

第28回日高ライブリーカレッジ

2017年10月21日

ニュートリノ物理学への招待

このスライドは以下のHPに置いてあります：

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/hidaka2017.pdf>

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

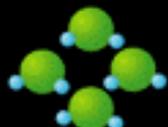


(1)素粒子の基礎知識

素粒子とはそれ以上細かくできないもの

結論から言うと、今の所、物質中の電子・クォークが素粒子と考えられている

10^{-7} cm



水の分子(水素・酸素)

10^{-8} cm



酸素原子(原子核・電子)

10^{-12} cm



原子核(陽子・中性子)

核子

10^{-13} cm

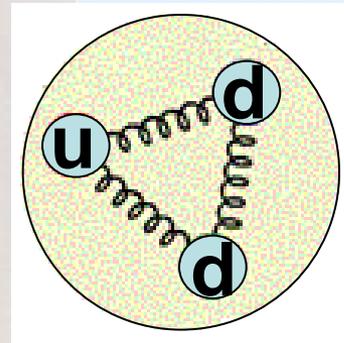


核子(uクォーク・dクォーク)

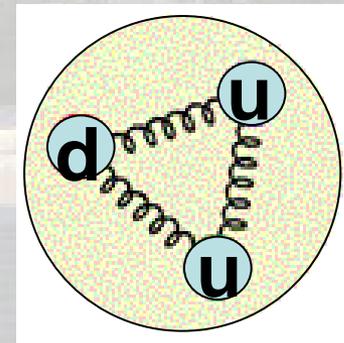
$<10^{-16}$ cm



クォーク



中性子



陽子

[注] 数の表示方法

大きな数の表示方法:

$$1 \text{ 万} = 10,000 = 10^4 \text{ (10の4乗)}$$

$$1 \text{ 億} = 100,000,000 = 10^8 \text{ (10の8乗)}$$

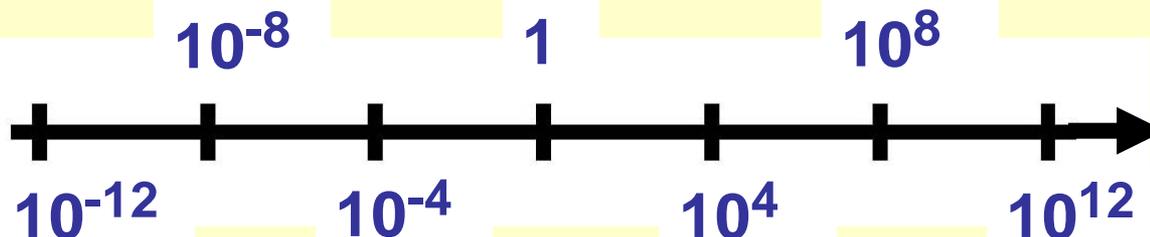
$$1 \text{ 兆} = 1,000,000,000,000 = 10^{12} \text{ (10の12乗)}$$

小さな数の表示方法:

$$1 \text{ 万分の1} = 0.0001 = 10^{-4} \text{ (10のマイナス4乗)}$$

$$1 \text{ 億分の1} = 0.00000001 = 10^{-8} \text{ (10のマイナス8乗)}$$

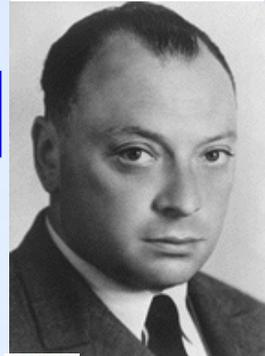
$$1 \text{ 兆分の1} = 0.0000000000001 = 10^{-12} \text{ (10のマイナス12乗)}$$



ニュートリノ

1933年に理論的に予言された素粒子

nobelprize.org



中性子→陽子+電子

という反応(ベータ崩壊と呼ばれる)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+(反電子)ニュートリノ

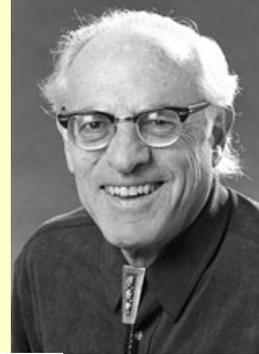
速度×質量

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



- ニュートリノも素粒子の一種と考えられている
- 1998年までは(標準モデルでは)ニュートリノの質量はゼロと考えられていた

nobelprize.org



ライネス

www.aps.org



コーワン

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)

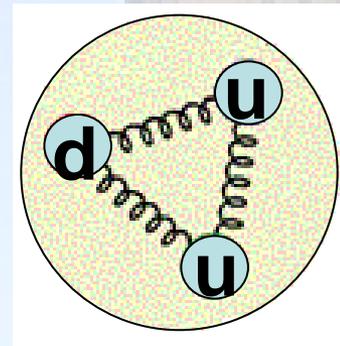
素粒子のまとめ(1):クォークとレプトン

- 物質はクォーク・レプトンから構成されている

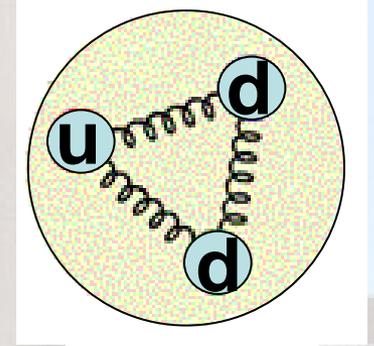
クォークは複数で束縛し合い、陽子・中性子のような複合粒子を構成する

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



陽子



中性子

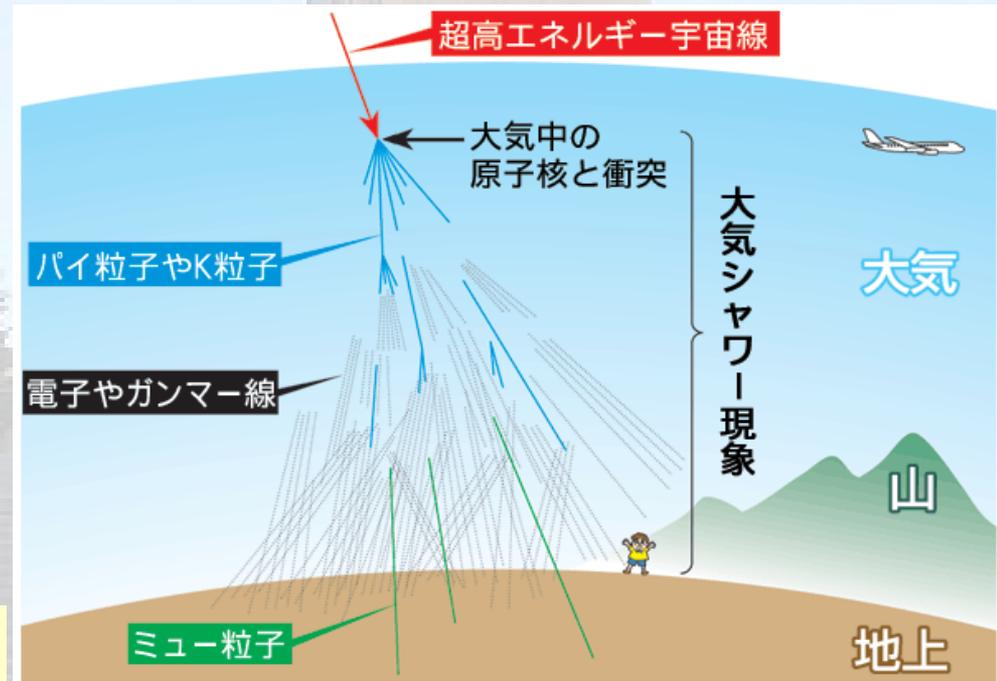
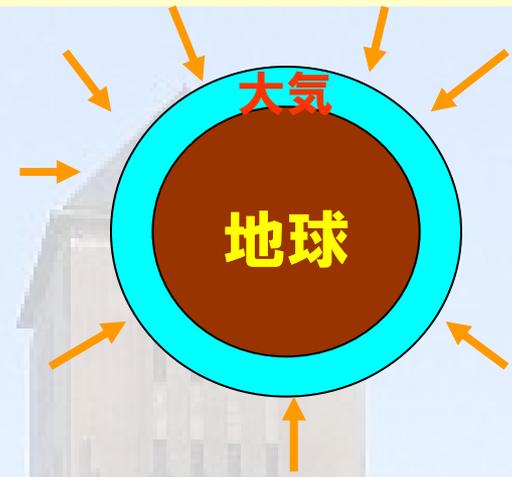
一方、世の中には宇宙線というものが降って来ていることが知られている

1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)

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



素粒子のまとめ(2):三世代

- 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**標準模型**では**ゼロ**

	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

	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=mc²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

[注] エネルギーの単位

※ 1eV (電子ボルト) = $1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ (ジュール) はエネルギーの単位(粒子の質量の記述に便利)

1keV (キロ・エレクトロンボルト、ケブ) = 10^3eV

1MeV (メガ・エレクトロンボルト、メブ) = 10^6eV

1GeV (ギガ・エレクトロンボルト、ジェブ) = 10^9eV

[注] 質量の単位

$E=mc^2$ の公式から質量 m はエネルギー E により $m=E/c^2$ と表せるので、質量の単位は MeV/c^2 と書けるが、素粒子物理学では通常 $c=1$ としてしまつて質量の単位を MeV と書く(自然単位と呼ばれる)。

[注] 「/」の意味

$A \div B$ のことを A/B と表す

[注] 記号の読み方

ギリシャ文字:

Δ : デルタ (英語の大文字のDに相当)

γ : ガンマ (英語の小文字のgに相当)

μ : ミュー (英語の小文字のmに相当)

ν : ニュー (英語の小文字のnに相当)

τ : タウ (英語の小文字のtに相当)

π : パイ (英語の小文字のpに相当)

θ : シータ (英語の小文字のqに相当)

二つの量
の差

光子(ガ
ンマ線)

ミューオン

ニュートリノ

タウオン

パイ中間子

角度

p: 陽子(proton)

n: 中性子(neutron)

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)



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

$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$
(クーロン) は素電荷

	電荷	質量 [MeV]
電子	-e	0.5
陽電子	+e	0.5

1932年：陽電子の発見



その後他の粒子にも反粒子
が存在することが実験的に
証明されている

ディラック

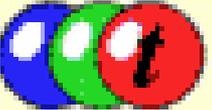
アンダーソン

素粒子のまとめ(3): 標準模型(三世代の粒子+反粒子)

- 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	 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

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	 反ミューニュートリノ	 反タウニュートリノ
	 陽電子	 ミュープラス	 タウプラス



(2)ニュートリノに働く力と観測の方法

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
相互作用の大きさの比	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	×	×	○	○

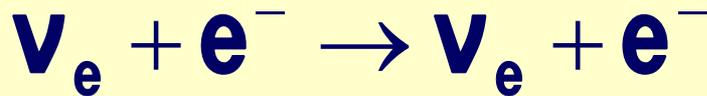
(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない

→観測はものすごく難しい

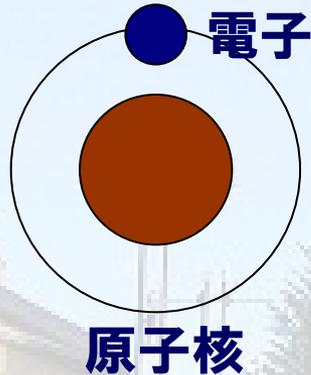
ニュートリノの観測の原理

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

太陽ニュートリノ



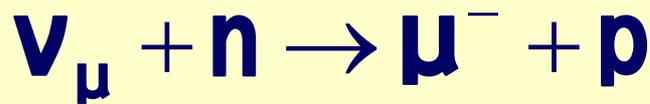
電子ニュートリノ



観測可能

電子

大気ニュートリノ



ミューニュートリノ



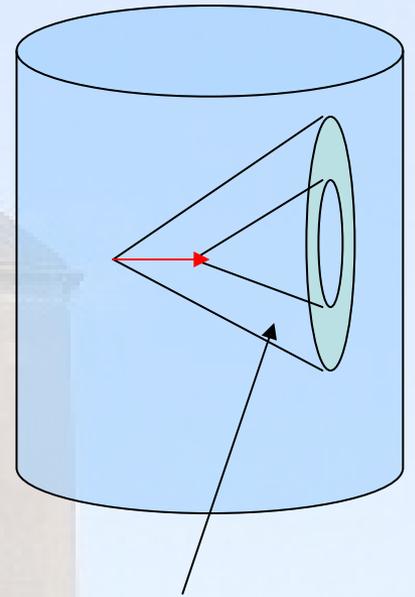
観測可能

ミューオン

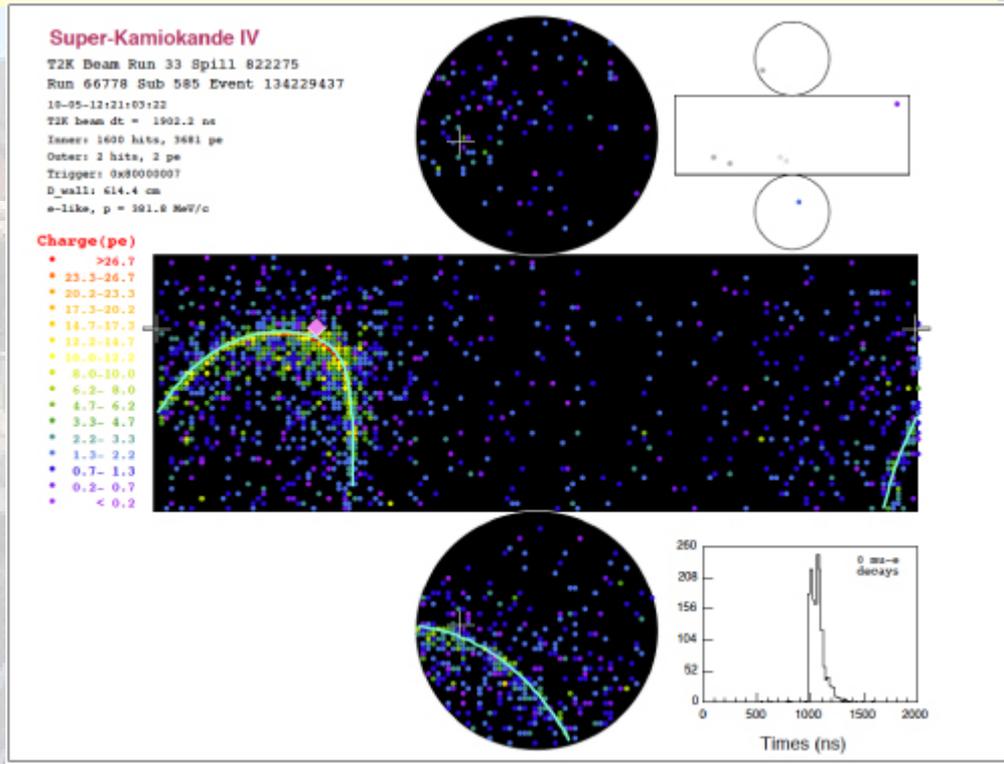
陽子

水による荷電粒子の観測の原理

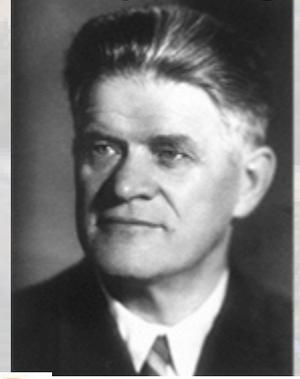
物質中では光の速度は真空中よりも遅くなる→水中を走る荷電粒子は水中の光速度以上で運動する時に**チェレンコフ光**と呼ばれる光を放つ(衝撃波の一種)→その光を光電子増倍管で観測する。←IMB, カミオカンデ、スーパーカミオカンデ、SNO



チェレンコフ光



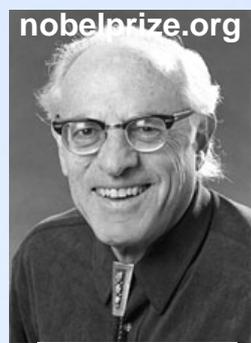
nobelprize.org



チェレンコフ

水チェレンコフ観測器

IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven、
米オハイオ州、1982～1991)



 ライネス

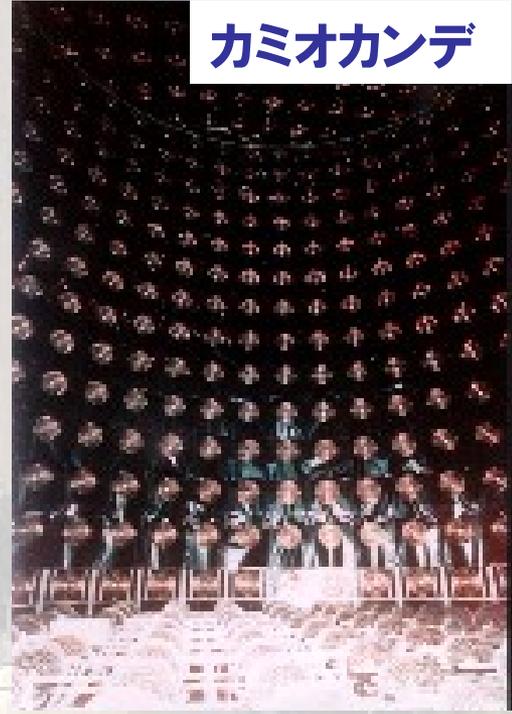


IMB

カミオカンデ (Kamioka Neutron Decay
Experiment、神岡、1985～1996)



 小柴昌俊



カミオカンデ

1987年超新星ニュートリノ観測の
成功でその後スーパーカミオカン
デへと発展

- 大量の水(IMB 8kt、Kam 3kt)による測定器
- 地下(IMB 約600m、Kam 約1km)の実験施設
(バックグラウンドを減らすため)
- 元々は核子崩壊(Nucleon Decay)を探索するのが
目的だったが、両実験とも副産物のニュートリノの
観測で大成功を収めた



(3)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、エネルギー E で、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

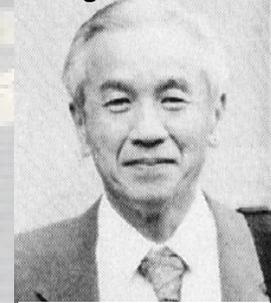
となることが、示されている
(1962年 牧—中川—坂田)。

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



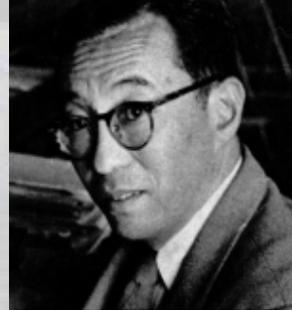
牧二郎

Publ. Committee Sci.
Work of Prof.
Nakagawa



中川昌美

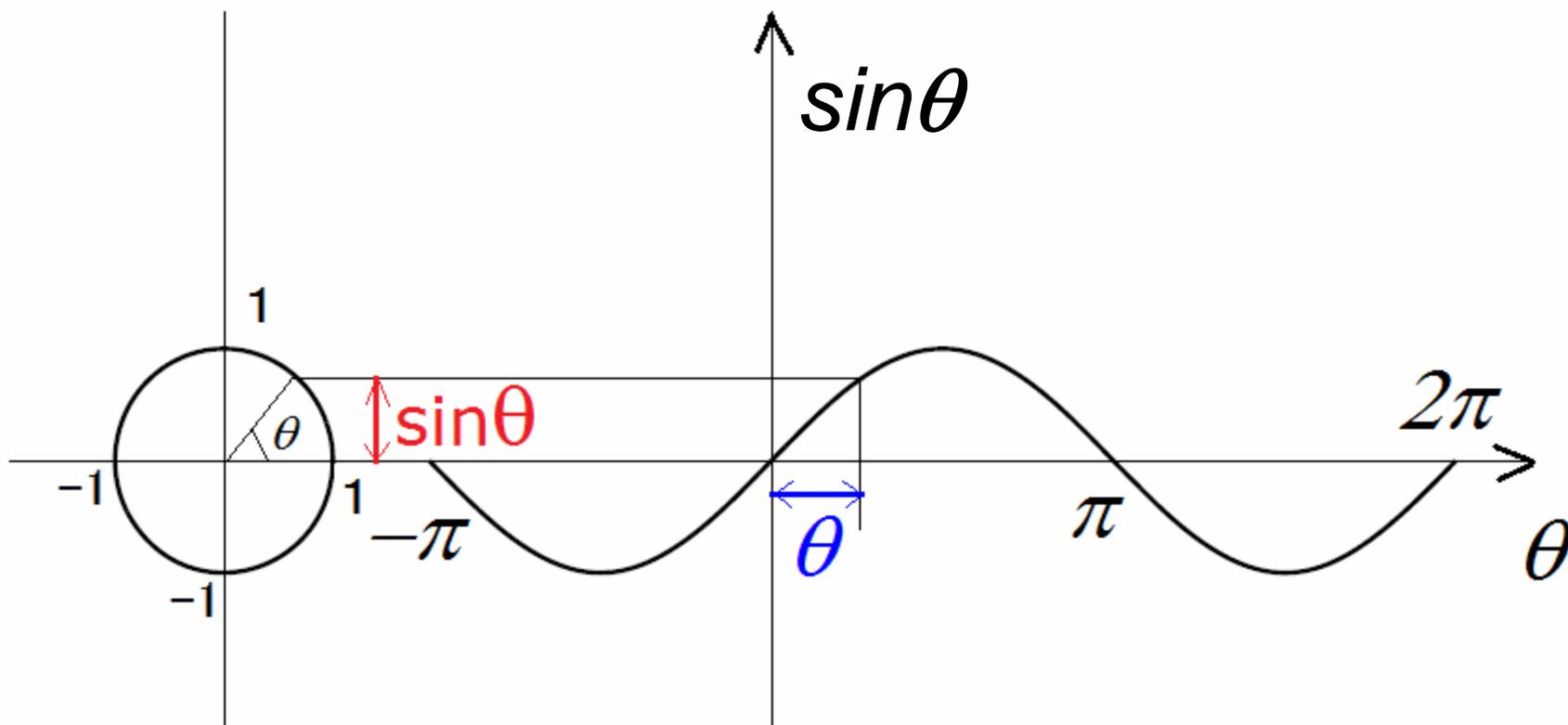
Publ. Committee Sci.
Work of Prof. Sakata



坂田昌一

[注] 三角関数に関する若干の説明

● 三角関数 $\sin\theta$ は振動する関数



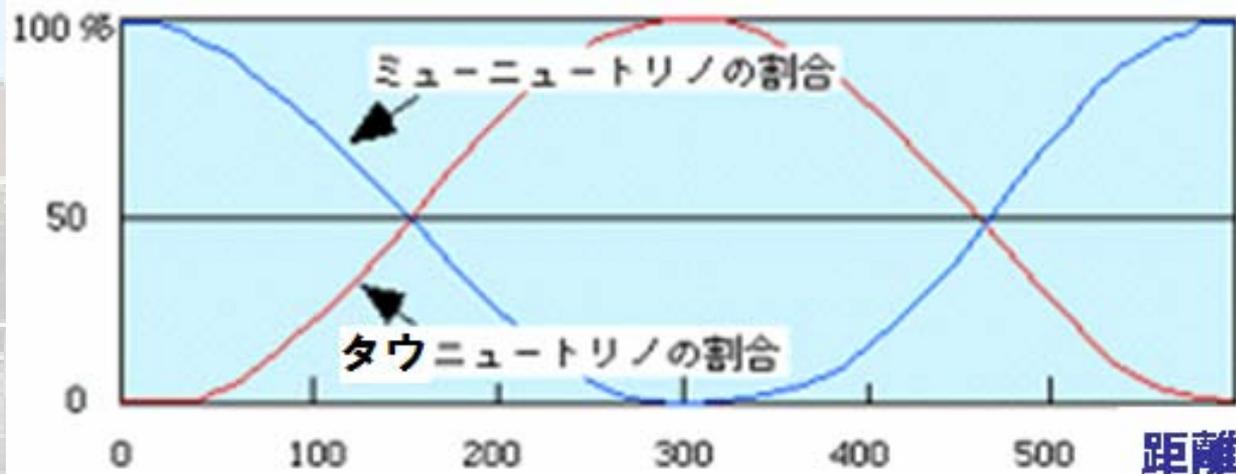
確率は距離 L の振動的な関数→ニュートリノ振動と呼ばれる

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

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)

$\Delta m^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ なら $E=4 \text{MeV} \rightarrow L=\text{約}100 \text{km}$ (カムランド実験)



●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 $\neq 0$ が言える

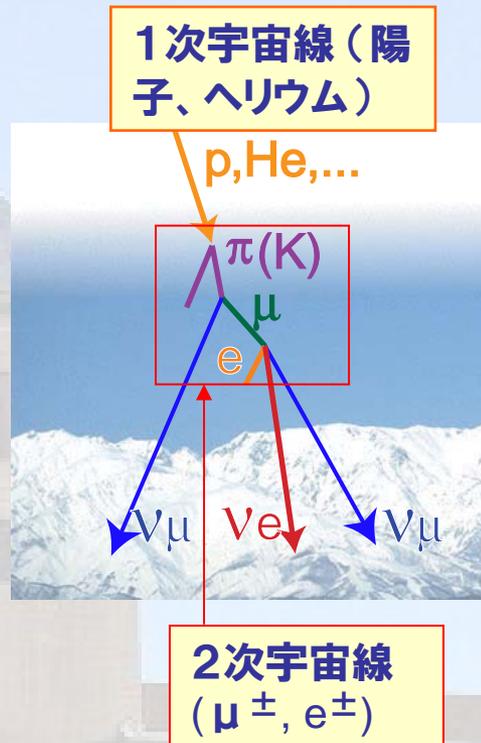
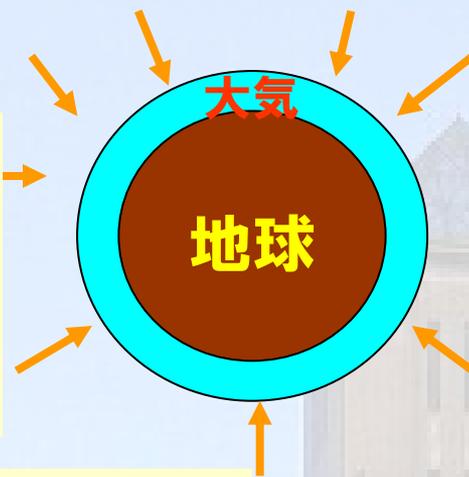
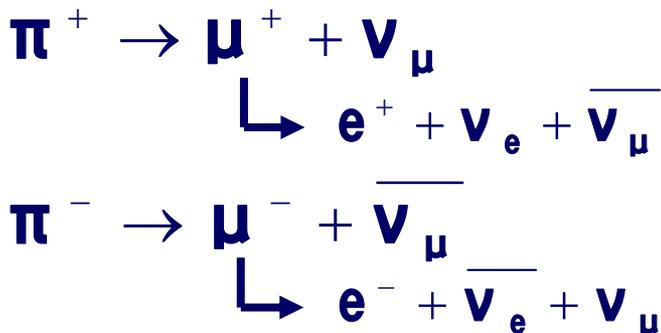


(4)大気ニュートリノの話

大気ニュートリノ

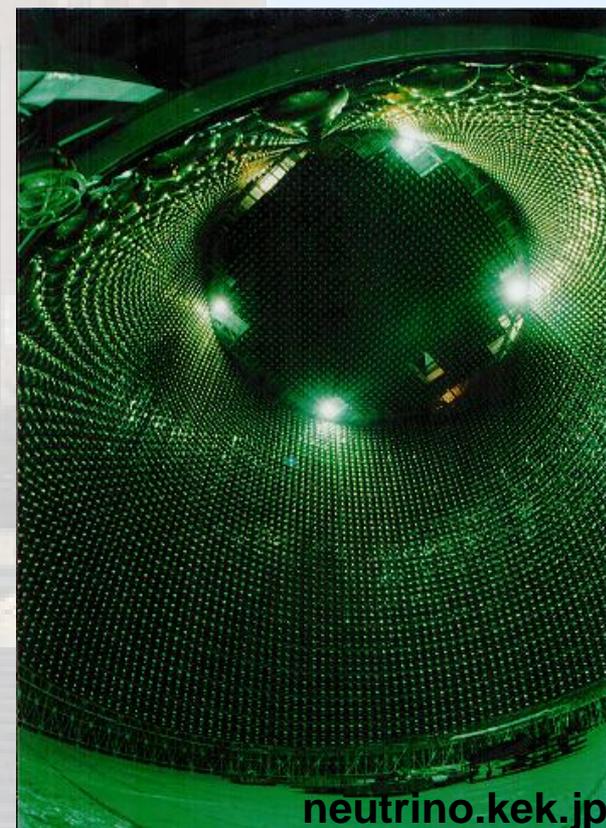
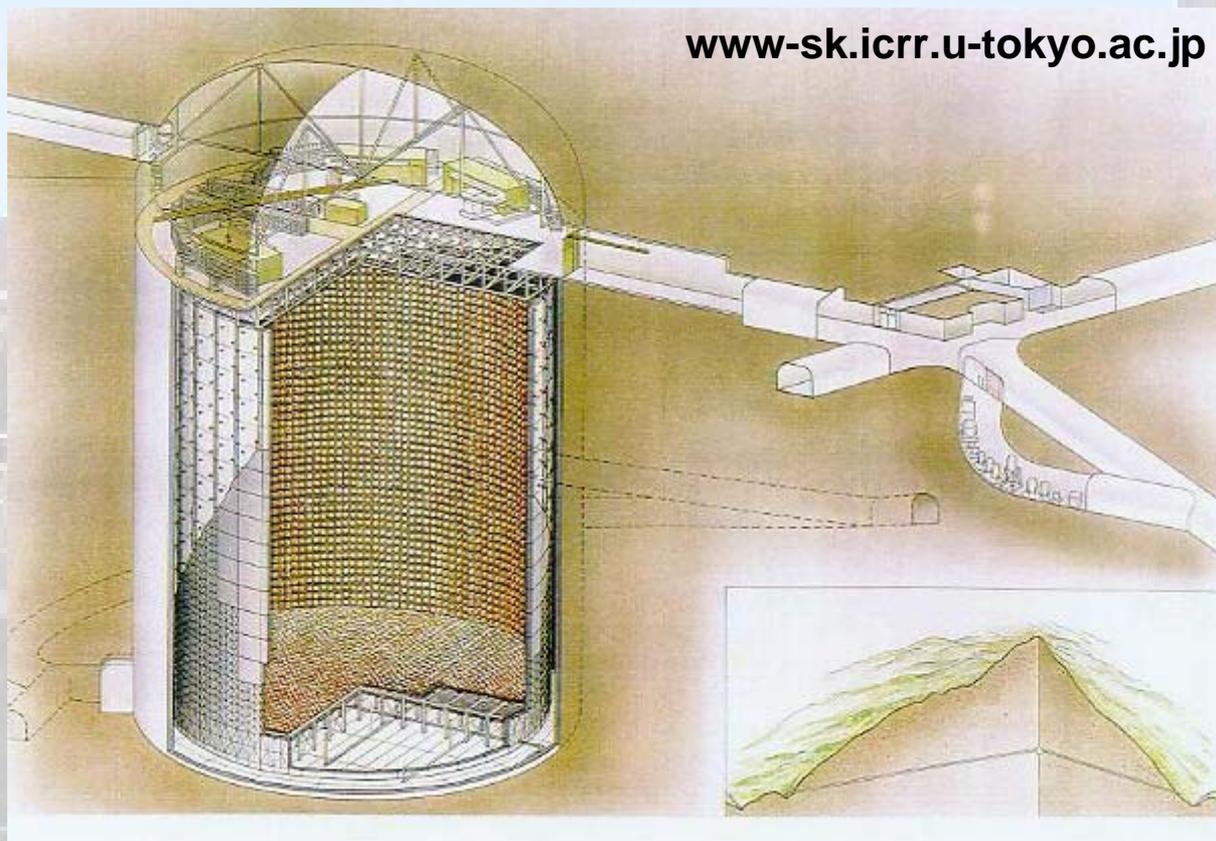
地球には宇宙から1次宇宙線
がつねに降り注いでいる→それ
らが大気中の核子と衝突して
2次宇宙線が生成される

ほとんどの粒子は π^\pm 中間子となる
→ π^\pm はミュー粒子 μ^\pm に崩壊
→ μ^\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。



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

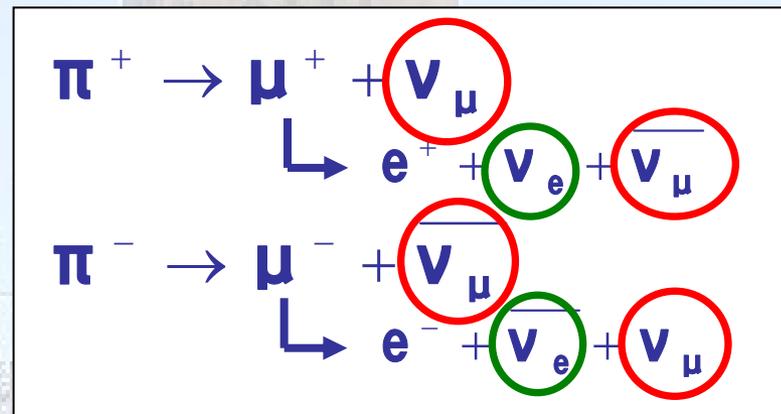
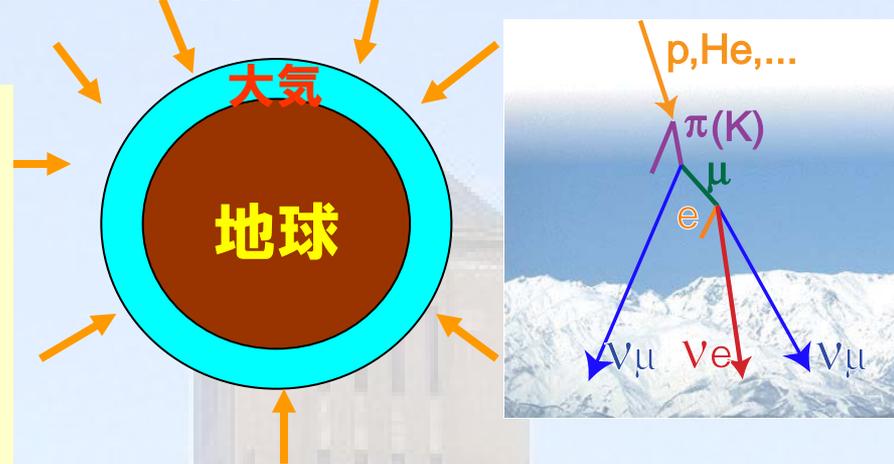
$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2 : 1$$

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

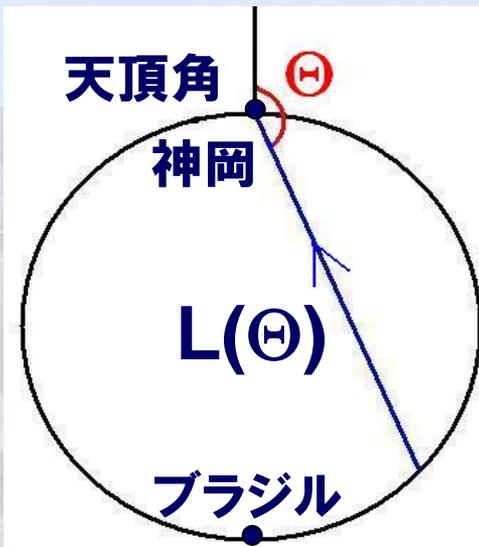
結論から言うと、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ の転換で
 ν_{μ} の量が減っているのが大気ニュートリノ欠損の原因

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

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。



地球の断面図

www2.kek.jp



戸塚洋二

nobelprize.org



梶田隆章

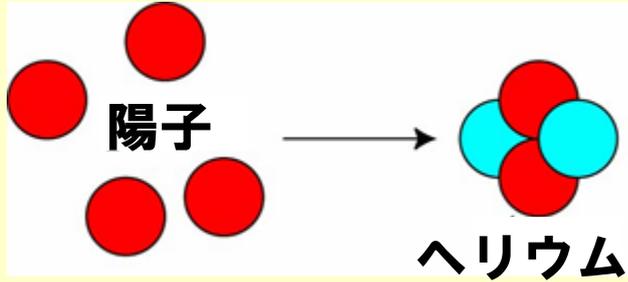


(5)太陽ニュートリノの話

●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

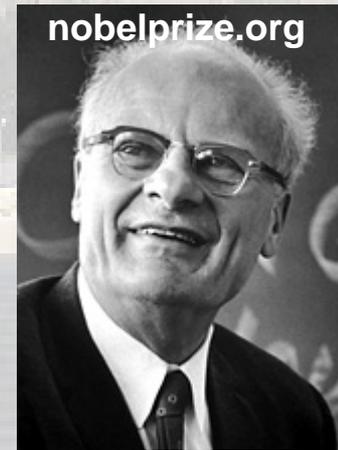


+ 2陽電子 + 2電子ニュートリノ

+ 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

恒星におけるエネルギー発生
の解明



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。



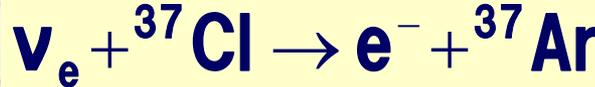
結論から言うと $\nu_e \rightarrow \nu_\mu + \nu_\tau$ の転換により ν_e の量が減っているのが太陽ニュートリノ欠損の原因

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

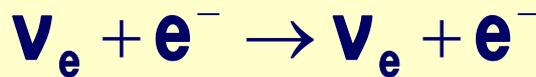


放射化学的測定

$E \geq 0.8\text{MeV}$

Kamiokande (日)

1989年

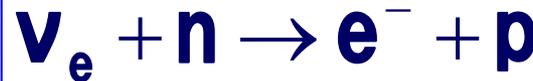


水チェレンコフ

$E > 5\text{MeV}$

Superkamiokande (日)

1998年



と基本的に同じ

GALLEX (伊)

1998年



放射化学的測定

$E \geq 0.2\text{MeV}$

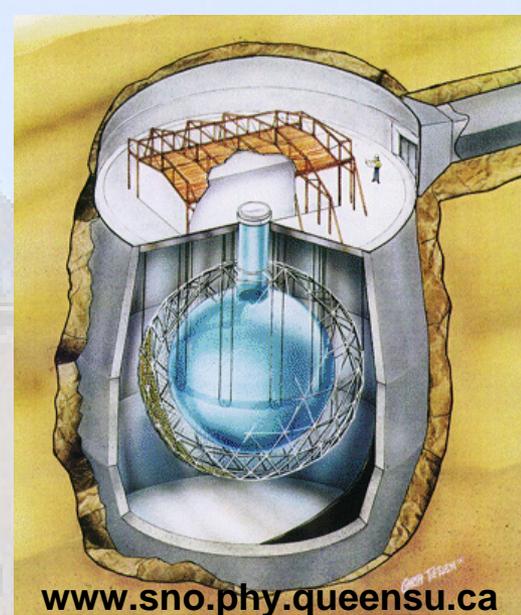
SAGE (露)

1999年

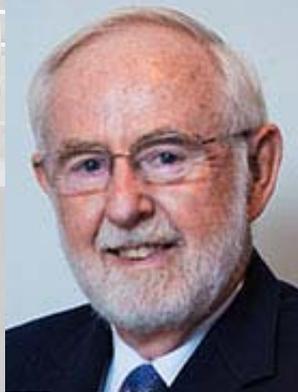
SNO (Sudbury Neutrino Observatory、カナダ オンタリオ州サドベリー市クレイトン鉱山、1999 ～2006)

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(～150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

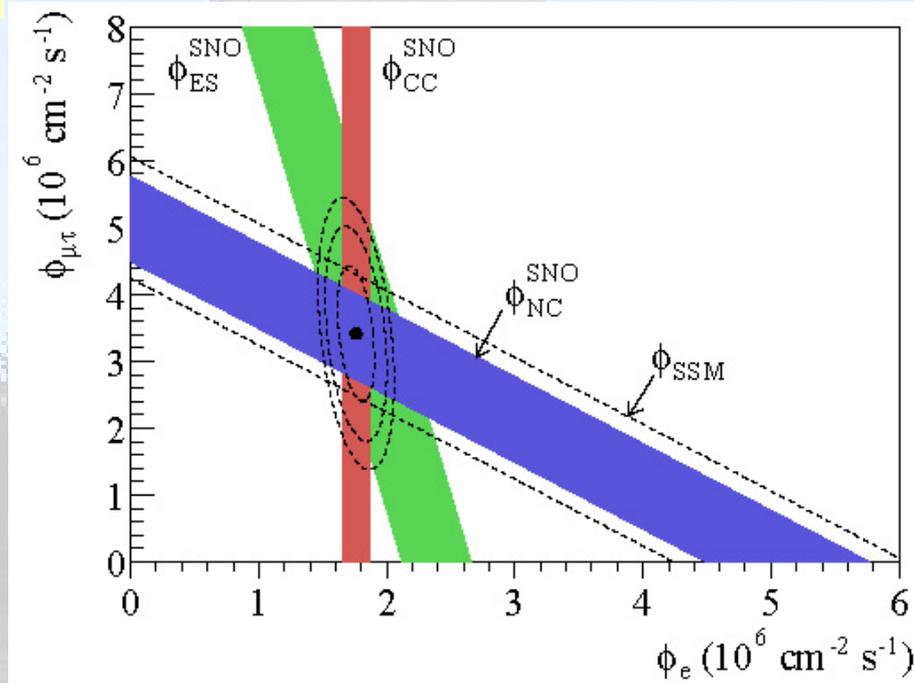
SNOでは次の2つの反応を観測することができる[d=(pn)]:

$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ → 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, μ , τ

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



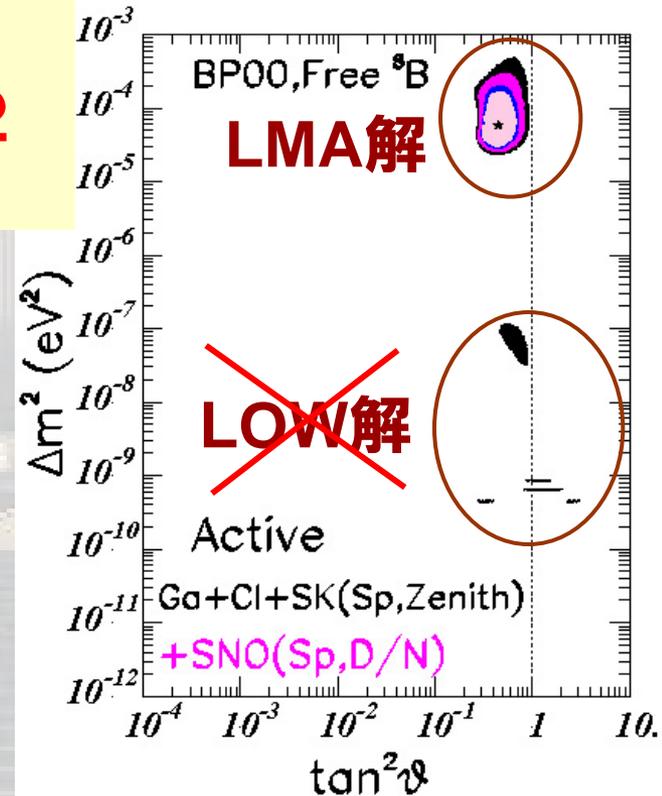
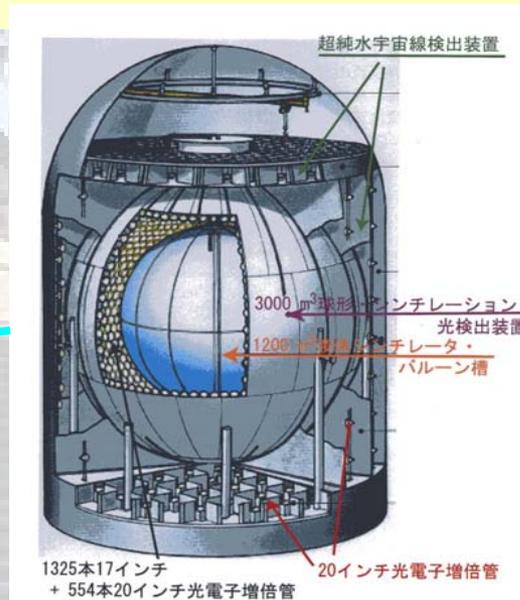
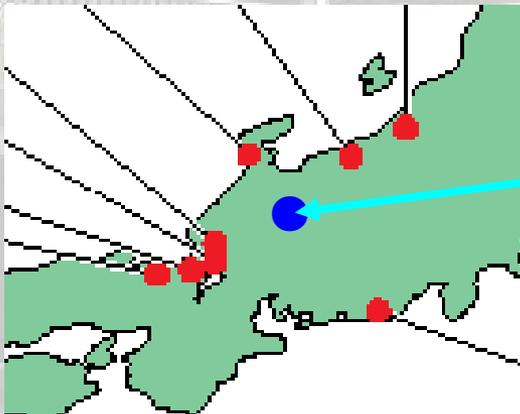
カムランド(原子炉ニュートリノ欠損, 2002 ~)



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)



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・カムランド⇒

$$\Delta m_{\text{太陽}}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; \theta_{\text{太陽}} = \text{約} 30^\circ$$

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

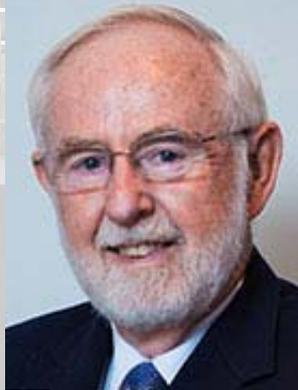
● 大気ニュートリノ⇒

$$|\Delta m_{\text{大気}}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; \theta_{\text{大気}} = \text{約} 45^\circ$$

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

→ 2015年ノーベル賞

nobelprize.org



マクドナルド

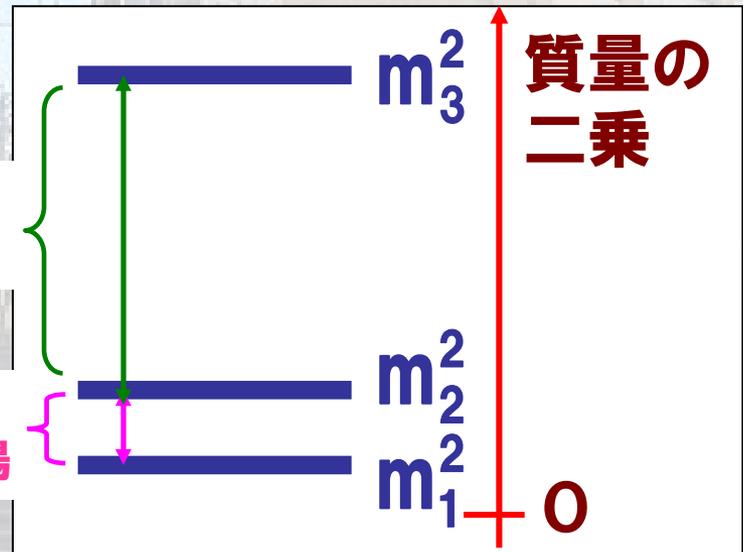
nobelprize.org

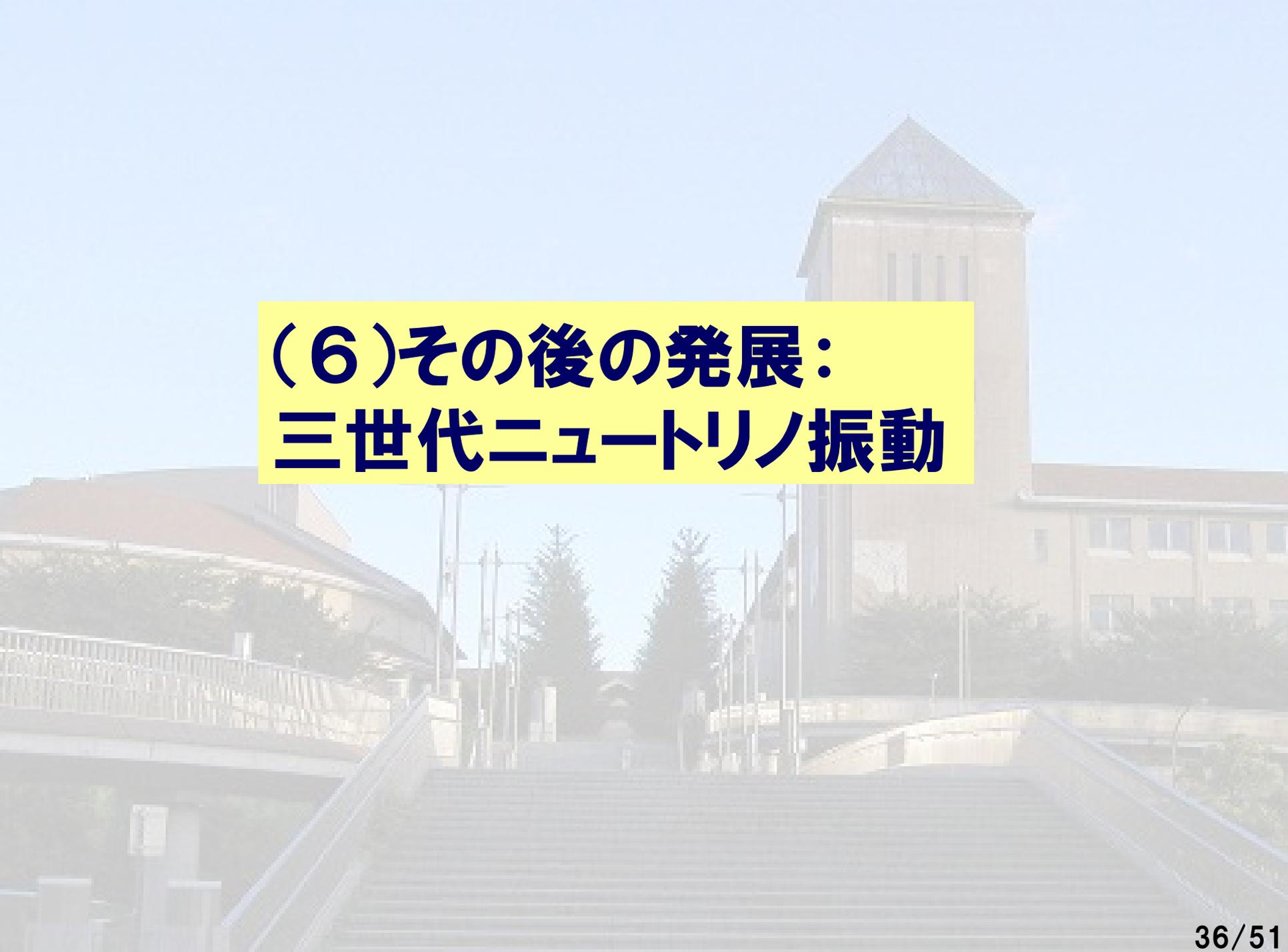


梶田隆章

$$|\Delta m_{\text{大気}}^2|$$

$$\Delta m_{\text{太陽}}^2$$





**(6)その後の発展：
三世代ニュートリノ振動**

ニュートリノの質量と混合

混合行列は**牧・中川・坂田行列**と呼ばれる(4個の変数を含む)

実際にはニュートリノには3世代あるので、3種類の混合となる:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{e2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{e3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\mu1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\mu2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\mu3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\tau1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\tau2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\tau3}\mathbf{v}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1} & \mathbf{U}_{e2} & \mathbf{U}_{e3} \\ \mathbf{U}_{\mu1} & \mathbf{U}_{\mu2} & \mathbf{U}_{\mu3} \\ \mathbf{U}_{\tau1} & \mathbf{U}_{\tau2} & \mathbf{U}_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

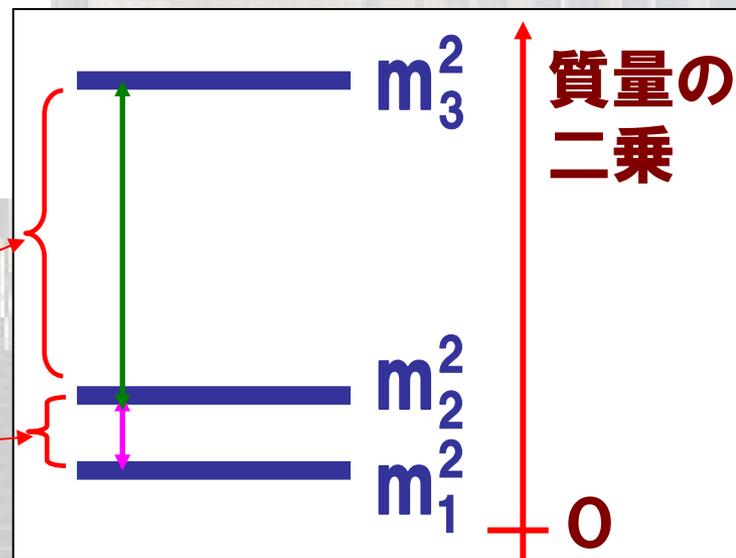
3状態を導入して議論するので、確率は複雑になる

牧・中川・坂田行列の4個の変数:

$\theta_{12} = \theta_{\text{太陽}}$, $\theta_{23} = \theta_{\text{大気}}$, θ_{13} : 3つの混合角

δ : CP非保存の位相

最終的に求めるものは**牧・中川・坂田行列**の変数4個と質量二乗差2個



[注] 複素数の位相に関する若干の説明

- 実数とは二乗するとゼロ又は正となる数：(例) $(-1)^2 = (-1) \times (-1) = +1 > 0$

- 虚数とは二乗すると負になる数

(定義)：(例) $i^2 = i \times i = -1 < 0$

- 複素数は実数と虚数をあわせた数全体： $z = a + b i$ (a, b は実数で、それぞれ $a = \text{Re}(z)$, $b = \text{Im}(z)$ と書き、 z の実部(real)、 z の虚部(imaginary)と呼ぶ)

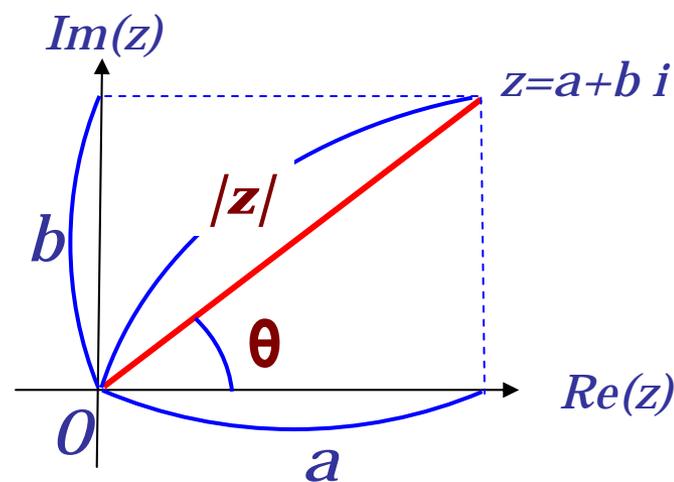
- $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ を複素数 z の絶対値、

$\tan\theta = b/a$ を複素数 z の偏角(物理では位相とも)と呼ぶ

- 複素数の極形式：

$$z = r e^{i\theta} = r(\cos\theta + i \sin\theta) = a + b i$$

複素平面と呼ばれる図



ニュートリノに対するCPの破れ

CP非保存位相 δ が $\delta \neq 0$ の時、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ の確率と $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率が異なることが知られている

➡ $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$ の起こる確率を測定して比較

➡ どちらの確率も小さいので、その差はさらに小さく、実験は困難を極める

➡ ビームの強度を増強し、測定器のサイズも拡大する

(参考)クォークに対するCPの破れ

小林益川理論の正しさが実験で証明されている→2008年ノーベル賞

nobelprize.org



小林誠

nobelprize.org



益川敏英

CP対称性の性質

CP変換とは、荷電共役C(Charge conjugation)と空間反転P(Parity)を施す変換

CP対称性とは、CP変換に対して理論が不変な性質

CP対称性の破れがあると

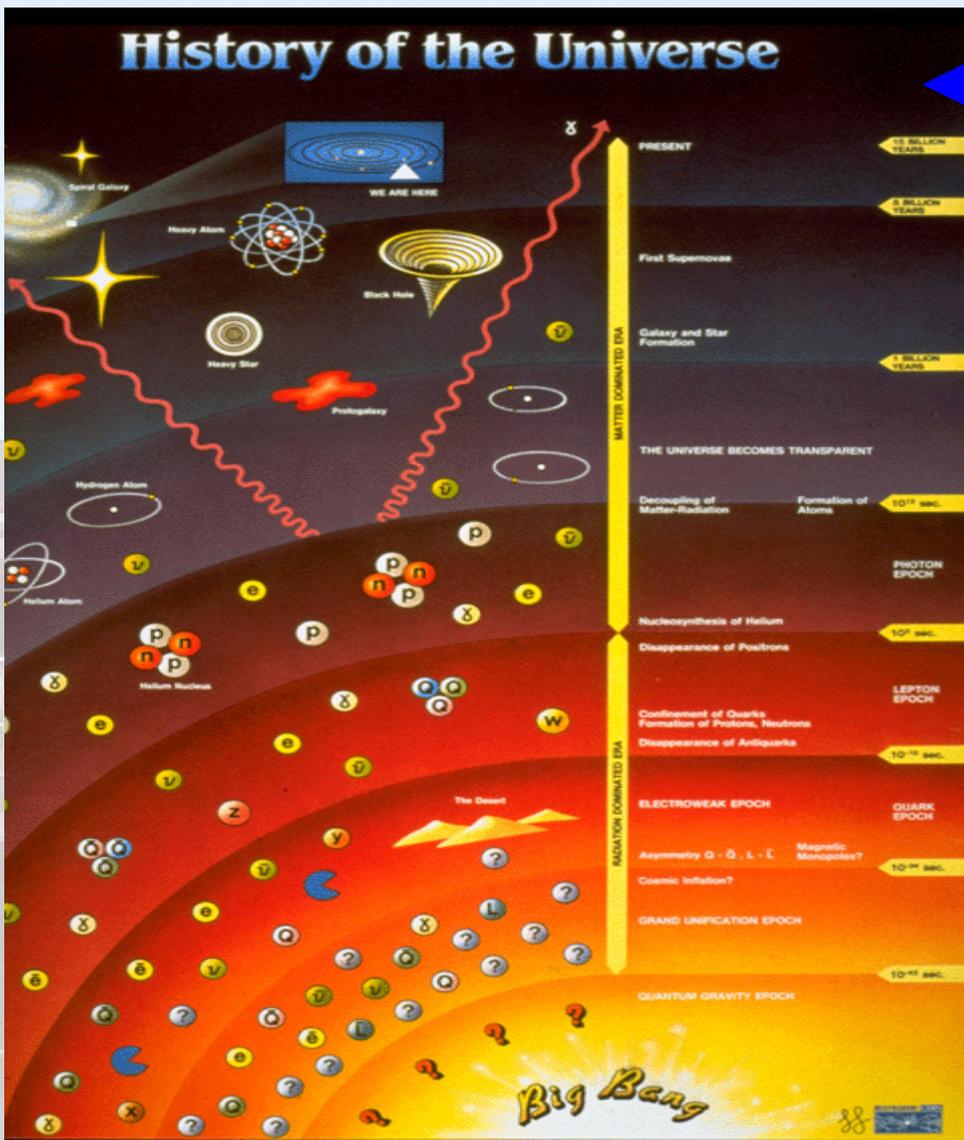
重い粒子 → 軽い粒子 + . . .

重い反粒子 → 軽い反粒子 + . . .

という崩壊反応の**頻度に違いが出る**事が知られており、素粒子物理学では**重要だ**と考えられている

なぜそんなにC P対称性が重要かと言うと

宇宙における物質・反物質の非対称性を宇宙論 + 素粒子論で説明できるかもしれないから



温度 = 3度 (= 摂氏 -270度)
現在の宇宙は**粒子(物質)の世界**であることが知られている

宇宙が膨張し、宇宙の温度が下がる

ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が作られたに違いない！

温度 = 10^{32} 度
宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた
→物質・反物質は同数だけあるはず

宇宙はビッグバンで誕生した

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} : の測定

- 短基線原子炉ニュートリノ欠損 Double-CHOOZ(仏,2011), (L=約2km) Daya Bay(中,2012), Reno(韓,2012)

θ_{13} の測定 → $\theta_{13} = \text{約}9^\circ$

T2K (Tokai To Kamioka; 2009~、加速器ニュートリノ欠損)

● 第一段階 (2009年~)

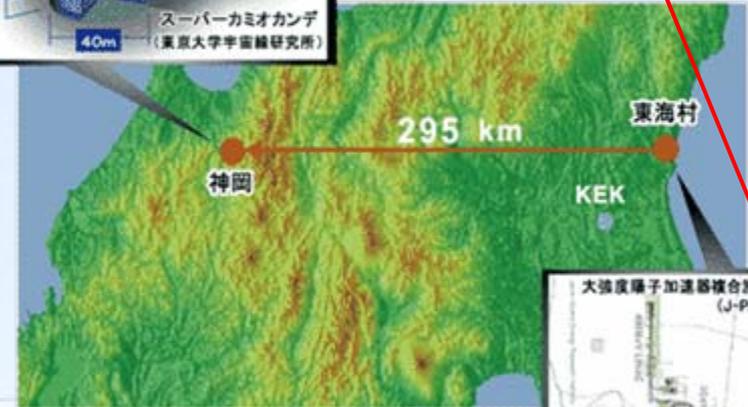
0.75MWのニュートリノビーム (JPARC)
⇒ SK (K2Kの50倍)

● K2Kの拡張版(イベント数を50倍にして精密実験)

● 牧・中川・坂田行列の未知の混合角 θ_{13} の値を測る



大強度陽子加速器複合施設 (J-PARC)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ の発見

結果発表: 2011年6月15日

バックグラウンド1.5事象が期待される所に6事象が観測された
→ $\theta_{13} \neq 0$ の最初の兆候

t2k-experiment.org

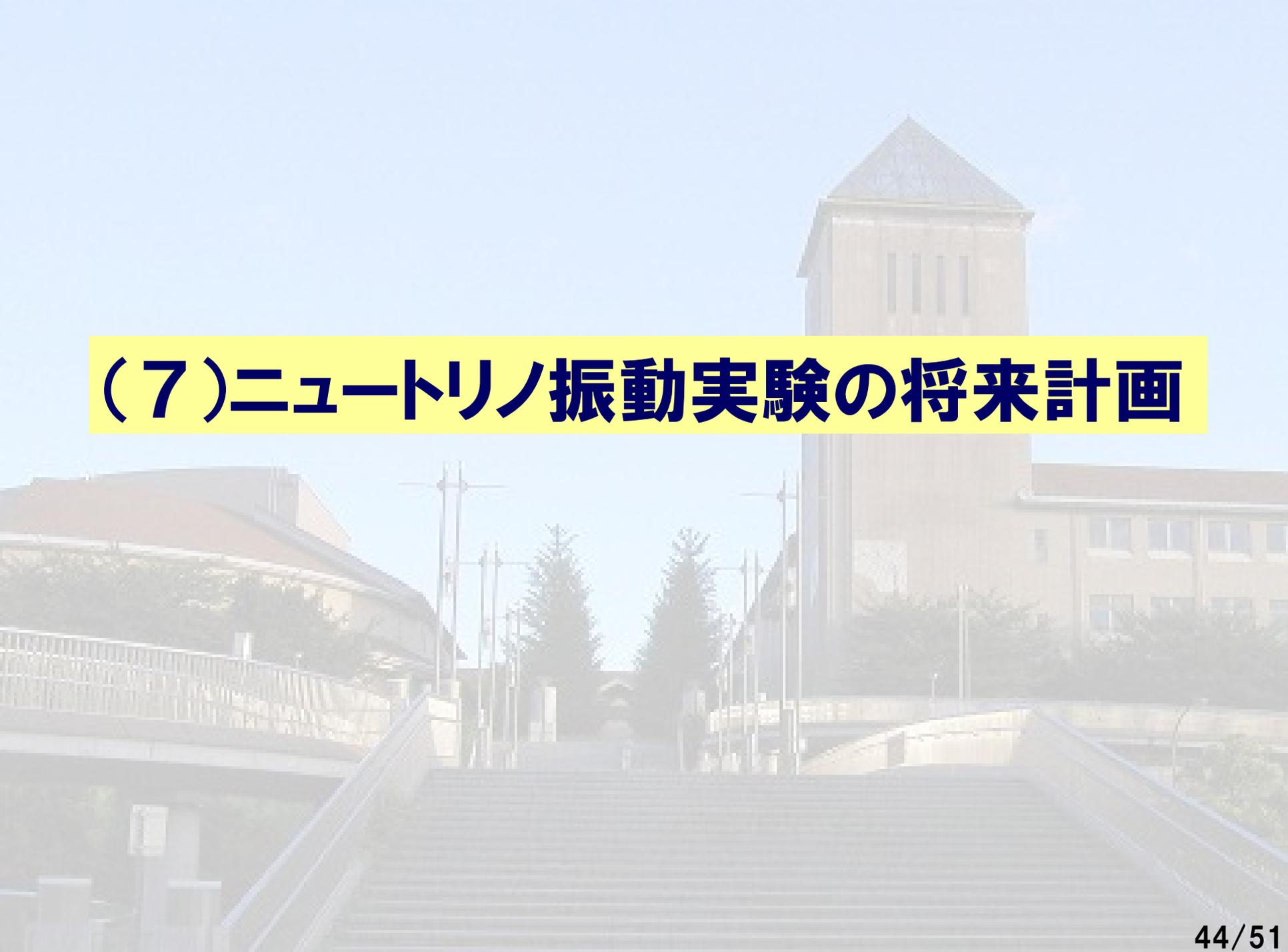
www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp



小林隆



中家剛



(7)ニュートリノ振動実験の将来計画

日本の将来計画:T2HK

t2k-
experiment.org

www-
he.scphys.ky
oto-u.ac.jp



小林隆



中家剛

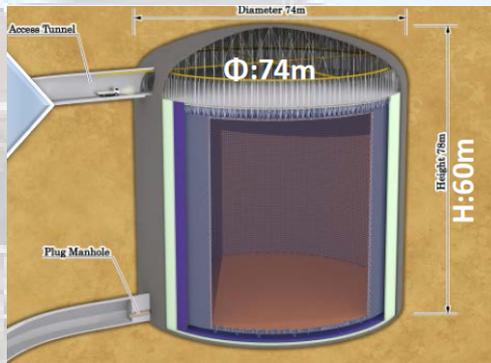
●第二段階 (2025(?)年~)

0.75MWのニュートリノビーム⇒ハイパーカミオカンデ
ビーム強度の増強

測定器サイズの拡大

●T2Kの拡張版(事象数を増加させて精密実験)

●CP非保存位相の δ を測る



Hyper-kamiokande



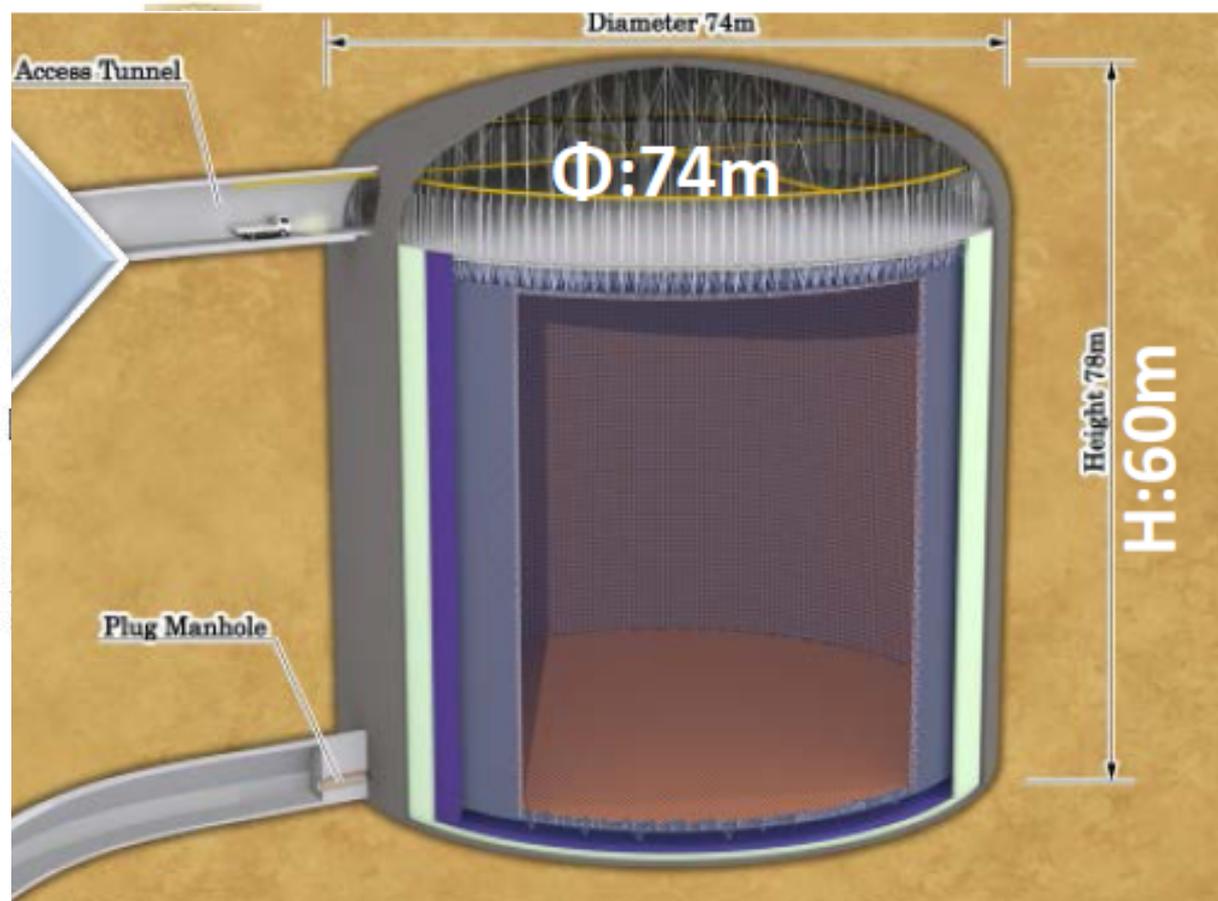
T2HK

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

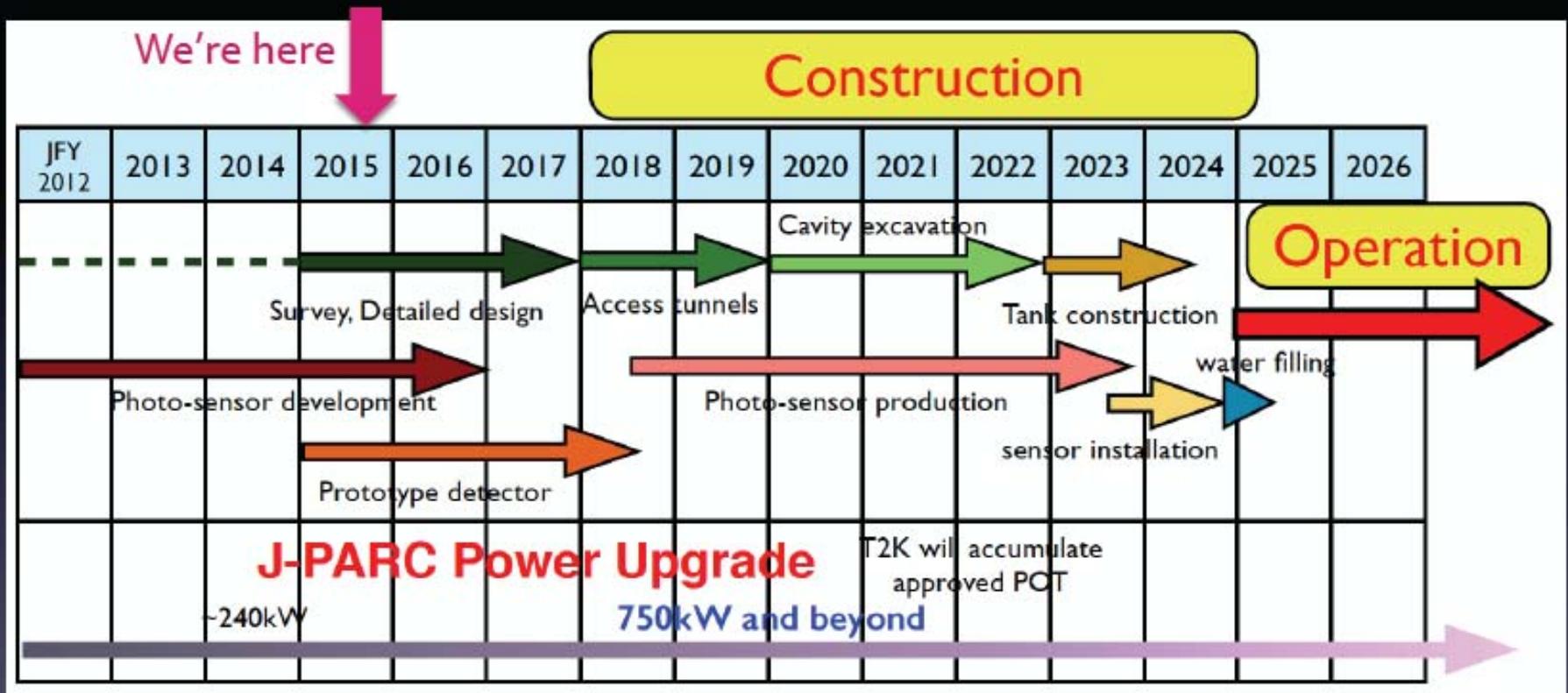


ハイパーカミオカンデ (0.5Mt=SKx10, 2025(?)-)

- ニュートリノ振動の精密測定
- 核子崩壊のさらなる探求
- 超新星ニュートリノの精密測定 (もし超新星爆発があった場合)



ハイパーカミオカンデの工程予定表



- 2016 Start making the detailed design
- 2018 Start the excavation
- 2025 Start the operation

アメリカの次期計画: DUNE

$E \sim 2\text{GeV}$, $L \sim 1300\text{km}$

- 2.3MWの強力ニュートリノビーム
- 40kt 液体アルゴン測定器



cam.ac.uk

トムソン

naturwissenschaften.ch



ルビア

SANFORD LAB

マウントラッシュモア

FERMILAB

South Dakota

North Dakota

Minnesota

Wisconsin

Nebraska

Iowa

Illinois

(Proposed)

Deep Underground Neutrino Experiment

Sanford Underground
Research Facility
Lead, South Dakota

フェルミ研究所(イリノイ州)→サンフォード地下研究施設(サウスダコタ州)

Fermilab
Batavia, Illinois

20 miles

800 miles

wikipedia.org



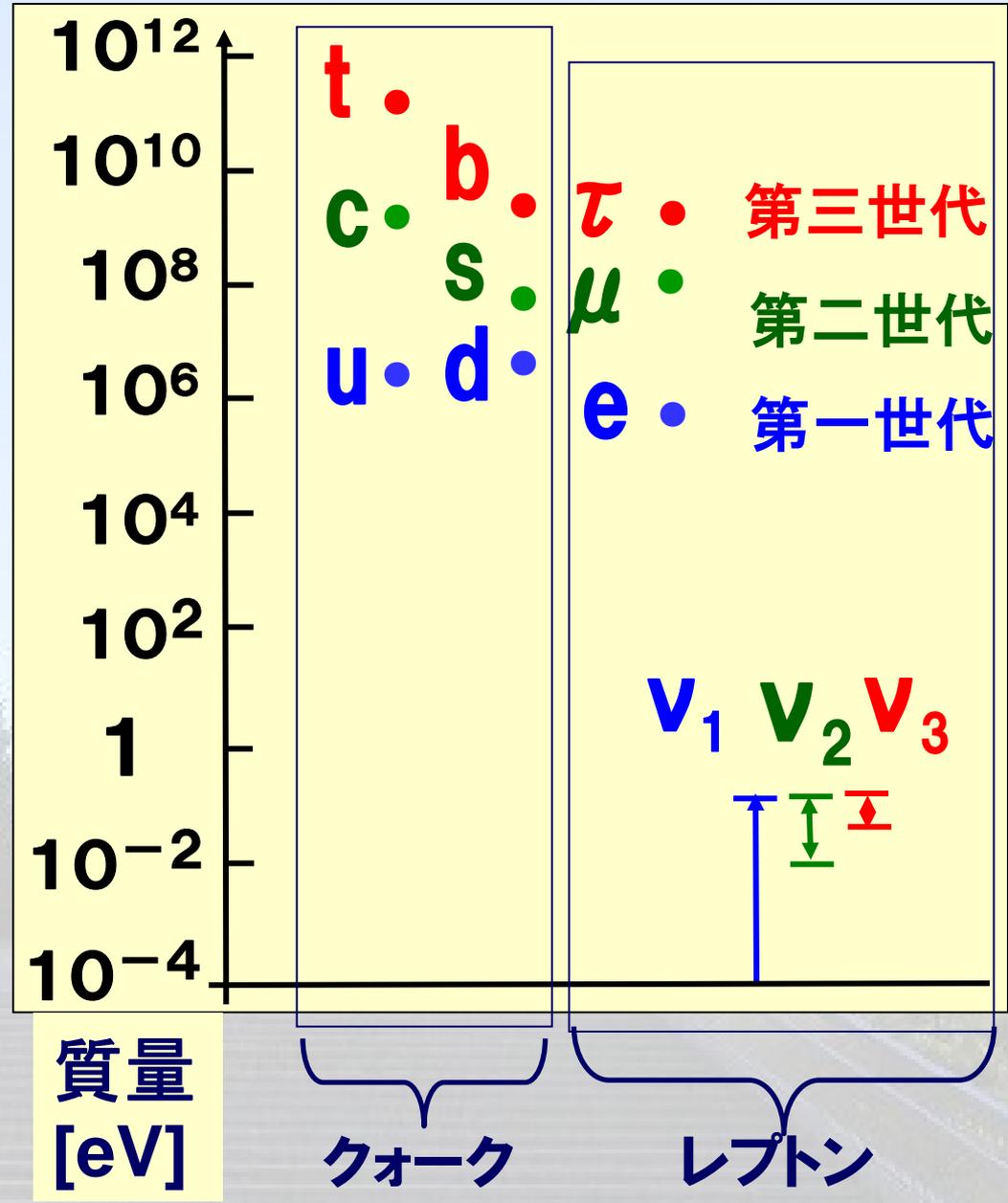
DUNEの工程予定表(2026(?)-)

Timeline



まとめ: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、その発見は**標準模型を超える物理**を探る鍵を与える
- 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
- 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** は約10年後には決定される見込み→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



■梶田隆章先生特別公開講演会のご案内

■タイトル:ニュートリノと重力波で探る宇宙の謎

■日時:開催日時:

12月11日(月) 16:00~17:15 (開場15:00)

■場所:首都大学東京南大沢キャンパス 講堂大ホール
(京王相模原線南大沢駅より徒歩5分)

※駐車場はございません

■申込み:不要。どなたでも参加
いただけます。

(入場無料、先着1,000名)

■お問い合わせ:

理工学研究科物理事務

kouenkai@phys.se.tmu.ac.jp

■主催:首都大学東京大学院理工学研究科
平成29年度首都大学東京理工学研究科
教育改革推進事業(理工GP)

特 別 講 演 会

2015年度 ノーベル物理学賞受賞

梶田 隆章 先生

ニュートリノと
重力波で探る
宇宙の謎

www.tmu.ac.jp

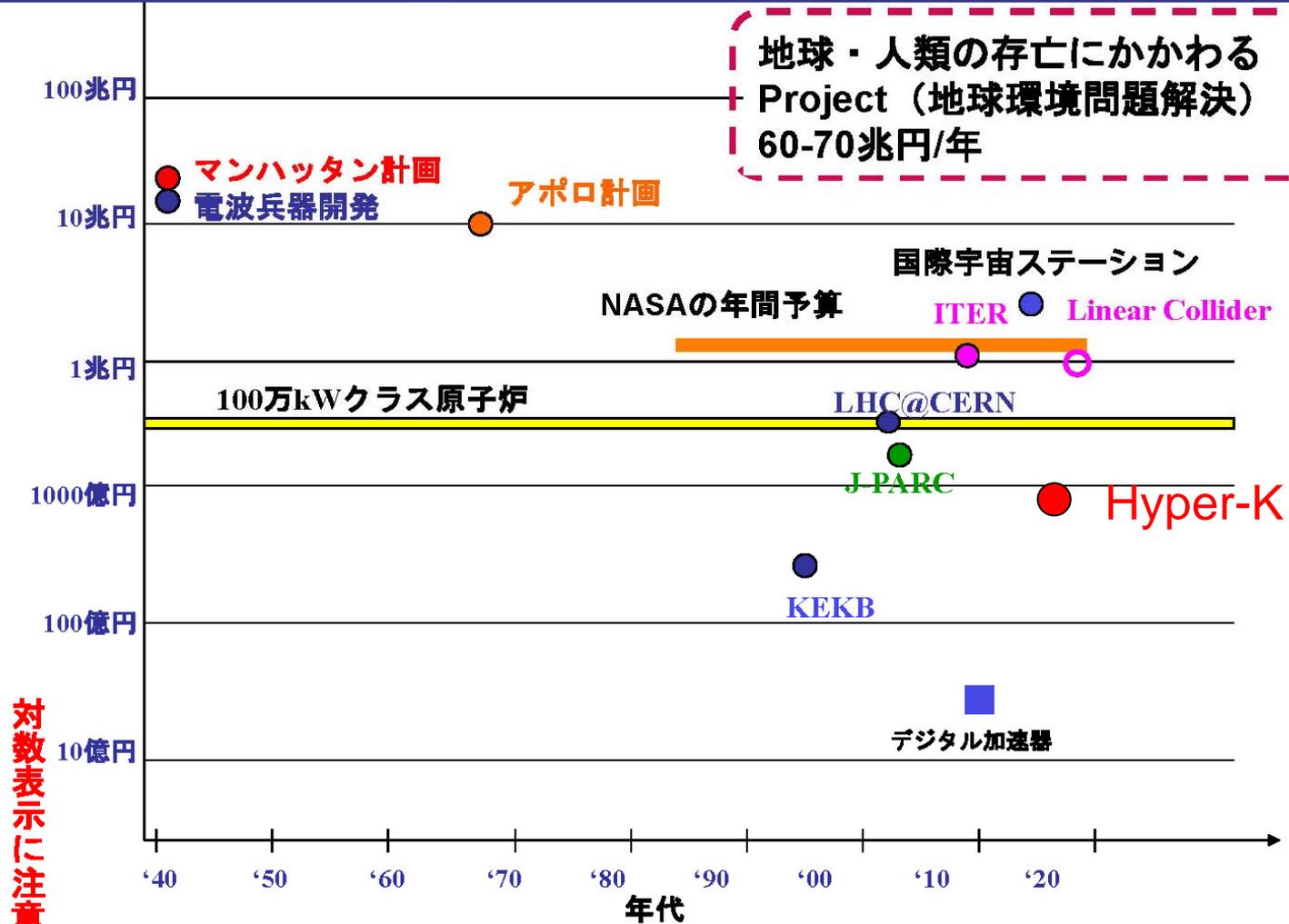




Backup slides

高エネルギー物理学は巨大科学となっている

近代のBig Science & 国家事業の比較



KEK高山健先生2009年公開講座より借用したものに加筆

太陽 ν 実験

Ga: Gallex-GNO, SAGE

Cl: Homestake

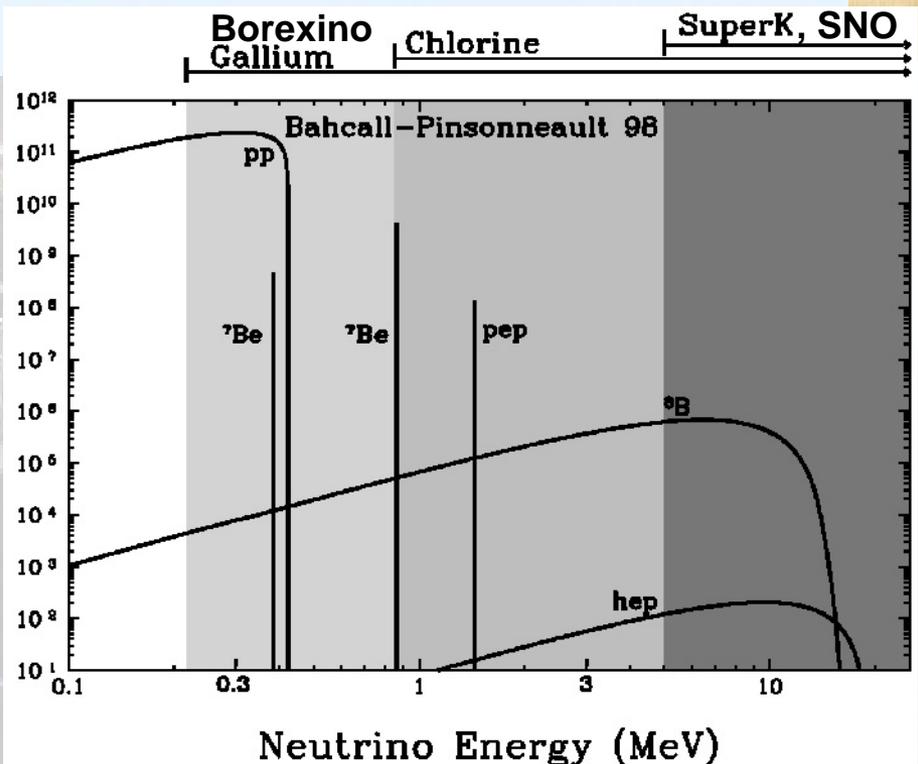
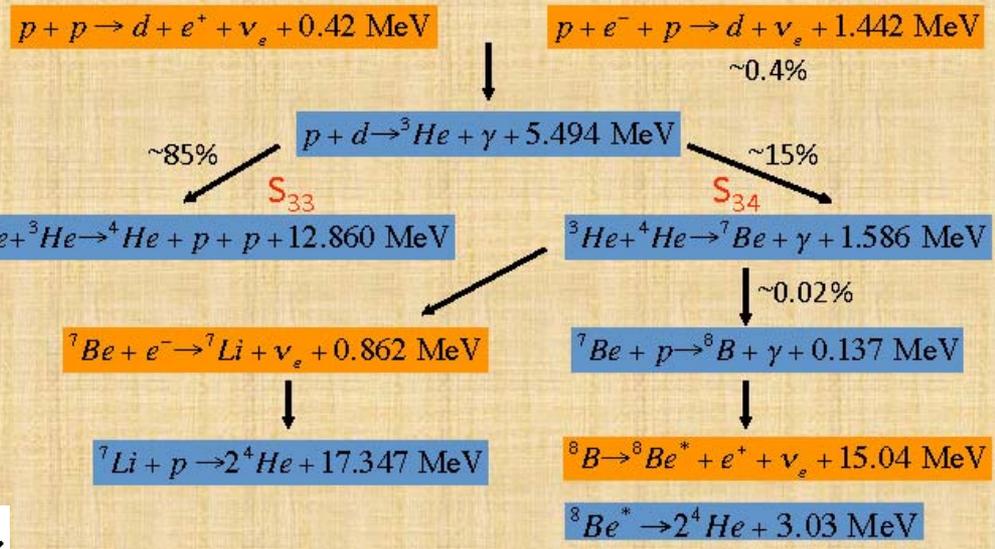
H₂O: Kam, SK

D₂O: SNO

(CH₂)_n: Borexino

稼働中

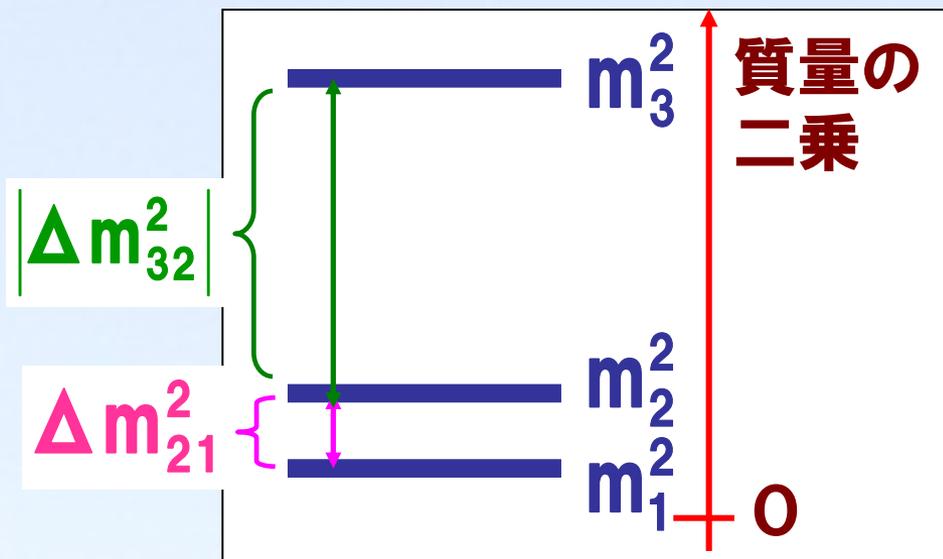
Solar Neutrinos Sources: pp chain



しきい値の異なる太陽νの諸実験の結果からΔm²とsin²2θの情報が得られる

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種類の間での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

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

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

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