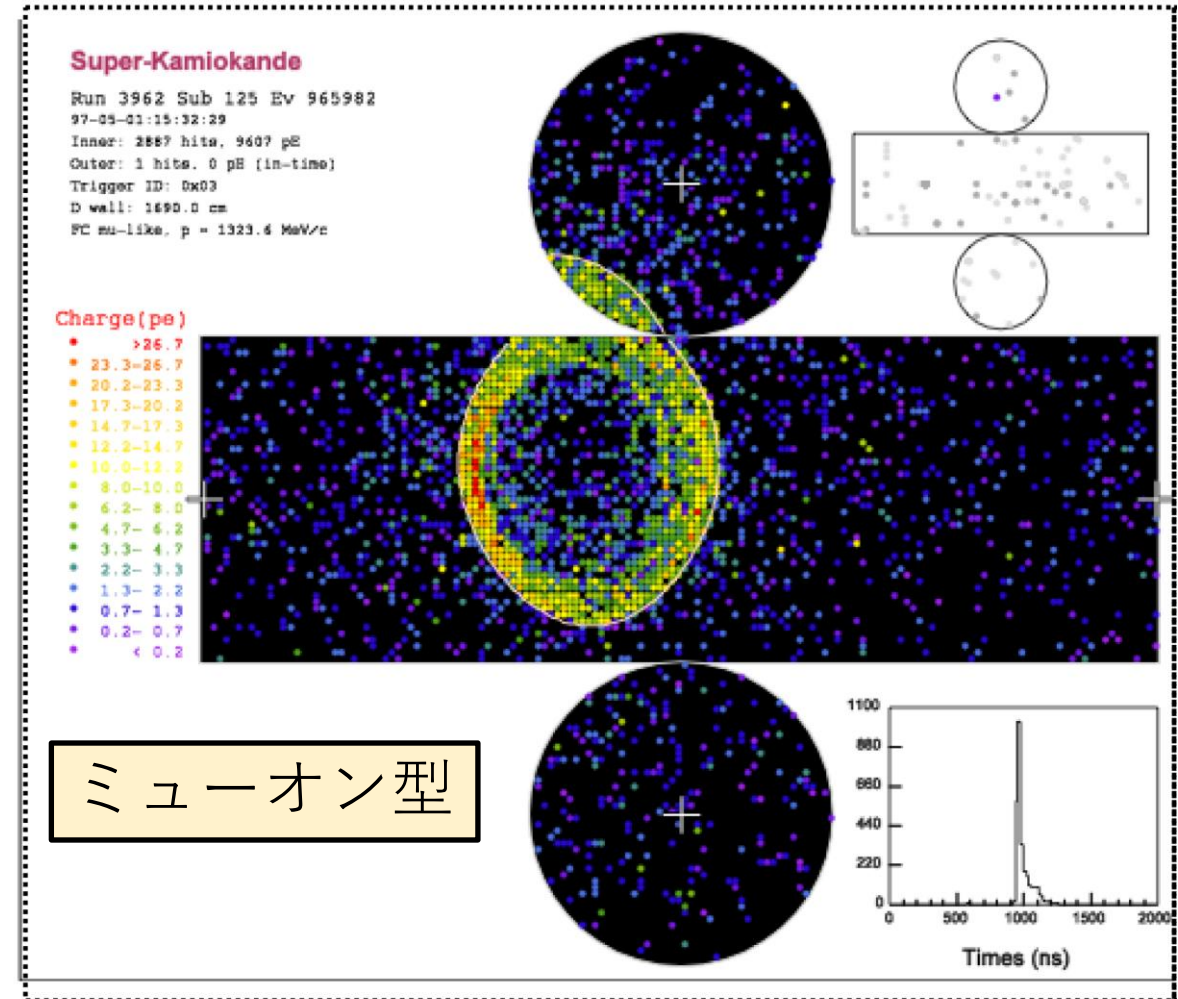
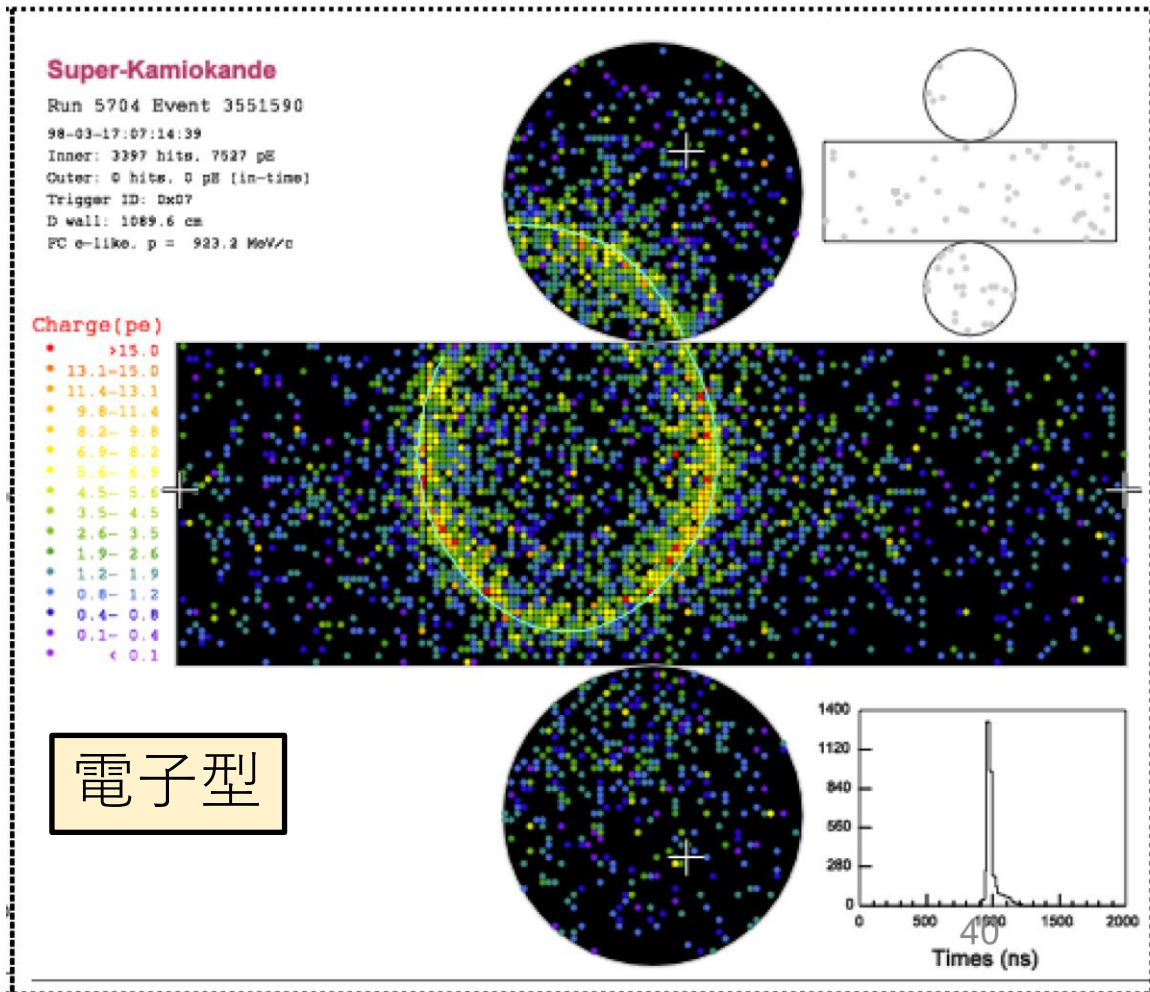
# 測定原理

- ニュートリノが水中で反応して発生する荷電粒子が、水中での光速より速く移動する時に出すチェレンコフ光を光センサーで測定する。
- 電子ニュートリノが反応すると電子が、ミューオンニュートリノが反応するとミューオンが発生する。
- チェレンコフ光が壁に到達し光センサーで測定されたときのパターンから、電子型なのかミューオン型なのかの判別をする。



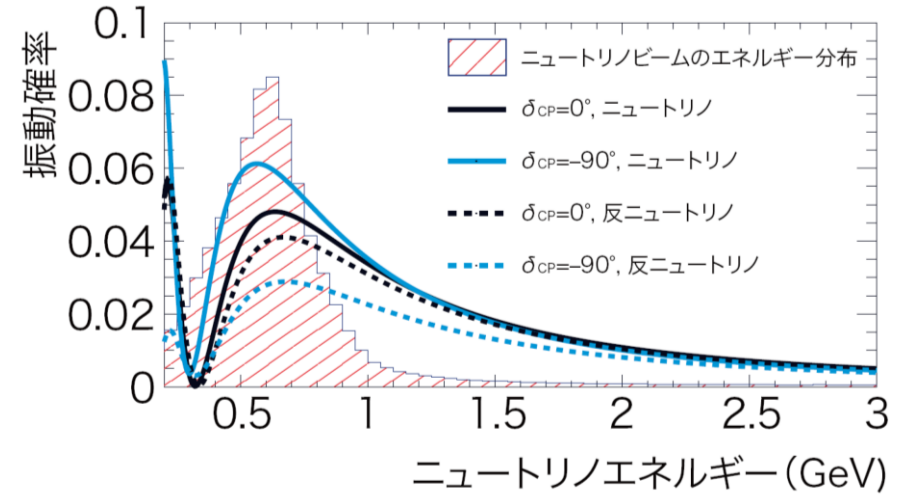
# 電子型事象とミュー型事象の弁別

- 下図はスーパーカミオカンデによるもの。リングのパターン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ためぼやけたリングになる。

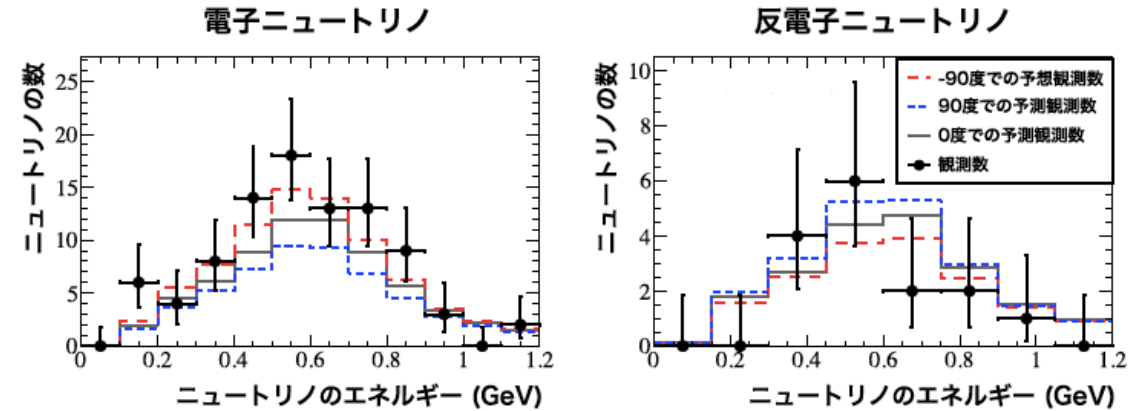


# ニュートリノ・反ニュートリノの振動確率

- 右図は、エネルギーの違いによる振動確率を表す。
- ニュートリノビーム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) それぞれの振動確率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% ( $2\sigma$ ) の信頼度で観測されている。
- ただし、対称性の破れの発見を主張するには、99.99995% ( $5\sigma$ ) 以上の信頼度が必要な状況にある。

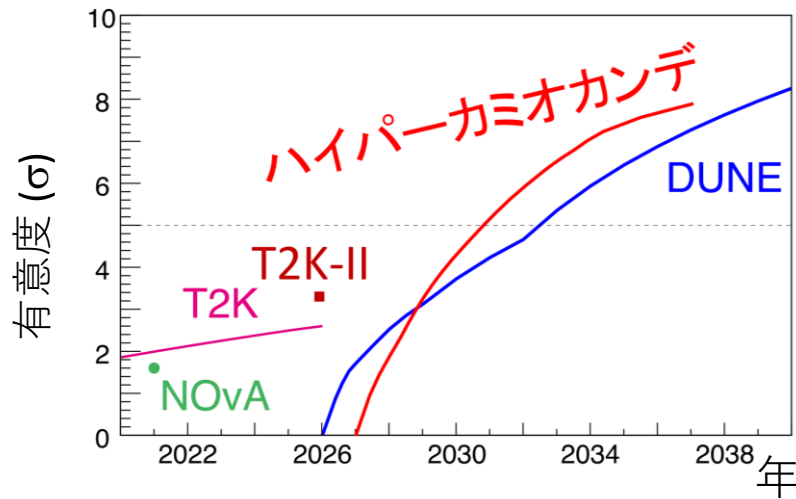


→ 統計(観測事象数)を1桁以上増やす必要がある。  
 HK 計画により、同じ観測時間で20倍以上  
 の統計増加を実現することで発見を目指す。

	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

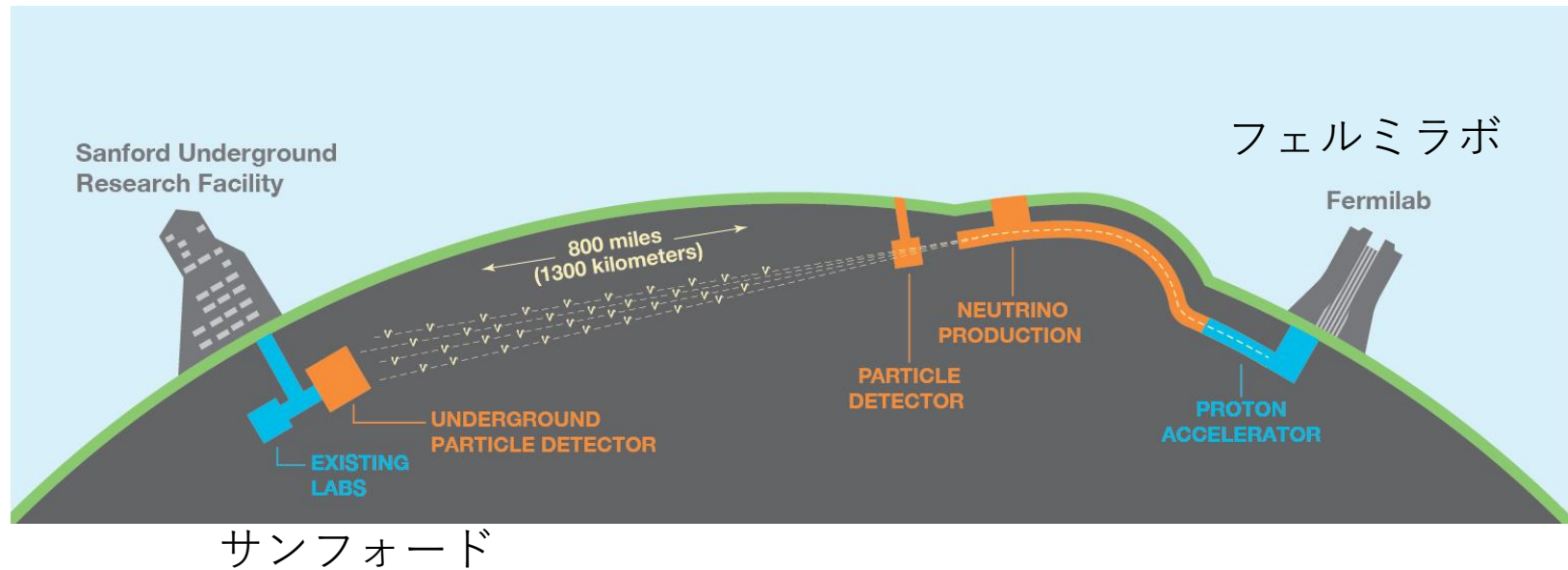
# 競合実験: DUNE

- 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。



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)

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



# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

# ニュートリノによる超新星爆発機構の解明



爆発前



爆発後

↑ 地球から約16万光年 (~50 kpc)  
離れたところにある大マゼラン星雲  
の超新星爆発 (SN1987A)

SN1987A アンゲロオーストラ  
リア天文台 David Malin 撮影

- 星が一生の最後に起こす大爆発を超新星爆発とよぶ。
  - 質量が太陽の8倍以上の大質量星は、重力崩壊型の超新星爆発を起こし、爆発の後には中性子星またはブラックホールになる。
  - 爆発のエネルギーの99%以上がニュートリノとして放出され、残り1%以下が星を吹き飛ばしたり輝いたりする光のエネルギーになる。その際に、重元素合成が起こると考えられている。
  - ニュートリノは重力崩壊が起こる星の中心部から直接出てくるため、崩壊についての情報を保持している。
- ニュートリノの観測によって、爆発機構の詳細が分かる。

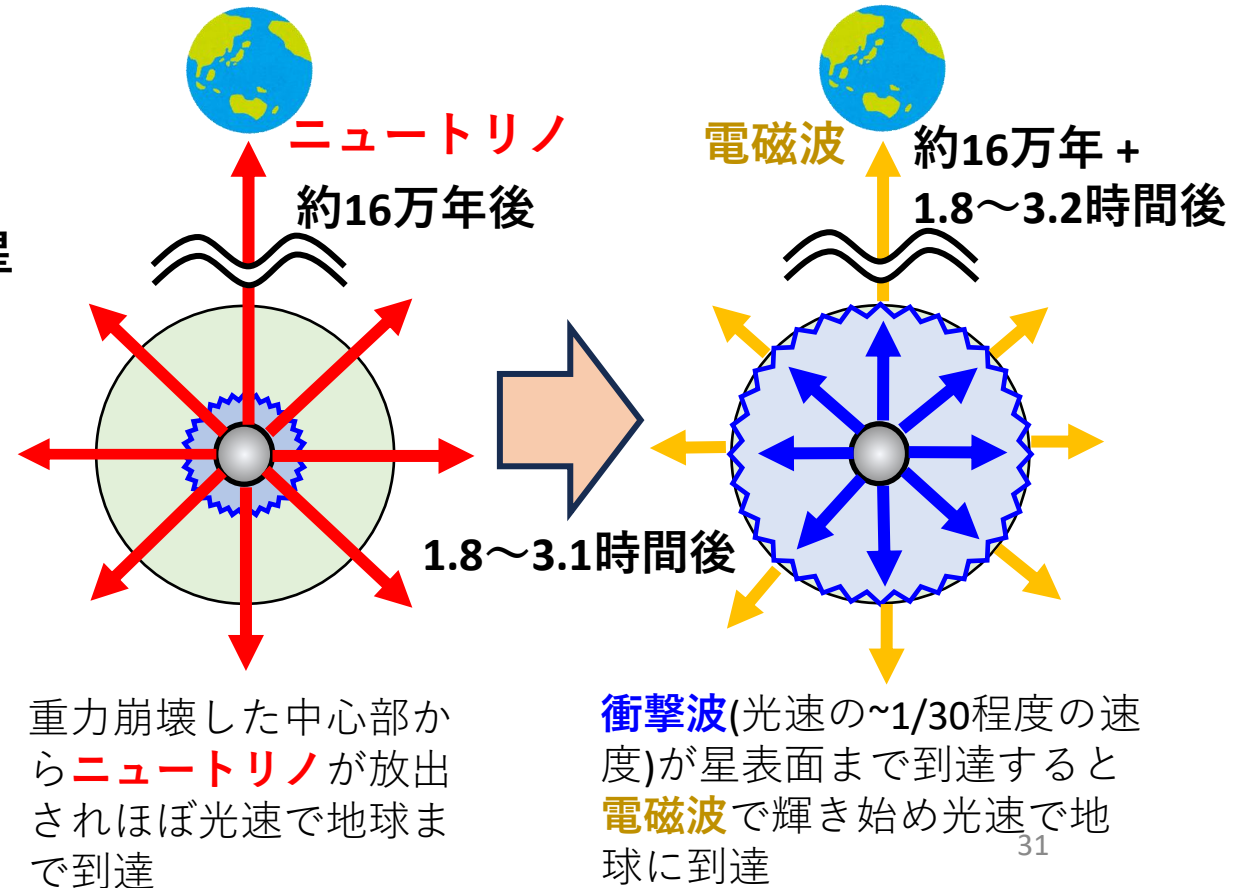
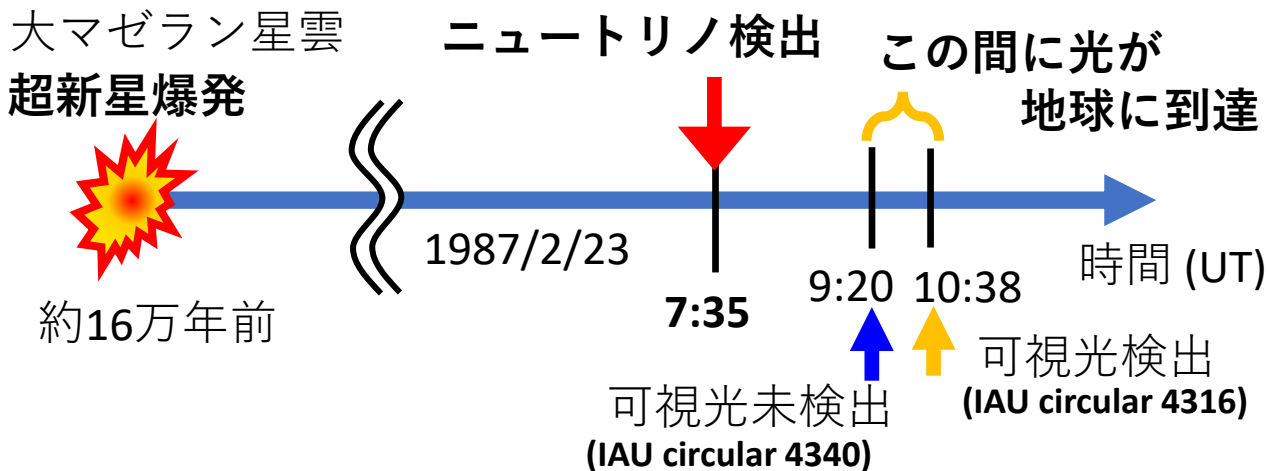
- これまで、超新星爆発ニュートリノの観測例は1987年2月に起きたSN1987Aの一例のみ。カミオカンデ、IMB、Baksanで観測された。
- カミオカンデによる業績により、小柴昌俊博士が2002年にノーベル物理学賞を受賞した。

# SN1987A の観測

- 1987年2月24日1時30分(世界時)、チリでシュルトン氏が可視光により SN1987A を発見。
- 2月23日7時35分35秒 (±1分): カミオカンデが、約13秒間に11個のニュートリノを検出。アメリカのIMB、ロシアのBaksan を合わせると全部で24個のニュートリノが検出された。
- 世界中で撮影された他の可視光画像が調べられ、2月23日の9:20頃には写っていないSN1987Aが、10:38頃には写っていたことから、超新星爆発からの光が地球に届いたのは 9:20~10:40 の間で、**ニュートリノが光よりも 1.8~3.1時間ほど早く地球に到達していたことが分かった。**

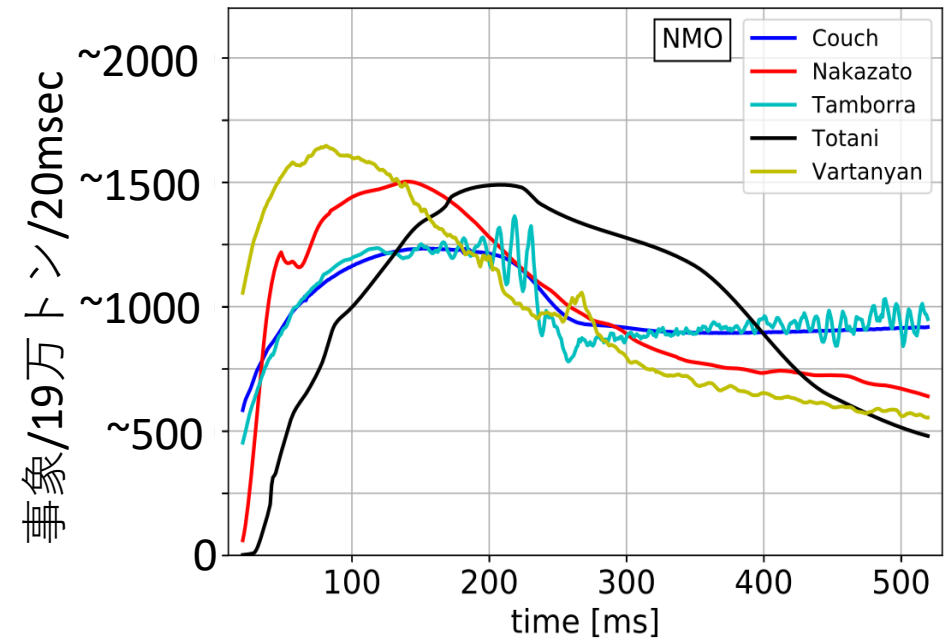
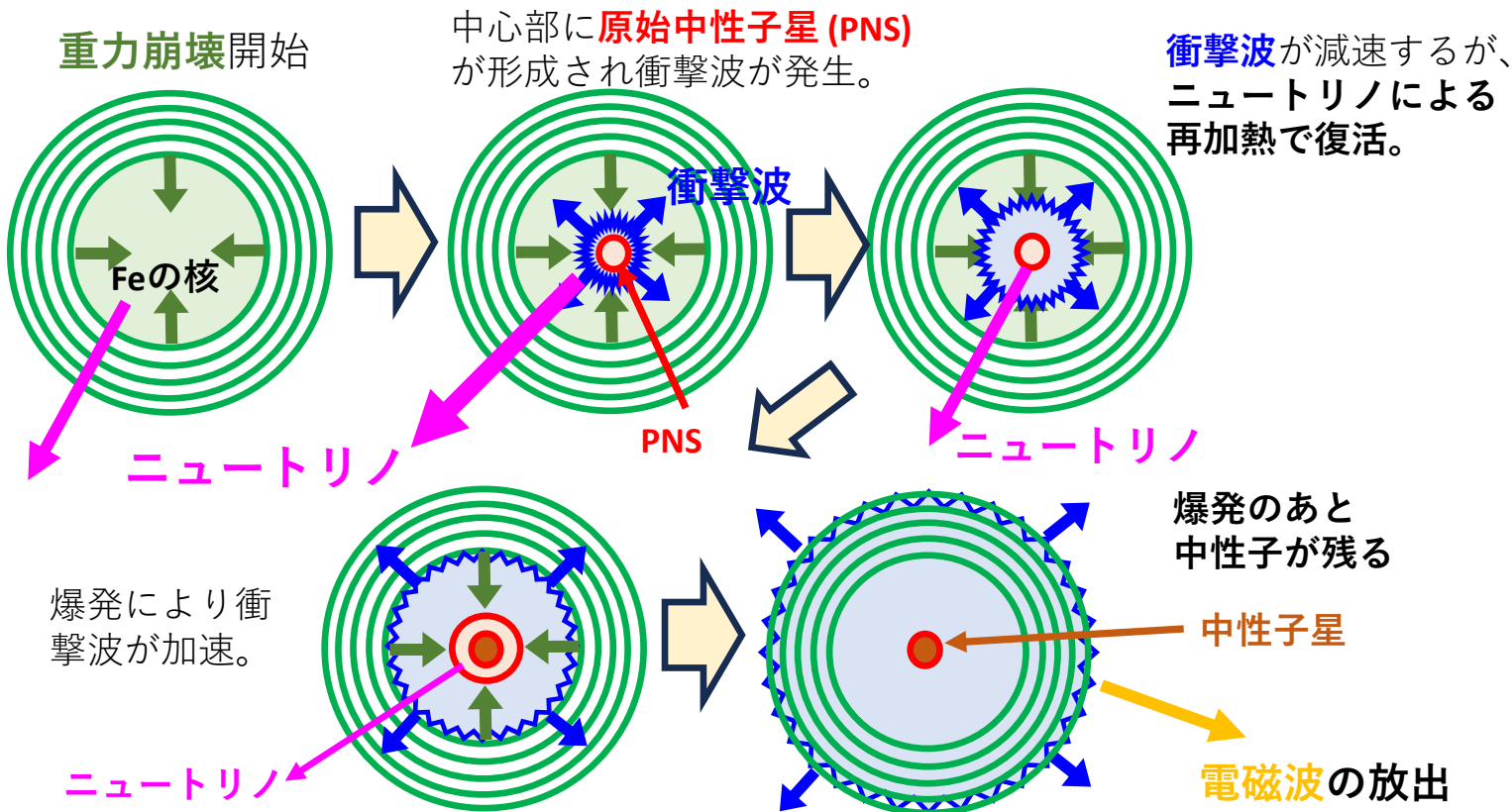
- 時間差から  
→ ニュートリノと光の速度の違い < ~0.0000002%
- 時間差と衝撃波速度から  
→ 爆発直前の星は太陽半径の約50倍ほどの青色超巨星

## マルチメッセンジャー天文学の始まり



# 超新星爆発メカニズムの詳細説明

- カミオカンデ等により観測された超新星爆発からのニュートリノ24事象により、これまでに考えられている爆発メカニズムの大枠が正しいことが分かった。
- ハイパーカミオカンデでは、銀河中心付近 (10 kpc) で超新星爆発がおきると、50000~100000 事象ものニュートリノの観測が期待されており、大量のニュートリノ事象の時間分布、エネルギー分布等を見ることで、爆発メカニズムについての様々なモデルの検証を詳細に行うことが可能になる。



ハイパーカミオカンデ(有効体積19万トン)で観測が期待される事象の時間分布。Astrophys. J. 916 (2021) 15 の図3を 10kpc に対応させた。

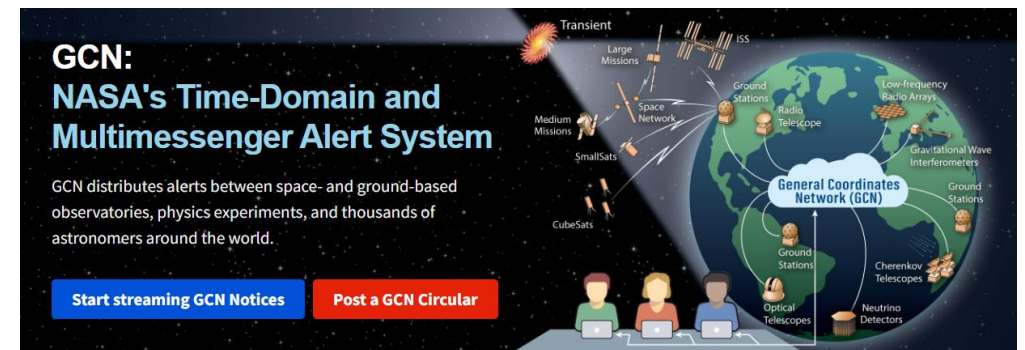


# マルチメッセンジャー天文学の新展開

- SN1987A の時には、超新星爆発からの電磁波が最初に地球に到達した時刻は正確には分からず幅を持っていた。
- ニュートリノを検出したらいち早く世界中の天文施設にアラートを送り、超新星爆発の方向を伝え、電磁波観測をスタンバイさせる必要がある。
- 現行スーパーカミオカンデは、ガドリニウムを添加したSK-Gd にアップグレードされたことで、**1.5分以内に4度以下の精度(10 kpc 先の時)で超新星爆発の方向を特定しアラートが送れる**ようになっている。  
(NASAが運営する General Coordinates Network (GCN) 等に自動でアラートを送信)
- なお、銀河中心程度までの距離で超新星爆発が起こると、重力波検出器 (LIGO, Virgo, KAGRA) の目標感度内で重力波が検出され、強い重力場を作る原始中性子星付近での爆発時の物質の動きについての理解が進むと期待されている。

→ 電磁波、ニュートリノ、重力波による観測を合わせることで超新星爆発のメカニズムの理解が大きく進み、物質進化についての知見が得られる。

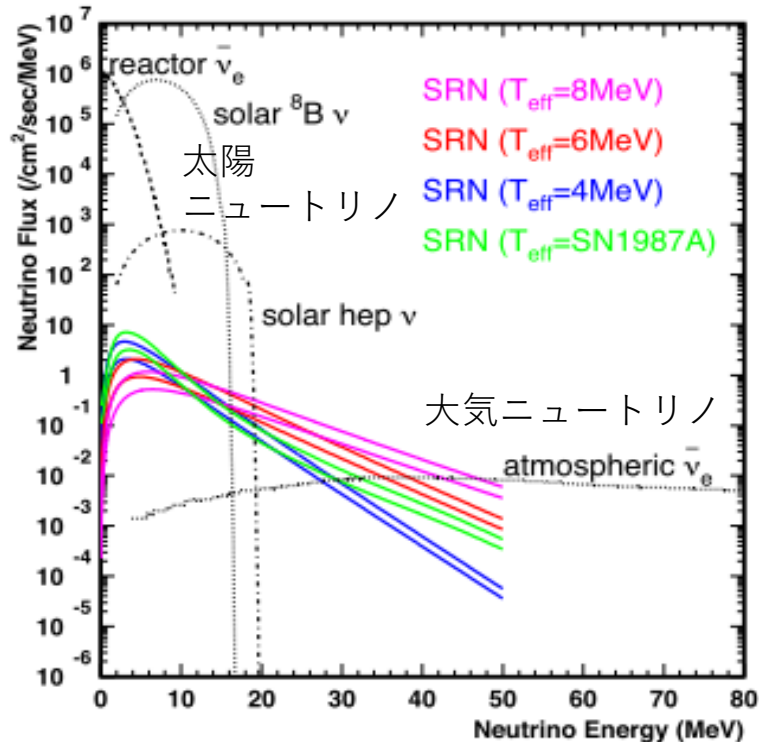
重力波が2015年に初観測(GW150914)されてから、マルチメッセンジャー天文学は新しい領域に入ったと言える。



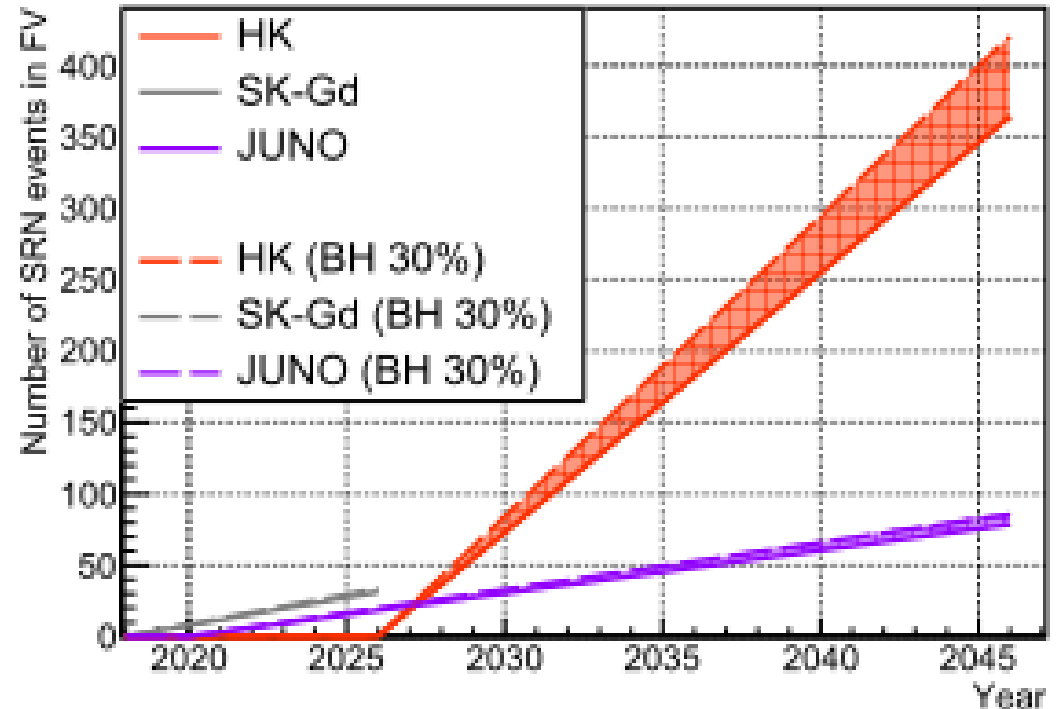
# 超新星背景ニュートリノ

- 我々の銀河系内もしくは近傍で超新星爆発が起こる頻度は、30-50年に1度といわれている。
- 宇宙の始まりから現在までに起きてきた超新星爆発からのニュートリノが我々の周辺を飛び回っており、超新星背景ニュートリノと呼ばれている。
- 宇宙には $10^{20}$ 個の星があり、そのうちの0.1%にあたる $10^{17}$ 個は超新星を起こしてきた大質量星であり、これらから生まれた超新星背景ニュートリノの観測から超新星爆発の全貌がつかめる。

予想される超新星背景ニュートリノのフラックス



HK等で期待される検出数 (有効温度 6 MeV を仮定)



# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに



2021年5月28日 着工記念式典



# 現在 空洞掘削中

2022年3月7日

アクセストンネル(全長約2km)掘削完了



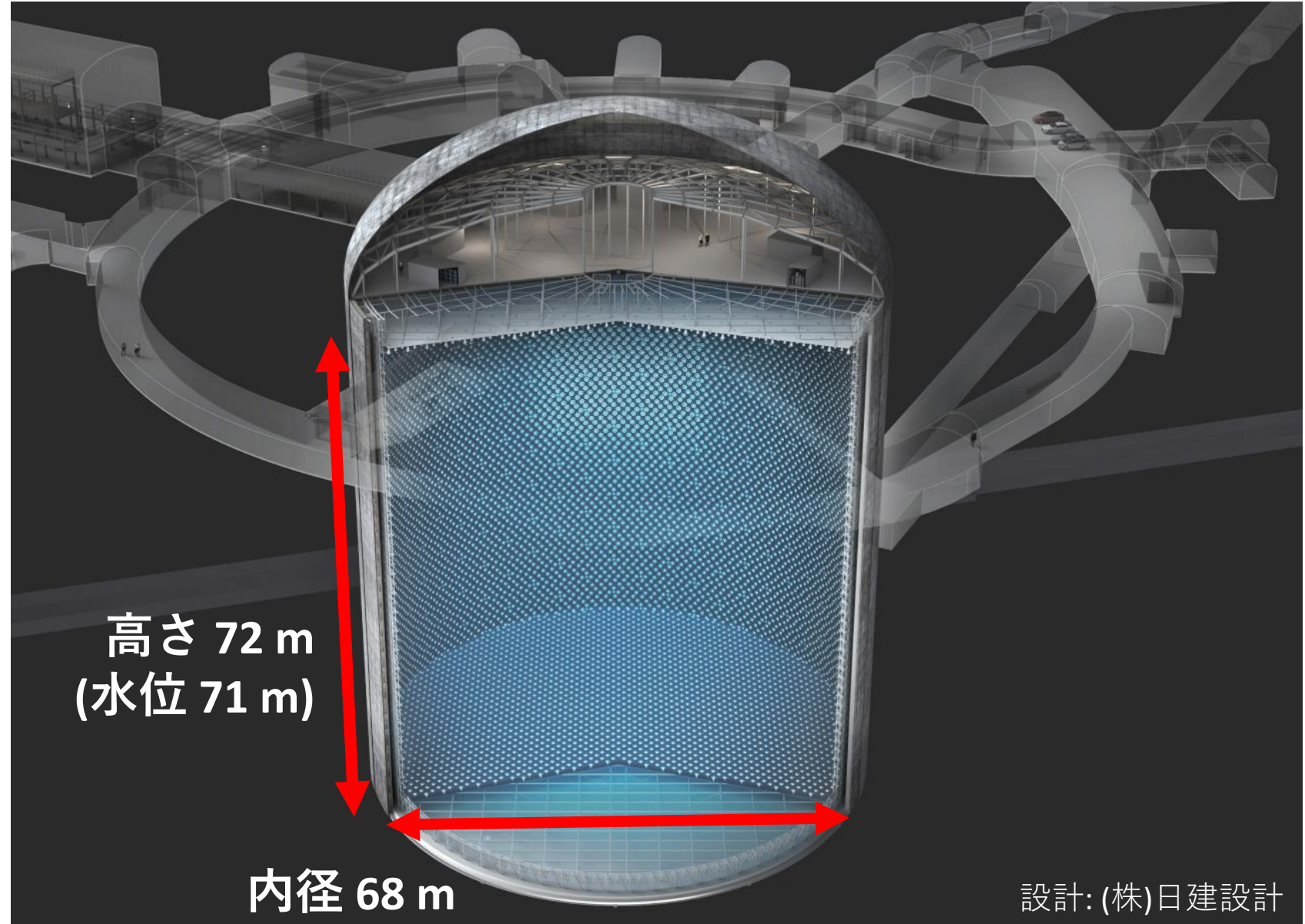
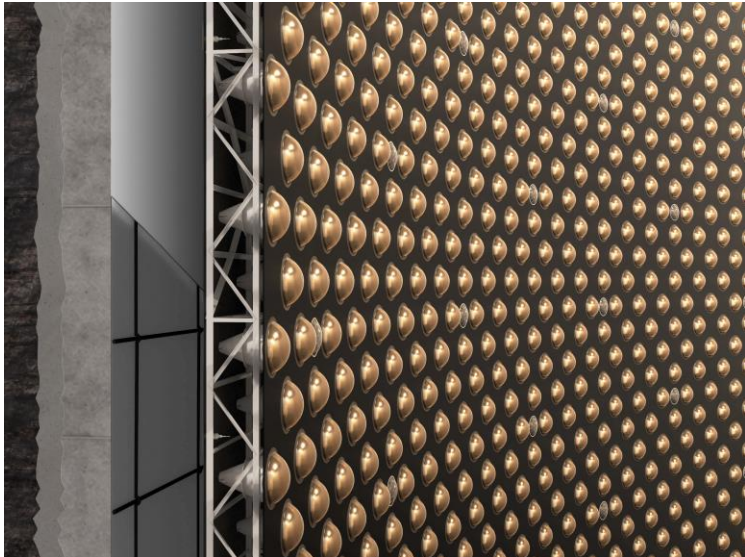
2022年6月23日 空洞ドーム中心部に到達



2023年10月3日 完成した本体空洞ドーム部 (直径69m、高さ21m)。現在(2024年4月)は、ドーム下の円筒部を掘削中。

# 水槽・光センサー支持架構の実設計完成

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した。  
2025年より、現地施工開始予定。



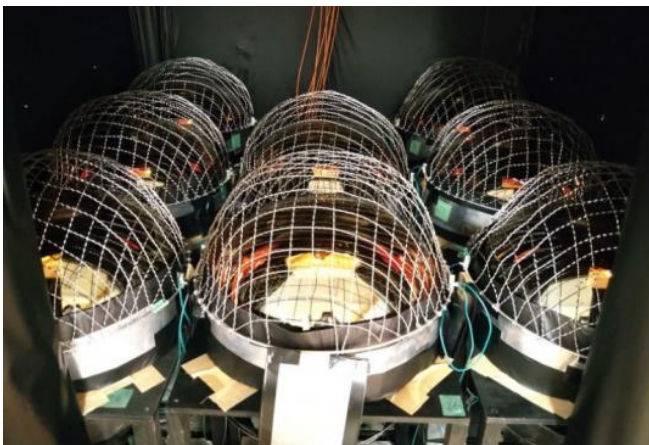
# 検出器構成機器の開発・生産・品質チェック

- 2027年観測を目指して、世界中で各要素の準備が進められている。

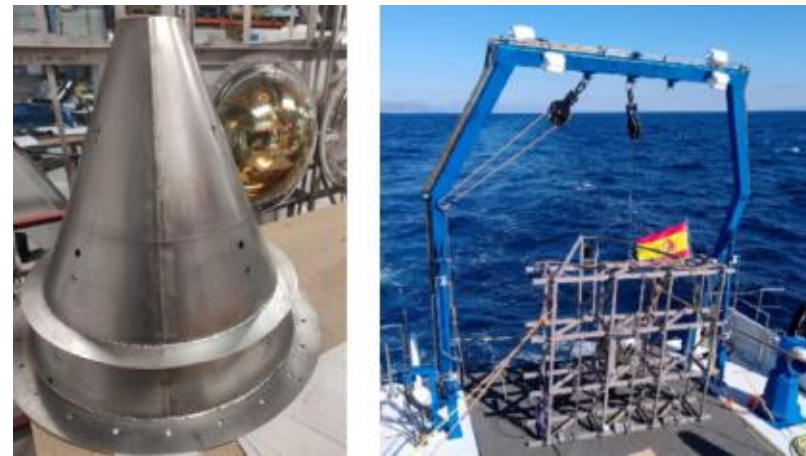
機器設置モックアップ試験 (日本・柏)



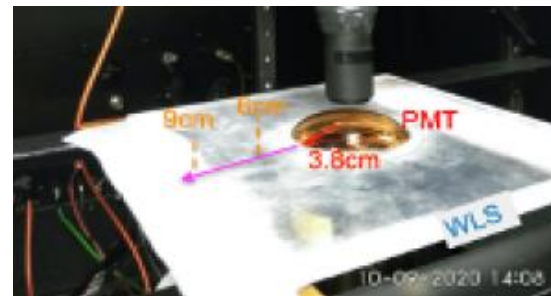
PMT品質チェック (日本・神岡)



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)

# 講演内容

## 1. はじめに

- 「物質のある宇宙」はどうしてできたのか？
- 物質はどのように進化してきたのか？

## 2. ニュートリノとは？

- 素粒子ニュートリノの性質
- ニュートリノ振動

## 3. ハイパーカミオカンデ計画

- カミオカンデの歴史
- 物質・反物質の非対称性の測定
- 物質進化の理解の試み
- 建設状況

## 4. おわりに

# 4. おわりに

ハイパーカミオカンデ (HK) は、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？
- 物質はどうやって進化してきたのか？

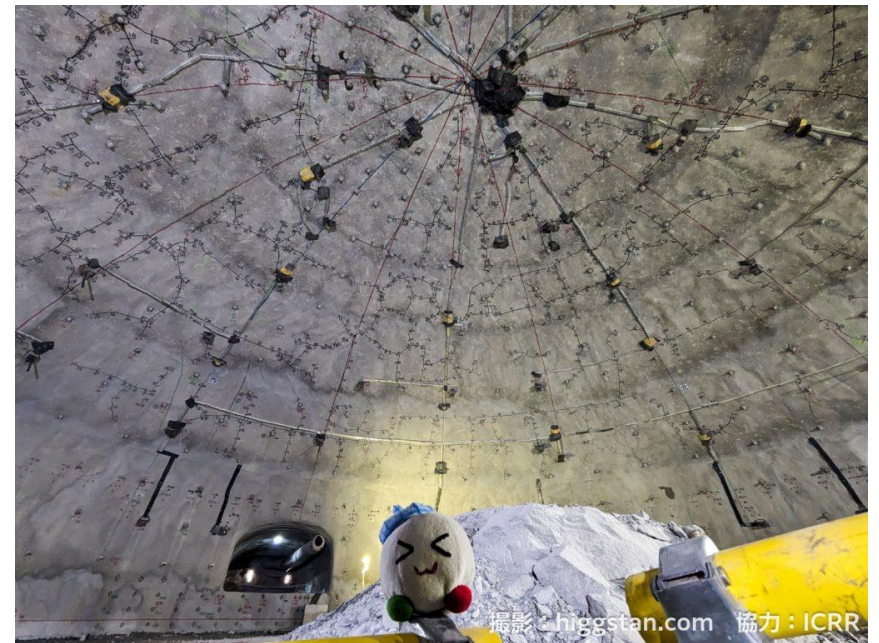
といったことを、ニュートリノという切り口で解き明かす壮大なプロジェクト。

これまでに、ニュートリノ天文学の創始・ニュートリノ質量の発見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。

もともとは、陽子崩壊を探索するために計画されたカミオカンデが、それまでニュートリノについて知られていなかった性質を解き明かし、素粒子標準理論を書き換え、マルチメッセンジャー天文学の先駆けとなった。

HK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るのでHKの成長を暖かく見守ってください。



ひっぐすたん 【HKちゃん成長日記05】 より

<https://higgstan.com/>