

1.3 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

ν_e : エレクトロンニュートリノ

ν_μ : ミューオンニュートリノ

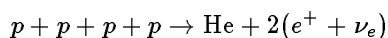
ν_τ : タウニュートリノ

2. 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 π 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

2.1 太陽ニュートリノ

2.1.1 核融合反応



2.1.2 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° 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

2.1.3 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

KAMIOKAND: 1983 年完成 水 4,500 トン

Super-KAMIOKAND: 1995 年完成 水 50,000 トン

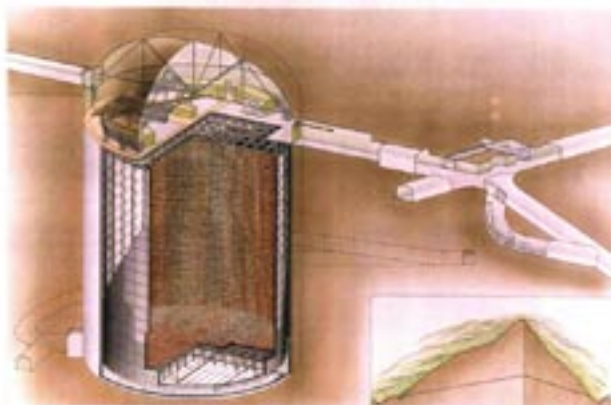


図 2.1 スーパーカミオカンデ <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp> より転載

観測原理：

$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) のときに
 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

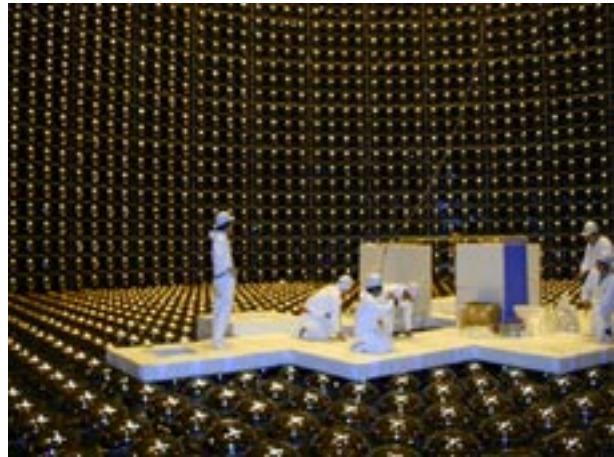


図 2.2 事故直前のスーパーカミオカンデ内部
 2001年9月5日、小出による撮影

[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

2.1.4 ニュートリノ振動の観測

観測された ν_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

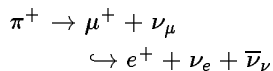
⇒ ニュートリノ振動 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ が起こっていると解釈される

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

2.2 大気ニュートリノ

宇宙線が大気と衝突

⇒ π^+ 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いうことの世界初の実験的検証を行う

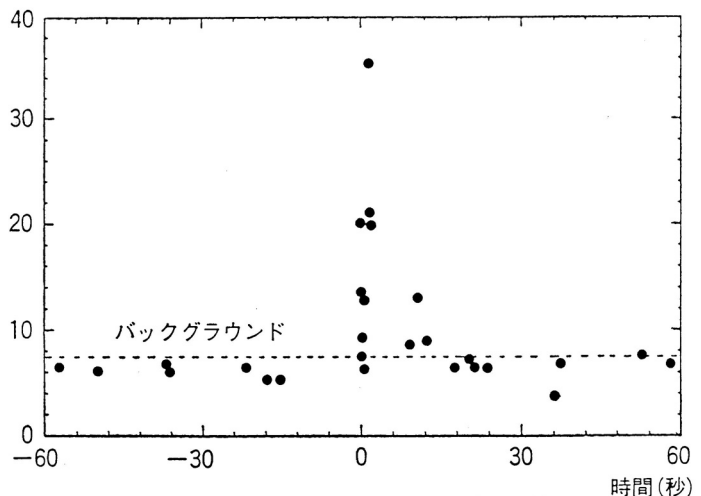
2.3 超新星ニュートリノ

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 2.3 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

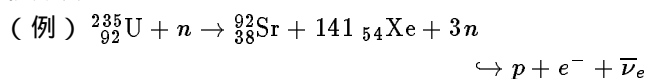
二次電子のエネルギー (MeV)



日本標準時 2月23日16時35分35秒(±1分)
 グリニッチ標準時 2月23日7時35分35秒(±1分)

2.4 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)

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

2.5 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

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

3. 今、何が謎か？

3.1 質量の起源

3.1.1 クォークとレプトンの質量

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)
$Q = 0$	ν_e (?)	ν_μ (?)	ν_τ (?)
$Q = -1$	e^- (0.511)	μ^- (105.7)	τ^- (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

⇒ 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？

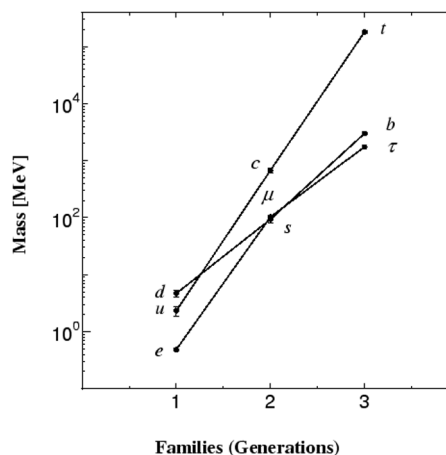


図 3.1 クォーク・レプトンの質量

3.1.2 対極的な 2 つの説

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_ν は $m_\nu \sim m_{q,\ell}$ であった ↓ 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_ν はゼロであった ↓ 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

3.2 混合角の起源

3.2.1 実験事実

クォーク: $\theta_{12} \simeq 12.7^\circ; \quad \theta_{23} \simeq 2.3^\circ$

レプトン: $\theta_{12} \sim 60^\circ; \quad \theta_{23} \simeq 45^\circ$

3.2.2 なぜ両者はこんなに異なるパターンを示すのか？