

# 2015年ノーベル物理学賞の生まれたところ ～ニュートリノ振動の発見とこれから～



塩澤 真人

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設  
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

2018年7月14日、オープンカレッジ in 飛騨 2018

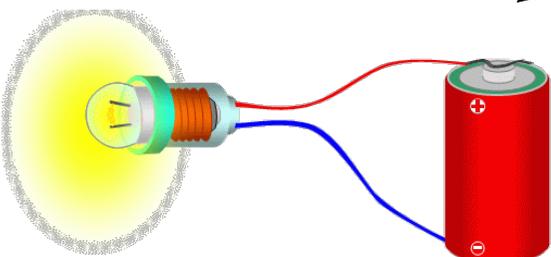




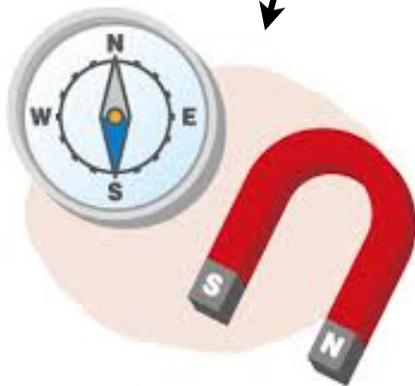
- 神岡の実験に携わっています。素粒子実験屋
- 統一理論が好き

マクスウェル方程式

$$\partial_\nu F_{\mu\nu} = J_\mu$$



電気力



磁気力



光学

電磁波

いつか

『素粒子の統一、力の統一』方程式を見つけない

# 2015年ノーベル物理学賞

梶田隆章宇宙線研究所教授



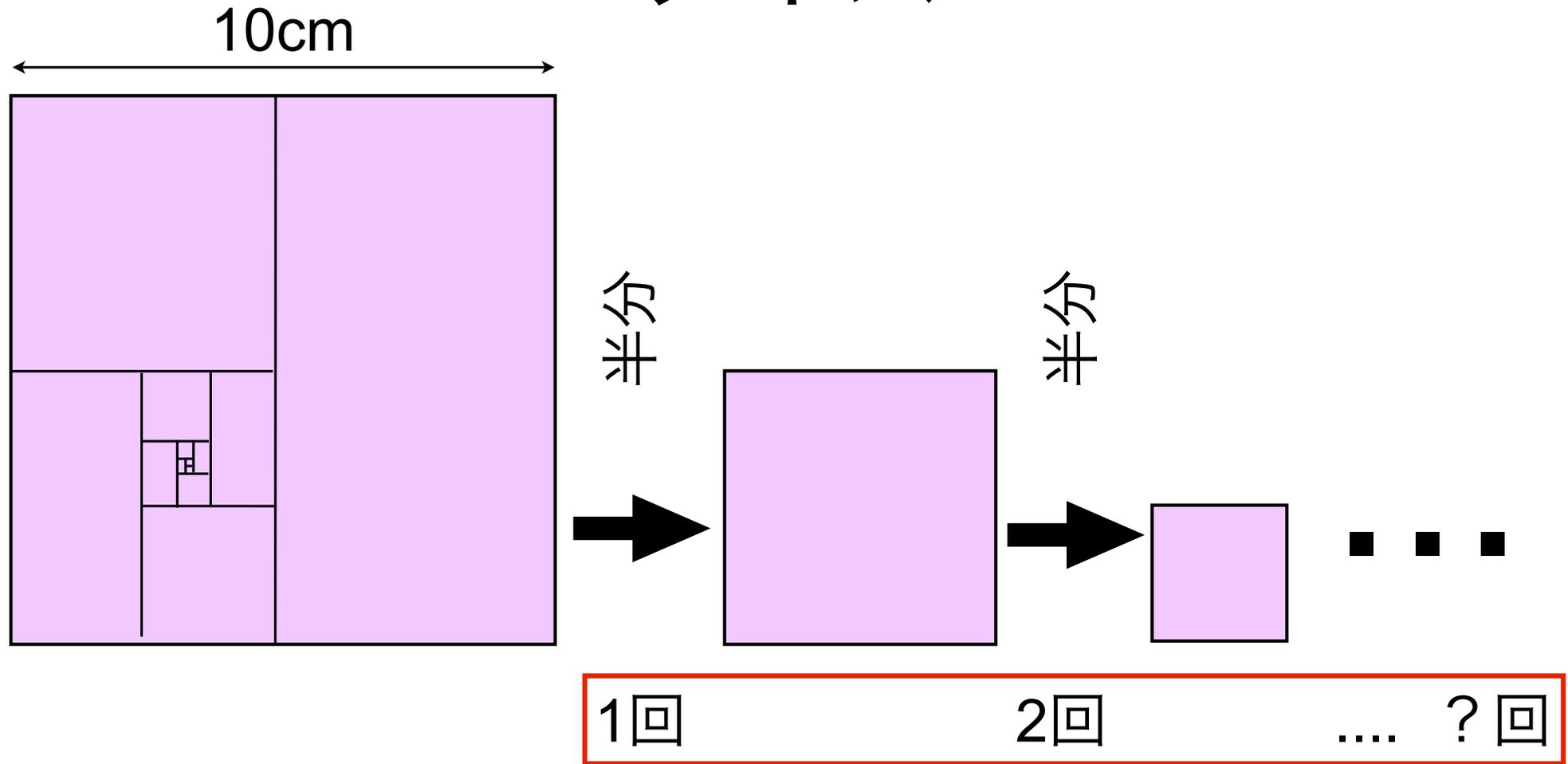
Copyright © Nobel Media AB 2015



Copyright © Nobel Media AB 2015

受賞理由： 「ニュートリノが質量を持つことを示す、  
ニュートリノ振動の発見」

# クイズ



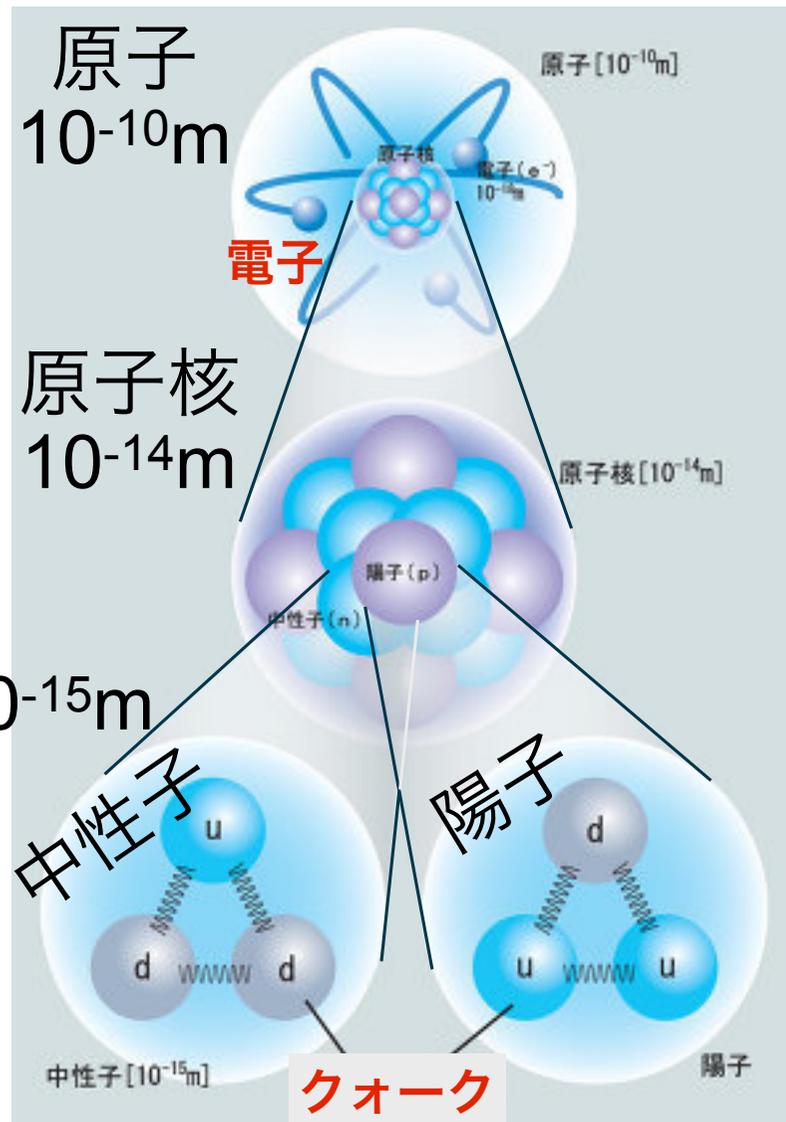
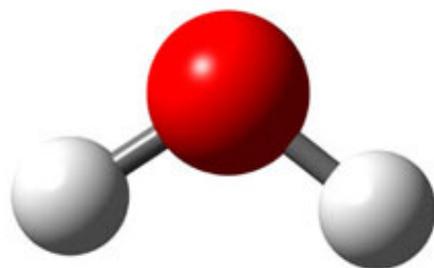
問題：何回、「半分」に分けられる？

答え：(あ) 何回でも (い) 30回

# 素粒子の仲間



→ 水分子  $10^{-10}\text{m}$



物質の最小単位は 2 種類

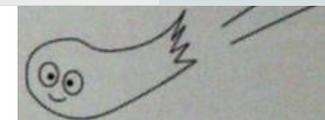
1. u型、d型 クォーク

(3 + 3 個)

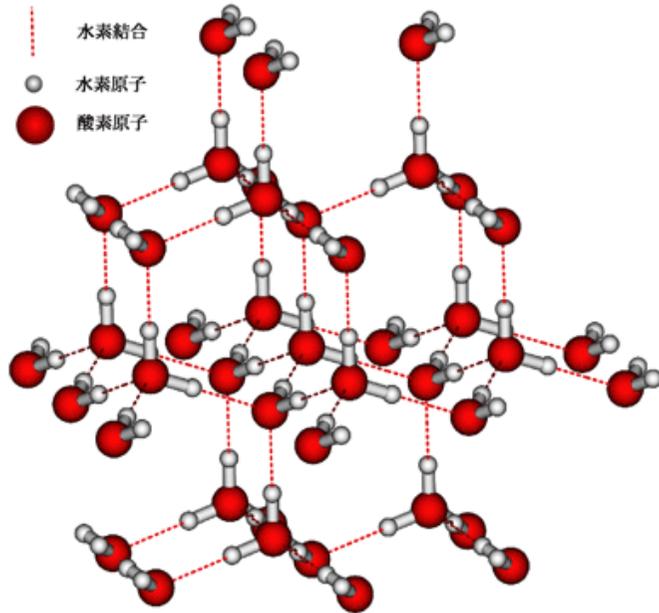
2. ニュートリノ、電子グループ

(3 + 3 個)

ニュートリノ



## 氷の結晶



## アイスフラワー



氷に強い光をあてると、氷は表面だけでなく内部からもとけ、氷の中に雪の結晶のような形ができる。

写真と文章：中谷宇吉郎 雪の科学館ホームページより

水の分子

→氷の六角形結晶、六方向にとけやすい

→アイスフラワー

# 素粒子と宇宙

- 宇宙線：宇宙から降る素粒子

- スーパーカミオカンデ：宇宙線（大気）ニュートリノを捕まえて、質量の発見

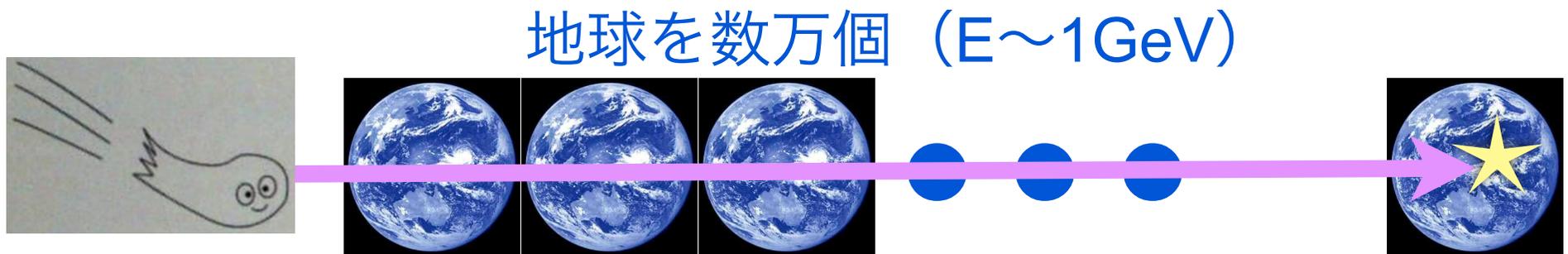
- 宇宙は素粒子でできている

- 素粒子の研究は、宇宙の進化、運命、人間の誕生などの理解にもつながる

- 宇宙（星）を見る

- 光：天文学（可視光、マイクロ波、赤外線、X線、ガンマ線）
- ニュートリノ：スーパーカミオカンデ、カムランド
- 重力波：カグラ

# $\nu$ ニュートリノ : 幽霊粒子



調べるのが難しく、まだよくわかっていない粒子

# 宇宙の中での素粒子の数

電子 0.1個/m<sup>3</sup>

陽子 0.1個/m<sup>3</sup>

中性子 0.01個/m<sup>3</sup>



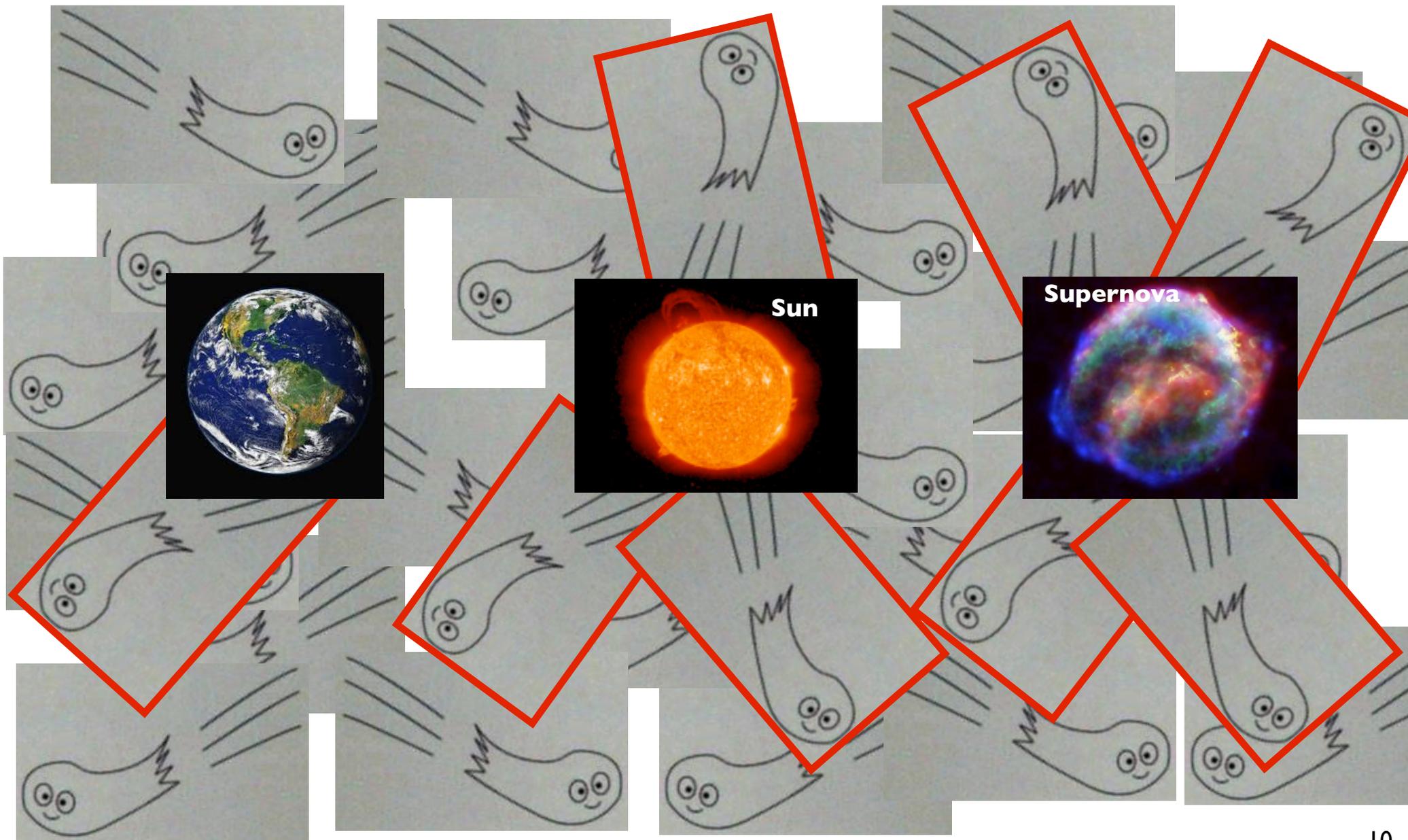
**v 300,000,000個/m<sup>3</sup>**

宇宙はニュートリノで満ちている。

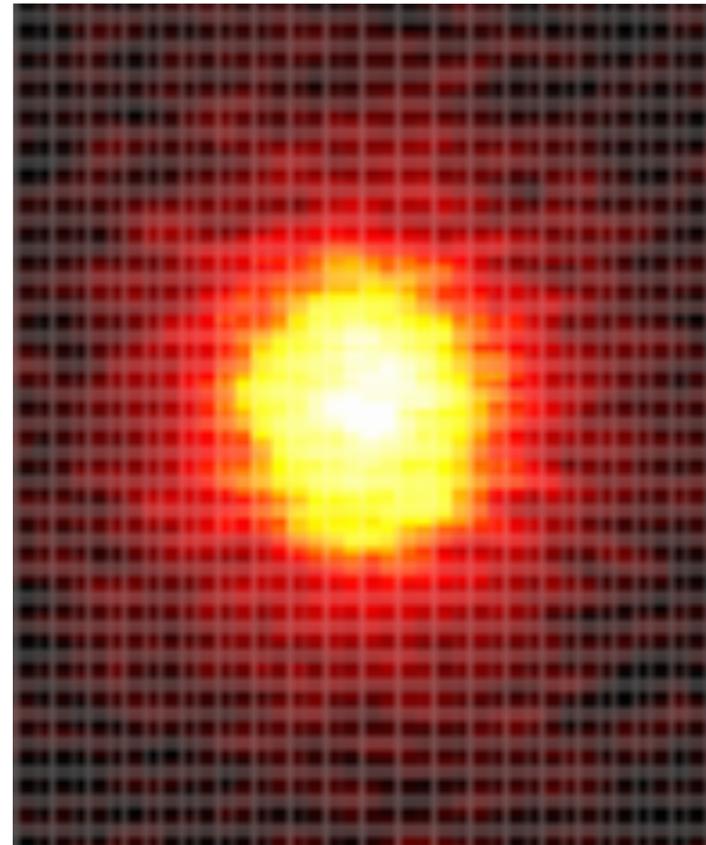
ただし、このビッグバンの残骸のニュートリノは、エネルギーが小さすぎて観測できていない。

# V

## ニュートリノ：数



# $\nu$ は天体内部を見る”光”



X線（レントゲン）：体の内部の様子を見る

ニュートリノ：太陽中心部の核融合、超新星爆発内部  
やブラックホール誕生の瞬間

# V

## ニュートリノ：まとめ



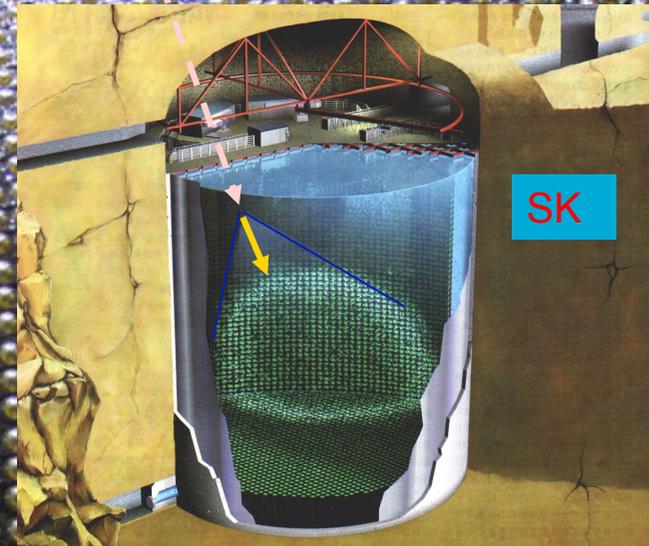
- 小さい（原子よりも）
- なんでも突き抜ける（まれにぶつかる）
- 宇宙はニュートリノだらけ
- 星や人類の誕生にも関わっているかも
- 星の内部を見る”光”
- わからないことが多い素粒子

# スーパーカミオカンデ実験 (第二世代)

# スーパーカミオカンデ実験

岐阜県 飛騨市 神岡町





# スーパーカミオカンデ

5万トンの水槽を地下1000メートルに建設。  
ニュートリノが水と反応した際に出る光をセン  
サー1万個で捉える。

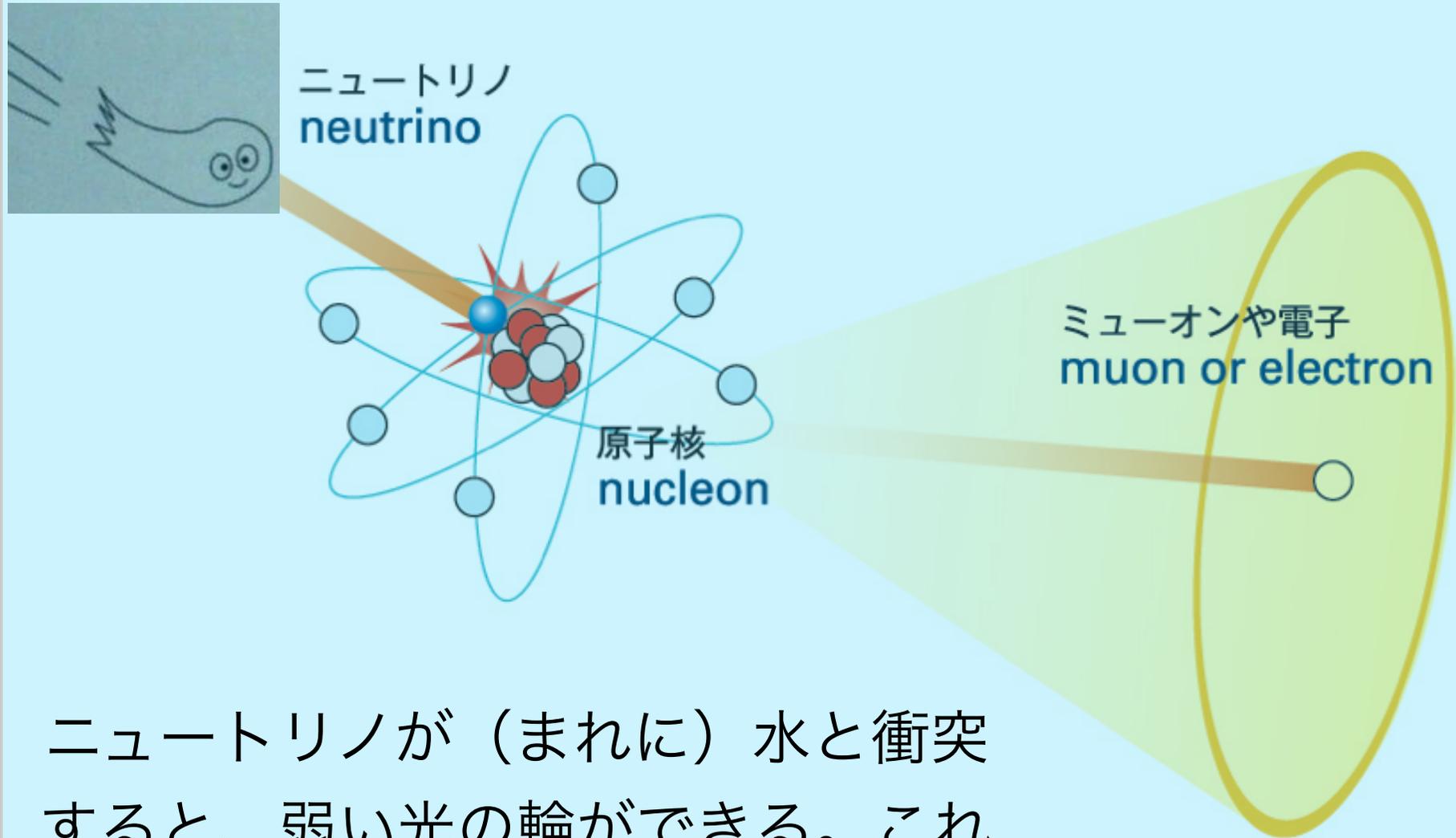
(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

# 高感度光センサー



- 光のつぶ一つも見える、高感度さ.
- 直径50cm（世界最大）.

# ニュートリノのつかまえ方



ニュートリノが（まれに）水と衝突すると、弱い光の輪ができる。これを光センサーでつかまえる。

# スーパーカミオカンデの実験目的

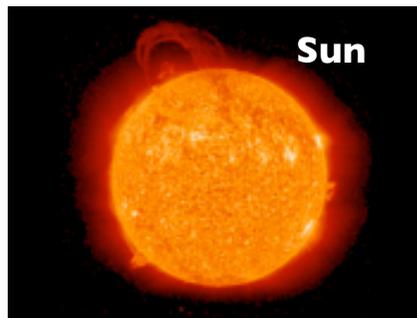
大気ニュートリノ

- 大気ニュートリノ観測
- 太陽ニュートリノ観測
- 超新星爆発ニュートリノ観測
- 暗黒物質からのニュートリノ探索
- 陽子崩壊の探索



太陽ニュートリノ

4陽子 + 2電子 → ヘリウム + 2ニュートリノ + 熱



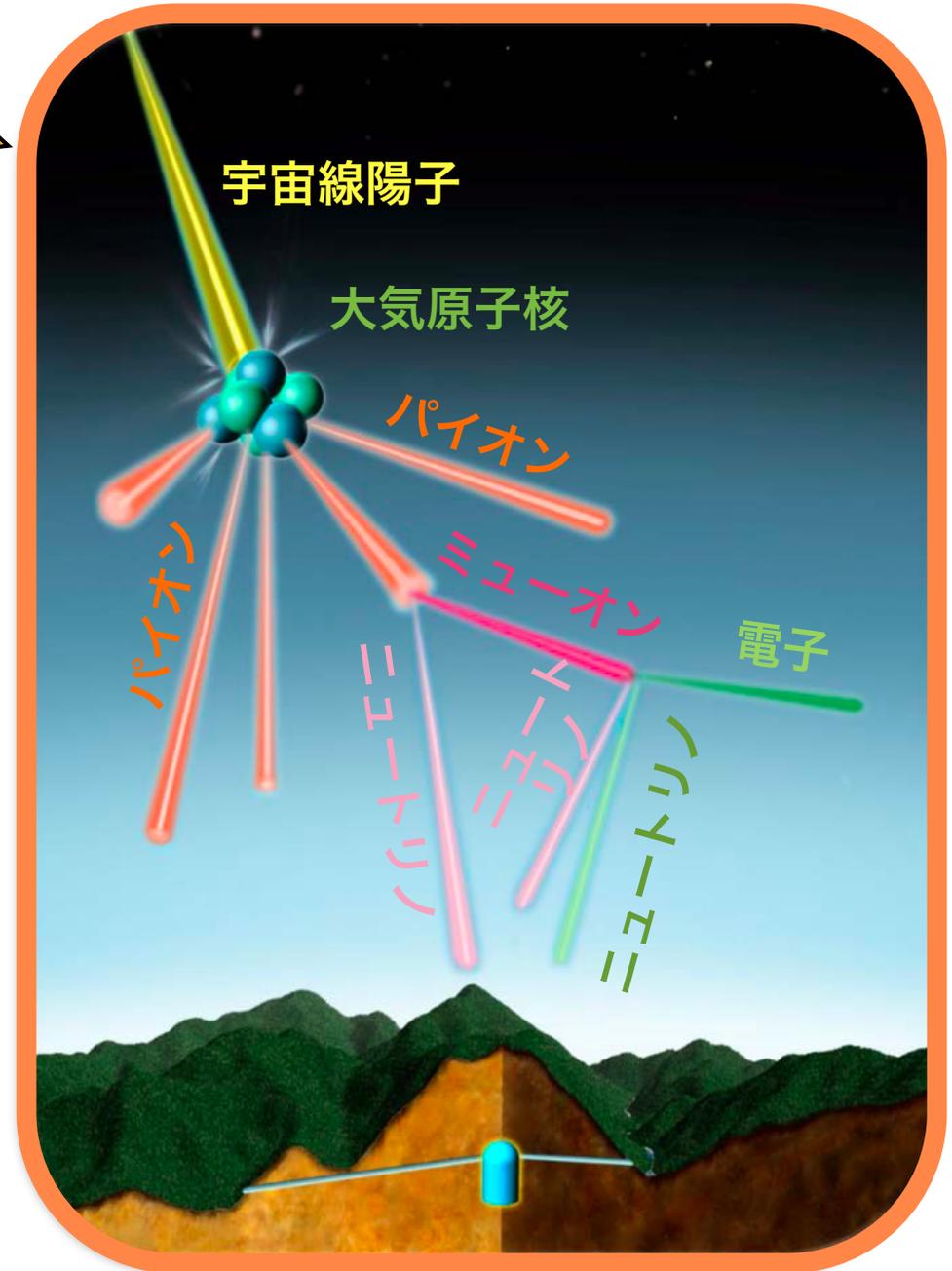
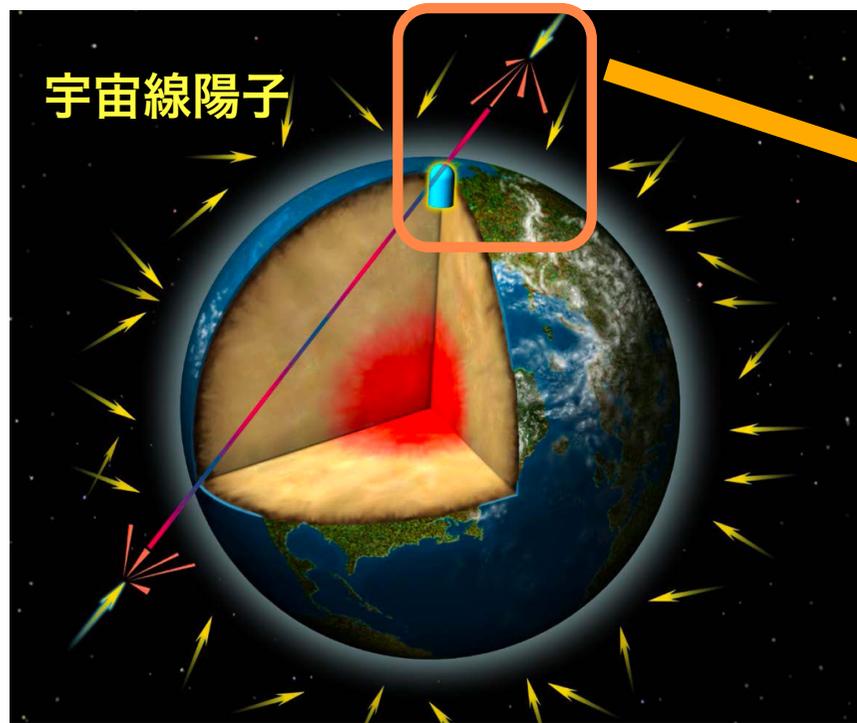
超新星爆発ニュートリノ  
巨星の最後



陽子の陽電子とパイオンへの崩壊



# 大気ニュートリノ

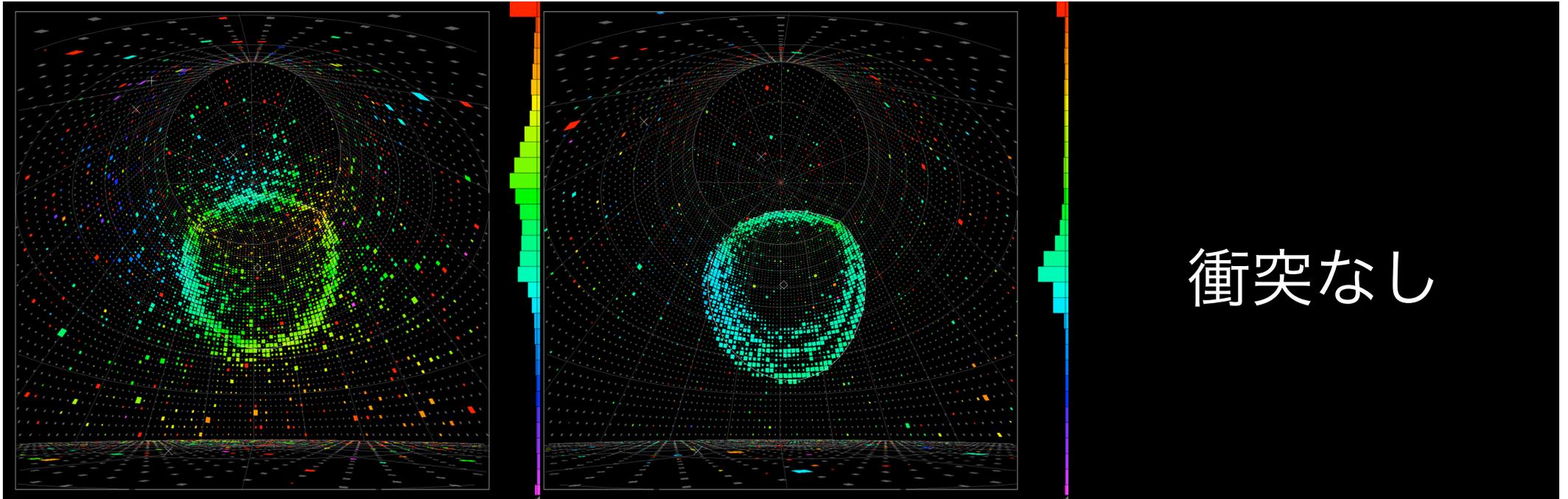


装置に降るニュートリノ  
の数は、上からと下から  
で同じはず。

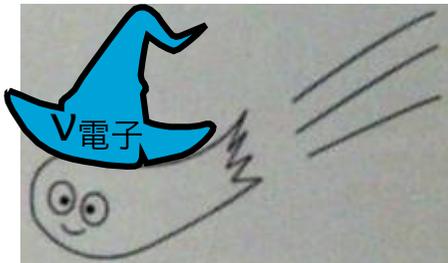
飛行する距離は違う。

# 観測データ

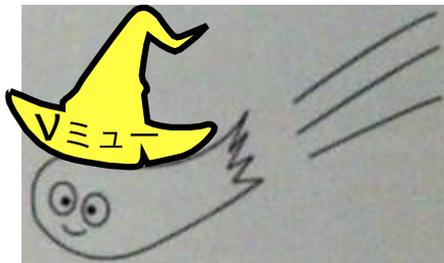
ニュートリノと水の衝突による光



電子型ニュートリノ



ミュー型ニュートリノ



タウ型ニュートリノ



# スーパーカミオカンデの**開始前**

- 大気ニュートリノ問題：カミオカンデでミュー型ニュートリノが期待数の約半分しか観測されなかった。
- 海外の複数の実験では、大気ニュートリノは期待通りに観測されたと発表。 **矛盾**。
- 多くの理論物理学者はカミオカンデの結果に **懐疑的**。
  - 他の素粒子に比べて極端に小さな質量（電子の100万分の1程度の）が必要。
  - 暗黒物質としても軽すぎる。

**例えると：友達と違う意見、先生も信じてくれない。  
皆さんならどうします？**

# 日本のニュートリノ研究者の行動

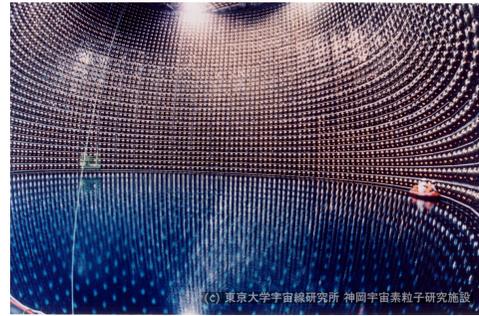
スーパーカミオカンデを作って確認しなければ



戸塚 洋二

中村 健蔵

大気ニュートリノが足りないぞ. どうやっても間違いが見つからない.

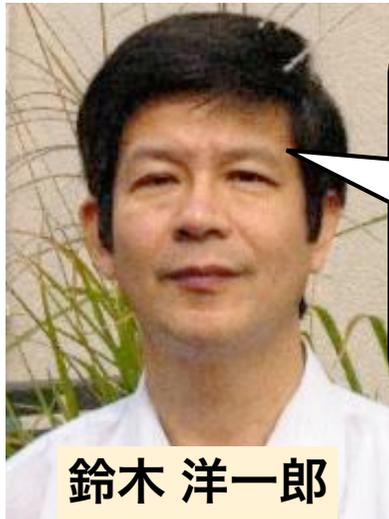


© 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設



梶田 隆章

太陽ニュートリノで調べよう



鈴木 洋一郎

原子炉ニュートリノを捕まえる装置を作って調べよう



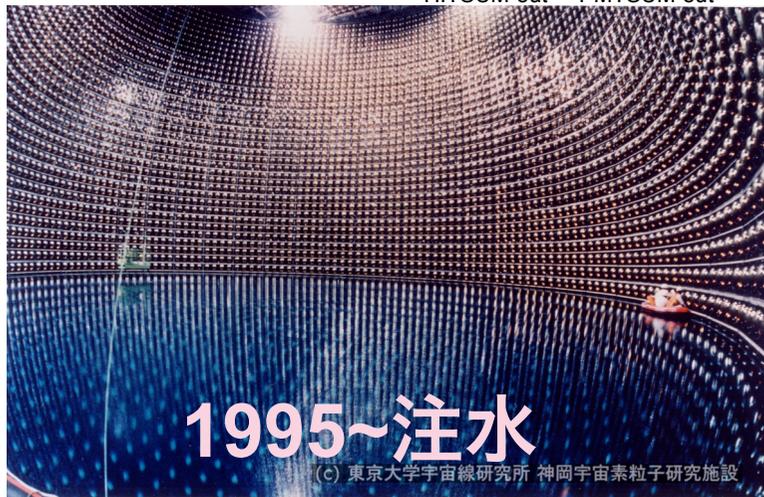
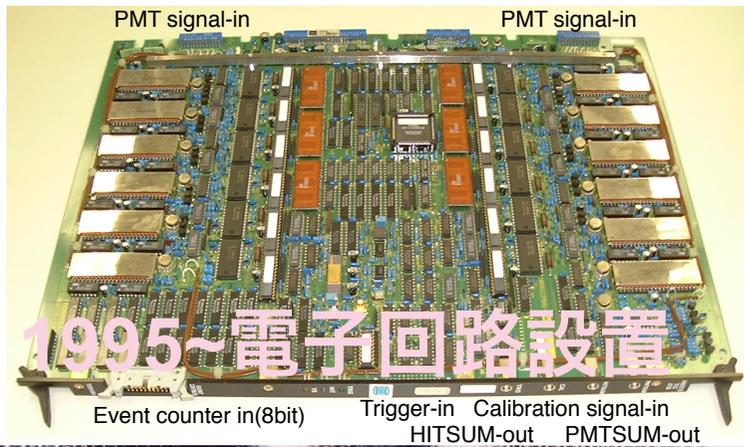
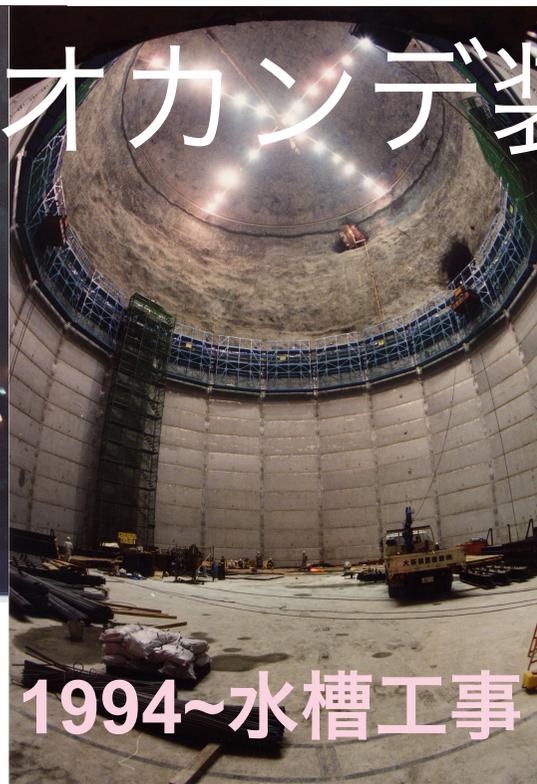
鈴木 厚人

加速器で作ったニュートリノで調べよう



西川 公一郎

# スーパーカミオカンデ装置の建設

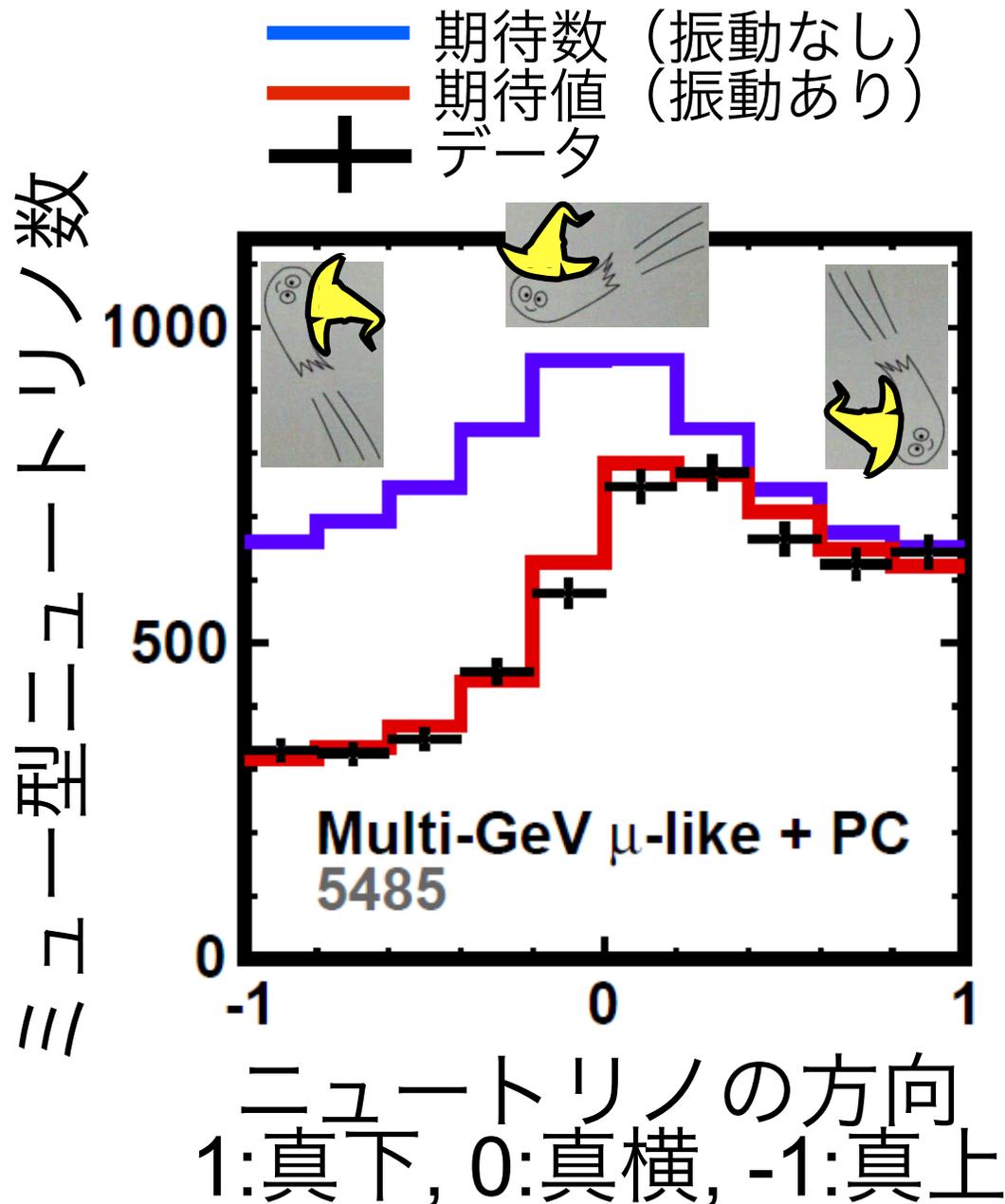


戸塚さん (実験リーダー)

塩澤



# スーパーカミオカンデの観測結果



このデータからわかること

- 下向き ( $\cos\theta=1$ ) でニュートリノ飛行距離 $\sim 10\text{km}$ では期待通りの数が観測
- 上向き ( $\cos\theta=-1$ ) で飛行距離 $\sim 13,000\text{km}$ では期待の半分しか観測されず
- **ニュートリノ振動が起きている世界初の証拠!**



# 結果の報告 (論文)

VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 AUGUST 1998

## Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

### 「ニュートリノが振動する証拠」

Y. Fukuda,<sup>1</sup> T. Hayakawa,<sup>1</sup> E. Ichihara,<sup>1</sup> K. Inoue,<sup>1</sup> K. Ishihara,<sup>1</sup> H. Ishino,<sup>1</sup> Y. Itow,<sup>1</sup> T. Kajita,<sup>1</sup> J. Kameda,<sup>1</sup> S. Kasuga,<sup>1</sup> K. Kobayashi,<sup>1</sup> Y. Kobayashi,<sup>1</sup> Y. Koshio,<sup>1</sup> M. Miura,<sup>1</sup> M. Nakahata,<sup>1</sup> S. Nakayama,<sup>1</sup> A. Okada,<sup>1</sup> K. Okumura,<sup>1</sup> N. Sakurai,<sup>1</sup> M. Shiozawa,<sup>1</sup> Y. Suzuki,<sup>1</sup> Y. Takeuchi,<sup>1</sup> Y. Totsuka,<sup>1</sup> S. Yamada,<sup>1</sup> M. Earl,<sup>2</sup> A. Habig,<sup>2</sup> E. Kearns,<sup>2</sup> M.D. Messier,<sup>2</sup> K. Scholberg,<sup>2</sup> J.L. Stone,<sup>2</sup> L.R. Sulak,<sup>2</sup> C.W. Walter,<sup>2</sup> M. Goldhaber,<sup>3</sup> T. Barszczak,<sup>4</sup> D. Casper,<sup>4</sup> W. Gajewski,<sup>4</sup> P.G. Halverson,<sup>4,\*</sup> J. Hsu,<sup>4</sup> W.R. Kropp,<sup>4</sup> L.R. Price,<sup>4</sup> F. Reines,<sup>4</sup> M. Smy,<sup>4</sup> H.W. Sobel,<sup>4</sup> M.R. Vagins,<sup>4</sup> K.S. Ganezer,<sup>5</sup> W.E. Keig,<sup>5</sup> R.W. Ellsworth,<sup>6</sup> S. Tasaka,<sup>7</sup> J.W. Flanagan,<sup>8,†</sup> A. Kibayashi,<sup>8</sup> J.G. Learned,<sup>8</sup> S. Matsuno,<sup>8</sup> V.J. Stenger,<sup>8</sup> D. Takemori,<sup>8</sup> T. Ishii,<sup>9</sup> J. Kanzaki,<sup>9</sup> T. Kobayashi,<sup>9</sup> S. Mine,<sup>9</sup> K. Nakamura,<sup>9</sup> K. Nishikawa,<sup>9</sup> Y. Oyama,<sup>9</sup> A. Sakai,<sup>9</sup> M. Sakuda,<sup>9</sup> O. Sasaki,<sup>9</sup> S. Echigo,<sup>10</sup> M. Kohama,<sup>10</sup> A.T. Suzuki,<sup>10</sup> T.J. Haines,<sup>11,4</sup> E. Blaufuss,<sup>12</sup> B.K. Kim,<sup>12</sup> R. Sanford,<sup>12</sup> R. Svoboda,<sup>12</sup> M.L. Chen,<sup>13</sup> Z. Conner,<sup>13,‡</sup> J.A. Goodman,<sup>13</sup> G.W. Sullivan,<sup>13</sup> J. Hill,<sup>14</sup> C.K. Jung,<sup>14</sup> K. Martens,<sup>14</sup> C. Mauger,<sup>14</sup> C. McGrew,<sup>14</sup> E. Sharkey,<sup>14</sup> B. Viren,<sup>14</sup> C. Yanagisawa,<sup>14</sup> W. Doki,<sup>15</sup> K. Miyano,<sup>15</sup> H. Okazawa,<sup>15</sup> C. Saji,<sup>15</sup> M. Takahata,<sup>15</sup> Y. Nagashima,<sup>16</sup> M. Takita,<sup>16</sup> T. Yamaguchi,<sup>16</sup> M. Yoshida,<sup>16</sup> S.B. Kim,<sup>17</sup> M. Etoh,<sup>18</sup> K. Fujita,<sup>18</sup> A. Hasegawa,<sup>18</sup> T. Hasegawa,<sup>18</sup> S. Hatakeyama,<sup>18</sup> T. Iwamoto,<sup>18</sup> M. Koga,<sup>18</sup> T. Maruyama,<sup>18</sup> H. Ogawa,<sup>18</sup> J. Shirai,<sup>18</sup> A. Suzuki,<sup>18</sup> F. Tsushima,<sup>18</sup> M. Koshiya,<sup>19</sup> M. Nemoto,<sup>20</sup> K. Nishijima,<sup>20</sup> T. Futagami,<sup>21</sup> Y. Hayato,<sup>21,§</sup> Y. Kanaya,<sup>21</sup> K. Kaneyuki,<sup>21</sup> Y. Watanabe,<sup>21</sup> D. Kielczewska,<sup>22,4</sup> R.A. Doyle,<sup>23</sup> J.S. George,<sup>23</sup> A.L. Stachyra,<sup>23</sup> L.L. Wai,<sup>23,||</sup> R.J. Wilkes,<sup>23</sup> and K.K. Young<sup>23</sup>

(Super-Kamiokande Collaboration)

<sup>1</sup>*Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo, 188-8502, Japan*

<sup>2</sup>*Department of Physics, Boston University, Boston, Massachusetts 02215*

<sup>3</sup>*Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973*

# 科学的知識は人類に共有される

## ニューヨークタイムス

### Mass Found in Elusive Particle; Universe May Never Be the Same

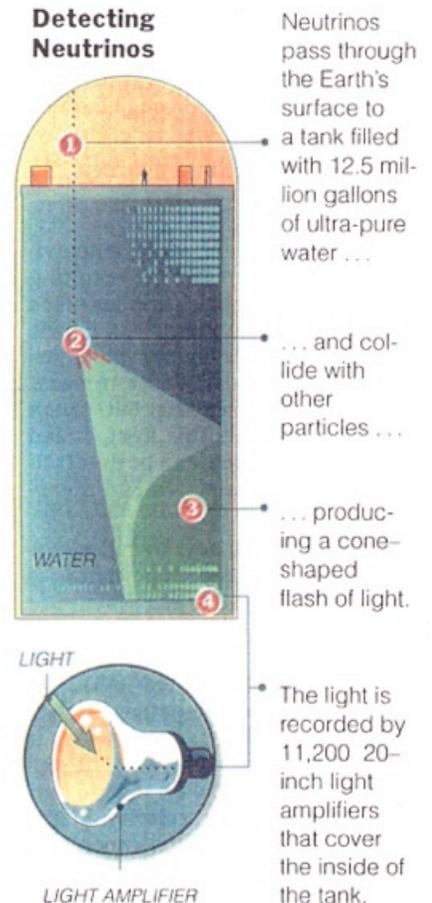
#### Discovery on Neutrino Rattles Basic Theory About All Matter

By MALCOLM W. BROWNE

TAKAYAMA, Japan, June 5 — In what colleagues hailed as a historic landmark, 120 physicists from 23 research institutions in Japan and the United States announced today that they had found the existence of mass in a notoriously elusive subatomic particle called the neutrino.

The neutrino, a particle that carries no electric charge, is so light that it was assumed for many years to have no mass at all. After today's announcement, cosmologists will have to confront the possibility that a significant part of the mass of the universe might be in the form of neutrinos. The discovery will also compel scientists to revise a highly successful theory of the composition of matter known as the Standard Model.

Word of the discovery had drawn some 300 physicists here to discuss neutrino research. Among other things, the finding of neutrino mass might affect theories about the formation and evolution of galaxies and the ultimate fate of the universe. If neutrinos have sufficient mass, their presence throughout the universe



#### And Detecting Their Mass

By analyzing the cones of light, physicists determine that some neutrinos have changed form on their journey. If they can change

- 報道で発見が伝えられる。
- クリントン大統領がMIT大学での演説で、発見にふれる。

## クリントン大統領演説

### ニュートリノに質量

### 米大統領が意義を強調

【ワシントン5日】大塚隆一「クリントン米大統領は五日、米マサチューセッツ工科大(MIT)の卒業式の講演で、なぞの素粒子「ニュートリノ」に質量があることを突き止めた東大宇宙線研究所の実験グループの成果に触れ、「素粒子の性質や宇宙の膨張など最も根元的な(物理)理論を変えるかもしれない」と意義をたたえた。

大統領は「こうした発見の持つ意味は実験室内にはとどまらない。社会全体や私たちの生命観にも影響を及ぼす」と指摘。「米エネルギー省も資金援助をしていた」と述べ、日米共同実験だったことを強調した。

その一方で大統領は、素粒子のなぞの解明を目指す米国の大型プロジェクトが「無駄遣い」とする議会の反対でつぶされたことを批判。「米国は科学技術の革命を先導し続けなければならない」と述べ、基礎研究への投資の重要性を訴えた。

「ニュートリノに質量」の発表は、五日付の米紙「ニューヨーク・タイムズ」、ワシントン・ポストもそれぞれ一面で報じるなど、米国内でも反響を呼んでいる。

- 教科書に載る。→多くの学生に伝わる。

# ニュートリノ振動 (簡易版)

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2 2\vartheta_{23} \sin^2 \left( \frac{m^2 \times L}{4E} \right)$$

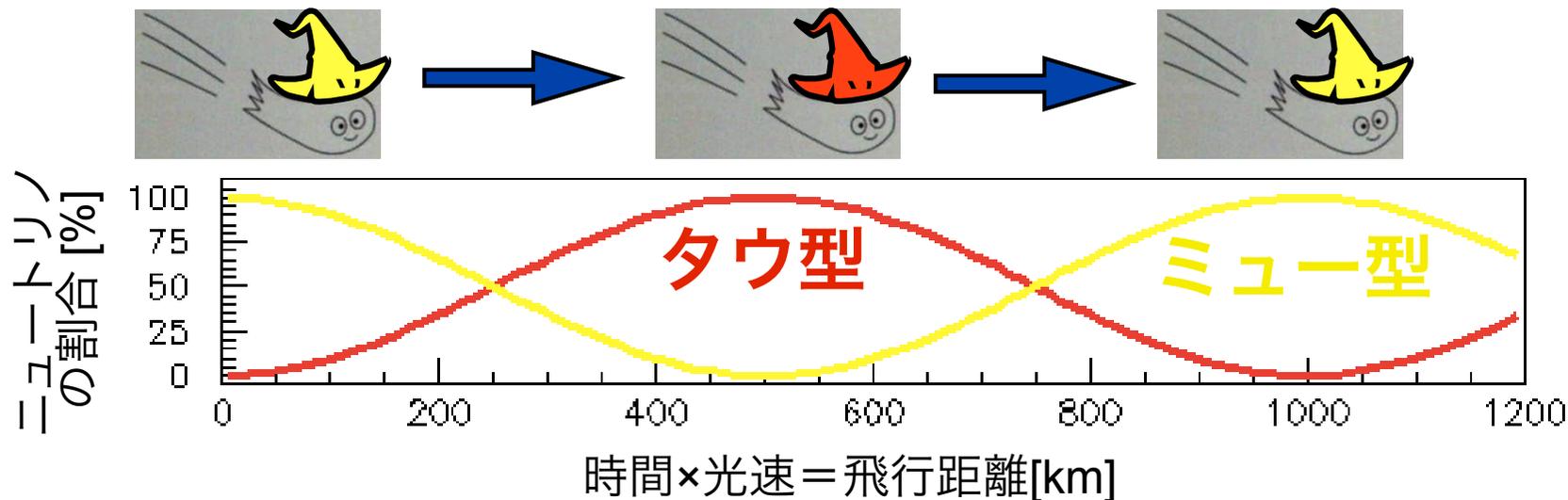
# ニュートリノ振動

ミュー型ニュートリノがミュー型ニュートリノである確率

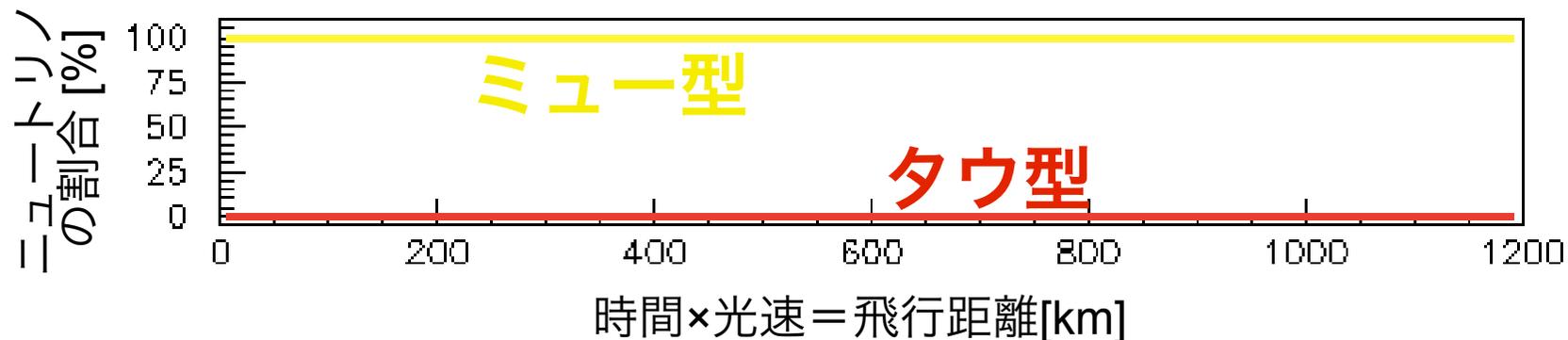
$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2 2\vartheta_{23} \sin^2 \left( \frac{\overset{\text{質量}}{m^2} \times \overset{\text{時間}}{T}}{\underset{\text{エネルギー}}{4E}} \right)$$

# 振動と質量の関係

## 1. 質量がゼロでない場合→変化する



## 2. 質量がゼロの場合 (m=0) →変化しない



変化（振動）を観測→ニュートリノに質量がある証拠！

# ニュートリノ振動

Flavor eigenstate
Mass eigenstate

$${}^t(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau) = U_{ai}^{MNS} {}^t(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$$

$U^{MNS}$ : Maki-Nakagawa-Sakata Matrix

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta_{12} & \sin\vartheta_{12} & 0 \\ -\sin\vartheta_{12} & \cos\vartheta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\vartheta_{13} & 0 & \sin\vartheta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\vartheta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\vartheta_{23} & \sin\vartheta_{23} \\ 0 & -\sin\vartheta_{23} & \cos\vartheta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} \text{Re}(U_{ai}^* U_{\beta i} U_{ai}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{4E_\nu}$$

$$\mp 2 \sum_{j>i} \text{Im}(U_{ai}^* U_{\beta i} U_{ai}^* U_{\beta j}) \sin \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{2E_\nu}$$

ニュートリノは三種類  
 $\nu_e$ (電子型),  $\nu_\mu$ (ミュー型),  $\nu_\tau$ (タウ型)

スーパーカミオカンデ開始前は7個全ての値がわかっていなかった

実験で調べるパラメータは：

$\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\delta$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$

CPの破れのパラメータ

# ニュートリノ振動の発見の意味

- ニュートリノは、極端に小さな（電子の100万分の1程度の）質量を持つ。その理由は理解されていない。
- ニュートリノのユニークな性質（質量など）は、次世代の素粒子理論への突破口になると期待されている。
- 宇宙の進化の過程で、ニュートリノが粒子（物質）と反粒子（反物質）のバランスを崩した可能性。

ニュートリノは、素粒子と宇宙を理解するための、重要な鍵となった。