

# ニュートリノの謎

サイエンスカフェ

2015年10月29日

青山 昭五

# ノーベル物理学賞 2015

“Metamorphosis in the particle world”

梶田隆章 教授

スーパーカミオカンデ

Arthur B. McDonald 教授

SNO (カナダ)

(Sudbury Neutrino Observatory)

# ニュートリノ

660億個  $/cm^2 \cdot 秒$

我々の体を通り抜ける

どこから？

SNO

スーパーカミオカンデ

- ✓ 太陽ニュートリノ 核融合
- ✓ 大気ニュートリノ 宇宙線(主に  $p$ )と大気中の原子核との衝突
- ✓ 地球ニュートリノ カムランド
- ✓ 超新星爆発 1987年2月 カミオカンデ
- ✓ 加速器 J-PARK OPERA
- ✓ 原発 カムランド
- ✓ 背景放射 ビックバンで創生

光	$2.7K$
ニュートリノ	$1.9K$ (理論)

## 歴史

- 1914年 Chadwick  $\beta$ 崩壊の発見  
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$
- 1930年 Pauli  $\beta$ 崩壊でのエネルギー非保存の危機  
中性謎の粒子を仮定して救済
- 1932年 Chadwick 中性子 (neutron) の発見  
これと区別して  
ニュートリノ (neutrino)  $\nu$   
と命名 (Fermi). 正しくは 反ニュートリノ  $\bar{\nu}$
- 1956年 Reines, Cowan 直接の実在証明  
$$\bar{\nu}(\text{原発}) + p \rightarrow e^{+} + n \quad \text{逆}\beta\text{崩壊}$$
- 1962年 Lederman, Schwartz, Steinberger  
新ニュートリノの発見  $\nu_{\mu}$   
$$\bar{\nu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$$
  
$$\bar{\nu} + p \rightarrow e^{+} + n \quad \times$$

1962年

牧, 中川, 坂田

MNS 名古屋模型

対応



	第1世代	第2世代
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$
	$e$	$\mu$
クォーク	$u$	?
	$d$	$s$



見える



見えない



1973年

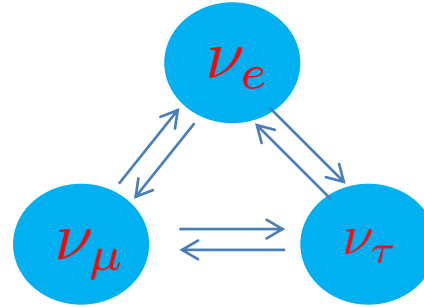
小林, 益川

$CP$  の破れ, 実験では1964年に発見

	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$ 1975年
クォーク	$u$	$c$ 1974年	$t$
	$d$	$s$	$b$ 1977年

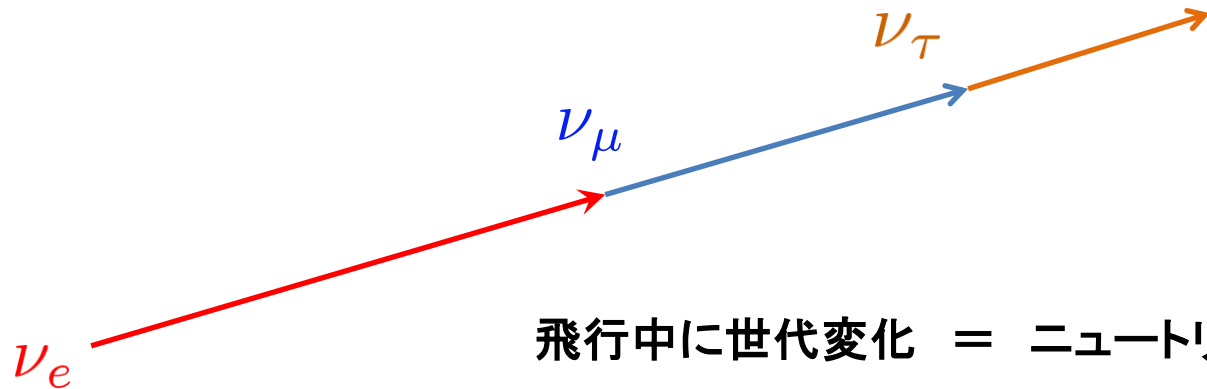
# ニュートリノ

- ▶ 3世代の混合状態



- ▶ 異なった質量をもつ

└───> それぞれが異なった時間発展

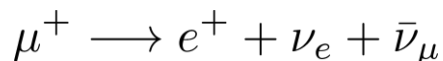
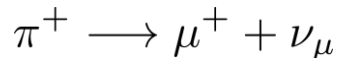


飛行中に世代変化 = ニュートリノ振動

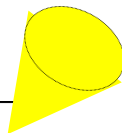
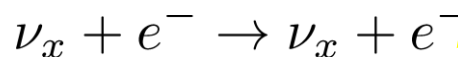
# スーパーカミオカンデ

## 大気ニュートリノの観測

$p$  (宇宙線) + 原子核(大気中)  $\rightarrow \pi, K$



生成された  $\nu_e, \nu_\mu$  が水と反応



チェレンコフ光

光電子増倍管  
浜フォト

比  $\nu_\mu / \nu_e = 2$  (理論)

$< 0.6$  (観測) 1992年) 第一世代スーパーカミオカンデ

予測  $\nu_\mu$  が  $\nu_e$  または  $\nu_\tau$  に変化

第二世代スーパーカミオカンデ ... 10倍にパワーアップ

観測結果

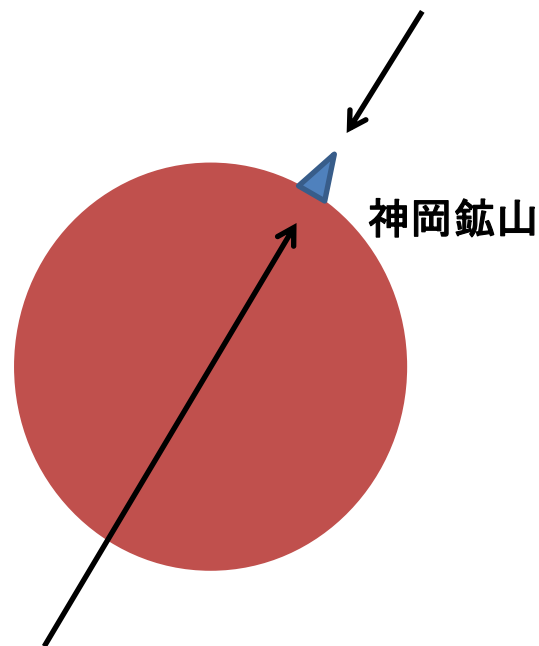
1992年 - 1998年

下からの  $\nu_\mu$  が少ない

$\nu_e$  については方角依存性はなし

- - - MSW効果で  $\nu_e$  生成

- - - 飛行中に変異  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  が生じた

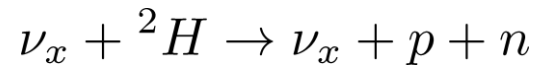
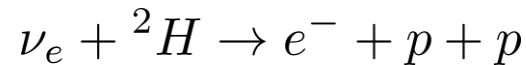


# SNO

太陽ニュートリノ の観測

核融合で生成されるので  $\nu_e$

飛行中に姿をかえながら、装置の重水と反応



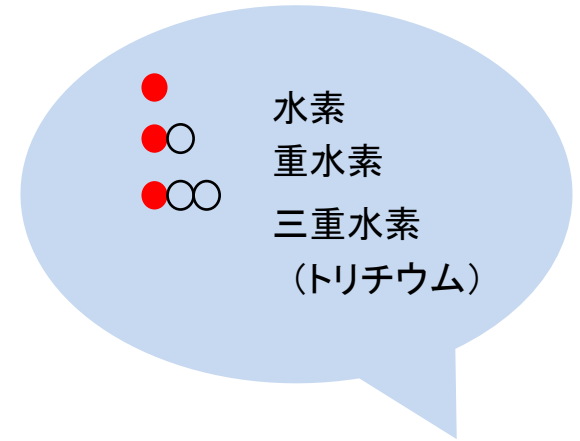
観測結果(2001年-2002年, 2013年)

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  の総数      525万個 /  $cm^2 \cdot 秒$

“標準太陽モデル”での  $\nu_e$  の総数(理論値)と一致

$\nu_\mu, \nu_\tau$  の総数      326万個 /  $cm^2 \cdot 秒$

∴ 2/3 の  $\nu_e$  が飛行中に変異していた



参考



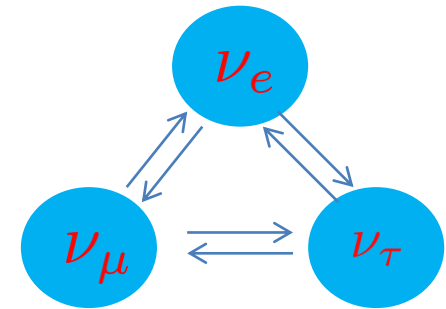
# ニュートリノ振動

## 理論

質量の異なった粒子の状態の重ね合わせ  
簡単のため、2種類で考える

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

牧—中川—坂田 行列



$\nu_2, \nu_3$  が異なった質量をもつ

↳ シュレディンガー方程式によって異なった時間発展

$$\begin{pmatrix} e^{-i \frac{E_2 t}{\hbar}} \nu_2 \\ e^{-i \frac{E_3 t}{\hbar}} \nu_3 \end{pmatrix}$$

をして混合の割合が変化

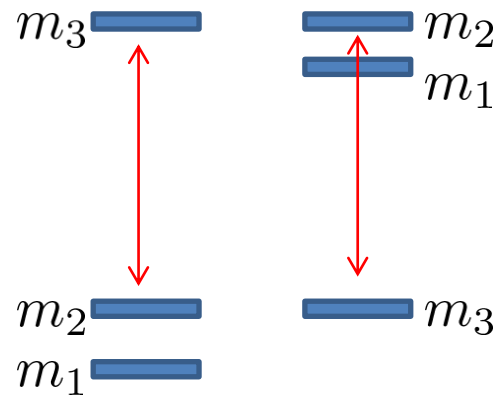
$$\text{遷移確率 } (\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 (m_3^2 - m_2^2) \frac{L}{E} \right)$$

飛行距離  
エネルギー

# スーパーカミオカンデの観測結果

質量の大きさの順序 ?

順階層      逆階層



$$\theta_{23} \approx 42 \text{ 度}$$

$$\theta_{12} \approx 33 \text{ 度}$$

$$\theta_{13} \approx 9 \text{ 度}$$

$$m_3^2 - m_2^2 \approx 2.4eV^2 \text{ または } -2.4eV^2$$

# 基本粒子の質量

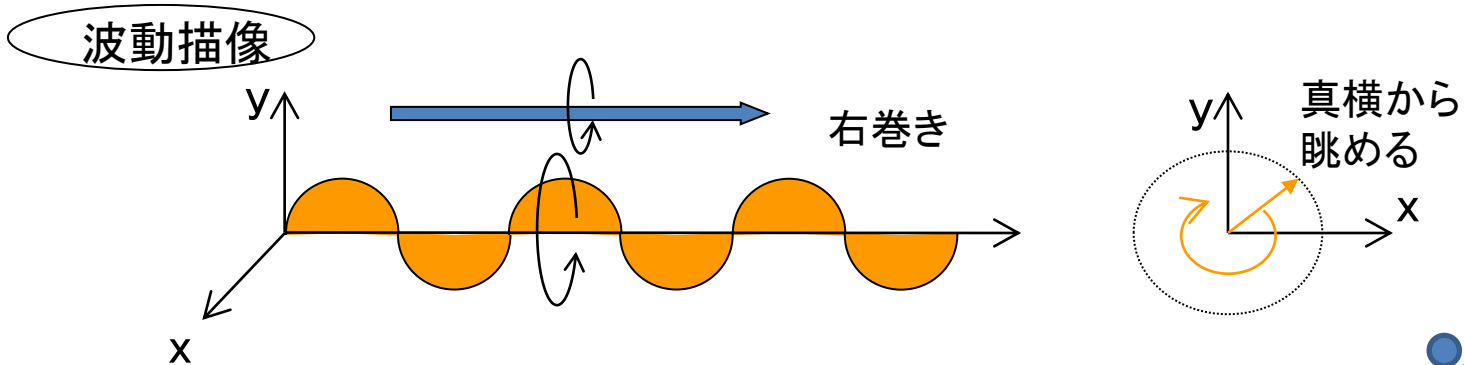
フェルミ粒子	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u 2.49 Mev	c 1.27 Gev	t 172 Gev
	d 5.05 Mev	s 101 Mev	b 4.19 Gev
レプトン	$\nu_e \leq 2 \text{ ev}$	$\nu_\mu \leq 0.19 \text{ Mev}$	$\nu_\tau \leq 18.2 \text{ Mev}$
	e 0.511 Mev	$\mu$ 106 Mev	$\tau$ 1.7 Gev

ゲージ粒子	$W^\pm$ 80.4 Gev
	$Z^0$ 91.2 Gev
	$\gamma$ 0

# 素粒子統一理論の再検討

現状 …… 左巻きニュートリノしか実験で見つからない

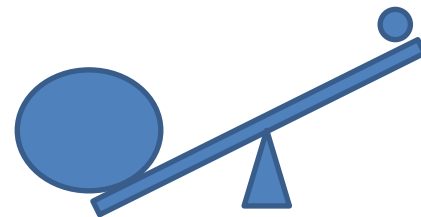
粒子画像	左巻き	右巻き	スピン	
光			1	ボソン
ニュートリノ			$\frac{1}{2}$	フェルミオン



ニュートリノに質量がある

➡ 右巻きニュートリノの存在が必須

しかし、シーソー機構で重たくなって見えない



柳田 1979年

## 宇宙論への意味

✓ ニュートリノはダークマターの候補への可能性



ー 軽すぎる

✓ 大きな  $CP$  対称性の破れを説明できる可能性

クォークセクターの小林-益川では小さ過ぎる

✓ レプトン創生 をととしてバリオン創生できる可能性

スファレロン機構

宇宙の陽子の数  $\gg$  宇宙の反陽子の数

このアンバランスは何故？

## その他のプロジェクト

### 1. カムランド 鈴木厚人

- ▶ シンチレータ検出器
- ▶ 反電子ニュートリノ  $\bar{\nu}_e$  を探査
- ▶ 原発から打込む 敦賀, 柏崎 180km  
J-PARK(東海村) 300km
- ▶ 地球ニュートリノ  $^{238}\text{U}$ の核分裂, 地熱の50%

### 2. OPERA 名古屋大F研

- ▶ 原子核乾板 ... 富士フィルム
- ▶ CERN—Gran Sasso 730 km

