



**大学説明会オープンラボ**

**2005年7月18日**

**素粒子物理学とニュートリノ**

**首都大学東京理工学系物理学コース**

**素粒子理論サブグループ 安田修**

# 素粒子とは？

物質中の**電子・クォーク**等が素粒子  
(今のところ)

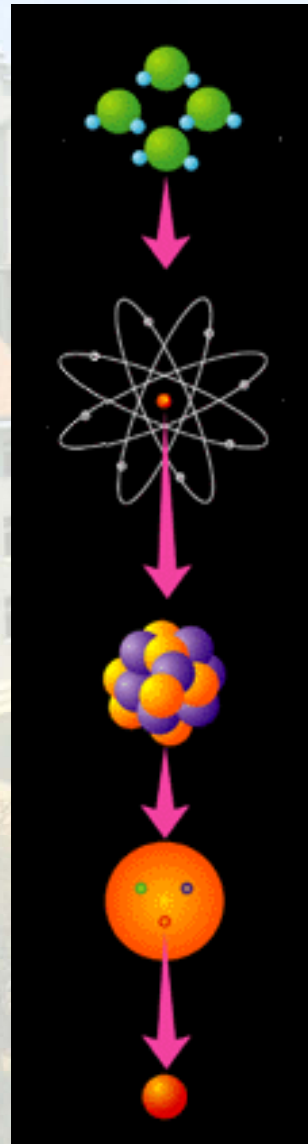
$10^{-7}\text{cm}$

$10^{-8}\text{cm}$

$10^{-12}\text{cm}$

$10^{-13}\text{cm}$

$<10^{-16}\text{cm}$



水の分子(水素・酸素)

酸素原子(原子核・**電子**)

原子核(陽子・中性子)  
) , \* , +  
核子

核子(u**クォーク**・d**クォーク**)

**クォーク**

# 特殊相対論と量子力学

- 特殊相対論(1904年頃完成) (大学3~4年で学習)

アインシュタインの関係式

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

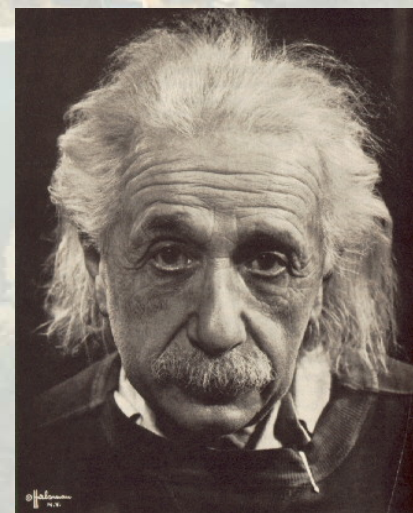
E:粒子のエネルギー, m:粒子の質量,

p:粒子の運動量(=  $mv / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ),

c:光速度= $3 \times 10^8$ m/s

特に超相対論的( $mc \ll p$ )の時には

$$E \cong pc$$



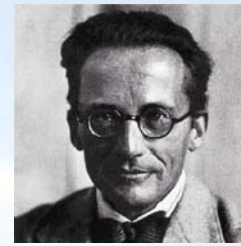
アインシュタイン



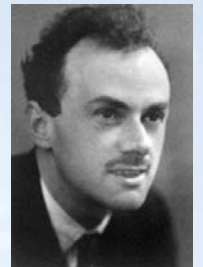
# ●量子力学（1930年頃完成） （大学3年で学習）



ボーア



シュレディンガー



ディラック

## ハイゼンベルグの不確定性原理

（座標と運動量は原理的に同時に正確には測定できない）

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h / (4\pi)$$

$\Delta x$ :座標の不確定性,  $\Delta p$ :運動量の不確定性

$h$ :プランク定数= $7 \times 10^{-34}$  J·s(角運動量の次元)

実際には  $\Delta x \rightarrow x$ 、 $\Delta p \rightarrow p$  として最善の測定を考えると

$$x \cdot p \cong h / (4\pi)$$

さらに両辺に  $c$  をかけて ※ $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$

$$x \cdot pc \cong hc / (4\pi) \cong 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{eV}$$



エネルギーの次元(超相対論的の時には $E \cong pc$ )



ハイゼンベルグ

粒子の拡がり 粒子を探るエネルギー  $\equiv$  物体の結合エネルギー

$x=10^{-7}$  cm  $\Leftrightarrow$  pc=100eV (分子)

$x=10^{-8}$  cm  $\Leftrightarrow$  pc=1keV (原子)

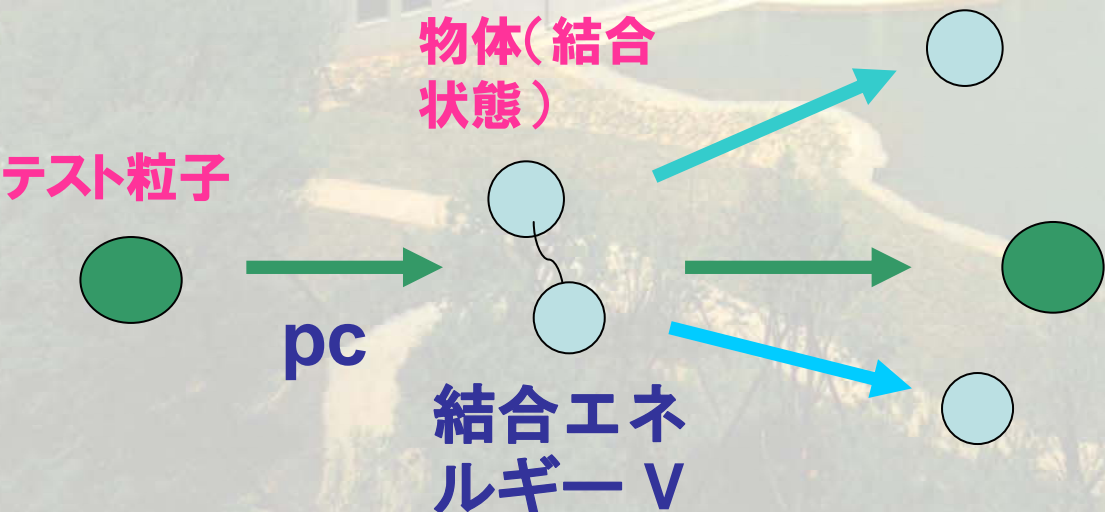
$x=10^{-12}$  cm  $\Leftrightarrow$  pc=10MeV= $10^7$ eV (原子核)

$x=10^{-13}$  cm  $\Leftrightarrow$  pc=100MeV= $10^8$ eV (核子)

$x<10^{-16}$  cm  $\Leftrightarrow$  pc $>$ 100GeV= $10^{11}$ eV (クォーク)

ポテンシャルエネルギー (位置エネルギーの一般化)

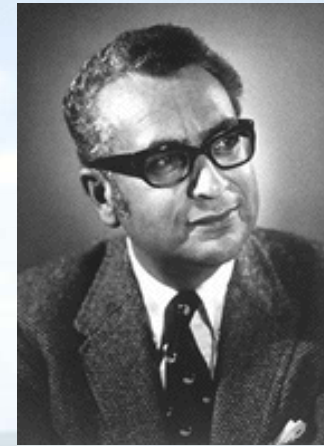
$\times 1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$



pc $>$ Vならば物体をバラバラに出来る

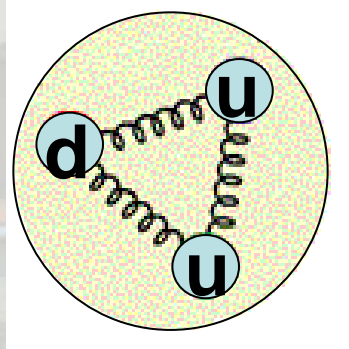
# クォークとレプトン

(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

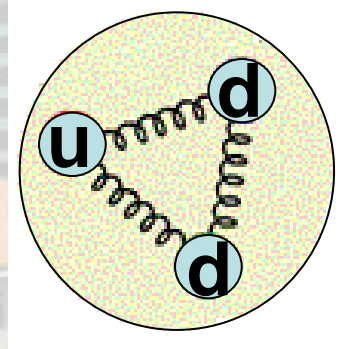


ゲルマン

●クォーク: 3個で核子を構成する素粒子



陽子



中性子

●レプトン: 電子とニュートリノは素粒子



電子



ニュートリノ

次ページで説明



粒子	電荷
----	----

陽子	+1
----	----

中性子	0
-----	---

u(アップ)クォーク	+2/3
------------	------

d(ダウン)クォーク	-1/3
------------	------

電子	-1
----	----

ニュートリノ	0
--------	---



# ニュートリノ(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

## ベータ崩壊

中性子→陽子+電子

の反応では一見エネルギー保存則が破れているように見える

実は**ニュートリノ**という、観測にかかりにくい粒子が存在して

中性子→陽子+電子+**ニュートリノ**

によりエネルギー保存則は成り立っている



パウリ

# 粒子と反粒子 (大学4年～大学院修士課程1年で学習)

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

粒子	電荷	反粒子	電荷
電子 $e^-$	-1	陽電子 $e^+$	+1
電子ニュートリノ $\nu_e$	0	反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$	0
陽子 $p = (uud)$	+1	反陽子 $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$	-1
中性子 $n = (udd)$	0	反中性子 $\bar{n} = (\bar{u}\bar{d}\bar{d})$	0
アップクォーク $u$	+2/3	反アップクォーク $\bar{u}$	-2/3
ダウンクォーク $d$	-1/3	反ダウンクォーク $\bar{d}$	+1/3

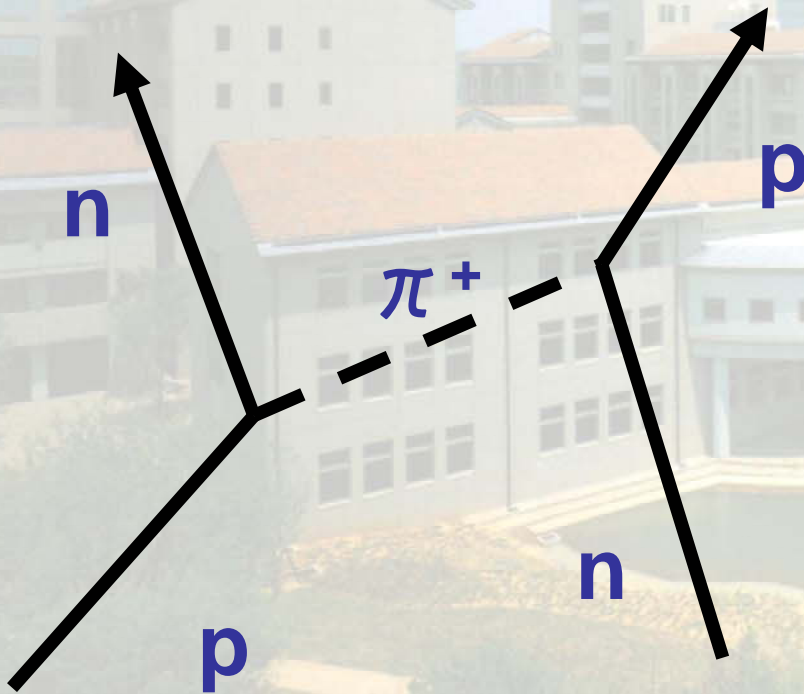
中性子と反中性子、電子ニュートリノと反電子ニュートリノはそれぞれバリオン数、電子レプトン数と呼ばれる量で区別される



# 素粒子論における力（相互作用）の記述

湯川の中間子論(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

相互作用（核力）は粒子（ $\pi$ 中間子）を媒介して起こる



湯川秀樹

湯川ポテンシャル

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-m_\pi cr/h}}{r}$$

力の到達距離は  $h/m_\pi c \doteq 10^{-13}\text{cm}$  ( $m_\pi = 140\text{MeV}$ )

# 自然界の4つの力(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

力	力の媒介粒子	媒介粒子の質量	力の大きさ
		<b>M</b>	<b><math>g^2</math></b>
強い力	グルーオン	0	1
電磁気力	光子	0	$10^{-2}$
弱い力	W,Zボゾン	約100GeV	$10^{-5}$
重力	重力子	0	$10^{-40}$

ポテンシャル

**$M \neq 0$ の時** 
$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-Mcr/h}}{r}$$

**$M = 0$ の時** 
$$V(r) = -\frac{g^2}{r}$$

# クォークとレプトンの世代

クォークとレプトンにはほとんど性質の同じコピーが**3世代**存在することが知られている



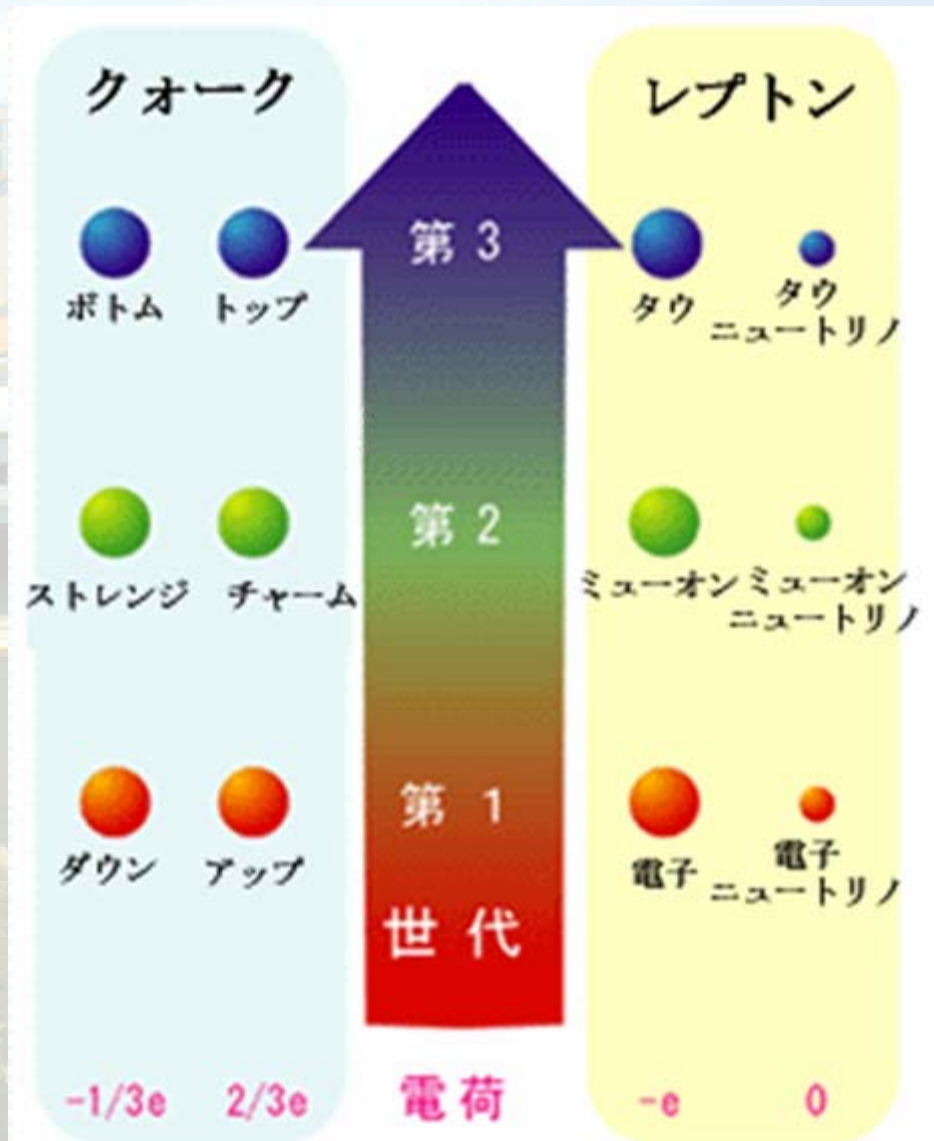
2世代目が実験的に発見される以前に、ある理論的な根拠から3世代の存在は予言されていた



小林誠

益川敏英

素粒子の質量は世代ごとに重くなってゆく



# 標準理論

(重力は除いてある)

物質粒子				力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代		
クォーク	アップ	チャーム	トップ	強い相互作用 グルーオン	
	ダウン	ストレンジ	ボトム	電磁相互作用 光子	
レプトン	<small>電子ニュートリノ</small>	<small>μニュートリノ</small>	<small>τニュートリノ</small>	弱い相互作用 Wボゾン  Zボゾン	
	電子	ミューオン	タウ		
質量を与える粒子 (未発見)				ヒッグス粒子                  ヒッグス粒子                  ヒッグス粒子                 ...	



# 標準理論の問題点とその拡張

(大学院修士課程1年以降に学習)

標準理論にはいくつかの定数(クォーク・レプトンの質量、ゲージ場の結合定数etc.)が入っていて、最終理論とは思われていない

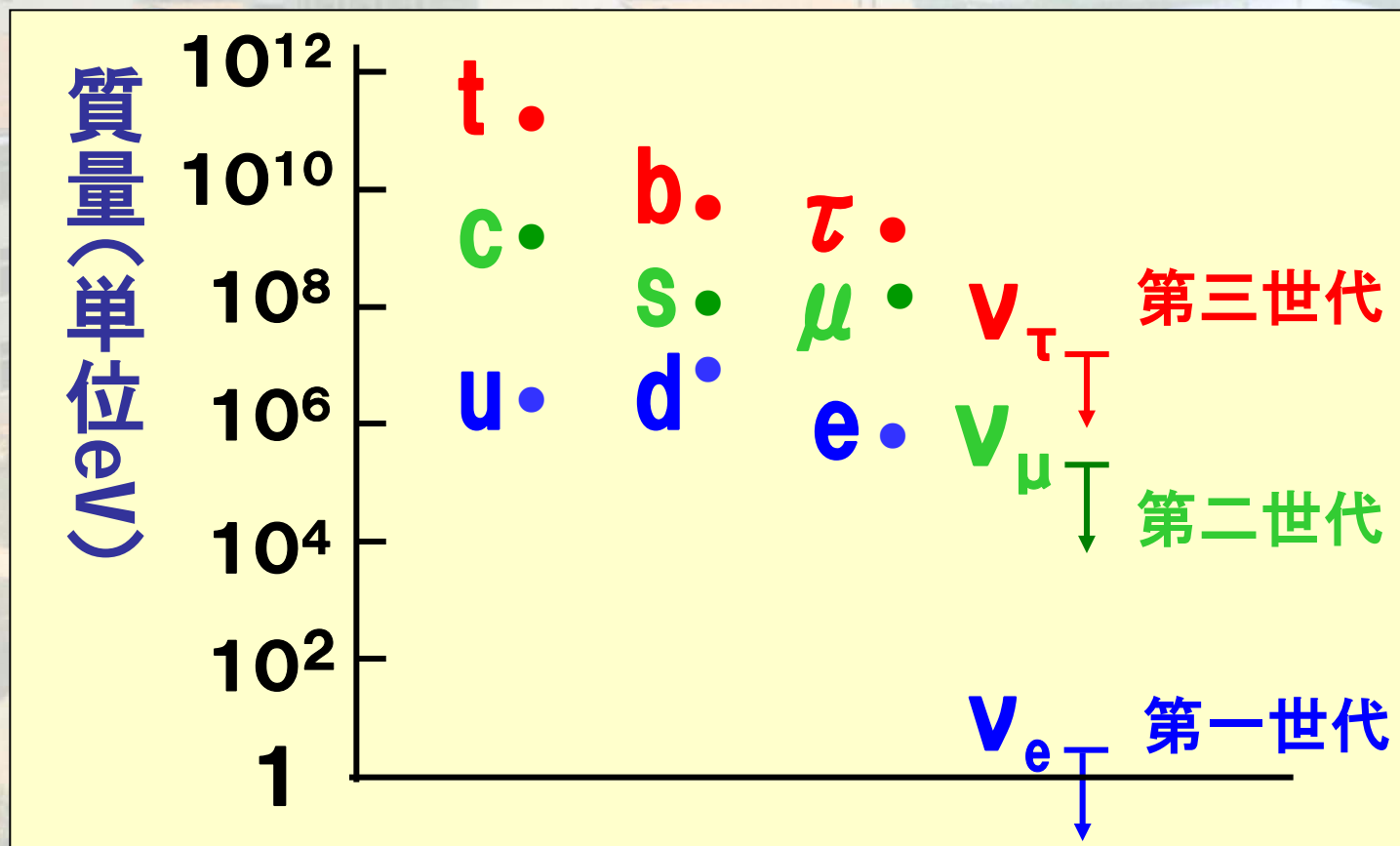


その先に進むには、さらなるミクロの情報(高エネルギーの情報)が必要

以下に見るように、ニュートリノはまさにそのような情報を提供する

# 問題点(1):素粒子の質量の階層性

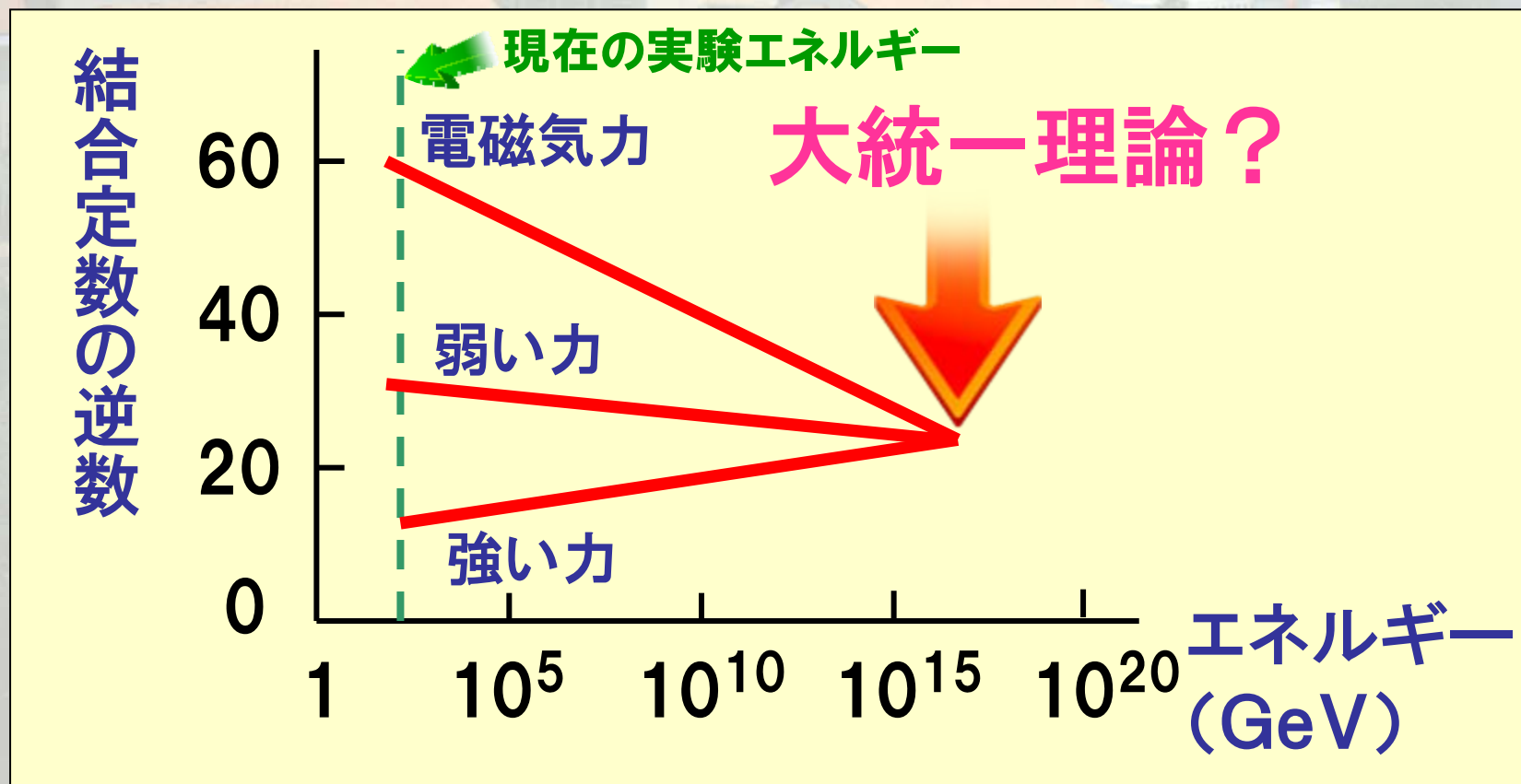
- 世代による質量の違いの起源はわかっていない
- 標準理論ではニュートリノの質量は0
- 実験的にはニュートリノの質量は上限値しかわかっていない
- もしニュートリノの質量が0でないとする、なぜ他の粒子の質量に比べてそんなに小さいのか？



## 問題点(2):ゲージ場の結合定数(力の強さ)

$x \rightarrow$ 小  $E=pc \rightarrow$ 大 (不確定性原理)の時に3つの力の結合定数が等しくなるように見える $\rightarrow$ その理由は未解決

大統一理論と呼ばれる仮説があるが、まだ検証されていない $\rightarrow$ 高エネルギーに関する実験データが必要



# もし大統一理論が自然を記述しているならば クォークとレプトンの間に関係があるはず

クォークには種類に関する状態と、質量に関する状態にわ  
ずかのずれがあり、それは3行3列の行列で表される  
(カビーボ・小林・益川混合行列)



カビーボ



小林誠



益川敏英

- レプトンにも混合行列はあるか？
- あるとしたらレプトンの混合行列とクォークの混合行列の関係は？



# ニュートリノの小さな質量

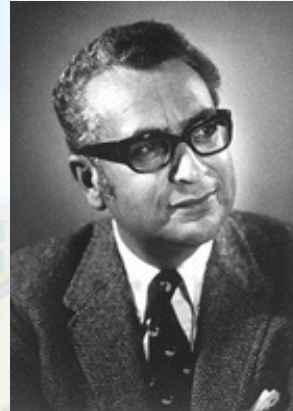
# シーソー機構



ミンコフスキー



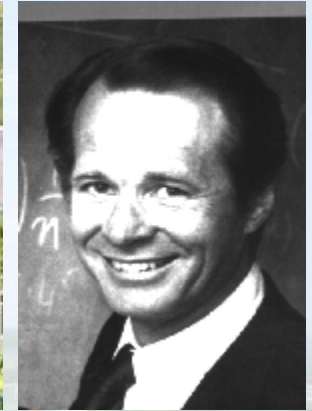
柳田勉



ゲルマン



ラモン



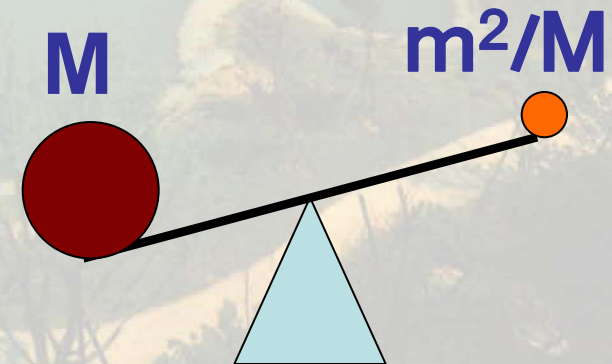
スランスキー

2行2列の行列 
$$\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$$

の固有値の絶対値は  $m \ll M$  の時、 $M$  と  $m^2/M$  となる  
そこで、 $m = 1 \text{ GeV}$  の時に  $m^2/M$  が  
ニュートリノの質量  $m_\nu$  だと仮定すると、

$$m_\nu = m^2/M < 1 \text{ eV} \rightarrow M > 10^9 \text{ GeV}$$

ニュートリノの小さな質量は高エネルギーに  
おける物理の兆候かもしれない！



# ニュートリノ振動(量子力学的効果)

実はずっと以前から、ニュートリノに質量がある場合には、ひとつの種類のニュートリノから別な種類のニュートリノに変換する可能性が知られていた(**振動**と呼ばれる理由は次ページ):

1957年      ポンテコルボ       $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$

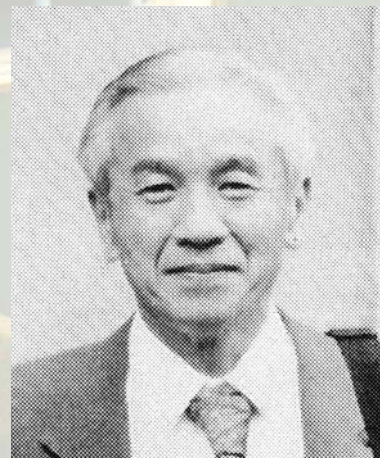
1962年      牧—中川—坂田       $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$



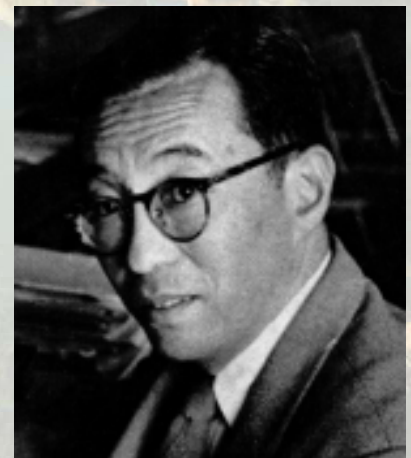
ポンテコルボ



牧二郎



中川昌美



坂田昌一

# ニュートリノ振動

種類の違うニュートリノの状態  $\nu_e, \nu_\mu$  と質量の違うニュートリノの状態  $\nu_1, \nu_2$  (質量  $m_1, m_2$ ) が2行2列の行列により

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる

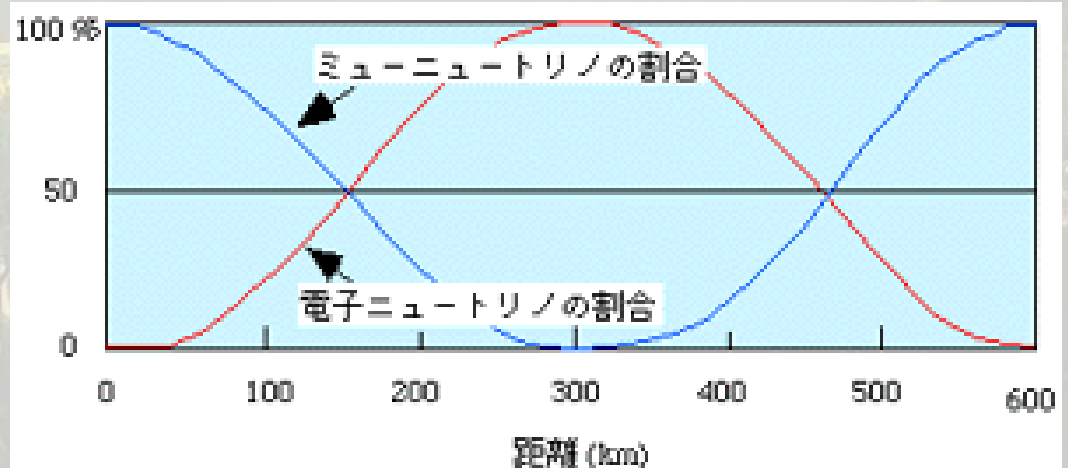
と関係つけられている時、時間  $t$ 、距離  $L$  ( $\equiv c t$ ) だけニュートリノが走る間に  $\nu_\mu$  から  $\nu_e$  に変換される**確率**は

$$\sin^2 \left( \frac{(\Delta m^2 c^4) (L/\Delta c)}{4E} \right) = \sin^2 \left( 1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / \text{eV}^2) (L/\text{km})}{(E/\text{GeV})} \right)$$

となり、**振動的**振る舞いを示す。

$$\Delta \equiv h / (2\pi),$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$





# ニュートリノ振動を示唆する実験事実

- 太陽ニュートリノ欠損 Homestake (米), Kam (日), SK (日), SNO (加), GALLEX (伊), SAGE (露)
- 大気ニュートリノ異常 IMB(米), Kam (日), SK (日), Soudan2(米), MACRO(伊)
- 加速器ニュートリノ欠損 K2K(日)
- 原子炉ニュートリノ欠損 KamLAND(日)

**Kam:**カミオカンデ

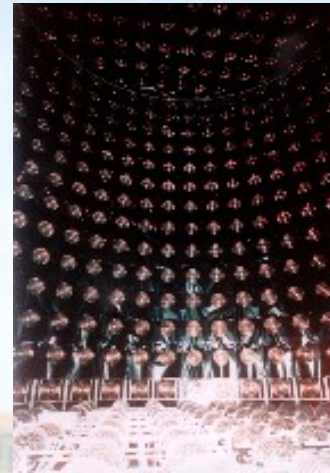
**SK:**スーパーカミオカンデ

**KamLAND:**カムランド

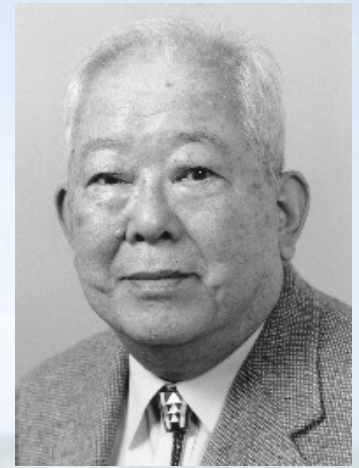


# スーパーカミオカンデ 1995年～

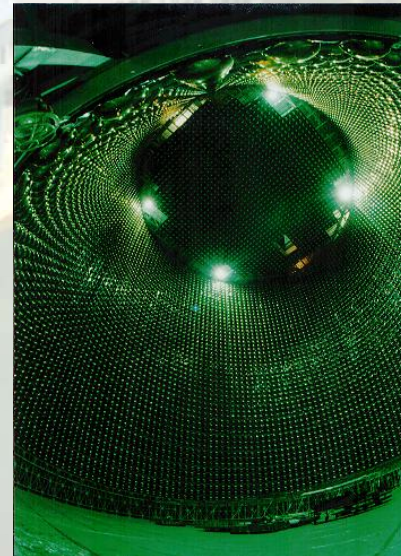
- 水による測定器
- その前進カミオカンデの拡張施設
- 太陽ニュートリノ欠損解決における重要な貢献
- 大気ニュートリノ異常現象の発見



カミオカンデ



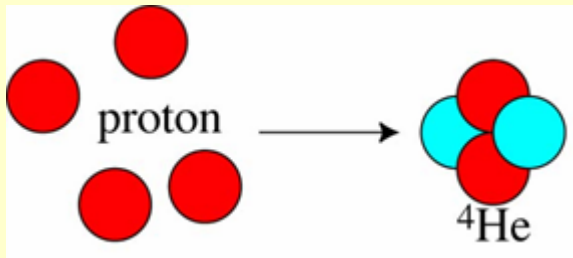
小柴昌俊



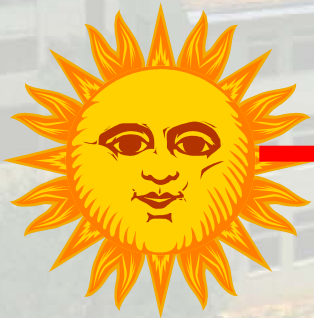
スーパーカミオカンデ

# 太陽ニュートリノ欠損

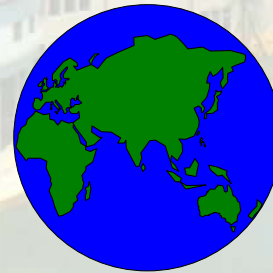
- 太陽中では核融合反応



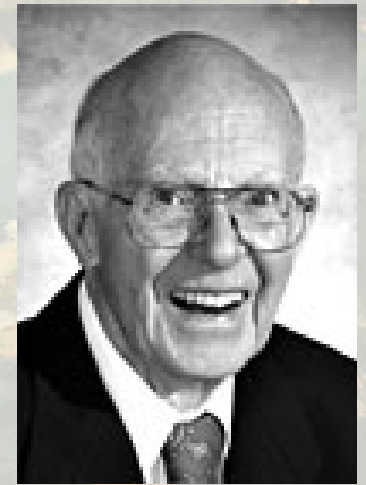
がつねに起こっていてその $\nu_e$ （太陽ニュートリノ）が地球に到達しているが、地上での観測値は理論値の約1/2以下



電子ニュートリノ



- 太陽ニュートリノ欠損は、1970年代からデイビスが米国サウスダコタ州にあるホームステークで行ってきた実験で最初に観測されていた。
- しかしニュートリノ振動という解釈で完全に解決されたのは2002年末のことである。



デイビス





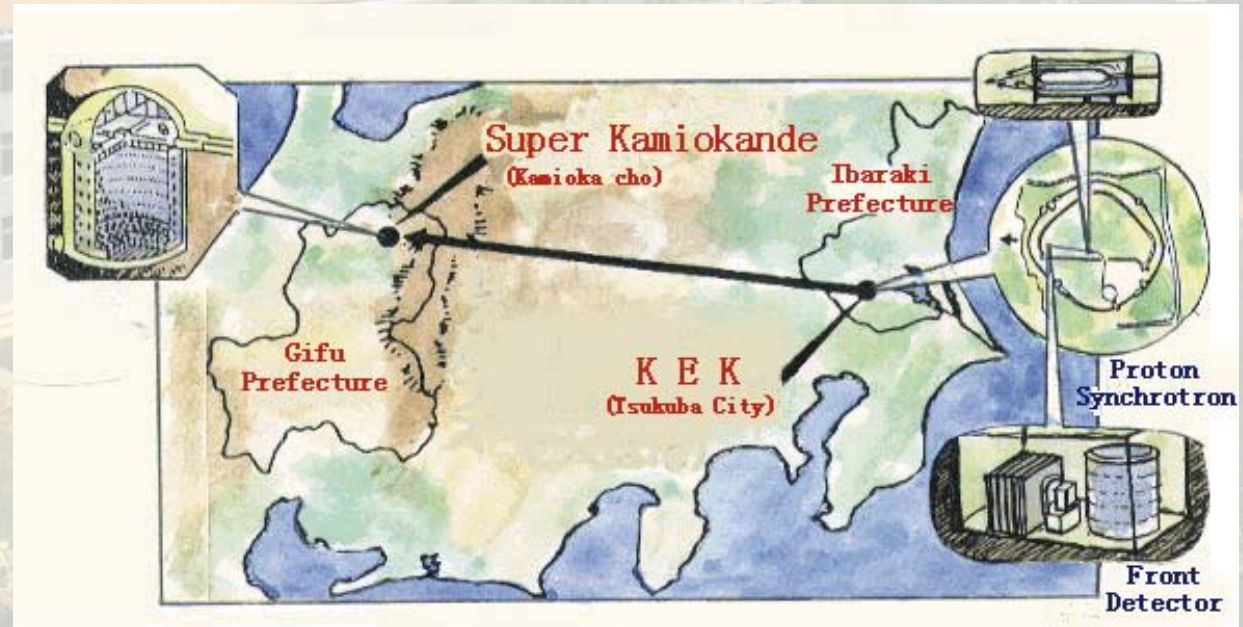
# K2K（加速器ニュートリノ欠損）

1999年～2004年

- 高エネルギー研究機構(筑波)→スーパーカミオカンデ(神岡)
- 人工的なニュートリノ( $\nu_{\mu}$ )が距離250kmでどれだけ別なニュートリノに変換しているかを測定(世界初)
- その結果はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果と一致



西川公一郎





# カムランド(原子炉ニュートリノ欠損)

2002年～

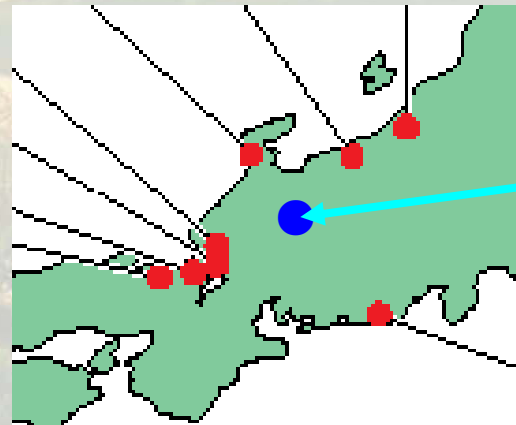
- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地にある原発(平均距離200km)から来る反電子ニュートリノ  $\bar{\nu}_e$  を検出



- 原子炉ニュートリノの欠損を発見(世界初)
- その結果は太陽ニュートリノの結果と一致(独立な検証)



鈴木厚人



# まとめ

- これまでの素粒子の殆ど現象は標準理論により説明されている
- ニュートリノの質量と混合は標準理論を越える物理学を示唆しているが、基本的な理論からの説明はまだ成功していない