

2015年ノーベル物理学賞の簡単な解説

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 安田修(専門:ニュートリノ振動の現象論)

 The Nobel Prize in Physics 2015
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald

大気 ν

Share this:     103 

Takaaki Kajita - Facts



Photo © Takaaki Kajita

Takaaki Kajita

Born: 1959, Higashimatsuyama,
Japan

Affiliation at the time of the award:
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

Prize motivation: "for the discovery
of neutrino oscillations, which shows
that neutrinos have mass"

Prize share: 1/2

nobelprize.org

 The Nobel Prize in Physics 2015
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald

太陽 ν

Share this:     56 

Arthur B. McDonald - Facts



Photo: K. MacFarlane. Queen's University
/SNOLAB

Arthur B. McDonald

Born: 1943, Sydney, Canada

Affiliation at the time of the award:
Queen's University, Kingston,
Canada

Prize motivation: "for the discovery
of neutrino oscillations, which shows
that neutrinos have mass"

Prize share: 1/2

nobelprize.org

梶田さん、マクドナルドさん、おめでとうございます。

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by green grass and some trees. A modern building with a curved, white, columned walkway or entrance is situated on the left side of the pond. Behind this building and further into the background, several other multi-story university buildings are visible, some with red-tiled roofs and others with more modern, glass-fronted facades. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow rectangular box with black text is overlaid in the center of the image.

(1)素粒子とは

素粒子:それ以上 細かくできないもの

結論から言うと、物質中の**電子・クォーク**・(次項で出て来る)**ニュートリノ**が今の所素粒子と考えられている

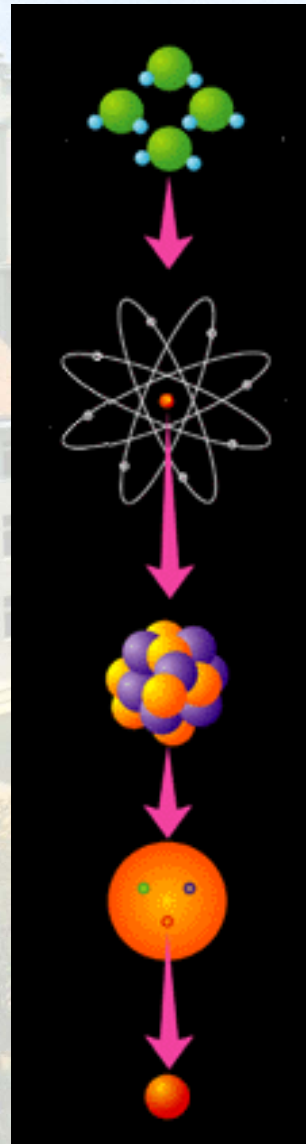
10^{-7}cm

10^{-8}cm

10^{-12}cm

10^{-13}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

ニュートリノ

1933年に理論的に予言された素粒子

nobelprize.org



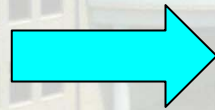
パウリ

中性子→陽子+電子

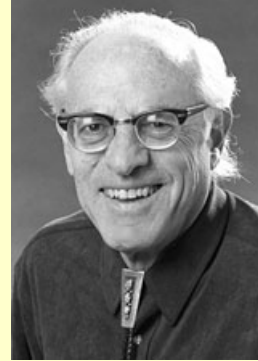
という反応で運動量・エネルギー保存則が成り立つようにするために**ニュートリノ**という中性粒子が導入された:

中性子→陽子+電子+ニュートリノ

ちなみに最初に
ニュートリノが発見されたのは
1955年のこと
である



nobelprize.org



ライネス

www.aps.org



コーワン

1998年まではニュートリノの
質量はゼロと考えられていた

1955年:ニュートリノの発見
(原子炉からのニュートリノの観測)

素粒子のまとめ(1)

- 物質はクォーク・レプトンから構成されている

クォークは複
数で束縛し合
い、陽子・中
性子のよう
な複合粒子
を構成する

電子とニュ
ートリノは
クォークと
性質が異な
り、レプト
ンと呼ば
れる

ク ォ ー ク	 アップ
	 ダウン
レ プ ト ン	 電子 ニュートリノ
	 電子

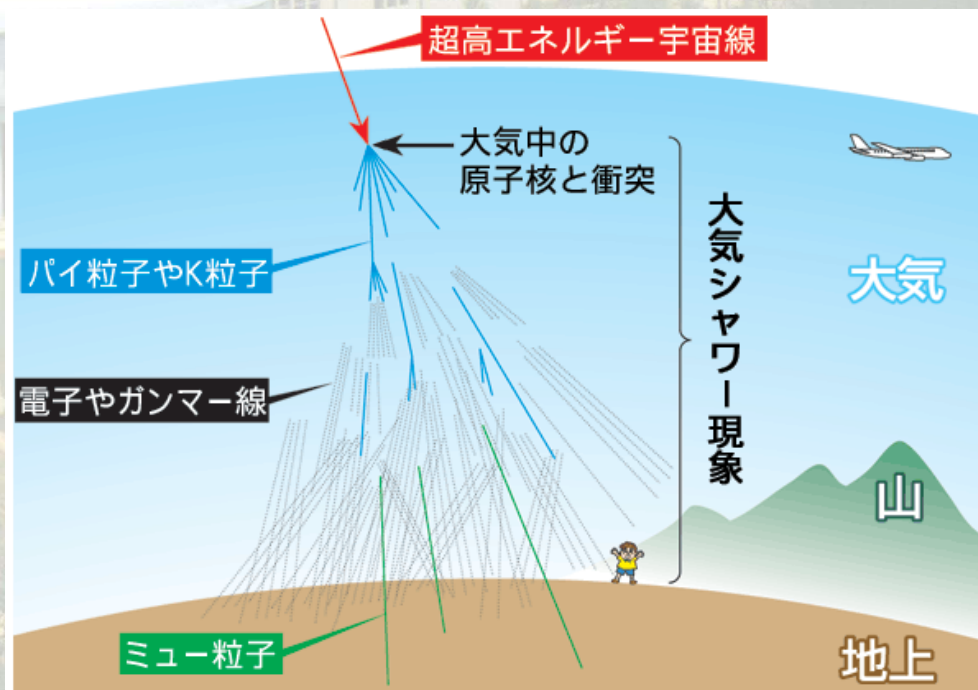
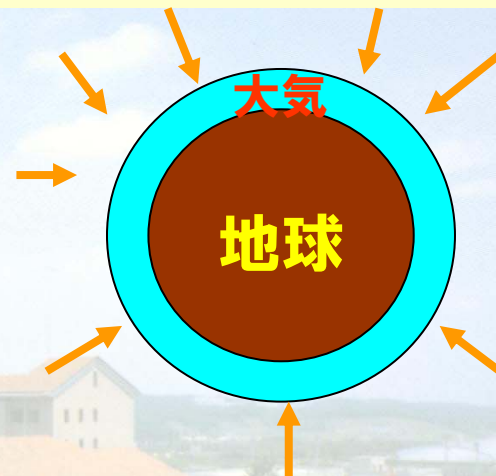
一方、世の中には宇宙線というものが降って来ていることが知られている

宇宙線

- 地球には宇宙から1次宇宙線と呼ばれる粒子がつねに降り注いでいる
- それらが大気中の核子と衝突して2次宇宙線と呼ばれる粒子が生成される
- 2次宇宙線の主なものは**ミュー粒子**(電子とほとんど性質が同じで質量が電子の200倍)

ミュー粒子: 第二世代の素粒子

1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)



素粒子のまとめ(2)

- 結論から言うと、素粒子には**第三世代**までであることが知られている
- ニュートリノの質量は**ゼロ**

物質粒子

	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
	 ダウَن	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	u	約3
	d	約6
レプトン	e	0.5
	ν_e	0

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	c	約1,200
	s	約120
レプトン	μ	106
	ν_μ	0

	粒子	質量 [MeV/c ²]
クォーク	t	174,300
	b	約4,000
レプトン	τ	1777
	ν_τ	0

世代と共に質量が増加して行く

$E=mc^2$ より、重い粒子を作るには多くのエネルギーが必要
→特別な工夫がなければ第二・第三世代は作れない

さらに、粒子には一般に**反粒子**と呼ばれるものが存在することが知られている

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

1930年:ディラック方程式(相対性理論+量子力学)

nobelprize.org



ディラック

陽電子(電子の**反粒子**と呼ばれる粒子)の存在を理論的に予言

1932年:陽電子の発見

霧箱とよばれる測定器
で発見

nobelprize.org



アンダーソン

	電荷	質量
電子	$-e$	0.5
陽電子	$+e$	0.5

素粒子のまとめ(3)

- 素粒子には**第三世代**までの粒子と反粒子があることが知られている
- 我々の宇宙には**安定的に存在しているのは粒子から構成される物質**のみで、反粒子から構成される**反物質**は**安定的に存在していない**



物質－反物質の非対称性は現在も素粒子論・宇宙論の研究課題

物質粒子

	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
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

反物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
反クォーク	 反アップ	 反チャーム	 反トップ
	 反ダウン	 反ストレンジ	 反ボトム
反レプトン	 反電子ニュートリノ	 反μニュートリノ	 反τニュートリノ
	 陽電子	 ミュープラス	 タウプラス

素粒子に働く力

自然界には4つの相互作用(=力)があることが知られている

相互作用	強い相互 作用	電磁相互 作用	弱い相互 作用	重力相互 作用
相互作用の 大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

核力など

粒子の測
定に利用

中性子の
崩壊など

重力は現在の素粒
子の実験エネル
ギーでは無視でき
るため議論しない

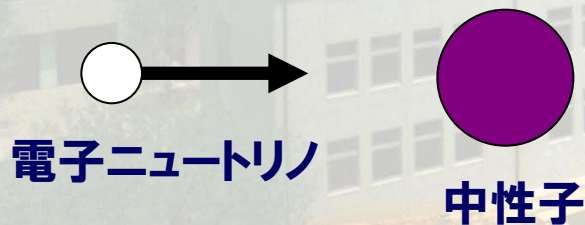
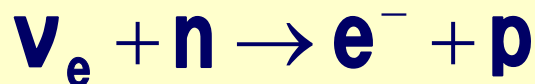
ニュートリノに働く力

素粒子		強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

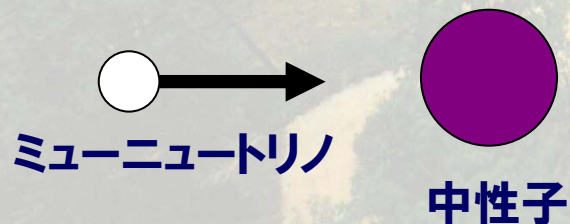
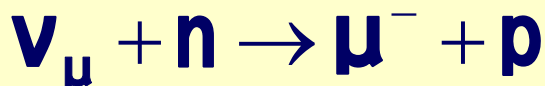
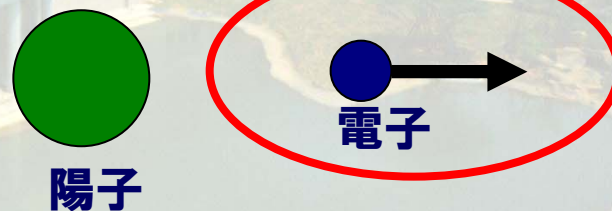
(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない
→観測はものすごく難しい

ニュートリノの観測

- ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する
- 標的の数を増大する(コストの削減→標的:水など経済的な物質)
- 元のニュートリノが電子型かミュー型かは生成される荷電粒子が電子かミューかで推測する



観測可能

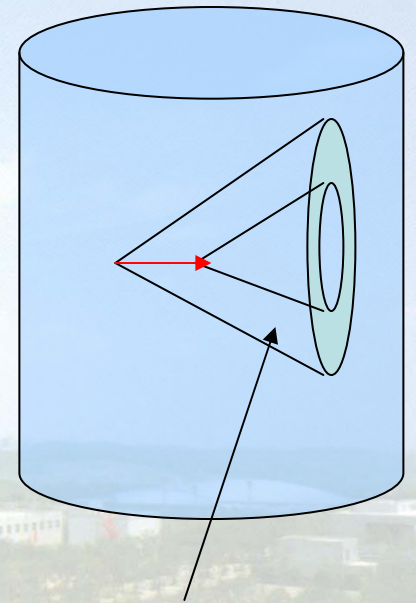


観測可能

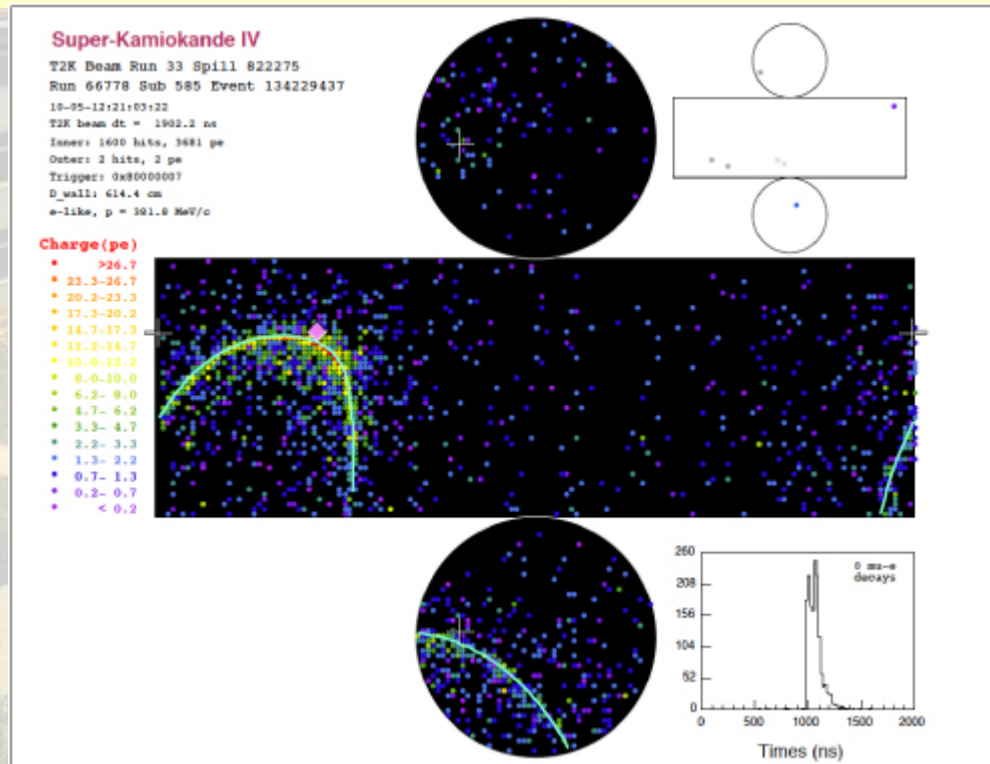


水による荷電粒子の観測の原理

物質中では光の速度は真空中よりも遅くなる→
水中を走る荷電粒子は水中の光速度以上で運動する時に**チェレンコフ光**と呼ばれる光を放つ
(衝撃波の一種)→その光を光電子増倍管で観測する。
←IMB, カミオカンデ、スーパーカミオカンデ、SNO



チェレンコフ光



nobelprize.org



チェレンコフ

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by green grass and some trees. A modern building with a curved facade and several columns is situated on the left side of the pond. In the background, several multi-story buildings with red-tiled roofs and modern architectural styles are visible. The sky is blue with some white clouds.

(2)ニュートリノ振動とは

真空中のニュートリノ振動(量子力学的干渉効果)

種類の違うニュートリノの状態 ν_μ, ν_τ と質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) が2行2列の行列により

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

θ : 混合角

と関係つけられている時、時間 t 、距離 L だけニュートリノが走る間に ν_μ から ν_τ に変換される確率は

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

$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$
: 質量二乗差

となることが、示されている
(1962年 牧一中川一坂田)。

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg/



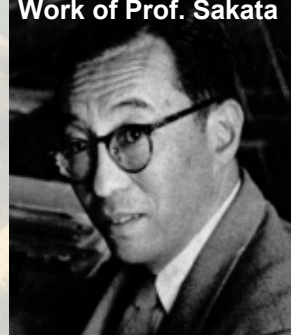
牧二郎

Publ. Committee Sci.
Work of Prof.
Nakagawa



中川昌美

Publ. Committee Sci.
Work of Prof. Sakata



坂田昌一

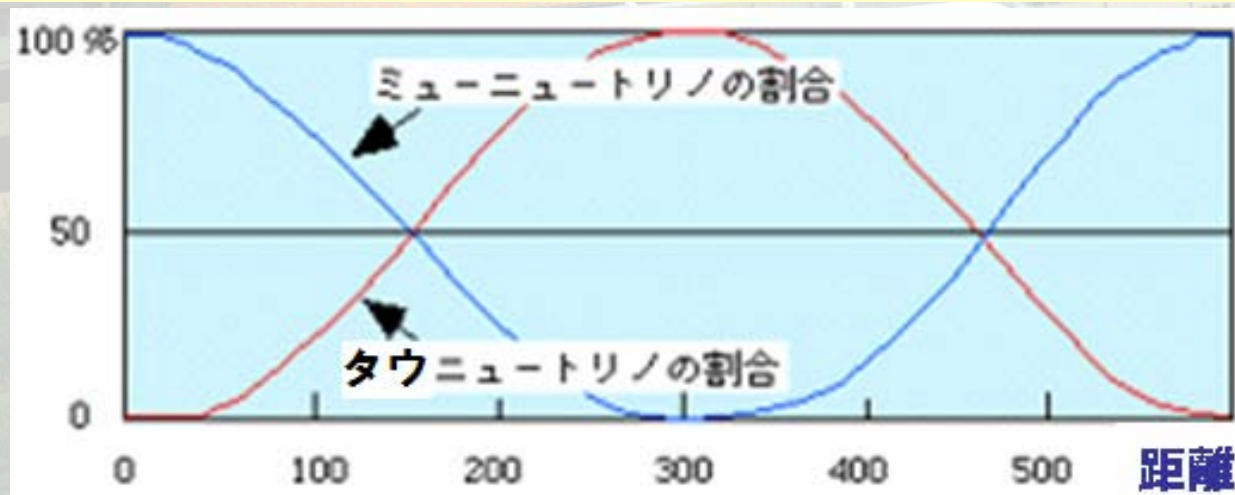
確率はLの振動的な関数→ニュートリノ振動と呼ばれる

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / \text{eV}^2) (L/\text{km})}{(E/\text{GeV})} \right) \quad \Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

この値が $\pi/2$ になる時にニュートリノの変換確率が最大となる

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ なら $E = 0.6 \text{GeV} \rightarrow L = \text{約} 300 \text{km}$ (T2K実験)

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ なら $E = 4 \text{MeV} \rightarrow L = \text{約} 2 \text{km}$ (D-CHOOZ実験)



角野先生
の話

住吉先生
の話

●素粒子の現象が数km～数百kmの距離で観測される特異な例

●実験からは θ と Δm^2 のみしかわからないが、ニュートリノ振動があれば、少なくとも一つの質量 $\neq 0$ と言える

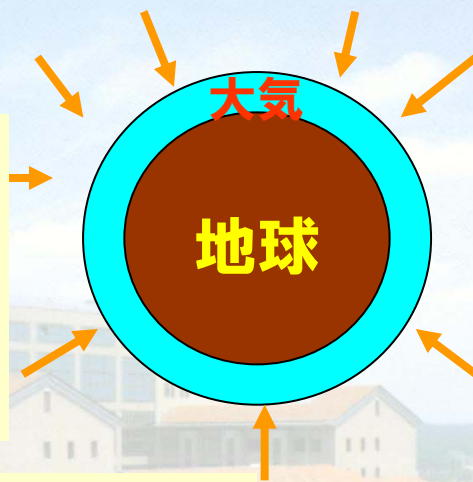
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by green grass and some trees. A modern building with a curved, white, columned walkway or entrance is situated on the left side of the pond. In the background, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with some light clouds.

(3)大気ニュートリノの話

大気ニュートリノ

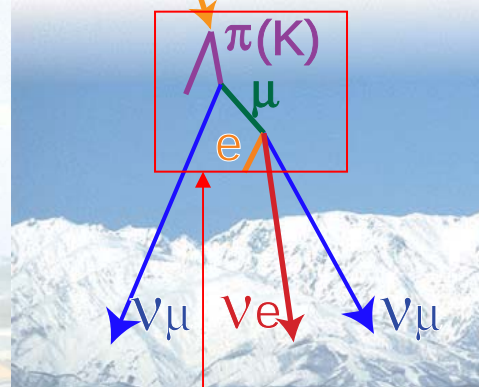
地球には宇宙から1次宇宙線がつねに降り注いでいる→それらが大気中の核子と衝突して2次宇宙線が生成される

ほとんどの粒子は $\pi^\pm$ 中間子となる
→ $\pi^\pm$ はミュー粒子 $\mu^\pm$ に崩壊
→ $\mu^\pm$ は(陽)電子・ニュートリノへと崩壊
→これらの過程で生成されたニュートリノを**大気ニュートリノ**と呼ぶ。

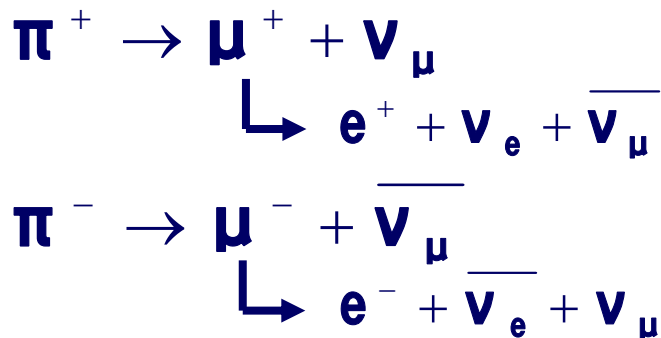


1次宇宙線（陽子、ヘリウム）

$p, He, \dots$

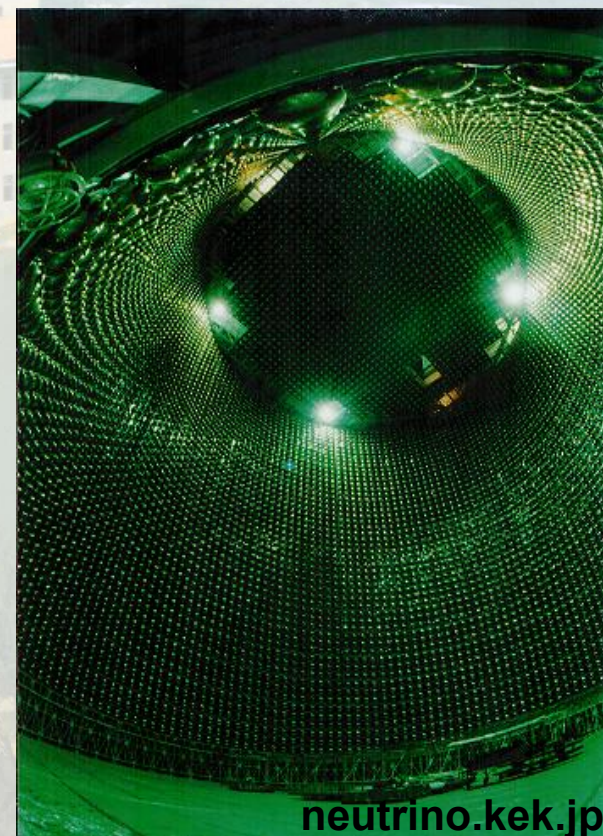
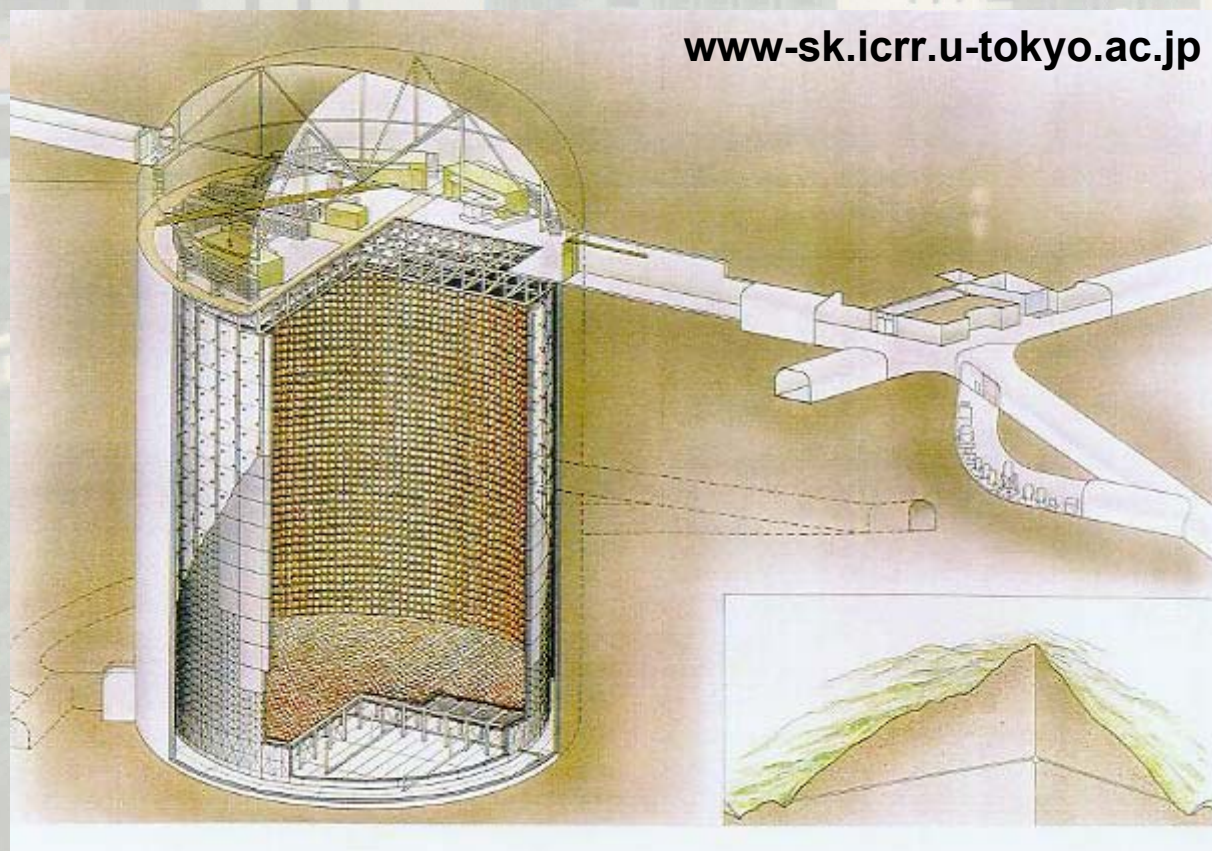


2次宇宙線（ $\mu^\pm, e^\pm$ ）



スーパーカミオカンデ(1995～、岐阜県神岡)

- 水(50kt)による測定器(標的が経済的であるだけでなく、チェレンコフ光による荷電粒子の観測が可能となり、一石二鳥)
- 地下(約1km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



大気ニュートリノ欠損の観測

粒子と反粒子の違いを無視すれば

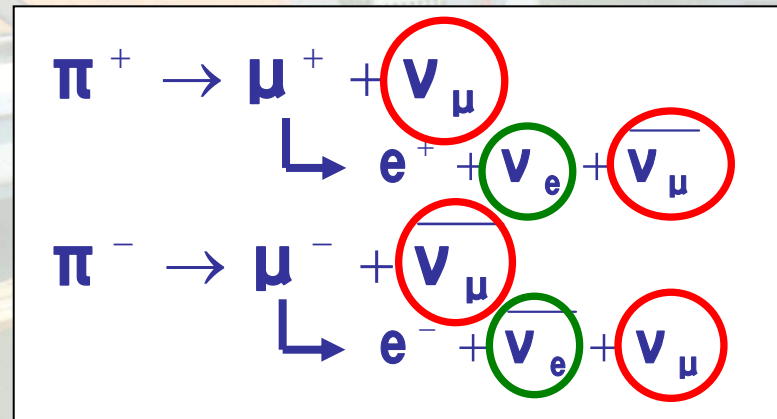
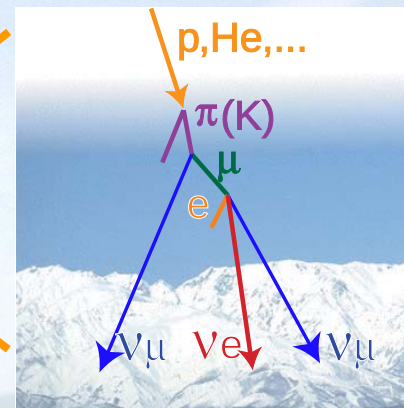
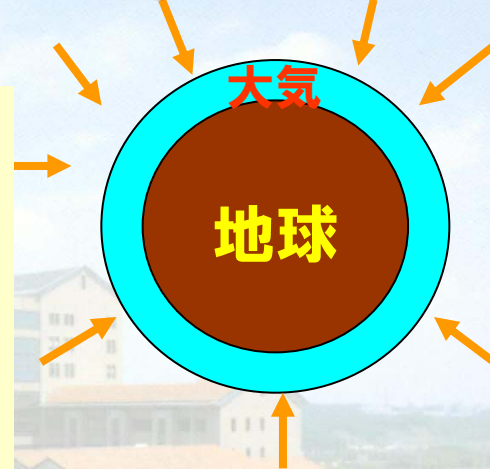
$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2:1$$

となるはずであるが、観測結果は

$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 1.3:1$$

となって理論と食い違っていることが
実験的に示された(スーパーカミオカンデ、1998年)。

1次宇宙線(陽子、ヘリウム)



大気ニュートリノ欠損の原因

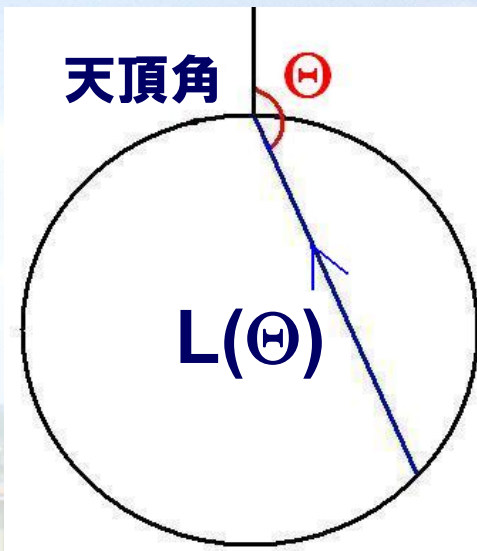
結論から言うと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の転換で
 ν_μ の量が減っているのが大気ニュートリノ欠損の原因

$$(\nu_\mu + \overline{\nu}_\mu) : (\nu_e + \overline{\nu}_e)$$

の実験値はLとEに依存し、ニュートリノ振動の公式

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

通りになっていることがスーパーカミオカンデにより1998年に実験的に証明された。



www2.kek.jp



戸塚洋二

nobelprize.org



梶田隆章

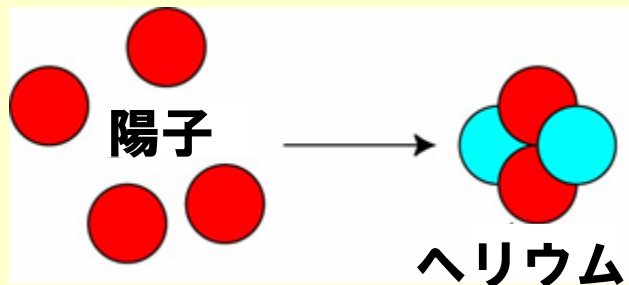
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by green grass and some trees. A modern building with a curved, white, columned walkway or entrance is situated on the left side of the pond. In the background, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered white clouds.

(4)太陽ニュートリノの話

●太陽中の反応

弱い相互作用による反応を含む

太陽中では核融合反応

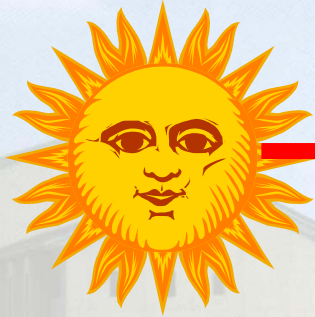


+ 2 陽電子 + 2 電子ニュートリノ

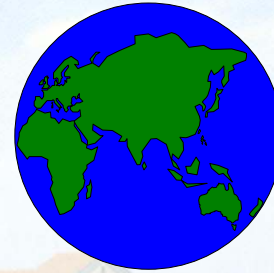
+ 26.7MeV

がっねに起こっていて**エネルギー**が発生している。この反応で発生する**電子ニュートリノ**を**太陽ニュートリノ**と呼ぶ

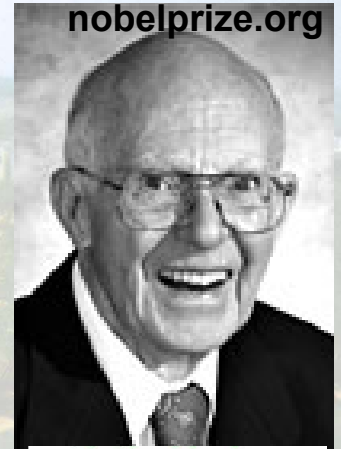
太陽ニュートリノ欠損の観測



電子ニュートリノ



●太陽ニュートリノは、1970年頃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観測されていたが、実験値は理論値の約1/2以下であることが長年にわたり知られていた。これを**太陽ニュートリノ問題**と呼ぶ。



デイビス

結論から言うと $\nu_e \rightarrow \nu_\mu + \nu_\tau$ の転換により ν_e の量が減っているのが太陽ニュートリノ欠損の原因

2000年頃までの太陽ニュートリノの観測

- 太陽ニュートリノは低エネルギー(<10MeV)なので、ミュー粒子($mc^2=106\text{MeV}$)やタウ粒子($mc^2=1777\text{MeV}$)を生成することはできず、 ν_e がどれだけ減ったかしか測定できない。
- 太陽ニュートリノのフラックスの予言値には理論的不定性があり、ニュートリノ振動が原因で減っているのかどうか、本当の所はわからない。

Homestake(米)

1968年

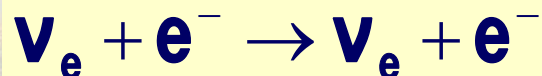


放射化学的測定

$E \geq 0.8\text{MeV}$

Kamiokande (日)

1989年



水チェレンコフ

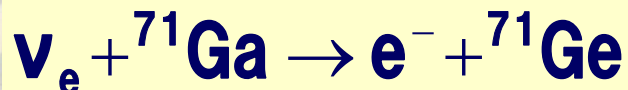
$E > 5\text{MeV}$

Superkamiokande (日)

1998年

GALLEx (伊)

1998年



放射化学的測定

$E \geq 0.2\text{MeV}$

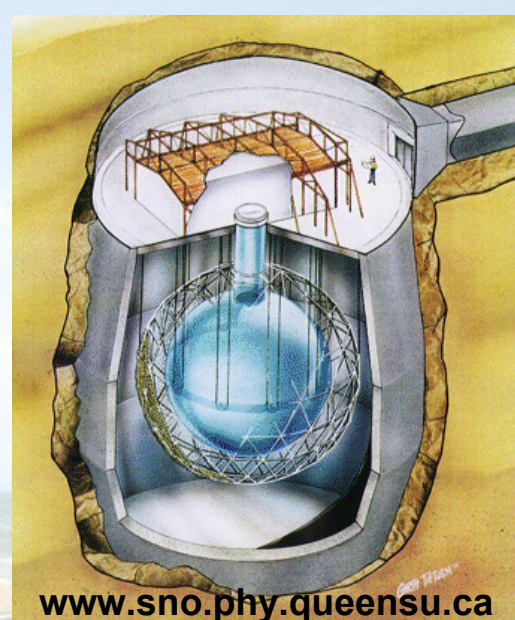
SAGE (露)

1999年

SNO (Sudbury Neutrino Observatory、カナダ オンタリオ州サドベリー市クレイトン鉱山、1999 ～2006)

D_2O , $d = (pn)$, 重陽子

- **重水**(1kt)による測定器(カナダには重水炉が複数箇所あり、高価な重水(～100円/g)が豊富→カナダ原子力公社から1ktを無償で借用)
- 地下(約2km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



nobelprize.org



マクドナルド

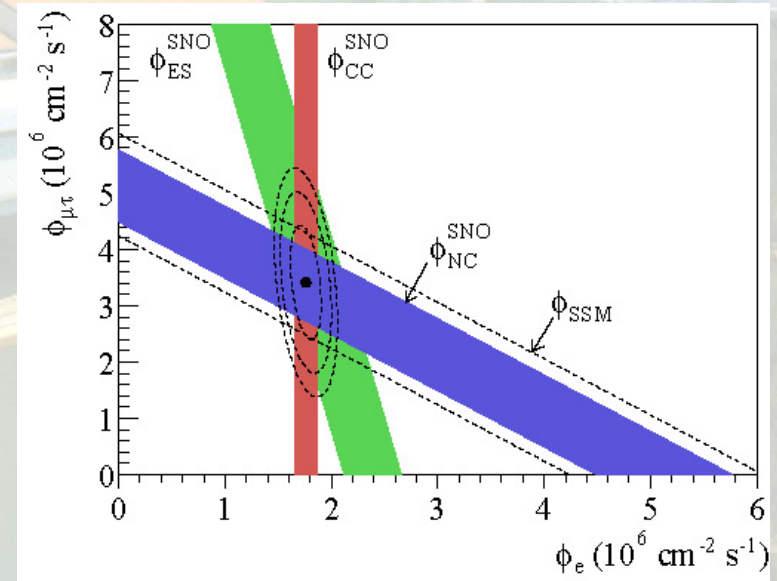
SNOでは次の2つの反応を観測することができる[d=(pn)]:

$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ → ν_e のみ可能 → ν_e のみのfluxが測定可能

$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ → ν_x の全部可能 → $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ のfluxが測定可能
 $x = e, \mu, \tau$

これら2つの反応を比較した結果、
 $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ は理論値通りで、
 ν_e の量が減っていることが示された(2002年4月19日)

→ニュートリノ振動の証拠



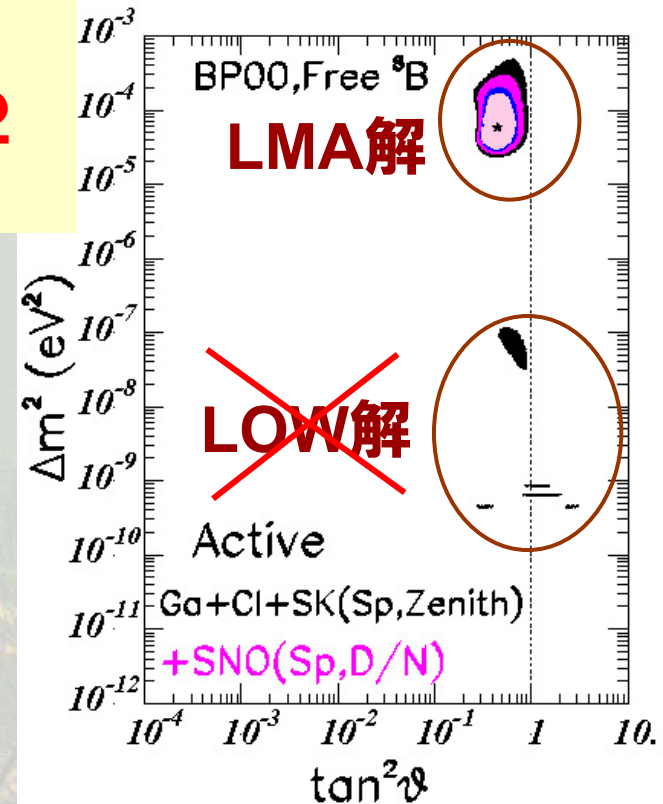
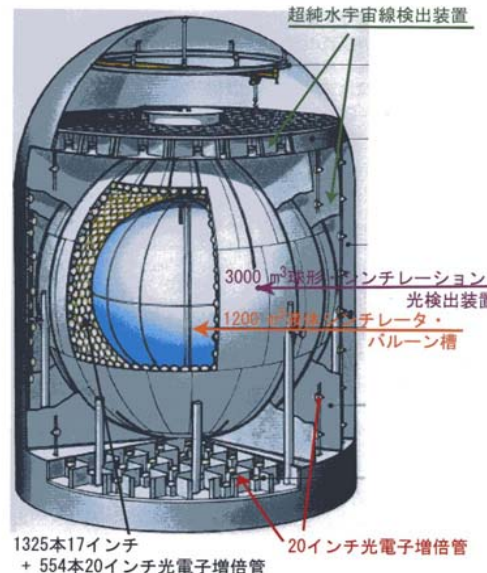
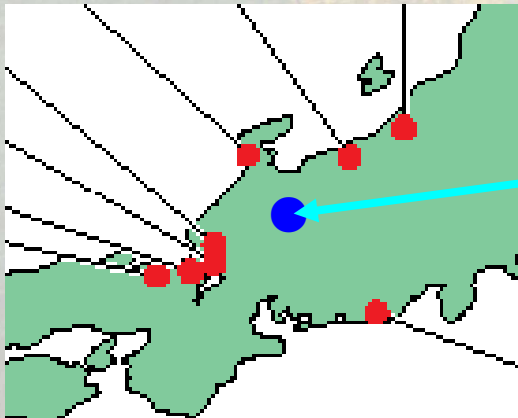
カムランド(原子炉ニュートリノ欠損, 2002 ~)

www.kek.jp



鈴木厚人

- 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**LMA解**と一致し
(SNOが排除できなかった**LOW解**を排除)、
太陽ニュートリノ問題を最終的に解決(2002年12月6日)

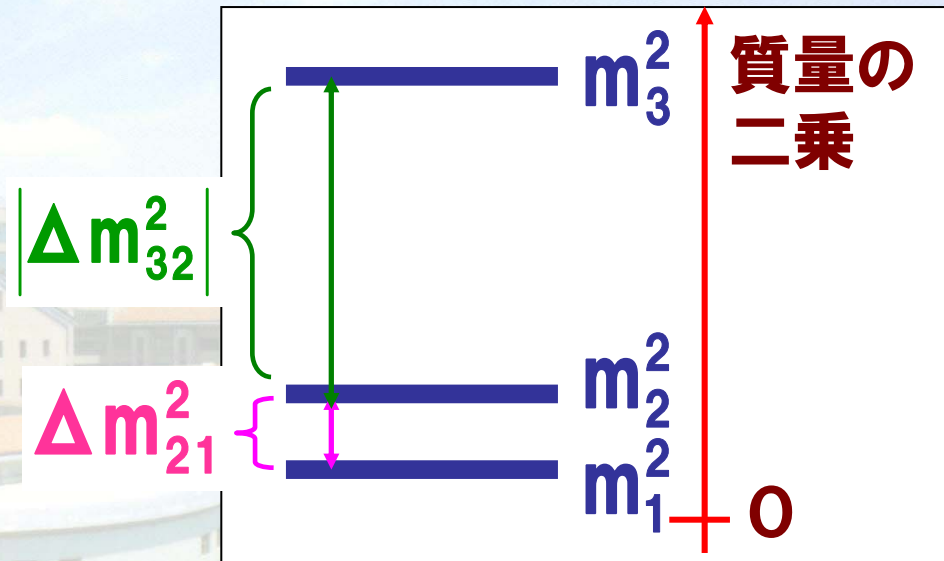


The background image shows a university campus. In the foreground, there is a large, multi-story building with a curved section and many windows. Behind it, another building is visible. In front of the main building is a large, irregularly shaped pond. The area is surrounded by greenery and trees. The sky is blue with some clouds.

(5)その後の発展:三世代 ニュートリノ振動

3世代ニュートリノの質量と混合

これまでの話は、簡単のため2種類の間ニュートリノ振動を議論→現実の世界ではニュートリノは3種類ある→3種類間ニュートリノ振動を議論する必要あり
 → ν_e, ν_μ, ν_τ は質量のニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3) と次式で関係:



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$\mathbf{U}$: 3×3 行列

$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$: 混合角

δ : CP非保存の位相

$$c_{jk} = \cos \theta_{jk}$$

$$s_{jk} = \sin \theta_{jk}$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2002年までのニュートリノ振動実験のまとめ

- 太陽ニュートリノ・長基線原子炉ニュートリノ⇒

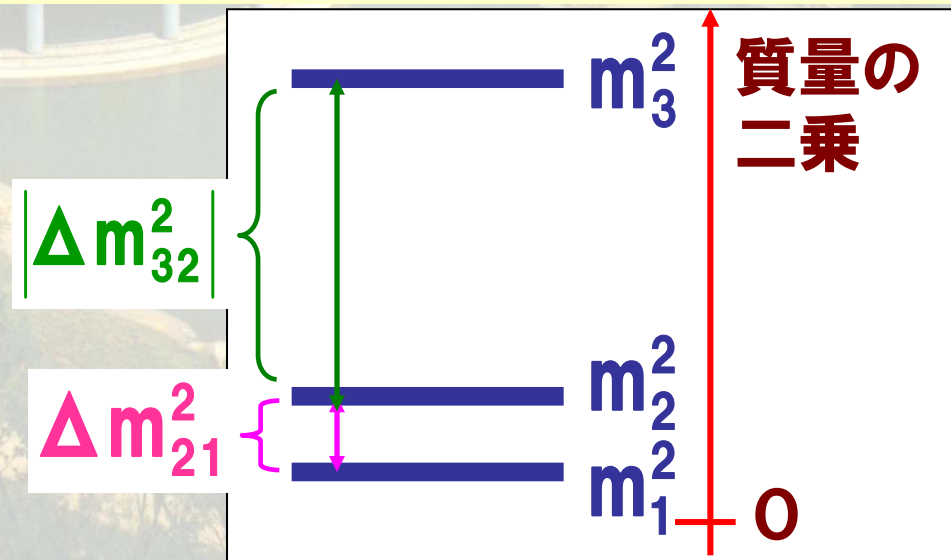
$$\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; \sin^2 2\theta_{12} \cong 0.8$$

⇒ $(\Delta m_{21}^2, \theta_{12})$ が決定された

- 大気ニュートリノ⇒

$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; \sin^2 2\theta_{23} \cong 1.0$$

⇒ $(|\Delta m_{32}^2|, \theta_{23})$ が決定された



2002年以降現在までの主なニュートリノ振動実験

- 加速器ニュートリノ欠損/転換 K2K(日,2003), MINOS(米,2006), OPERA(伊,2010), **T2K**(日,2011)

$|\Delta m^2_{32}|$ 、 θ_{23} 、 θ_{13} 、 δ : の測定 → $\delta \sim 3\pi/2?$

角野先生
の話

- 短基線原子炉ニュートリノ欠損 **Double-CHOOZ**(仏,2011), Daya Bay(中,2012), Reno(韓,2012)

θ_{13} の測定 → $\sin^2 2\theta_{13} = 0.09$

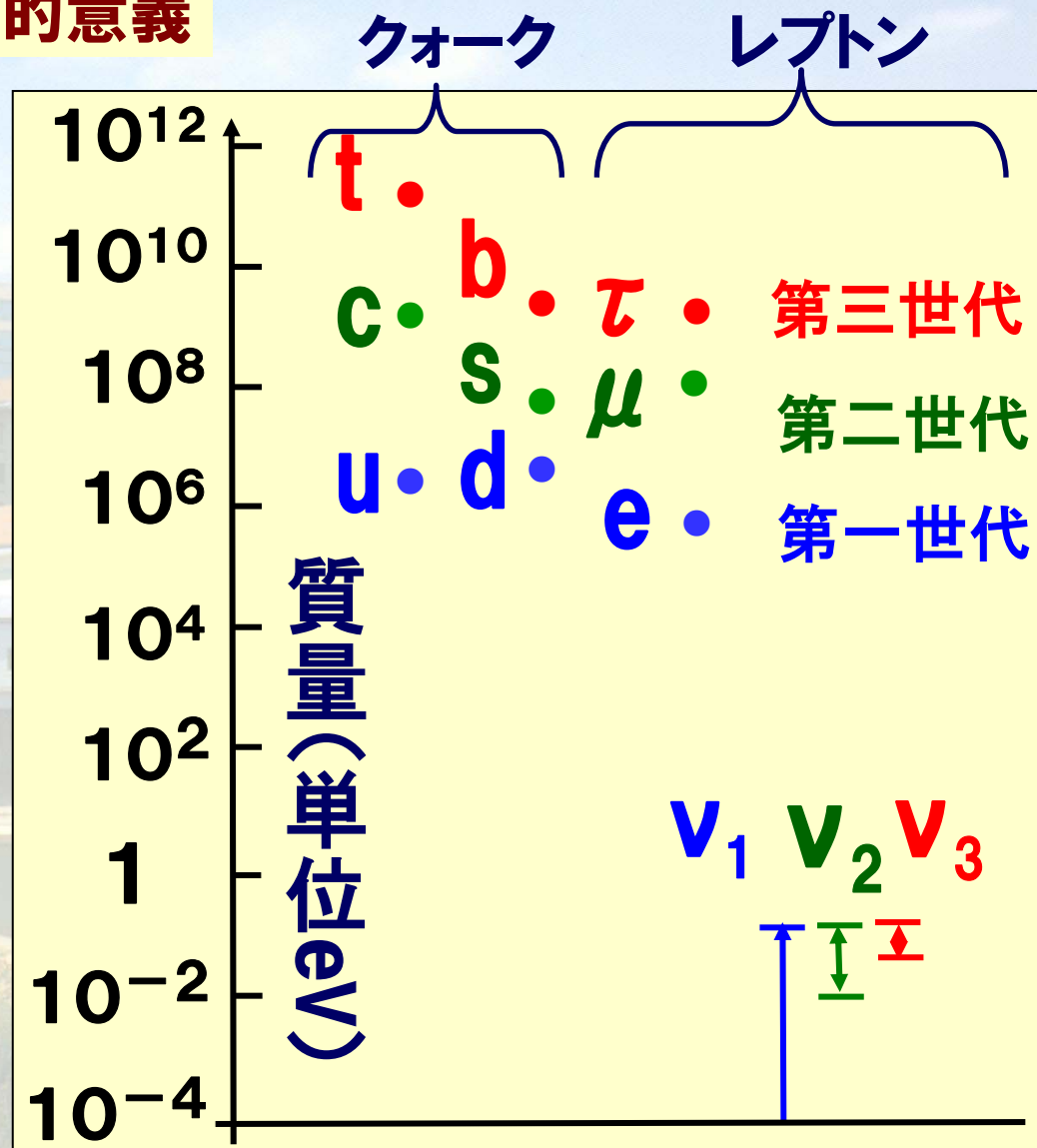
住吉先生
の話

ニュートリノ振動の発見の物理的意義

- ニュートリノの質量は素粒子の標準模型ではゼロと仮定されており、標準模型を超える物理(BSM)を探る鍵を与える→BSMのさらなる研究の加速

- ニュートリノ振動の発見からニュートリノに非常に小さい質量があることがわかった→質量階層性の新たな謎

- ニュートリノと反ニュートリノの振動の違いを表すCP非保存位相 δ は、宇宙の物質-反物質の非対称性を説明する物理の鍵を与える→宇宙論へのさらなる応用



An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by greenery and a winding path. Behind the pond, several modern university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The background shows more campus buildings and distant hills under a blue sky with scattered clouds.

Backup slides

ニュートリノ振動

(1) 真空中の2世代の場合

質量固有状態

(共通の $\vec{p}$) に対する
ディラック
方程式の1成分

$$\begin{cases} i \frac{d}{dx} \mathbf{v}_1(x) = E_1 \mathbf{v}_1(x) \\ i \frac{d}{dx} \mathbf{v}_2(x) = E_2 \mathbf{v}_2(x) \end{cases}$$

$$E_j \equiv \sqrt{\vec{p}^2 + m_j^2}$$

フレーバー固有状態

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{pmatrix}$$

真空中の混合角

$$U \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

MNS 行列

$$P(\mathbf{v}_\mu \rightarrow \mathbf{v}_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta E L}{2} \right)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 \cong \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E} = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

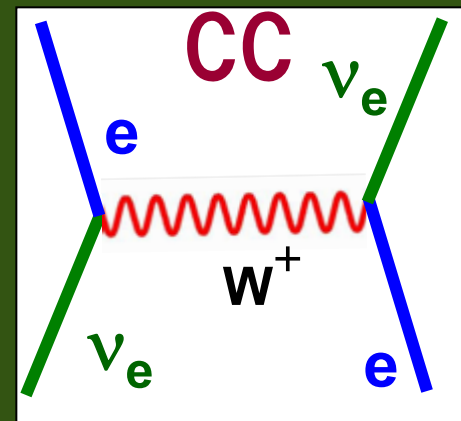
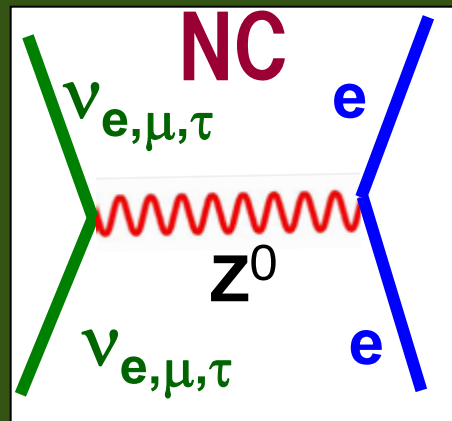
- ・ニュートリノに質量と混合角がある場合にはフレーバー変換が起こる
- ・フレーバーの変換確率は基線の長さLについて振動的

(2) 物質中の2世代の場合 (MSW効果)

$$L_{\text{eff}} = \sqrt{2} G_F \bar{\nu}_e \nu_e e e$$

$$\rightarrow \sqrt{2} G_F \bar{\nu}_e \nu_e n_e(x)$$

$$A \equiv \sqrt{2} G_F n_e(x)$$



$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \left[U \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

N_e が一定の場合には真空中と同様な式が出せる

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\tilde{\theta} \sin^2 \left(\frac{\Delta \tilde{E} L}{2} \right)$$

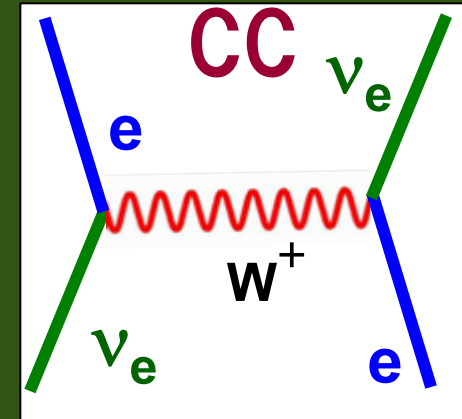
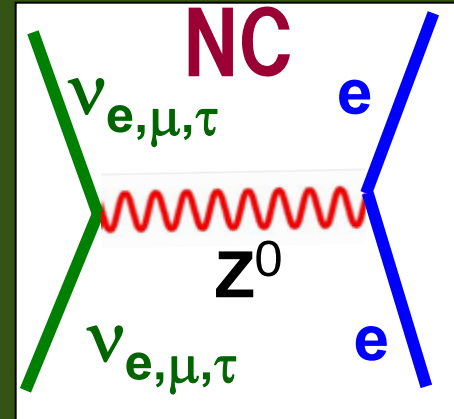
$$\tan 2\tilde{\theta} \equiv \frac{\Delta E \sin 2\theta}{\Delta E \cos 2\theta - A}$$

真空中の混合角 θ が小さくても物質中の混合角 $\tilde{\theta}$ は大きくなり得る (MSW効果)

$$\Delta \tilde{E} \equiv \left[(\Delta E \cos 2\theta - A)^2 + (\Delta E \sin 2\theta)^2 \right]^{1/2}$$

物質中のニュートリノ振動

ν_e のみが物質中の電子と余分な相互作用をするためにニュートリノ振動の確率は修正を受ける



太陽からの ν_e の振動確率は以下のようになる（「(0)」は生成点での値を表す； P は ν_e のエネルギー E に依存している）：

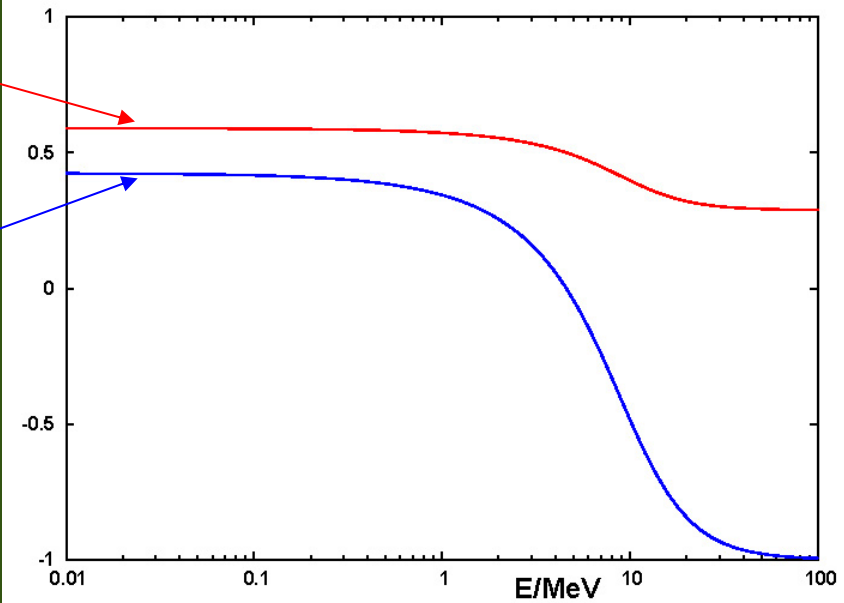
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos 2\theta \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta - 2EA(0)}{\Delta \tilde{m}^2(0)} \right]$$

$$\Delta \tilde{m}^2(0) = \left[\{ \Delta m^2 \cos 2\theta - 2EA(0) \}^2 + (\Delta m^2 \sin 2\theta)^2 \right]^{1/2}$$

太陽 ν の振動確率は
断熱近似 + $L \rightarrow \infty$ に
より求められ、始点
と終点の混合角度で
表される

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$$

$$\cos 2\tilde{\theta}(t_1)$$



太陽 ν の振動確率は発生点での有
効混合角を通して E_ν に依存する

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_e; \theta_\odot; A)_{N_\nu=2} &\simeq c_\odot^2 \tilde{c}^2(t_1) + s_\odot^2 \tilde{s}^2(t_1) \\ &= \frac{1}{2} \left[1 + \cos 2\theta_\odot \cos 2\tilde{\theta}(t_1) \right] \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \cos 2\theta_\odot \frac{\Delta E \cos 2\theta_\odot - A}{\Delta \tilde{E}(t_1)} \right) \end{aligned}$$

無限遠（真空中）での混合角

$$A \equiv \sqrt{2G_F n_e(x)}$$

発生点での
有効混合角

$$\begin{aligned} \Delta E &\equiv E_2 - E_1 \simeq \Delta m^2 / 2E \\ \tan 2\tilde{\theta}(t_1) &\equiv \frac{\Delta E \sin 2\theta_\odot}{\Delta E \cos 2\theta_\odot - A(t_1)} \end{aligned}$$

$$\Delta \tilde{E}(t_1) \equiv \left\{ [\Delta E \cos 2\theta_\odot - A(t_1)]^2 + (\Delta E \sin 2\theta_\odot)^2 \right\}^{1/2}$$

N_e が断熱的に
変化する場合
の表式

太陽 ν 実験

Ga:Gallex-GNO, SAGE

Cl:Homestake

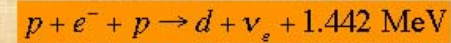
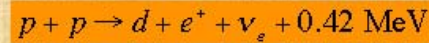
H₂O:Kam,**SK**

D₂O:SNO

(CH₂)_n:**Borexino**

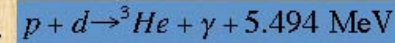
稼働中

Solar Neutrinos Sources: pp chain

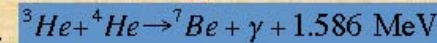
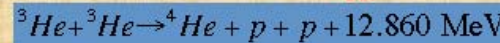


~0.4%

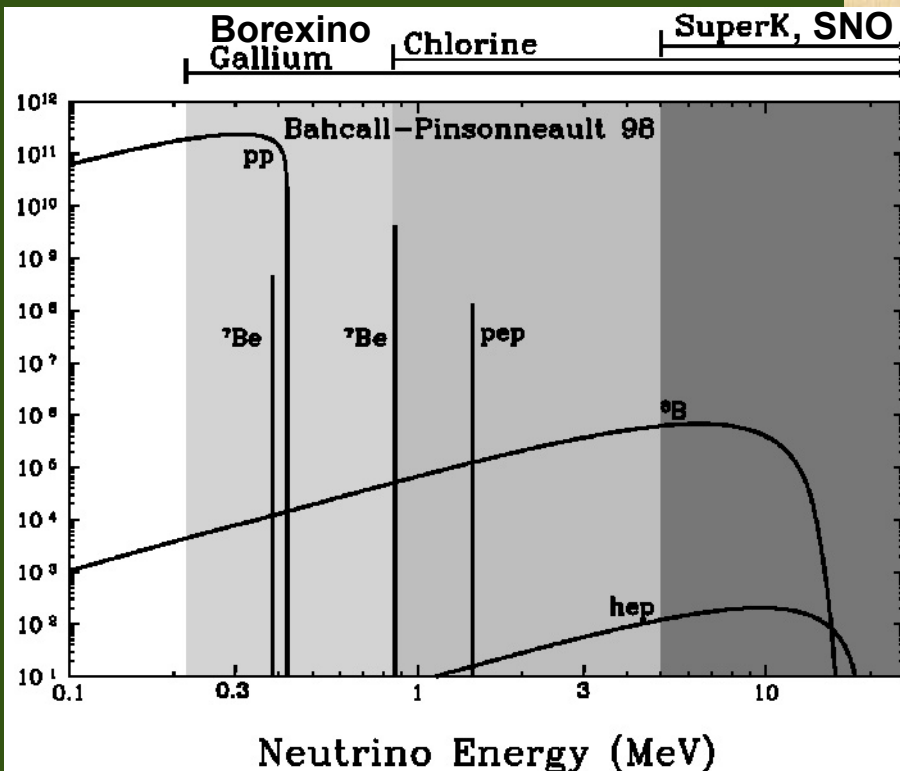
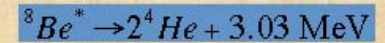
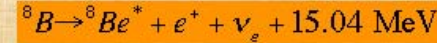
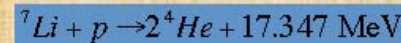
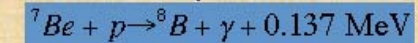
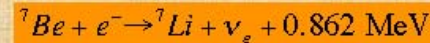
~85%



~15%



~0.02%



しきい値の異なる太陽νの
諸実験の結果から Δm^2 と
 $\sin^2 2\theta$ の情報が得られる