

首都大学オープンユニバーシティ

2017年6月3日

ニュートリノ物理学へのいざない

第四回

ニュートリノ研究の将来

このスライドは以下この講義のHPに置いてあります：
<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/ou-2017/>

**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**



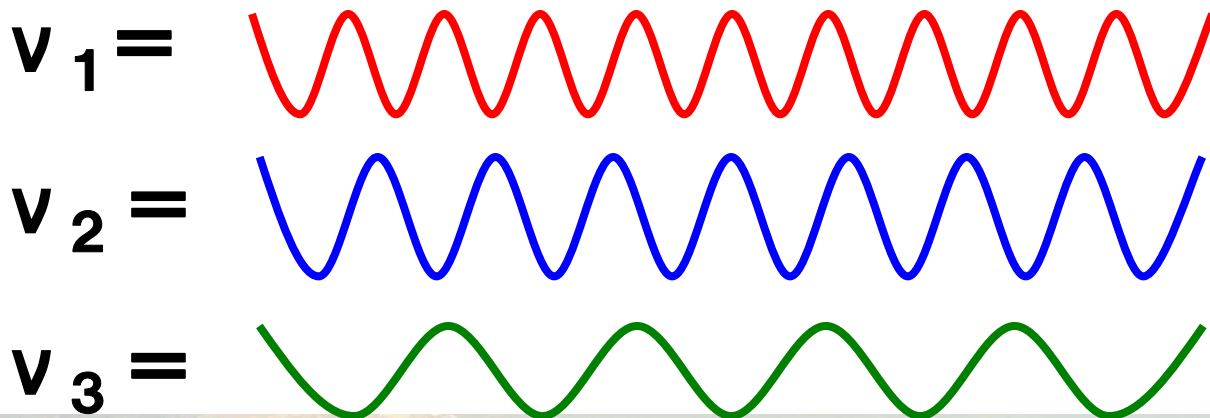


(1) 3世代ニュートリノ混合とCP位相

[復習]ニュートリノの種類の変換(3世代の場合)

実際にはニュートリノには3世代ある→3種類の質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3)が必要

質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3)の波は波長が微妙に異なる:



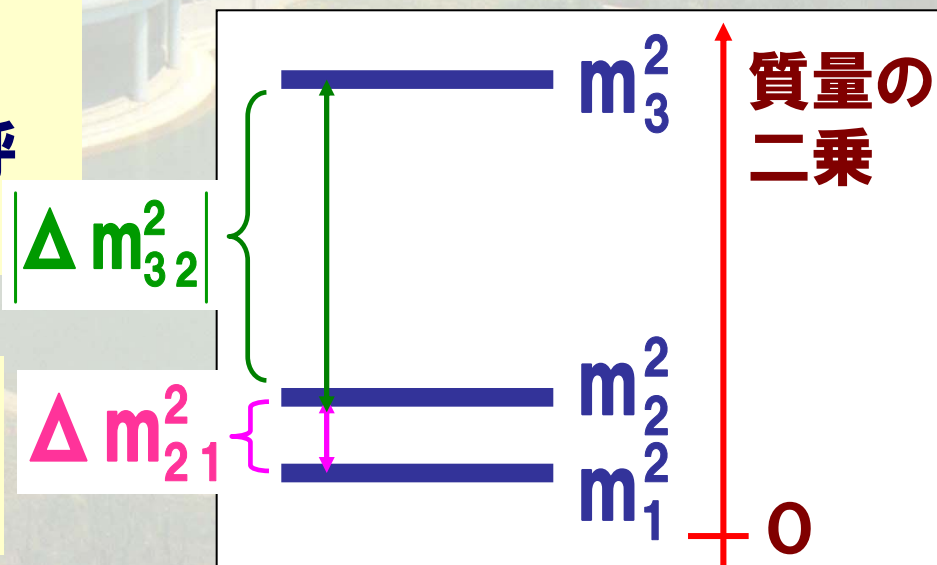
3世代ニュートリノの質量と混合

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3 \\ U_{\mu1}\nu_1 + U_{\mu2}\nu_2 + U_{\mu3}\nu_3 \\ U_{\tau1}\nu_1 + U_{\tau2}\nu_2 + U_{\tau3}\nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

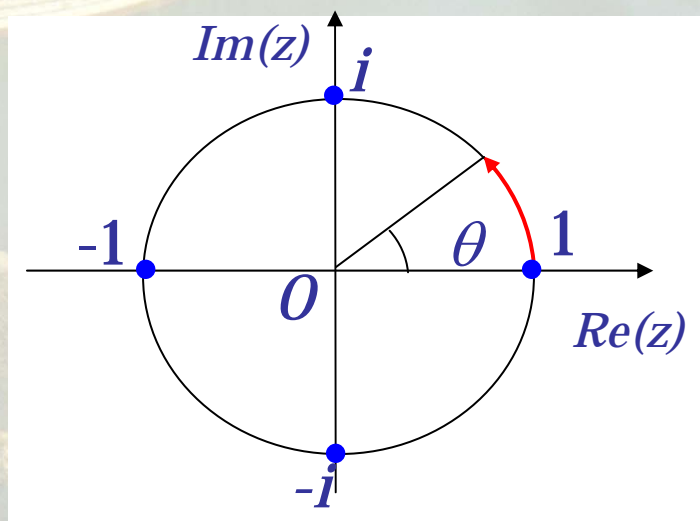
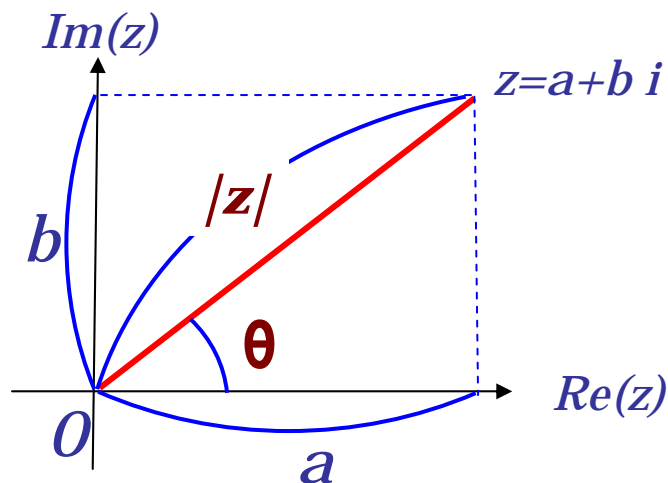
実は牧・中川・坂田行列のパラメータには混合角3個(θ_{12} ; θ_{23} ; θ_{13})の他に**CP非保存の位相 δ** と呼ばれる変数が1個存在する

CP非保存の位相 δ は $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の確率に違いを出す



- 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： $z = a + bi$ (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
- オイラーの公式 $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ が成り立つ
- 複素数の極形式： $z = re^{i\theta} = r(\cos \theta + i \sin \theta) = a + bi$
- $e^{i\theta}$ をかけることは偏角を変えることに相当し、**複素平面内の回転に相当**

複素平面と呼ばれる図



[復習]これ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⇒

$$\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; \theta_{12} \cong 30^\circ$$

が決定された

- 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; \theta_{23} \cong 45^\circ$$

が決定された

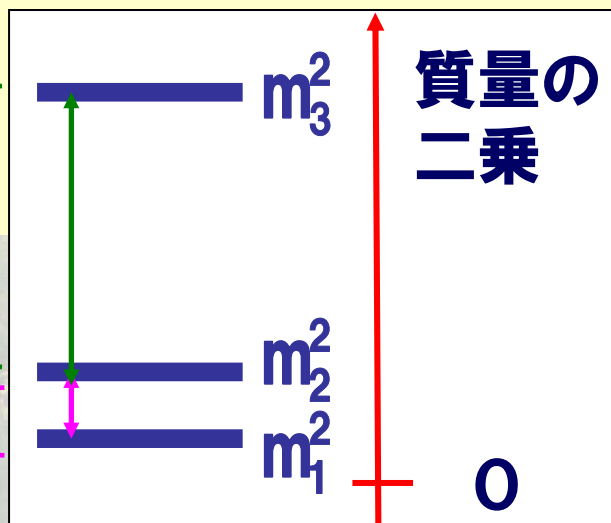
- 加速器ニュートリノ・短基線原子炉ニュートリノ欠損⇒

$$\theta_{13} \cong 9^\circ$$

が決定された

$$|\Delta m_{32}^2|$$

$$\Delta m_{21}^2$$



nobelprize.org



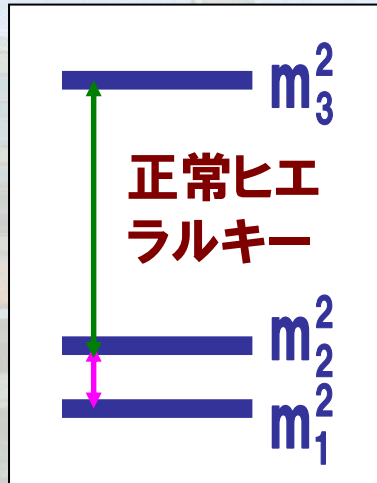
マクドナルド

nobelprize.org

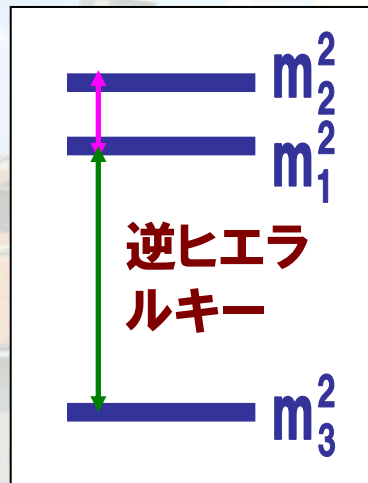


梶田隆章

ニュートリノ振動実験の今後の課題



又は



$$\Delta m_{32}^2 > 0$$

$$\Delta m_{32}^2 < 0$$

$$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$$

質量のパターンは現在の所、左図のどちらの可能性も残っている

現時点で未定なものは

- 質量パターン
- CP非保存位相 δ

特に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(後述)

● 物質効果による質量パターンの区別(1)

三世代の場合の真空中の振動確率

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \\ P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \end{array} \right\} = \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta E_{32} L}{2} \right)$$

$$\Delta E_{32} \equiv \Delta m_{32}^2 / 2E \equiv (m_3^2 - m_2^2) / 2E$$

三世代の場合の物質中の振動確率: ν は(-)、反 ν は(+)

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \\ P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \end{array} \right\} = \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\tilde{\theta}_{13}^{(\mp)} \sin^2 \left(\frac{\Delta \tilde{E}_{32}^{(\mp)} L}{2} \right)$$

$$\Delta \tilde{E}_{32}^{(\pm)} \equiv \sqrt{(\Delta E_{32} \cos 2\theta_{13} \pm A)^2 + (\Delta E_{32} \sin 2\theta_{13})^2}$$

$$\tan 2\tilde{\theta}_{13}^{(\pm)} \equiv \frac{\Delta E_{32} \sin 2\theta_{13}}{\Delta E_{32} \cos 2\theta_{13} \pm A}$$

$$A = (\rho / 3 \text{gcm}^{-3}) 10^{-13} \text{eV};$$

ρ =物質密度

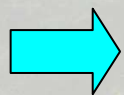
● 物質効果による質量パターンの区別(2)

$$\tan 2\tilde{\theta}_{13}^{(\pm)} \equiv \frac{\Delta E_{32} \sin 2\theta_{13}}{\Delta E_{32} \cos 2\theta_{13} \pm A}$$

ニュートリノは(-)、
反ニュートリノは(+)

物質中の実質的な混合角 $\tilde{\theta}_{13}$ の振る舞い

	正常ヒエラルキー $\Delta E_{32} > 0$	逆ヒエラルキー $\Delta E_{32} < 0$
ニュートリノ(-)	$\tilde{\theta}_{13}$ 増大	$\tilde{\theta}_{13}$ 減少
反ニュートリノ(+)	$\tilde{\theta}_{13}$ 減少	$\tilde{\theta}_{13}$ 増大



物質効果によりどちらの質量パターンかがわかる

An aerial photograph of a modern university campus. The central focus is a large, semi-circular building with a white facade and a curved portico supported by columns, situated on a slight rise overlooking a large, irregularly shaped pond. The pond is surrounded by greenery and a winding path. In the background, several other multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered white clouds.

(2)CPの破れ

素粒子物理学に現れる対称性

- 対称性とは何かの変換をして状態が変わらない性質
- 不連続な変換：

空間反転 (Parity transformation)

$$x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$$

荷電共役 (Charge conjugation)

粒子→反粒子

時間反転 (Time reversal)

$$t \rightarrow -t$$

CP対称性の性質

CP変換とは、荷電共役Cと空間反転P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

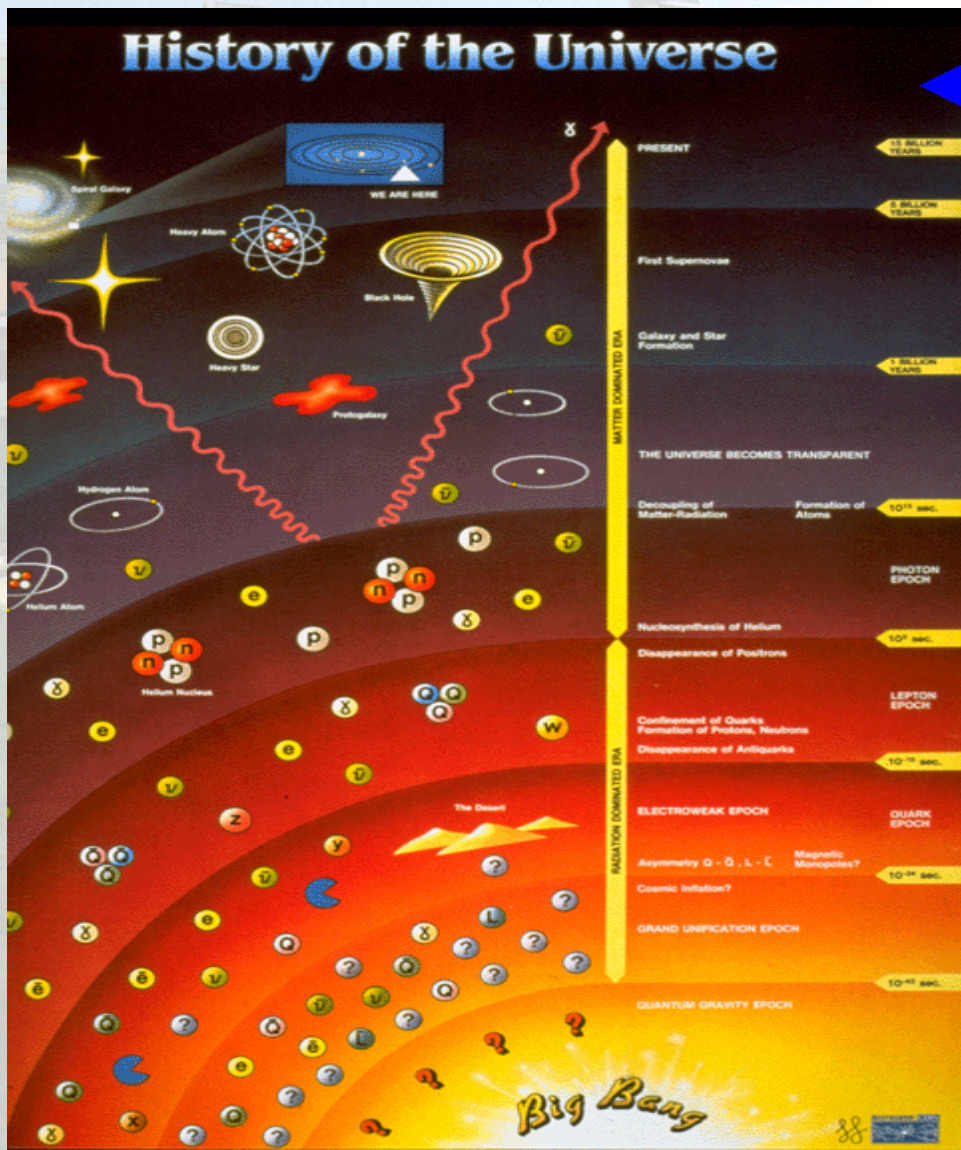
重い粒子 \rightarrow 軽い粒子 + . . .

重い反粒子 \rightarrow 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

●宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた(光子も同じ数だけあった)はず

→粒子と反粒子の対消滅がなかったら、現在の宇宙全体の光子・粒子・反粒子の数はおおざっぱに見積もると、次のようになっているはず:

光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$



光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87} + 10^{78}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$

●ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が微量だけ作られたとする:

●さらに、粒子と反粒子の対消滅が可能な限り起こったとする:

光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87} + 10^{78}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$

 およそ 光子 $10^{87} +$ 物質 10^{78}



●すると、物質(バリオン)と光子の比は 10^{-9} となり、観測値と合いそう:

物質と反物質間のほんのわずかなズレ

$$\frac{N - \bar{N}}{N_\gamma} = \frac{N - \bar{N}}{N + \bar{N}} = \frac{10^{87} + 10^{78} - 10^{87}}{10^{87} + 10^{78} + 10^{87}} = 10^{-9}$$

物質世界が出来る条件

1967年 サハロフ

粒子の世界が出来るための3条件

- 1) バリオン数非保存の相互作用がある(標準模型にはない)
(例えば陽子 \rightarrow 陽電子 $+$ π^0 (陽子崩壊と呼ばれる))
- 2) C対称性・CP対称性がともに破れている
(粒子と反粒子の世界で相互作用に違いがある)
- 3) 非平衡
(出来たバリオン数が残るために必要)



サハロフ

→ 宇宙における物質・反物質の非対称性の議論にはCP対称性の破れの研究が重要

→ クォークに対するCPの破れはB中間子の実験で研究されているが、レプトンに対しては未知

→ ニュートリノに対するCPの破れの研究がニュートリノ研究の最重要課題

ニュートリノに対するCPの破れ

CP非保存位相が $\delta \neq 0$ の時、 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ の確率と $\overline{\nu}_\alpha \rightarrow \overline{\nu}_\beta$ の確率が異なることが知られている

- ➡ 現実的な加速器ニュートリノビームは ν_μ と $\overline{\nu}_\mu$ のみ
- ➡ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\overline{\nu}_\mu \rightarrow \overline{\nu}_e$ 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

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond surrounded by a paved walkway and greenery. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow banner with black text is overlaid on the middle of the image.

(3)ニュートリノ実験の次期計画

日本の将来計画:T2HK

●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



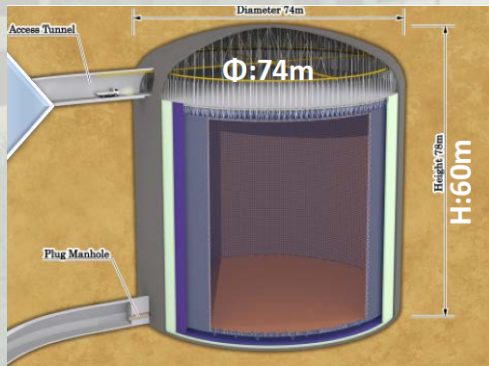
小林隆



中家剛

●T2Kの拡張版(事象数を増加させて精密実験)

●CPの破れ δ を測る



Hyper-kamiokande



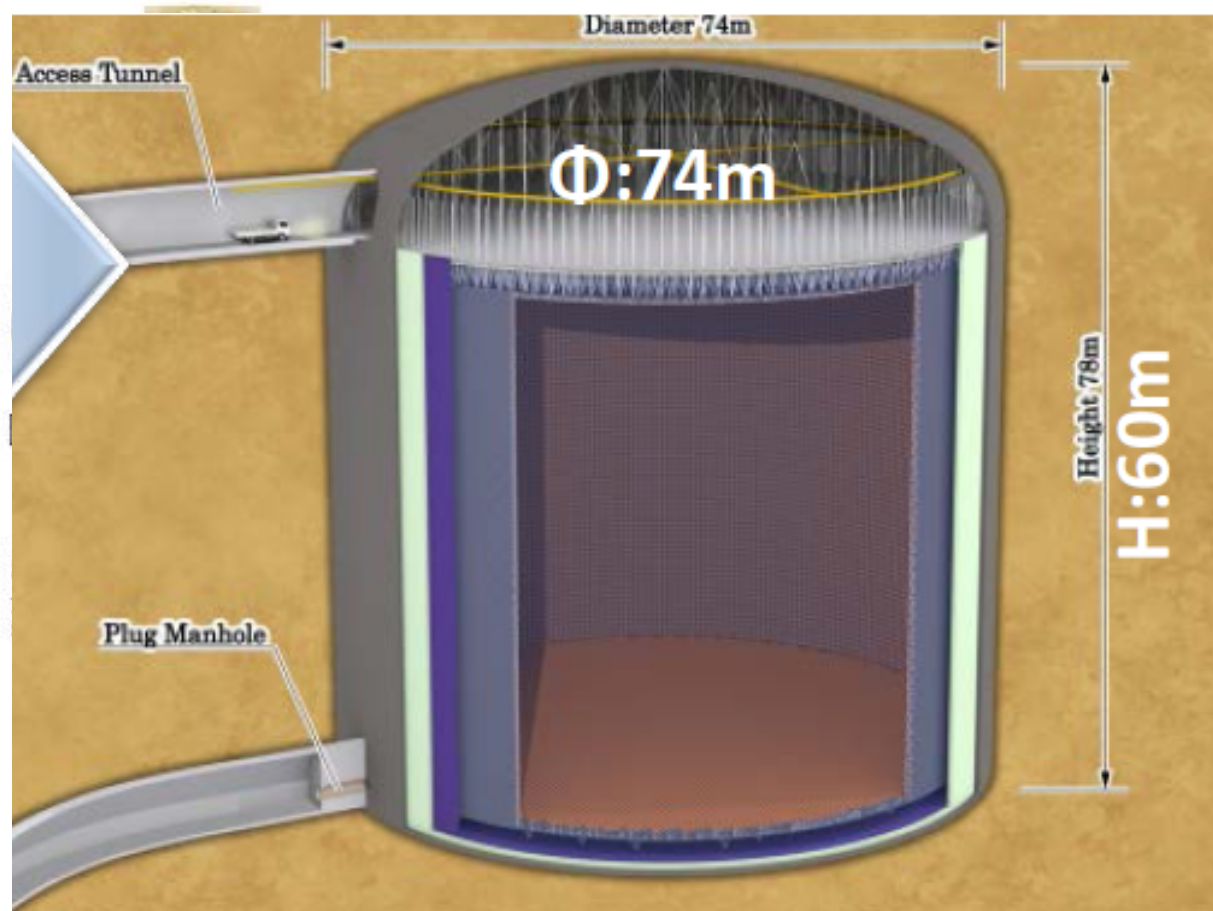
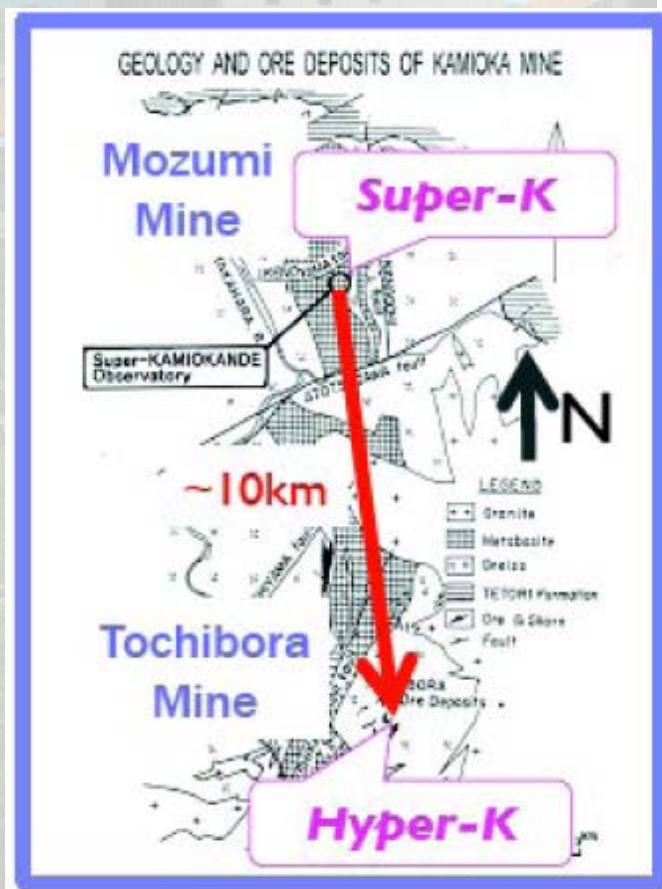
T2HK

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

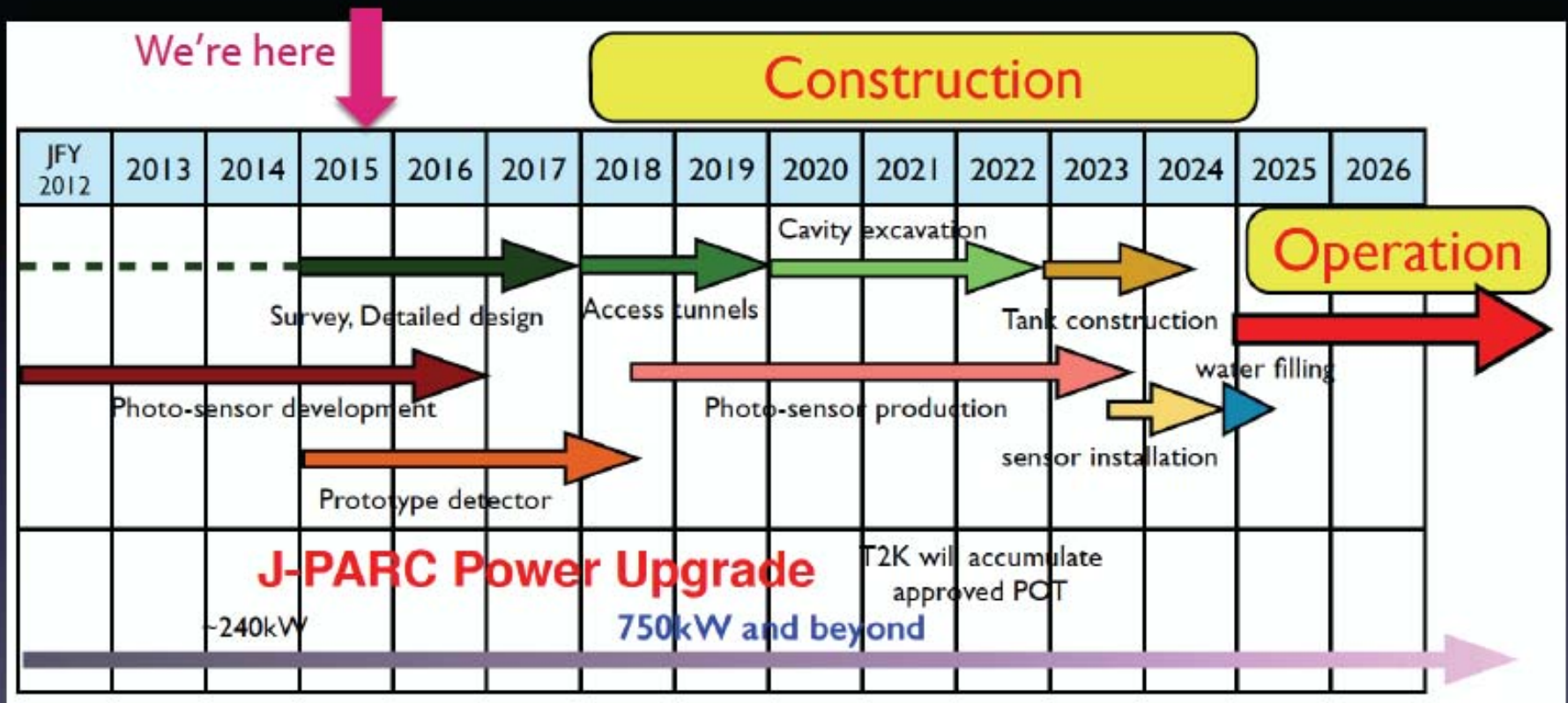


ハイパーカミオカンデ ($H_2O:0.5Mt=SK \times 10$, 2025(?) -)

- ニュートリノ振動の精密測定
- 陽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



ブラッチャー



トムソン



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




DUNEの工程予定表(2025(?)-)

LBNF/DUNE SCHEDULE

Year	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
LBNF										
PIP II (1.2 MW)	█	█	█	█	█					
PIP III (2.4 MW)			█	█	█	█	█	█	█	█
LBNF										
Excavation, construction commissioning	█	█	█	█	█					
First 10kT module complete		█								
Full 40kT fiducial mass					█					

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
█	█	█	█						
		█	█	█	█	█	█	█	█
█	█	█	█						
	█								
			█						

An aerial photograph of a university campus. In the center, there is a large, irregularly shaped pond. Surrounding the pond are several modern, multi-story buildings with light-colored facades and red-tiled roofs. The campus is surrounded by greenery and trees. The sky is blue with some clouds.

(4)ニュートリノと宇宙

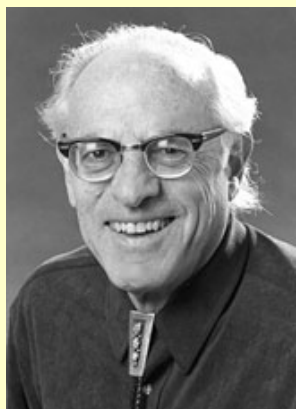
●超新星ニュートリノの観測

1987年に観測された超新星爆発によるニュートリノ:
距離=16万光年

超新星爆発によるニュートリノの観測 (1987年)

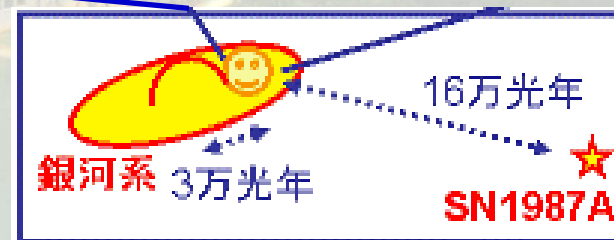


小柴昌俊



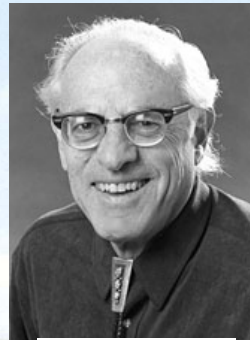
ライネス

カミオカンデ、IMB、他



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

- 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)

[注] 星の進化（質量が太陽の8倍以上の時）

星間物質

星間物質が重力による収縮で星が誕生

中性子星

ブラックホール



水素

水素が核融合によりヘリウムを生成（一生の9割）



ヘリウム

重力収縮と中性子の縮退圧により衝撃波が出来て超新星爆発→ニュートリノのみが放出

核融合により炭素・酸素を生成（一生の1割）

中性子は一つの状態に一個しか入れない性質を持ち、詰め込む力には反作用が生じる

IMB・Kamが観測した超新星は地球から16万光年離れた所（1987年2月）

炭素・酸素

核融合により酸素・ネオン・マグネシウムを生成

核融合により鉄を生成

酸素・ネオン・マグネシウム

鉄

ケイ素

● 高エネルギー宇宙ニュートリノの観測

● 活動銀河核(Active Galactic Nuclei)

ブラックホールにガス等が落ち込んでゆく時の余分なエネルギーがジェットと呼ばれる高エネルギー粒子の加速に使われていると予想されている



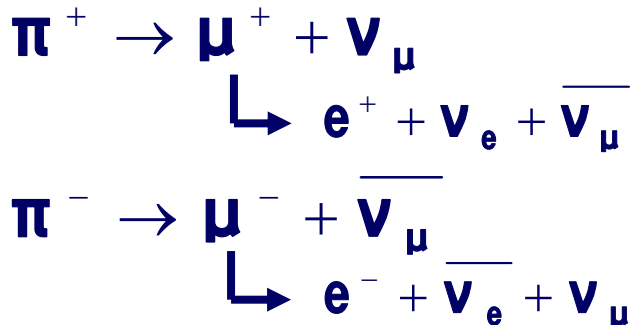
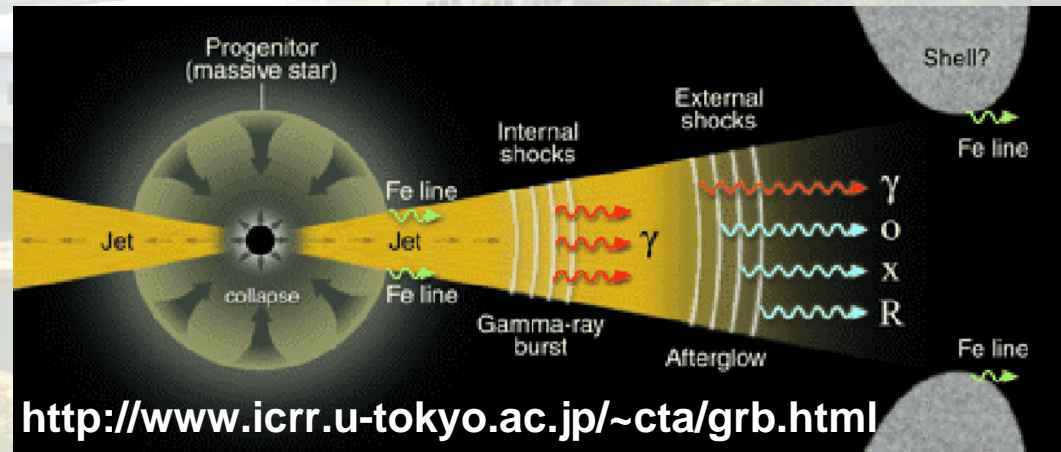
● ガンマ線バースト(Gamma Ray Burst)

宇宙最大の爆発現象

極超新星爆発？

中性子星の衝突？

中性子星とブラックホールの衝突？



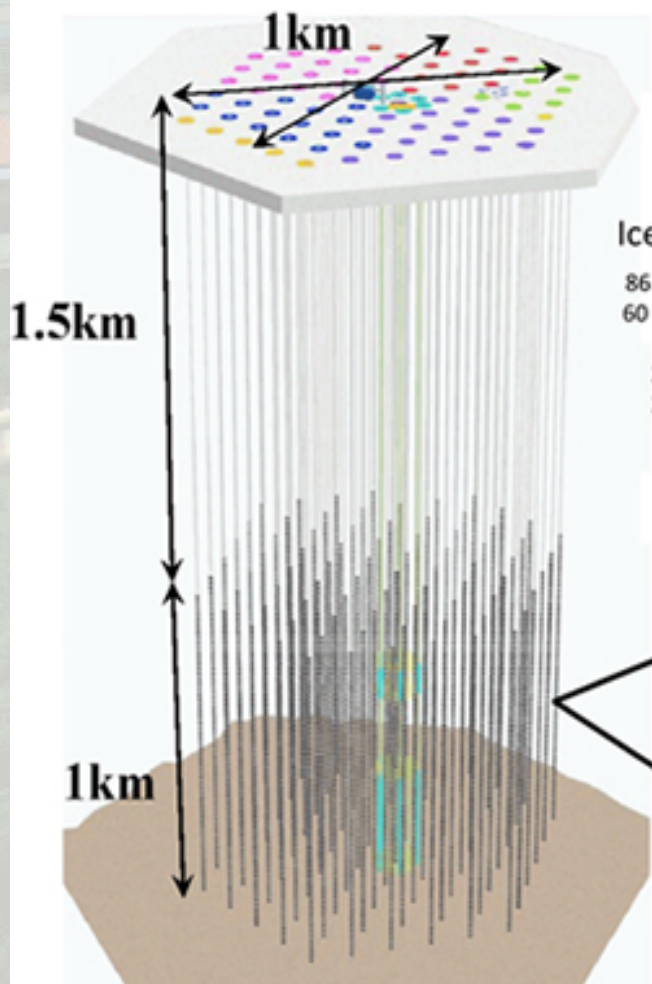
ニュートリノの生成機構は大気ニュートリノと同じと考えられているが、エネルギーがずっと大きい(～1TeV)



ハルツェン

水ではなく氷のチェレンコフ測定器: 巨大な体積 $\sim 1\text{km}^3$

The IceCube Neutrino Telescope

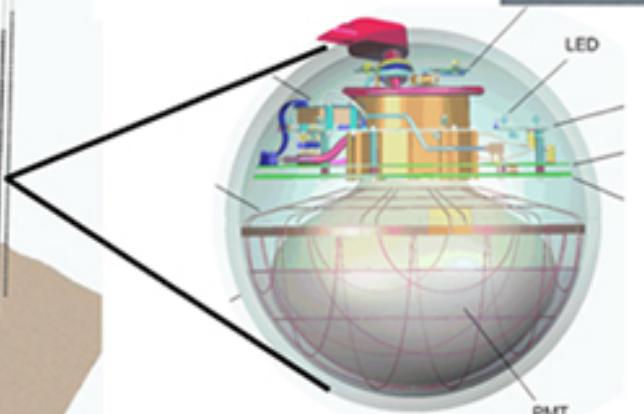
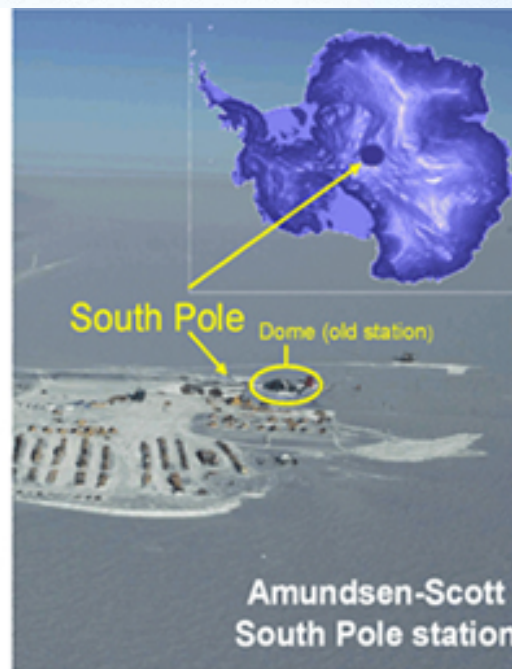


IceCube Array

86 strings including 8 DeepCore strings
60 optical sensors on each string

2004: Project Start 1 string
2011: Project completion 86 strings

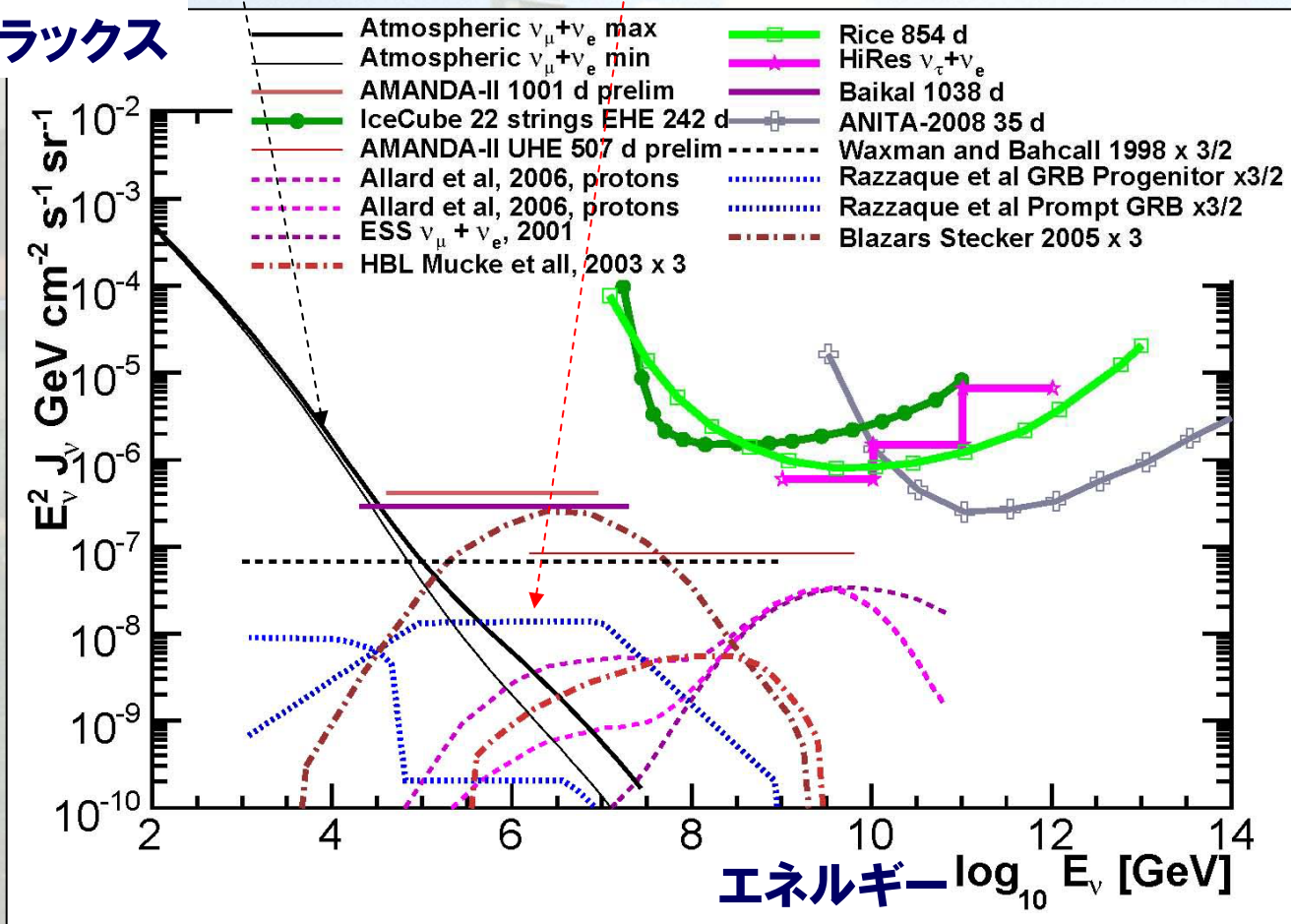
5160 optical sensors



Digital Optical Module (DOM)

大気ニュートリノと宇宙ニュートリノ: エネルギー領域が違うため、測定が有利 → $E > 100 \text{ TeV}$ 以上で既に10発以上のニュートリノ事象を観測している

フラックス



宇宙ニュートリノの観測は活動銀河核・ガンマ線バースト現象の解明に役立つと期待されている

●宇宙論とニュートリノの質量

実は宇宙論からもニュートリノの質量に制限がつくことが知られている

ニュートリノの質量がある程度大きいと、宇宙の大規模構造形成（銀河の分布）が観測と矛盾する→ $m_1 + m_2 + m_3 < 0.5\text{eV}$

→ニュートリノの質量が宇宙の膨張に影響を与えることはほとんどない

[現在の宇宙論] 宇宙のエネルギー(=質量)の内訳

4% 核子

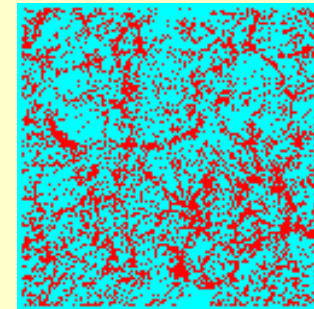
23% **コールド**ダークマター

73% ダークエネルギー

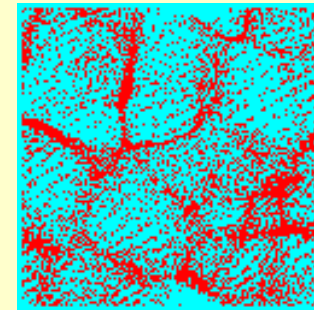
質量の**重い**
未知の粒子
からなる暗
黒物質

未知のエネルギー(宇宙定数)

天文学による銀河の分布の観測



コールドダークマターのみ
(観測と一致)



充滿している
ニュートリノの質量が3eV以上の
場合(観測と矛盾)

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by greenery and a paved path. A prominent building with a curved facade and several columns is situated near 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 clouds.

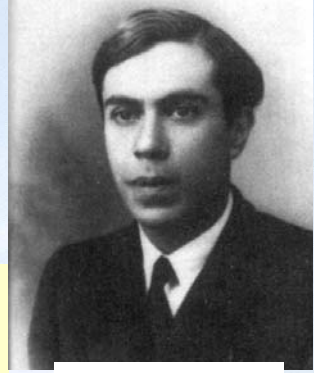
(5)マヨラナニュートリノ

●マヨラナニュートリノと無ニュートリノ二重ベータ崩壊

相互作用が $\nu + \bar{\nu}$ の組み合わせで起こるニュートリノをマヨラナニュートリノと呼ぶ

マヨラナニュートリノは反応の前後でレプトン数を破るため、標準模型を超える物理の探索では重要視されている

現時点ではニュートリノがマヨラナニュートリノかどうか不明→ニュートリノ振動実験からどちらかは言えない

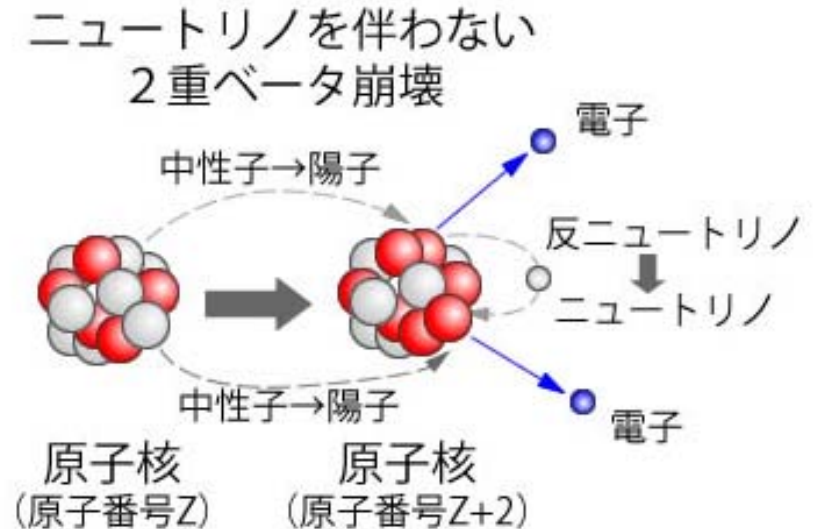
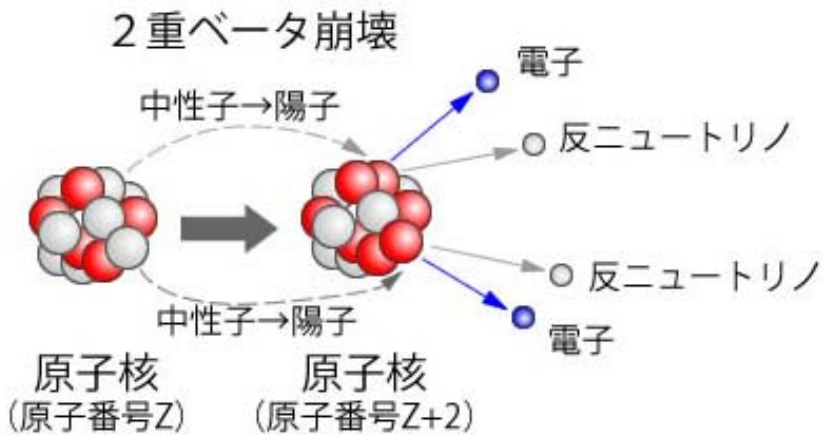


マヨラナ

→無ニュートリノ二重ベータ崩壊が発見されればマヨラナ型であることが言える

2ニュートリノ二重ベータ崩壊 ($2n \rightarrow 2p + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$) は観測されている

無ニュートリノ二重ベータ崩壊 ($2n \rightarrow 2p + 2e^-$) はまだ観測されていない



カムランド禅(2011~)



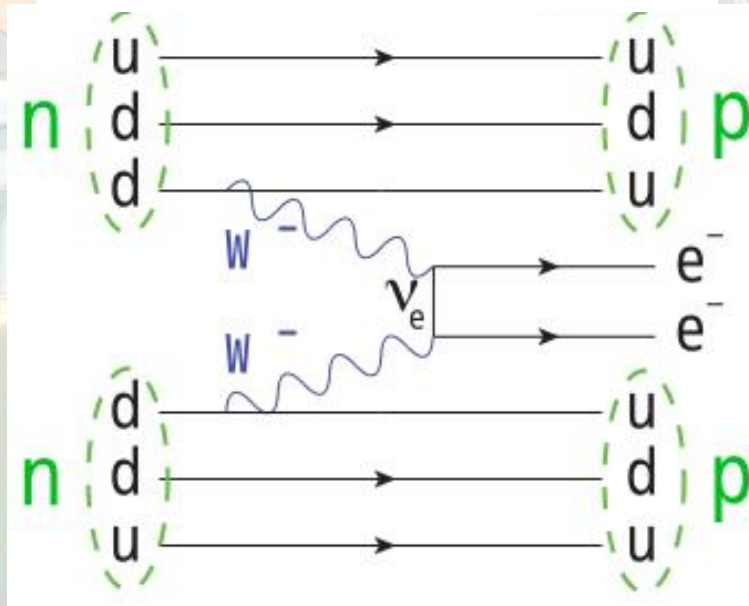
井上邦雄

- カムランド測定器の中にキセノンの試料を置いて2発の電子の出る以下の反応事象を探索:

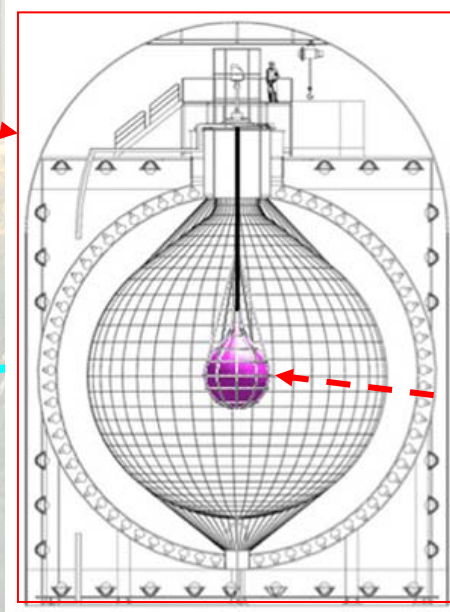
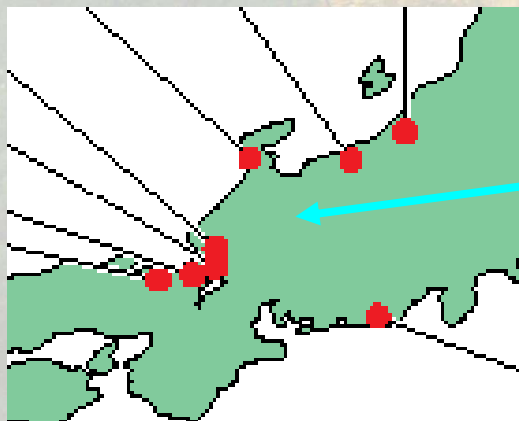


- 今までに得られている半減期 $\tau > 3.4 \times 10^{25}$ 年 (否定的結果) は現時点で世界最高感度

無ニュートリノ二重ベータ崩壊



カムランド



キセノン

ニュートリノの小さな質量

←ニュートリノが注目される訳

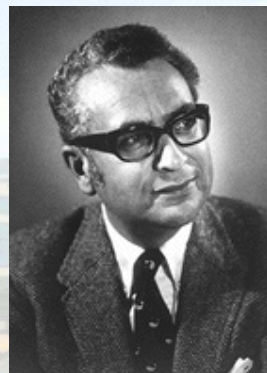
1978~79年
シーソー機構



ミンコフスキー



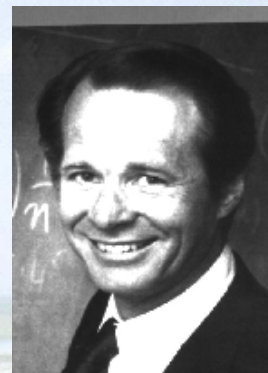
柳田勉



ゲルマン



ラモン



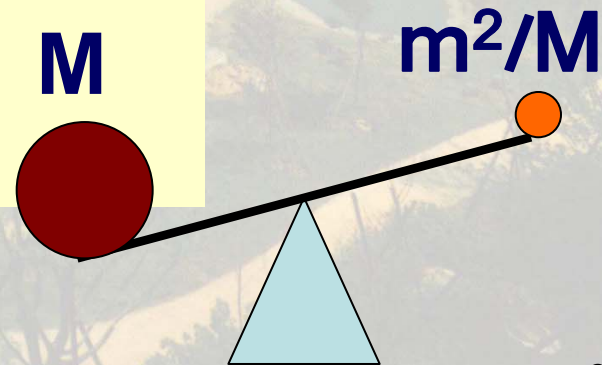
スランスキー

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_ν 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！



現在の素粒子論研究:

標準模型を越える物理の模索

A) フォーマルな研究

(トップダウン的アプローチ)

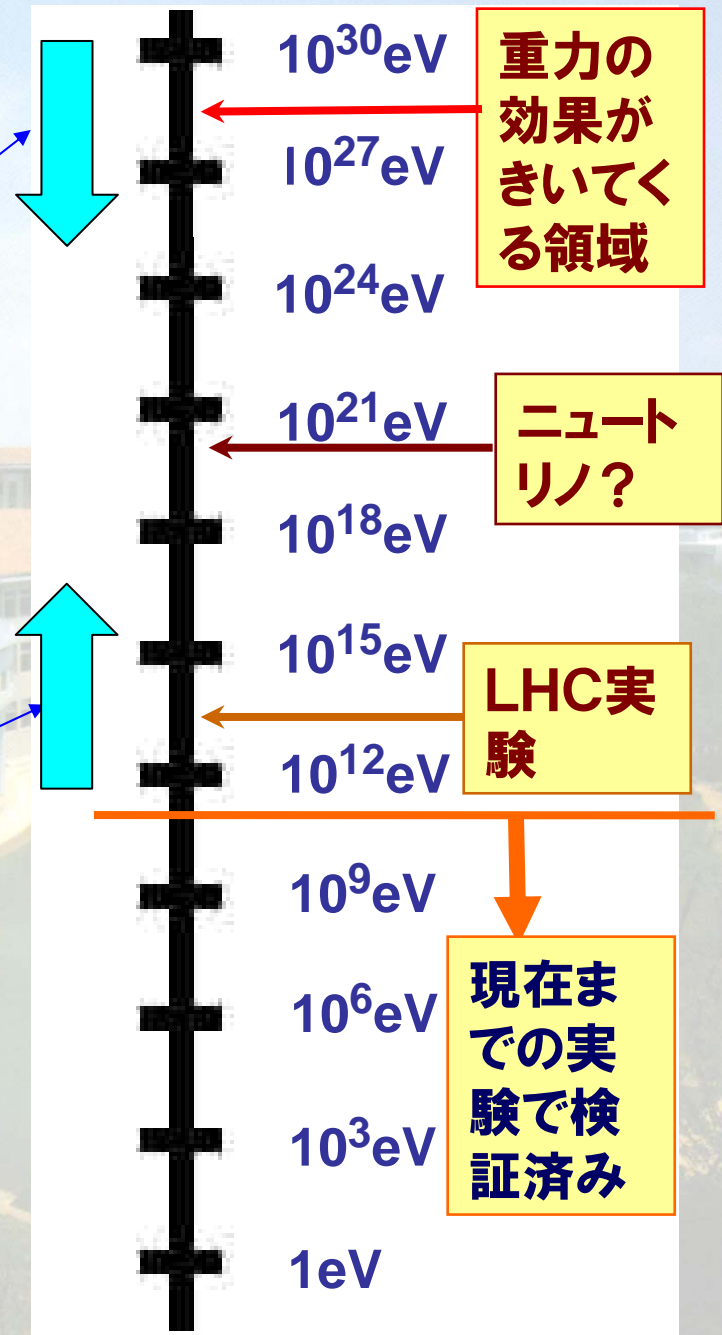
重力を含んだ統一理論の研究
(超ひも理論)

B) 現象論的研究

(ボトムアップ的アプローチ)

現在・近未来の実験で検証できる
物理を研究

ニュートリノの研究は現象論の中でも
高いエネルギーの情報を与え得る

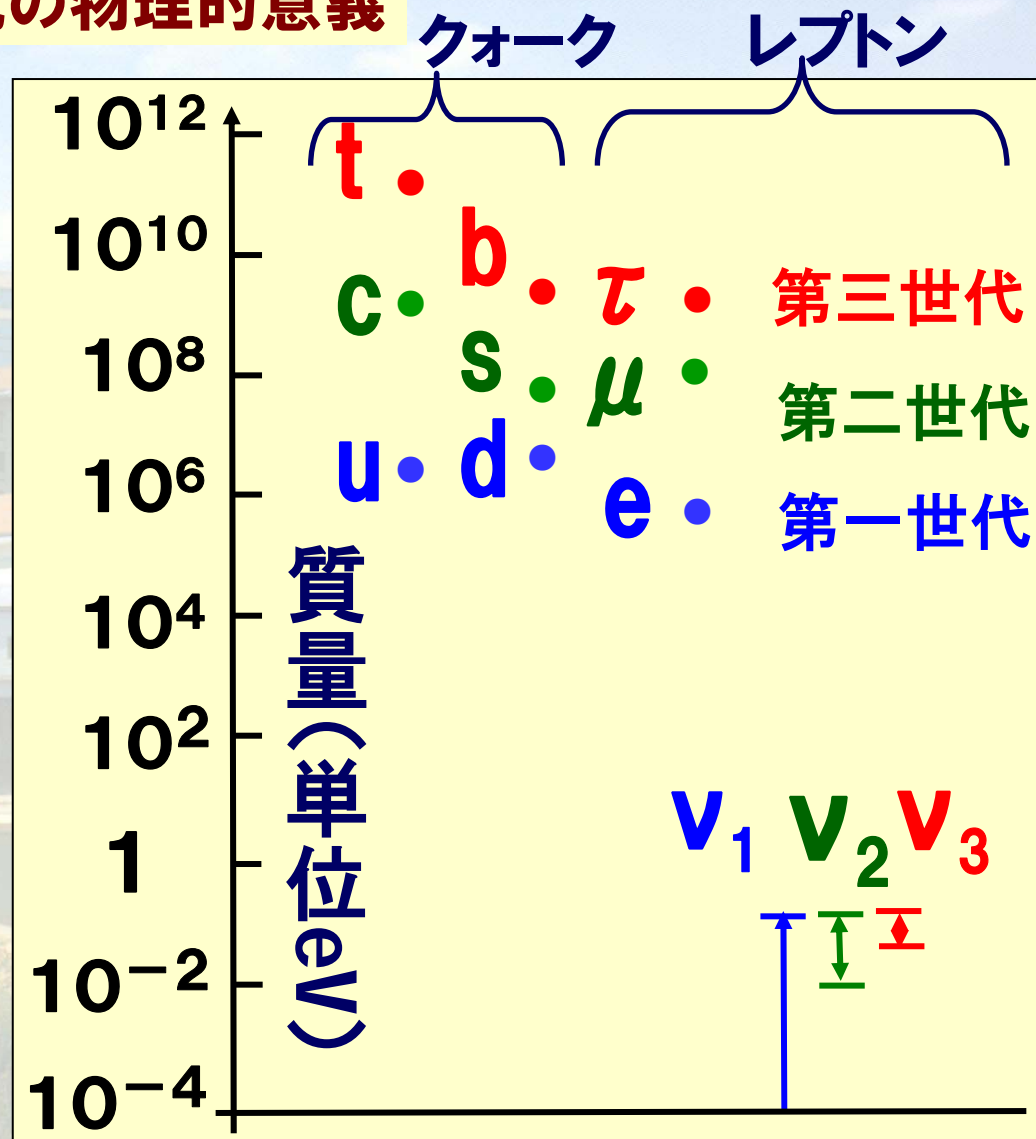


まとめ:ニュートリノ振動の発見の物理的意義

- 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、標準模型を超える新物理を探る鍵を与える→新物理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. The central focus is a large, light-colored building with a prominent circular section featuring several columns. In front of this building is a large, irregularly shaped pond. The campus is surrounded by greenery and other buildings in the background under a blue sky with scattered clouds. A semi-transparent yellow rectangular box is overlaid on the image, containing the Japanese characters '付録' (Appendix) in a bold, dark blue font.

付録

レプトジェネシス:右巻きニュートリノにより物質-反物質非対称性を説明する仮説(まだ全然検証されていない)

質量Mの重いニュートリノ:右巻きニュートリノ N

質量 m_ν の軽いニュートリノ:左巻きニュートリノ ν



福来正孝



柳田勉

$$N \rightarrow H + \ell$$

右巻きニュートリノNがヒッグス粒子Hとレプトン ℓ に崩壊

$$\bar{N} \rightarrow \bar{H} + \bar{\ell}$$

右巻き反ニュートリノ \bar{N} が反ヒッグス粒子 \bar{H} と反レプトン $\bar{\ell}$ に崩壊

マヨラナ型の相互作用がある場合、レプトン数は保存せず、Nと \bar{N} の崩壊の速度が異なれば、ゼロでないレプトン数の値が生成できる

B:バリオン数 L:レプトン数

標準模型では

$B-L=$ 一定に保ちながら

$B+L \rightarrow 0$ となるようなメカニズムが存在する(スファレロン効果)

→レプトジェネシスは大統一理論に比べて優れた理論

最初に $B=L \neq 0$ ならば

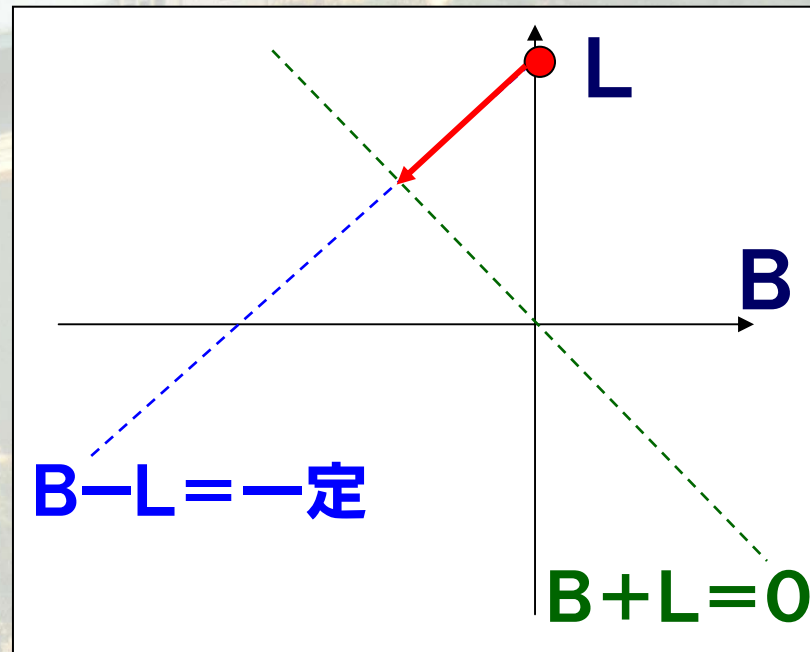
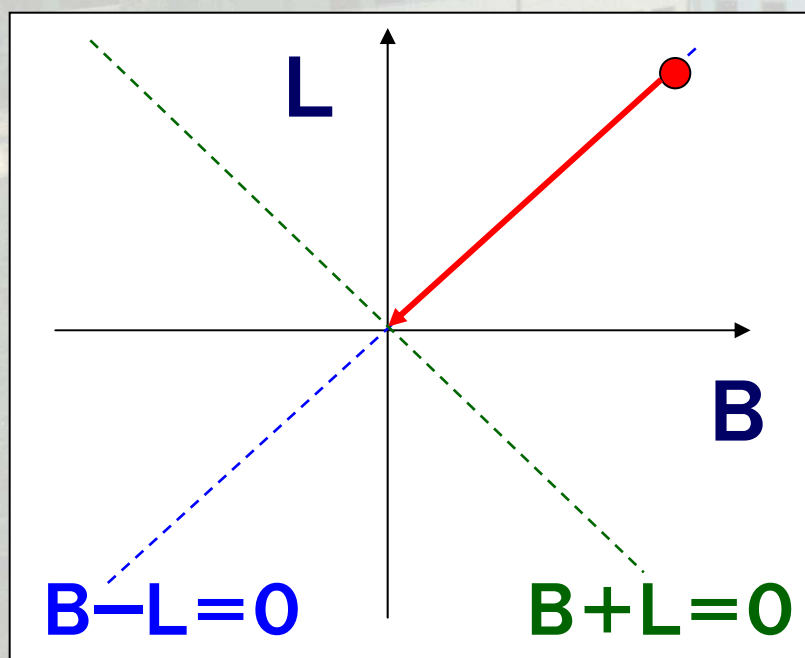
最後は $B=L=0$ となってしまう

(大統一理論)

最初に $B=0, L \neq 0$ ならば

最後は $B \neq 0$ となる

(レプトジェネシス)



標準模型

ある意味で電磁気力と弱い力を統一した理論と言える

電磁気力・弱い力(ワインバーグ・サラム理論):

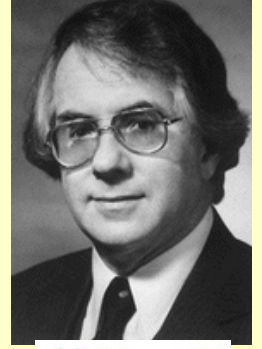
$SU(2) \times U(1)$ と呼ばれる群のゲージ理論

強い力(量子色力学):

$SU(3)$ と呼ばれる群のゲージ理論

2は2種類(アップ・ダウン)の2

3は3色(赤・緑・青)の3



ジョージアイ

グラシヨウ

標準模型の拡張

1974年:大統一理論
(まだ全然検証されていない)

$SU(5)$ と呼ばれる群のゲージ理論から標準模型の3つの群を出す:

$$SU(5) \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

クォーク・レプトン、光子(A)・W・Z・グルーオン(G)はそれぞれ同じ群の表現として変換

$\begin{pmatrix} d_R \\ d_G \\ d_B \\ e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & -\bar{u}_B & -\bar{u}_G & -u_R & -d_R \\ \bar{u}_B & 0 & -\bar{u}_R & -u_G & -d_G \\ \bar{u}_G & \bar{u}_R & 0 & -u_B & -d_B \\ u_R & u_G & u_B & 0 & -e^+ \\ d_R & d_G & d_B & e^+ & 0 \end{pmatrix}$
---	---

$\begin{pmatrix} G_{RR} - A & G_{GR} & G_{BR} \\ G_{RG} & G_{GG} - A & G_{BG} \\ G_{RB} & G_{GB} & G_{BB} - A \\ X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 \\ \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 \\ \bar{X}_3 & \bar{Y}_3 \\ Z + A & W^+ \\ W^- & -Z + A \end{pmatrix}$
--	--

数学的な表式よりも、3、2、1個の別々だったものがまとまっている点が重要

$SU(5)$ 独自のゲージ場(標準模型には不在)

1974年：大統一理論における ゲージ相互作用の結合定数 (大統一理論の理論的予言)

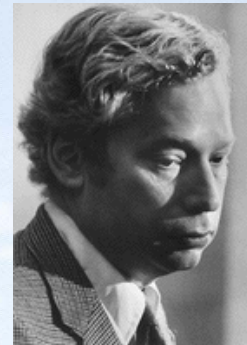
くりこみ理論によると、結合定数は、
想定しているエネルギーに依存して
変化することが知られていた



ジョージアイ

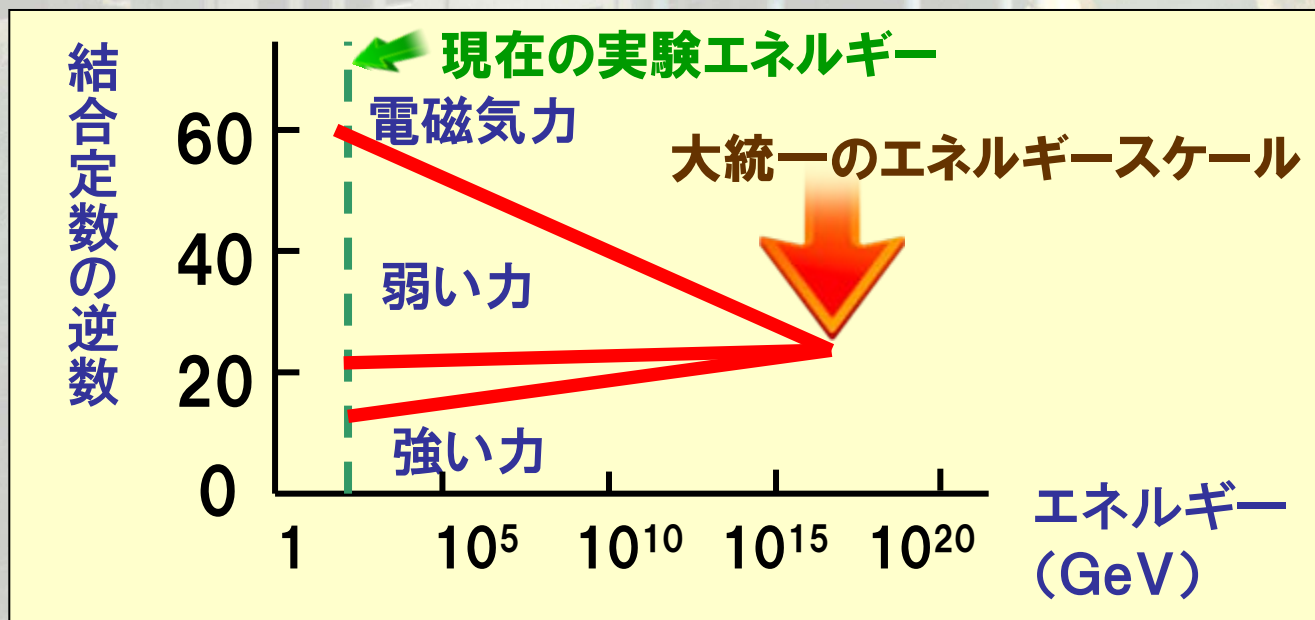


クウィン



ワインバーグ

電磁気力、弱い力、強い力の結合定数は
 10^{15} GeVのあたりで同じ値になる
→力の統一を示唆しているのではないか？



1974年：大統一理論における ゲージ相互作用の結合定数 (大統一理論の理論的予言)

さらに大統一理論は、統一エネルギースケール
の見積りから陽子崩壊の寿命を予言する：



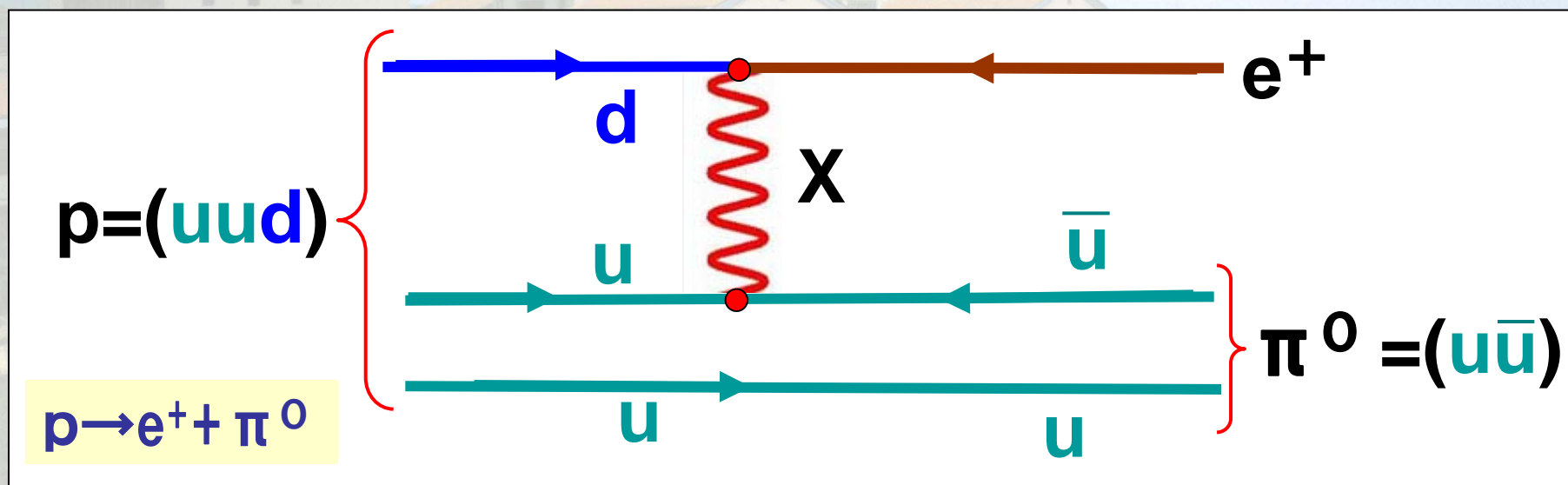
ジョージアイ



クウィン



ワインバーグ



$$\text{陽子の寿命} \approx (\text{Xの質量}/10^{15}\text{GeV})^4 \times 10^{31} \text{ 年}$$

この寿命は一個あたりの崩壊の確率を表すので、ものすごく大量の核子を置いて観測すれば、たまには崩壊する核子がみつかるかもしれない！

(注)大統一理論では $B-L$ = 一定に保たれている