

素粒子物理(ニュートリノ実験)について

小林 隆

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

素粒子物理学の大目標

力の分岐と統一理論

宇宙が生まれたときには超高エネルギー状態で、力は1種類だけだったと考えられている。その後、宇宙の温度が低下するにつれて、現在の宇宙でみられる4種類の力に分岐した。まず宇宙誕生直後に、重力が分岐した。次に強い力、最後に弱い力と電磁気力が分かれたと考えられている。

力の統一理論は、力の分岐を逆にたどるような形で研究が進んでいる。まず電磁気力と弱い力を合わせた「電弱統一理論」が完成した。強い力を含めた「大統一理論」も研究されている。重力をも含めた「超統一理論」が有力候補とされている。

大統一理論
(Grand Unified Theory: GUT)

未知!

超統一理論
(超ひも理論が有力候補)

大統一理論

電弱統一理論

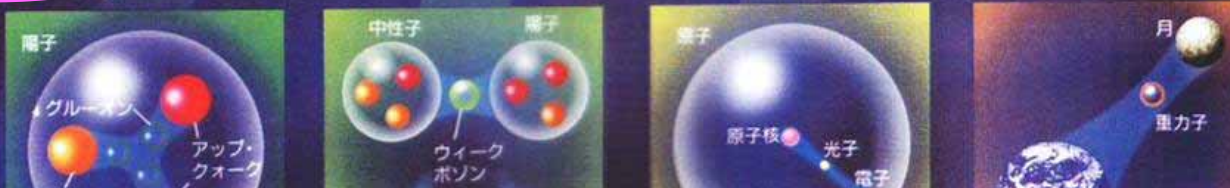
電弱理論
(Electroweak theory)

強い力:量子色力学
(Quantum Chromo Dynamics)

電磁気学→
量子電磁力学(QED)

確立!

標準模型



物質の究極の微小構成要素
極微の世界をつかさどる究極の法則
物質の起源の解明

98年7月号

J-PARCにおける素粒子物理

現在の素粒子の描像(標準模型)

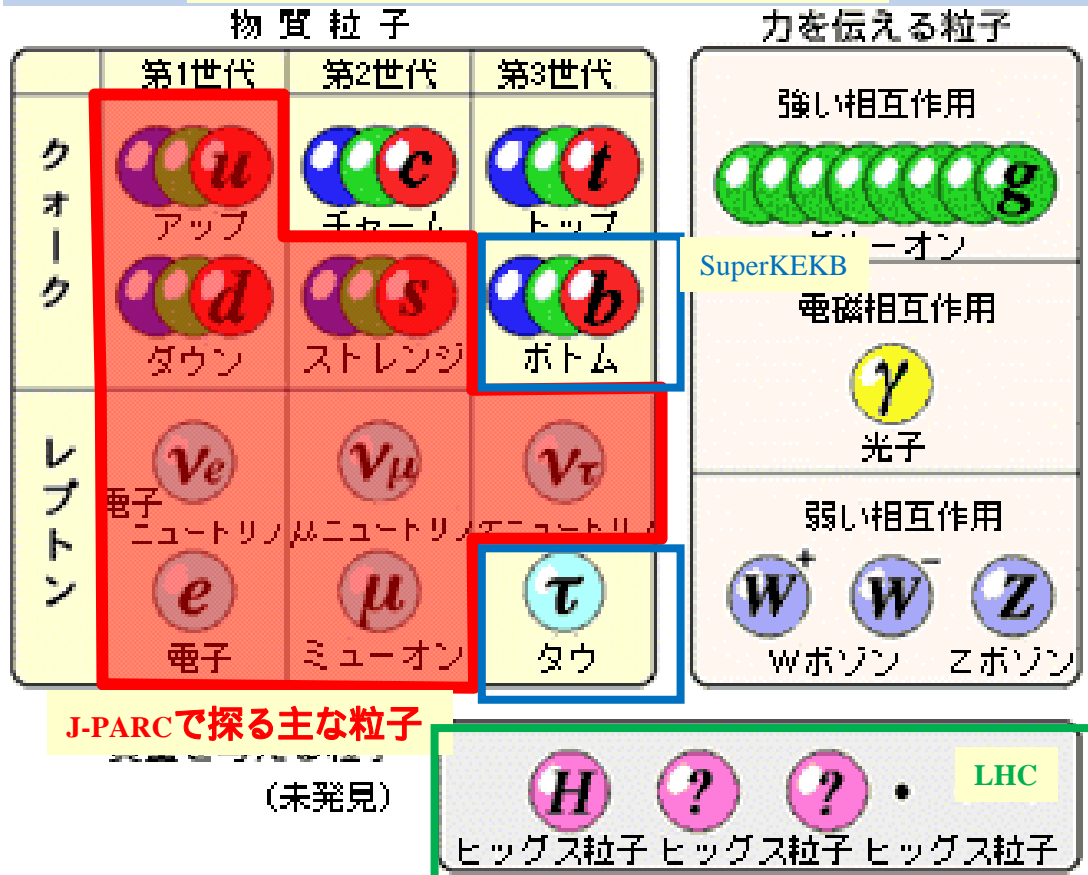


図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

- ◆ 大強度陽子ビームにより生成される大量の二次、三次粒子を利用
 - ❖ ニュートリノ
 - ❖ K中間子
 - ❖ ミュー粒子
 - ❖ 中性子
- ◆ レプトン(ニュートリノ、ミューオン)、クォークの性質を高い精度で解明
- ◆ 標準模型で説明できない性質の発見 → 標準模型を越える新しい物理を捉える
- ◆ **大強度の実現が生命線**

J-PARC全体で展開される研究

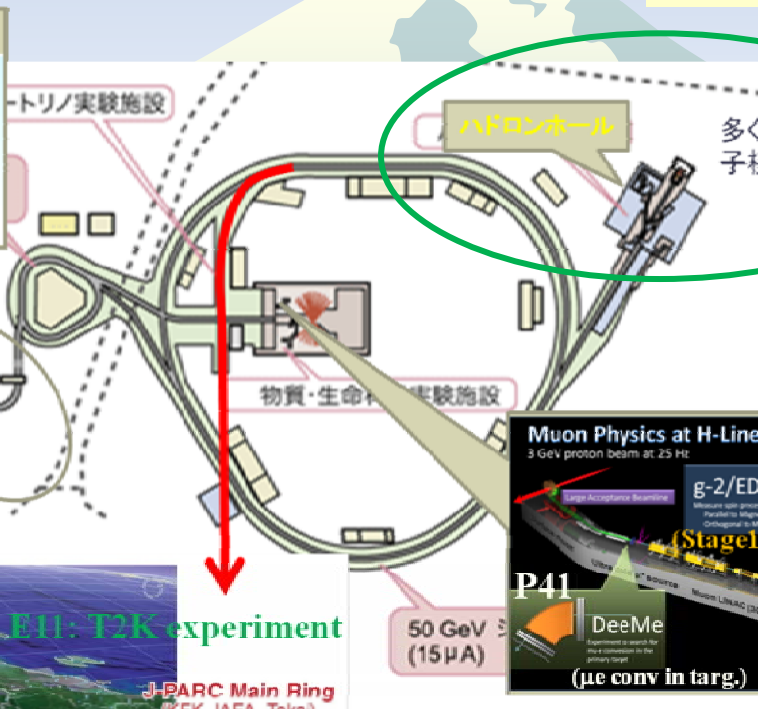
小林の報告

	粒子	ニュートリノ施設	ハドロンホール	MLF等
素粒子	ニュートリノ	T2K実験		
	K中間子		<ul style="list-style-type: none"> • 中性K中間子稀崩壊探索KOTO実験 • 荷電K中間子の時間反転非対称性探索 • 荷電K中間子崩壊におけるレプトン対称性 	
	ミューオン		$\mu \rightarrow e$ 転換探索COMET実験計画	<ul style="list-style-type: none"> • g-2/EDM測定実験計画 (MLF Hライン) • $\mu \rightarrow e$ 転換探索DeeMe提案 (MLF Hライン)
	中性子			電気双極子能率測定実験提案 (LINAC)
原子核	$\pi/K/p$		様々な原子核ハドロン実験	田中の報告 (主に原子核)

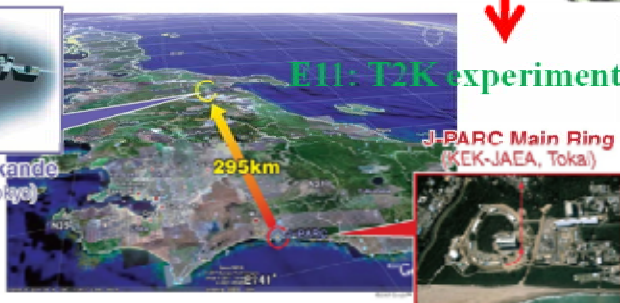
P33: nEDM $\rightarrow 10^{-27}$ ecm

LINAC beam on dedicated target \rightarrow high density UCN with new ideas of optics

加速器駆動核実験施設



- ◆ 赤: 実験中 or 建設中
- ◆ 青: 第一段階承認
- ◆ 緑: 提案段階



Muon Physics at H-Line in MLF
3 GeV proton beam at 25 Hz

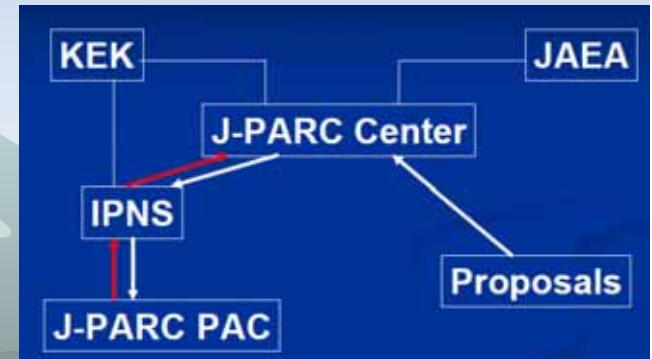
g-2/EDM P34
Measure spin precession precisely. Further improve field of 2.0 Oersted to 10.0. Field \rightarrow 20.0
(Stage 1 recommended)

P41 DeeMe
Experiment in search for dark component for the primary target (μe conv in targ.)

研究推進のための機構

(原子核実験も同じフレームワーク)

- ◆ ボトムアップの提案
 - ❖ 国内国際コミュニティから自発的に実験グループが組織される
 - ◆ 数十人～数百人
 - ❖ 実験提案書をPACに提出
 - ◆ 一般に実験は数カ月～数年測定 (パワーの重要性)
 - ◆ 測定装置(ビームラインを含む場合も)は実験グループが設計、建設、運転、保守、アップグレードに予算も含め責任をもつ
- ◆ プログラム諮問委員会 (PAC)
 - ❖ 実験提案の物理的意義、実現性を評価
 - ❖ 将来の施設整備計画
 - ❖ 国際的委員会
 - ◆ 15人中7人外国人、提案書、議論全て英語
 - ❖ 年2回
 - ❖ これまでに43件の提案を評価
 - ◆ Stage 1承認: 11件 (物理的意義と技術可能性)
 - ◆ Stage 2承認: 12件 (正式承認)
 - ❖ KEK素核研所長とJ-PARCセンター長に答申
- ◆ 加えて素核研内にPACの答申に基づいた運転計画や研究計画を所長に提言する組織



スムーズに機能

これまでと今後の研究計画

◆ 継続的な物理成果の創出

- ❖ T2K実験
- ❖ KOTO実験: 2012年本格的実験開始

◆ 今後5年の計画

- ❖ **設計強度の実現** → 強度フロンティア実験の本格的展開
- ❖ ハドロンホールの陽子ビームラインの高度化
 - ◆ **COMET実験の段階的実現**
 - ◆ (高運動量ビームによる原子核物理の新展開) → 田中の報告
- ❖ 将来の可能性を広げるための研究開発

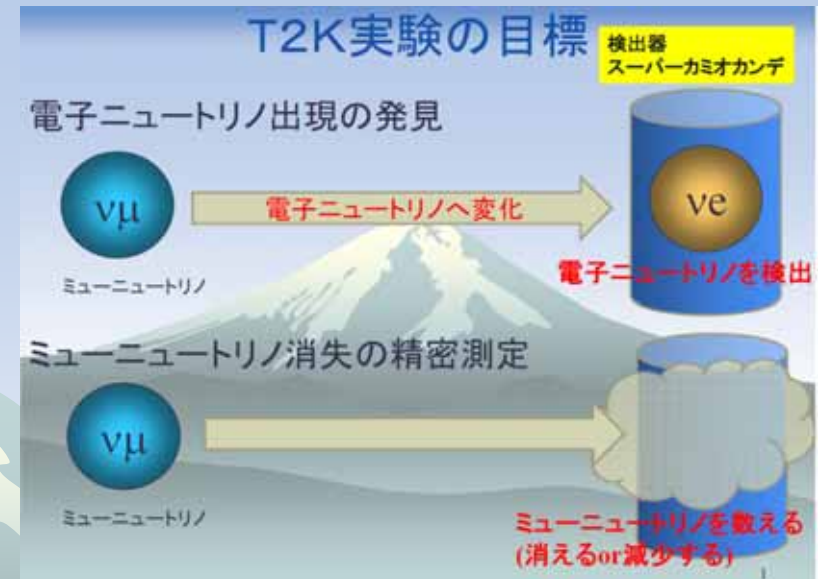
◆ 長期計画(~10年)

- ❖ ニュートリノにおけるCP非保存探索 → 宇宙の物質起源に迫る。
- ❖ 新たな可能性

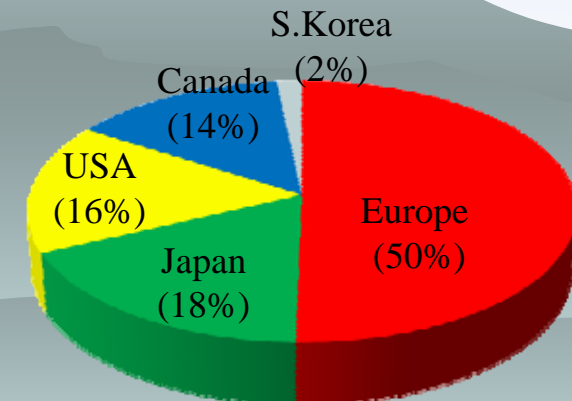
現行実験

The background features a stylized mountain range with a blue sky gradient. The mountains are rendered in shades of blue and green, with a prominent peak in the center. The sky transitions from a light blue at the bottom to a darker blue at the top.

T2K長基線ニュートリノ振動実験



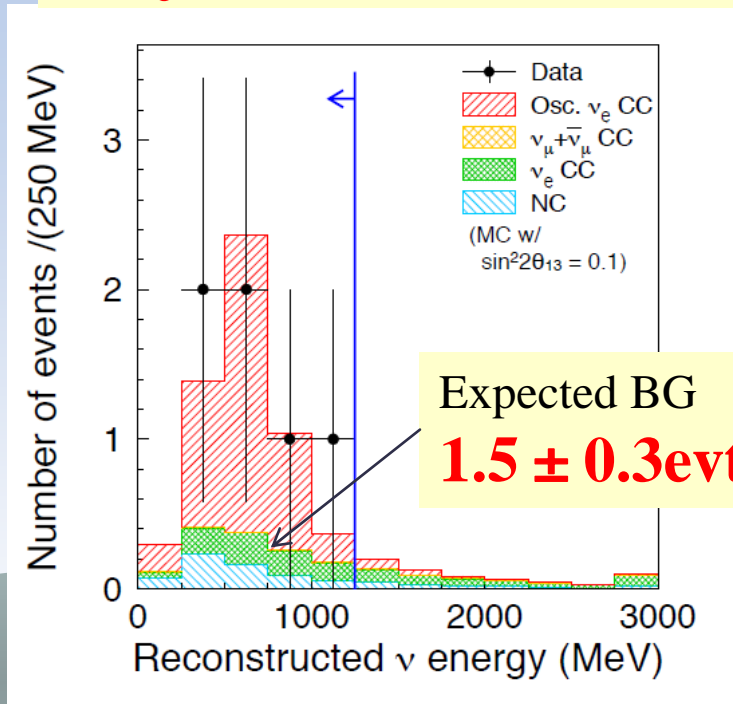
- ◆ 主目的
 - ❖ **ミューニュートリノ→電子ニュートリノへ変化の発見**
 - ◆ 世界中で発見競争
 - ❖ ミューニュートリノ消失の精密測定
- ◆ 世界最大強度ビームと世界最大の検出器で可能になる最高感度の実験に世界から500人を超える研究者
- ◆ 競争的資金約4億、海外から30億
- ◆ 計画通り2009年4月初ニュートリノビーム生成
- ◆ 2010年1月から本格的に測定開始
- ◆ 2010.1~2011.3.11までの全てのデータを解析
 - ❖ 145kW安定運転達成 (2012.4.8 190kW達成)
 - ❖ 1.43×10^{20} 個の陽子を標的に照射
 - ◆ PACで承認された量の2%
- ◆ **初物理結果を2011年6月に公表**



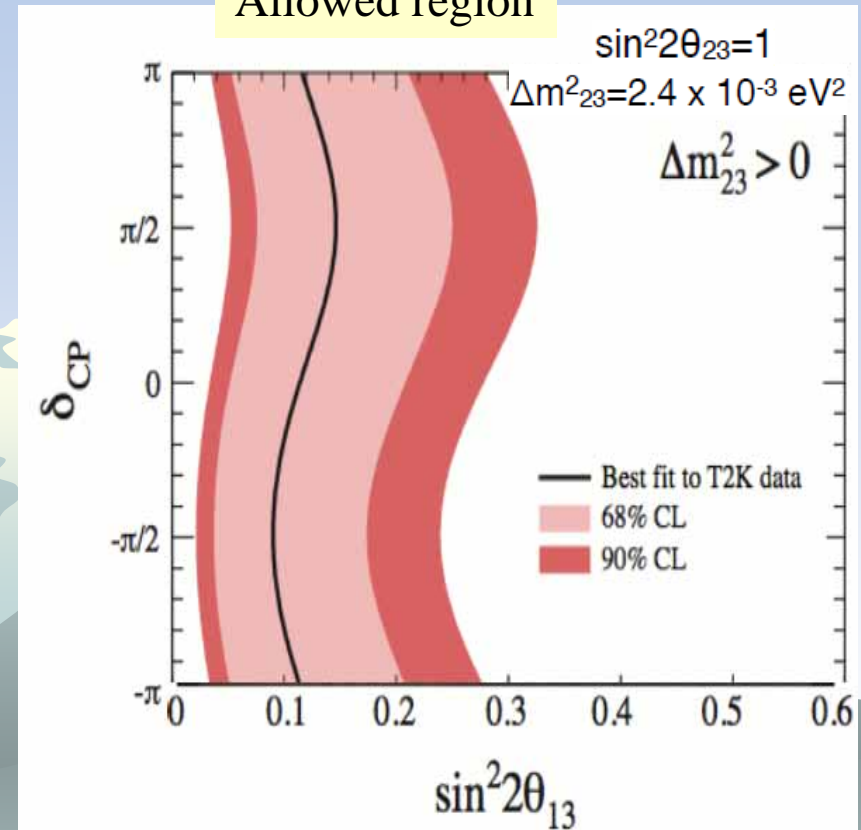
12カ国59機関から500名を超えるメンバー

電子ニュートリノ出現の検出

6 ν_e 候補事象を検出!




Allowed region



- ◆ 世界に先駆けて、電子ニュートリノ出現を検出
 - ❖ これまで発見されたニュートリノ振動では変化した先のニュートリノの種類が同定されたことは無かった
- ◆ ニュートリノ振動によるとした場合、未知の混合角が有限であることを世界で初めて示す。

成果発表等

PRL 107, 041801 (2011)  Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending
22 JULY 2011

Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam

◆ 電子ニュートリノ出現

- ❖ Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011)に掲載 (2012.4.8現在262回の引用)。“Viewpoint in Physics”に選ばれた。
- ❖ 英国物理学会により、2011年の全ての物理分野の成果の中でTop 10のブレイクスルーの一つに選ばれた。
- ❖ 新聞各紙報道

2011年6月16日 朝日新聞に掲載

「ニュートリノ 新変身観測

ミュー型 電子型 高エネルギー機構、世界初」

◆ ミューニュートリノ消失

- ❖ Phys. Rev. D 85, 031103(R) (2012) (arXiv:1201.1386v1)

◆ 実験装置に関するNIM論文

- ❖ T2K experiment, NIMA659 (2011) 106-135
- ❖ Detector NIM papers (MPPC: NIMA610(2009)128, NIMA622 (2010)567, TPC: NIMA637 (2011)25)
- ❖ その他多数準備中

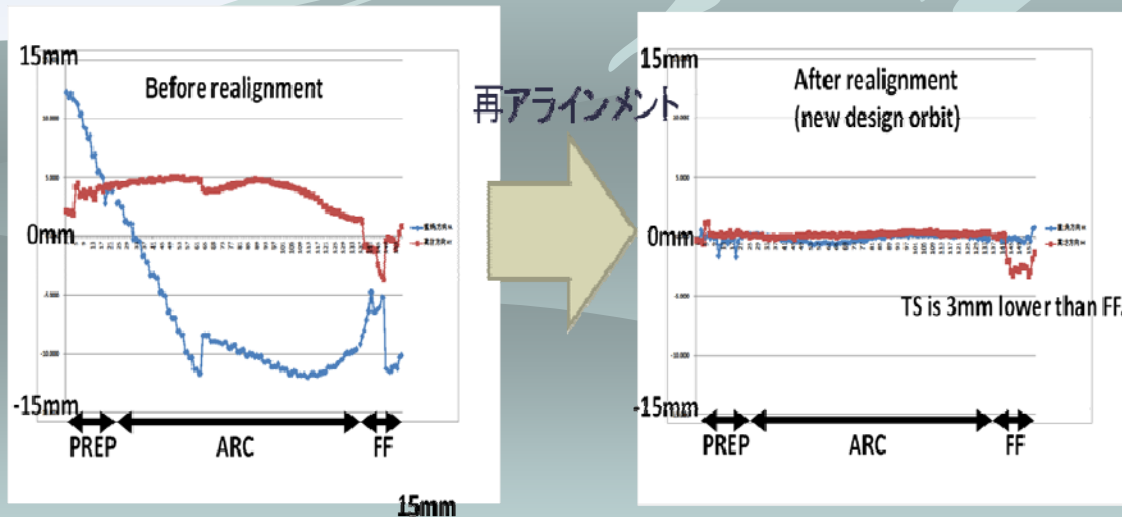
◆ 若手の育成

- ❖ 博士号取得14名、修士号取得33名
- ❖ 博士学生72名、修士学生11名在籍

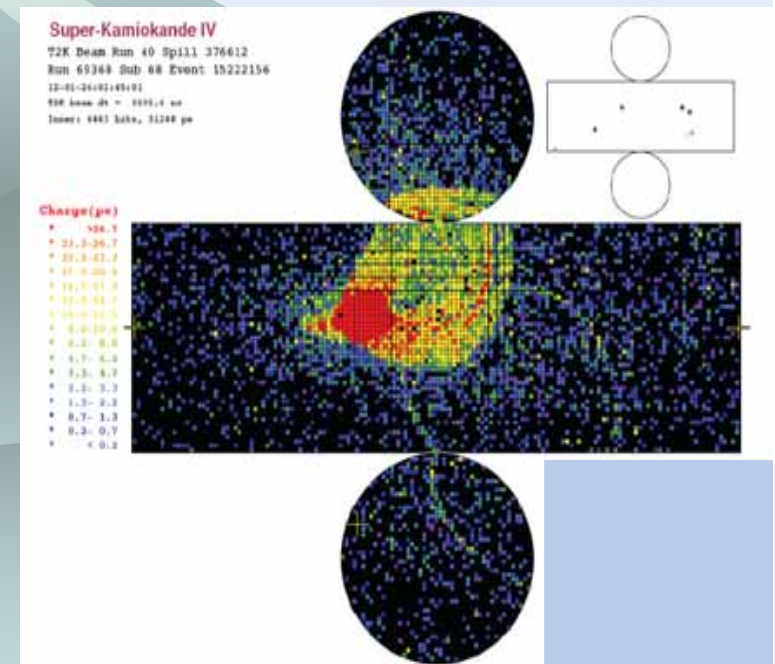
震災後

- ◆ 建屋、実験装置に大きな被害なし
- ◆ 建屋周りに深刻な沈下、配管配線断裂
- ◆ 陽子ビームライントンネル(~200m)の変形
 - ❖ →全ての磁石の再アライメント
- ◆ 2012年12月24日震災後初ニュートリノビーム
- ◆ 2012年3月8日本格的実験再開
 - ❖ 190kW定常運転達成

震災後初のニュートリノ事象



--- ΔR :horizontal direction
--- ΔH :height



今後のニュートリノ実験プログラム

◆ T2K実験

❖ 電子ニュートリノ出現の確立

- 原子炉実験は**反電子**ニュートリノの**消失**を検出。変化した先のニュートリノを同定した(出現)実験はT2Kが初めて。出現を早急に確立する必要がある。
- 2013夏までに**99.9999%以上の確率で存在を決定する**

❖ ニュートリノ振動の高精度測定

- 電子ニュートリノ出現を精密測定
 - 他の実験と組み合わせることにより、CP対称性や質量の階層性などのニュートリノの謎を解くヒントを捉えることを目指す。
- ミューニュートリノ消失を精密測定
 - 2番目と3番目のニュートリノの混合が本当に最大(45度)か？本当に45度なら背後に未知の物理の存在が強く示唆

◆ 反ニュートリノ測定の可能性

- 振動現象はまだ反ニュートリノではあまり調べられていない。(消失、出現とも) 同じ法則に従うのか？
- 反応確率はニュートリノの3分の1から4分の1

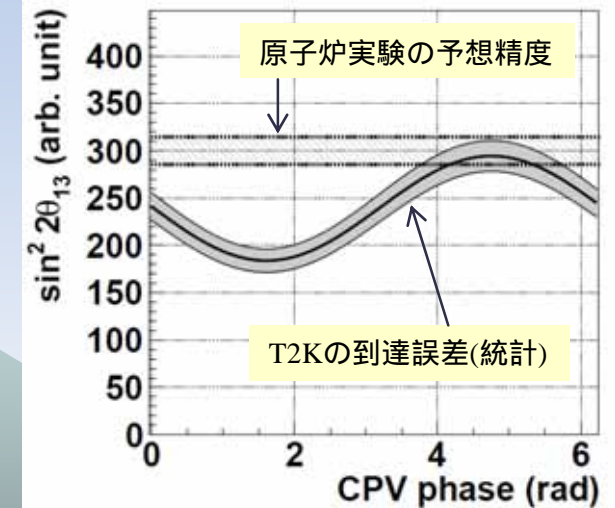
◆ 高精度測定や反ニュートリノ測定のためには設計強度の早期実現は必須。

◆ さらに将来

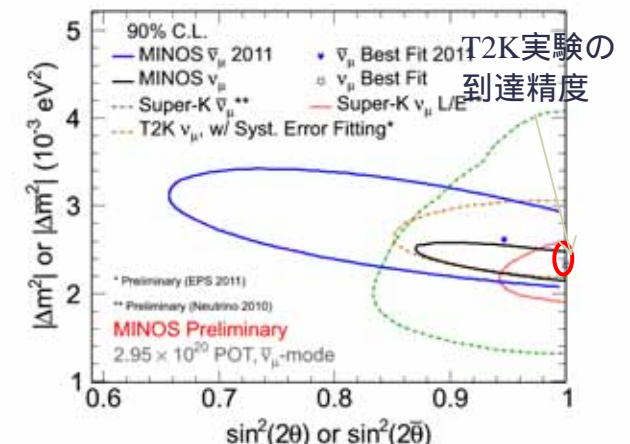
- 加速器のさらなる大強度化 & 超大型高精度検出器の建設 → ニュートリノにおける物質反物質対称性の破れの探索
- 宇宙の物質起源の謎に迫る
- 検出器のR & D遂行中

750kWx5年(5x10⁷s) (180kWで20年)で期待される結果の例

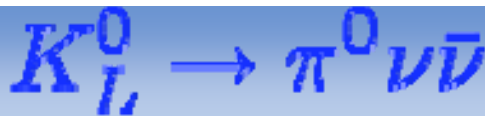
電子ニュートリノ出現



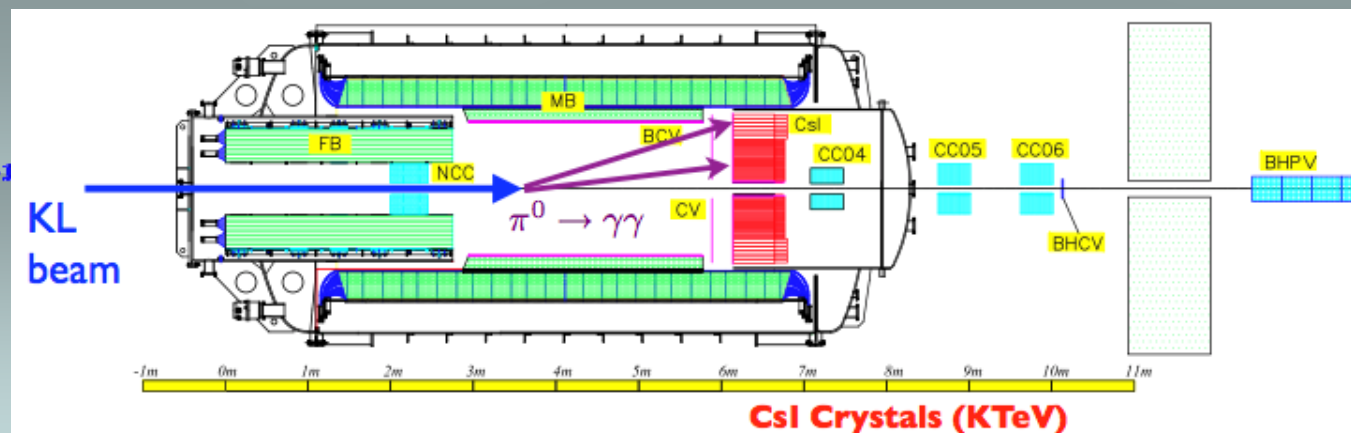
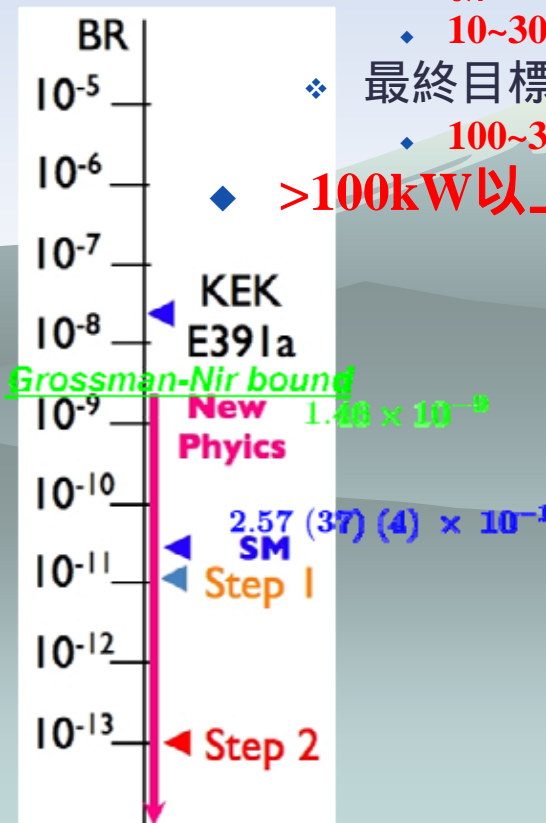
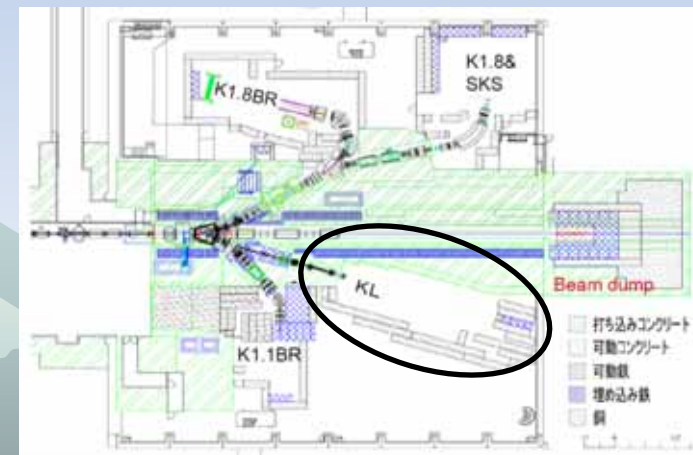
ミューニュートリノ消失



KOTO 実験



- ◆ 極めて稀なCP非保存崩壊現象の探索
→ 新たな物理の発見を目指す
- ◆ 65名(海外28名)のグループ
- ◆ 国内競争的資金4.6億、海外2.9億
- ◆ **建設の最終段階。**
- ◆ 目標
 - ❖ 2013夏まで: $\sim 10^{-9}$ 以下の分岐比を目指す。
 - ◆ **新しい物理の領域**
 - ◆ **10~30kW x 4週**
 - ❖ 最終目標(step1): 1×10^{-11}
 - ◆ **100~300kW x 3年**
- ◆ **>100kW以上のパワーが不可欠**



KOTOのマイルストーン

◆ 2009

- ❖ ビームライン完成
- ❖ ビームテスト → K中間子の収量が提案書で想定した量の2.3倍であることがわかった → よいニュース
- ❖ **NIMA664 (2012) 264-271**

2009年のデータ

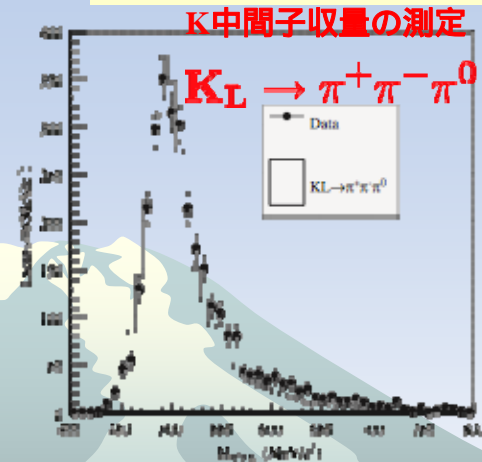
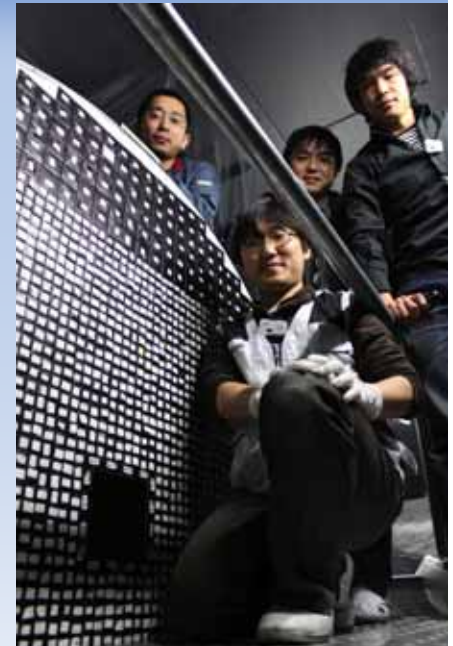


Fig. 9. Invariant mass distribution of $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ after subtracting all the background with a fit using the χ^2 method. The fit is shown with the black line. The data points are shown with the error bars.



Completion of CsI calorimeter (Feb.8,2011)

◆ 2010~

- ❖ 検出器建設

◆ 2011

- ❖ 震災による深刻なダメージはなし

◆ 2012

- ❖ 2月エンジニアリングラン
 - ◆ 検出器の較正
- ❖ 実験開始

2012年2月のデータ

