

# ニュートリノ物理

物理学特別講義B(東京理科大学)

梶田隆章 (宇宙線研究所)

## 講義の概要

基礎(ニュートリノ物理に関連あることについて)

ニュートリノの質量とニュートリノ振動実験

大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ振動実験

太陽ニュートリノ、原子炉ニュートリノ

将来のニュートリノ振動実験

(時間があれば: 関連する物理: 陽子崩壊実験)

(ほとんど数式は使わないで講義)

# エネルギーの単位について

MeV = メガ電子ボルト =  $10^6$  電子ボルト

$10^6$  Vの電位差で電子を加速した時に電子が持つエネルギー

(GeV = ギガ電子ボルト =  $10^9$  電子ボルト)

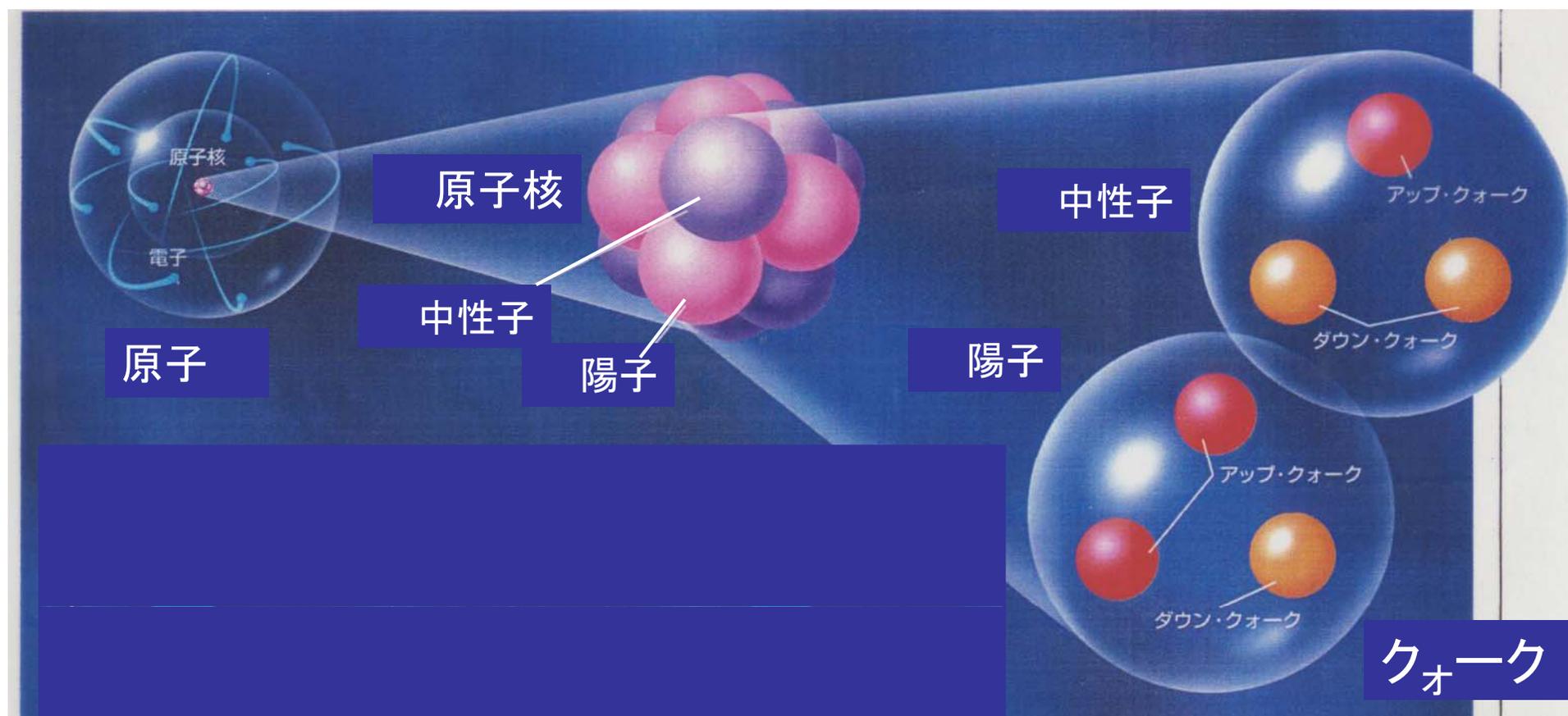
1電子ボルト =  $1.6 \times 10^{-19}$  Jなので

MeV =  $1.6 \times 10^{-13}$  Jに相当する。

ところで相対性理論によれば、 $E=mc^2$ なので質量もエネルギーの単位で表す。

例えば、電子の質量は  $0.511 \text{ MeV}/c^2$ .

# 物質を構成する素粒子



クォーク、電子、ニュートリノが現在の“素粒子”

# 素粒子の種類

	第一世代 (first)	第二世代 (second)	第三世代 (third)
レプトン: LEPTON	 電子ニュートリノ electron neutrino	 ミューニュートリノ muon neutrino	 タウニュートリノ tau neutrino
	 電子 electron	 ミューオン muon	 タウ tau
クォーク: QUARK	 ダウン down	 ストレンジ strange	 ボトム bottom
	 アップ up	 チャーム charm	 トップ top

# 追加(2008年ノーベル物理学賞関連)



Photo: Universtity of Chicago

**Makoto Kobayashi**



Photo: Kyoto University

**Toshihide Maskawa**

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

3世代=6種類(以上)のクォークの予言(1973)

# 素粒子の相互作用と標準理論

## 素粒子間の相互作用

相対的強さ

●強い相互作用: 例: 陽子と中性子から原子核をつくる

1



特徴: 強い

●電磁相互作用: 例: (どこにもある)

$10^{-2}$

素粒子反応では、例えば  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

●弱い相互作用: 例:  $X \rightarrow Y\nu\beta$  (ベータ崩壊)

$10^{-5}$



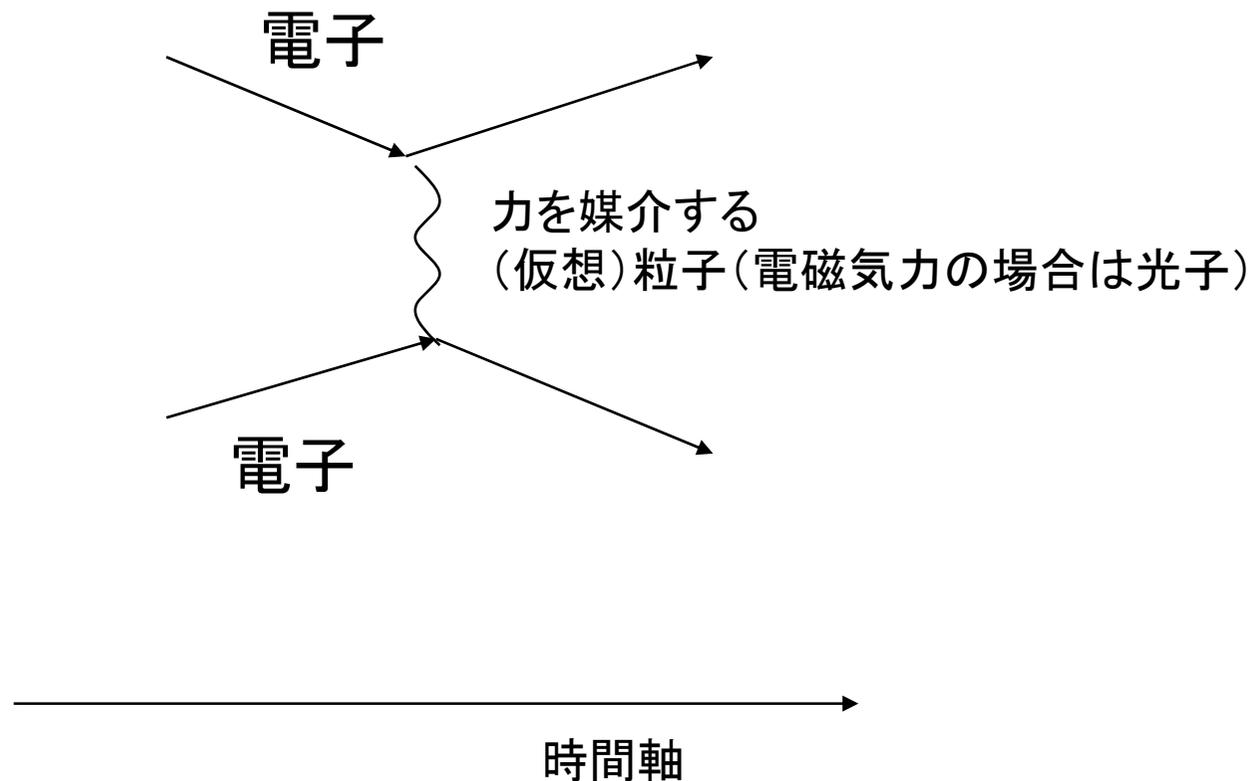
特徴: 非常に弱い

(●重力 これはかなり性質の違う力、現在の素粒子実験では完全に無視できる。)

$10^{-38}$

# 素粒子間に働く力

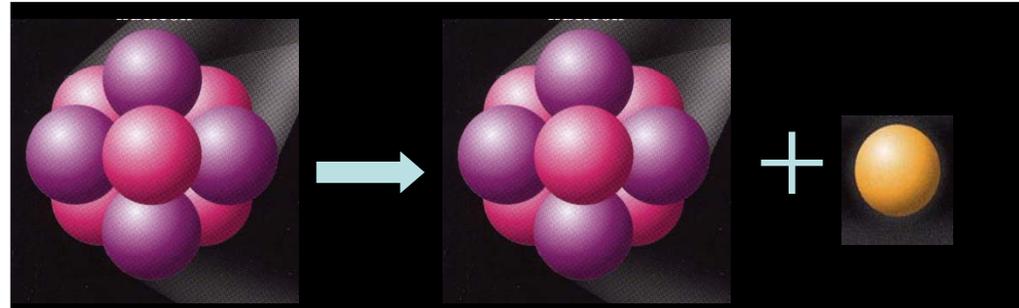
素粒子間に働く力は、根本的には、力を媒介する粒子の交換による。例えば電子と電子の散乱の場合：





# ニュートリノの存在の予言

観測されていた原子核反応



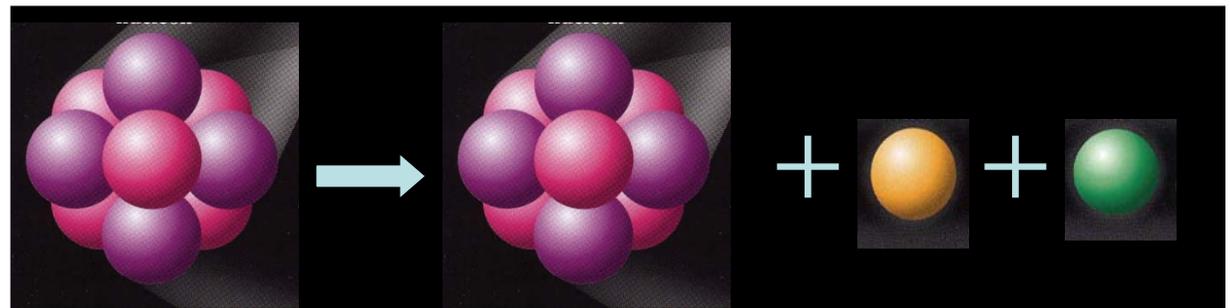
原子核

別な原子核

電子

なぜか、この反応ではエネルギーが保存していない ?????

実は、、、(1930年)



原子核

別な原子核

電子

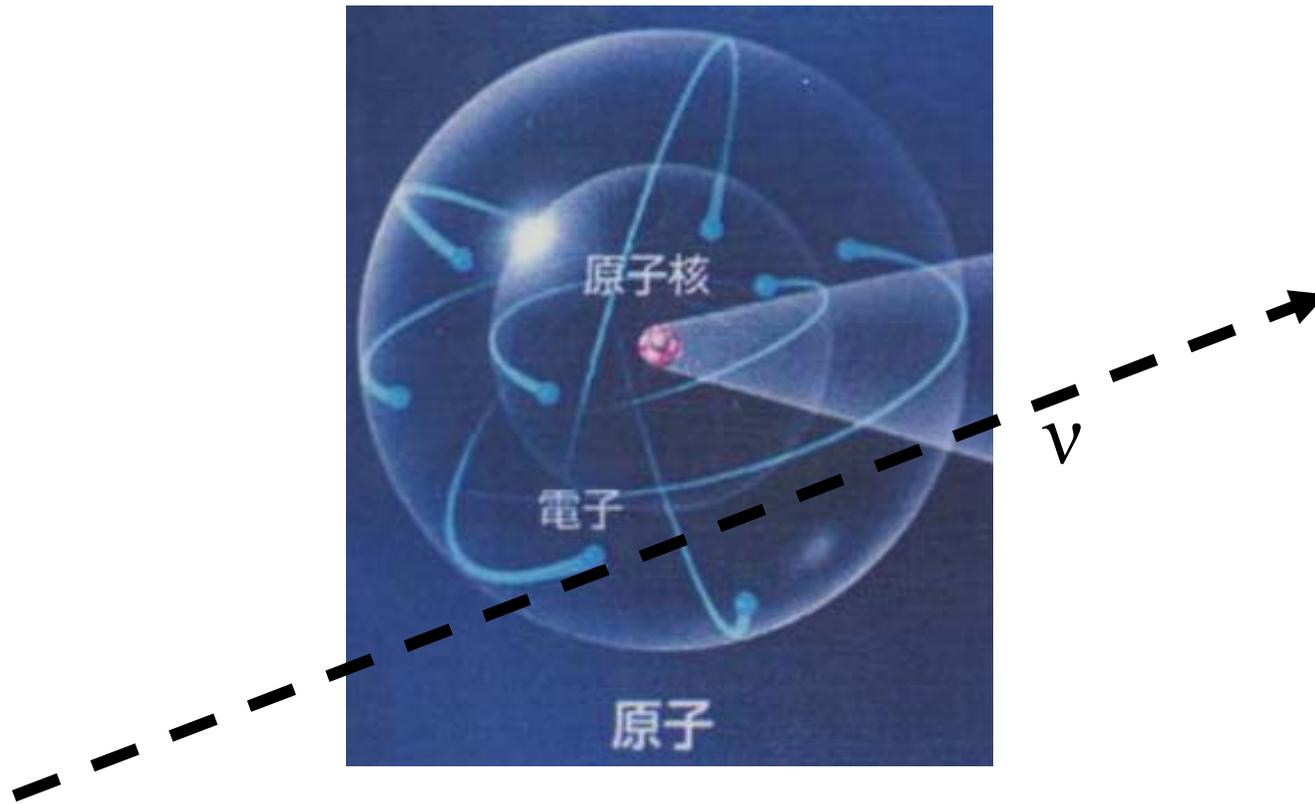
$\nu$



W.Pauli

# ニュートリノはどんなもの？

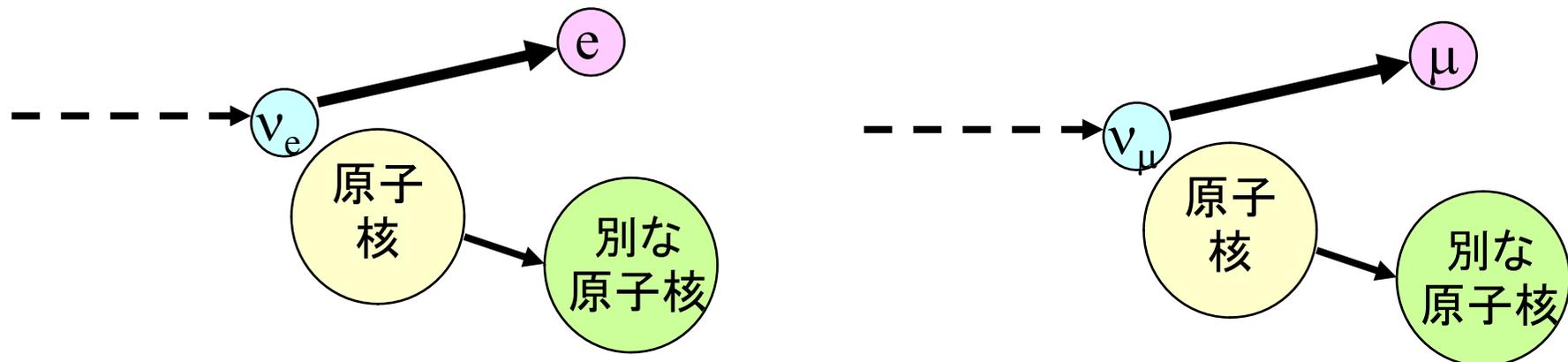
だいたいの答え：電子から電荷を取り（電気を帯びてない）、また重さをほとんど取ったもの。弱い相互作用しかしない。



# ニュートリノと物質との反応

ニュートリノは弱い相互作用のみしかないので、物質との相互作用が極めて弱いですが、全く相互作用をしないわけではない。

反応は例えば...



# ニュートリノの発見

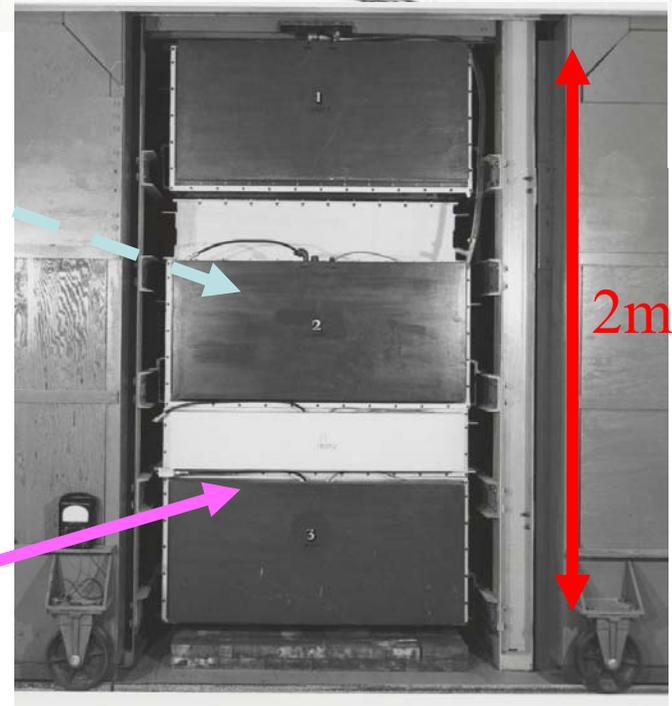
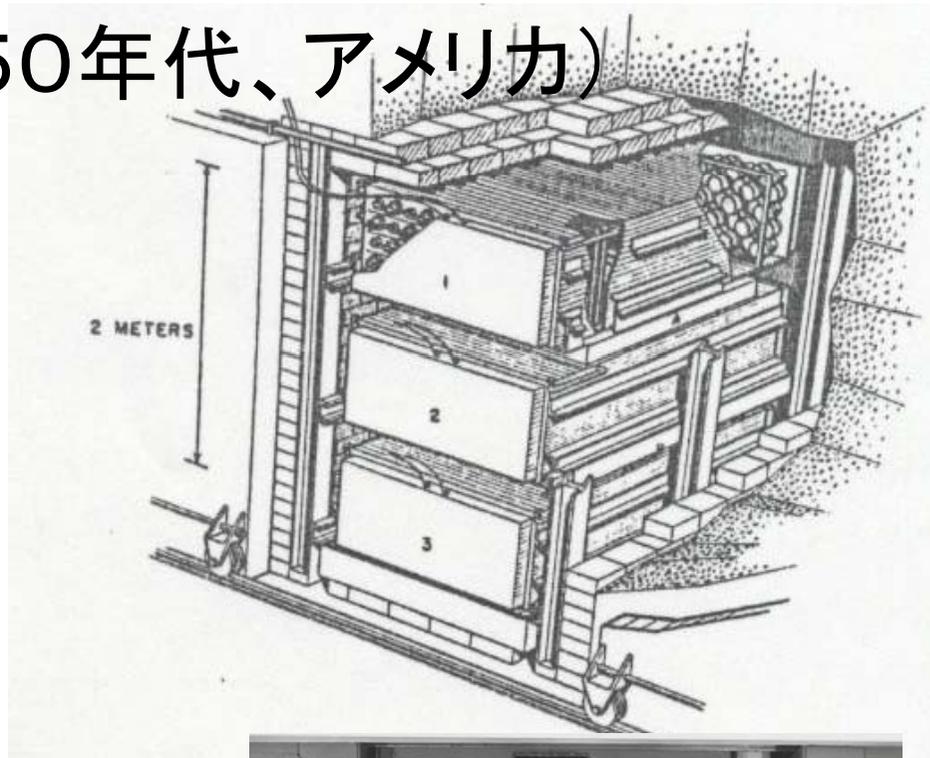


F.Reines (右、1995年ノーベル賞)とC.Cowan

# ニュートリノの発見(1950年代、アメリカ)

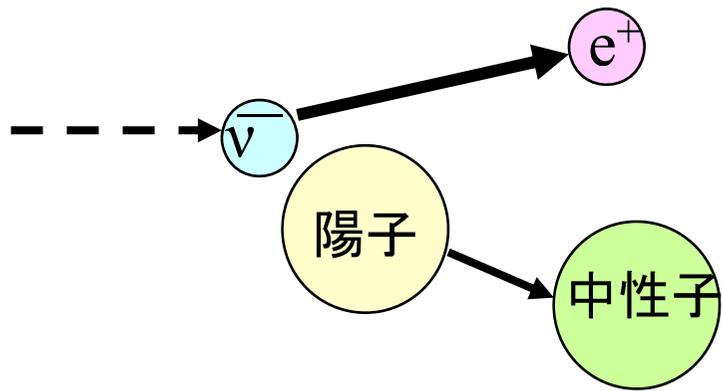


原子炉で反電子ニュートリノが大量に生成される。



反ニュートリノ

ニュートリノ測定器

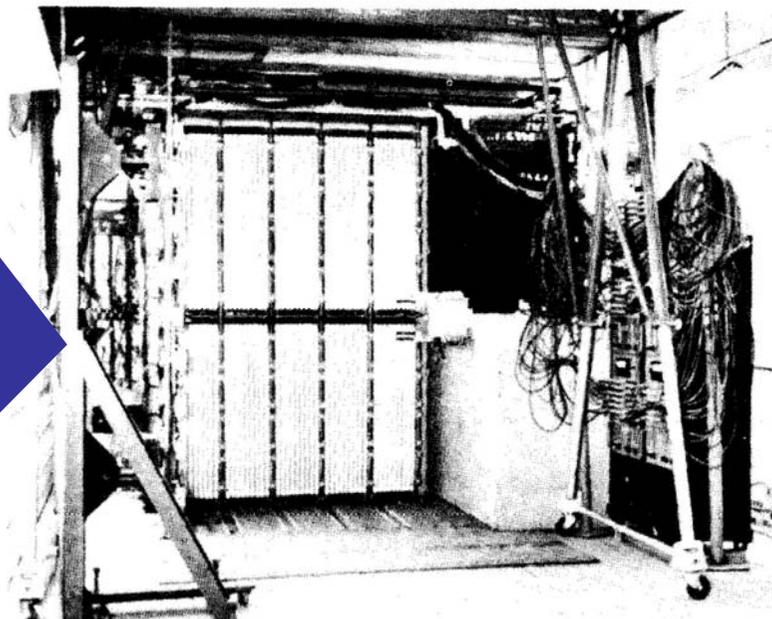
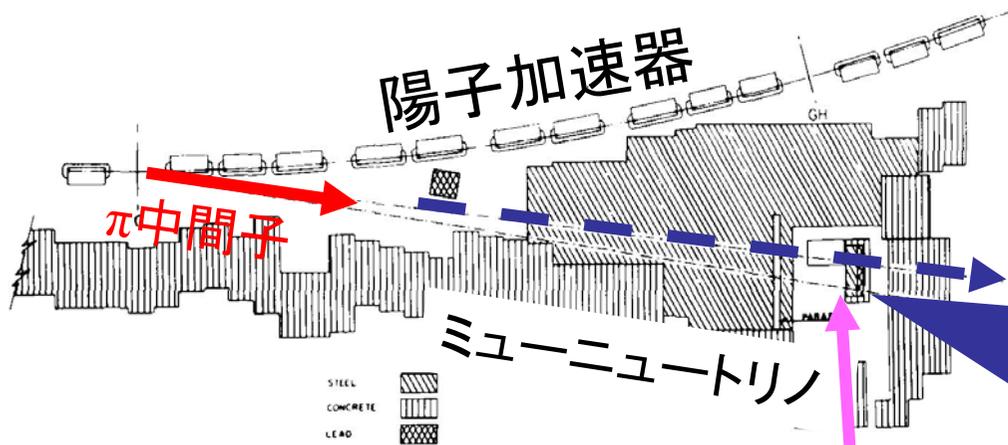


# ミューニュートリノの発見(1962年)



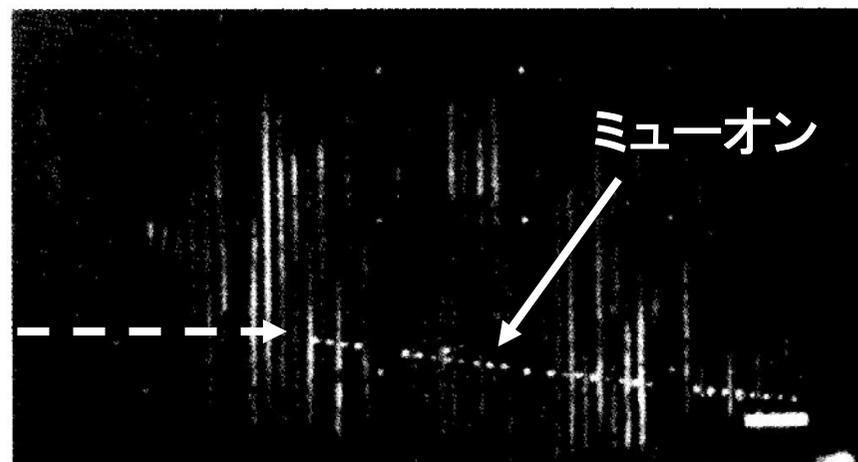
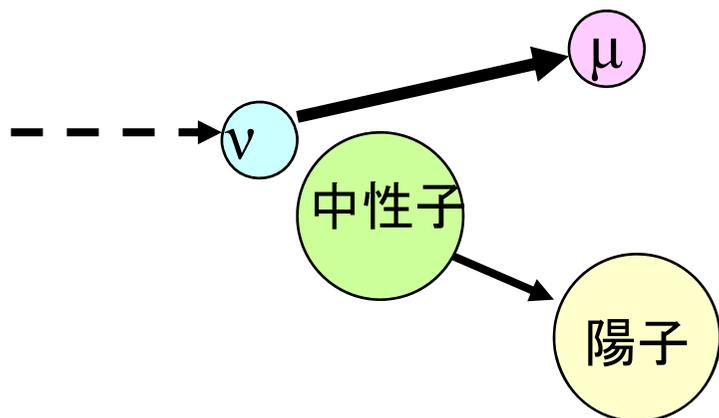
左からJ.Steinberger, M.Schwartz and L.Lederman (1988年ノーベル賞受賞)

# ミューニュートリノの発見(1962年、アメリカ)



ニュートリノ  
測定器

加速器でミューニュートリノ  
を大量に生成する。

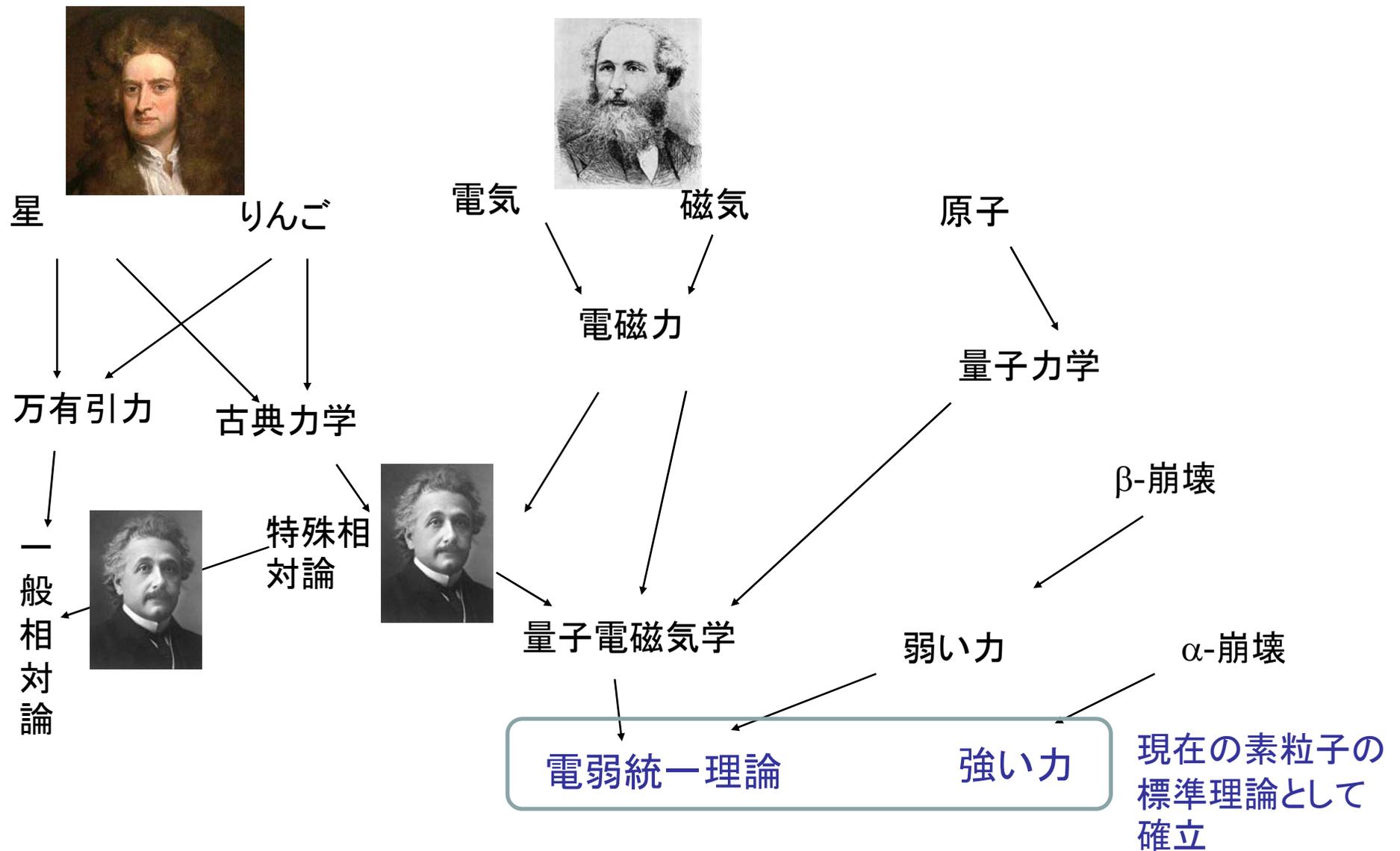


観測された事象の1例

# 素粒子の種類と弱い相互作用の規則性



# 物理学の夢：自然法則の統一的な理解

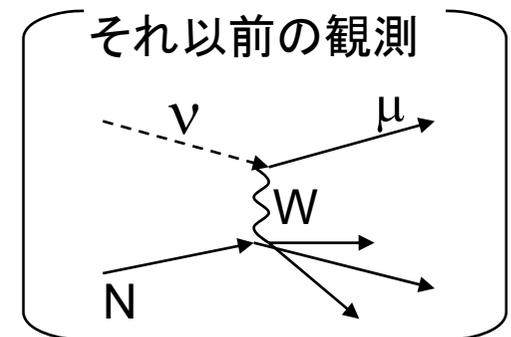
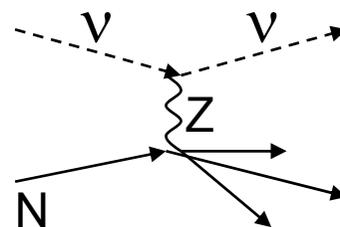
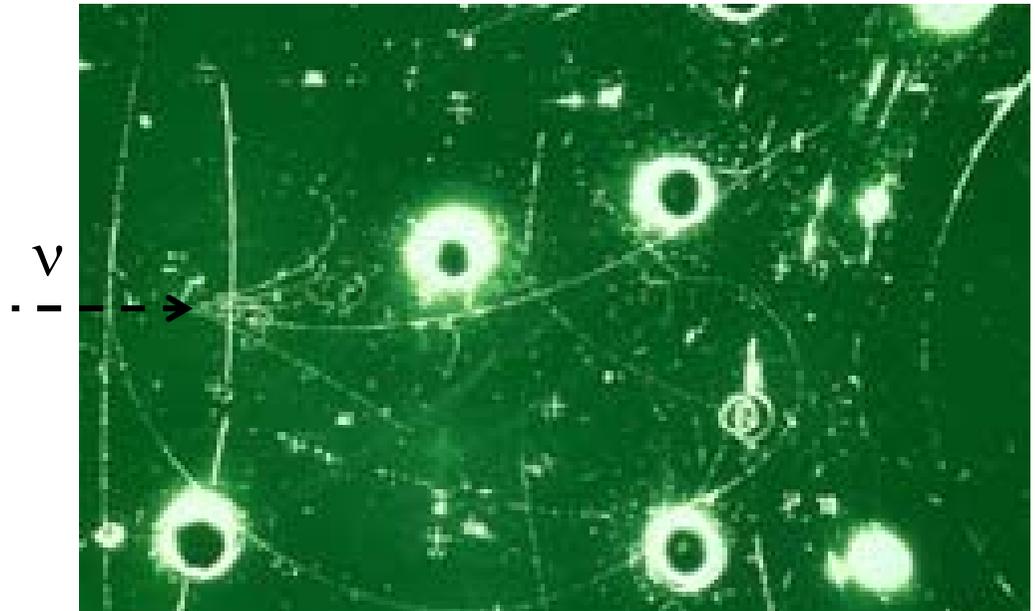


# 弱い相互作用の理解と素粒子の標準理論の確立

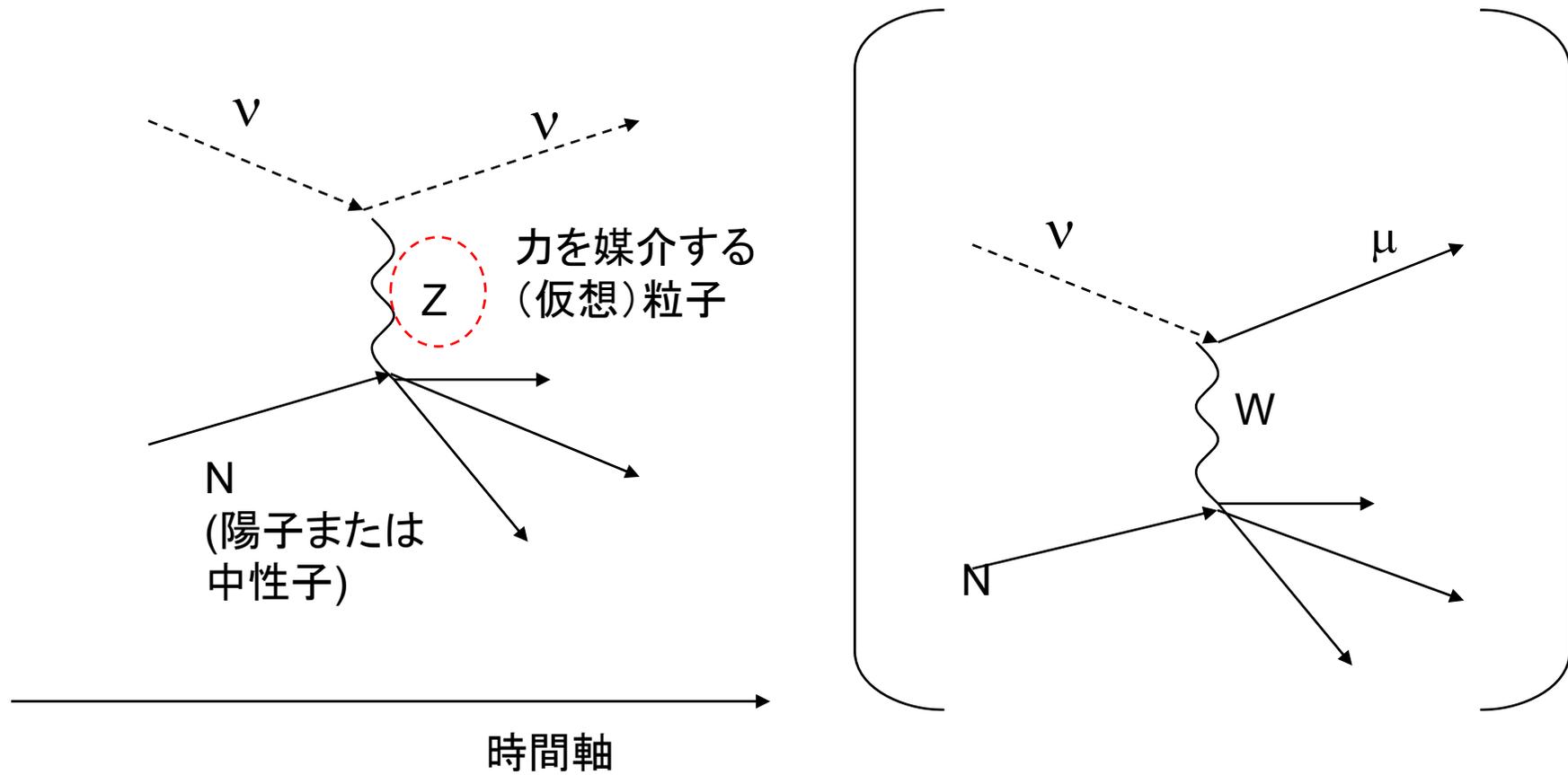
- 弱い力は、電磁力と統一的に考えたとき、はじめて矛盾ない理論ができる。
- この理論 (Glashow, Weinberg, Salamの理論) は現在の精密高エネルギー実験の数々の検証でその正当性が示されてきた。→ 例 (中性カレント反応の予言とその実験的発見, 1973)



Gargamelle泡箱実験 (CERN)

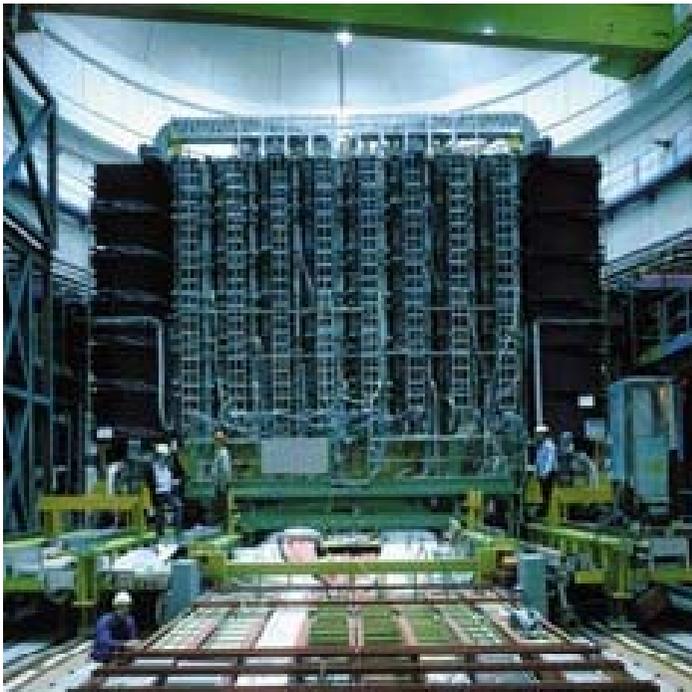


# 図の見方

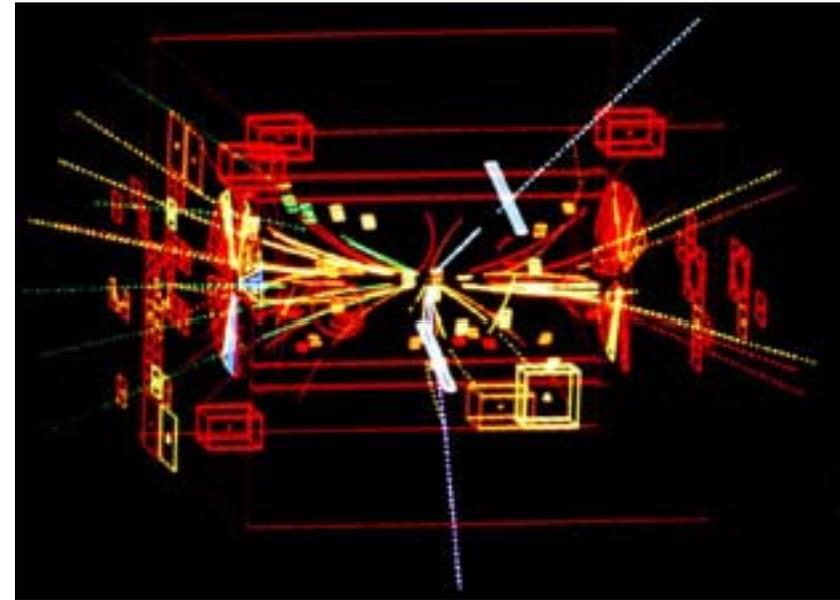


# 素粒子標準理論の確立(2)

- 弱い力が弱いのは、力を媒介する粒子が重いため、力の到達距離が短く、そのため、反応確率が低い。(→ 弱い相互作用を媒介するW,Z中間子の発見 @CERN 1983年)



W, Z中間子を発見したUA1検出器(CERN)



最初のZ中間子事象の例。Z中間子が電子陽電子対に崩壊した。

$$(p+\bar{p}\rightarrow Z+X, Z\rightarrow e^++e^-)$$

S.Glashow, A.Salam, S.Weinberg 1979年ノーベル賞 (電弱相互作用理論)

C.Rubbia, S.van der Meer 1984年ノーベル賞 (W,Z の発見)

# 追加(2008年ノーベル物理学賞関連)



The Nobel Prize in Physics 2008



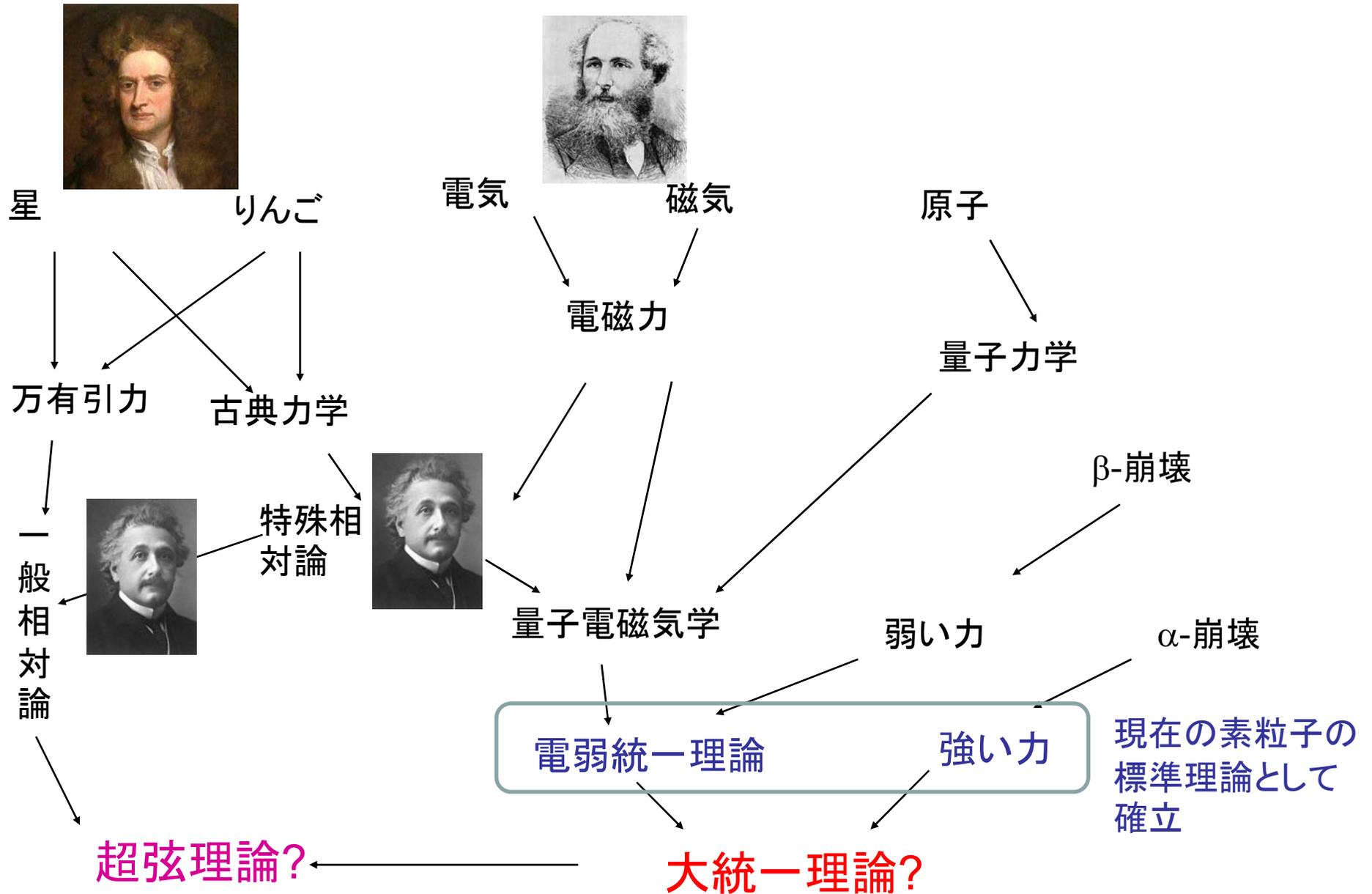
Photo: SCANPIX

**Yoichiro Nambu**

for the discovery  
of the mechanism  
of spontaneous  
broken symmetry  
in subatomic  
physics

なぜ、本来質量がないはずの粒子に質量があるのか？

# 物理学の夢：統一理論



# 力の強さ

- 強い力の結合定数は、電磁力や、弱い力の結合定数より大きい。
- →しかし、強い力の結合定数はエネルギーが上がるほど弱くなることの発見(2004年のノーベル物理学賞)



## The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

## The Nobel Prize in Physics 2004

[Prize Announcement](#)  
[Press Release](#)  
[Advanced Information](#)  
[Information for the Public](#)

### David J. Gross

[Nobel Lecture](#)  
[Interview](#)  
[Other Resources](#)

### H. David Politzer

[Nobel Lecture](#)  
[Other Resources](#)

### Frank Wilczek

[Nobel Lecture](#)  
[Interview](#)  
[Other Resources](#)

# 大統一理論

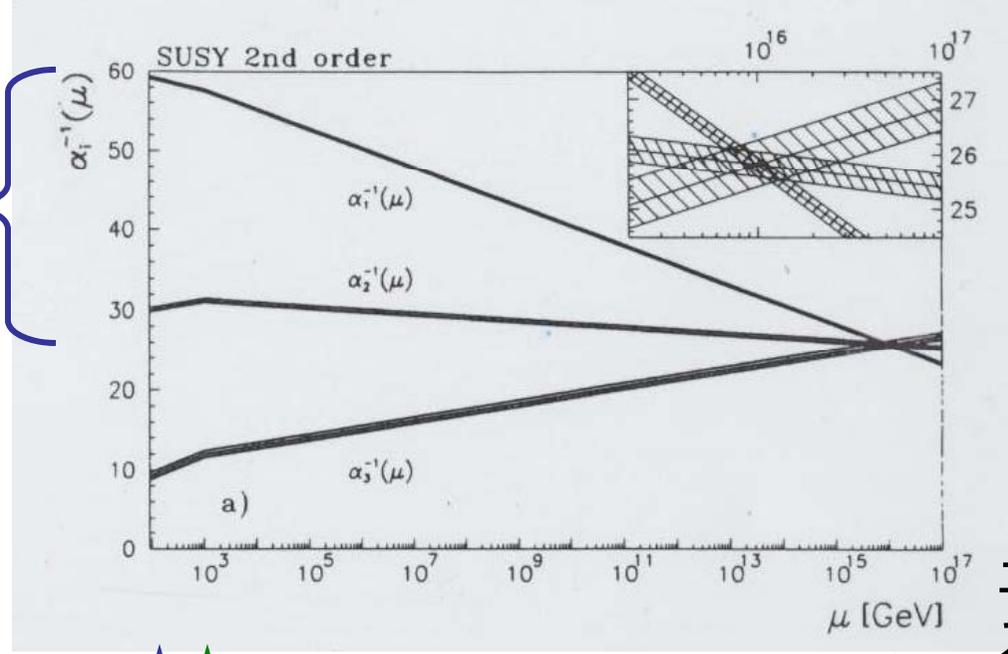
力の強さの逆数

電磁力

+

弱い力

強い力



エネルギー  
スケール

現在の加速器

次世代の加速器

大統一理論

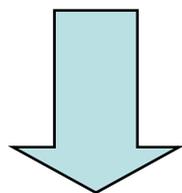
# ニュートリノ質量とニュートリノ振動実験

- ニュートリノの質量の意義
- ニュートリノ振動
- ニュートリノ振動実験

(ニュートリノ振動の発見、大気ニュートリノ、太陽ニュートリノ、原子炉ニュートリノ、加速器ニュートリノ振動実験)

# ニュートリノの質量の意義

- 素粒子の標準理論では $m_\nu=0$
- 一方、多くの大統一理論では $m_\nu$ は0ではない。



- もし、 $m_\nu$ が0でないとする；  
→ 昔言われていたことですが(つまり現在ではこのように考えられてないですが)もし、 $\Sigma m_\nu \sim 0$  ( $10\text{eV}/c^2$ )なら、少なくとも质量的には、宇宙のダークマターの候補となりうるかも????

しかし、もっと大切な点は、、、；

→  $m_\nu$  は seesaw mechanism (柳田、Gellmann Ramond, Slansky, 1979) により、

$$m_\nu = \frac{m_q^2}{m_N}$$

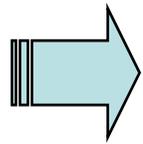
$m_q$ : クォークの質量  
 $m_N$ : 重い中性粒子の質量



非常に小さいニュートリノの質量は、背後に巨大なエネルギースケール ( $m_N$  に対応するエネルギースケール) の物理を示唆。

陽子崩壊が発見されていない現状での  
唯一の大統一理論検証の実験的方法

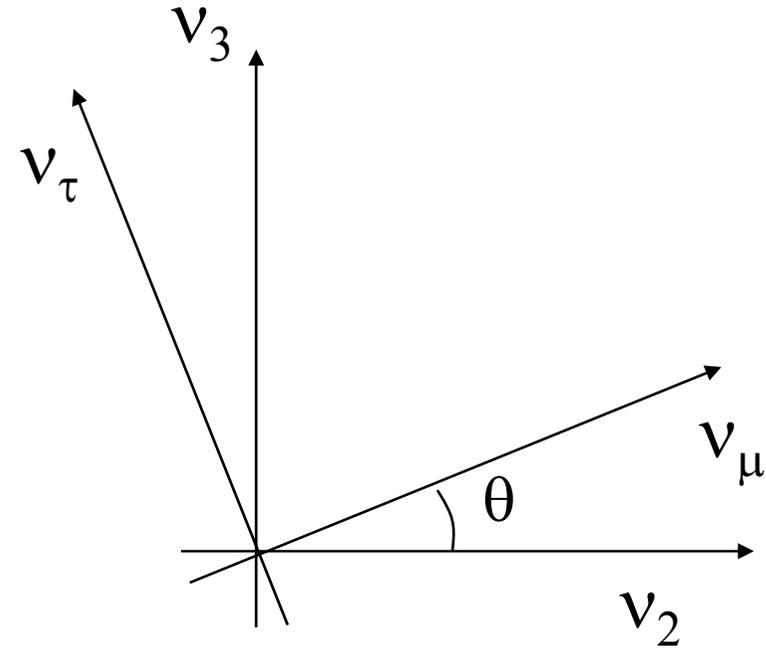
# どのような方法でニュートリノの質量を測定するか？



ニュートリノ振動現象を使う。

(牧、中川、坂田,1962)

ミューニュートリノ( $\nu_\mu$ )やタウニュートリノ( $\nu_\tau$ )は固有の質量を持っているわけではなく、固有の質量を持った状態を $\nu_2$ ,  $\nu_3$ とすると、 $\nu_\mu$ は $\nu_2$ と $\nu_3$ を重ね合わせたものとしてあらわせる。

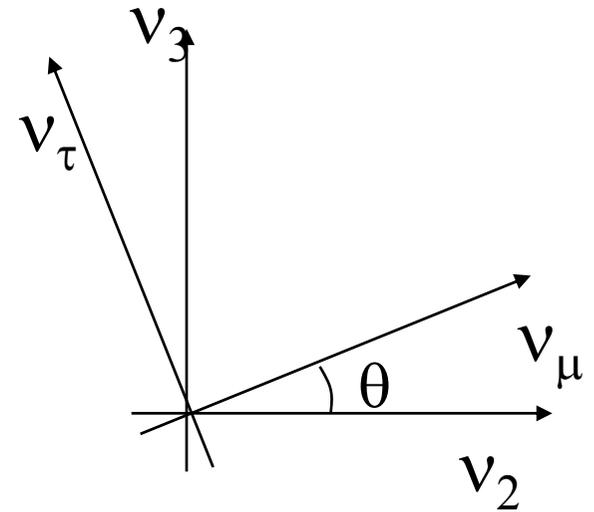


この場合、 $\nu_\mu$ が真空中を飛ぶとは、 $\nu_2$ と $\nu_3$ の重ね合わさった状態が飛ぶということになる。

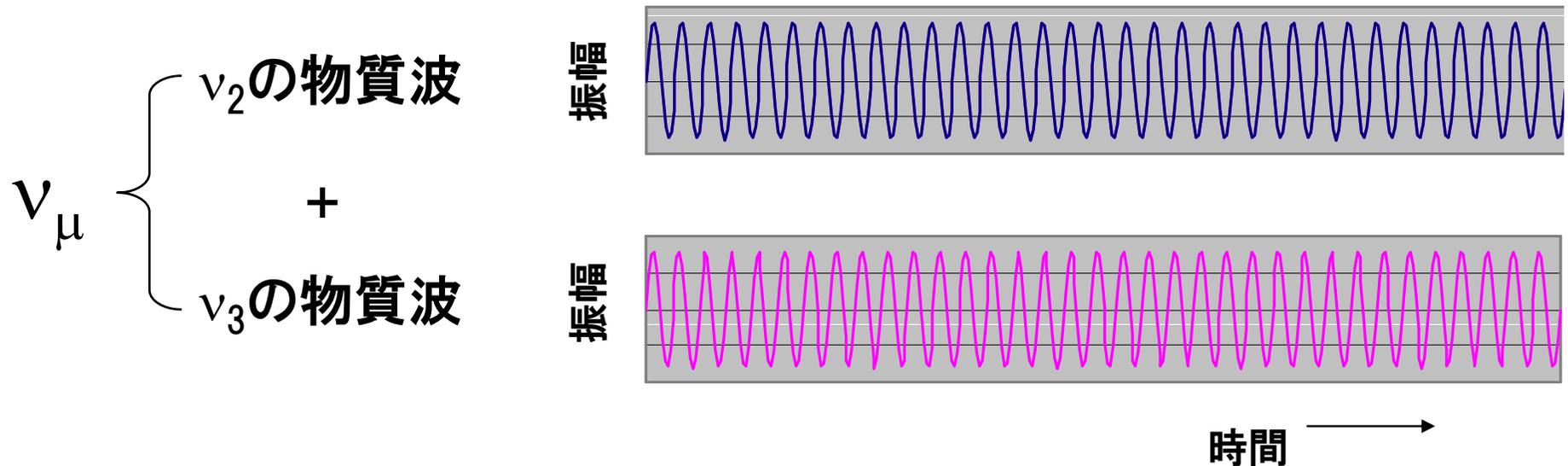
また、素粒子は粒子であると同時に波(物質波)である。

# 飛行中のニュートリノ

$$\nu_{\mu} = \cos\theta\nu_2 + \sin\theta\nu_3$$



ところで、 $\nu_2$ と $\nu_3$ はほぼ光速で飛んでいるが、質量が違うので、飛ぶ時の物質波の周波数はわずかに違う。



# ニュートリノ振動

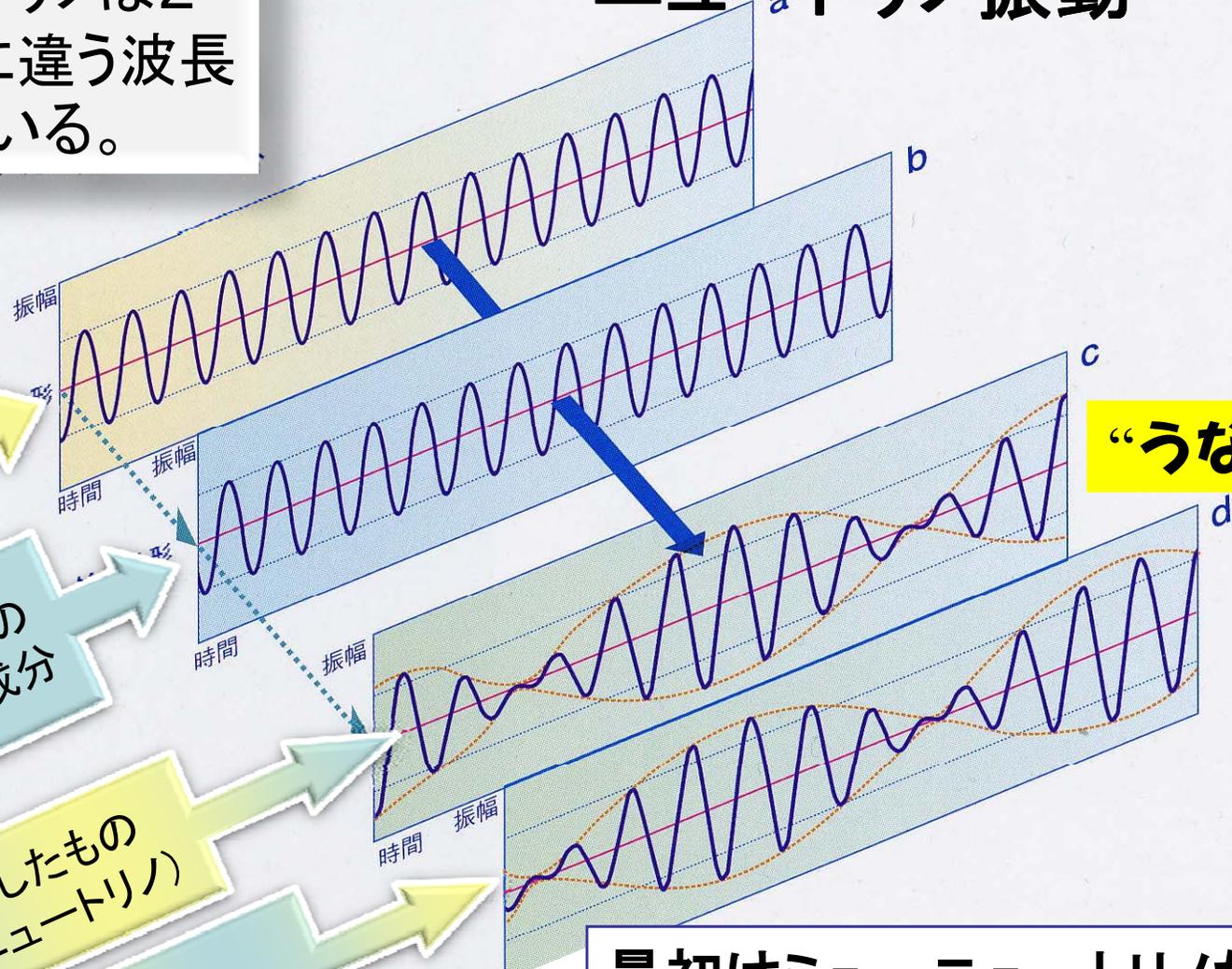
ミューニュートリノは2つのわずかに違う波長成分をもっている。

1つ目の波の成分

2つ目の波の成分

2つを足したもの  
(ミューニュートリノ)

残り  
(タウニュートリノ)

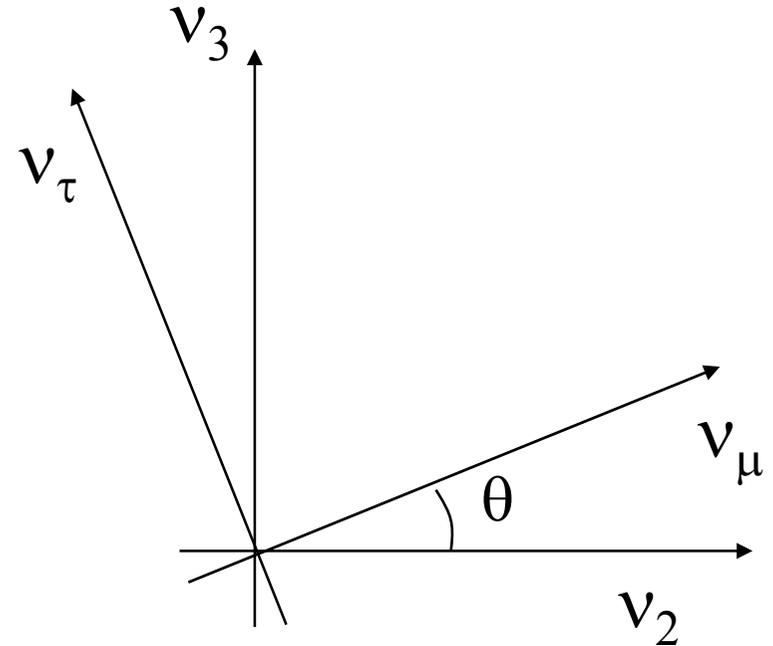


“うなり”

最初はミューニュートリノだったものが時間と共にミューニュートリノが減ったり増えたりする。  
→ ニュートリノ振動

# ニュートリノ振動の確率

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動を考える



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L(km)}{E(GeV)} \right)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$$

➡ ミューニュートリノが飛行距離(L)やエネルギー(E)と共にどのように振動して減るかを調べることで、ニュートリノの質量の2乗の差( $\Delta m^2$ )と混合角( $\theta$ )が測定できる。

10/9 ここまで