

2009.2.16

@GCOEシンポジウム

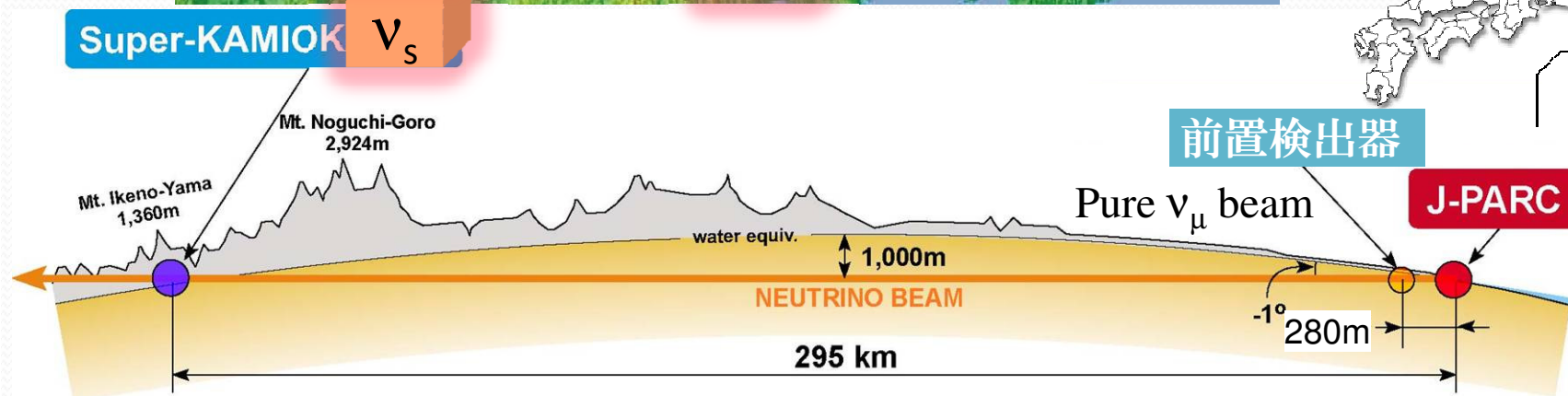
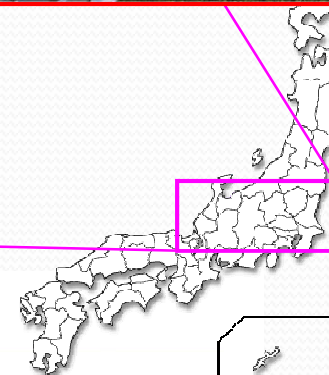
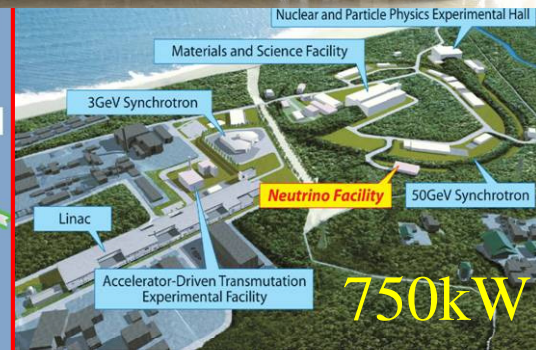
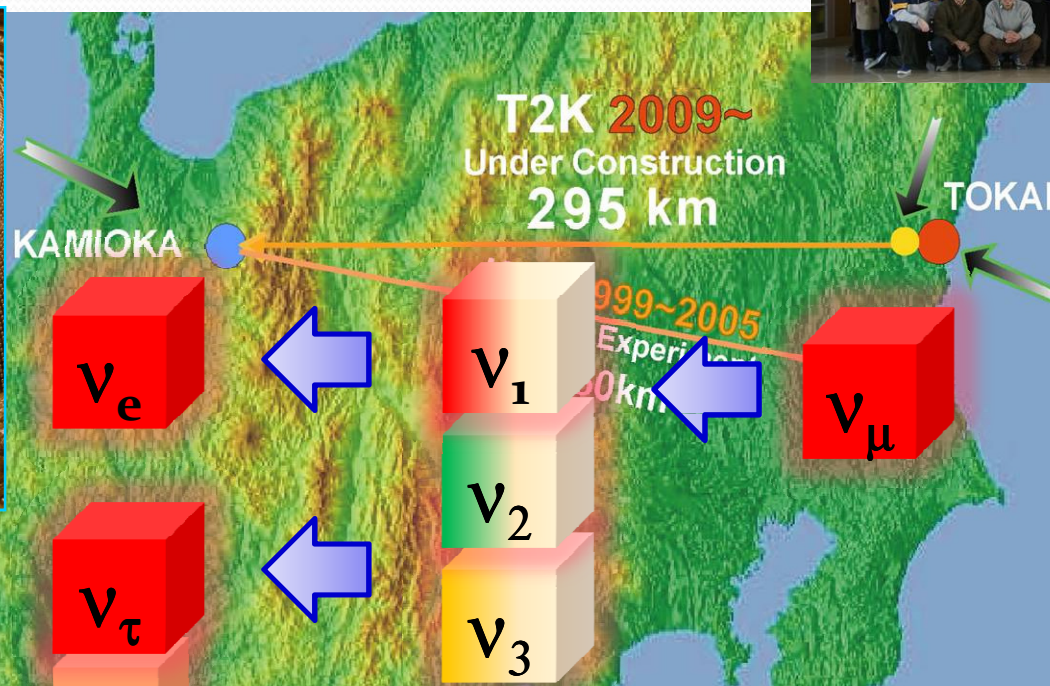
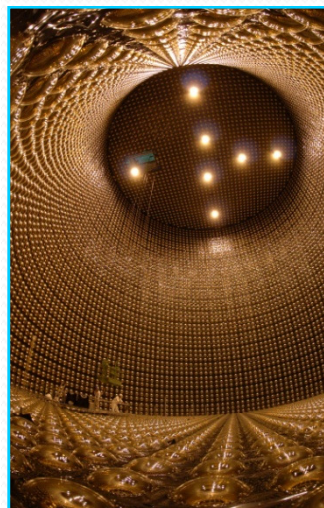
ニュートリノ物理の展開

— 普遍性と創発性（予期せぬ発見） —

中家 剛（京大・物二・高エネルギー）

T2K実験

Tokai-to(2)-Kamioka



素粒子と力

創発?

H

SUSY

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
	-1	e	μ	τ
クォーク	2/3	u	c	t
	-1/3	d	s	b

W^\pm, Z^0

弱い力

γ

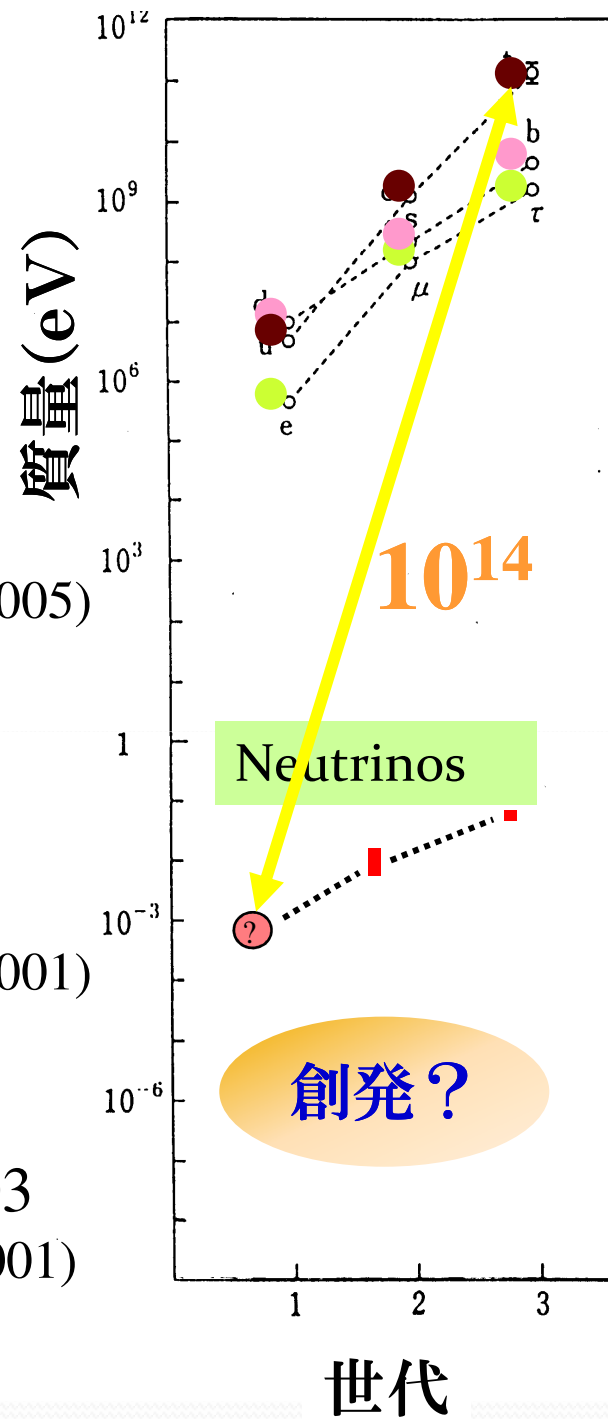
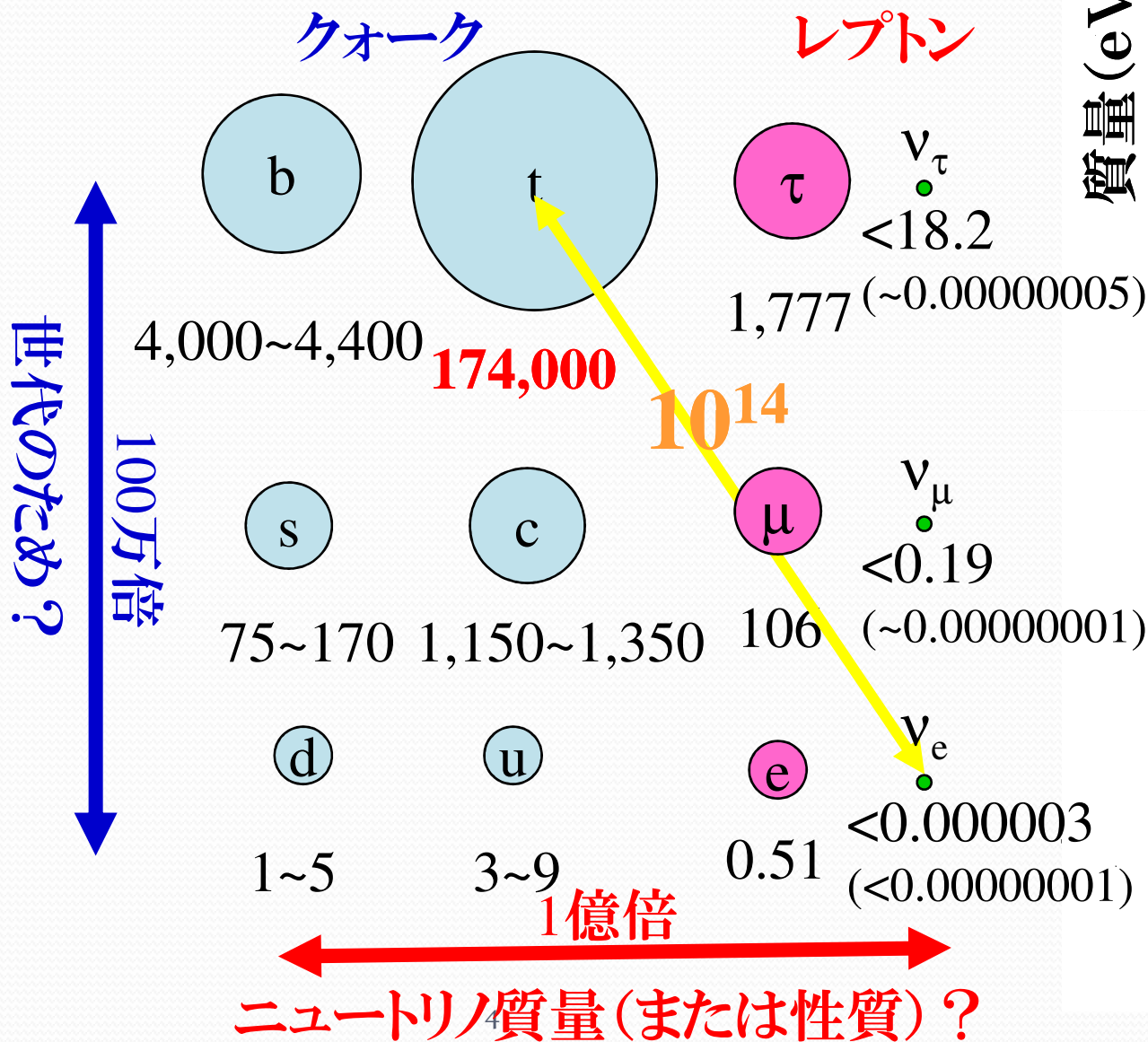
電磁力

g

強い力

+ 反粒子

素粒子の質量(MeV):



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 β 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: $>10^{15}\text{eV}$) 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

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 ν_2 and ν_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 as¹⁰⁾

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

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

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

普遍性

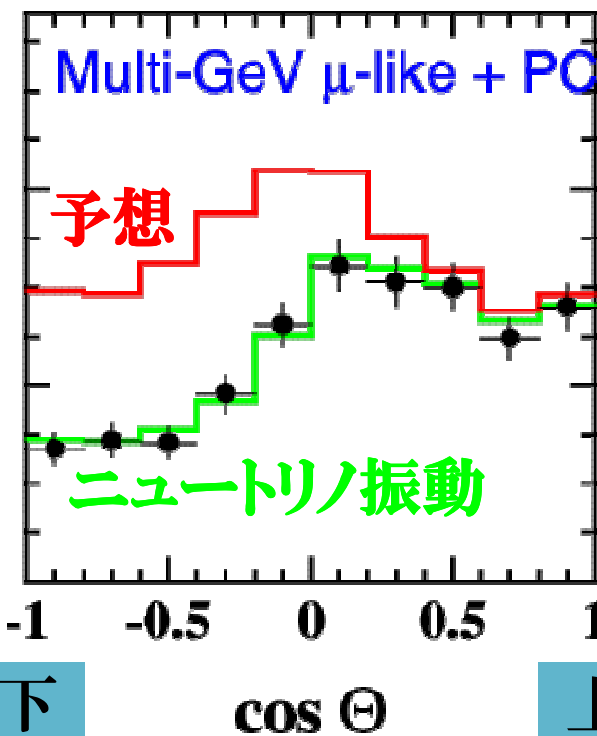
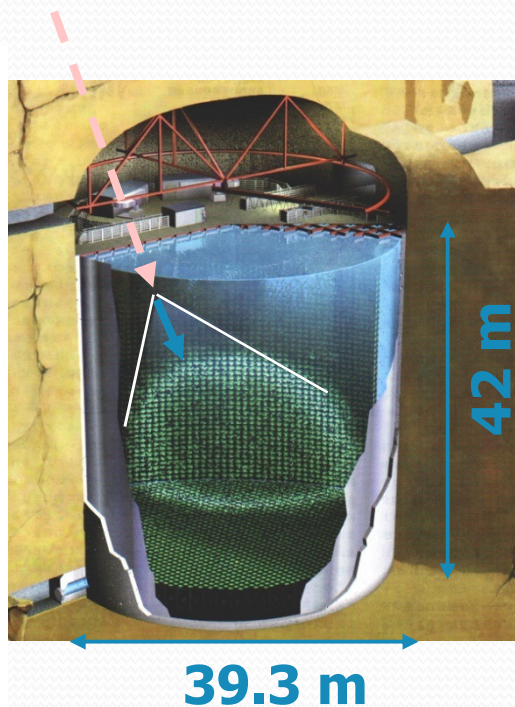
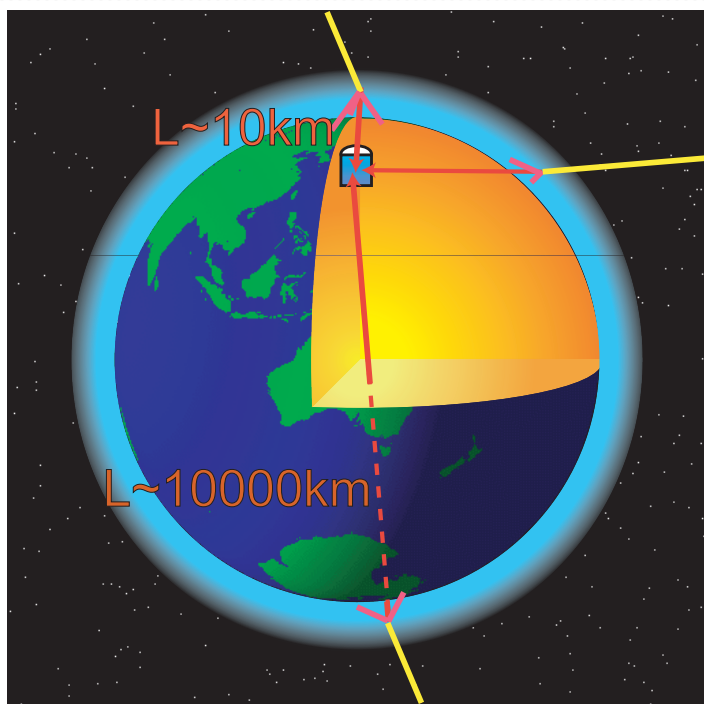
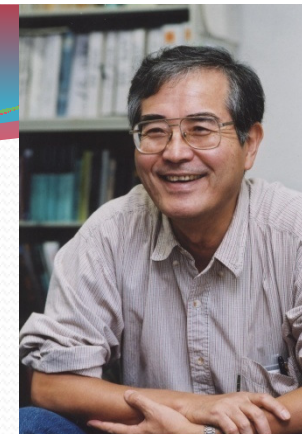
作用の状態

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

質量の状態

Particles
SAKATA

ニュートリノ振動の発見(1998)



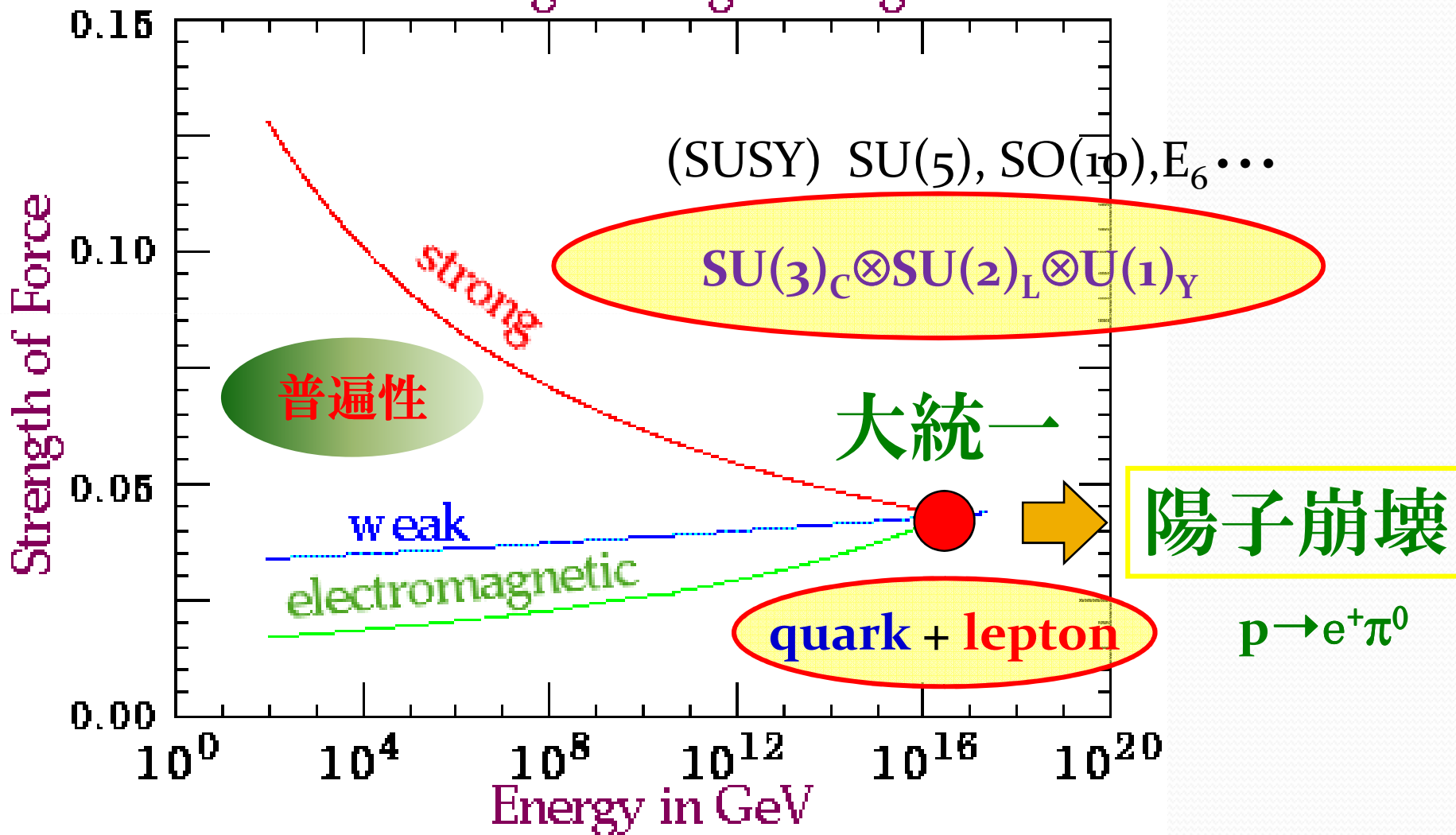
予想外

下から

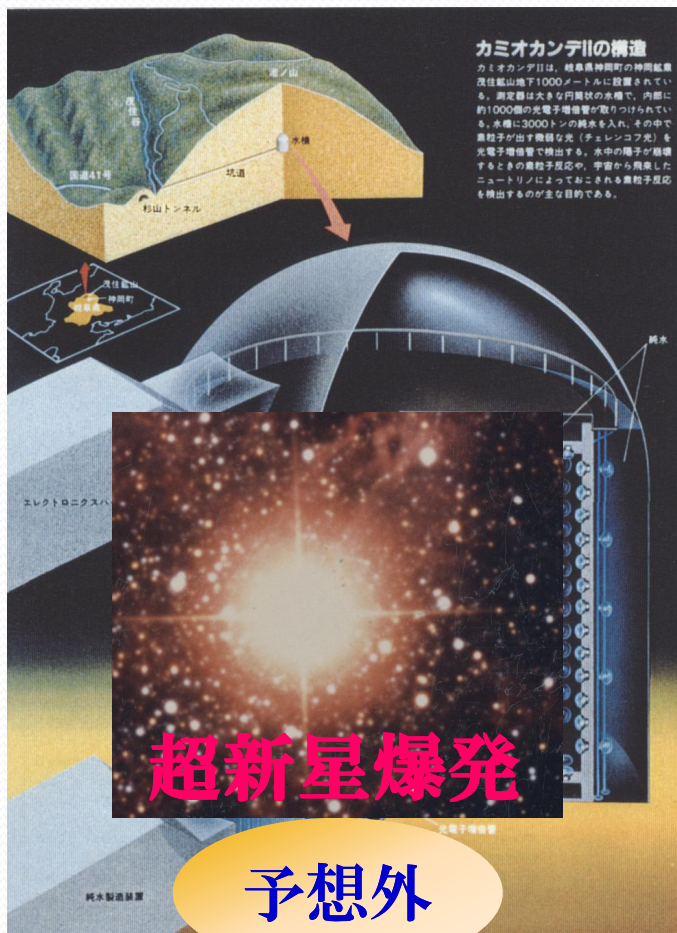
上から

大統一理論

Forces Merge at High Energies



陽子崩壊の探索



カミオカンテIIの構造

カミオカンテIIは、岐阜県神岡町の神岡鉱山
残存鉱山地下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槽で、内部に
約1000個の光電子増倍管が取り付けられて
いる。水槽に3000トンの純水を入れ、その中
で素粒子が出す微弱な光(チレンコフ光)を
光電子増倍管で検出する。水中の陽子が崩壊
するときの素粒子反応や、宇宙から飛来した
ニュートリノによっておこされる素粒子反応
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。

大気ニュートリノの研究を!

⇒ ニュートリノ振動発見へ

予想外

Test their real existence of atm. ν (Reines, Miyake etc., 1960's),

太陽ニュートリノ

- 太陽ニュートリノ観測の動機

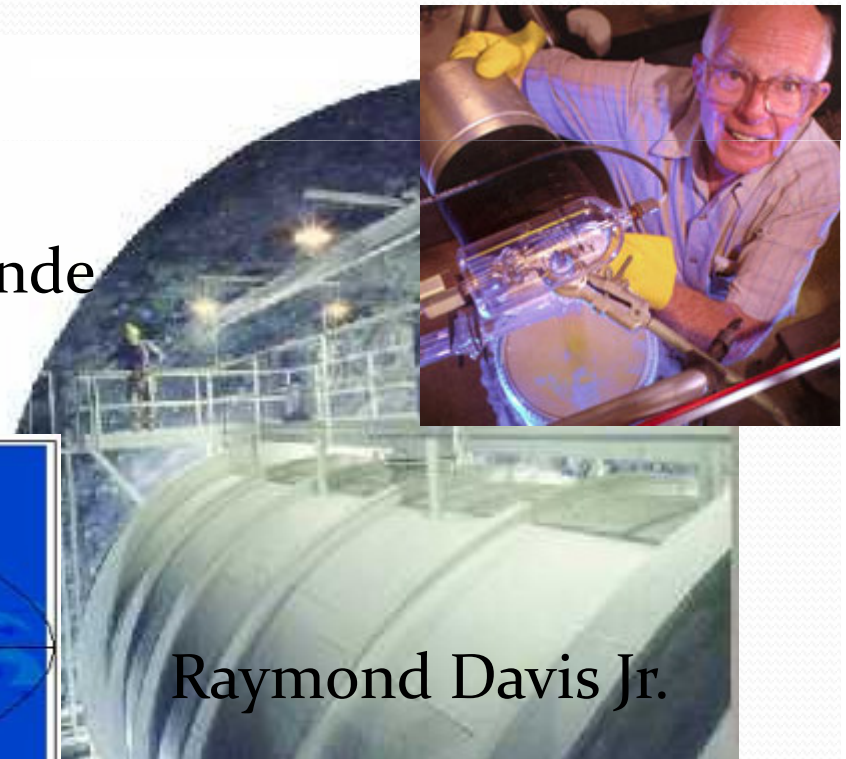
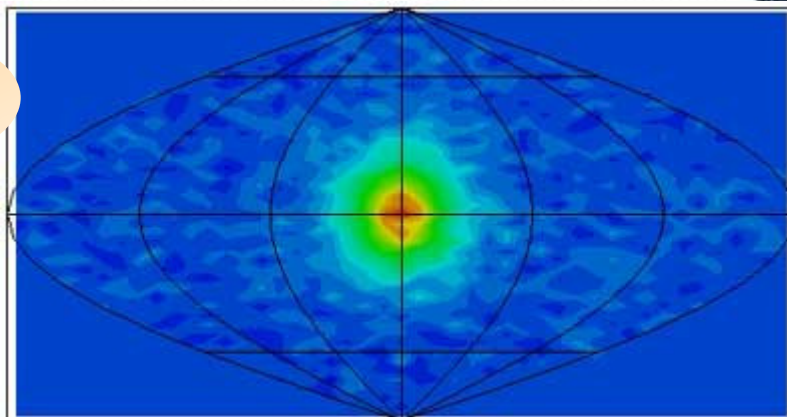
- Test the solar model (1960's) (J.N.Bahcall, "Neutrino Astrophysics", Cambridge University Press, 1989, page 488)

普遍性

- 太陽ニュートリノ観測

- 観測値が予想の1/3
- Kamiokande、Super-Kamiokande
観測値が予想の $\sim 40\%$

予想外



Raymond Davis Jr.

ニュートリノ振動

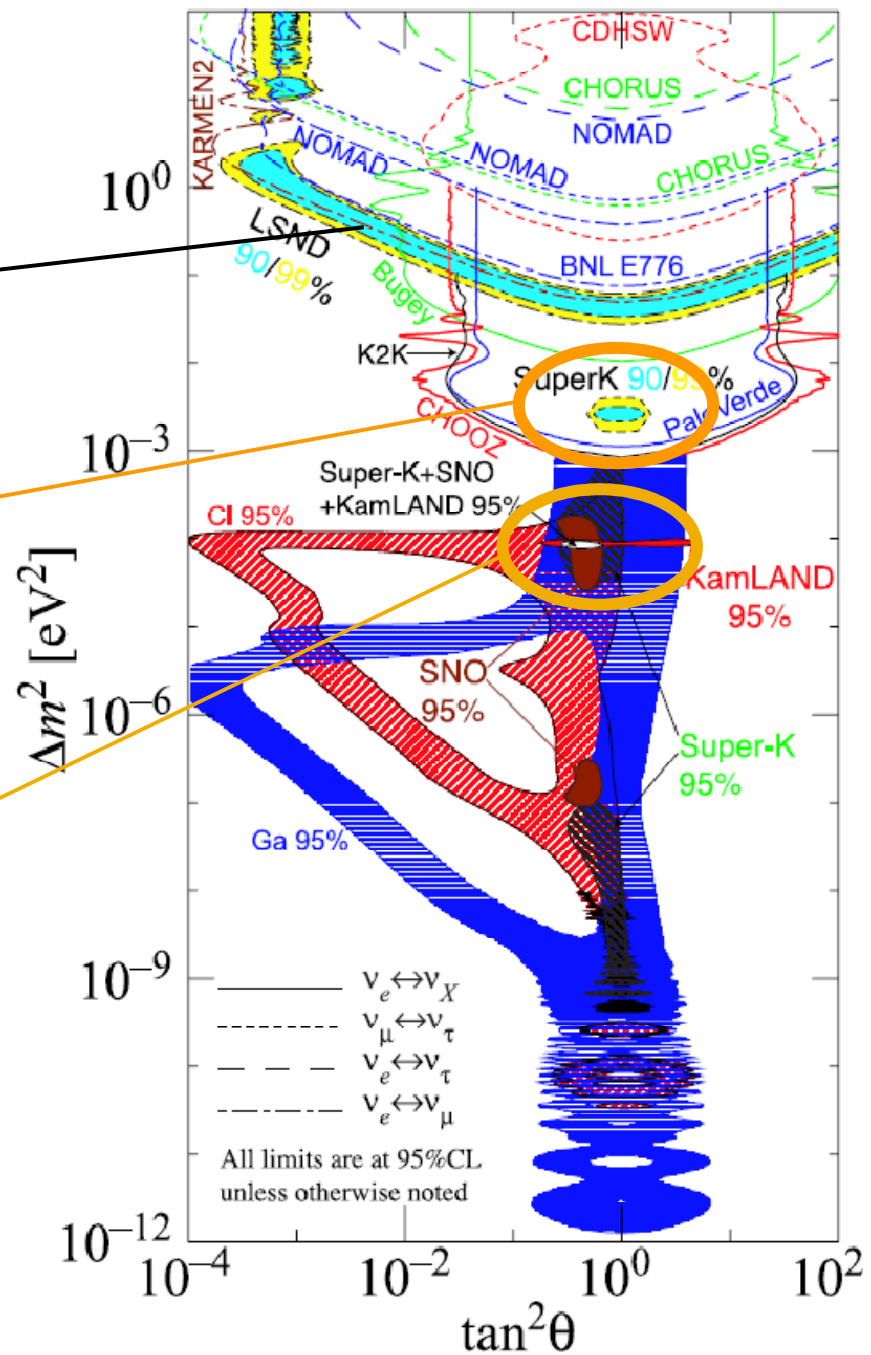
??? LSND anomaly ???

大気ニュートリノ
 ν_μ deficit (ν_τ appearance)
 Δm_{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
 ν_e deficit (NO NC deficit)
 Δm_{12} region

- $\Delta m_{12} \sim 7.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.82$



ニュートリノ振動

牧・中川・坂田行列

弱い相互作用の状態

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

Δm_{12}^2

$\Delta m_{23}^2 (\sim m_{13}^2)$

$|m_2 - m_1| \ll |m_3 - m_2|$

- 大気ニュートリノ振動
- 太陽ニュートリノ

ニュートリノ振動研究の展開

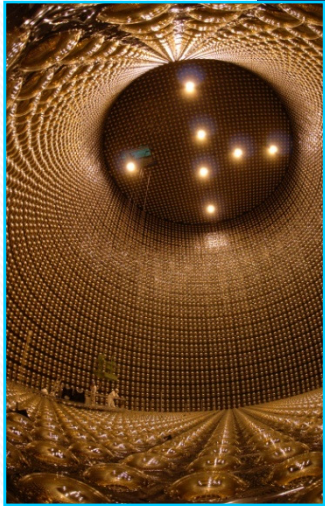
普遍性

- 加速器ニュートリノビームを使って、大気ニュートリノ振動を研究
 - 振動確認： K₂K実験(日本)、MINOS実験(アメリカ)、OPERA実験(ヨーロッパ)
 - Δm_{23}^2 、 θ_{23}
 - より高精度でニュートリノ振動行列を測定： **T₂K実験**
 - Δm_{23}^2 、 θ_{23} 、 θ_{13} ⇨ **CPの測定への道を開く。**

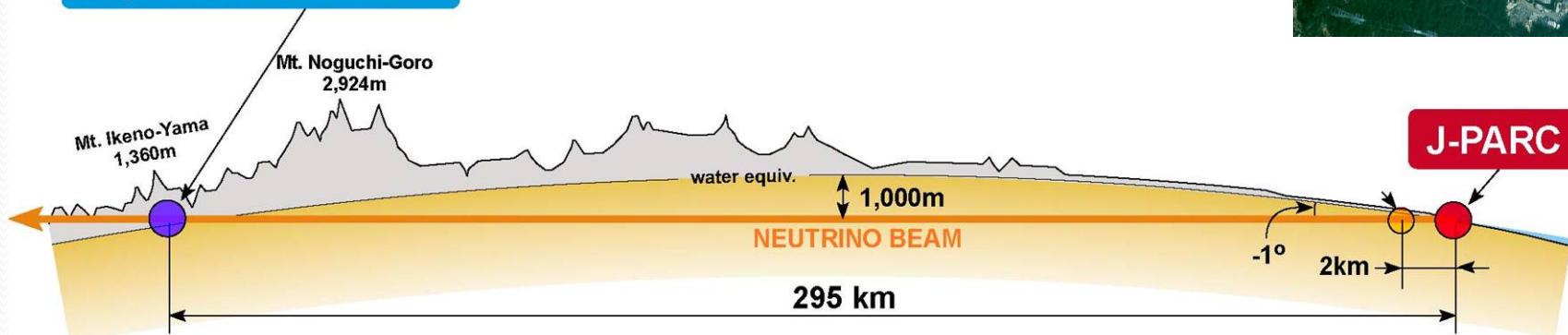
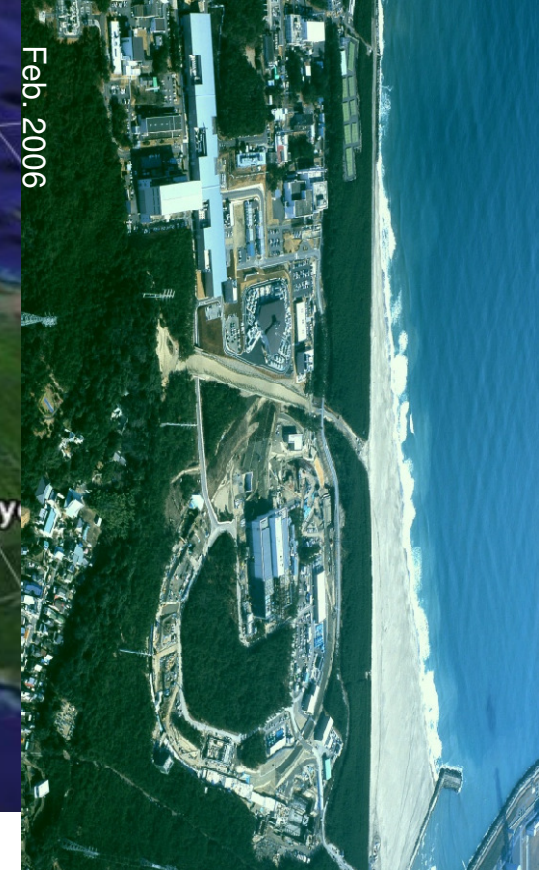
普遍性

- 原子炉反ニュートリノを使って、太陽ニュートリノ振動を研究
 - 確認と高精度測定： KamLAND実験(日本)
 - Δm_{12}^2 、 θ_{12}
 - 地球反ニュートリノの観測 ⇨ 予想していない現象の発見？
 - 新しい手法のββ実験 ⇨ 予想していない現象の発見？

T2K (Tokai-to[2]-Kamioka)



Super-KAMIOKANDE



実験提案

Letter of Intent:

A Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment
using the JHF 50 GeV Proton-Synchrotron
and the Super-Kamiokande Detector

February 3, 2000

—V1.0—

JHF Neutrino Working Group

Y. Itow¹, Y. Obayashi, Y. Totsuka

Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188-8502, Japan

Y. Hayato, H. Ishino, T. Kobayashi², K. Nakamura, M. Sakuda
Inst. of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Org. (KEK),
Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

T. Hara

Department of Physics, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

T. Nakaya³, K. Nishikawa⁴

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

T. Hasegawa, K. Ishihara, A. Suzuki

Department of Physics, Tohoku University, Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan

¹ Super Kamiokande Contact Person: itow@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp

² Neutrino Beam Contact Person: kobayasi@neutrino.kek.jp

³ Near Detector Contact Person: nakaya@sphys.kyoto-u.ac.jp

⁴ Organizer: nishikaw@neutrino.kek.jp

JHFニュートリノ実験

中家 剛 (京大理)

1. Overview of the experiment
2. Physics Motivation
3. JHF facility and ν beam
4. Physics Sensitivity
5. Additional Options
6. Summary and Conclusion

日本物理学会シンポジウム
平成20年3月25日 @ 近畿大学

日本が主導する
ニュートリノ振動・質量実験の現状と将来

T2Kの物理

中家 剛(京都大学)
for the T2K collaboration

- The JHF-Kamioka neutrino project: hep-ex/0106019

- Citation: 557

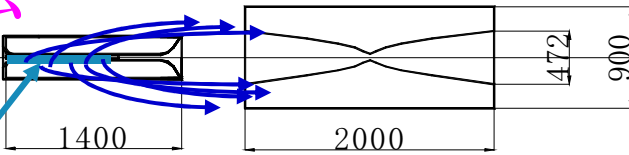
ニュートリノビームの生成



市川准教授

多数の π^+ を生成し集束する

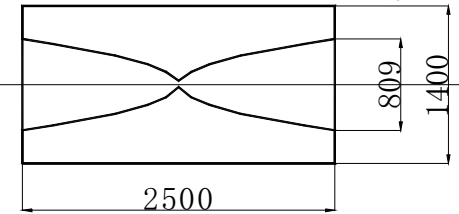
陽子ビーム



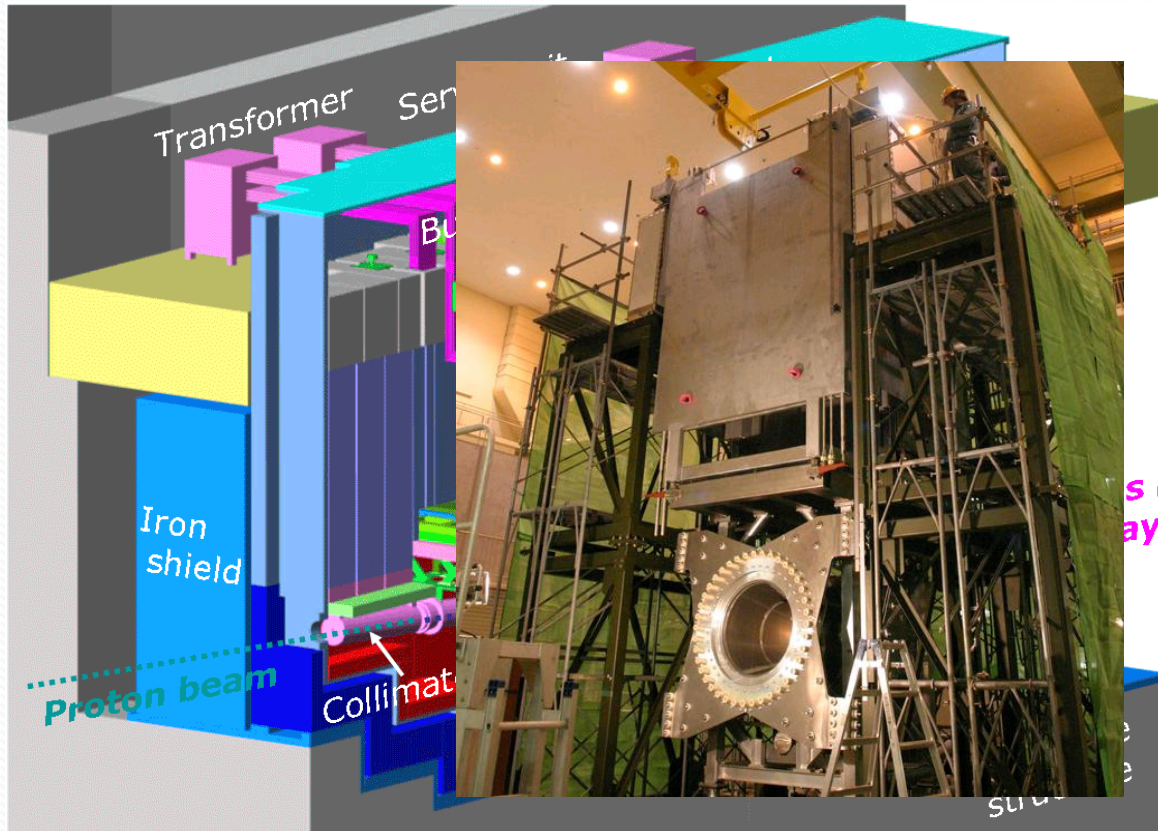
標的

第1ホーン

第2ホーン



第3ホーン

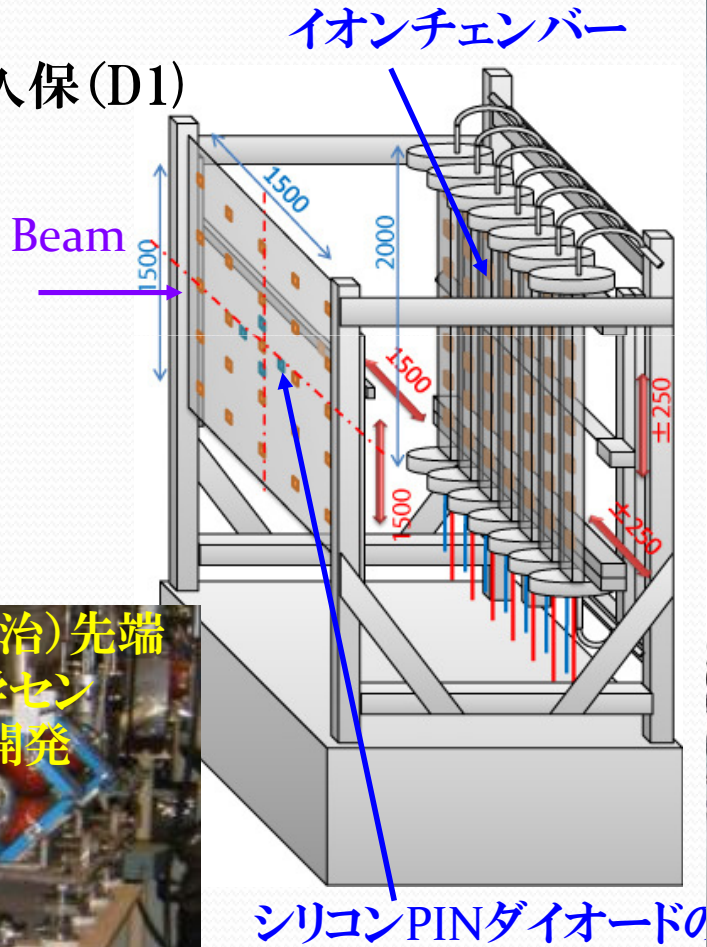


その後、 $\pi \rightarrow \mu \nu$ 崩壊で
ニュートリノビームを作る

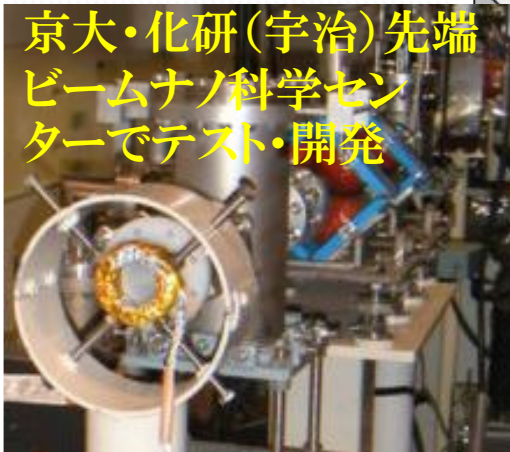
ニュートリノビームをモニターする。

- $\pi \rightarrow \mu\nu$ 崩壊の μ を観測。

設計、製作：
松岡(D2)、久保(D1)



京大・化研(宇治)先端
ビームナノ科学セン
ターでテスト・開発

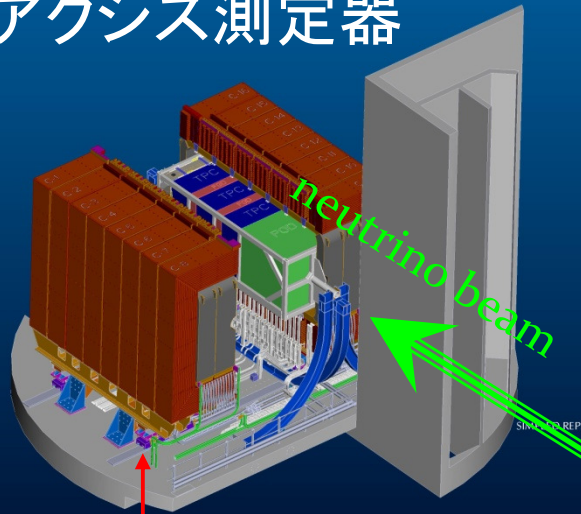


2009年2月14日



前置ニュートリノ測定器 (リーダー: TN)

オフ軸測定器



J-PARC 大強度陽子加速器施設
Japan Proton Accelerator Research Complex

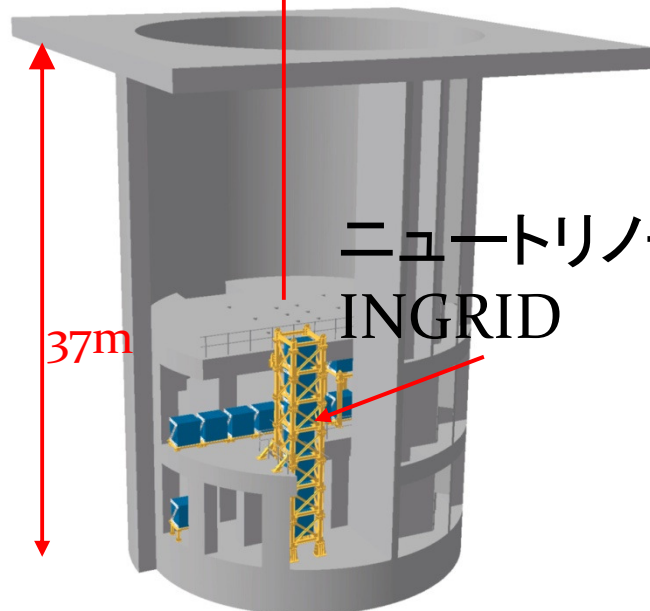
[ホーム](#) > [ニュース](#) > [プレス](#) > [この記事](#)

last up

News @ KEK

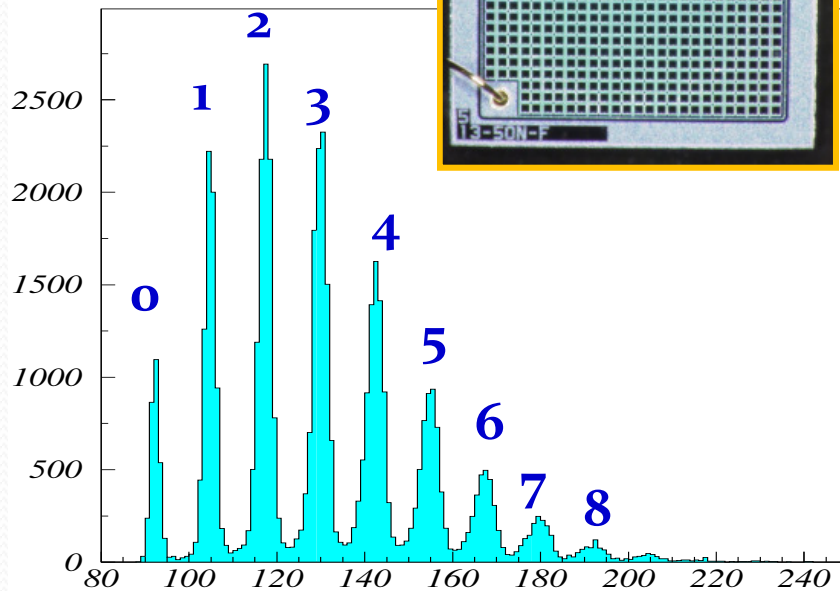
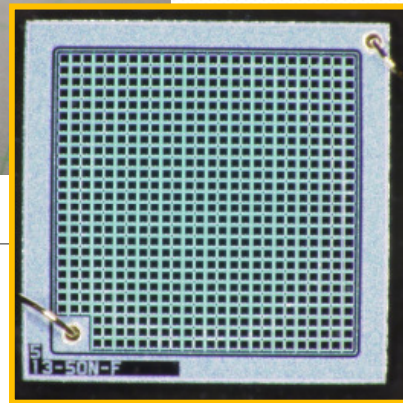
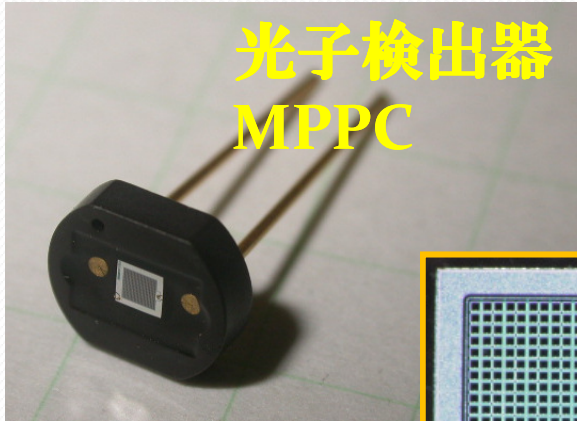
プレス・リリース ~ 08-06 ~ For immediate release: 2008年03月31日

ノーベル賞受賞実験の装置の一部をJ-PARC T2Kニュートリノ振動実験で再利用



数々の新技術の開発

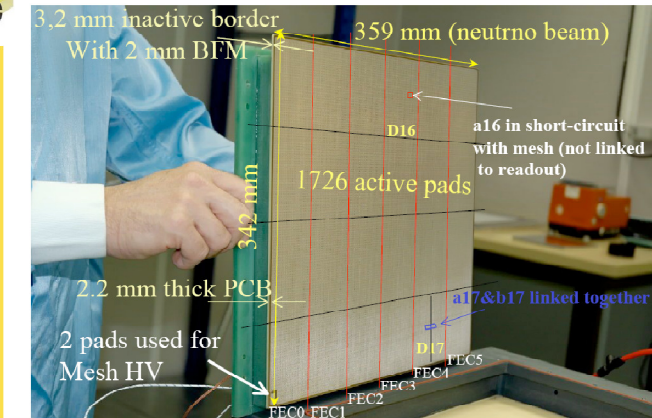
光子検出器 MPPC



大型TPC



MM1_001 (stiffener V2) (HARp tests 09/19/2007)



- a 30 μm thick 440 Lpi woven micromesh is embedded between 2 layers of pyralux
- 4 layers PCB with internal shielding layer & 6,9x9,7 mm pads with 7x9,8 mm pitch
- 128 μm amp. gap / 12 x ϕ 0,5 mm pillars per pad / « stretched » mesh procedure
- 93% of PCB surface is active area / less than 2 faulty pads per module

adrian@cea.fr - WP4 "Bulk" Micromeshes & WP5 Module Mechanicals Status, KEK ND260/T2KTPC meeting 09/26/2007

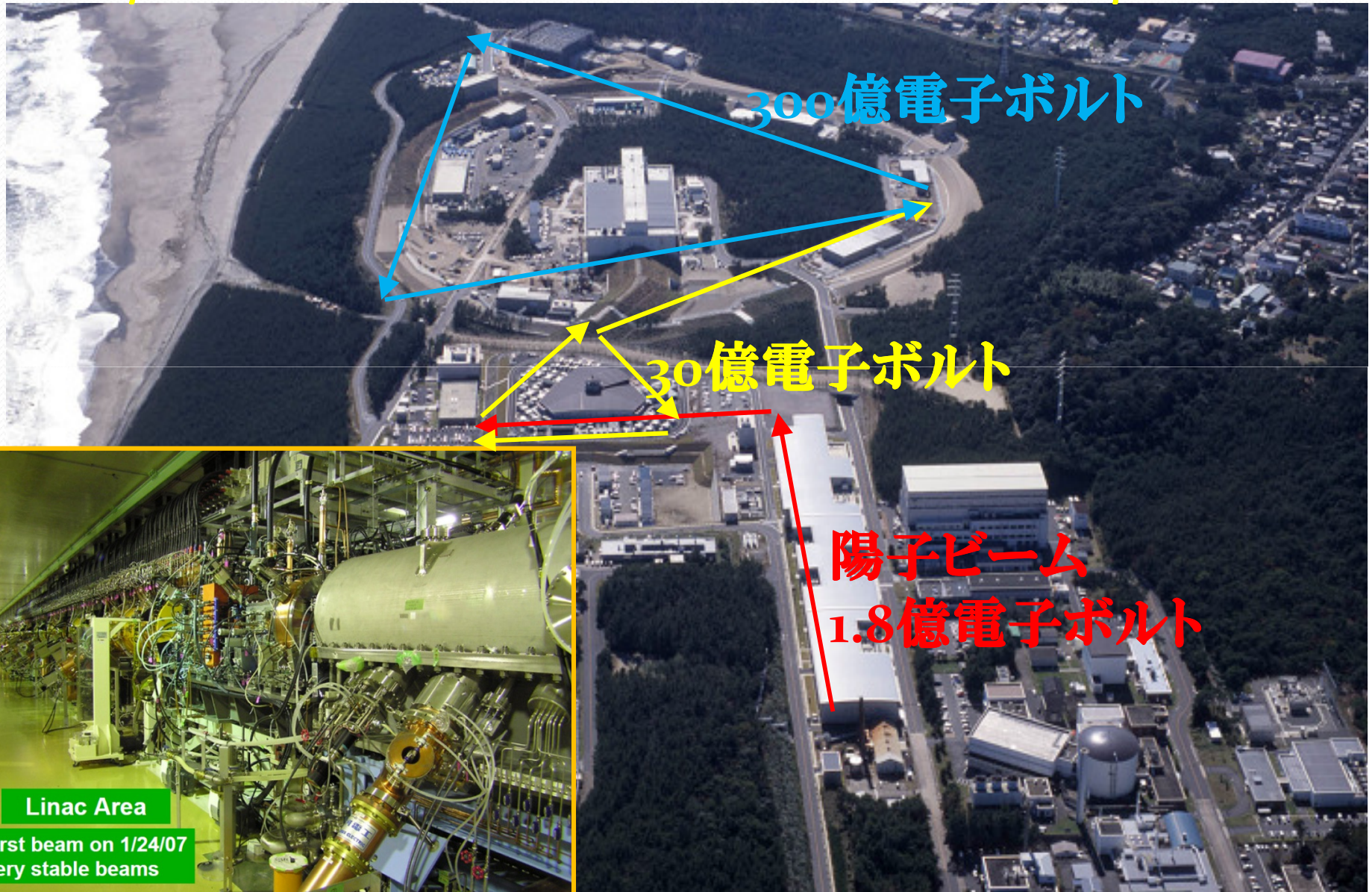
3/36

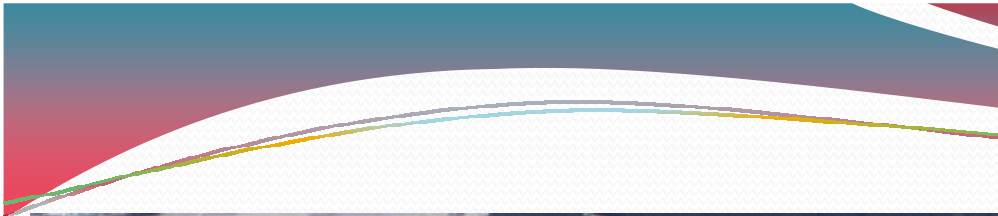


Total 120kチャンネル

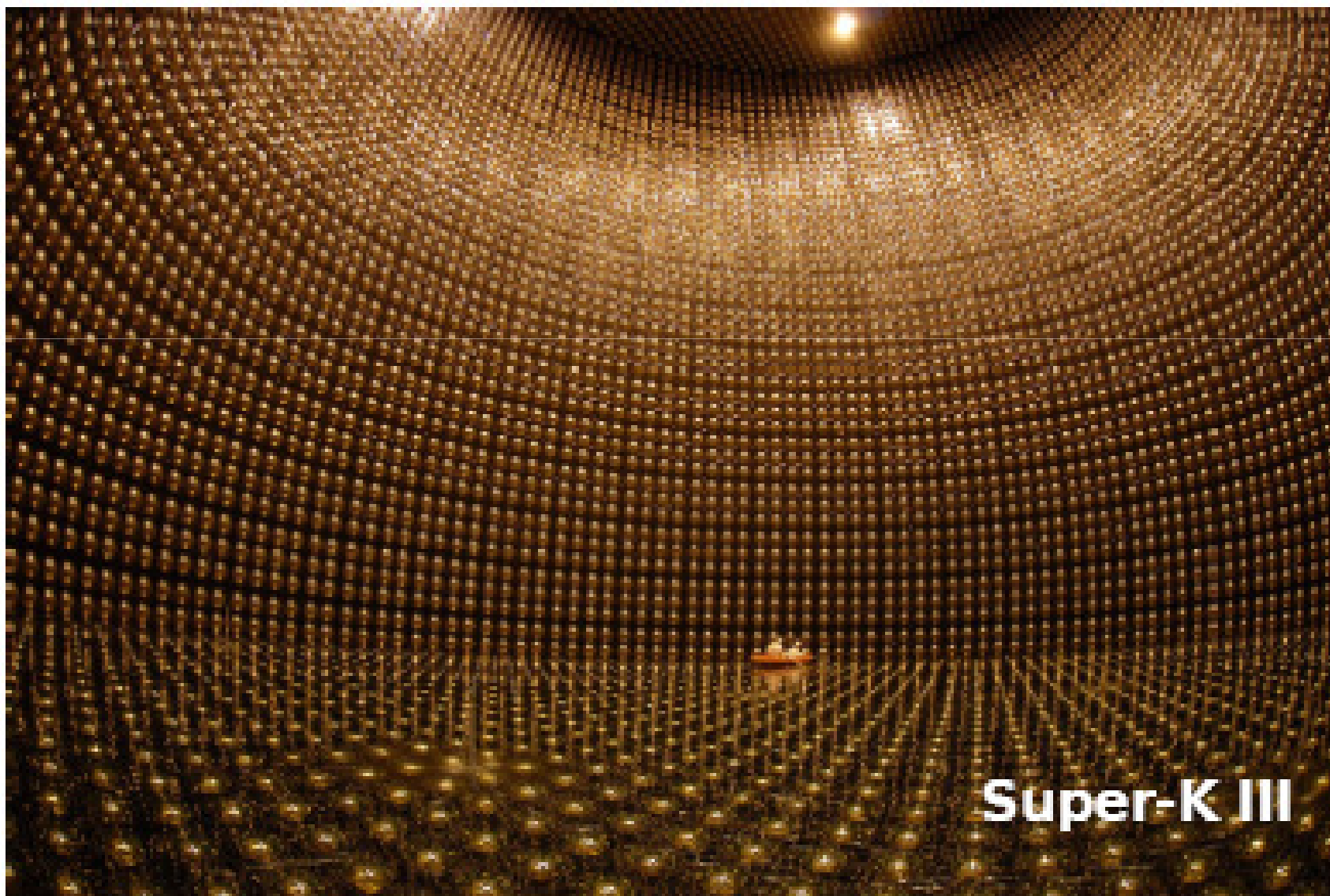
J-PARC

(Japan-Proton-Accelerator Research Complex)



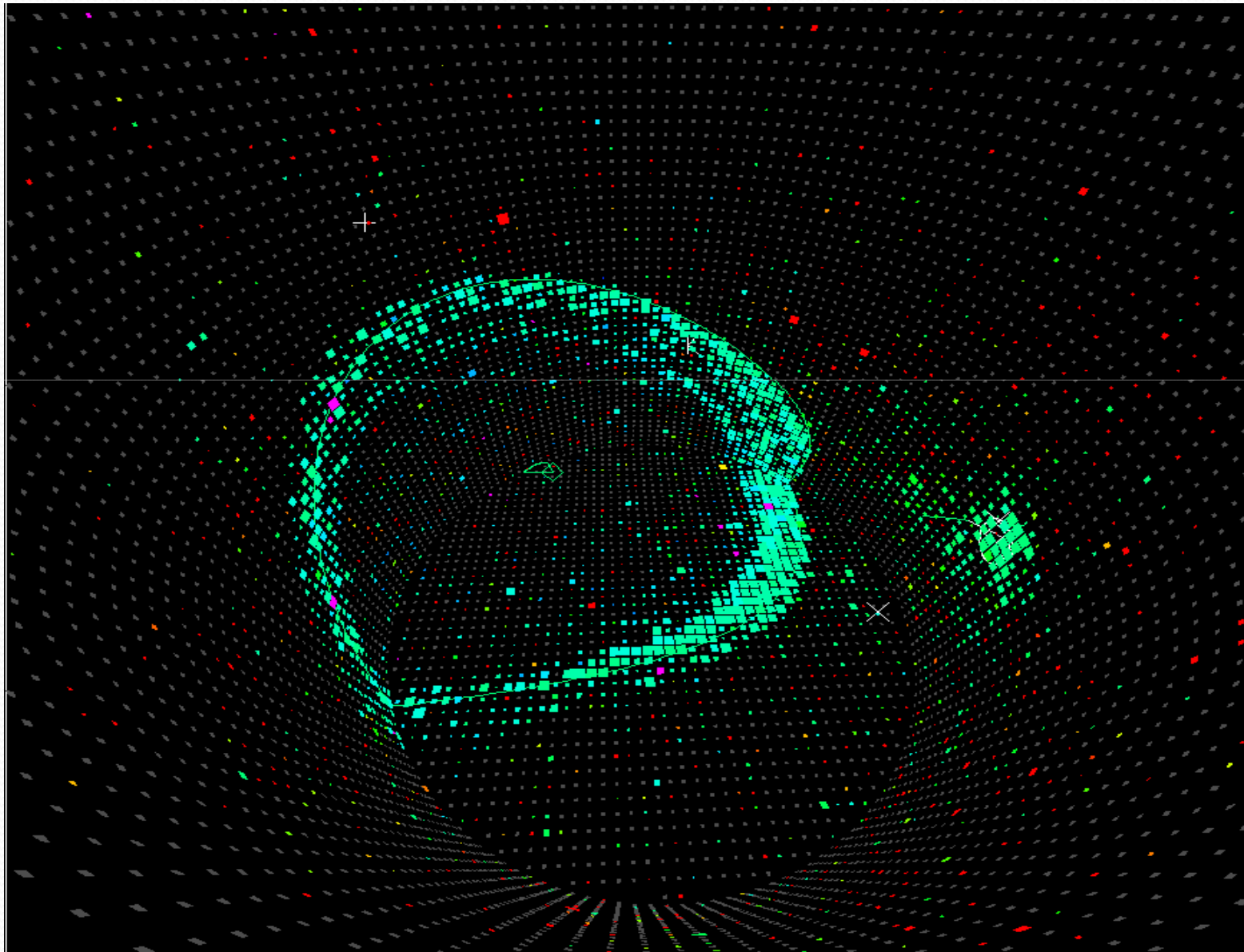


スーパーカミオカンデ IV



Super-K III

ニュートリノ事象 (K2K実験)





2009年4月実験開始

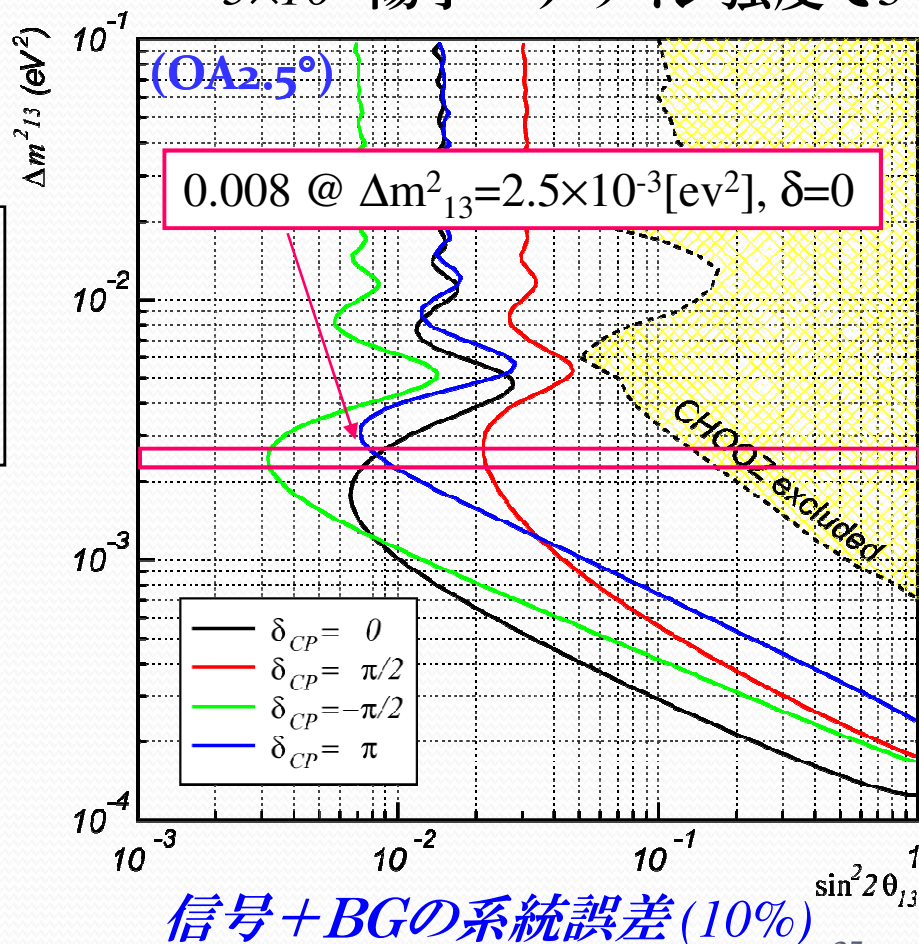
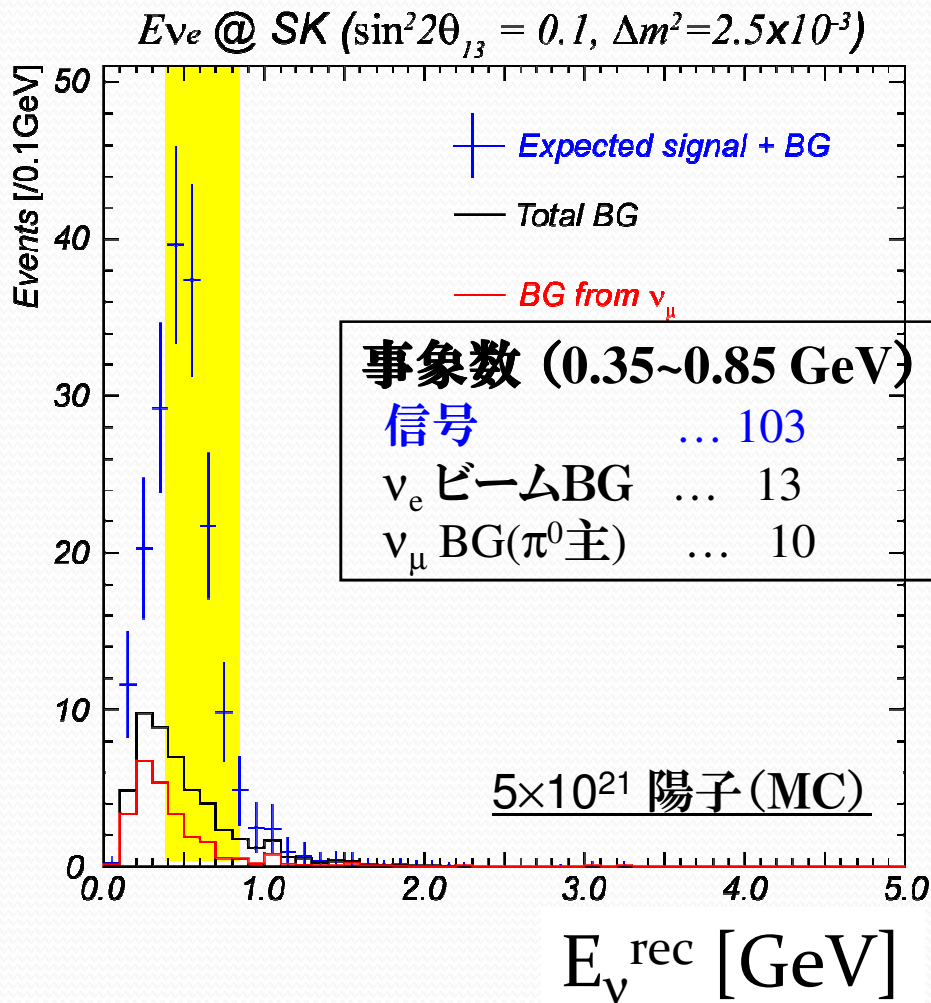
普遍性

T2K-I物理目標 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)

T2K探索感度 (90% CL)

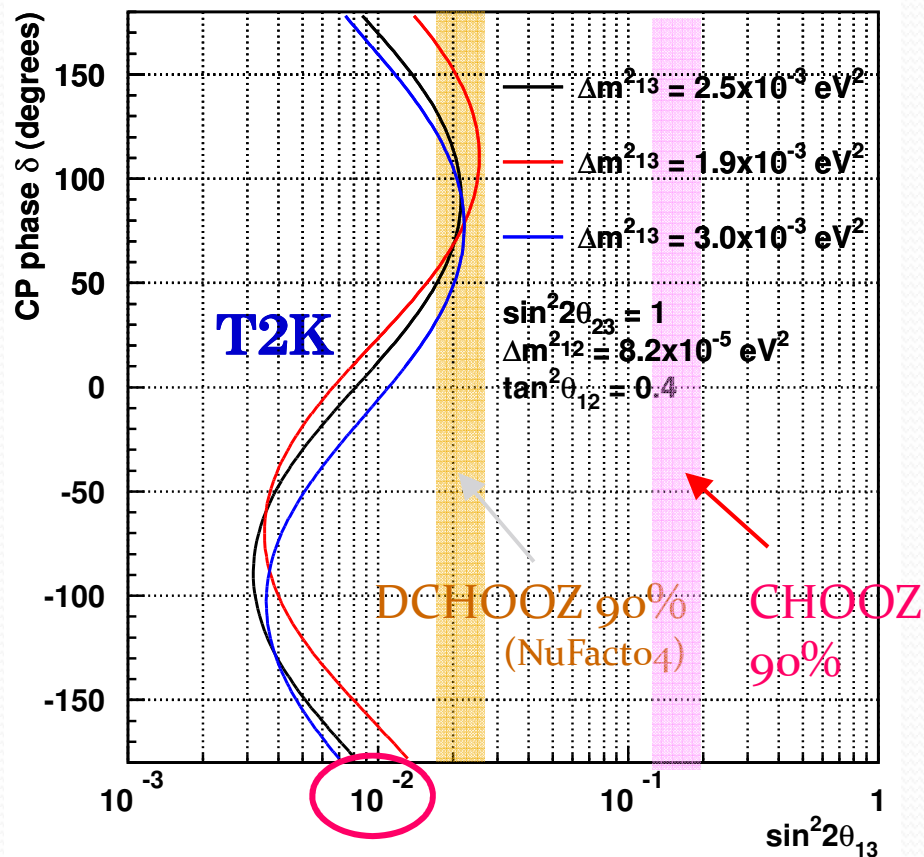
$\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ 仮定.

5×10^{21} 陽子 ~ デザイン強度で5年



CPフェイズ依存性

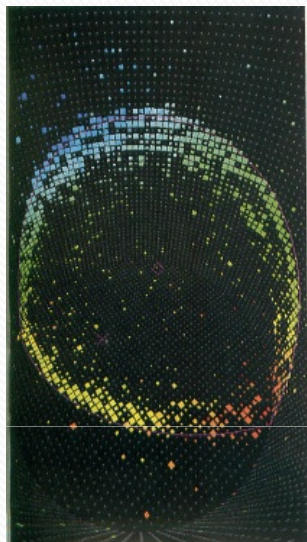
ν_e 出現



- 大きなCP依存性が期待される。
 - 反ニュートリノビームもオプションへ。
 - 他の実験(特に原子炉反ニュートリノ実験)との協力が重要。

現在の世界記録(CHOOZ)の 10 倍以上を目指す。

注目の実験



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 戸塚洋二 (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。大ニュートリノの発信地は日本、しかも東京から遠く北の岐阜県にあり、その施設は成層圏にまで伸びた。

サイエンス

SCIENTIFIC AMERICAN 日本版 2008年05月号

革命物理学

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

超微小質量がもたらした

- スーパーカミオカンデは、宇宙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”

日本発の微粒子にタダ

歌声の科学

2008年1400円



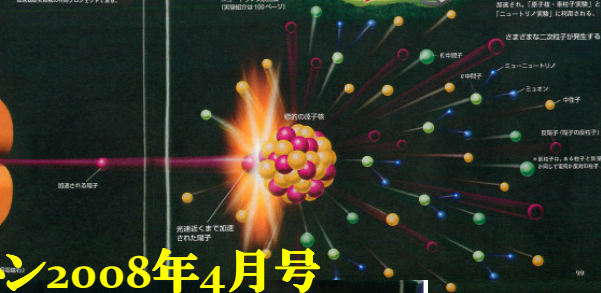
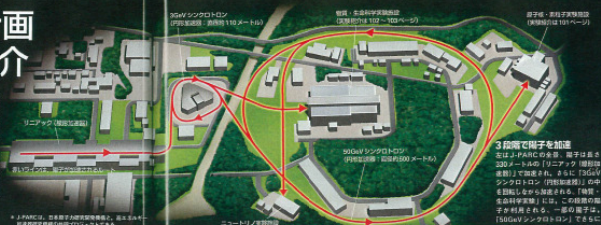
短期集中連載 物理学を変えたニュートリノ質量の発見

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年末に稼動する。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のだ。J-PARCの全貌を紹介する。

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

変化したニュートリノの“変身”をとらえる

ニュートリノによって一躍有名になった。地球すらも貫通して、三つの種類がある。奇妙な話だが、ニュートリノは、しばらくすると、ほかに変身することが、宇宙から飛来する実験や、実験によって確かめられている。突如関東に発生した「ニュートリノ」は地球の深部に存在する。ニュートリノの質量がゼロの素粒子としてあつては、ニュートリノ振動は従来の理論をこえた現象であり、この説明は、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で生成したニュートリノのビーム (多数のニュートリノ) は、途程に応じて、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、その変化の割合を月の満ち欠けのようなイメージで表している。



ニュートリノのなぞにせまる「T2K実験」 J-PARCから295キロメートル離れた「スーパーカミオカンデ」にニュートリノを打ちこみ、「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年までに行った「K2K実験」では、ニュートリノからタウニュートリノへの変化が観測された。T2Kでは、K2Kの100倍の強度のニュートリノビームで、観測の少ない、ミュー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。

CP対称性の破れの測定(将来)

普遍性

A few MW

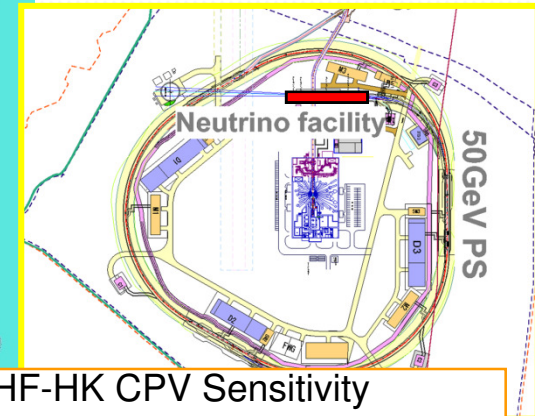
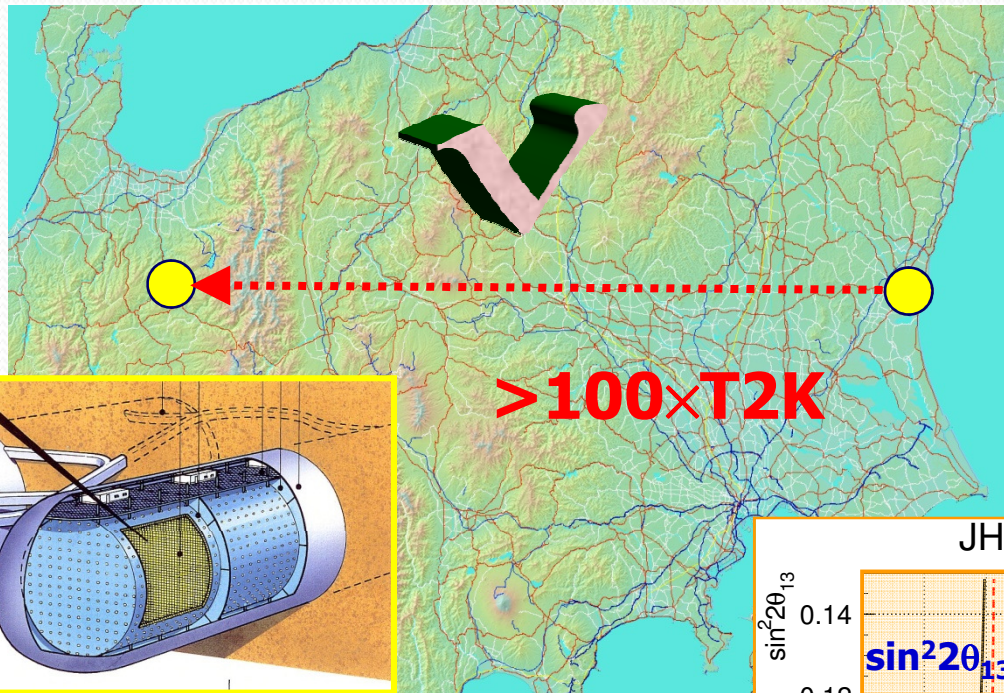
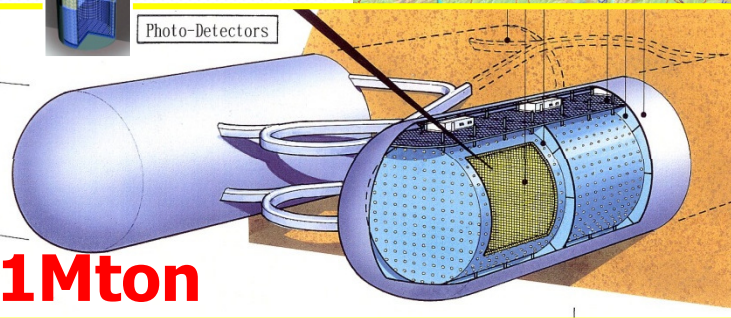


Photo-Detectors



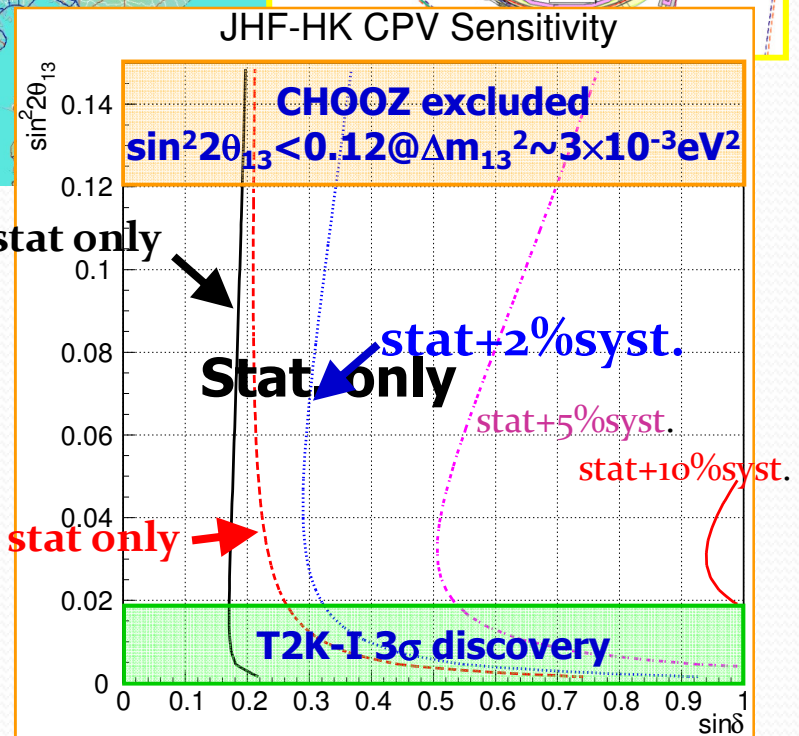
1Mton

3σ CP sensitivity : $|\delta| > 20^\circ$ for $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$ with 2% syst.

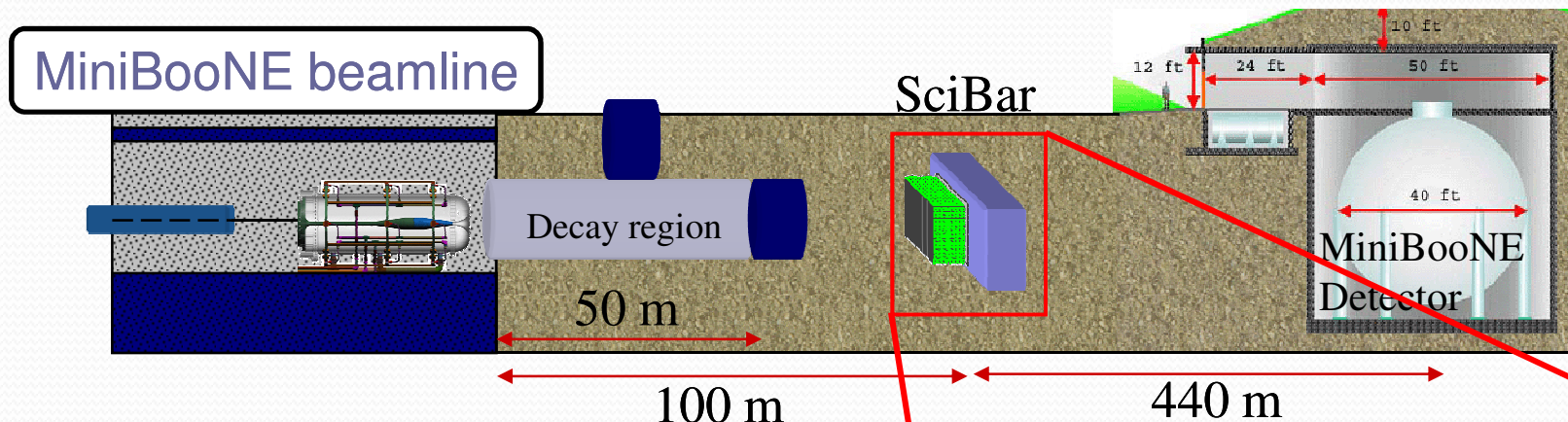
NOTE: CP violation

- $A_{CP} \sim 0.2 \sin\delta$ @ $\sin^2 2\theta_{13} = 0.10$
- $A_{CP} \sim 0.6 \sin\delta$ @ $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$

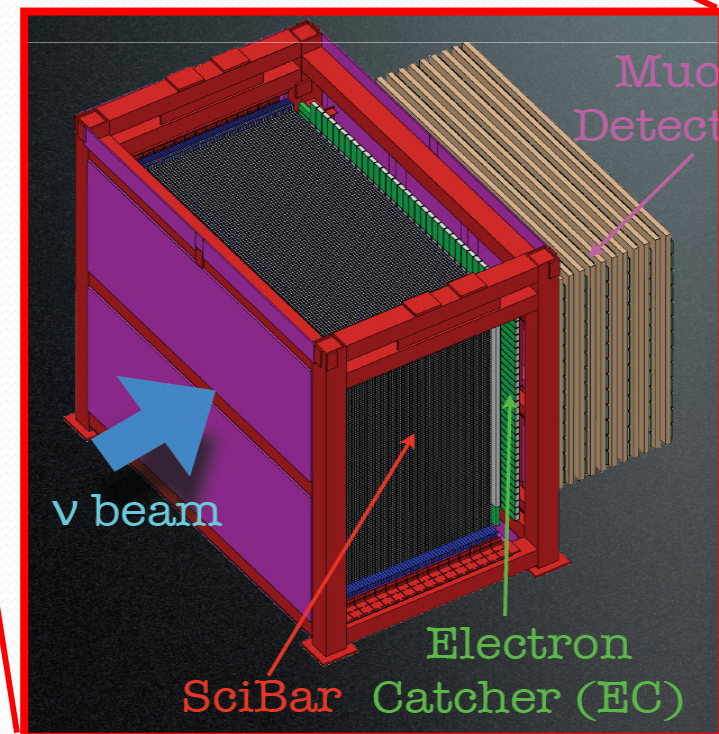
(signal+BG) stat only



FNAL-E954: SciBooNE



- ニュートリノ振動実験の基礎データとしてニュートリノと原子核の反応を精密に測定する。
 - 最初の結果を2008年に発表
 - 京大・博士号:平出
 - 将来のCP非対称性測定に向けて反ニュートリノ反応データの研究も推進。
- MiniBooNE実験と協力し、短距離でのニュートリノ変換の探索



SCIBOONE LIFE



国際共同研究 若手研究者の国際性の育成



2008.8.18



まとめ

- T₂K実験がいよいよ2009年4月開始。
- ニュートリノ研究は、日本が世界の最先端を進んでいる。
 - 多数の外国人研究者の日本への流入。
- 国際協力のもと、若手研究者の国際化も自然と進んでいる。
 - 日本、外国の区別(壁)がなくなりつつある。
- **普遍性**を動機に、数々の精密かつ高感度測定
-
- 個人的には、予想していない新現象の発見を望む。
- 新発見のためには、世界に他にない実験と測定が必須。

最後に

以下の現象が発見されるのも、夢ではない！

- 牧・中川・坂田行列で予想していなかったCPの破れの発見。
- ニュートリノ質量の大きさが、宇宙論から決定。
- ニュートリノのマヨラナ性の発見(2重ベータ崩壊)。
- 陽子崩壊の発見。
- その他、今我々が予想していない・・・

新発見