

# 現代の素粒子像

## 第2回「素粒子実験最前線」

中家 剛

# 素粒子実験

## ■ 加速器(を使った実験)

- LHC: 世界最高エネルギーの加速器
- J-PARC: 世界最大強度の加速器
- KEKB: 世界最高輝度の加速器

(例) 加速器は顕微鏡のようなもの？

## ■ 非加速器実験

- スーパーカミオカンデ
- カムランド
- 暗黒物質探索



**LHC**

**Large Hadron Collider**

**(超電導加速器)**



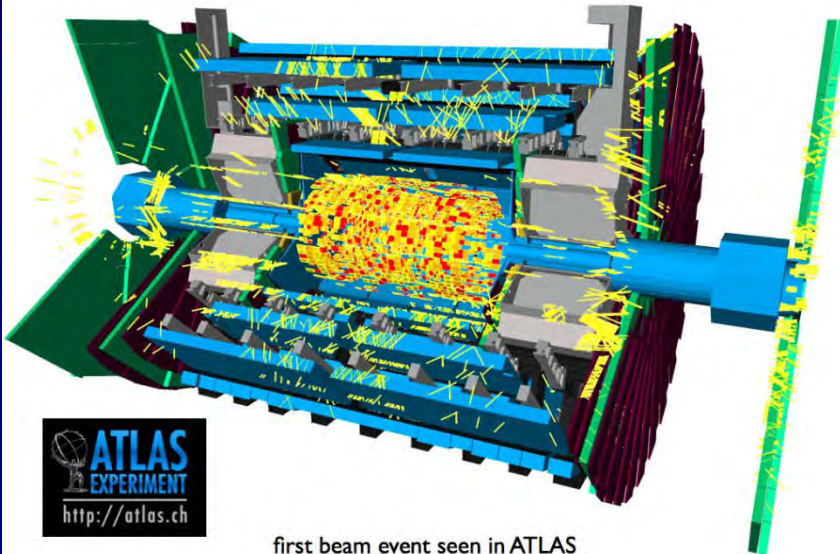
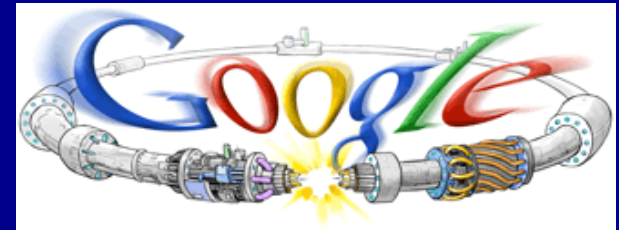
# *CERN and LHC*

周長27km  
(なぜ27kmも必要か？  
超電導マグネット: 8T)

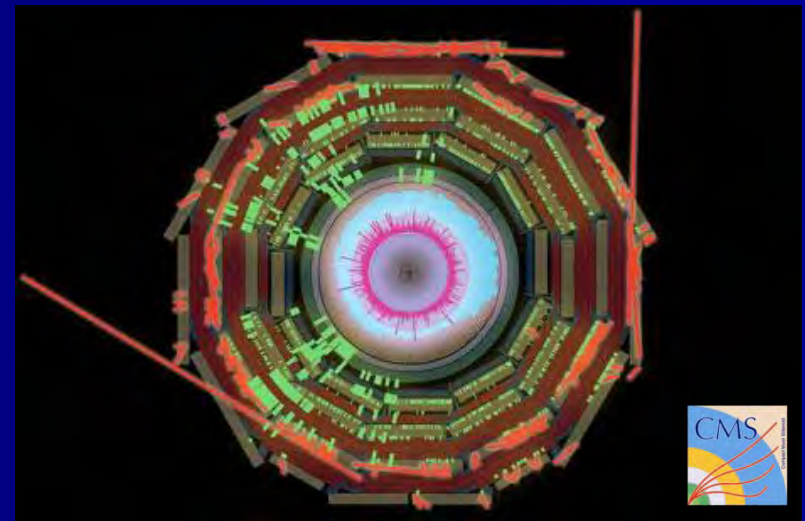
日本人の感覚？



今から2年前・・・  
(2008年9月10日)



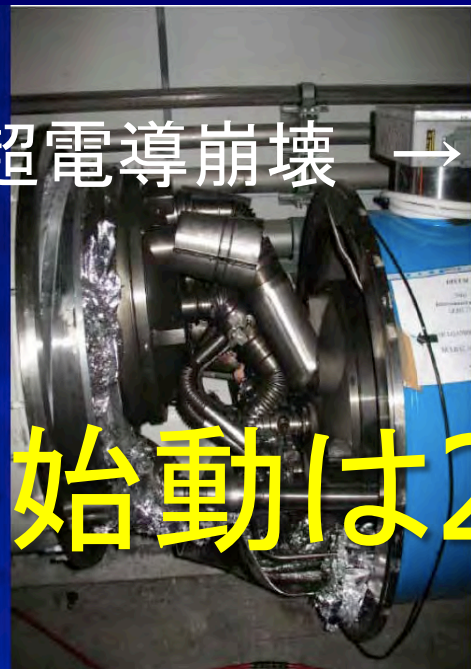
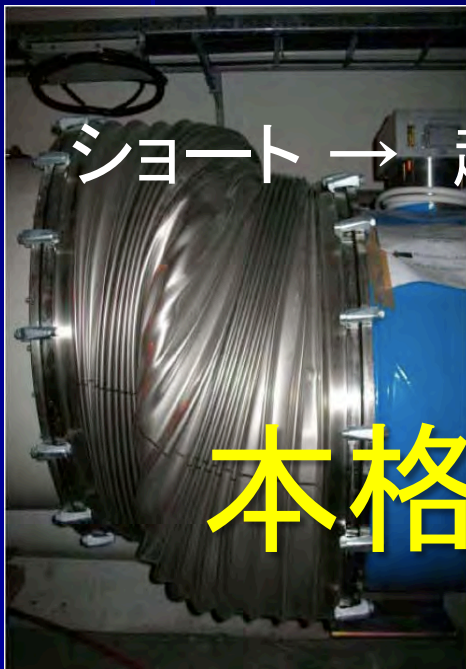
first beam event seen in ATLAS







# その9日後・・・ (2008年9月19日)



ショート → 超電導崩壊 → 液体ヘリウム沸騰・爆発

本格始動は2010年から

FEIN Elektrover  
FEIN Decide Power  
Gültig: 10/2008

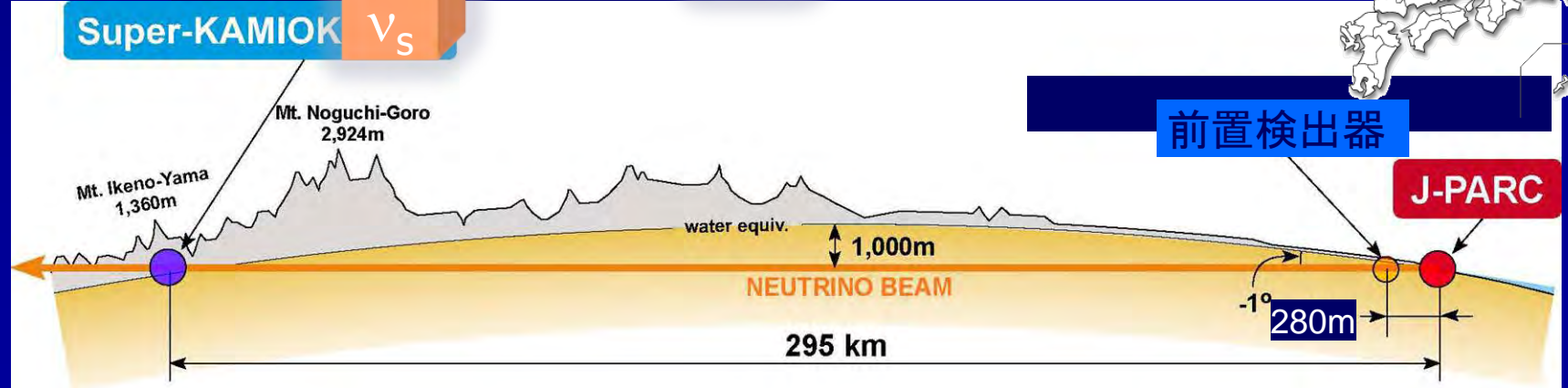
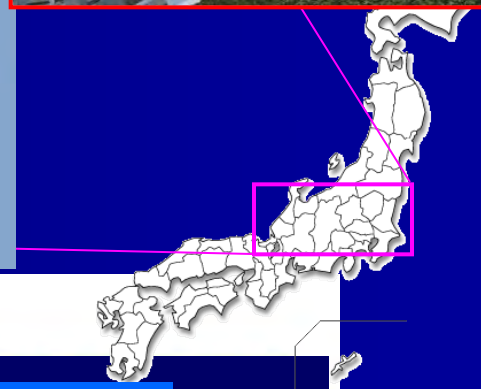
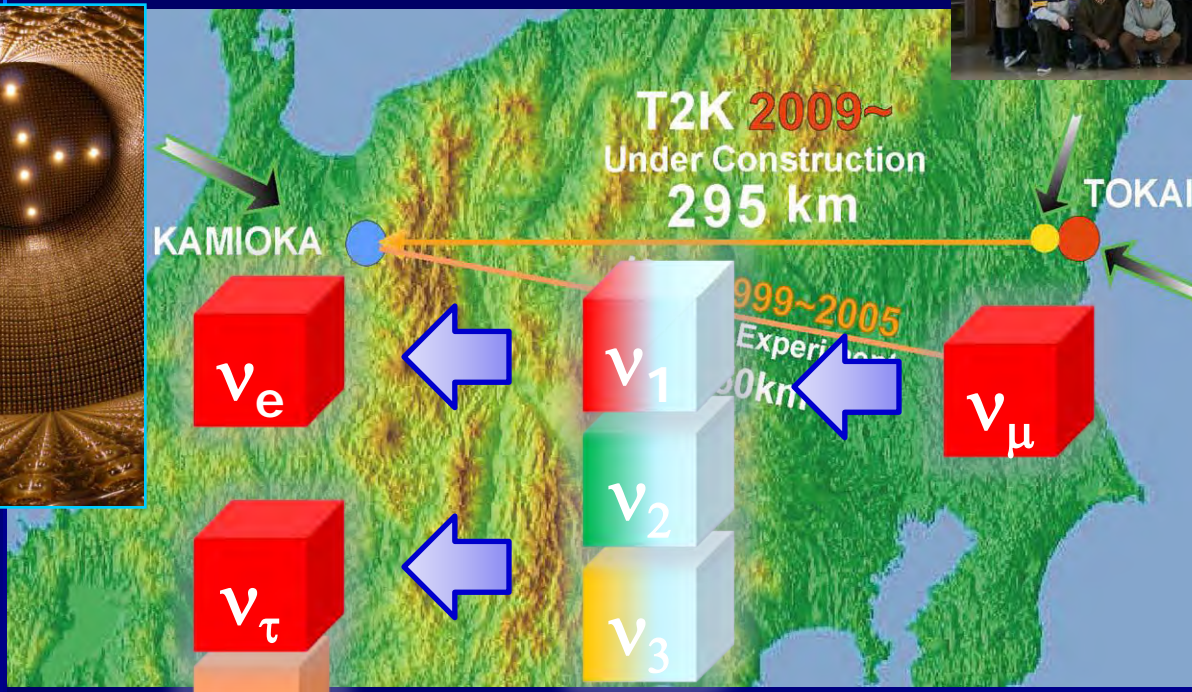
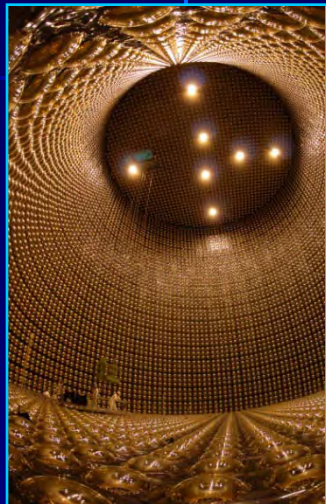


# T2K (Tokai to Kamioka)





# T2K実験の紹介





# J-PARC

MR commissioning May, Jun, Dec in 2008

Hadrons in 2009

50 GeV MR

in 2008

MLF

RCS

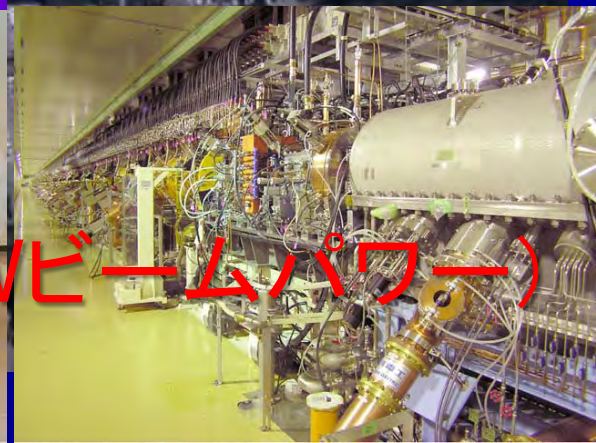
Neutrinos

From Apr. 2009



3 GeV RCS beam commissioning succeeded in Nov. 2007

Linac succeeded in 181 MeV acceleration in Jan. 2007



世界最大強度の陽子加速器 (750kWビームパワー)

# J-PARCビーム強度

- 陽子エネルギー: 30GeV ( $30 \times 10^9 \text{eV}$ )

– (注)  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$

- 陽子数:  $3 \times 10^{14}$ 個/beam

- 全エネルギー:

$$30 \times 10^9 \times 3 \times 10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.44\text{MJ}$$

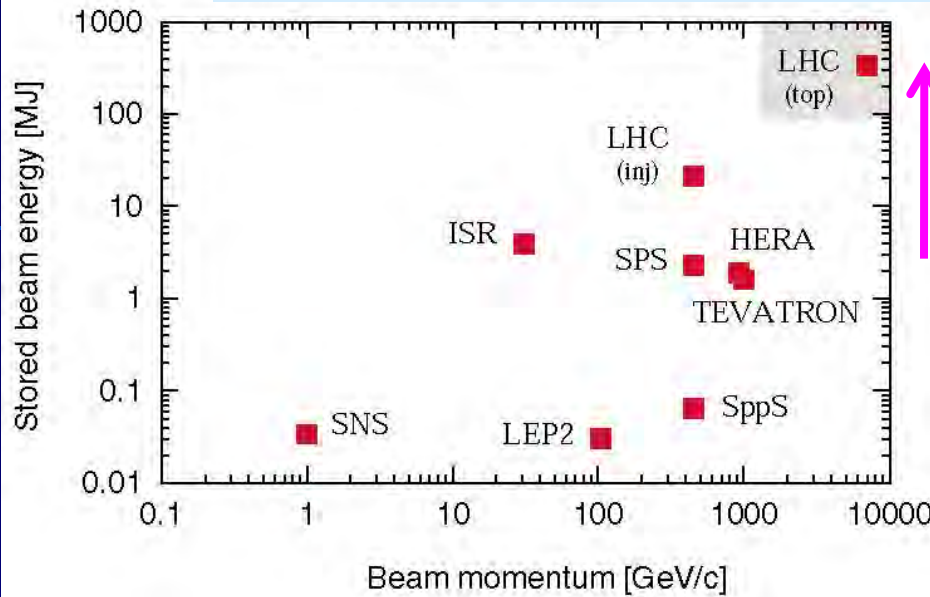
– 144トンのものを1m持ちあげる。

–  $\sim 1\text{kg}$ の水を0度 $\rightarrow$ 50度まで上げる。

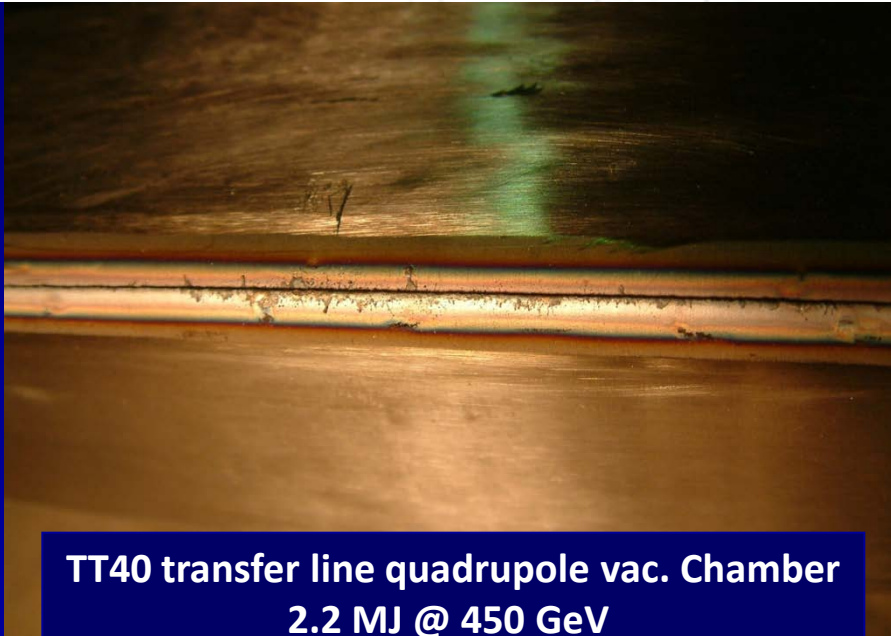
- 加速周期:  $\sim 2$ 秒毎  $\rightarrow \sim 700\text{kW}$



# Stored energy in LHC beam



100倍



TT40 transfer line quadrupole vac. Chamber  
2.2 MJ @ 450 GeV



SPS dipole vacuum chamber  
2 MJ @ 400 GeV

***Collimators must survive  
expected beam loss...***

# T2K ニュートリノ振動実験開始



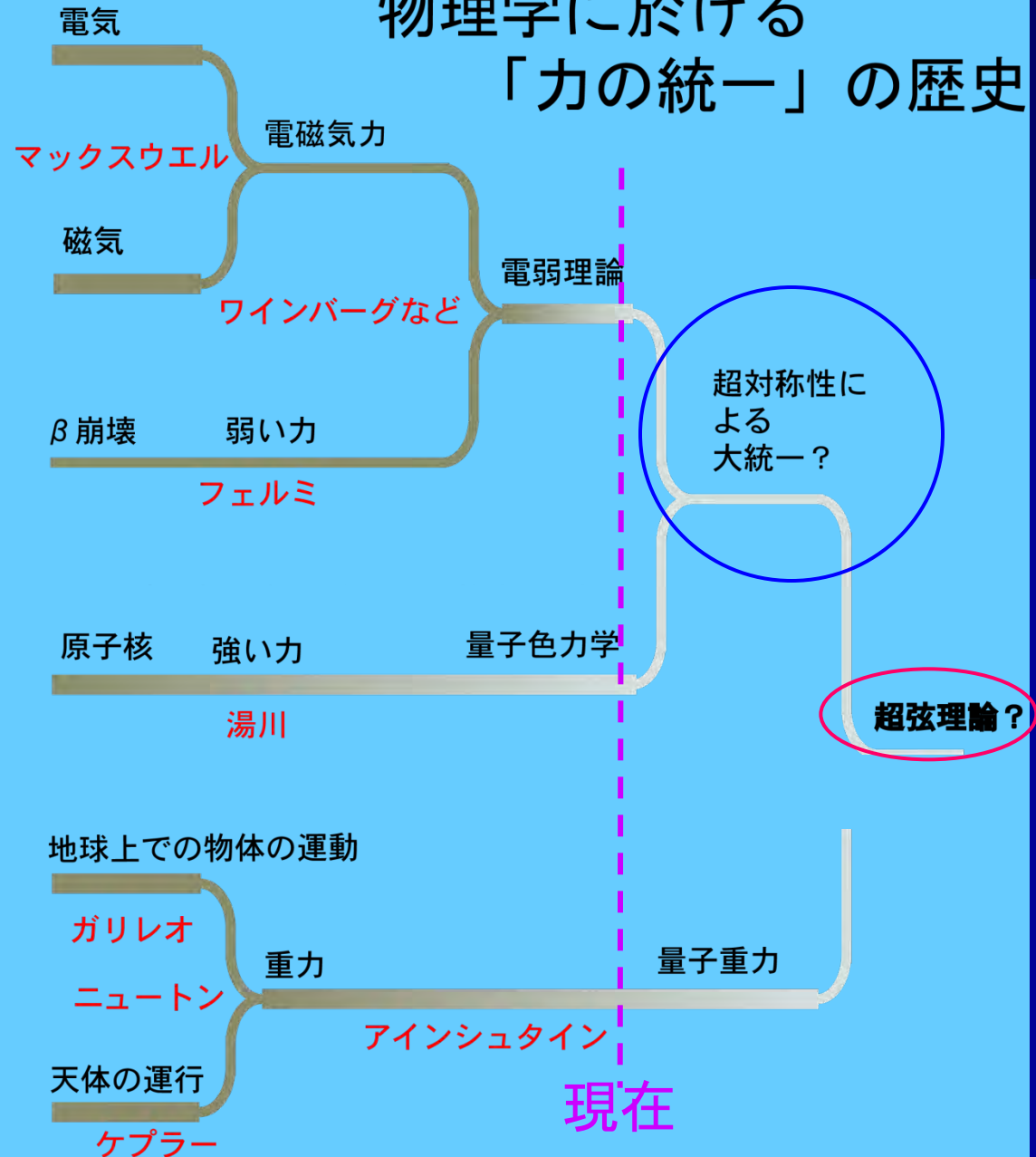
*Completion of J-PARC Facility*

祝 J-PARCニュートリノビーム生成  
2009年4月23日 19時09分

本格始動はやはり2010年から



# 物理学に於ける 「力の統一」の歴史





# 素粒子実験分野

エネルギーフロンティア

**LHC実験**  
**(ILC実験)**

大強度・稀事象フロンティア

*B-Factory*

ニュートリノ(T2K, SK, KamLAND, 他)

K中間子(K<sup>0</sup>TO, 他)

$\mu$ 、中性子、陽子崩壊、...

*$\tau$ -charm Factory*

:

Astro-Particle  
Physics

ニュートリノ

ダークマター

ダークエネルギー

CMB



# 不確定性原理(量子力学)

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$
$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- $h$ : プランク定数( $=4.1356692 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{秒}$ )
  - $\hbar$ は  $h/2\pi = 6.5821220 \times 10^{-16} \text{eV} \cdot \text{秒}$
  - $\hbar c = 197 \text{eV} \cdot \text{nm}$
- $\Delta t$ が小さいということは、めったに起こらない現象に対応。
  - 大強度加速器、高輝度加速器の活躍

# 素粒子実験の概要

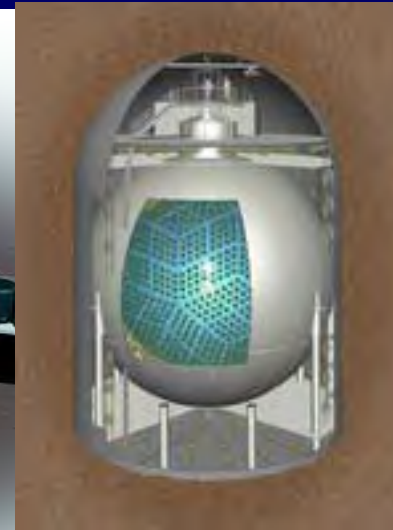
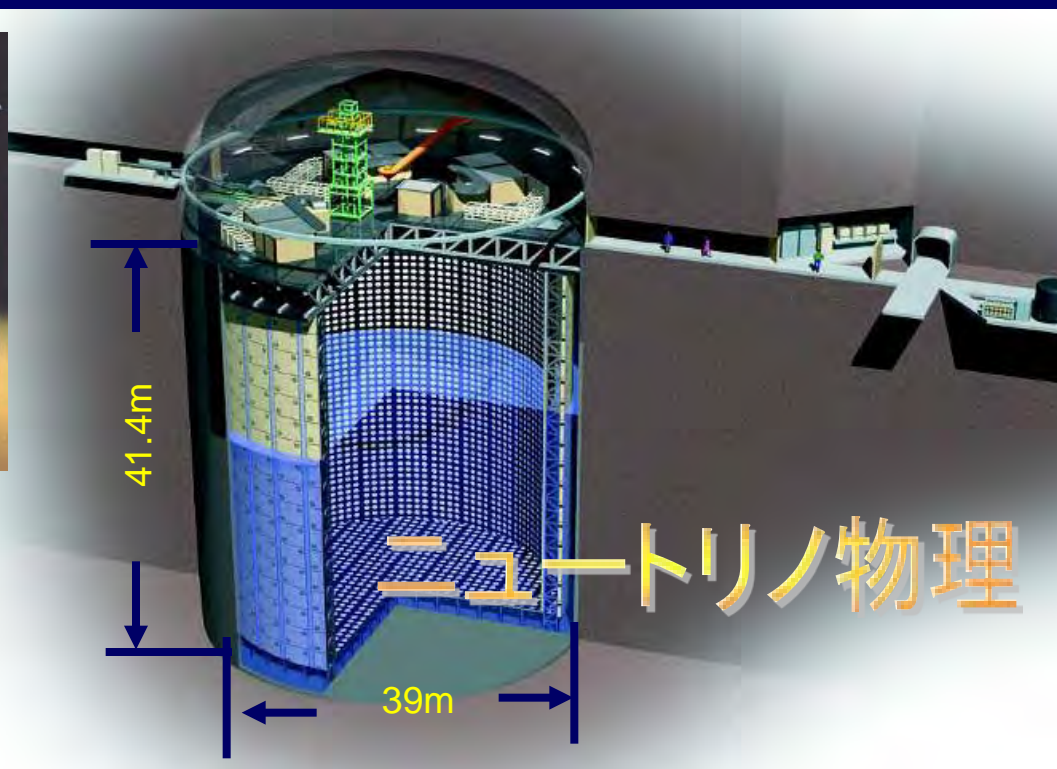
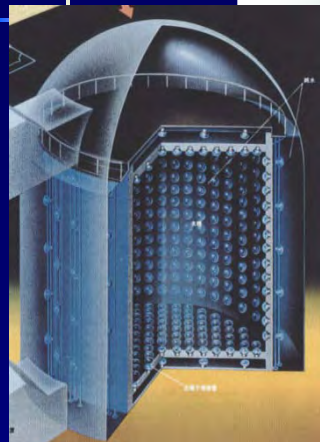
- TeV領域の物理を開拓
  - Higgs(電弱対称性)、SUSY、余剰次元
  - 高エネルギーコライダーによる直接探索と稀崩壊事象探索による間接探索。
- ニュートリノ質量、クォーク-レプトン対称性、陽子崩壊等を研究し、超高エネルギー(GUTスケール)の物理の情報を引き出す。
  - ニュートリノ混合の研究
  - ニュートリノを伴わない2重 $\beta$ 崩壊
  - CP対称性(レプトン、小林・益川以外の起源を探す)
  - 陽子崩壊
- 宇宙物理(宇宙の構成要素)と素粒子物理のリンクを探求
  - 暗黒物質
  - ダークエネルギー
  - ニュートリノ(宇宙背景放射ニュートリノ、超新星残骸ニュートリノ、超新星ニュートリノ等)



# これまでの**日本の**素粒子実験の成果

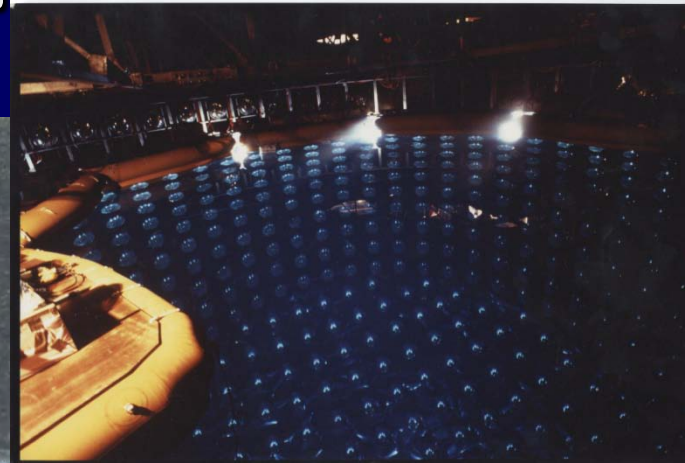
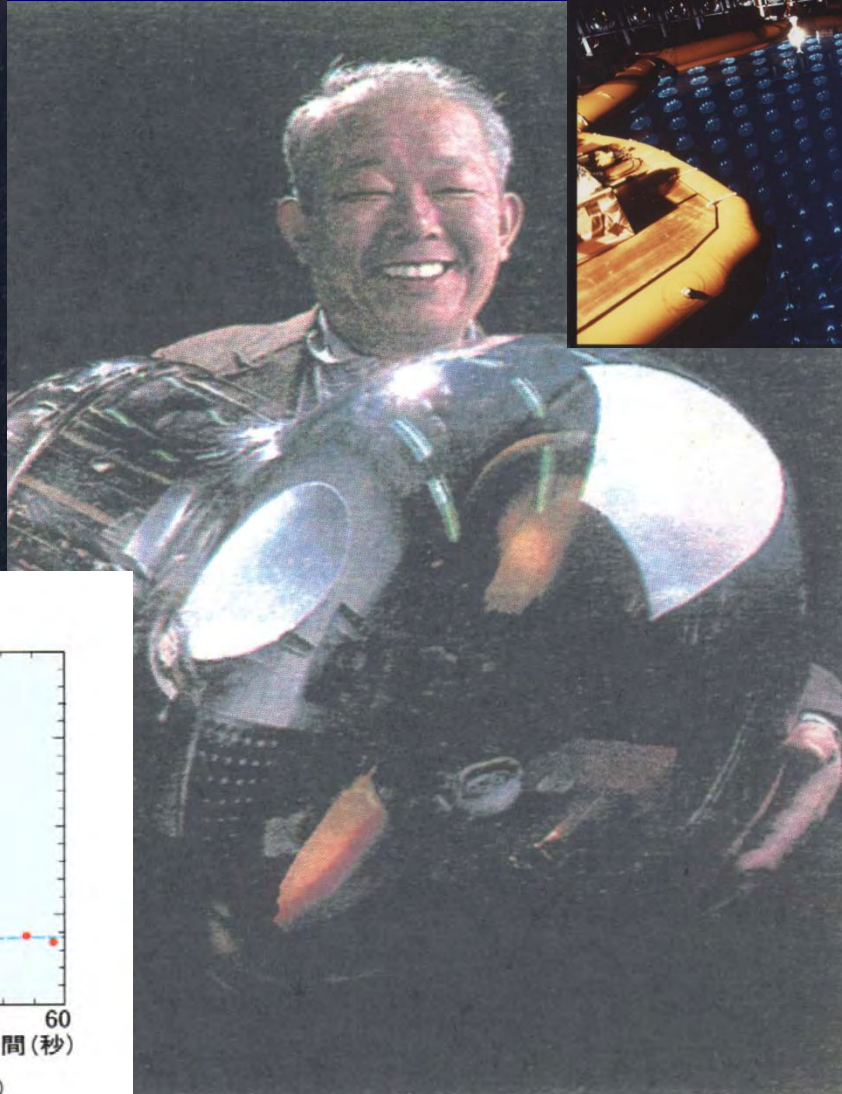
- 世界一(No1.)の結果を日本から発信
  - ニュートリノ物理
  - Bの物理[CP対称性の研究を中心として]
  - $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ [CP非保存]の探索
- 海外における国際協力研究で活躍
  - トップクォークの発見 (TEVATRON)
  - ヒッグス粒子の探索 (LEP、LHC、TEVATRON)
  - 超対称性の探索 (LEP、LHC、TEVATRON)
  - K中間子稀崩壊の発見、探索

# ここ~10年は 日本の素粒子**実験**物理の黄金期

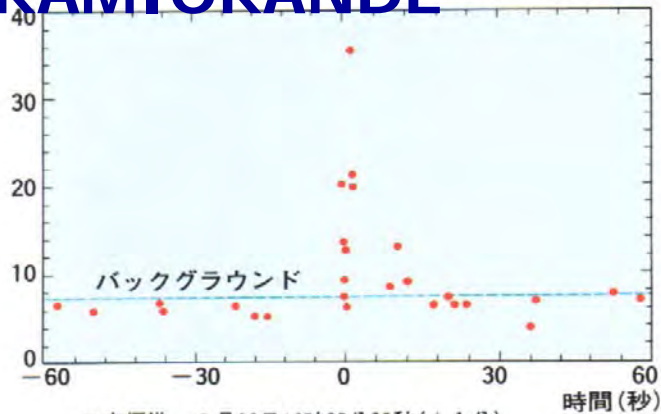




# 2002年ノーベル物理学賞



## KAMIOKANDE



日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)

グリニッジ標準時 2月23日7時35分35秒(±1分)



## 2007 Award Laureates

### 2007 Benjamin Franklin Medal in Physics

[Awards Home](#) » [2007 Award Laureates](#) » [2007...Medal in Physics](#)

Yoji Totsuka, Ph.D.



*Special University Professor Emeritus*  
University of Tokyo  
Tokyo, Japan

The 2007 Benjamin Franklin Medal in Physics is presented to Yoji Totsuka and Arthur McDonald for discovering that the three known types of elementary particles called neutrinos change into one another when traveling over sufficiently long distances, and that neutrinos have mass.

- 1935 [Albert Einstein](#), Franklin Medal
- 1947 [Enrico Fermi](#), Franklin Medal
- 1951 [James Chadwick](#), Franklin Medal
- 1952 [Wolfgang Pauli](#), Franklin Medal
- 1959 [Hans Albrecht Bethe](#), Franklin Medal
- 1992 [Frederick Reines](#), Franklin Medal
- 2003 [John Bahcall](#), [Raymond Davis, Jr.](#) and [Masatoshi Koshiba](#), Benjamin Franklin Medal in Physics



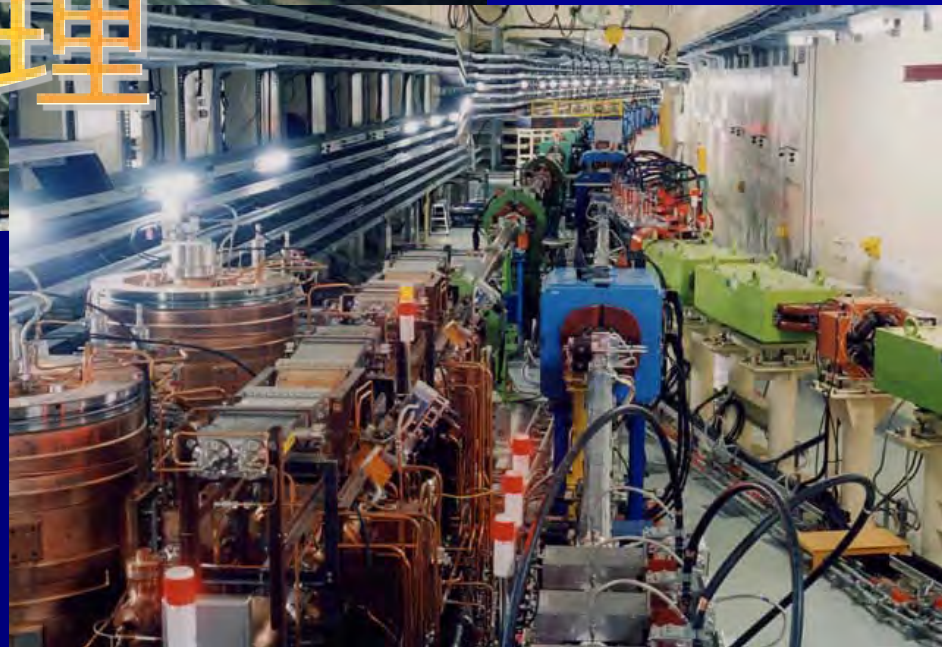
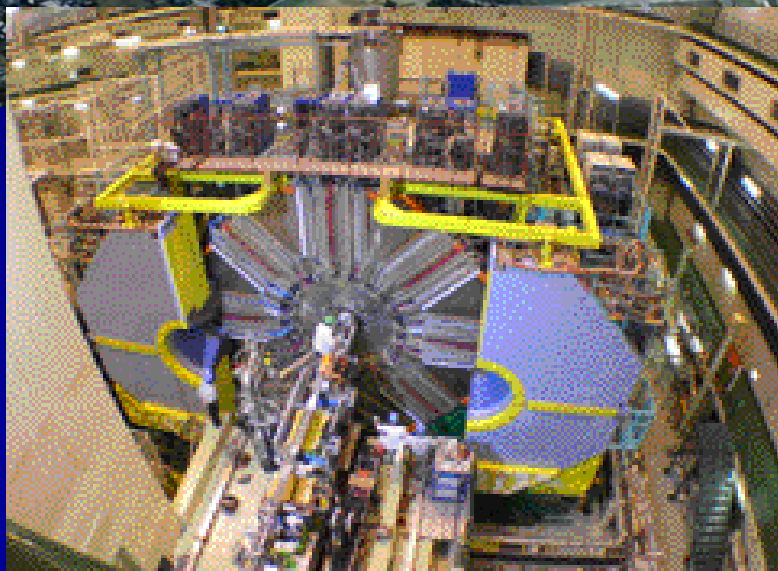
世界最高輝度の加速器： **KEKB** B-Factory (B工場)

*CP*[粒子・反粒子対称性]の破れの研究

周囲3km



**Bの物理**



# 2008年ノーベル物理学賞



- for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"
- "for the discovery of *the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks* in nature"

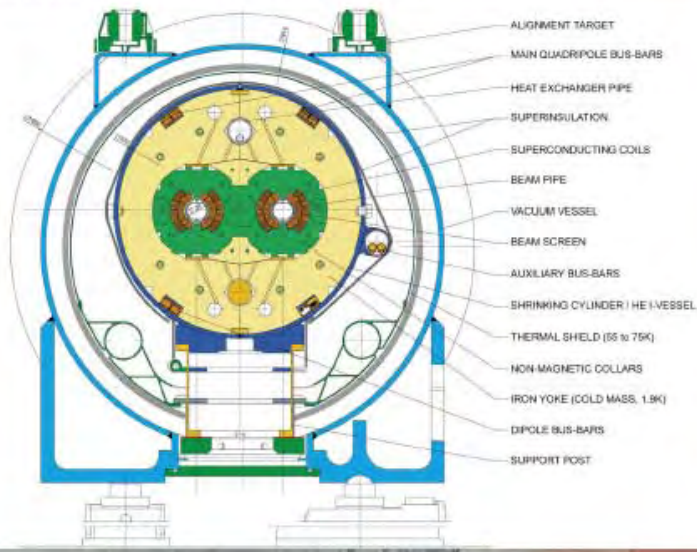


# LHC/ATLAS実験

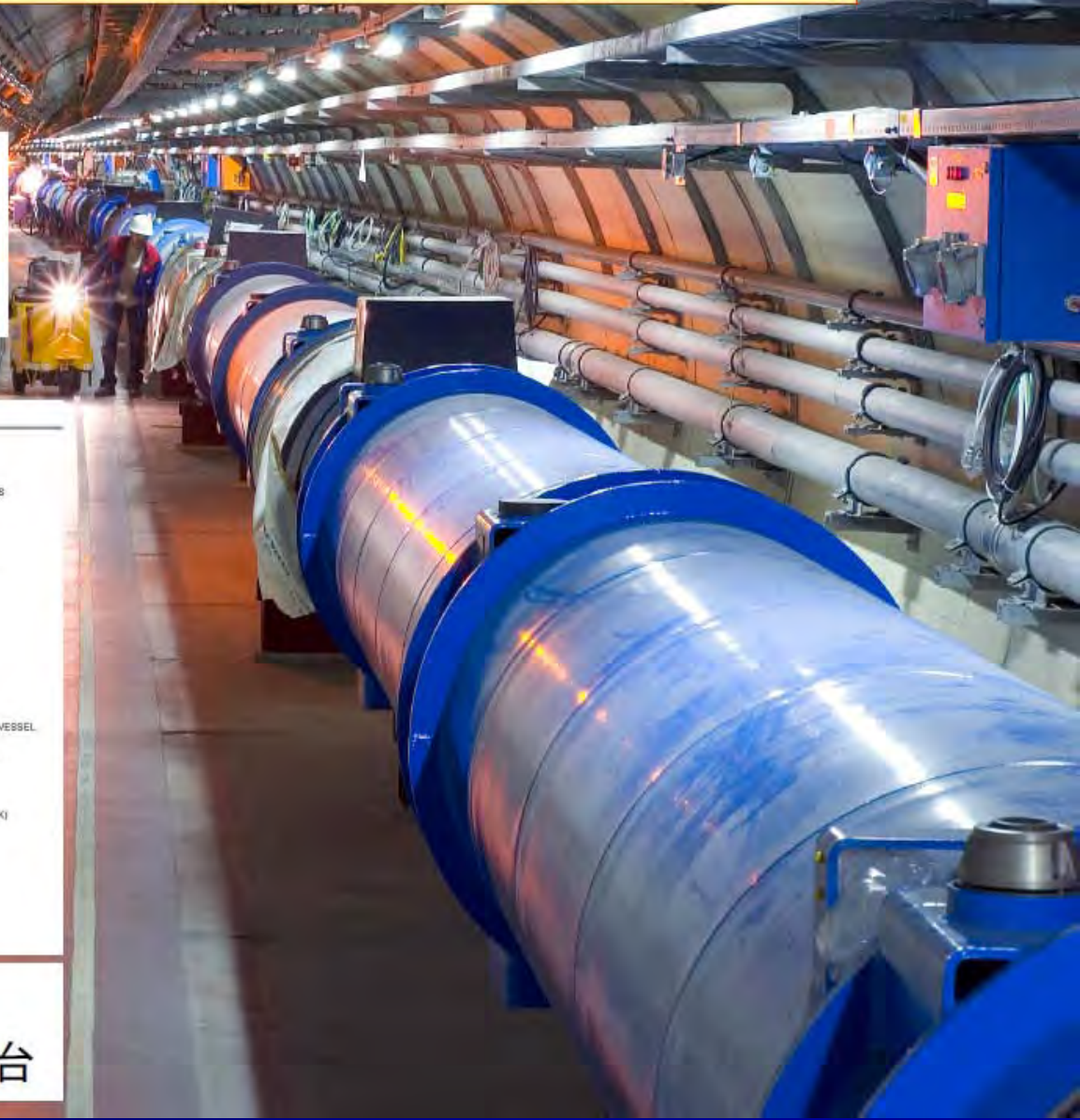
# Large Hadron Collider (LHC) at CERN

- ・ 14 TeV の陽子・陽子衝突型加速器
- ・ 円周27km LEPTンネルを利用
- ・ 建設に14年
- ・ 総建設費は約5000億円

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



1.9Kヘリウムで冷却  
磁場強度8.3T超伝導磁石 1232台





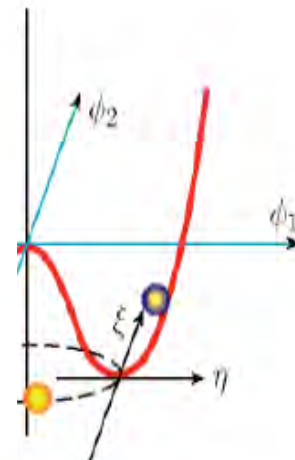
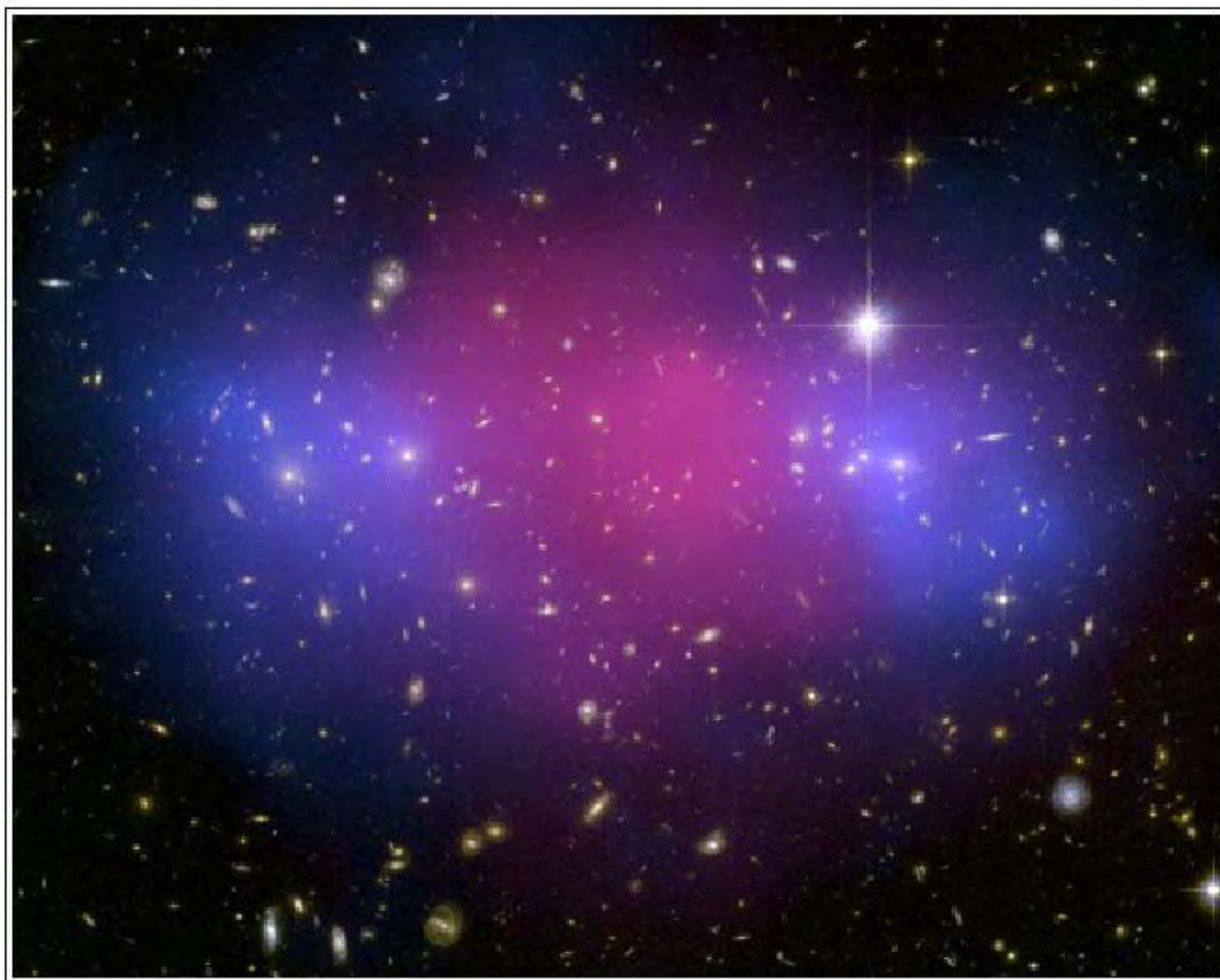
# LHC/ATLASで期待される成果:

TeV ( $< 0.1 \text{ am}$ ) の新たな地平線を切り拓く

(1) ヒッ

(2) 超

(3) 余



はがる

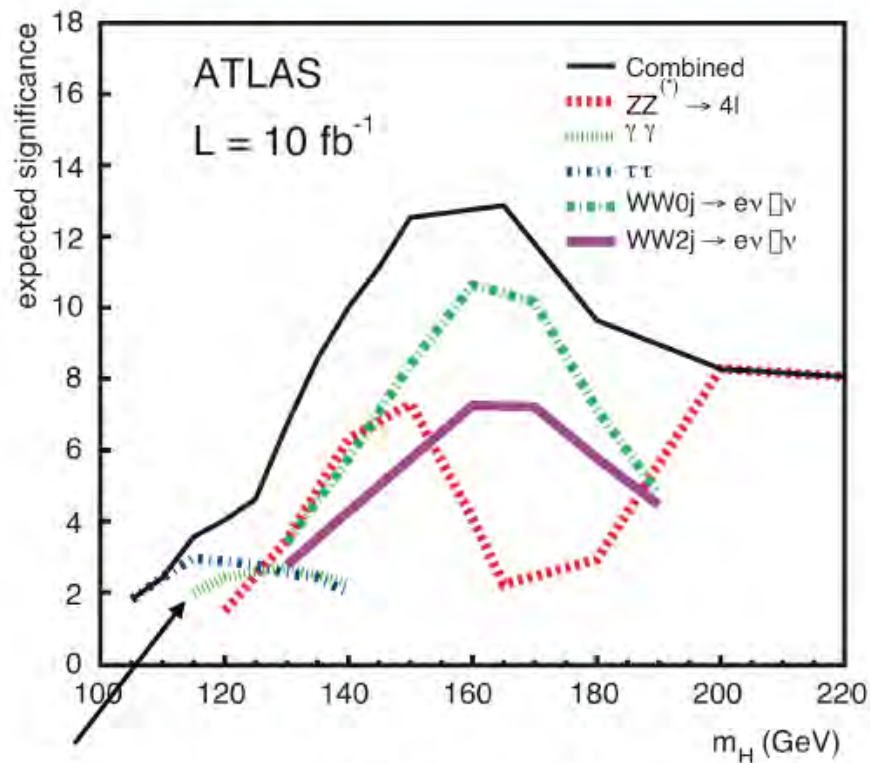


衝突)



# SM Higgsの発見能力

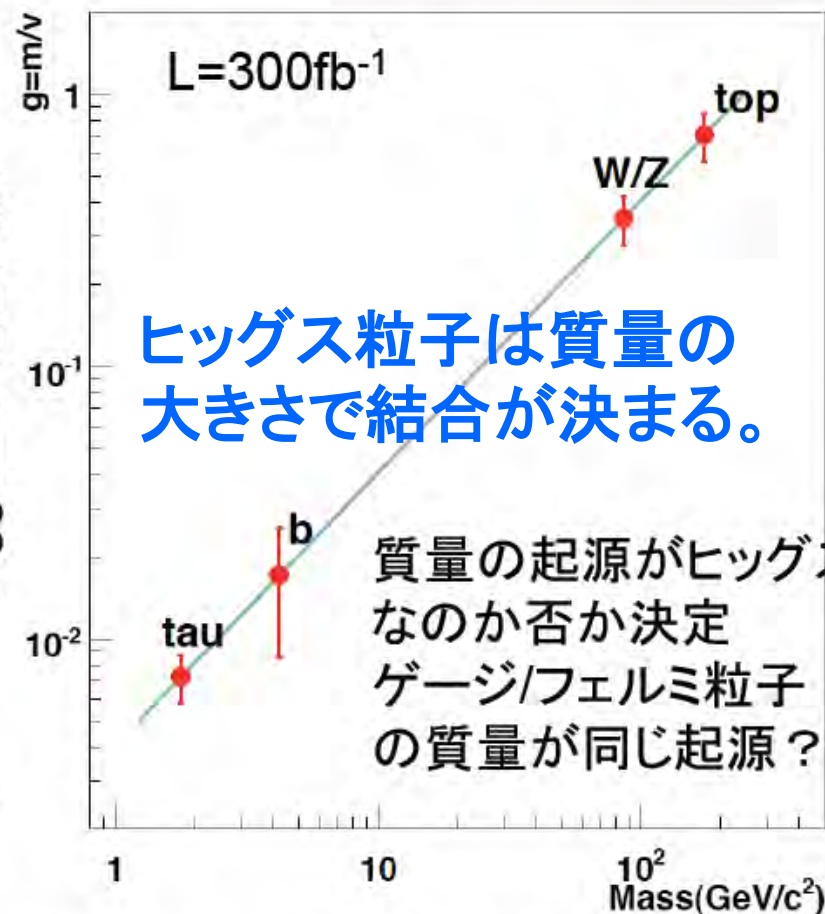
# 質量の起源の解明



H->γγがもっと良くなる。(ジェットの結果まだ)  
(3σ @L=10fb<sup>-1</sup>ほど)

L=10fb<sup>-1</sup>程度で5σ以上  
→ **2013年頃?**

Higgsとの結合定数



ヒッグス粒子は質量の  
大きさで結合が決まる。

質量の起源がヒッグス  
なのか否か決定  
ゲージ/フェルミ粒子  
の質量が同じ起源?

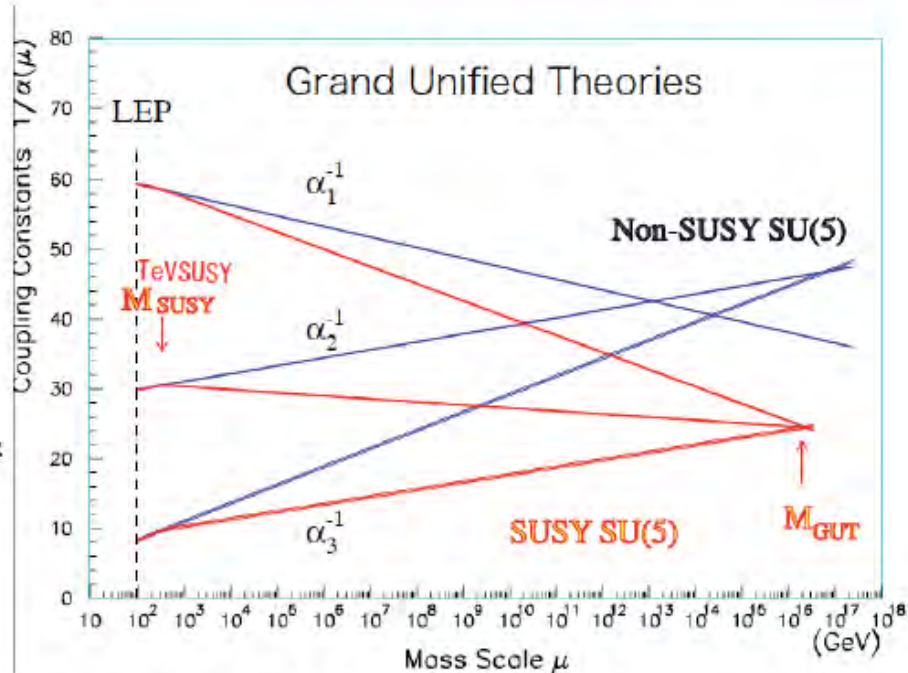
何故、フェルミオンの結合定数(湯川)が  
こんなに違うのか? 世代の意味?  
何故、Higgs ポテンシャルが  
自発的破れたか?



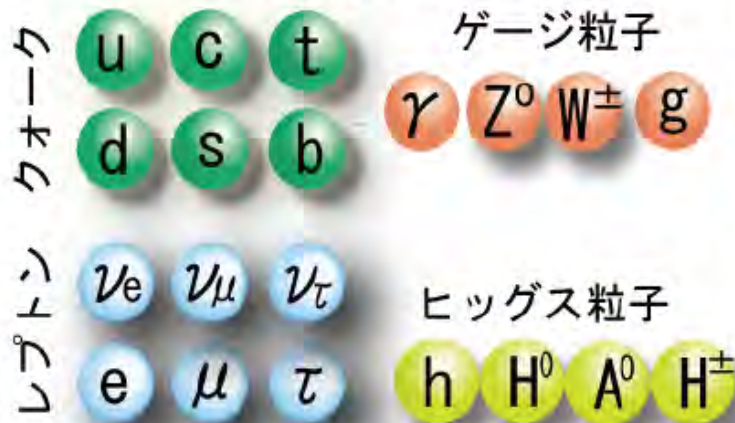
# SuperSymmetry

TeV 程度質量をもつ超対称性粒子の御利益

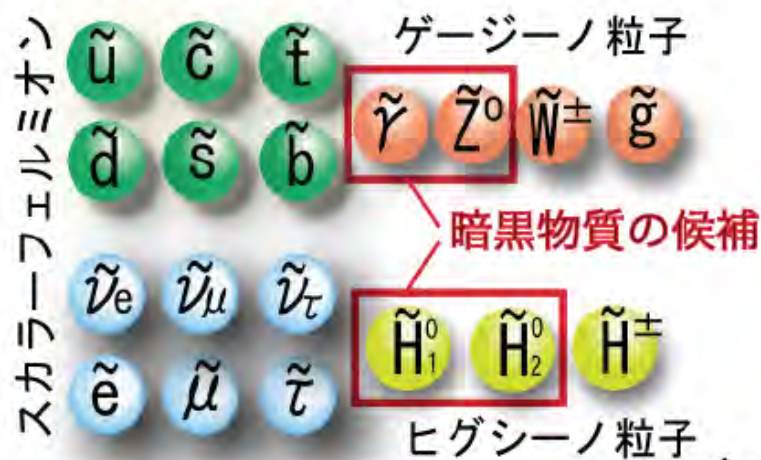
- 力の大統一(GUT)を実現
- 一番軽い超対称性粒子は安定  
(暗黒物質の良い候補)
- スカラー場(ヒッグス)の質量を対称性で制御(2次発散の抑制)
- 局所SUSY - 重力を取り込んだ理論



## 通常の素粒子



## 超対称性粒子



ヒッグス、超対称性粒子は未発見

Spin 1/2ずれた”SUSY粒子”

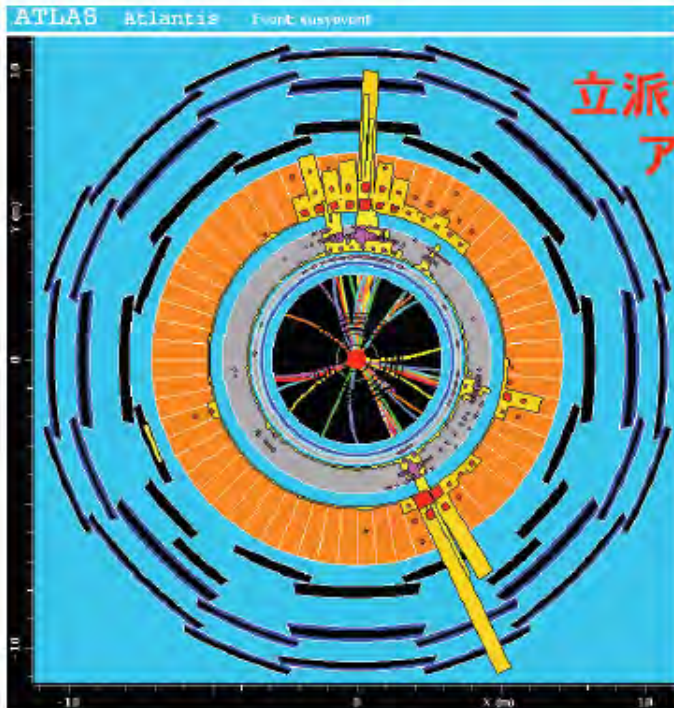
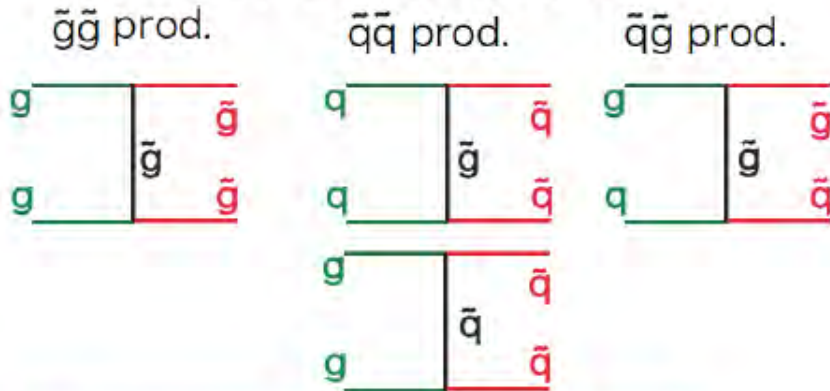






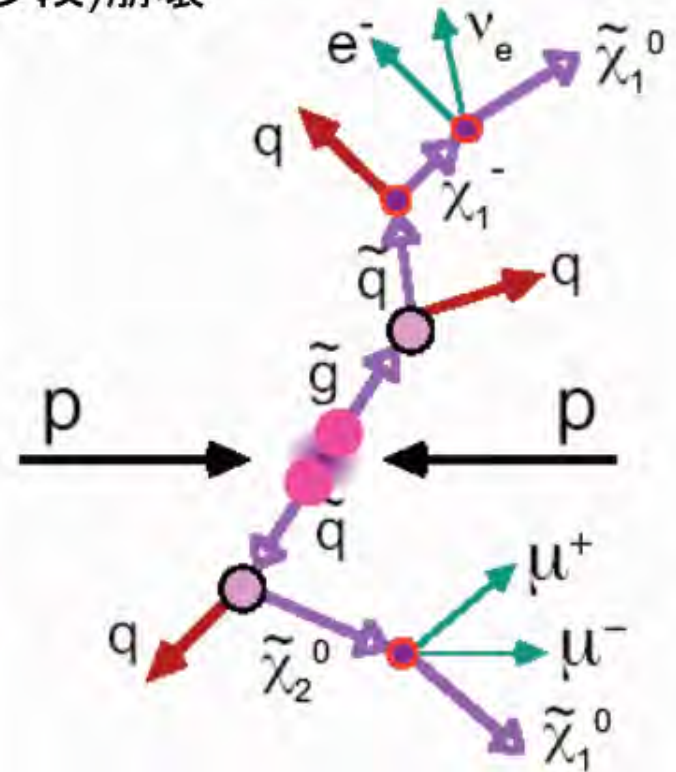
# 期待される Events topology

強い相互作用で生成



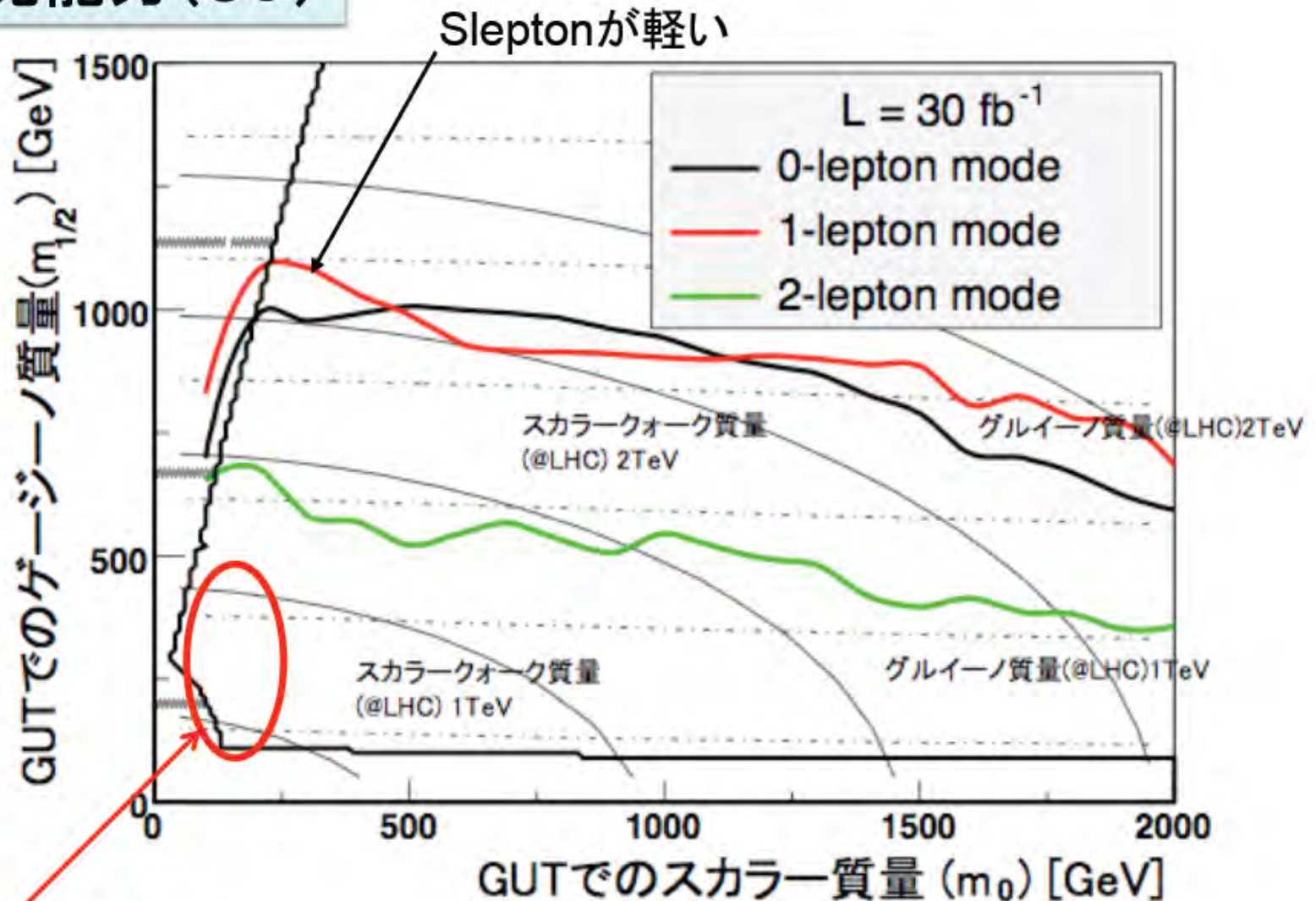
立派でアンバランス

カスケード: より軽いSUSY粒子へ (多段)崩壊



LSP:一番軽いSUSY粒子 安定でニュートリノの様に弱い相互作用 検出できない  
 高い運動量を持ったジェット 複数  
 LSPが最後2個 → 消失運動量 ( $mE_T$ )

# 発見能力(5 $\sigma$ )



暗黒物質として  
都合がよい領域  
(2010-11頃にカバー)

1.5 TeVまで発見  
2-2.3 TeV  
2.7 TeV

$L=1\text{fb}^{-1}$   
 $L=30\text{fb}^{-1}$   
 $L=300\text{fb}^{-1}$



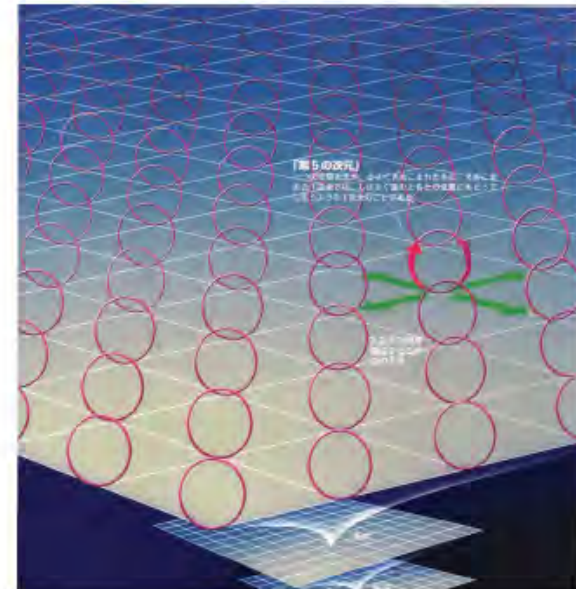
# 余剰次元

何故、重力が他の3つの力と較べて $10^{-40}$ も弱いのか？



重力子は、全空間を自由に運動、他の素粒子は、3次元の膜にはりついている。  
重力子がこの膜に来たときだけ感じる  
(重力が見かけ上、弱くみえる。)

余剰次元:小さくコンパクト化しているので  
日頃は感じない。 LHC は  $<0.1\text{nm}$  を探る。

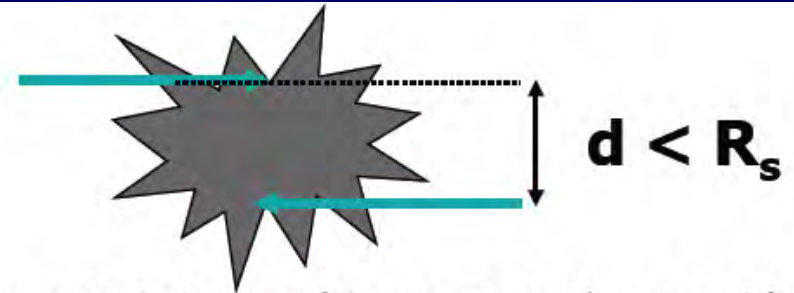


# ミニブラックホール

余剰次元nまで含めた重力定数  
 $M_P$  (TeVオーダーの重力定数)  
 シュバルツシルド半径

$$R_S = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[ \frac{M_{BH}}{M_P} \left( \frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

BHになる下限  $M_{TH} \sim 4-10 M_P$



$R_s$ より小さい距離で2つのパートンが衝突すると ミニブラックができる。

衝突するパートンの不変質量  $M_{BH}$   
 (Black Holeの質量)

$M_{BH} \gg M_P$  でないと量子重力の効果大  
 予言能力ない 別冊サイエンス156より

微小ブラックホールの短い一生：発生から消滅まで

発生

質量: 10 TeV  
時間: 0 ~ 1 ~ 10<sup>-26</sup> s

"毛"がなくなって段階

質量: 10 ~ 8 TeV

スピンドアウンの段階

質量: 8 ~ 5 TeV  
時間: 1 x 10<sup>-26</sup> ~ 1 x 10<sup>-25</sup> s

適切な条件で2個の粒子・束は滅んで消えていく(ある)が衝突するとブラックホールができる。衝突前後は対称性を保ちながら、回転や振動をしたり電磁波を帯びたりしている可能性がある(衝突と質量はぶよぶよの球。1 TeVは約 10<sup>-26</sup> kgの質量に相当するエネルギー)。

状態が安定するにつれて、ブラックホールは重力波と電磁波を放射する。物理学者のホイーラー(John A. Wheeler)の表現を借りれば、ブラックホールには「毛」がなくなる。電磁とスピンのみで特徴づけられ、その他には別の特色もない状態となる。荷電粒子を放射するにつれ、電荷も放射に放出していく。

ブラックホールは放射を放し、もはや「黒く」はなくなる。当時は放射がすべてスピンを奪われ、そのため、ブラックホールは自転速度を落とし、最終的に静止になる。最終的にはブラックホールの寿命が尽きて消滅する。

シュバルツシルド段階

質量: 4 ~ 2 TeV  
時間: 2 x 10<sup>-26</sup> ~ 20 x 10<sup>-26</sup> s

プランクスケール段階

質量: 2 ~ 0 TeV  
時間: 20 x 10<sup>-26</sup> ~ 22 x 10<sup>-26</sup> s

ミニブラックホールは極めて小さなサイズで、それは量子重力効果と放射の両方を生じ、中心に、放射層の「パイ」層(中心)の中に、衝突によって生まれた粒子(エネルギー)が閉じ込められ、これらが質量の増大(重力)の中心に集まる。

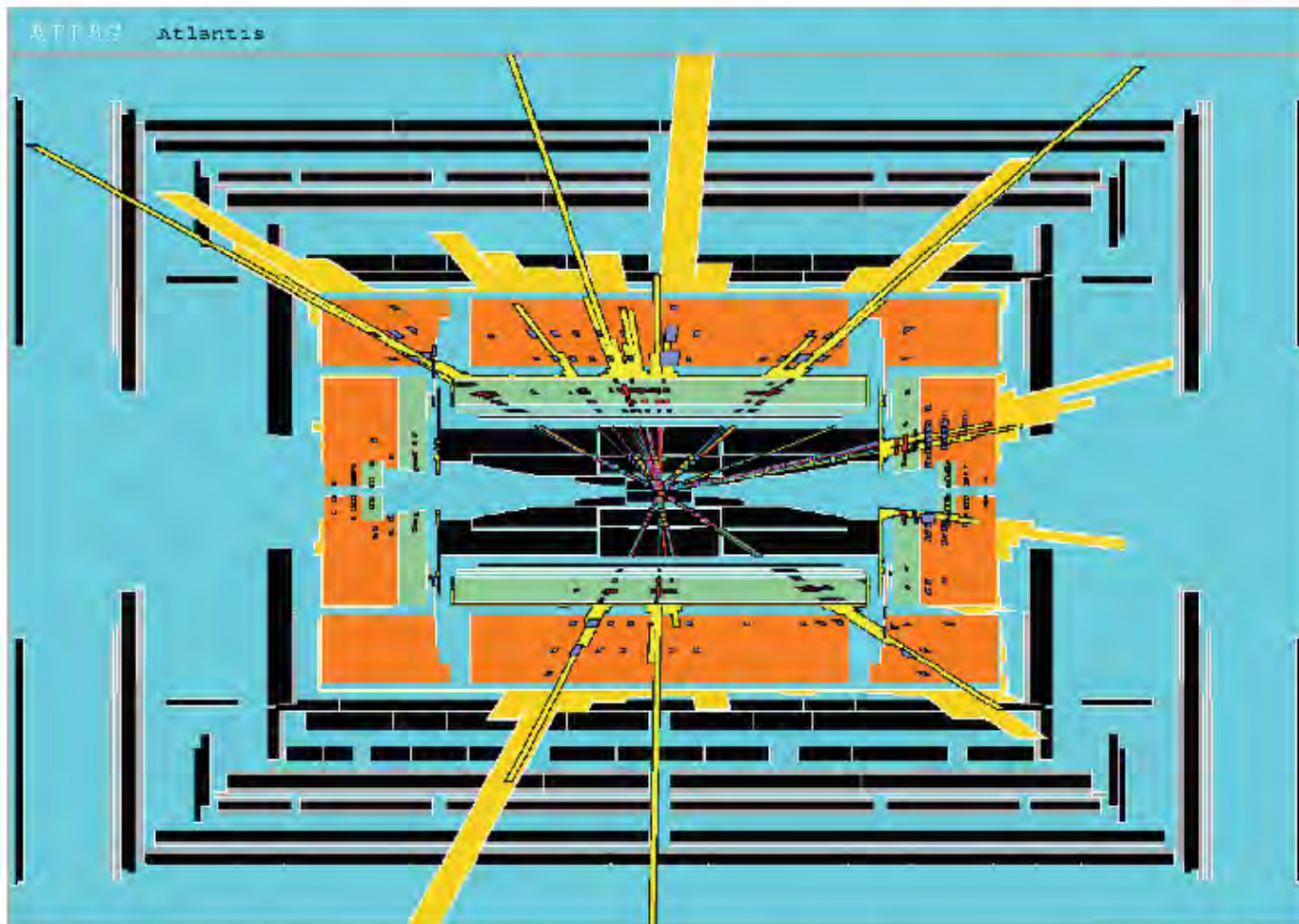
スピンドアウつたブラックホールは放射にも伴って寿命が尽き、質量の面で特徴づけられるようになる。その質量が尽きる。放射や電磁波を帯びた粒子の放出がすべてであるように放出していく。

質量がプランク質量(プランクスケール)に達すると、ミニブラックホールは一般相対論から量子重力へと移行する。この段階によると、ミニブラックホールは特殊な量子重力効果を持つと考えられる。

- (1) 生成  $M > M_{TH}$  (2) 毛を失い (3) スピンを失い (4) ホーキング放射 (5)  $M_P$  付近 → 量子重力効果  
 これ以下だと string ball? 熱化しないと 2body? 効果が重要



# ホーキング輻射と期待される事象



- 数百GeV の粒子が多数放出
- 粒子の種類は民主的 (model依存)
- まるいeventが特徴 (バランス、多い粒子数)
- 発見は容易 (BGは少ない)

下限が9TeVくらいまで発見可能

$M_p=1\text{TeV}, M_{BH}=5\text{TeV}$

n=2 シミュレーション

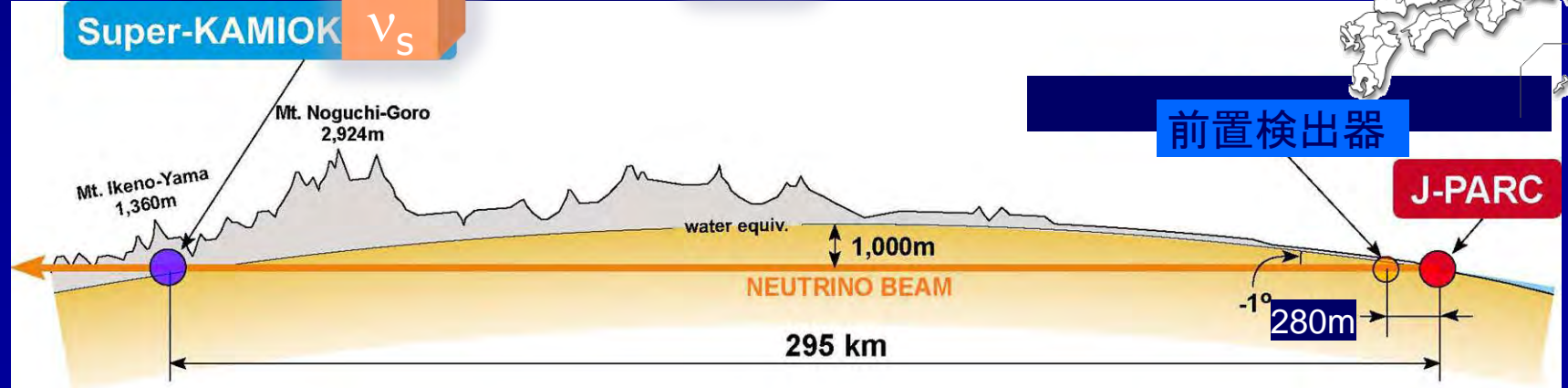
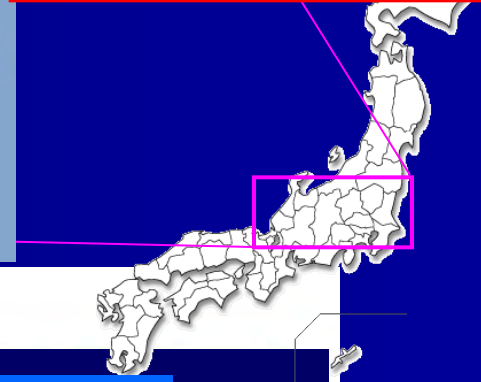
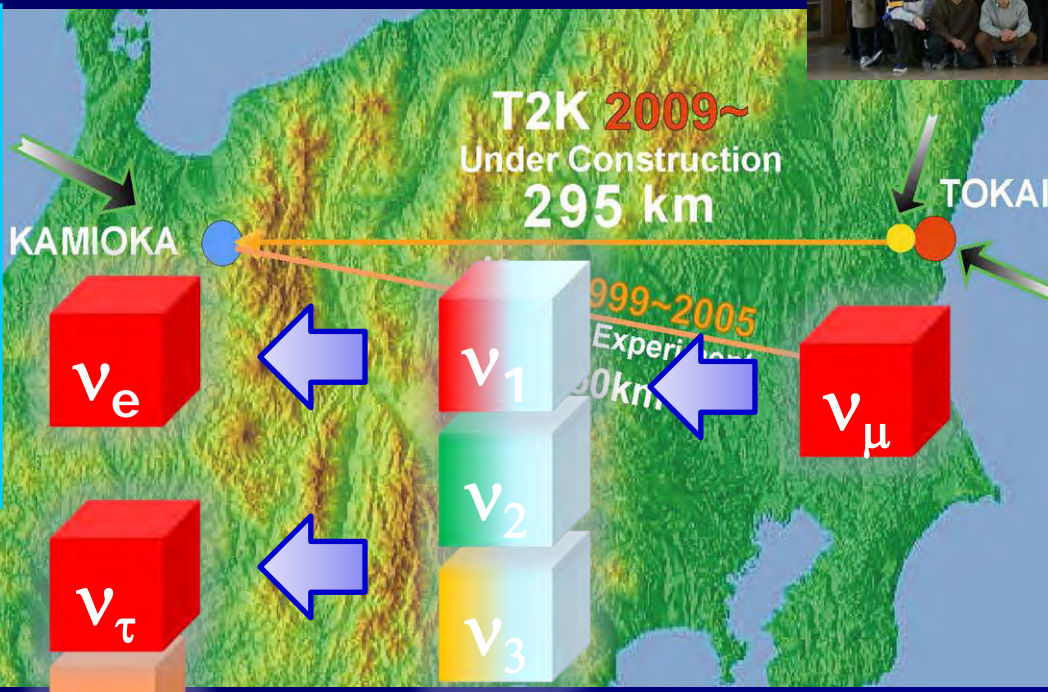
$$T_H = M_p \left[ \frac{M_p}{M_{BH}} \left( \frac{n+2}{8\Gamma((n+3)/2)} \right) \right]^{1/n} \quad \frac{dN}{dE} \propto \frac{(E/T_H)^2}{\exp(E/T_H) + c}$$

# J-PARC/T2K実験



# T2K実験

## Tokai-to(2)-Kamioka



# ニュートリノ

- 弱い相互作用しかしないので、観測が難しい。
  - 巨大検出器、ハイパワーニュートリノ源
- 質量が非常に軽く(0.05eV以下→エネルギーにすると室温程度かそれ以下)、通常の方法では質量を測定できていない。
  - **ニュートリノ振動**、2重 $\beta$ 崩壊
- ニュートリノ振動を通して、ニュートリノとクォークの混合の比較が可能。
  - 超高エネルギー(GUTスケール: $>10^{15}$ eV)の物理

1998年のスーパーカミオカンデによるニュートリノ質量の発見から飛躍的に進んでいる学問分野である。



# 小林・益川行列



## 小林益川行列

弱い相互作用の状態

a) The weak neutrinos must be re-defined by a relation

$$\left. \begin{aligned} \nu_e &= \nu_1 \cos \delta - \nu_2 \sin \delta, \\ \nu_\mu &= \nu_1 \sin \delta + \nu_2 \cos \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

The leptonic weak current (2.9) turns out to be of the same form with (2.1). In the present case, however, weak neutrinos are *not stable* due to the occurrence of a virtual transmutation  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  induced by the interaction (2.10). If the mass difference between  $\nu_2$  and  $\nu_1$ , i.e.  $|m_{\nu_2} - m_{\nu_1}| = m_{\nu_2}^{*})$  is assumed to be a few Mev, the transmutation time  $T(\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu)$  becomes  $\sim 10^{-18}$  sec for fast neutrinos with a momentum of  $\sim \text{Bev}/c$ . Therefore, a chain of reactions such as<sup>10)</sup>

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (2.19a)$$

$$\nu_\mu + Z(\text{nucleus}) \rightarrow Z' + (\mu^- \text{ and/or } e^-) \quad (2.19b)$$

is useful to check the two-neutrino hypothesis only when  $|m_{\nu_2} - m_{\nu_1}| \lesssim 10^{-6} \text{ Mev}$

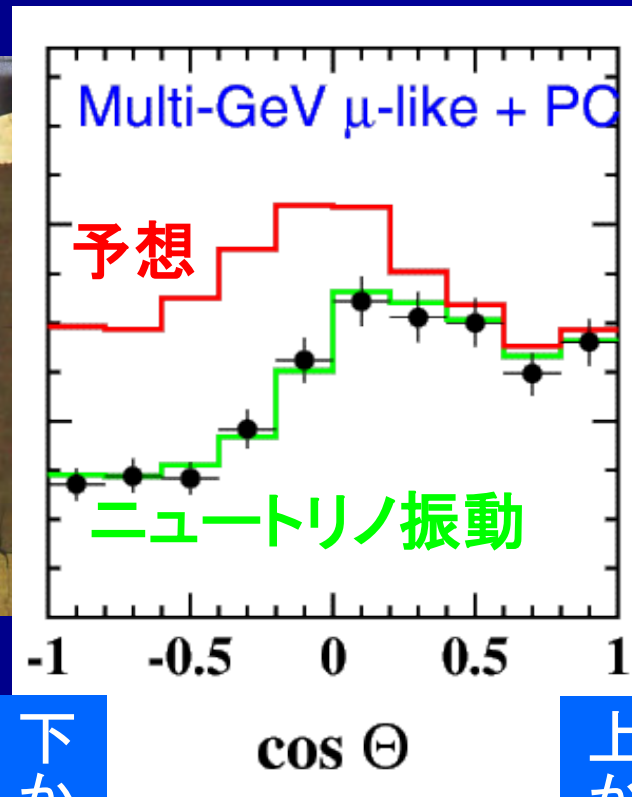
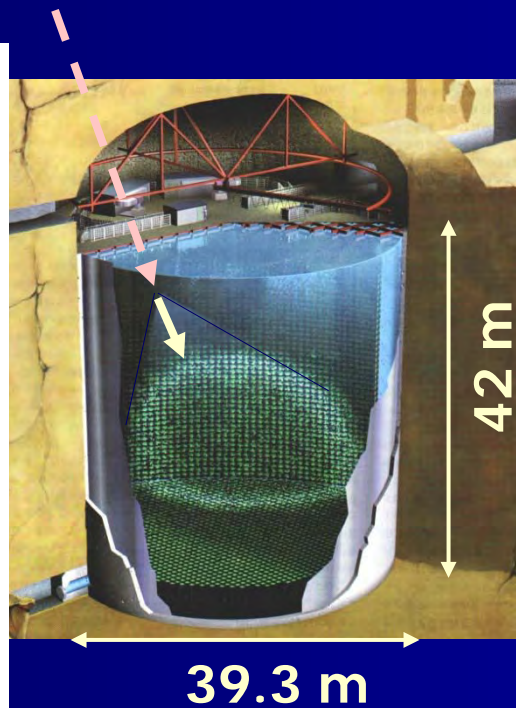
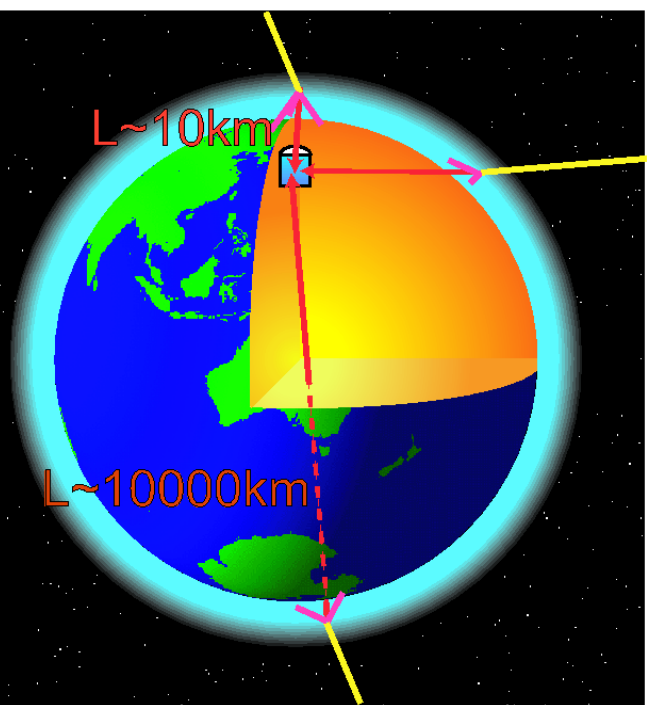
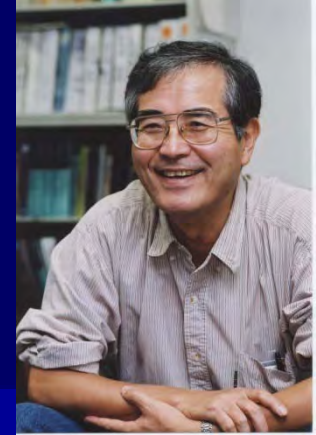
音速は

作用の状態

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

状態

# ニュートリノ振動の発見(1998)



下から

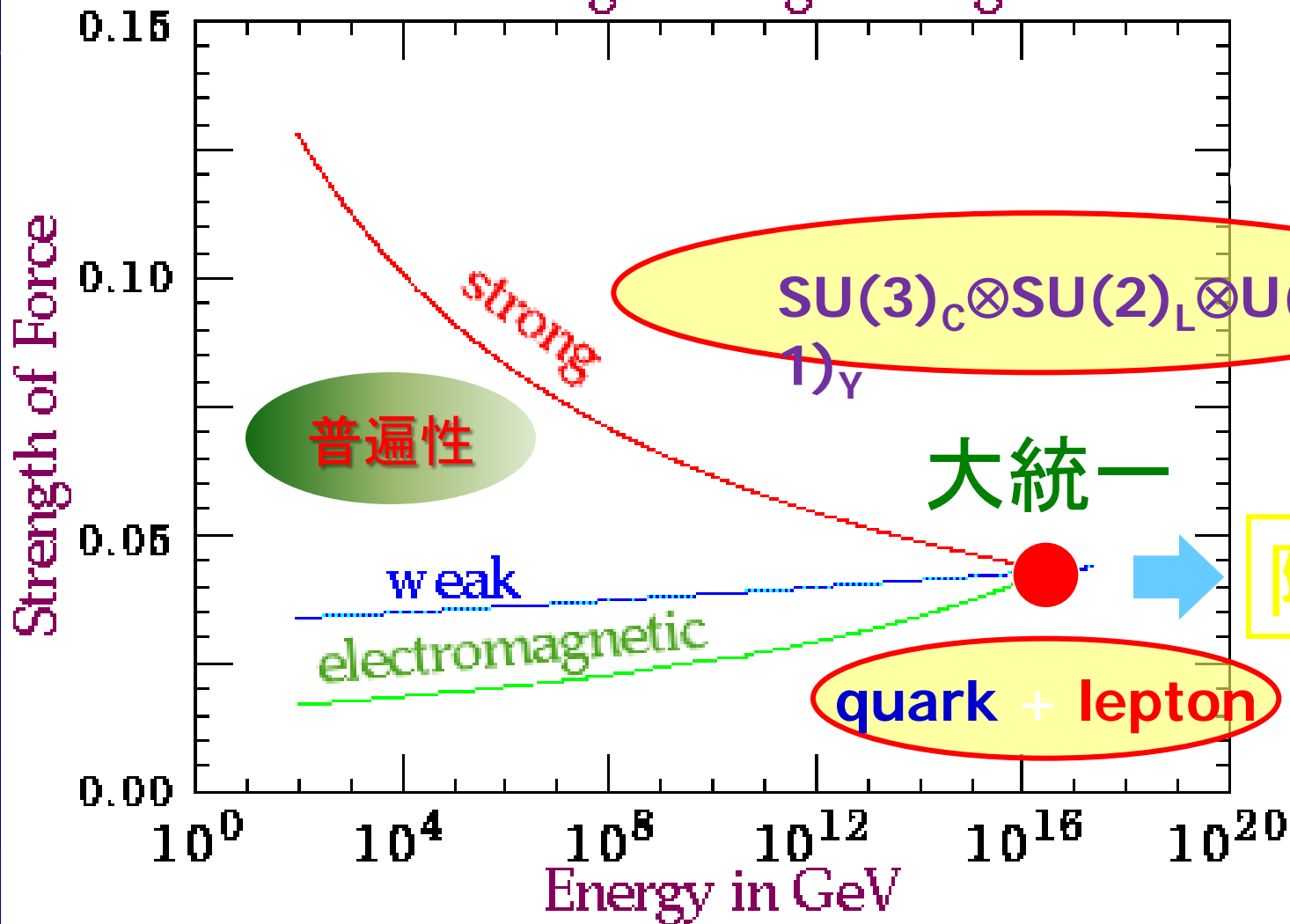
上から

予想外



# 大統一理論に向けて

Forces Merge at High Energies



# 陽子崩壊の探索



## カミオカンデIIの構造

カミオカンデIIは、岐阜県神岡町の神岡鉱業遺跡鉱山地下1000メートルに設置されている。測定器は大きな円筒状の水罐で、内部に約1000個の光電子増倍管が取りつけられている。水罐に3000トンの純水を入れ、その中で高エネルギーが放出されたとき（チェレンコフ光）を光電子増倍管で検出する。水中の陽子が崩壊すると多くの高エネルギー中性子や陽子が発生し、ニュートリノによっておこされる高エネルギー反応を検出するのが主な目的である。

## 大気ニュートリノが最大のバックグラウンド

### ■ シグナル:



### ■ バックグラウンド:



(注) n, p は測定器で見えない。

超新星爆発

予想外

## 大気ニュートリノの研究を!

⇒ ニュートリノ振動発見

予想外



# 太陽ニュートリノ

## ■ 太陽ニュートリノ観測の動機

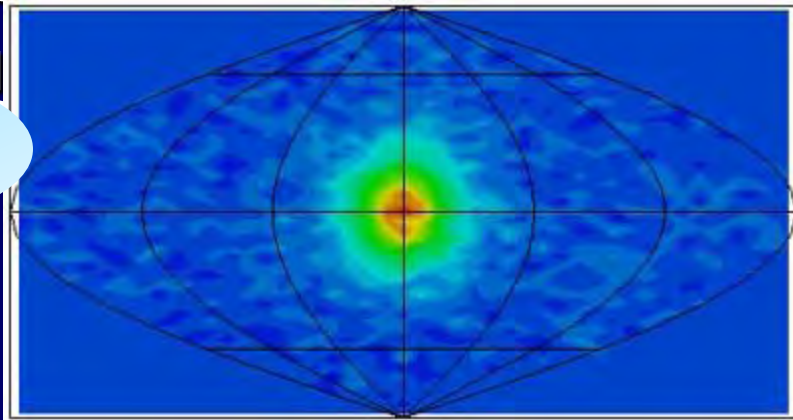
普遍性

- Test the solar model (1960's) (J.N.Bahcall, "Neutrino Astrophysics", Cambridge University Press, 1989, page 488)

## ■ 太陽ニュートリノ観測

- 観測値が予想の1/3
- Kamiokande, Super-Kamiokande

観測  
予想外



# ニュートリノ振動

??? LSND anomaly ???

大気ニュートリノ

$\nu_\mu$  deficit ( $\nu_\tau$  appearance)

$\Delta m_{23}$  region

- $\Delta m_{23} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

- $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1.0$

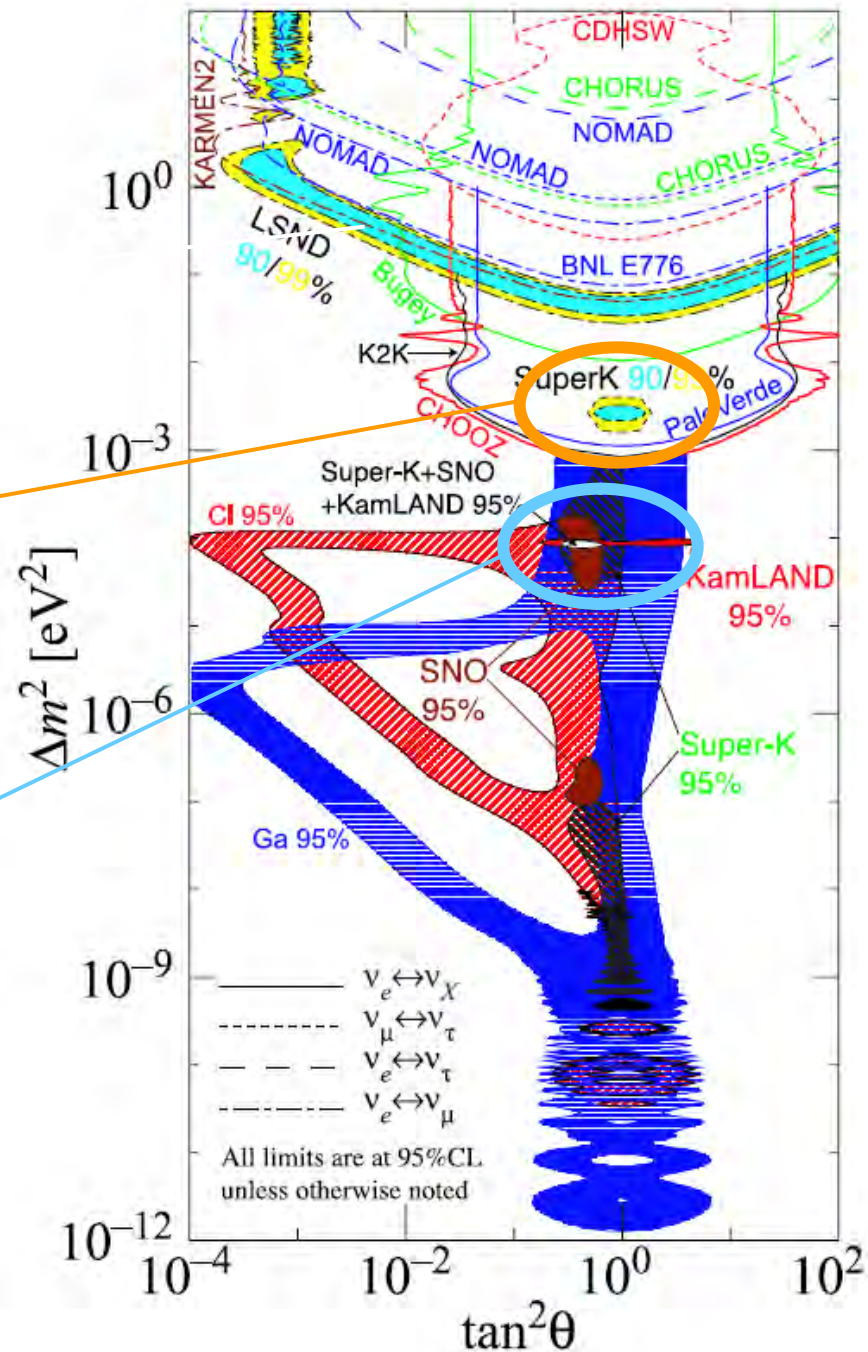
太陽ニュートリノ

$\nu_e$  deficit (NO NC deficit)

$\Delta m_{12}$  region

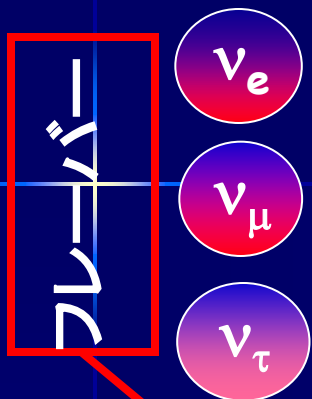
- $\Delta m_{12} \sim 7.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$

- $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.82$

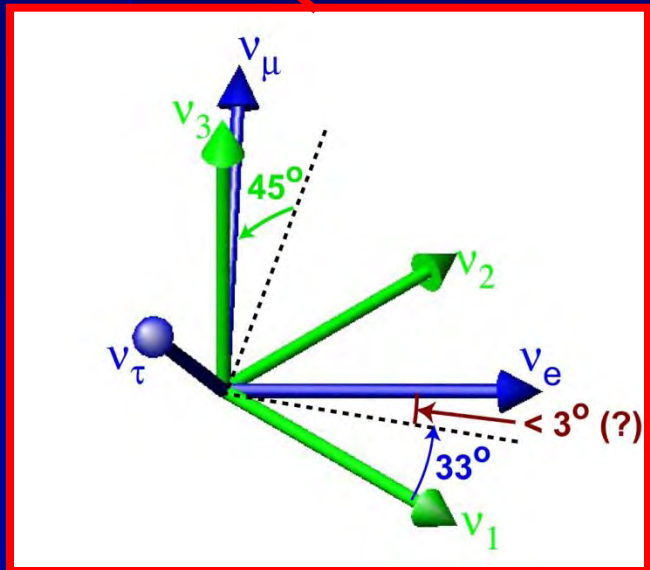
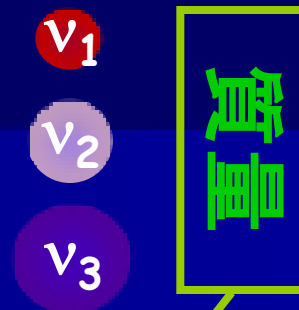




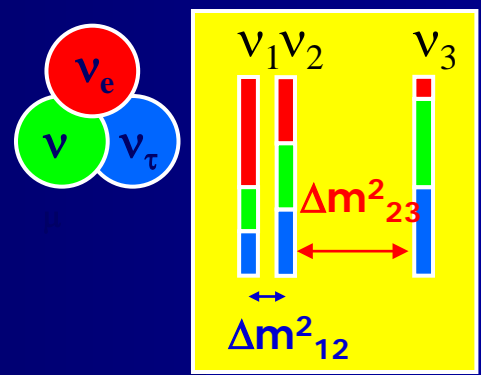
# ニュートリノ質量とニュートリノ混合



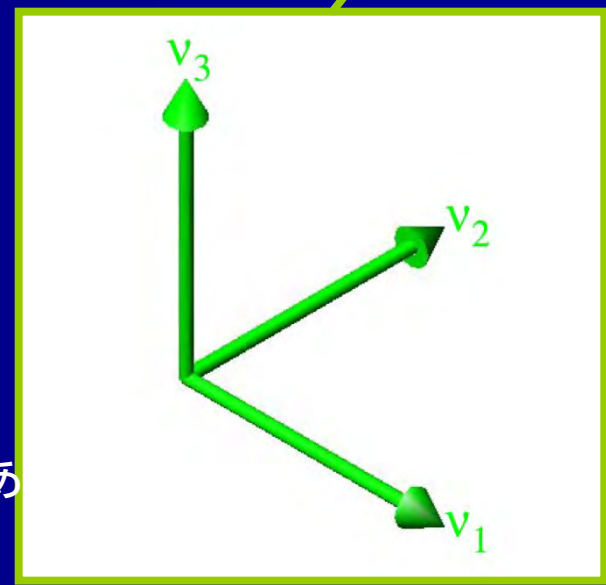
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{MNS} V_M^{CP} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$m_3 > m_1, m_2$  の場合

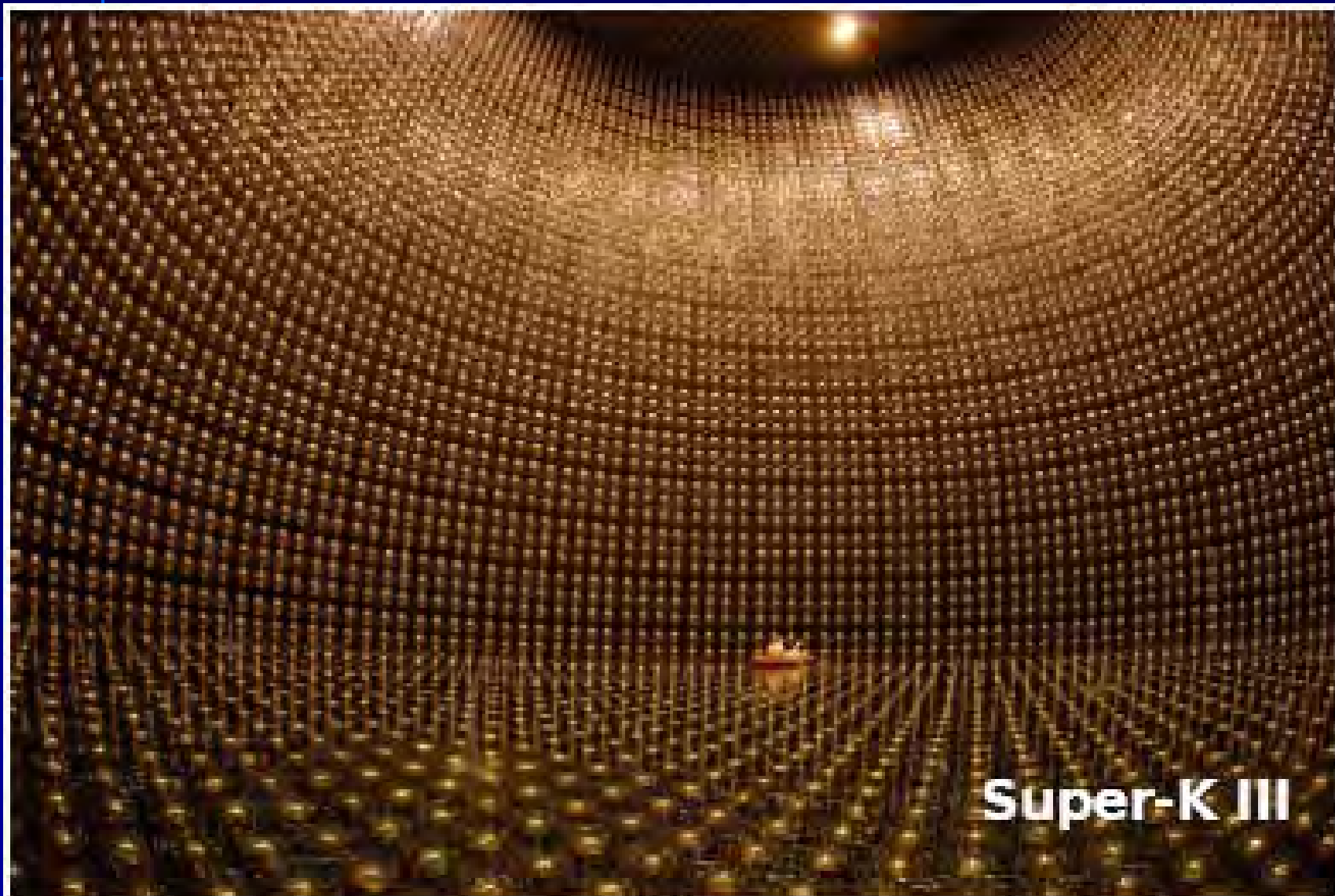


( $m_3 < m_1, m_2$  の可能性もあ



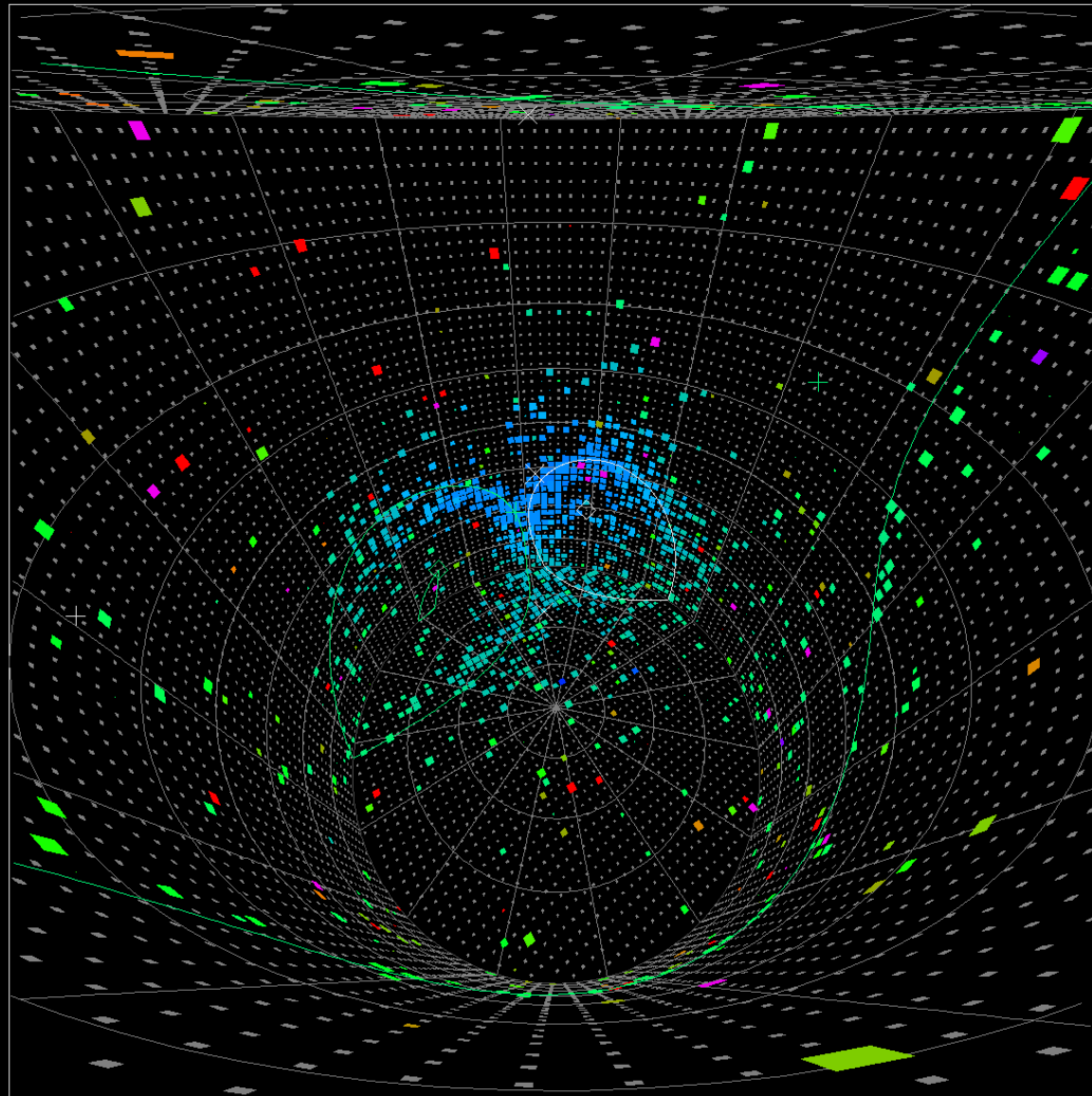
超微小なニュートリノ質量の情報を得る現在唯一の手段 ⇒ ニュートリノ振動

# スーパーカミオカンデ IV





# ニュートリノ事象 (T2K実験)



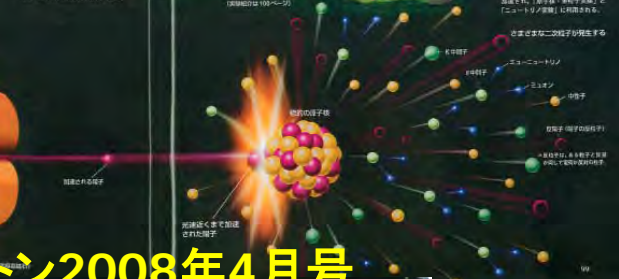
# 注目の実験

# 物質・生命のなぞに新加速器がせまる

## 大強度陽子加速器計画「J-PARC」を徹底紹介

世界最高レベルの性能をもつ、多目的な大型の粒子加速器「J-PARC(ジェイパーク)」が2008年末に稼働する。J-PARCでは、陽子を光速近くまで加速して標的の原子核にぶつけ、中性子や中間子、ミュオンなど、さまざまな「二次ビーム」を生む。これらの高強度の二次ビームを使い、最先端の原子核・素粒子実験を行ったり、燃料電池に使われる素材やタンパク質の構造を調べたりする。J-PARCの全貌を紹介する。

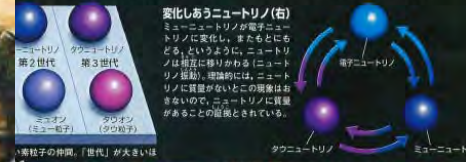
協 高エネルギー加速器研究機構  
日本原子力研究開発機構



## ニュートリノ2008年4月号

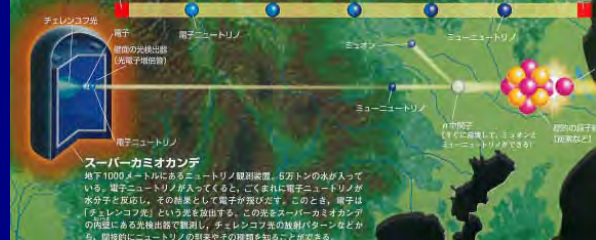
### 捉えたニュートリノの“変身”をとらえる

スーパーカミオカンデによって一躍有名になったニュートリノ。地球すらも貫通して、三つの種類がある。奇妙な話だ。ニュートリノは、しばらくすると、ほかに変身することが、宇宙から飛来するニュートリノや、実験によって確かめられている。理論的には、ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量をもたないとおきない。しかし、素粒子物理学の標準模型(基礎となった理論)では、ニュートリノを質量ゼロの素粒子としてあつかっていた。つまり、ニュートリノ振動は従来の理論をこえた現象であり、この解明は、物理学にあらたな地平をひらくと期待されている。



### 飛行中に変化するニュートリノ

J-PARCで生成したミュオンニュートリノのビーム(多数のミュオンニュートリノ)は、途端に距離に応じて、ある割合で電子ニュートリノに変化する(ニュートリノ振動)。イラストでは、その割合の割合を肩の落ち方のようにイメージできると。



ニュートリノのなぞにせまる「T2K実験」 J-PARCから2005年開始された「スーパーカミオカンデ」にニュートリノを打ち込み、「ニュートリノ振動」を観測する。高エネルギー加速器研究機構などが2004年まで行った「T2K実験」では、電子ニュートリノや陽子ニュートリノの割合が異なる。T2Kでは、約1000兆個の電子ニュートリノビームで、質量の少ないミュオンニュートリノから電子ニュートリノへの変化を世界ではじめてとらえることをめざす。

## 超微小質量の巨大インパクト

短期集中連載: カミオカンデとスーパーカミオカンデ 物理学を変えた四半世紀 2  
素粒子論の標準モデルを超えて……100ページ

中島林彦(編集) / 協力 伊藤洋二(東京大学)

盤石だと思われていた素粒子理論の標準モデルに、最初の大きな亀裂が走ったのは1998年のことだった。大ニュースの発信地は日本、しかも東京から遠く、岐阜県にあり、その名は「スーパーカミオカンデ」だ。

れた素粒子論の標準モデルに、最初の大きな亀裂が走ったのは1998年のことだった。大ニュースの発信地は日本、しかも東京から遠く、岐阜県にあり、その名は「スーパーカミオカンデ」だ。



2008年05月号  
革命前夜  
物理学  
史上最強の加速器 LHC稼働へ  
国際リニアコライダー  
日本の進むべき道は



短期集中連載  
物理学を変えた  
ニュートリノ質量の  
発見

## 超微小質量がもたらした

- スーパーカミオカンデは、宇宙(気ニュートリノ)の精密観測による現象が起きていることを発見した。
- ニュートリノ振動は、ある種類の現象で、ニュートリノが非常に「ニュートリノは質量ゼロ」とする
- スーパーカミオカンデの大発見は現在、ニュートリノが質量を持つ

あなたの体に  
潜む“他者”

日本発の  
微粒子ICタグ

歌声の科学



# SCIBOONE LIFE



## 国際共同研究の実態



2008.8.18

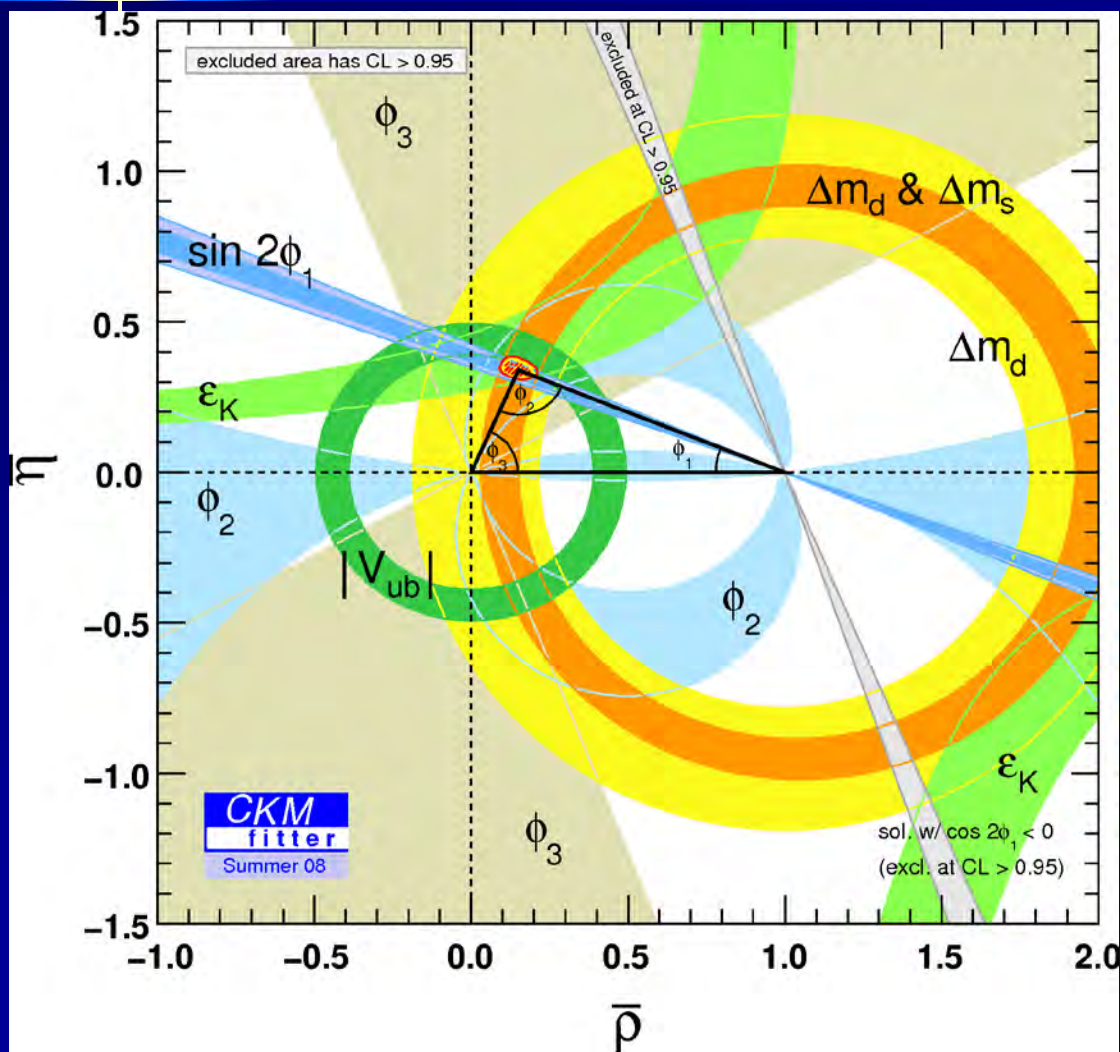


# Super-KEKB/Belle-II実験



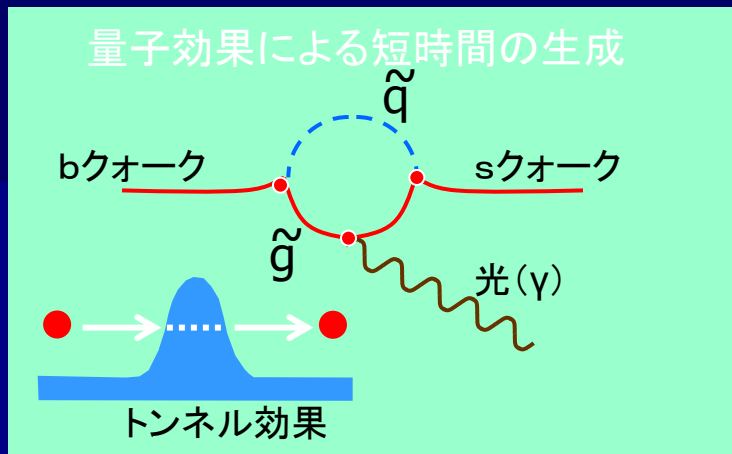
# Super-KEKB/Belle-II実験

## ■ 小林・益川理論を越えて!

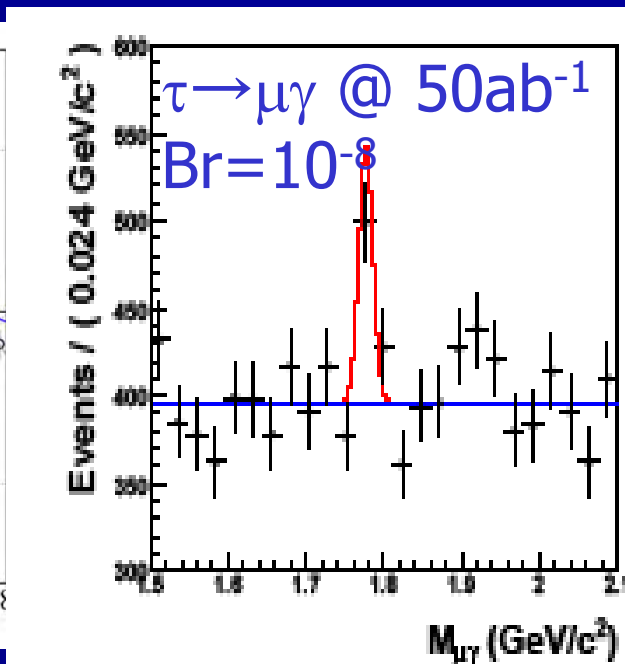
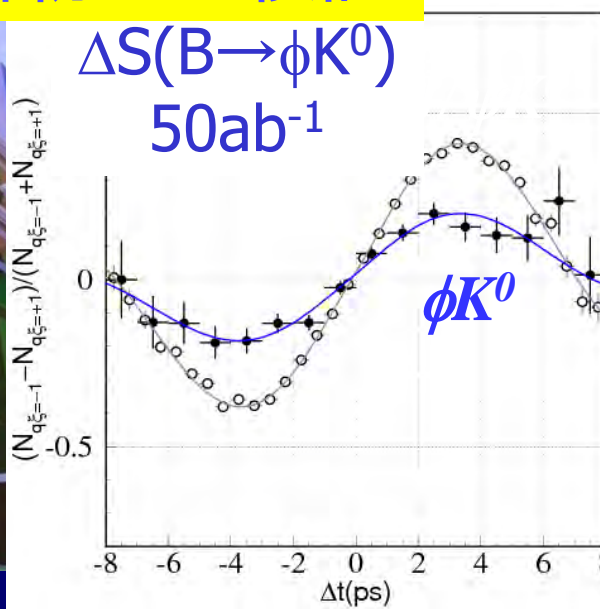


# Super B Factory 実験の目的

- 世界最高のKEKBのルミノシティーを約50倍にさらに増強。
- 第3世代の**B中間子とタウレプトン** (+チャーム)の崩壊に現れる新物理を探索。



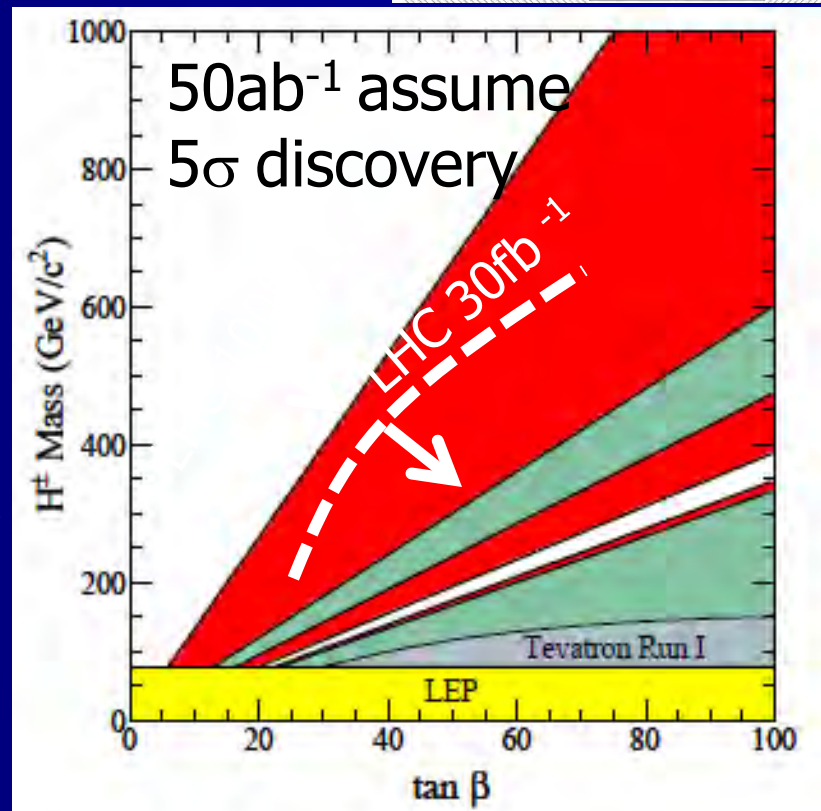
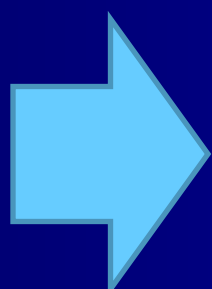
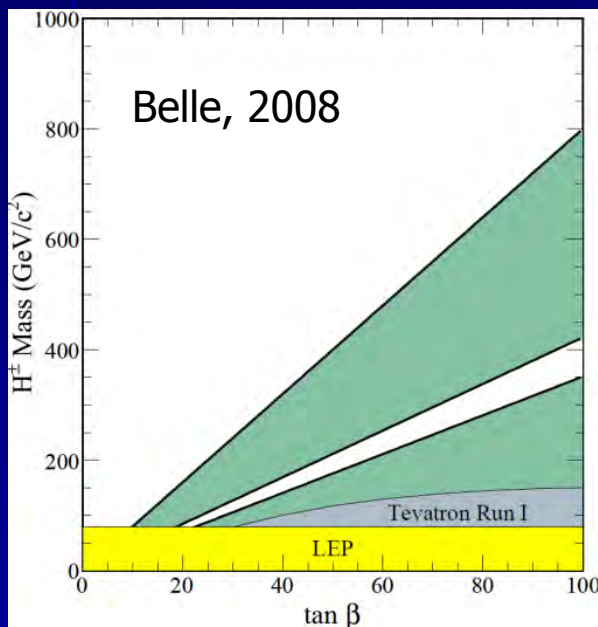
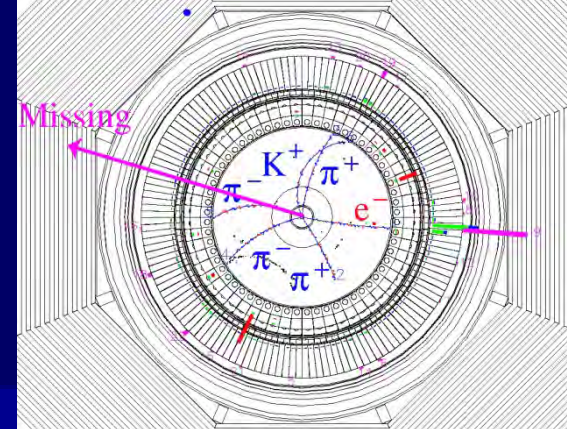
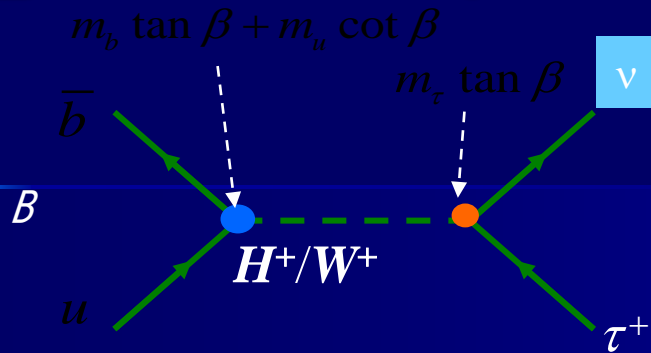
## 超対称性などの新物理の検証





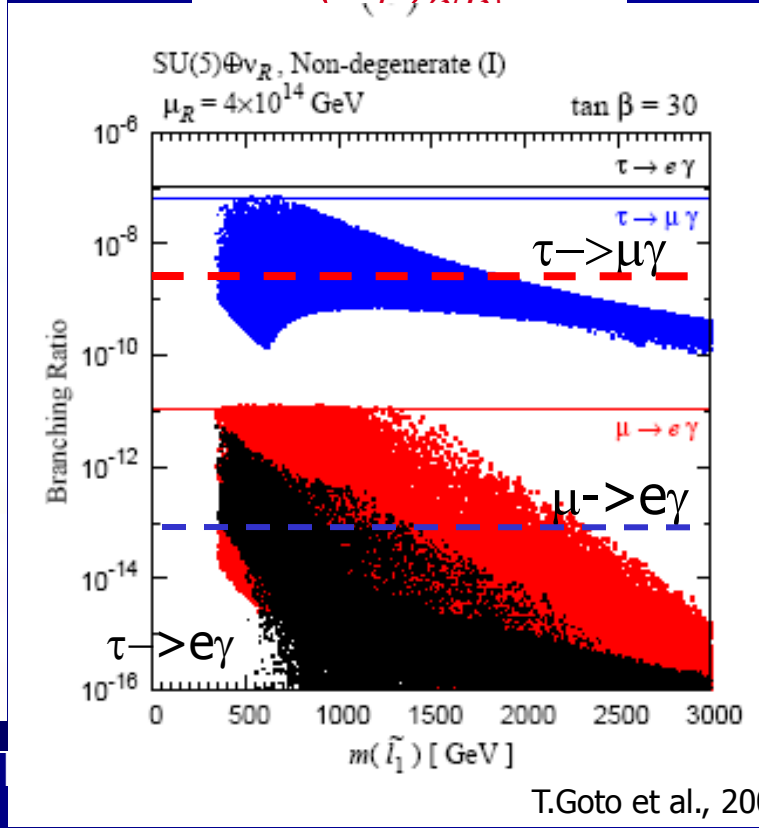
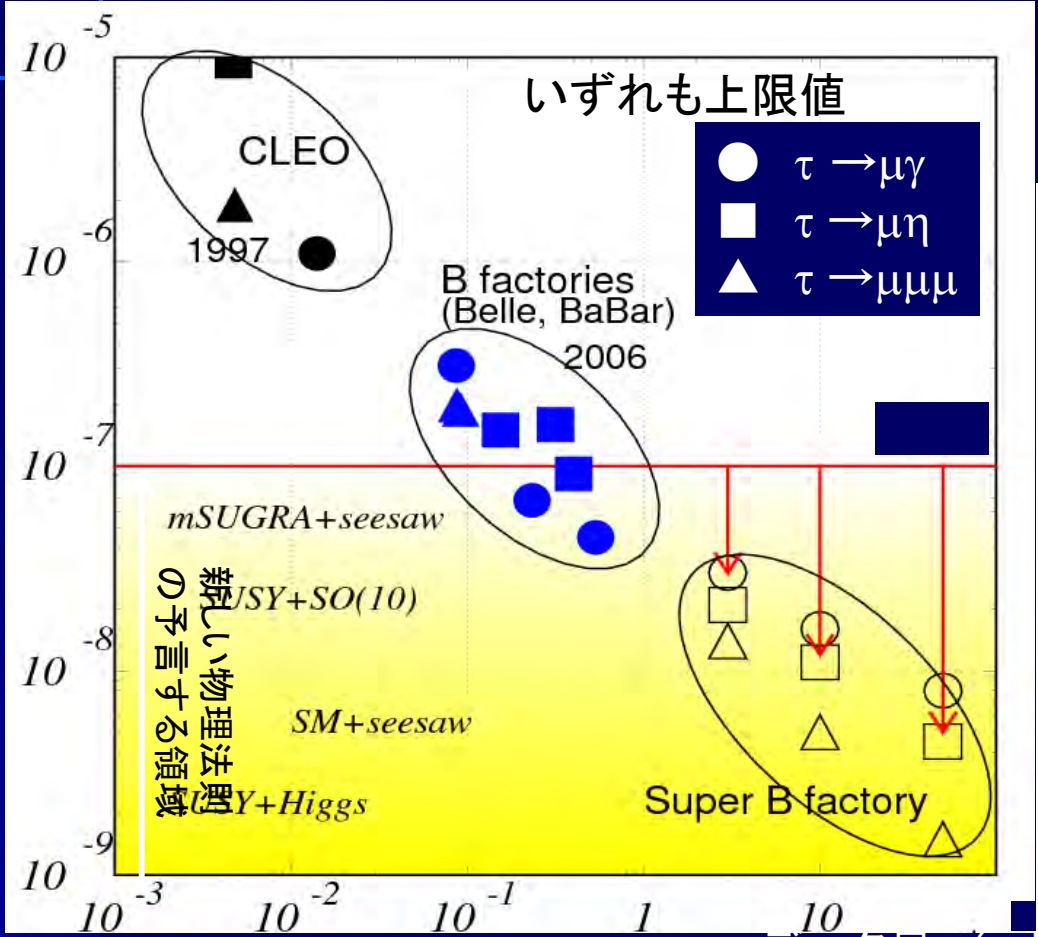
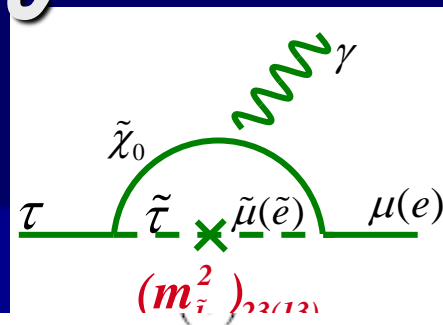
# 荷電ヒッグス粒子の探索

$B \rightarrow \tau \nu$



- 超対称性理論は荷電ヒッグスを予言
- $B \rightarrow \tau \nu / D \tau \nu$  は  $b-H^\pm - u$ 、 $b-H^\pm - c$  結合を測定する唯一の手段

# レプトンフレーバーの破れ



T.Goto et al., 2007

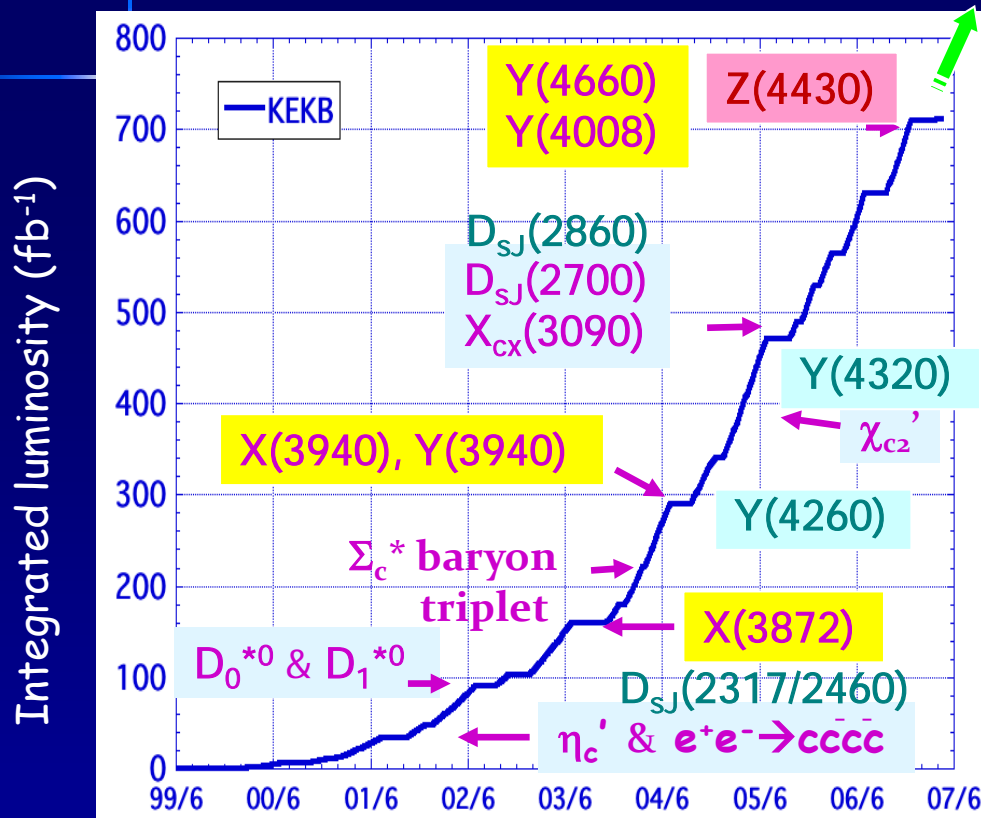
崩壊分岐比

データ量 (a)  
 現在のBファクトリーの到達範囲  
 SuperKEKBの範囲

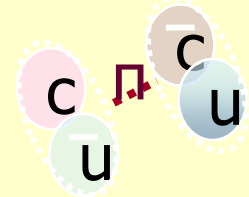


# エキゾチックハドロン

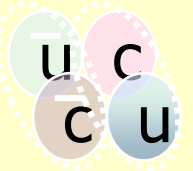
## Belle実験における新共鳴粒子の相次ぐ発見



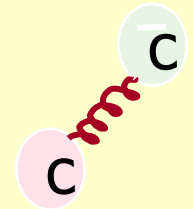
Molecular states



Tetra-quark



Hybrid



And more...

Super B-Factory では

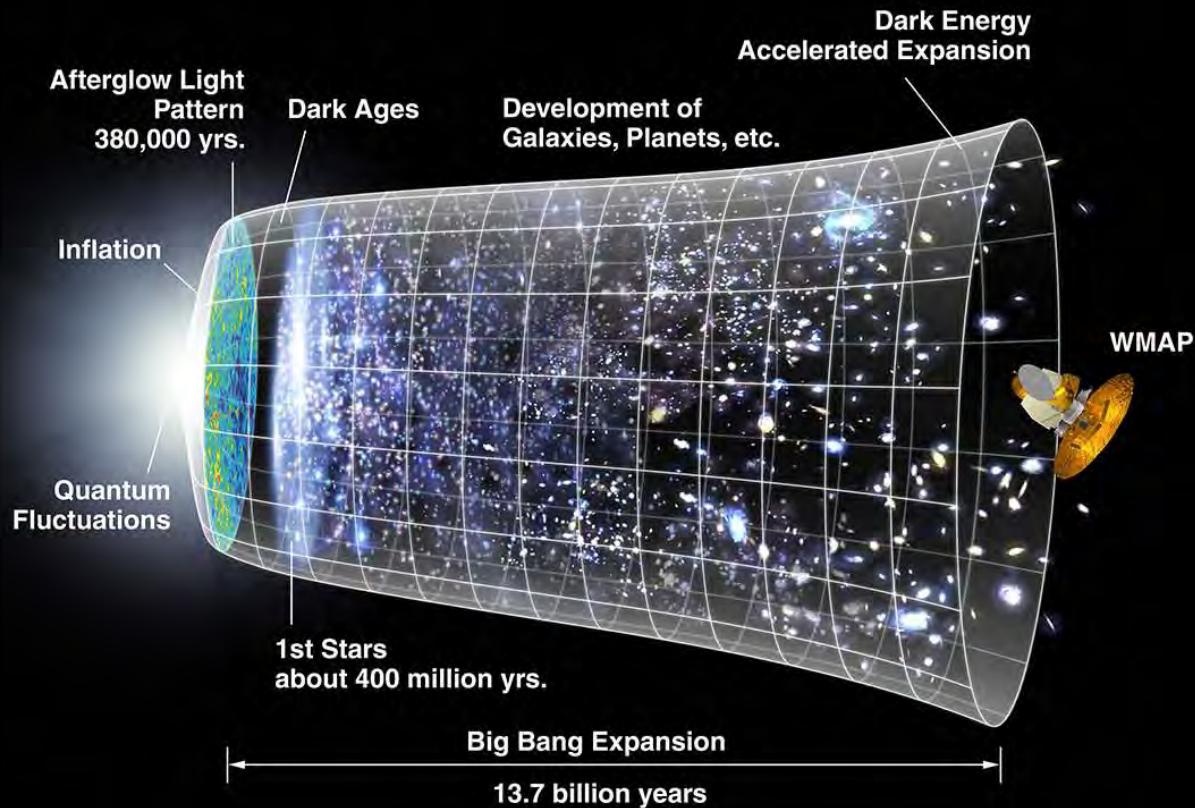
新たなエキゾチックハドロン状態の探索(ccus、ccud など)。  
エキゾチックハドロンの属性(スピン、パリティ)の測定。

# 最後に！

- 自然界/宇宙創成の神秘に迫れるか？



# 宇宙創成137億年



宇宙の最初はエネルギー(光)の塊

# 反物質はどこに消えたのか？



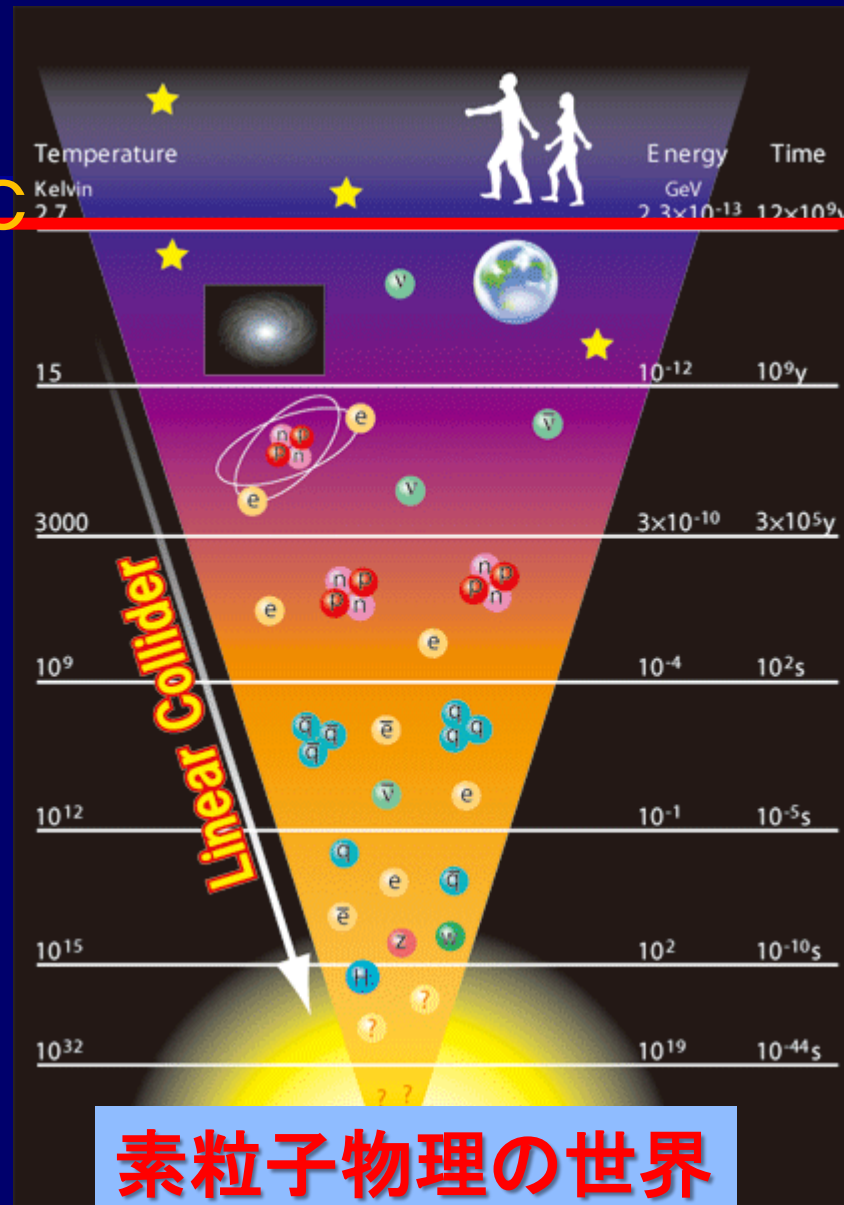
# 暗黒物質はいつ生まれたのか？



# 宇宙誕生後(ビッグバン後)、 10<sup>-10</sup>(0.1ナノ)秒の世界へ

2.7K = -271.3°C

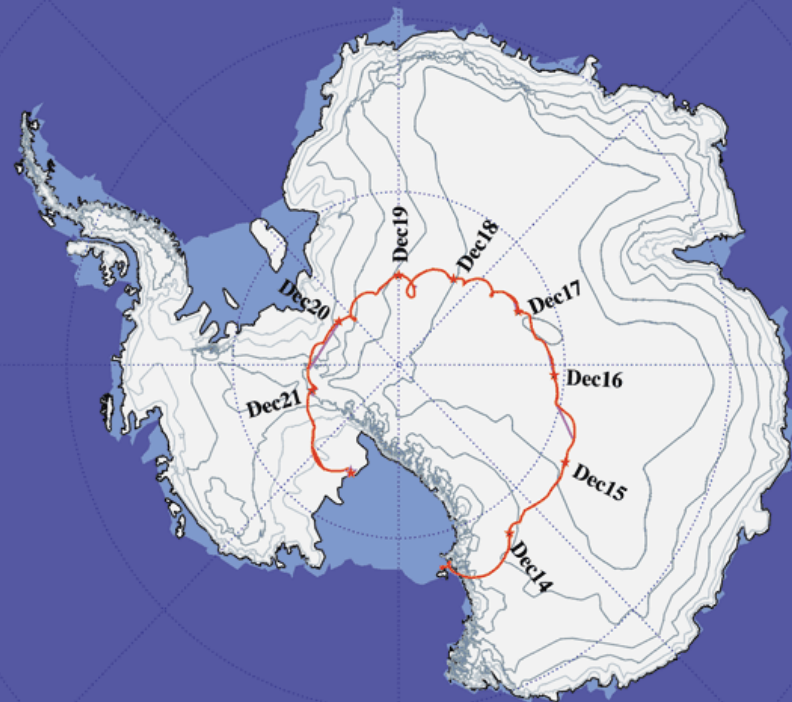
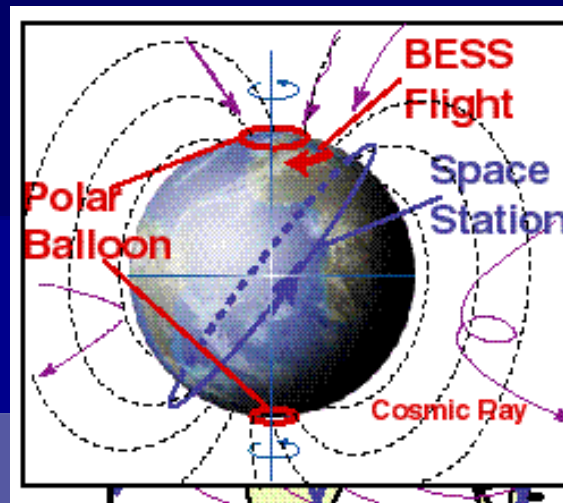
137億年



1000兆度

0.1ナノ秒

# 宇宙からの巨粒子の探索。





# He/He Limit

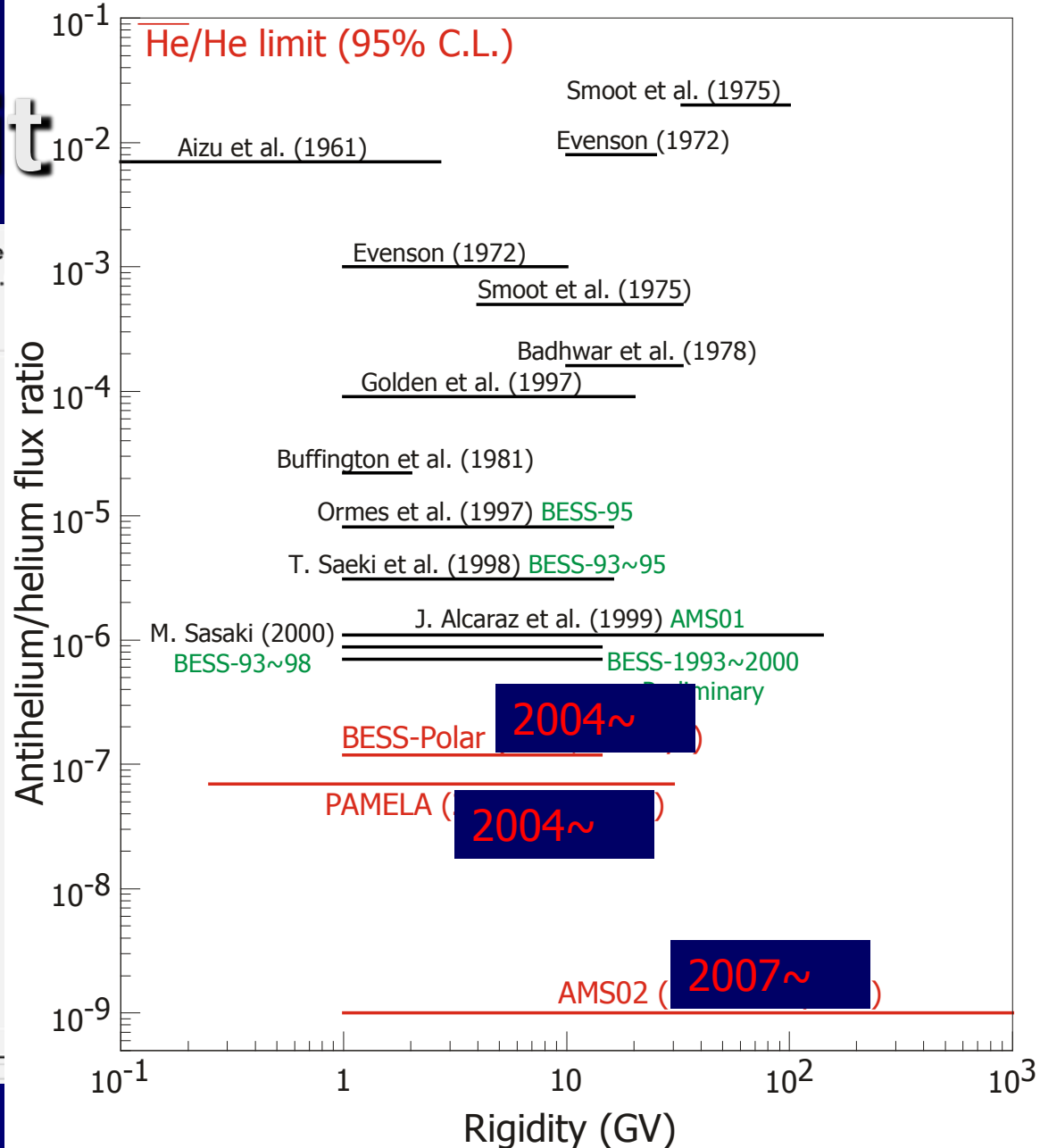
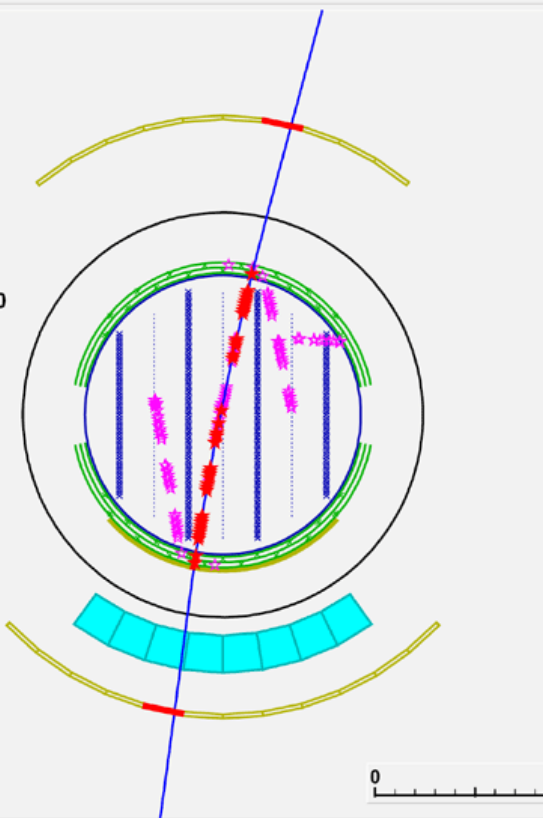
**BESS-Polar**

ONLINE : fadclnx.bess-net.ke

Event Time: 17.25.33.

Event: 1398034 (06) Size: 2234 FADC: 1472 FEND: 730  
Trigger: 000111111 JET: 33 IDC: 3 UTOF: 1 MTOF: 1 LTOF: 1

Nhit: 33/37  
Nshd: 48  
 $\chi^2$ : 4.48/36.70  
RGT: 1.89 GV  
 $\sigma_{1/R}$ : 4.65 TV<sup>-1</sup>  
1/ $\beta$ : 1.003



反物質が無い。

物質・反物質対消滅の高エネルギー<sup>59</sup>γ線も観測されない。

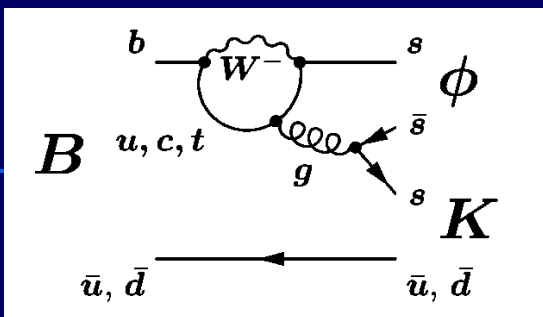
# 補助資料



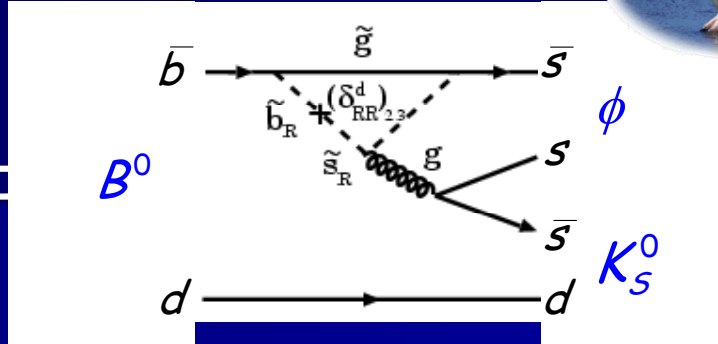
# ペンギン崩壊におけるCPV



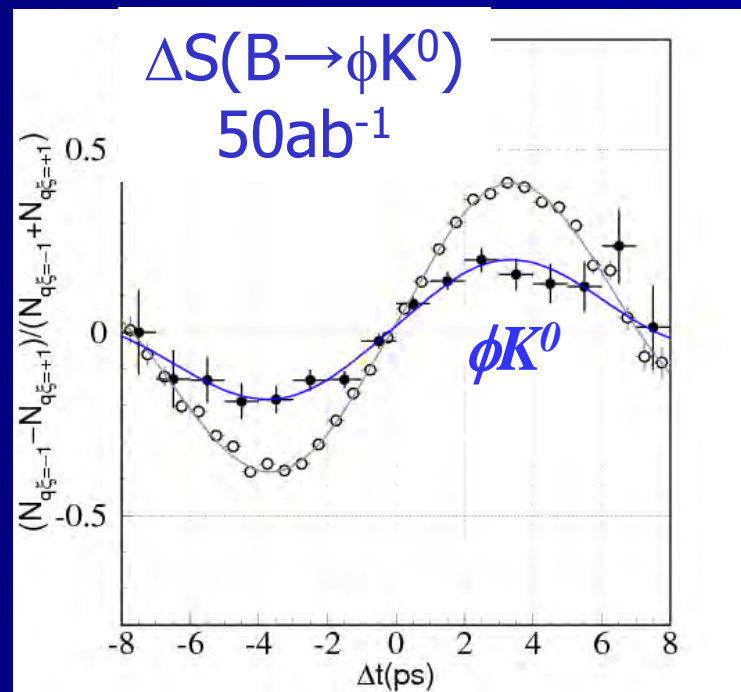
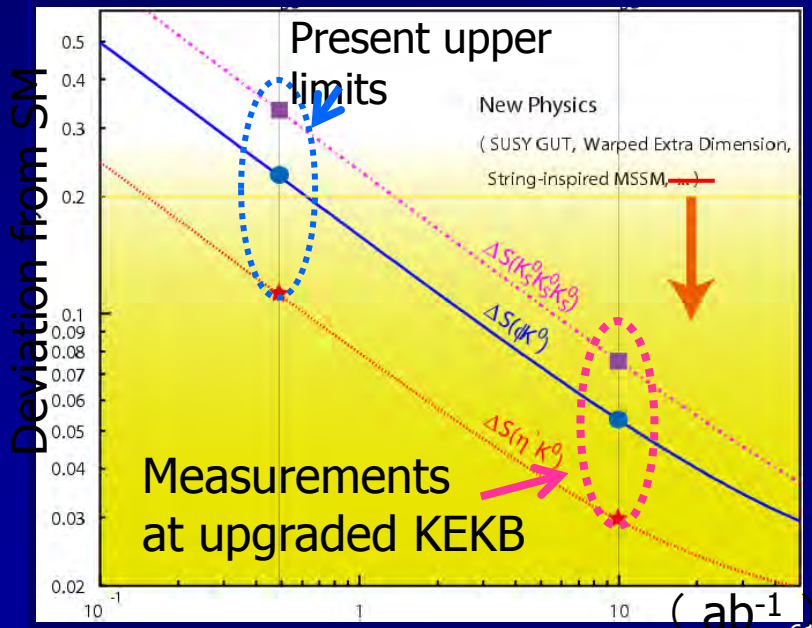
SM



NP



$$A_{CP}(t) = \sin 2(\phi_{\text{eff}}^d) \times \sin(m_d t)$$



Present B factories  $\rightarrow$  Upgraded KEKB

# Belle Upgrade

Better background tolerance  
Better performance

日本,ロシア

**KL/ $\mu$  detection**  
RPC  $\rightarrow$  Scintillator  
+SiPM(endcap)

**ECL**

Wave sampling + pure  
CsI crystal(endcap)

**PID**

Threshold Aerogel + TOF  
 $\rightarrow$  TOP + Aerogel-RICH

日本,スロニア,エア,US

**CDC**

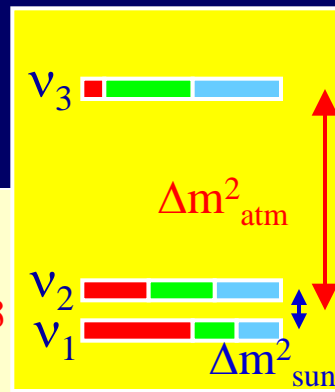
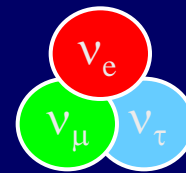
Super small cell  
Longer lever arm

New Dead time free  
readout and  
high speed  
computing systems

**SVD**

4-lyr DSSD  $\rightarrow$  6lyr DSSD  
(option: triplet / pixel)

# T2K Measurements



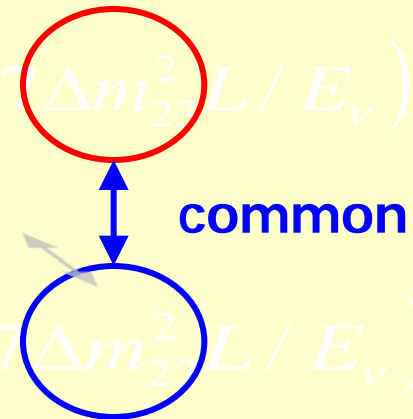
Oscillation Probabilities when  $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2 \approx \Delta m_{13}^2$

➤  $\theta_{23}$ :  $\nu_\mu$  disappearance

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_x} \approx 1 - \underbrace{\cos^4 \theta_{13}}_{\sim 1} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} \right)$$

➤  $\theta_{13}$ :  $\nu_e$  appearance

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \approx \underbrace{\sin^2 \theta_{23}}_{\sim 0.5} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} \right)$$



➤  $\delta$ : CP violation (T2K-II)

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \approx \begin{cases} \sim 0.18 & (\sin^2 2\theta_{13} = 0.1) \\ \sim 0.58 & (\sin^2 2\theta_{13} = 0.01) \end{cases} \cdot \sin \delta$$