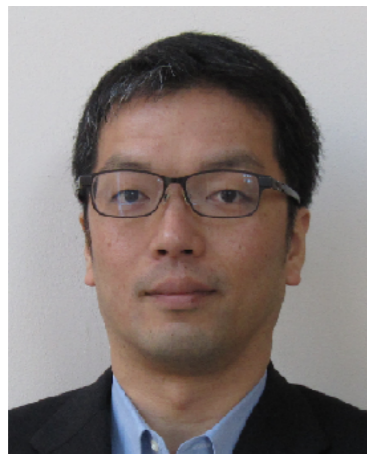


ニュートリノで探る 素粒子から宇宙まで



© HiggsTan higgstan.com

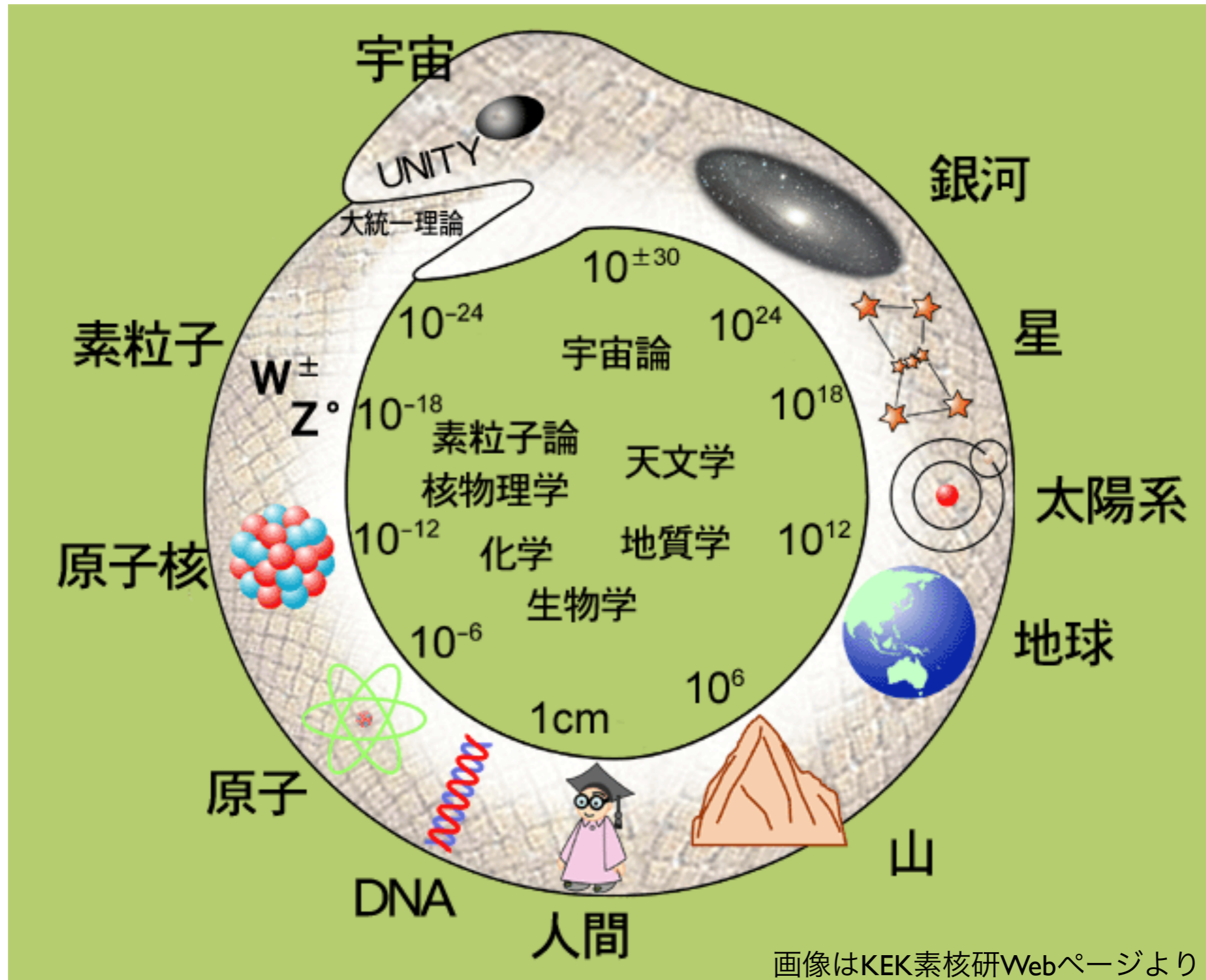


大学院理学系研究科 物理学専攻

横山 将志

「素粒子から宇宙まで」

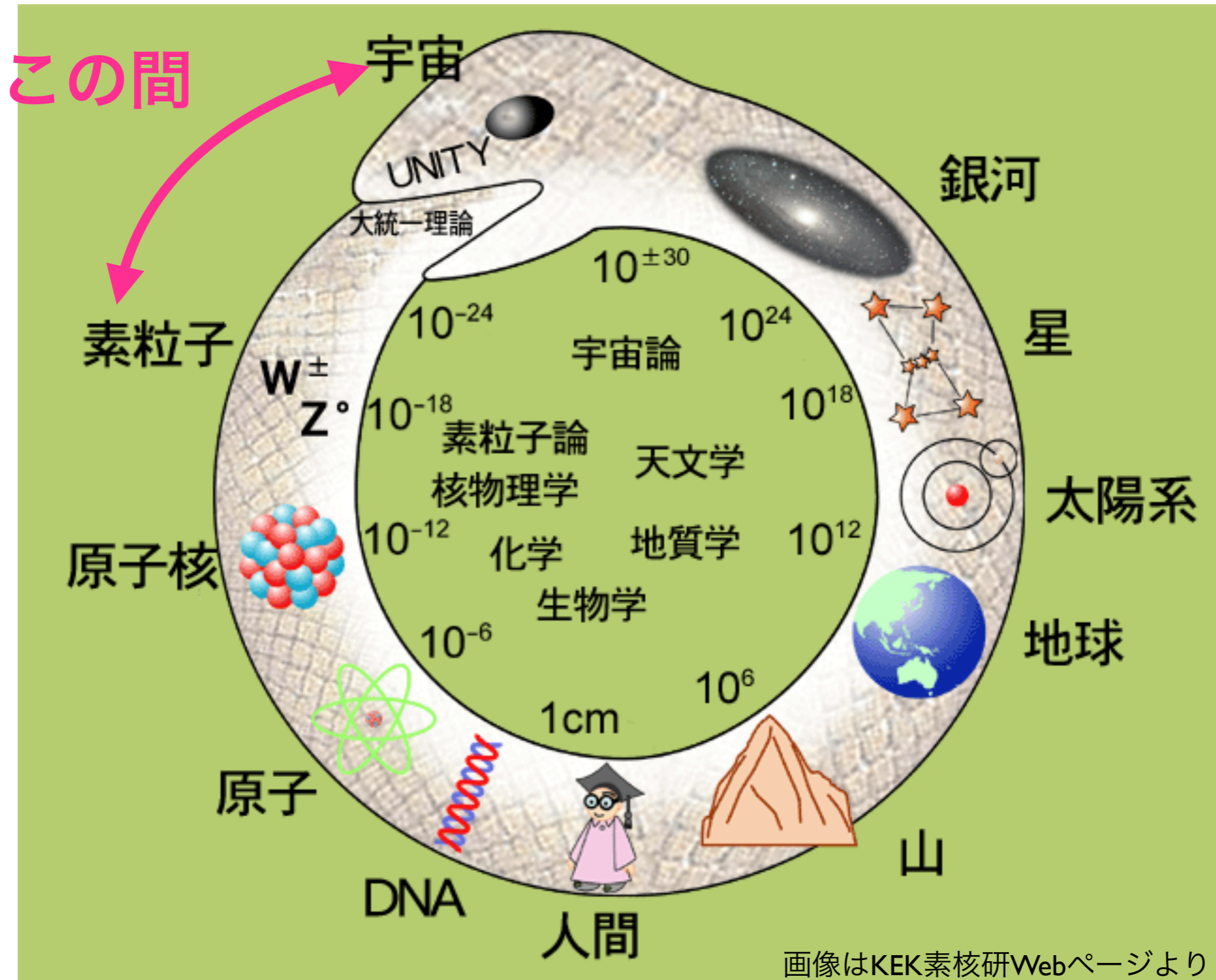
自然の階層性 ウロボロスの蛇



画像はKEK素核研Webページより

「素粒子から宇宙まで」

自然の階層性 ウロボロスの蛇

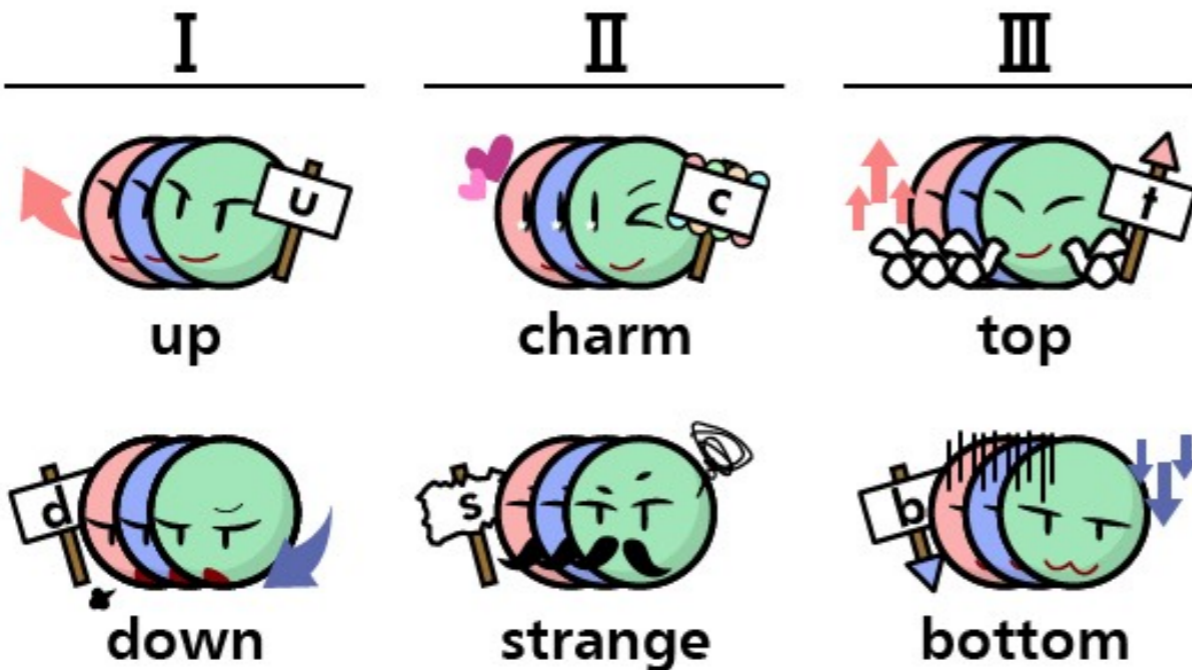


画像はKEK素核研Webページより

素粒子・ニュートリノ

物質粒子 matter (fermions)

クォーク
quarks



レプトン
leptons



ニュートリノ

ゲージ粒子 gauge bosons

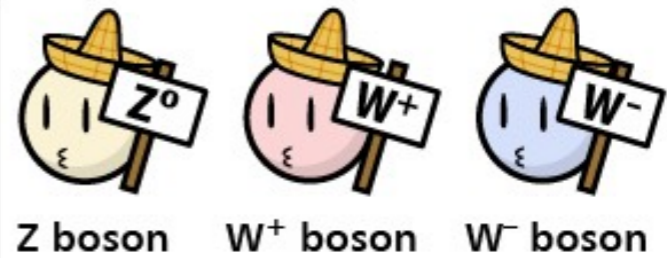
電磁気力
electromagnetic



強い力
strong



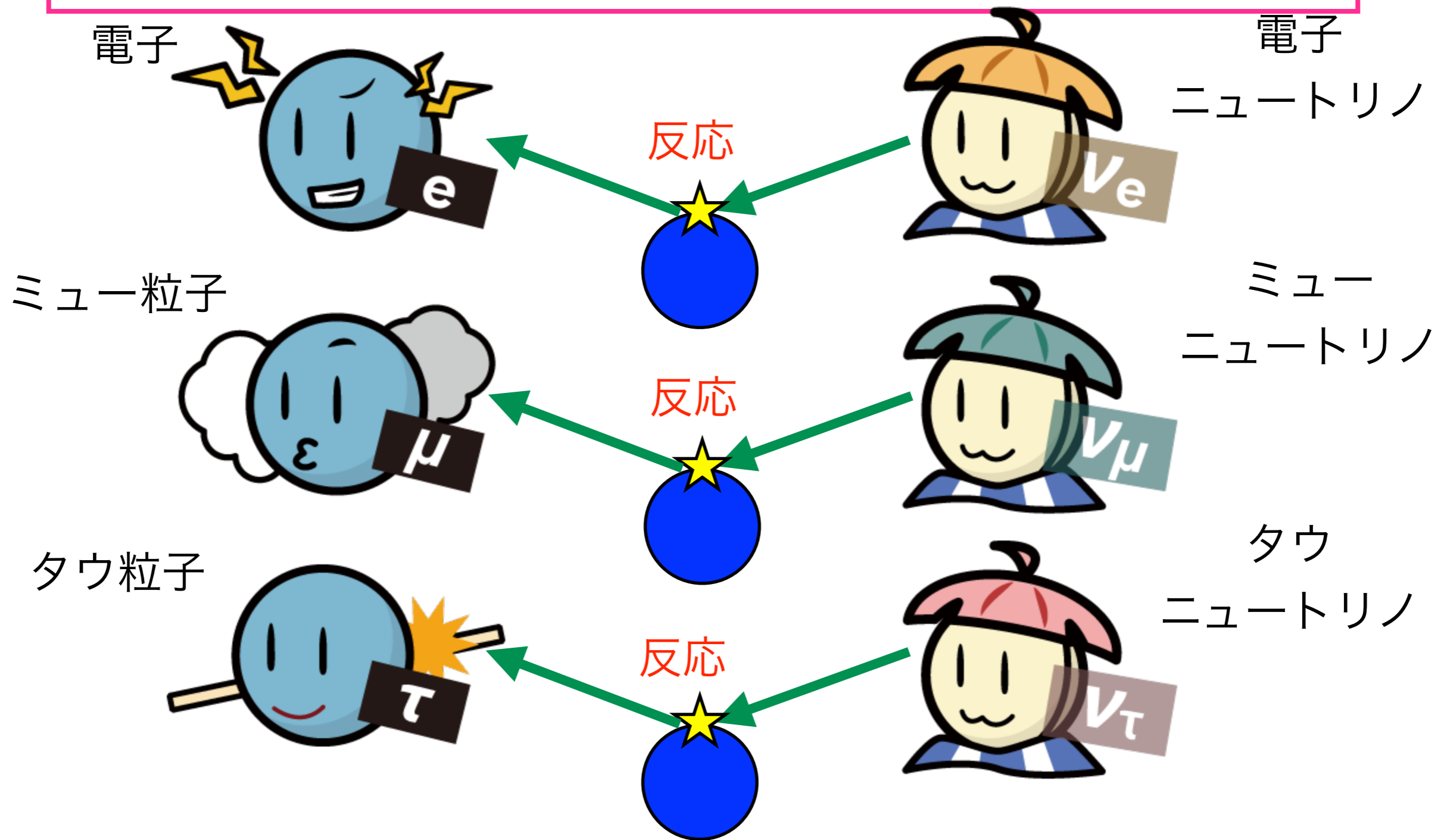
弱い力
weak



ヒッグス粒子 Higgs bosons

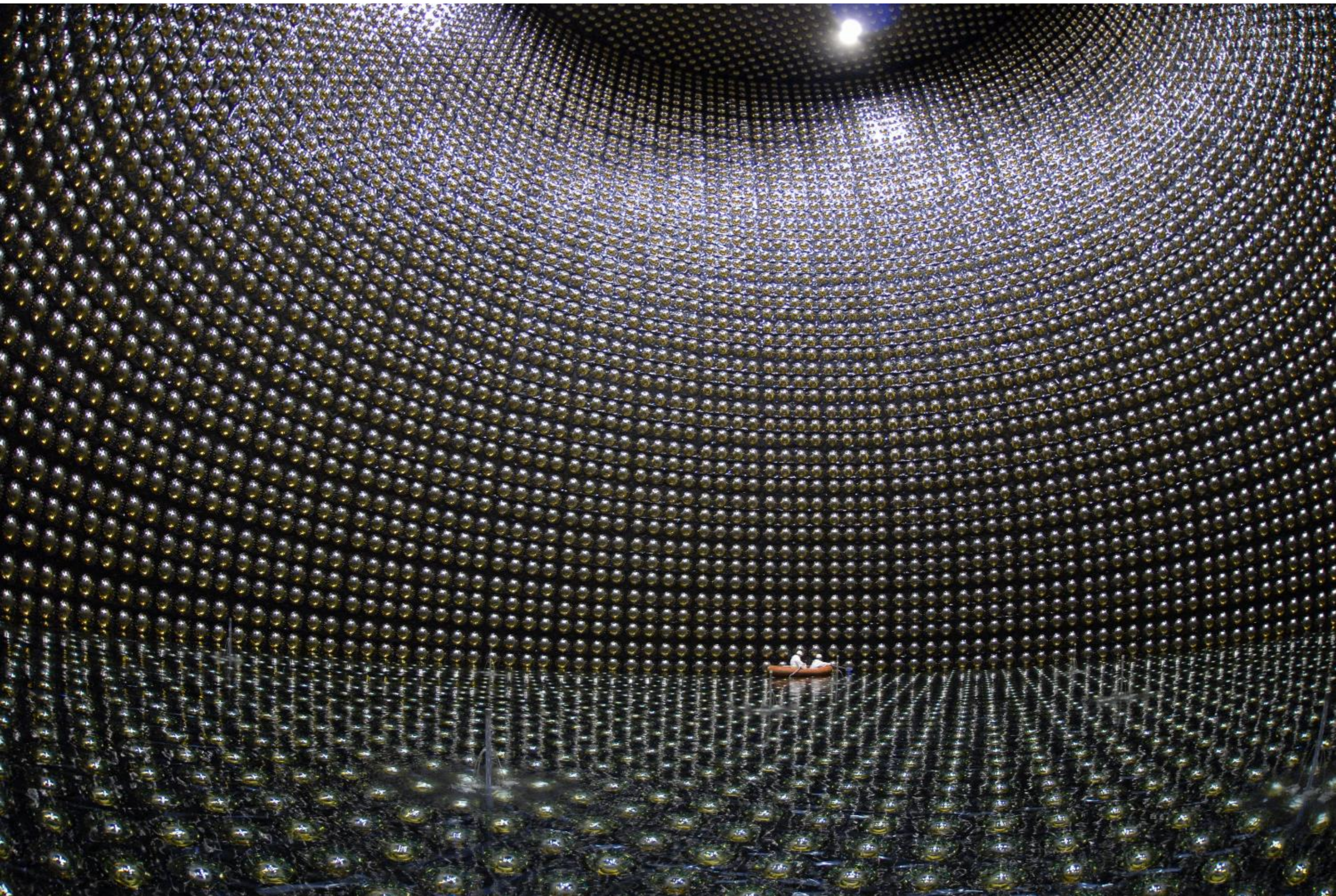


ニュートリノは3種類

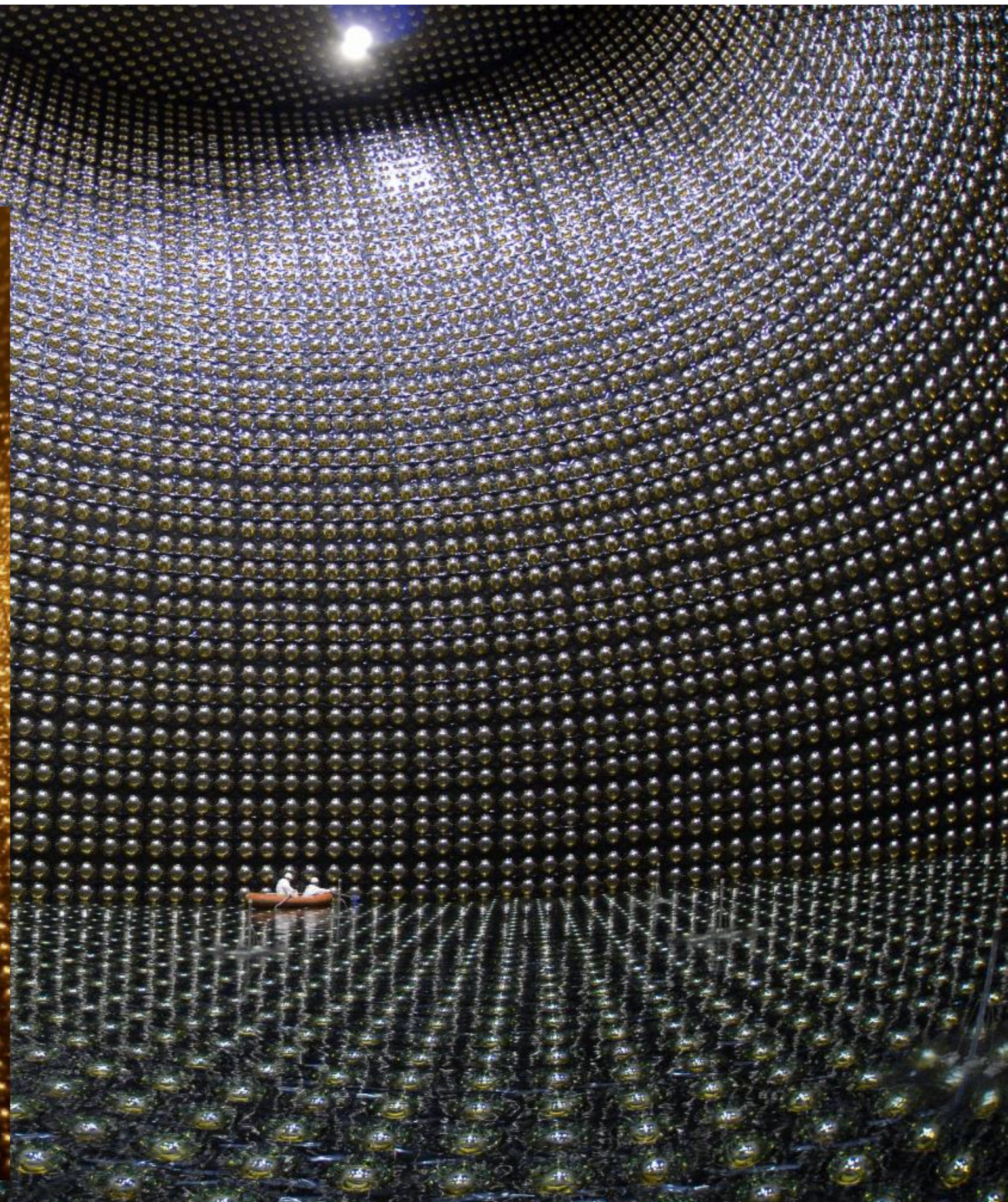


反応（衝突）した時に**どの粒子に変化するか**で見分ける
ただし稀にしか反応しないので、巨大な観測装置が必要

スーパーカミオカンデ (東京大学宇宙線研究所)



スーパーカミオカンデ (東京大学宇宙線研究所)



スーパーカミオカンデ

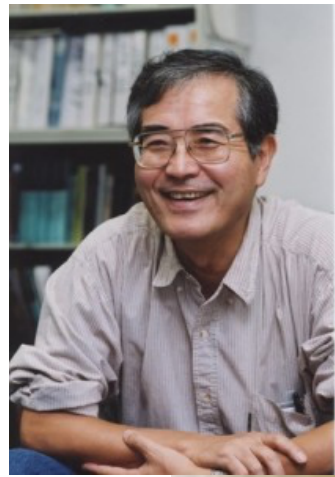
岐阜県飛騨市神岡町

1000mの地下に

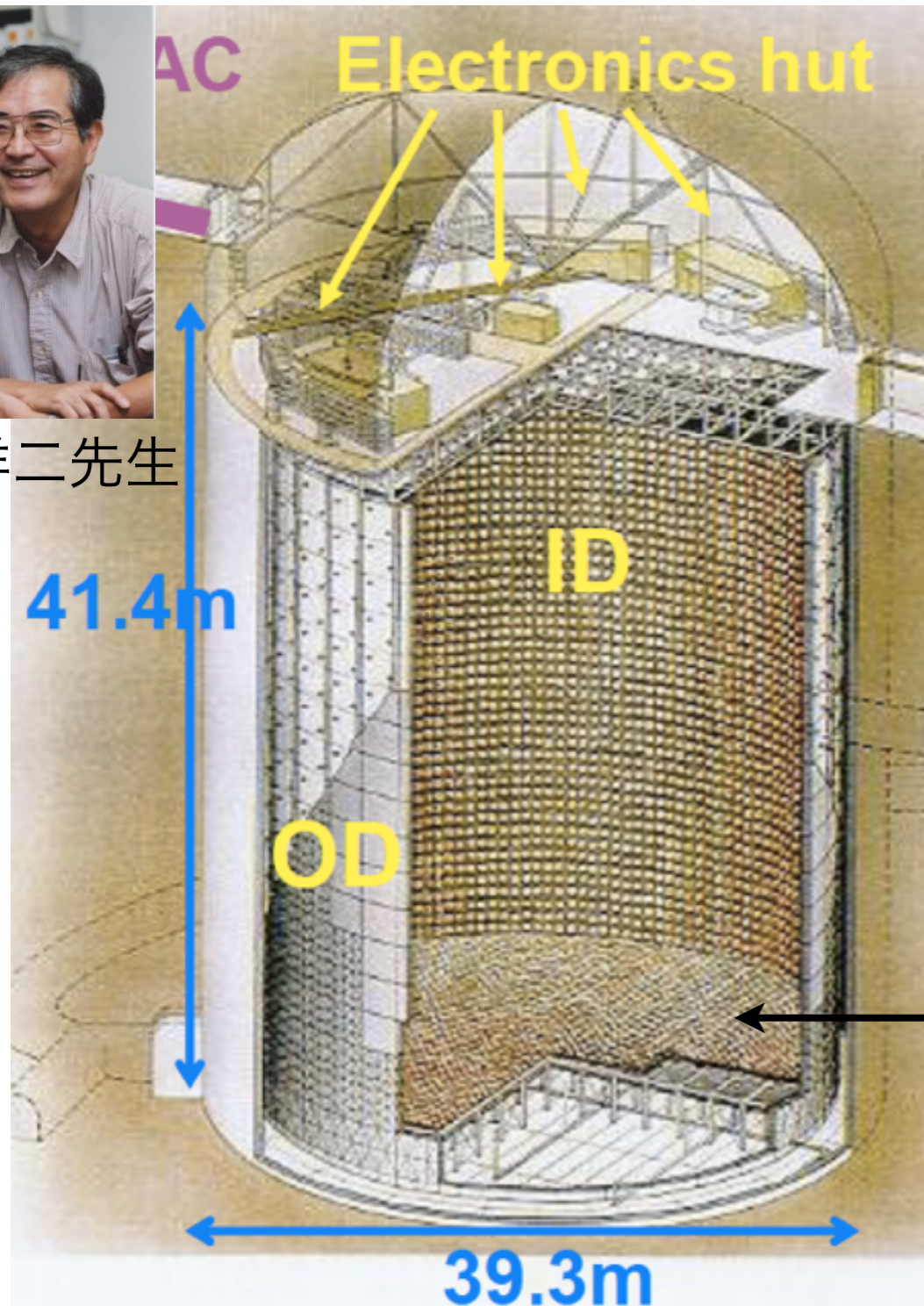
5万トンの超純水

11,000本以上の

50センチ径 **光電子増倍管**



戸塚洋二先生



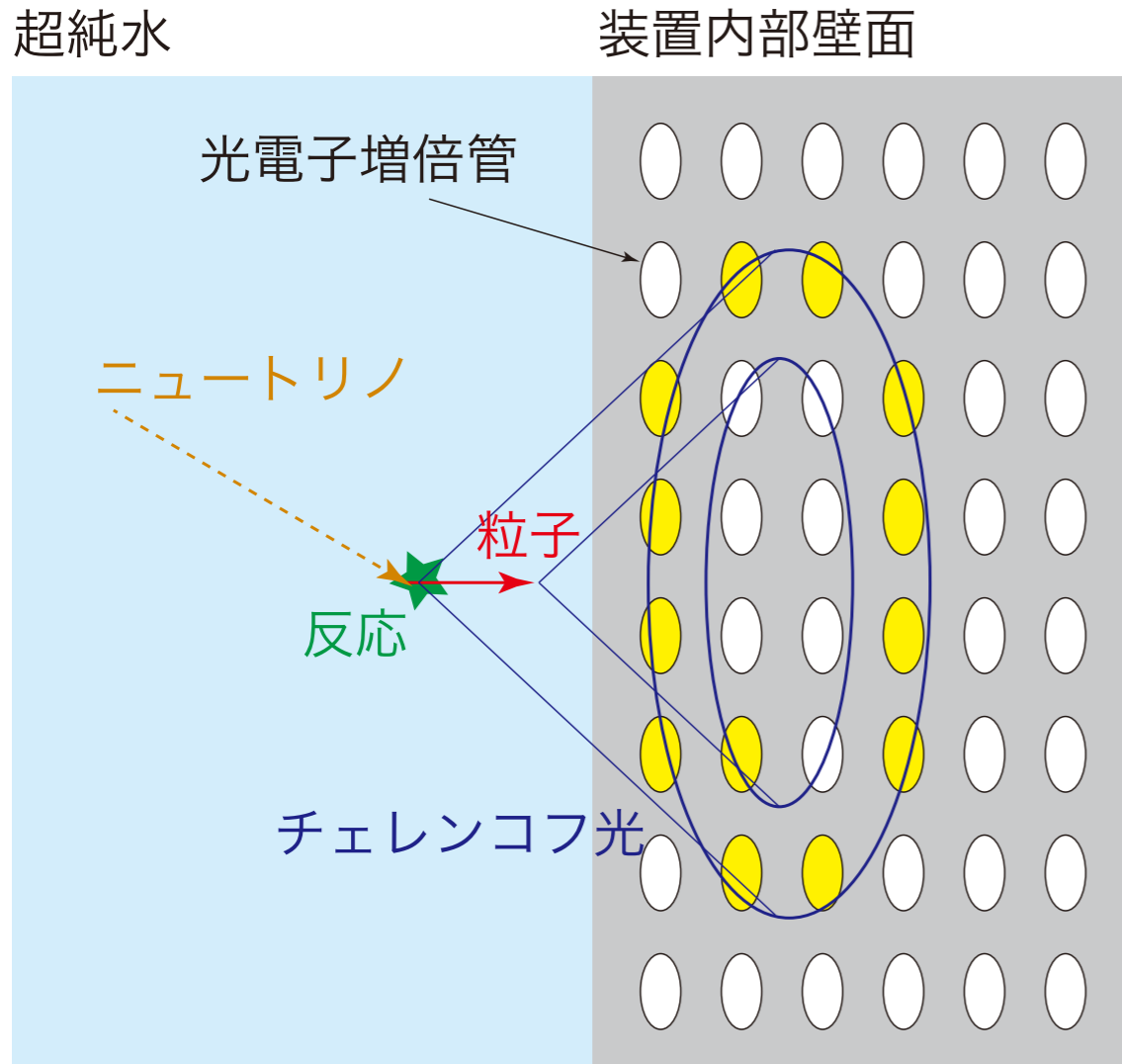
理1号館の1階や
赤門の近くに
展示あり

水槽は**2層**構造

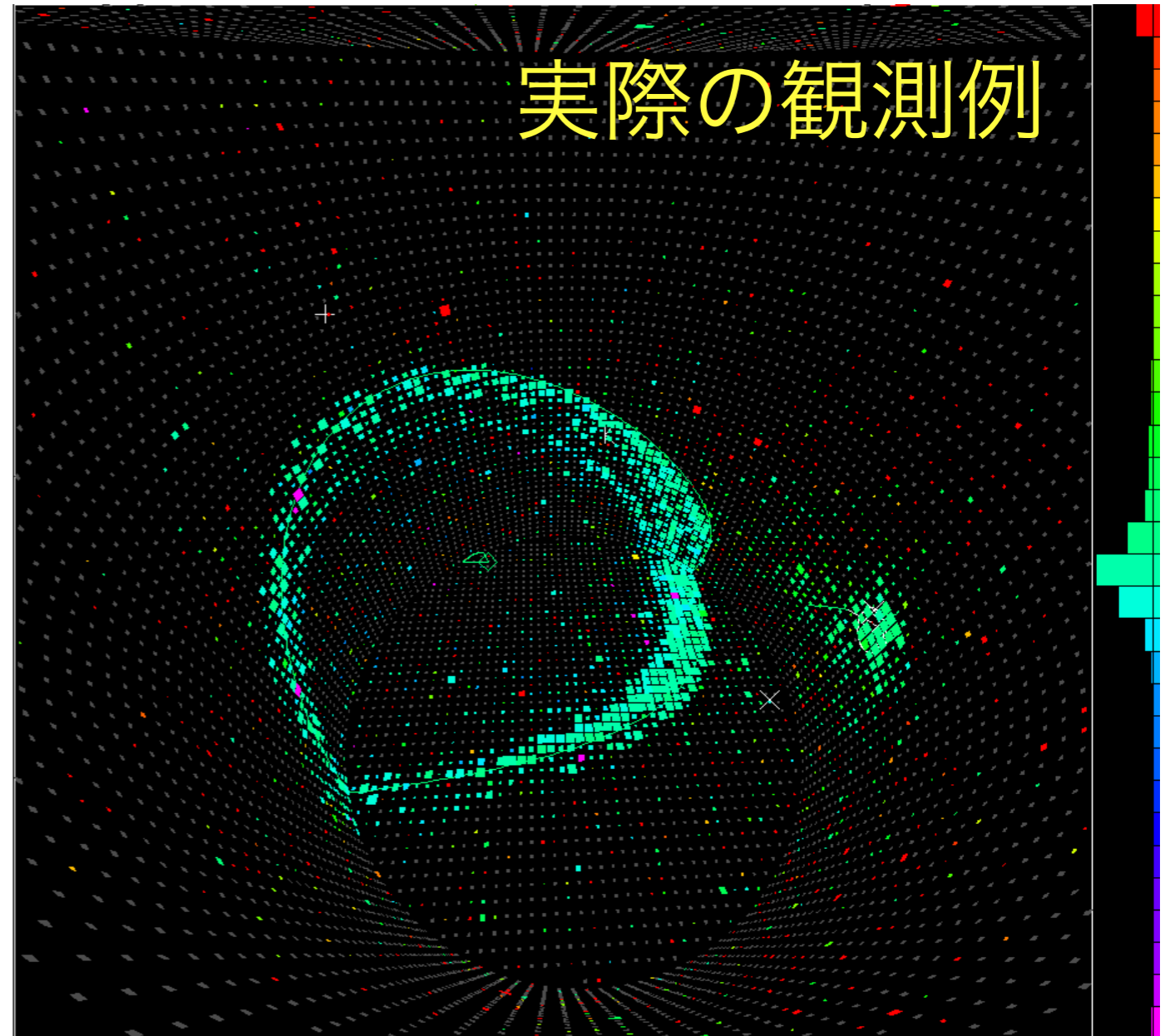
外部からの宇宙線→外側の水槽にも信号

ニュートリノが内部で反応→**内側だけに信号**。

ニュートリノ検出の原理



実際の観測例



ニュートリノの反応で生成された荷電粒子の放つ
リング状の**チェレンコフ光**を観測

チェレンコフ光のパターン (光量, 時間) から

粒子の**反応点**, **エネルギー**, **方向**などを測定

大気ニュートリノの観測で「ニュートリノ振動」発見

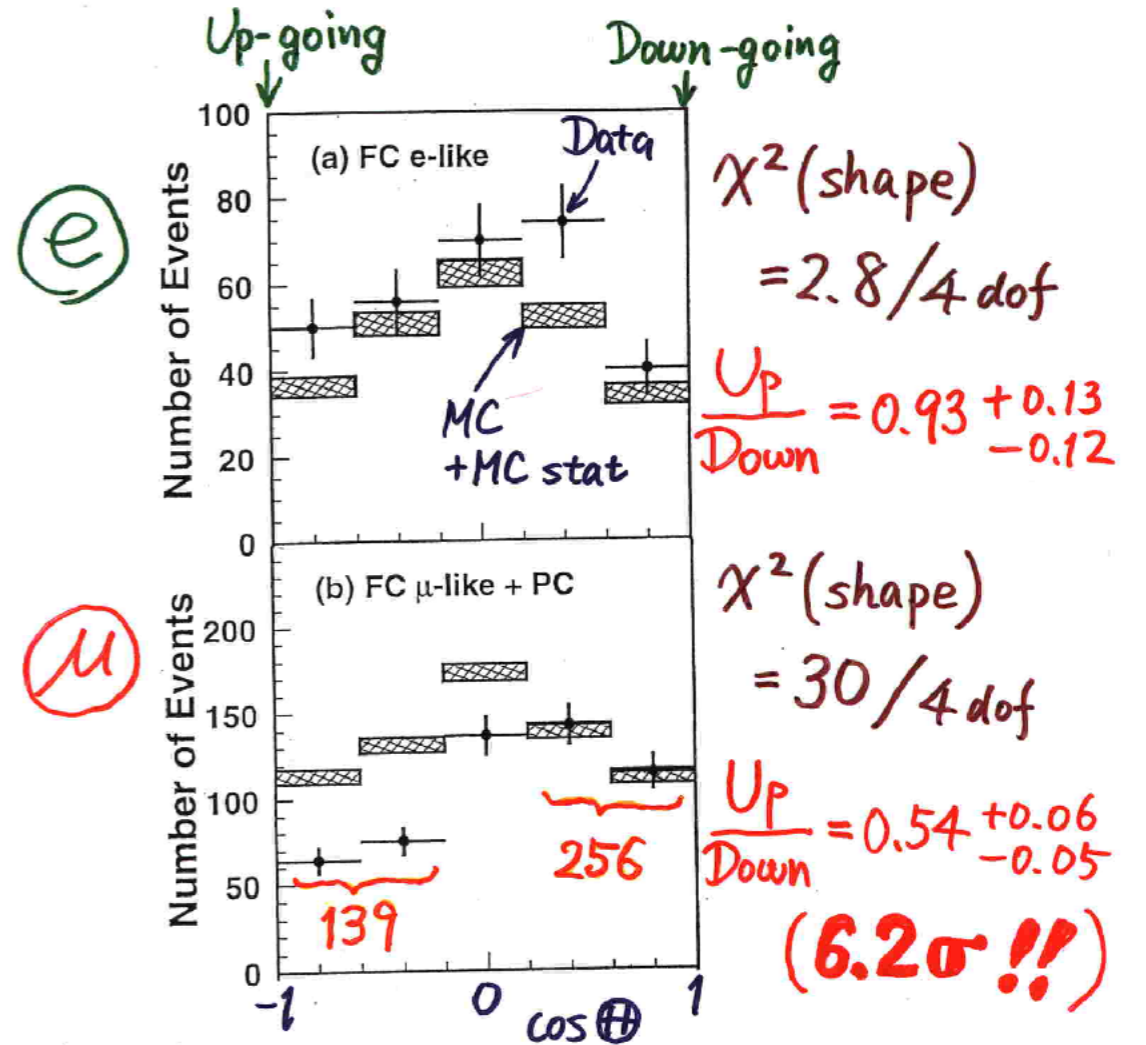
1998年6月@高山

ニュートリノ国際会議

梶田さん

カミオカンデから
約10年研究を続けて
確たる証拠を捉えた！

Zenith angle dependence (Multi-GeV)



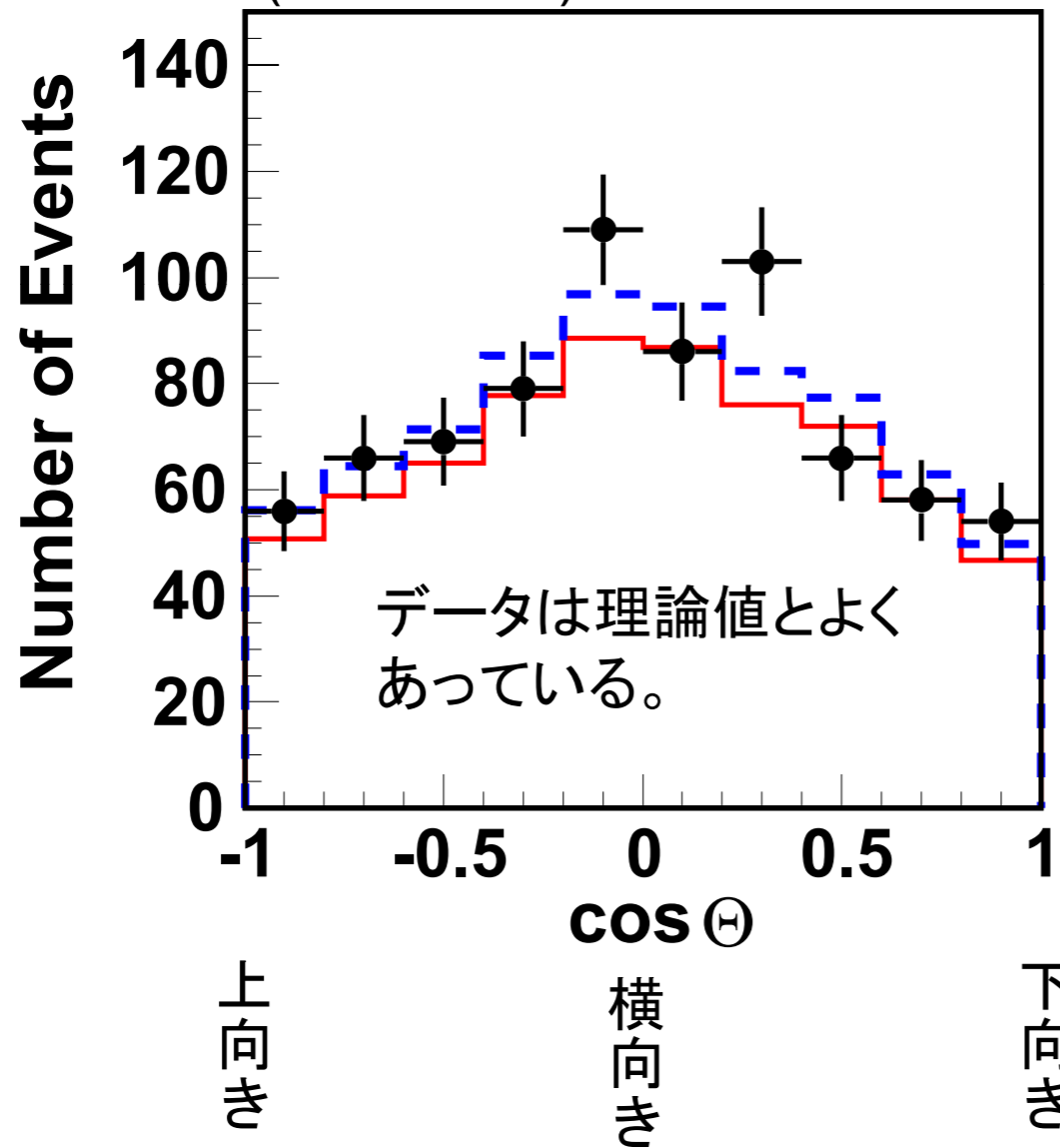
* Up/Down syst. error for μ -like

Prediction (flux calculation $\dots \lesssim 1\%$
1km rock above SK $\dots 1.5\%$) 1.8%

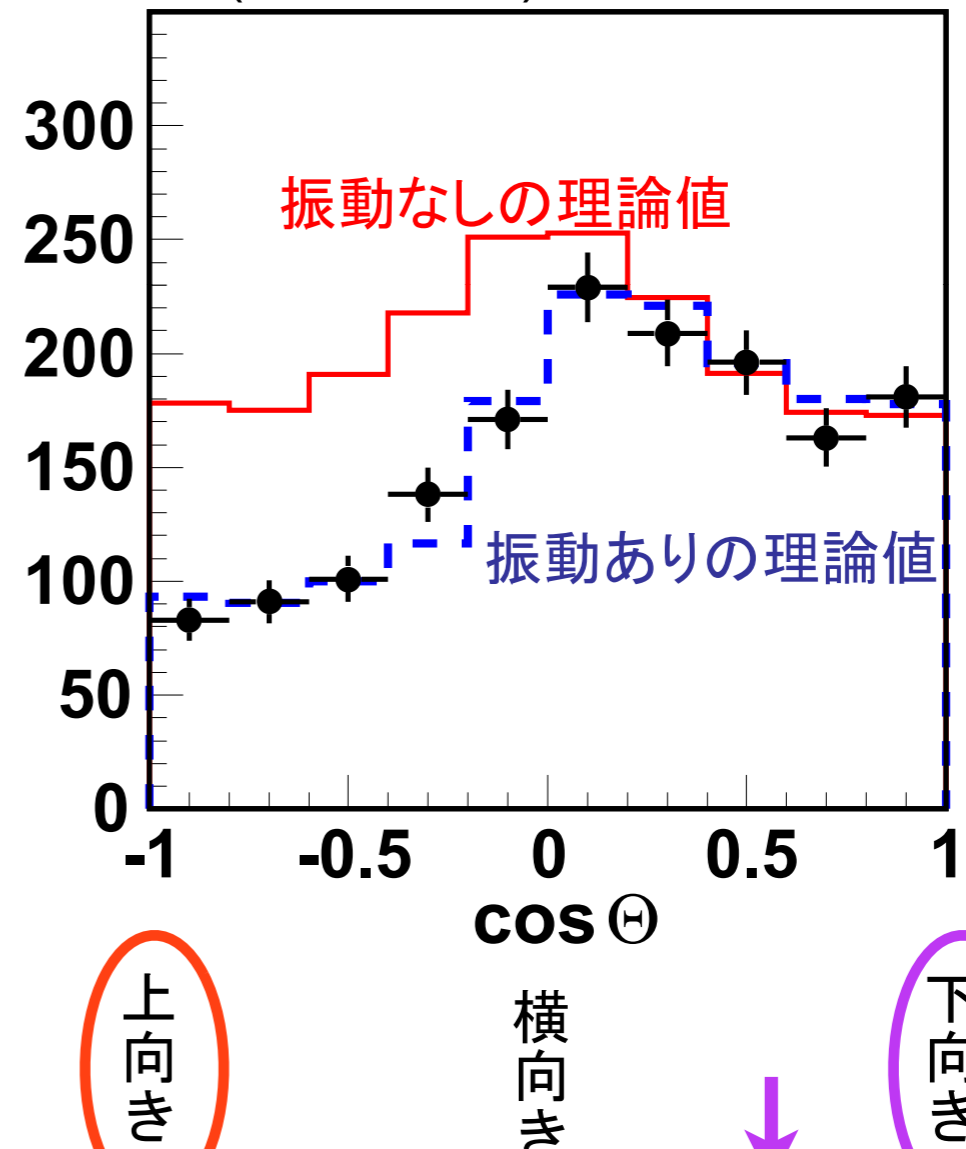
Data (Energy calib. for $\uparrow\downarrow \dots 0.7\%$
Non ν Background $\dots < 2\%$) 2.1%

ニュートリノ振動の発見

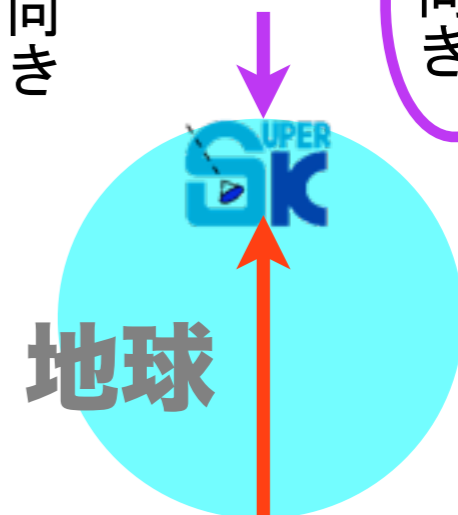
電子ニュートリノ事象
($E > 1.3 \text{ GeV}$)

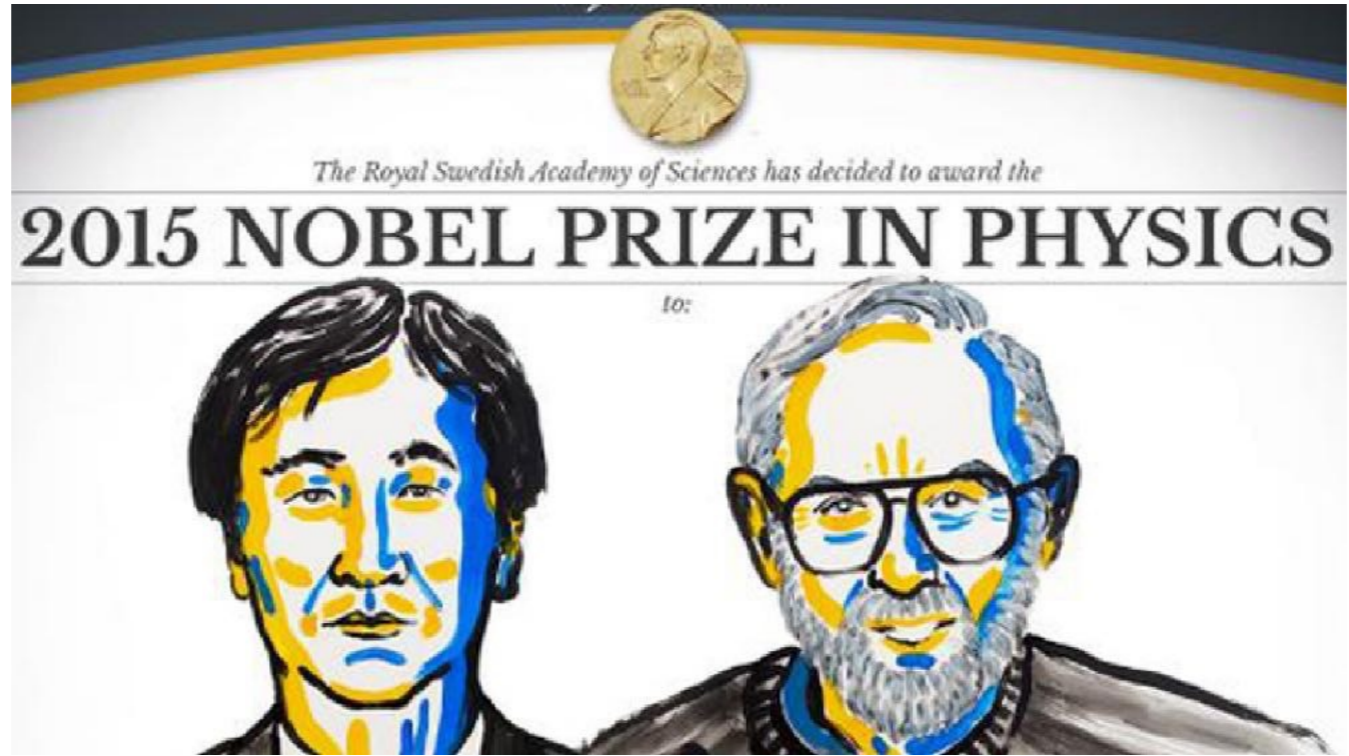


ミューニュートリノ事象
($E > 1.3 \text{ GeV}$)



地球の裏側から来る
ミューオンニュートリノが減っている。
→ ニュートリノ振動が起きている





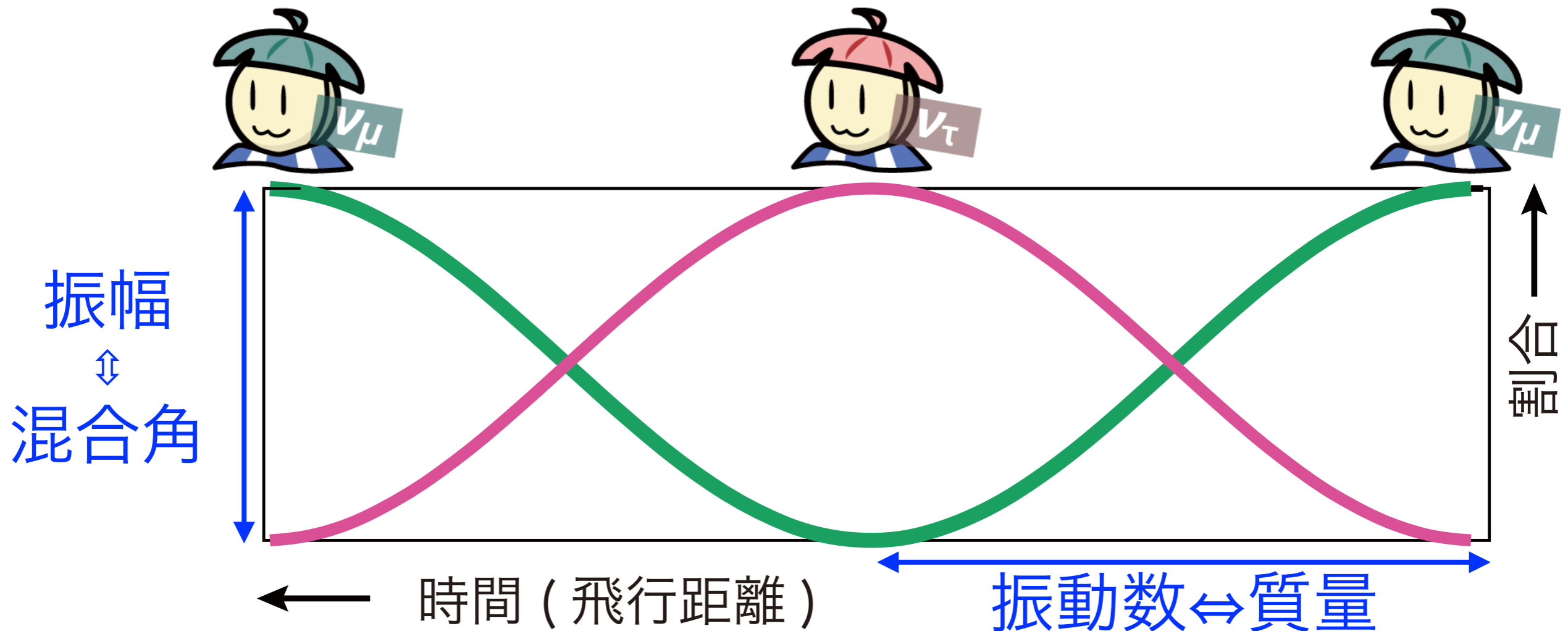
© Nobel Media AB 2015
Photo: Pi Frisk



© Nobel Media AB 2015
Photo: Pi Frisk

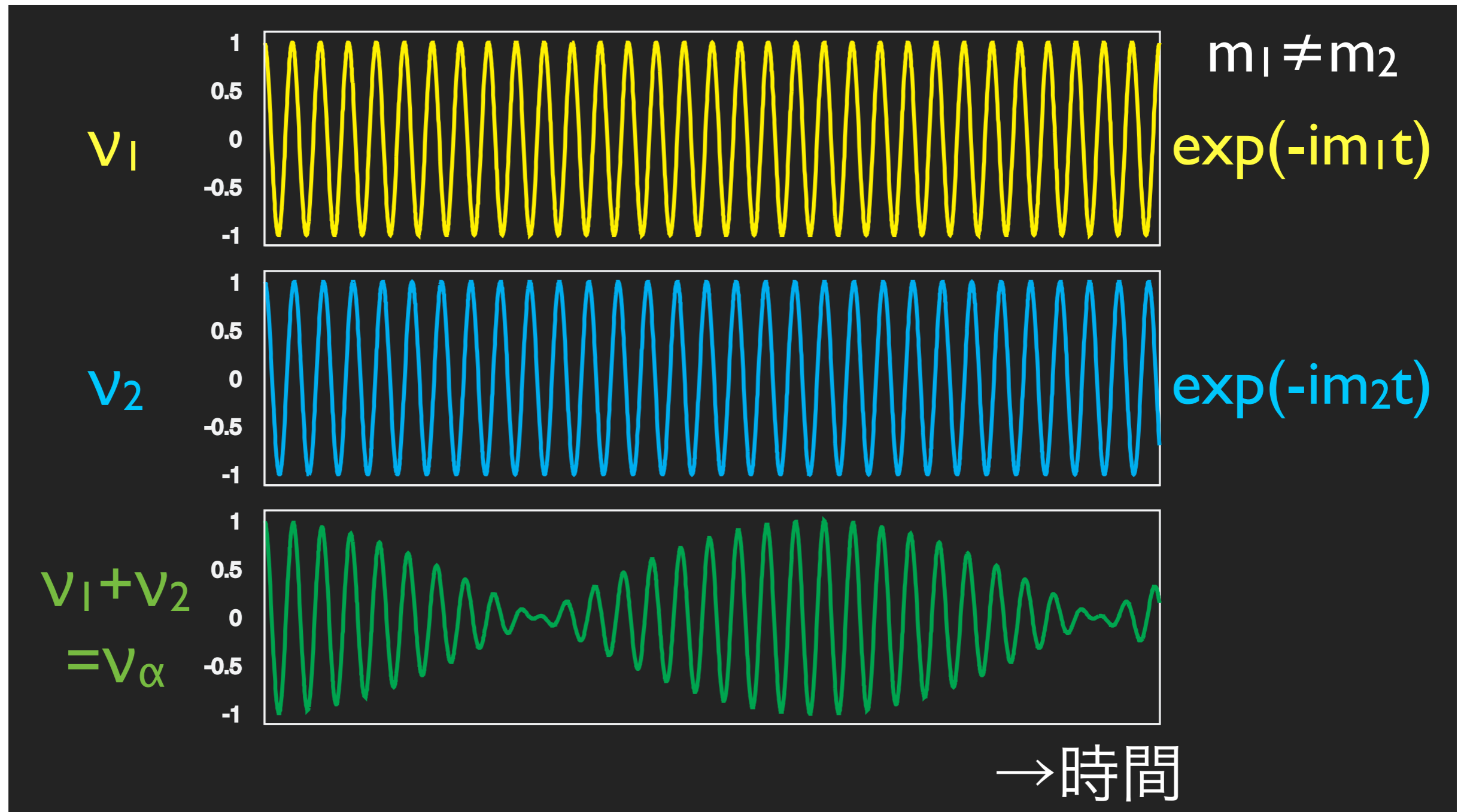
ニュートリノ振動

飛んで行くうちに種類が変わる！



- ニュートリノの質量がゼロだと起こらない
- ニュートリノ振動の測定により、
ニュートリノの性質を調べることが可能に

ニュートリノ振動=「うなり」

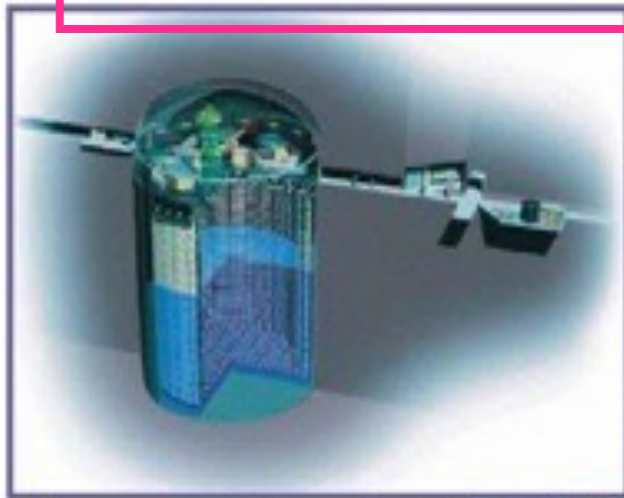


量子力学では、粒子の状態は波として表される。
波の周期は質量で決まる。

T2K実験

<http://t2k-experiment.org/ja>

Tokai-to-Kamioka



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



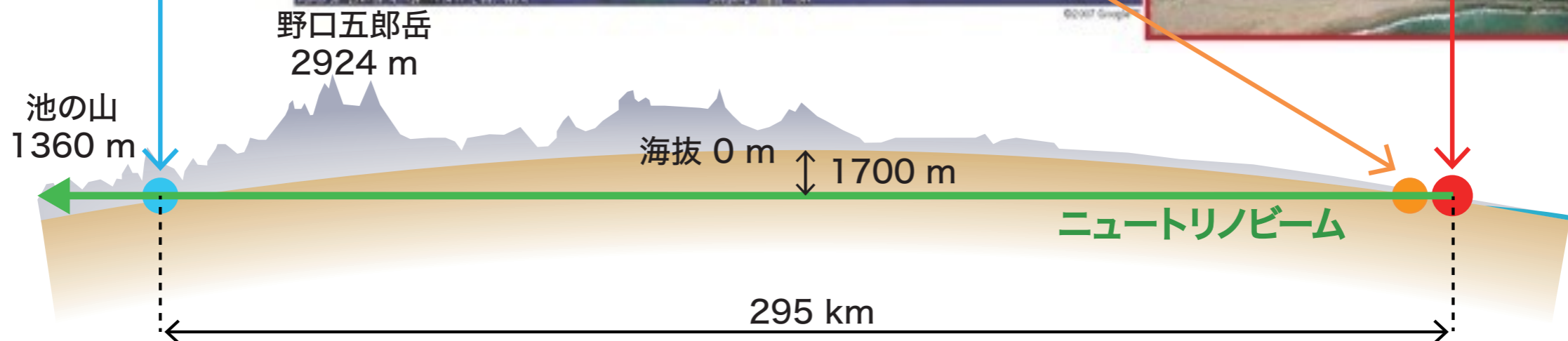
J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



スーパーカミオカンデ

前置検出器

J-PARC



人工的に作ったニュートリノビームを
295km先のスーパーカミオカンデに打ち込む
→ 制御された条件で精密な測定が可能

J-PARC 加速器 (茨城県東海村)

線形加速器

3 GeV
陽子加速器

世界最高強度の
陽子加速器

ニュートリノ
ビーム
(神岡へ)

物質・生命科学
研究施設

30 GeV
陽子加速器

ハドロン実験
施設

— CY2007 Beams
— JFY2008 Beams
— JFY2009 Beams

Bird's eye photo in January of 2003

太平洋

加速して一度にとり出せる陽子の数 >260兆個：世界記録!

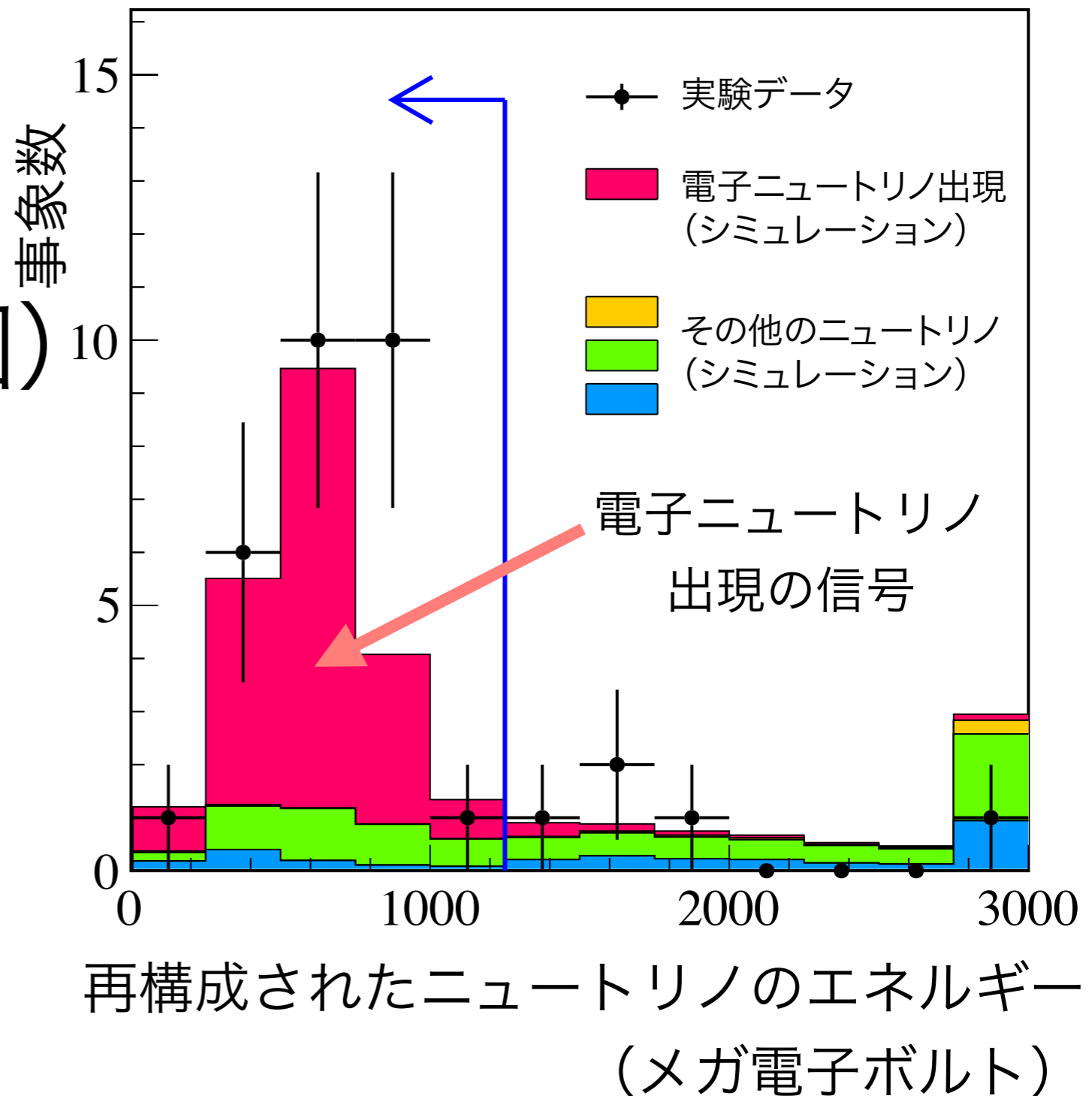
電子ニュートリノ出現の発見

2011年に最初の
「兆候」を報告

2013年に確証を得る
(28候補事象：右図)

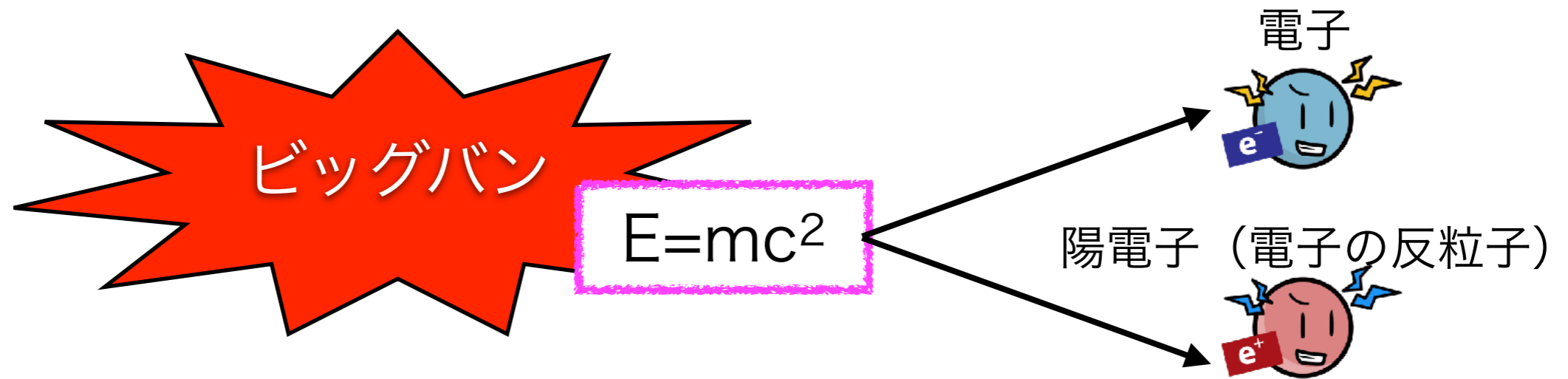
ニュートリノ振動で
種類が変わった後の
ニュートリノを
世界で初めて
確実に観測した

T2K実験のデータ



次なる謎への挑戦

ニュートリノ振動の研究が進み、
ニュートリノの性質が理解されてきたことで、
新たな研究への道が開けた

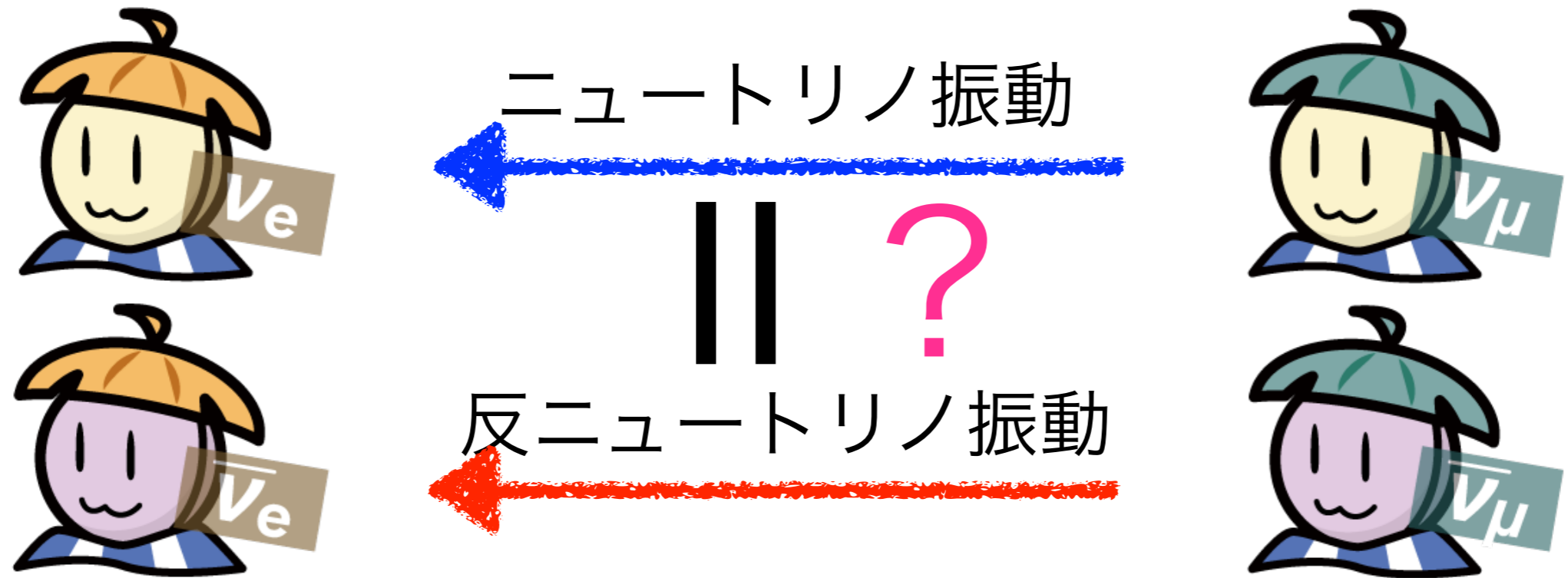


宇宙の始まりには「粒子」と「反粒子」は同数あったはず
…が、現在の宇宙には「反粒子（反物質）」はほとんどない

粒子と反粒子の間に微妙な性質の違いがあるはず

「CP対称性の破れ」

ニュートリノ振動で宇宙の物質の起源を探る



T2K実験では、装置の設定により
ニュートリノビームを作るか、
反ニュートリノビームを作るか、選択可能

ニュートリノ振動の確率を測って比べ、
性質が違つかどうか（CP対称性が破れているか）調べる

世界で初めての研究

T2K実験の最新結果

The international journal of science / 16 April 2020

nature

THE MIRROR CRACK'D

An indication of matter-antimatter symmetry violation in neutrinos

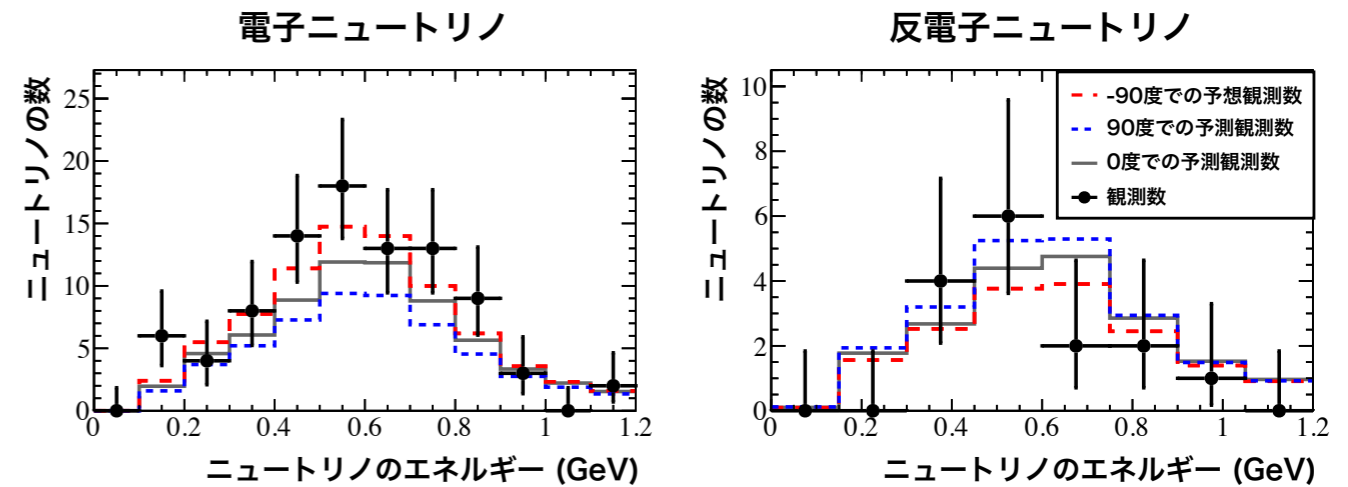
Coronavirus
The models driving the global response to the pandemic

Hot source
Remnants of primordial nitrogen in Earth's mantle

Origin of a species
Revised age for Broken Hill skull adds twist to human evolution

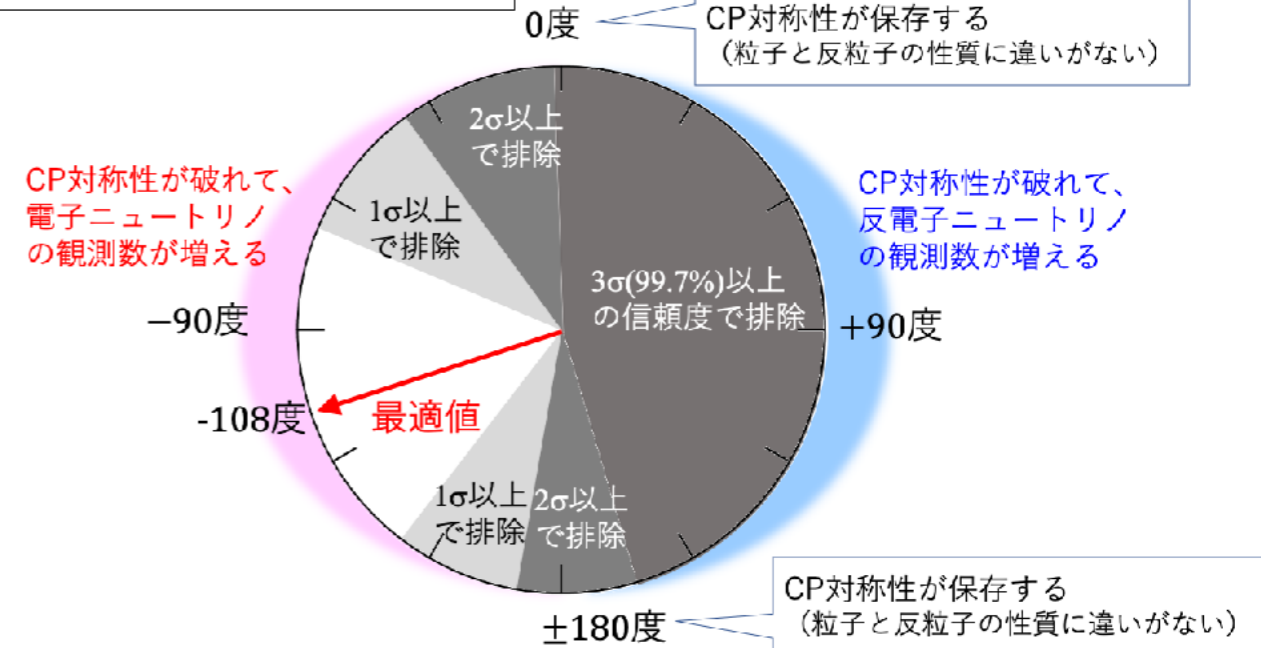


Nature 2020年4月16日号掲載



CP位相角

(-180度から180度の間の値を取り得る)



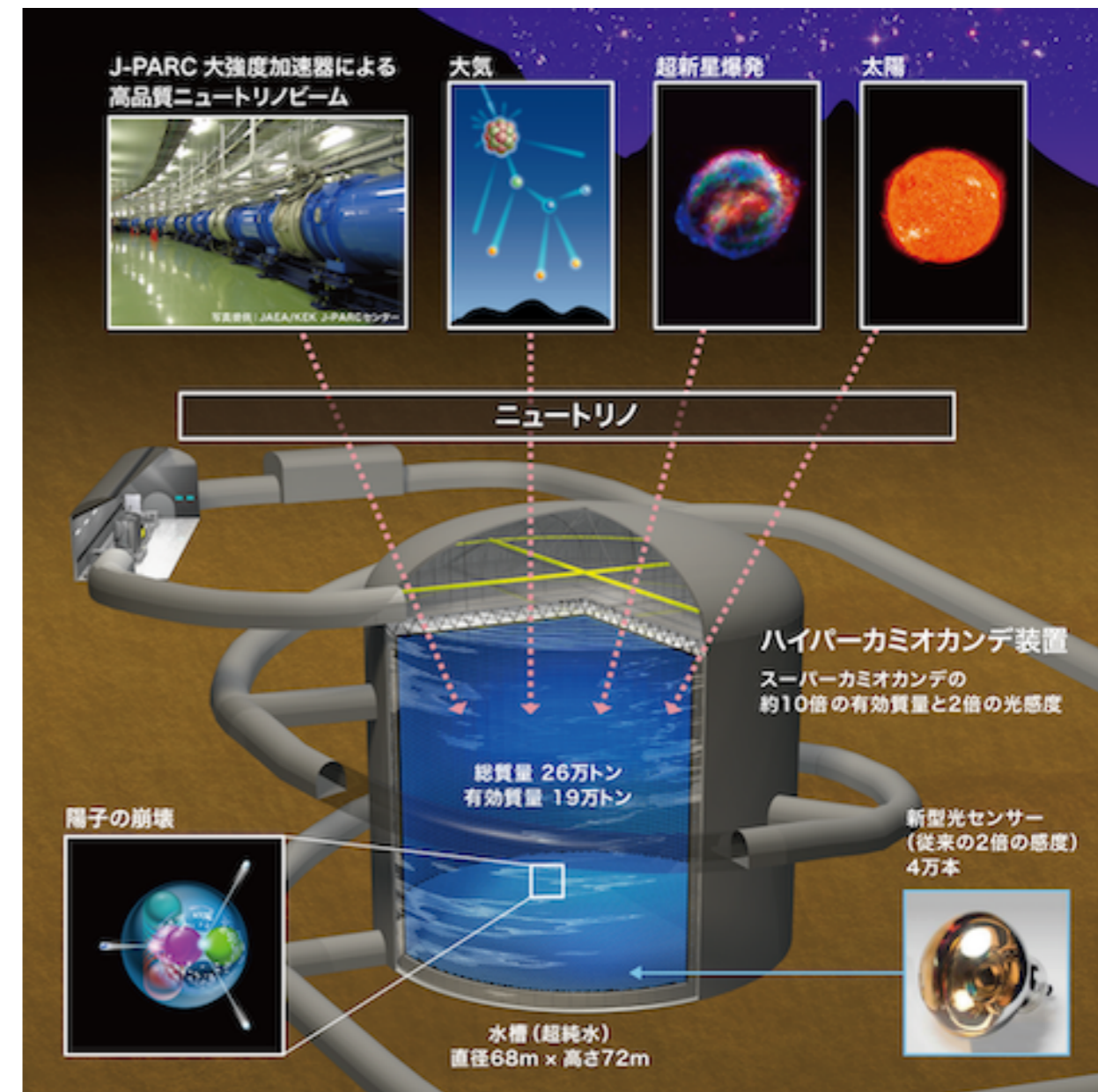
CP対称性, 破れてそう...?

もっと研究したい!!

今後：ハイパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデのさらに約8倍の有効質量

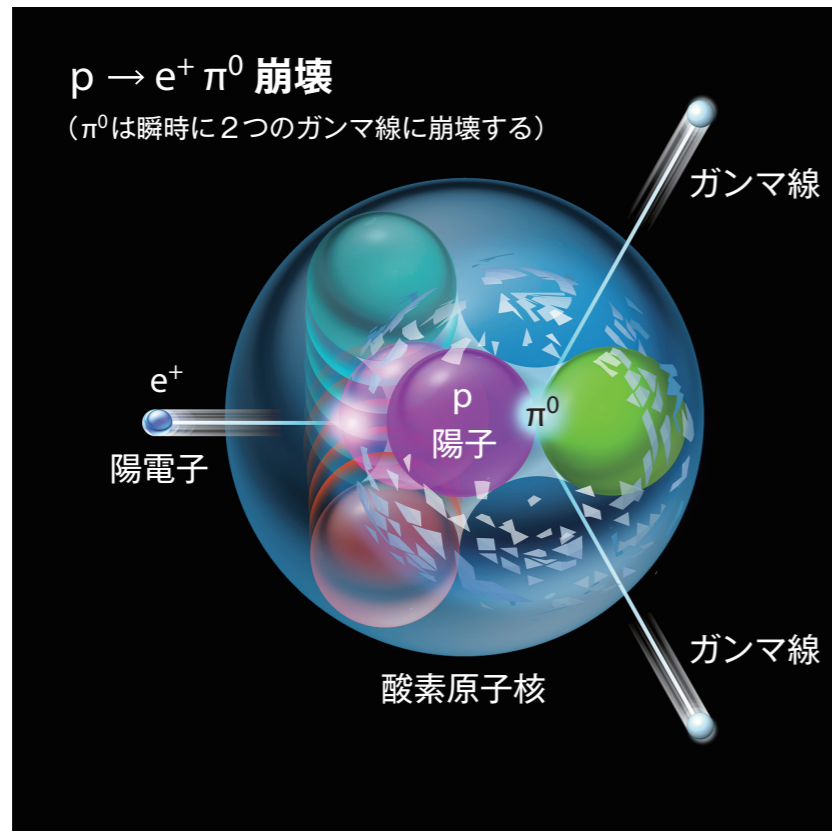
- ニュートリノ振動の詳細研究
- 宇宙に物質が残った理由の解明へ
- 超新星ニュートリノの観測
- ニュートリノ天文学の進展
- 宇宙に漂う過去の超新星爆発からのニュートリノの観測
- 元素合成の歴史を探る
- 暗黒物質からのニュートリノ探索
- 陽子崩壊の探索
- 大統一理論の検証



2020年建設開始, 2027年実験開始予定

宇宙の終末にも迫る

(スーパーカミオカンデのシミュレーション)

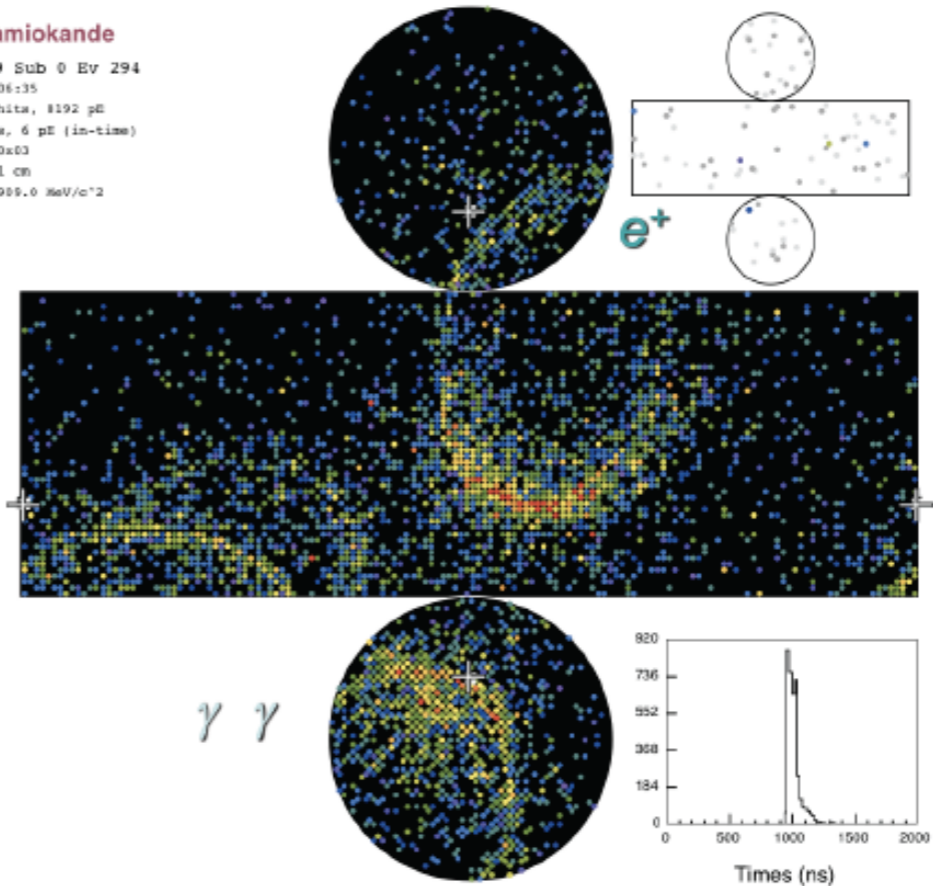


Super-Kamiokande

```
Run 999999 Sub 0 Ev 294
02-11-16:00:06:35
Inner: 3053 hits, 8192 pE
Outer: 5 hits, 6 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D Wall: 946.1 cm
PC, mass = 989.0 MeV/c^2
```

Charge (pe)

- >15.0
- 13.1-15.0
- 11.6-13.1
- 9.8-11.6
- 8.2-9.8
- 6.9-8.2
- 5.6-6.9
- 4.5-5.6
- 3.5-4.5
- 2.6-3.5
- 1.9-2.6
- 1.2-1.9
- 0.8-1.2
- 0.4-0.8
- 0.1-0.4
- < 0.1



- 「大統一理論」では、陽子の崩壊を予言
- 全ての物質は消滅する運命にあるのか？
- 素粒子の統一理論の検証
- ハイパーカミオカンデで発見が期待できる

カミオカンデ3兄弟（の模型）



2027-