

# 素粒子物理学の魅力

## — ニュートリノ物理学を中心として —

小出 義夫

### Contents

1. 謎の地下研究所「スーパーカミオカンデ」
2. 「ニュートリノ」とは？
3. 主な発生源とニュートリノ実験
4. 今、何が謎か？

### 1. 謎の地下研究所「スーパーカミオカンデ」

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙粒子研究施設

場所：岐阜県吉城郡神岡町 地下 1,000 m

KAMIOKANDE: 1983 年完成 水 4,500 トン

Super-KAMIOKANDE: 1995 年完成 水 50,000 トン

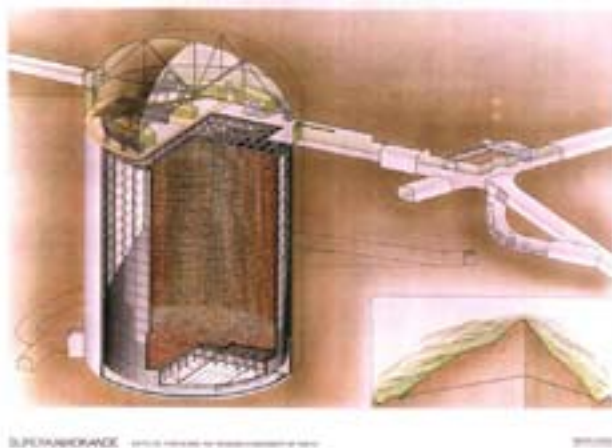


図 1.1 スーパーカミオカンデ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp> より転載

観測原理：

$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$  ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) のときに  
でる微弱光を水タンクの壁にとりつけた光電子増倍管にて検出

特徴：

リアルタイムでのデータが得られる  
入射ニュートリノの方向が測定できる

[参考] 11月12日の悲劇

2001年11月12日午前11時、タンクの水を抜いて補修点検後、再度水を注入中に、突然、11,146本の光電子増倍管の内、約60%が破壊される。

完全な復旧予定は2006年。

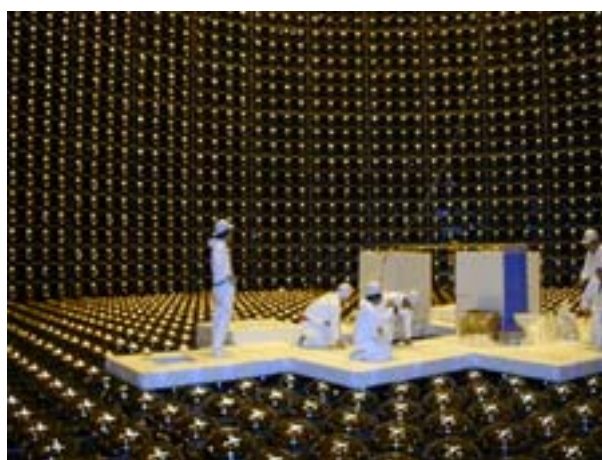


図 1.2 事故直前のスーパーカミオカンデ内部  
2001年9月5日、小出による撮影

## 2. 「ニュートリノ」とは？

### 2.1 素粒子とは

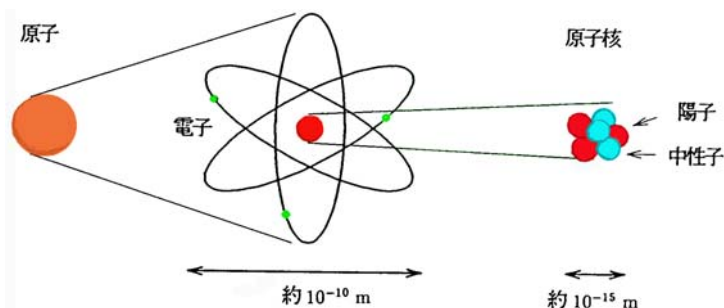
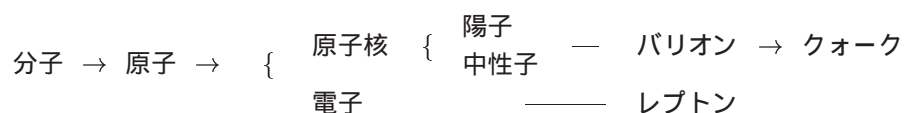


図 2.1 原子および原子核



### 2.2 歴史

1930 年 パウリ (W.Pauli, スイス) ニュートリノ仮説

実験事実： $\beta$ 崩壊 (中性子  $n$ )  $\rightarrow$  (陽子  $p$ ) + (電子  $e^-$ )  
において，反応の前後でエネルギーの合計が一致しない  
 $\Rightarrow$  パウリは，未知の観測にからない粒子がエネルギーを運びと仮定  
[1945 年度ノーベル物理学賞受賞：パウリ原理の発見]

1947 年 ポウエル (C.F.Powell, イギリス)

宇宙線による素粒子反応  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$   
 $\hookrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  を観測  
[1950 年度ノーベル物理学賞受賞]

1956 年 ライネス (F.Reines, アメリカ)

原子炉からの反ニュートリノを用いて  
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  の反応を確認  
[1995 年度ノーベル物理学賞受賞]

### 2.3 現在分かっている性質

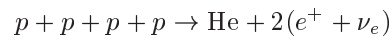
- (a) 電気的中性
- (b) 質量がとびきり小さい (電子の質量の 100 万分の 1 以下)
- (c) 物質中をほとんど自由に通過する
- (d) 現在 3 種類の仲間が知られている
  - $\nu_e$ : エレクトロンニュートリノ
  - $\nu_\mu$ : ミューオンニュートリノ
  - $\nu_\tau$ : タウニュートリノ

### 3. 主な発生源とニュートリノ実験

発生源	反 応	ニュートリノ実験
太陽	核融合反応 $p + p + p + p \rightarrow \text{He} + 2(e^+ + \nu_e)$	太陽ニュートリノ実験 (例) スーパーカミオカンデ実験
大気	宇宙線の大气との衝突 $\pi$ の生成と崩壊	大気ニュートリノ実験 (例) スーパーカミオカンデ実験
超新星 (スーパーノバ)	重力エネルギーの放出	超新星ニュートリノ観測 (例) カミオカンデ実験
原子炉	核分裂 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	原子炉ニュートリノ実験 (例) カムランド (Kamland) 実験
加速器	素粒子反応	加速器実験 (例) K2K 実験

#### 3.1 太陽ニュートリノ

核融合反応によるニュートリノの放出



どれくらいの数のニュートリノが地球にやってくるか？

太陽に垂直な面に対し  $6.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

身長 160cm, 体幅 25cm, 水平に対し  $60^\circ$  の角度で太陽光が入射

⇒ 太陽から見た有効面積  $2 \times 10^3 \text{ cm}^2$

人を貫くニュートリノの数:  $6.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \times 2 \times 10^3 \text{ cm}^2 = 1.36 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$

すなわち, 1秒あたり約 100兆個

ニュートリノ振動の観測

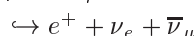
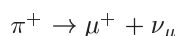
観測された  $\nu_e$  の数が, 標準太陽モデルからの理論的予想値に比べて, かなり少ない

⇒ ニュートリノ振動  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  が起こっていると解釈される

$\sin^2 2\theta_{12} \simeq 0.76, \quad m_2^2 - m_1^2 \simeq 5.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

#### 3.2 大気ニュートリノ

宇宙線が大气と衝突 ⇒  $\pi^+$  メソン (あるいは  $K^+$  メソン) を生成



理論的予想:  $N(\nu_\mu) : N(\nu_e) = 2 : 1$

しかるに観測値は理論値の約 0.64 倍

⇒ ニュートリノ振動  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  と解釈される

$\sin^2 2\theta_{23} \simeq 1.0, \quad |m_3^2 - m_2^2| \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

1998年6月にSKグループはニュートリノ振動  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  の発見を公表

ニュートリノが質量を持つと言うことの世界初の実験的検証を行う

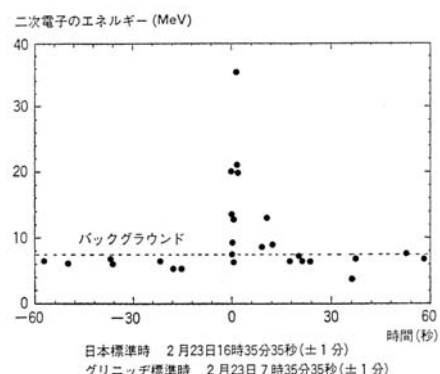
#### 3.3 超新星ニュートリノ

1987年2月23日午後4時35分

大マゼラン星雲の中の1つの星が超新星となったときに放出されたニュートリノをカミオカンデが捕らえる(ニュートリノは15万年の旅をして地球に到達した!)

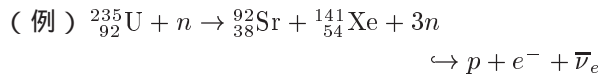
図 3.1 超新星からのニュートリノ信号

日本物理学会誌第 42 巻第 5 号 (1987 年), 佐藤勝彦, p.500, より転載



### 3.4 原子炉ニュートリノ

#### 核分裂



実験(例)カムランド (Kamland) 実験 (2001年スタート)

$L = 160 \text{ km}, E_\nu \sim 4 \text{ MeV}$

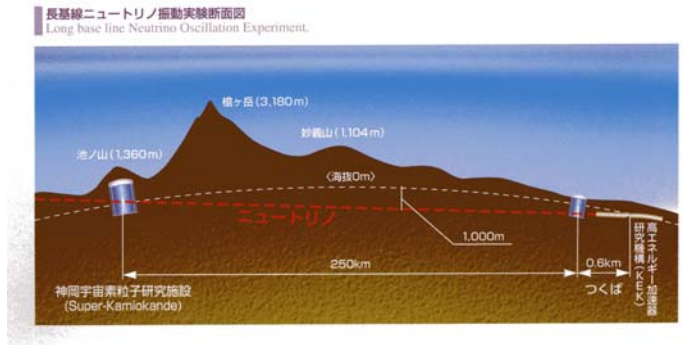
### 3.5 加速器ニュートリノ

実験(例) K2K 実験 (1999年スタート)

筑波 KEK から神岡 SK へ向けてニュートリノビームを発射

$L = 250 \text{ km}, E_\nu \sim 1.4 \times 10^3 \text{ MeV}$

図 3.2 K2K: 地中をニュートリノビームは走る  
 東京大学宇宙線研究所パンフレット「神岡宇宙素粒子研究施設」1999.1, p.14 より転載



## 4. 今、何が謎か？

### 4.1 クォークとレプトン

ニュートリノの研究は物質究極の基本粒子「クォークとレプトン」の統一的理解への手がかりとなると思われる。

荷電	第1世代	第2世代	第3世代
$Q = +\frac{2}{3}$	$u$ (2.33)	$c$ (677)	$t$ (181,000)
$Q = -\frac{1}{3}$	$d$ (4.69)	$s$ (93.4)	$b$ (3,000)
$Q = 0$	$\nu_e$ (?)	$\nu_\mu$ (?)	$\nu_\tau$ (?)
$Q = -1$	$e^-$ (0.511)	$\mu^-$ (105.7)	$\tau^-$ (1777)

数値の単位は MeV

ニュートリノの質量は、大きくても、せいぜいが電子の質量の 100 万分の 1 以下と思われる

- (1) 物質基本粒子の中で、なぜニュートリノだけがこんなに小さな質量を持っているのか？
- (2) そもそも「世代」の起源は何か？

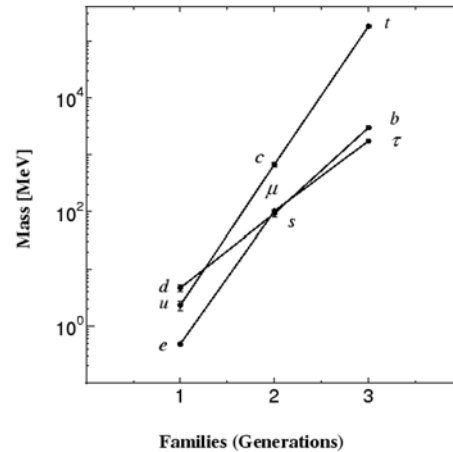


図 4.1 クォーク・レプトンの質量

### 4.2 なぜニュートリノの質量はこんなに小さいのか？

シーソーメカニズム説	輻射質量起源説
柳田 (1979年), 他	Zee (1980年)
もともと $m_\nu$ は $m_\nu \sim m_{q,\ell}$ であった $\downarrow$ 大きなマヨラナ質量 $M_R$ の存在により $m_\nu (M_R)^{-1} m_\nu$ で与えられる小さな質量として振る舞う	もともと $m_\nu$ はゼロであった $\downarrow$ 輻射プロセス $\nu \rightarrow e^- + H^+ \rightarrow \bar{\nu}$ により, ごく小さな質量が 2 次的に生まれた

### 4.3 「世代」の起源は何か？

クォークと荷電レプトンでは世代が異なるごとに加速度的な質量増加では、ニュートリノではどうか？

世代間の混合: なぜクォークとレプトンではそんなに違うのか？