2011年9月17日（土）
日本物理学会＠弘前大学

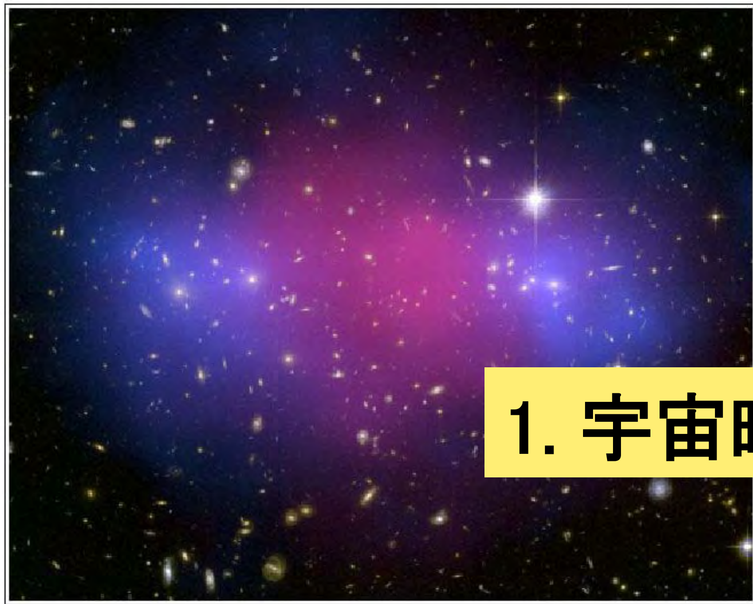
10年先を俯瞰した J-PARCにおける素粒子実験の展望

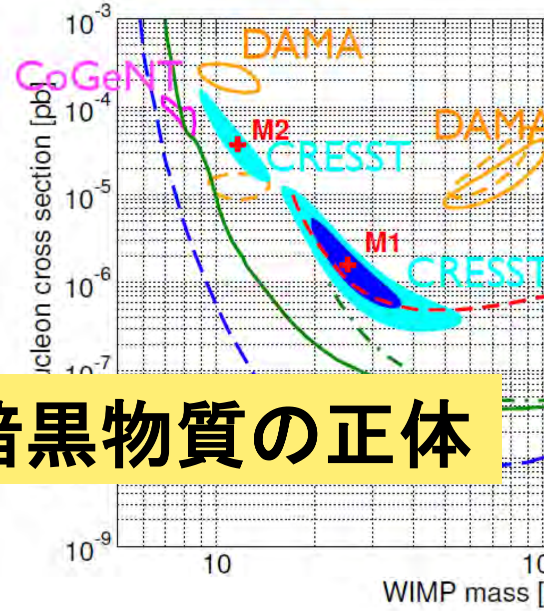
中家　剛（京都大学）

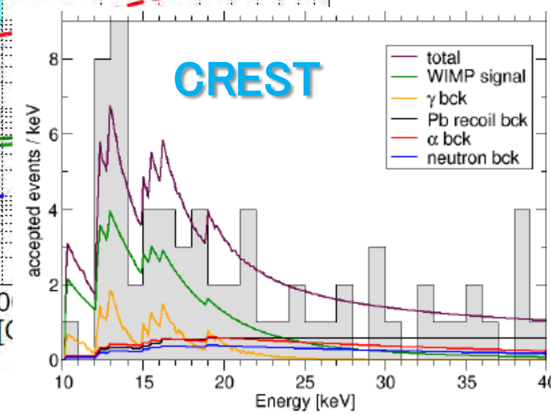
現状

理解できない数々の現象

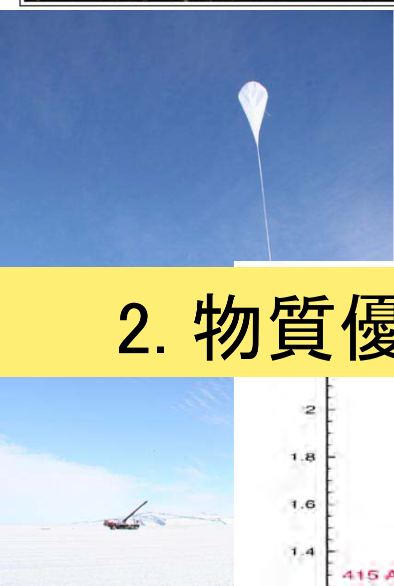
1. 宇宙暗黒物質の正体
   - 宇宙観測だけからでなく、地上実験でも信号？が！
2. 物質優勢な宇宙
   - 宇宙起源の反物質がない。
3. 力の統一
   - SUSYを入れて、GUTスケール（~10^{16} GeV）で統一？
4. クォークとレプトンの間の対称性
   - 異なる質量構造、異なる混合行列
5. 11桁以上にわたる粒子の質量スペクトル
   - m_ν(<~1eV/c2) ～ m_t(=175 GeV/c2)
6. 世代構造、暗黒エネルギー、強い相互作用のCP問題、等々
   - なぜ3世代？、暗黒エネルギーの正体は？、なぜ強い相互作用でCPは保存？

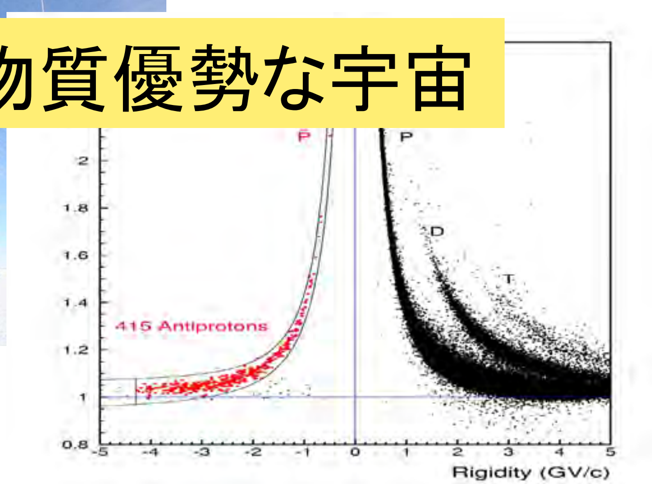




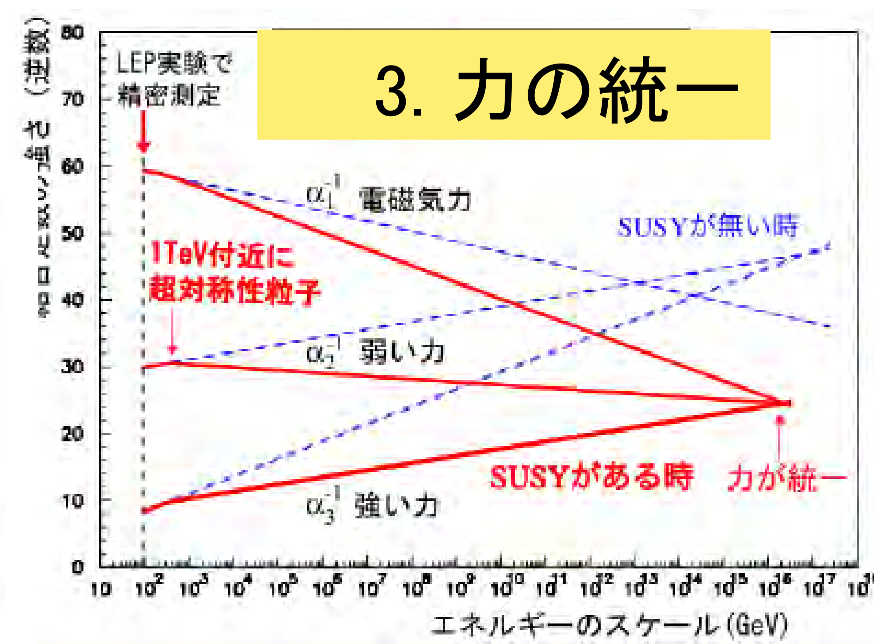


1. 宇宙暗黒物質の正体





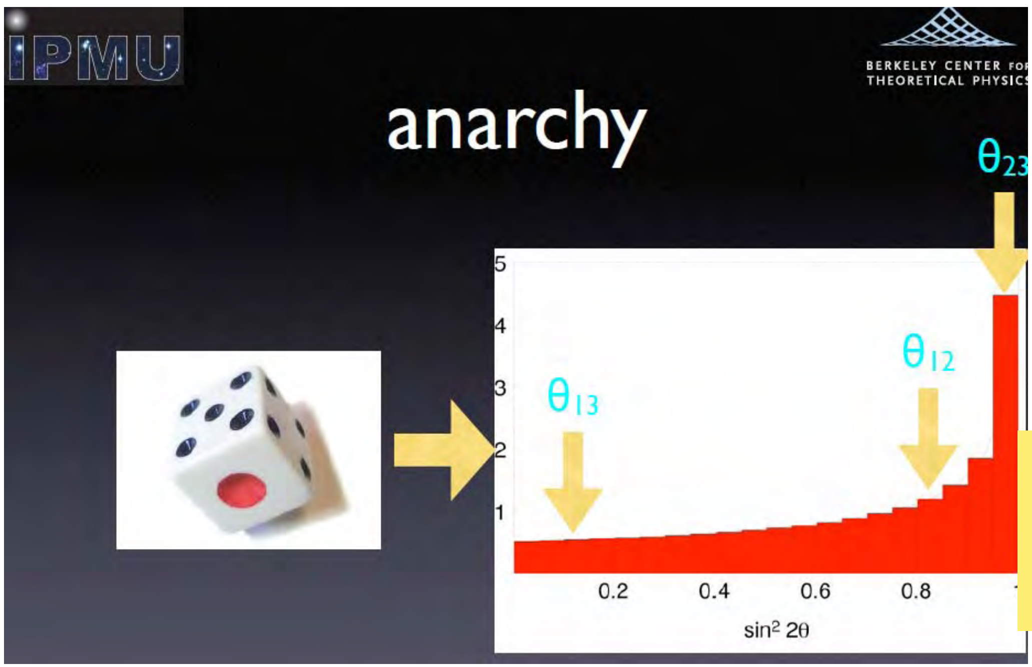
2. 物質優勢な宇宙



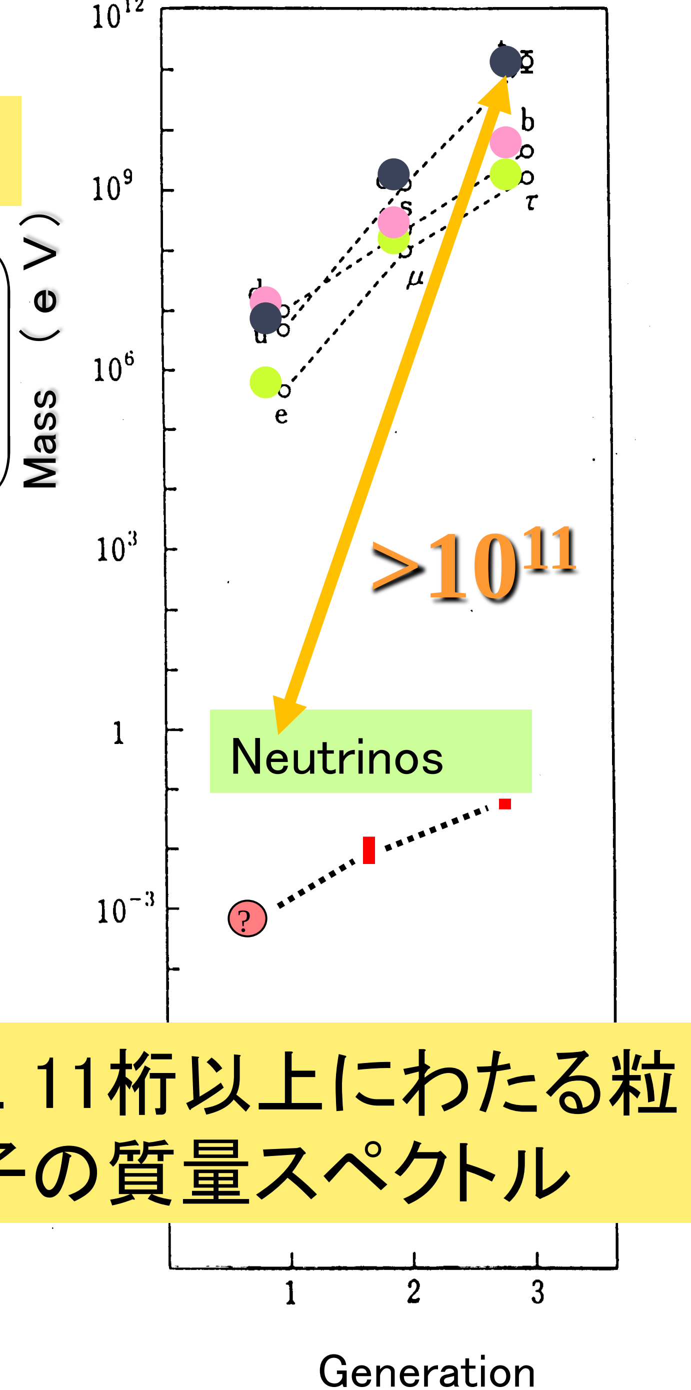
3. 力の統一

4.クォークとレプトンの間の対称

$$|V_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} 0.97 & 0.23 & 0.004 \\ 0.23 & 0.96 & 0.04 \\ 0.007 & 0.03 & 1 \end{pmatrix} \qquad |V_{MNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & 0.16 \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

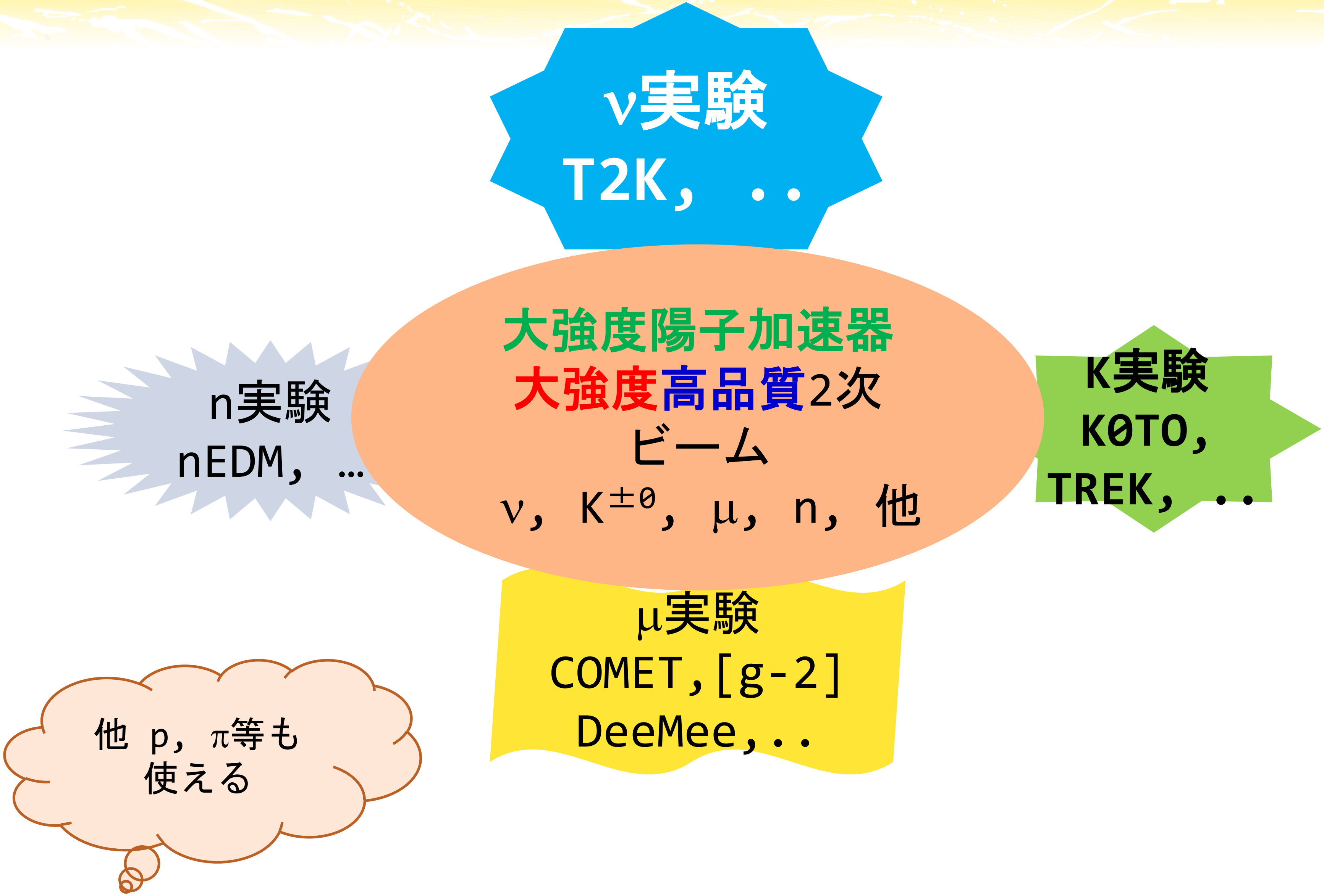


村山さん講演



5. 11桁以上にわたる粒子の質量スペクトル

J-PARCにおける素粒子実験プログラム



将来計画委員会の活動

http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hecsubc/activities.html

- Hearing (6/27/2009～6/12/2010)
  - LHC, neutrino, B, ILC, 宇宙, μ, K, n
- タウンミーテングー
  - **Kick-off: 6/25/2011@東大**
    - エネルギーフロンティア、**ニュートリノ**、**フレーバー**（B**Kn**, **μ**τ）、地下実験、宇宙観測
  - 地下素粒子実験・宇宙観測：7/29/2011@IPMU
  - **J-PARCでの物理： 8/9/2011@J-PARC**
    - **ν, μ, K, n & 加速器**
  - コライダーの物理： 9/10/2011@名古屋大

Outline

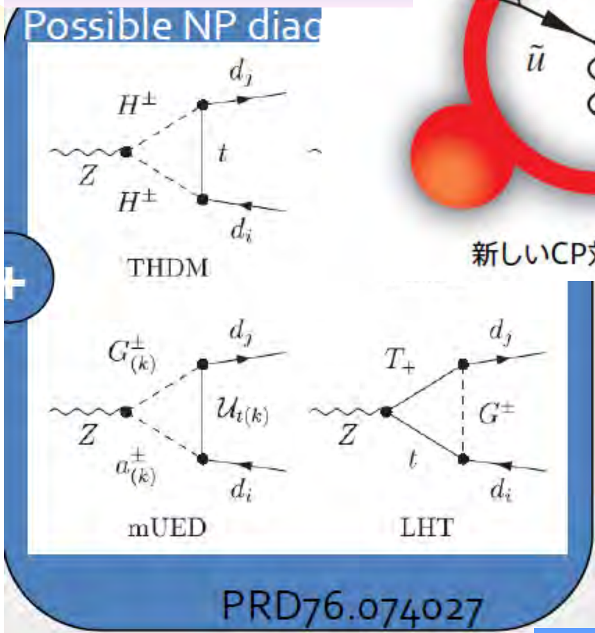
1. J-PARCで拓く素粒子物理
    1. New Physics in the TeV region
    2. A window to access the GUT physics
2. 加速器
3. １０年先の実験に向けて
    1. ニュートリノ
    2. K中間子
    3. ミューオン
    4. 中性子
4. 最後に

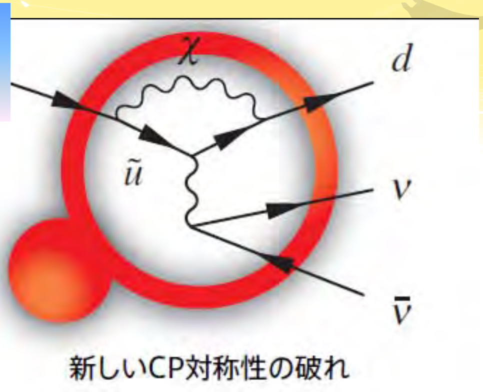
J-PARC実験で拓く物理

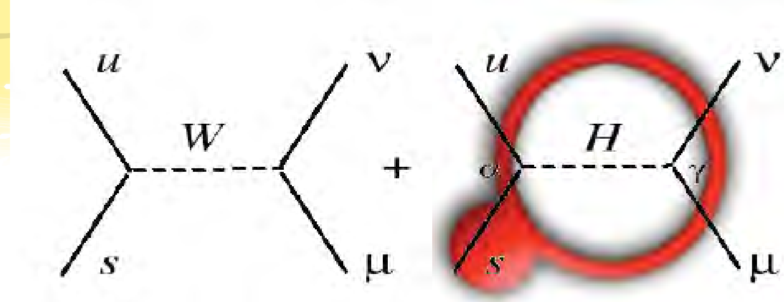
- New Physics in the TeV region.
  - SUSY, Extra-dimension, etc..
- A window to access the GUT physics.
  - ν mass and the information
  - ν CP
  - Proton decay
  - Charged lepton flavor violation

A new physics in the TeV region

$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$



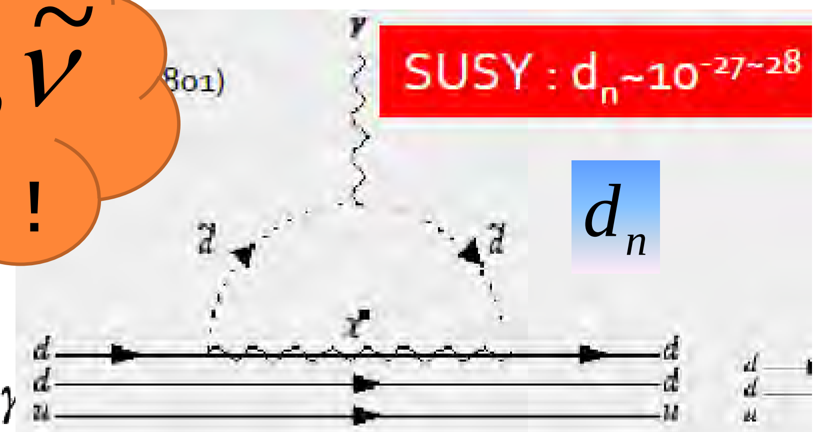




$K^+ \to \pi^0 \mu^+ \nu$

$\tilde{\chi}, \tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{\nu}$

が人気！！

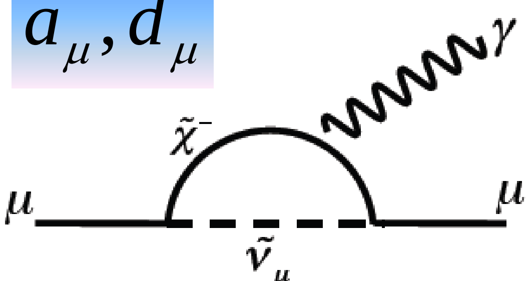


d_n

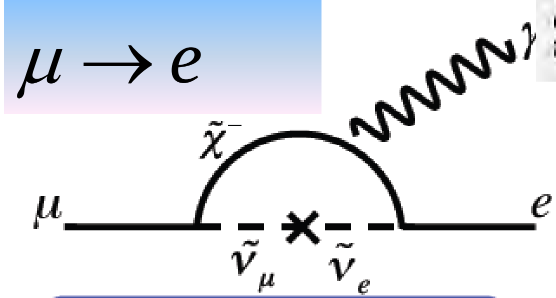
a_μ, d_μ

$\mu \to e + \gamma$

$\mu \to e$



Diagonal elements by g-2, EDM



Muon LFV (μ→eγ, μ→e conv.)

しかし、

$\tilde{u}, \tilde{d}$

がLHCで見えない？？

A SUSY model

W. Altmannshofer. et. al.
Nucl.Phys.B830:17-94,2010

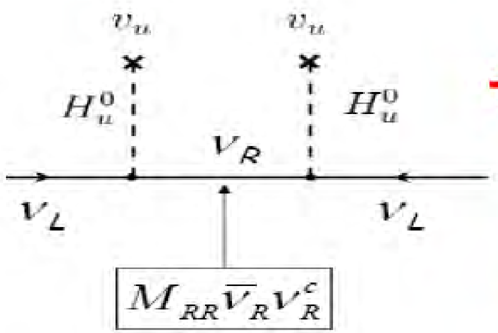
	AC	RVV2	AKM	δLL	FBMSSM	LHT	RS
$D^0-\bar{D}^0$	★★★	★	★	★	★	★★★	?
ϵ_K	★	★★★	★★★	★	★	★★	★★★
$S_{\psi\phi}$	★★★	★★★	★★★	★	★	★★★	★★★
$S_{\phi K_S}$	★★★	★★	★	★★★	★★★	★	?
$A_{\rm CP}(B\to X_s\gamma)$	★	★	★	★★★	★★★	★	?
$A_{7,8}(B\to K^*\mu^+\mu^-)$	★	★	★	★★★	★★★	★★	?
$A_9(B\to K^*\mu^+\mu^-)$	★	★	★	★	★	★	?
$B\to K^{(*)}\nu\bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★	★
$B_s\to\mu^+\mu^-$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★	★
$K^+\to\pi^+\nu\bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★★★	★★★
$K_L\to\pi^0\nu\bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★★★	★★★
$\mu\to e\gamma$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★
$\tau\to\mu\gamma$	★★★	★★★	★	★★★	★★★	★★★	★★★
$\mu+N\to e+N$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★
d_n	★★★	★★★	★★★	★★	★★★	★	★★★
d_e	★★★	★★★	★★	★	★★★	★	★★★
$(g-2)_\mu$	★★★	★★★	★★	★★★	★★★	★	?

μが有望か？

Table 8: "DNA" of flavour physics effects for the most interesting observables in a selection of SUSY and non-SUSY models ★★★ signals large effects, ★★ visible but small effects and ★ implies that the given model does not predict sizable effects in that observable.

GUT Physics

- **Seesaw paradigm:** R.N. Mohapatra@NuFact2011
- **Add right handed neutrinos N_R to SM with Majorana mass:**



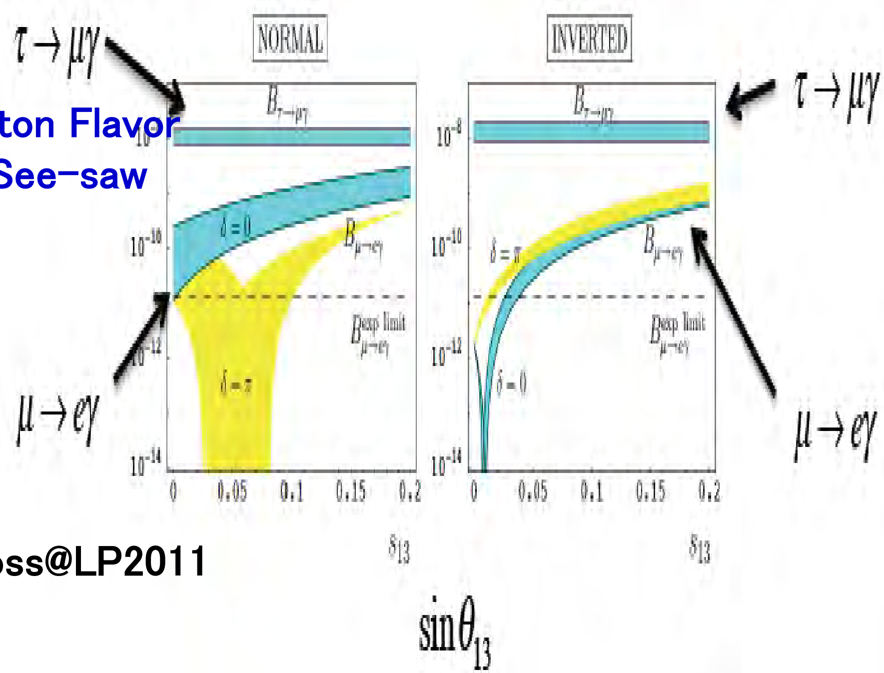
→ $m_\nu \cong -\frac{h_\nu^2 v_{wk}^2}{M_R}$ (Type I)

→ neutrinos necessarily Majorana

→ MR large so that nu mass small

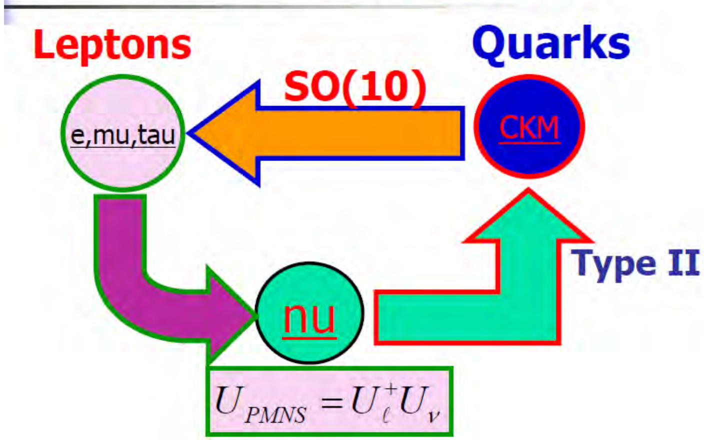
Minimal Lepton Flavor Violation + See-saw

MLFV1:



G.G. Ross@LP2011

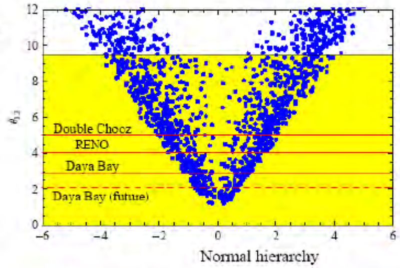
Intimate quark-lepton connection in SO(10)-II



R.N. Mohapatra@NuFact2011

- θ_{13} - θ_{23} correlation –testable feature of models

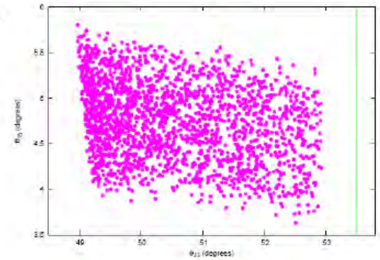
Approx $\mu-\tau$



(figure from He, Yin'11)

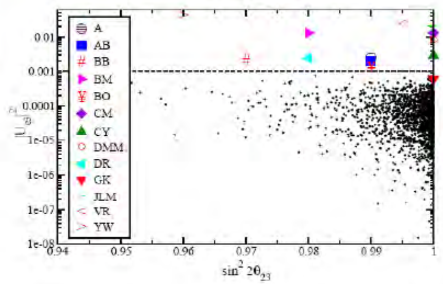
SO(10)xS4

(Dev, RNM, Severson)



- GUTs vs ~TBM

(Albright, Rodejohann)



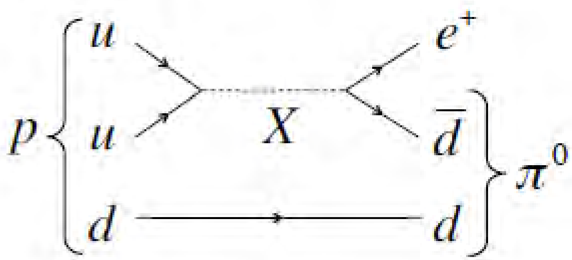
SU(5)xT'

(Pakvasa, Bjorken,King, Chen, Mahanthappa,..)

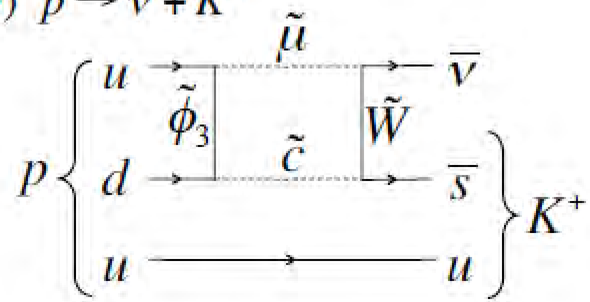
$$\theta_{13} = \frac{\theta_C}{3\sqrt{2}} \sim 3^0$$

Proton Decay

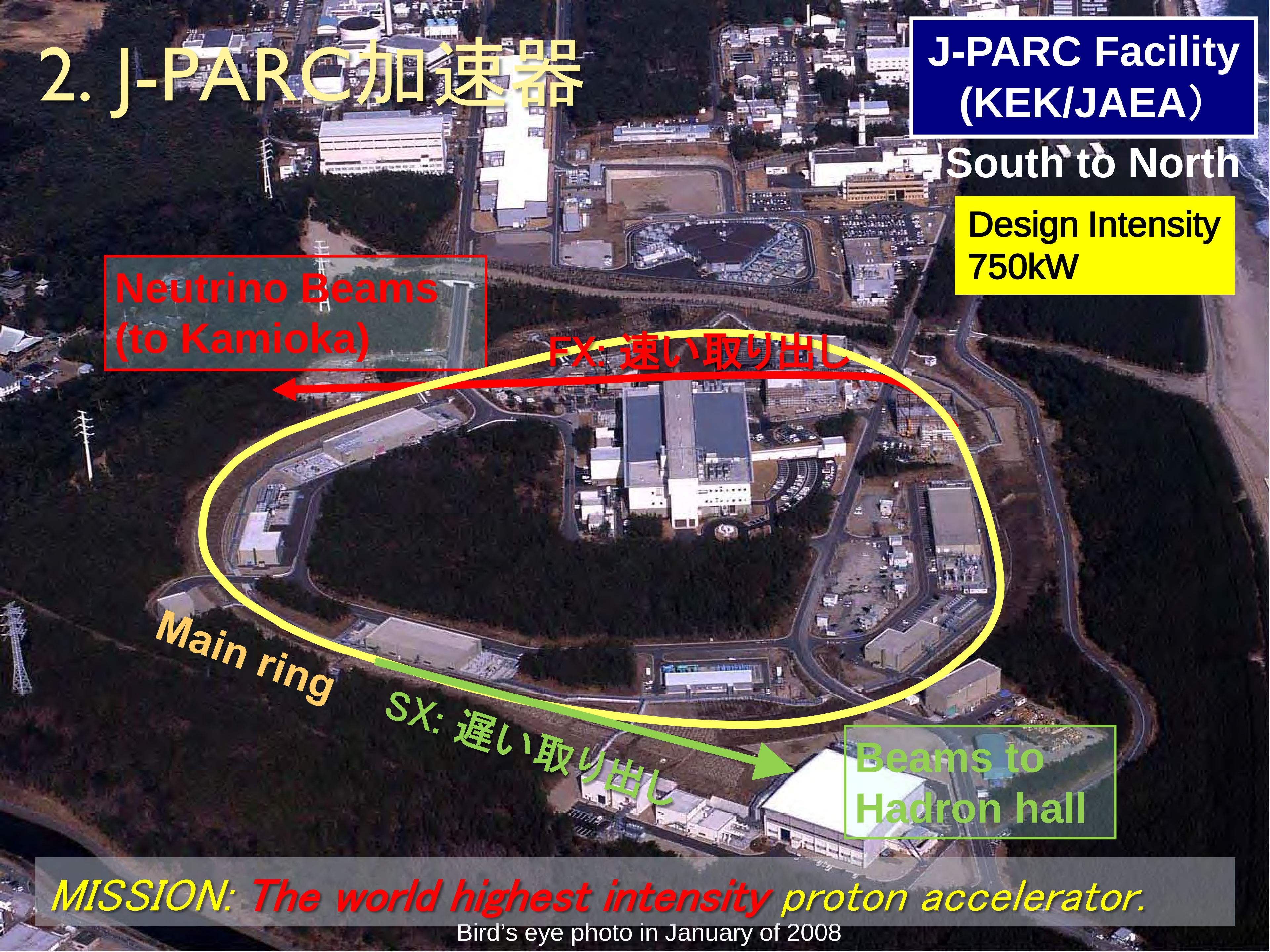
(a) $p \to e^+ + \pi^0$



(b) $p \to \bar{\nu} + K^+$

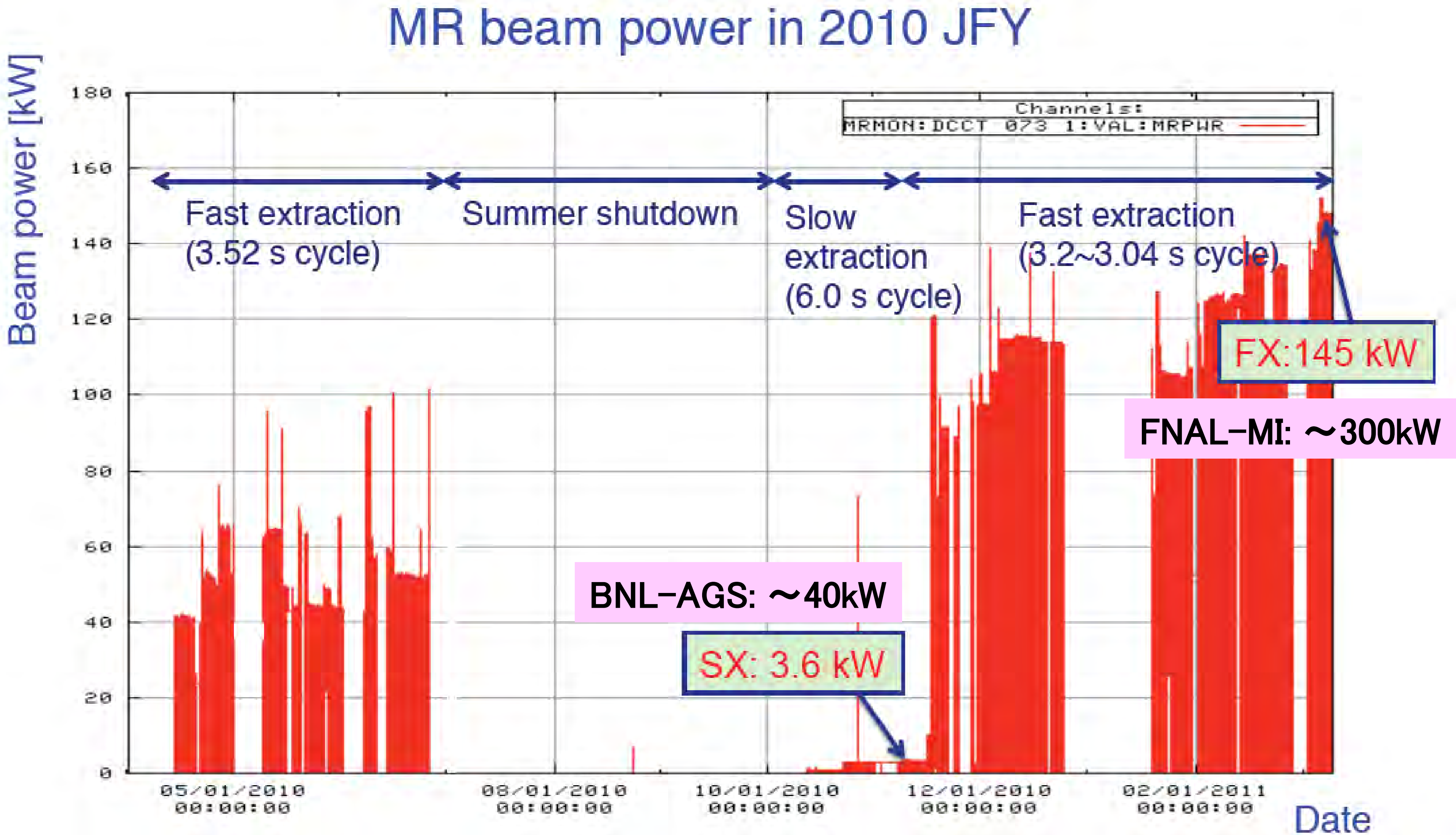


2. J-PARC加速器



Bird’s eye photo in January of 2008

現状（震災前）



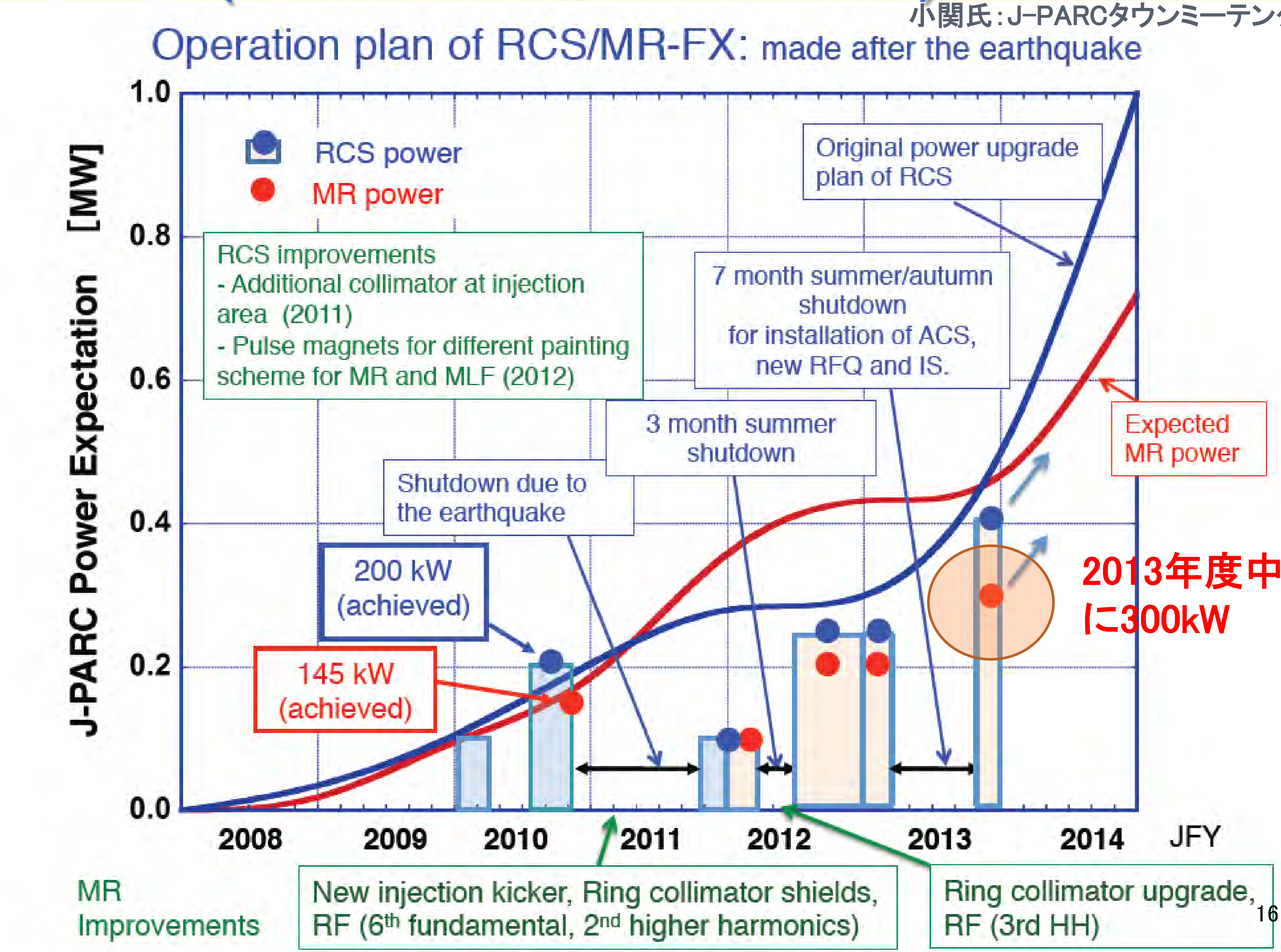
小関氏：J-PARCタウンミーテングより

実験の要求（希望）

- ν
  - T2K: **750kw×10^7s**/year
  - Beyond T2K (for CPV): **~2MW** [note: KEK roadmap: **1.66 MW**]
- K
  - K0TO(proposal): **290kW×3years**
    - 2.3 higher Kaon flux may reduce the requirement to ~100kW×3years
- μ
  - COMET: **56kW(8GeV) w/3bunches [~560kW@30GeV w/8bunches]**
  - DeeMee@RCS: **1MW**
  - g-2@RCS: **1MW**
- n
  - nEDM@Linac: **250kW@400MeV**

現状 (FX: Fast Extraction)

小関氏：J–PARCタウンミーテングより



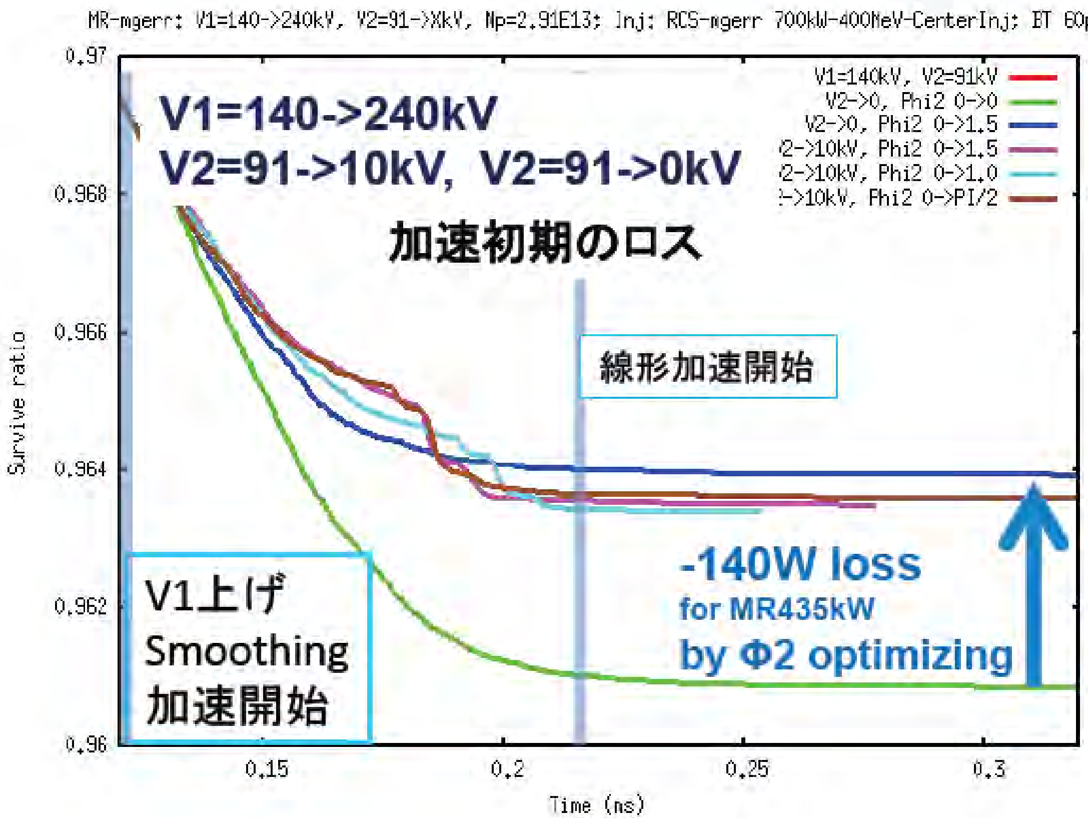
現行電源で可能な繰り返し=2.4 sでのシナリオ

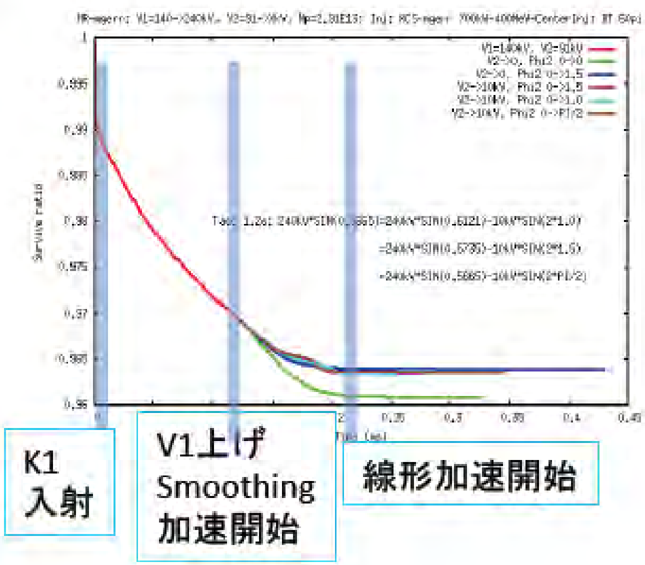
RCS:
フルエラー
700 kW
400 MeV Center入射

MR 435 kW
フルエラー;
Trep 2.4 s
350BT loss 1.3 kW
60π cut

BT/MR コリメータバランス

MRパワー 435 kW
MRロス(65π cut) 1.3 kW





Tune=(22.43, 20.76)

小関氏：J-PARCタウンミーテングより

2014年度以降：仕様値750 kW(FX)の達成

オリジナルプラン（J-PARC建設開始時）

750 kW @ 50 GeV ：J-PARC第2期計画（必要経費 < 100億）

-> オリジナルプランと同程度、またはそれ以下の予算で、仕様値の早期達成を目指す。

基本方針：高繰り返し化

現行電源の改修で得られる繰り返しは、2.2-2.6 s が限界。主電磁石電源の交換によって、1 s 繰り返しを目指す。

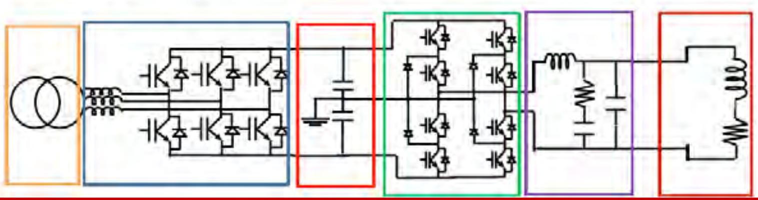
- 新電源（高繰り返し、低リプル、フリッカー対策）
- 高勾配加速空洞（磁性材料開発、小型化）：増設と現行空洞の一部置き換え
- インフラ整備：電源棟の増設を含む

Y. Kurimoto/K. Koseki

R&D of new magnet power supply

- High rep rate (> 1 Hz),
- Energy recovery using condenser bank
- Small current deviation ..

A small scale prototype and a real scale prototype (for QFR) will be manufactured and tested in 2011/2012.



小関氏：J-PARCタウンミーテングより

現状（SX: Slow Extraction）

SX power upgrade plan (~2013)

	User operation
2011.6-11(shutdown)	SX collimators
2011.12-2012.6	3 – 5 kW
2012.7-2012.9 (shutdown)	Ti chambers (SMS)
2012.10-2013. 6	10 kW
2013. 7-2014. 1 (shutdown)	Li 400MeV/50 mA,
2014. 2-2014. 6	50 kW
2014.7 – 9(shutdown)	
2014. 10-	100 kW

Plan made after the earthquake

	User operation	Accelerator study
wn)	SX collimators	
	3 – 5 kW	5 – 10 kW
utdown)	Ti chambers (SMS)	
	10 kW	50 kW
shutdown)	Li 400MeV/50 mA, Ti chambers (ESS)	
	50 kW	100 kW
wn)		
	100 kW	

For duty

- Upgrade of RQ power supply for higher o
- Coil short / ripple cancellor
- increase emittance
- ramping speed control of horizontal tune
- Replace the main magnet power supplies

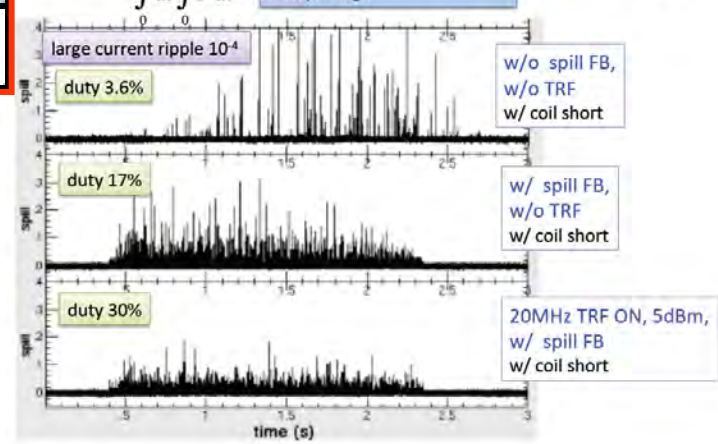
(

Time structure of extracted beam

$$Duty = \frac{\left(\int_0^T I dt\right)^2}{\int_0^T dt \int_0^T I^2 dt}$$

I(t): PM signal sampled at 100KHz through 10KHz LPF
t=0: spill start
t=T: spill length

Duty 100 %



小関氏：J-PARCタウンミーテングより

Future of J-PARC accelerators

- 10年先のMWクラスの加速器に向けてのアイデアがタウンミーテングで紹介された
  - For FX: Second booster ring for MR with >6GeV
  - For SX: Stretcher ring

To be continued….

3. 10年先の実験（発見）に向けて

- 10年先の実験は
  - 既存の実験の延長線上に育つ
    - T2K、KOTO実験，TREK実験（from 12GeV-PS）
  - 新しい実験、新しいアイデアから派生
    - COMET、DeeMee、g-2、nEDM
    - 新提案？

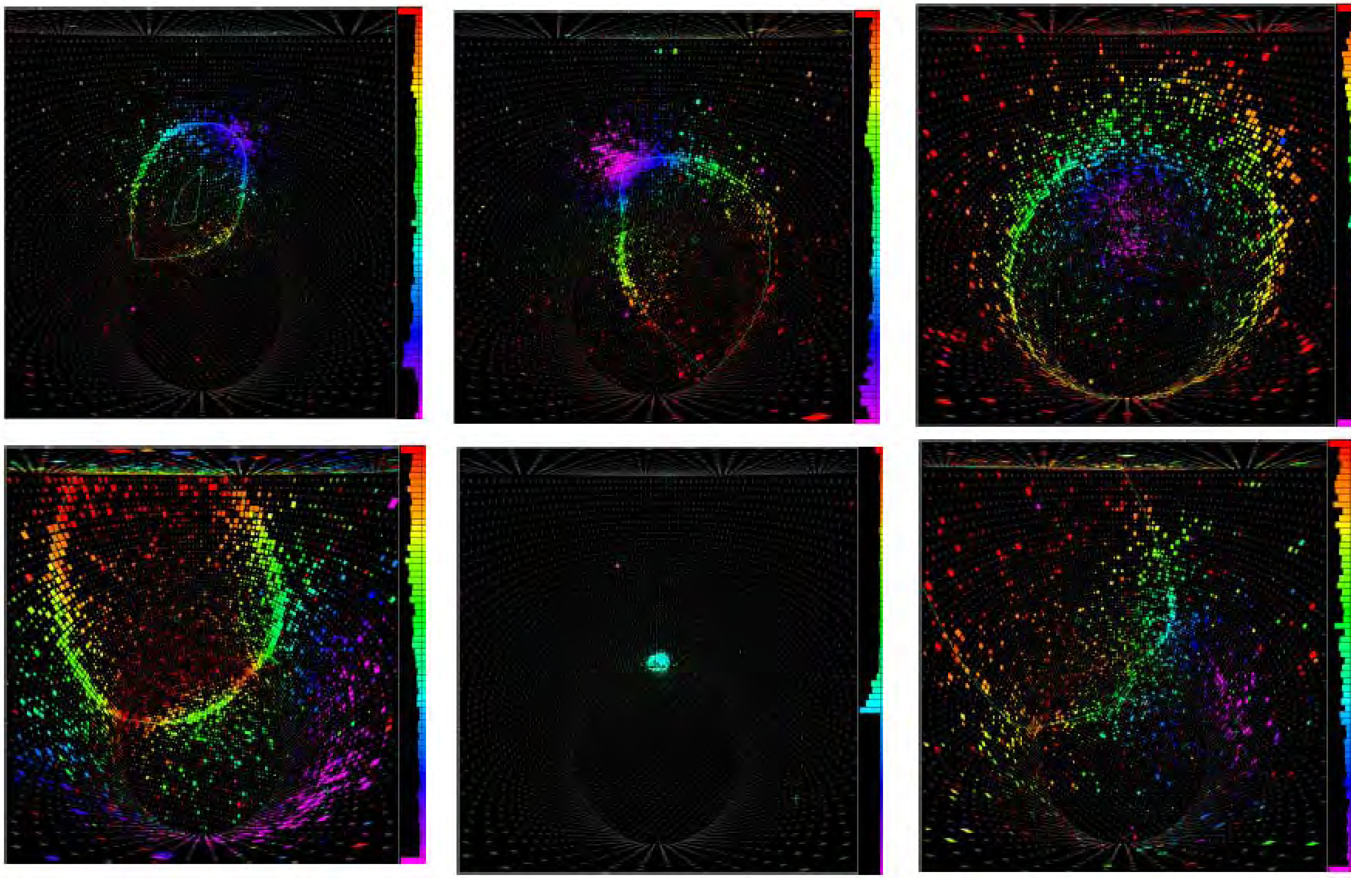
どれが、種になるか現時点では決定できない

よって、各実験を紹介し、将来に各実験から出た物理結果と物理の情勢を照らし合わせ、適宜方針を決めて行く。

- J-PARCで行わない、関係実験は省いています。
  - 原子炉ν振動実験（DoubleChooz，KASKA）、$\mu \to e\gamma$等

T2K 最新結果（$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$）

電子ニュートリノ事象候補



1.5±0.3 BG事象

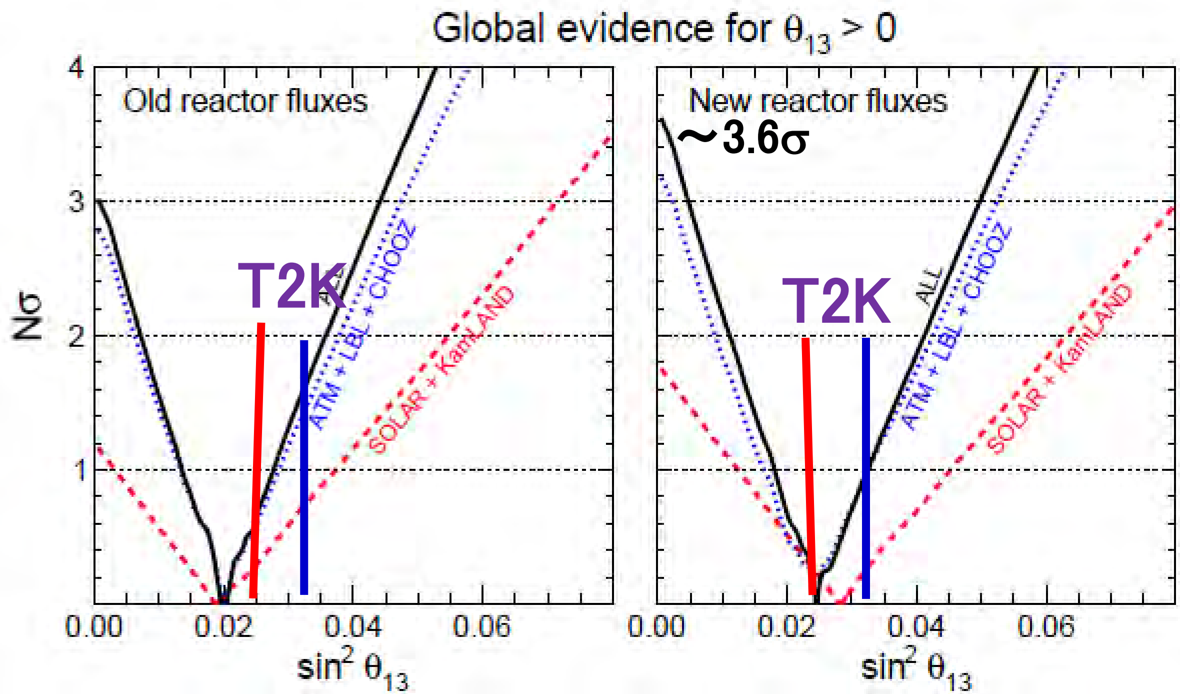
Phys.Rev.Lett.107: 041801,2011
74引用(6月より)

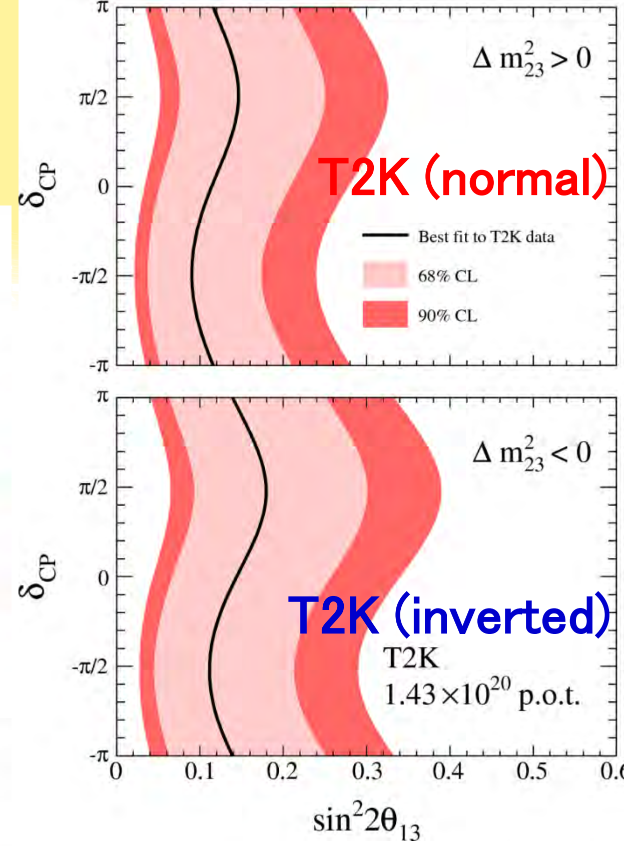
角野@JPS 16aSD
奥村@JPS 18aSY

- 2.5σで電子ニュートリノ出現（$\theta_{13}>0$）を示唆
  - $\sin^2 2\theta_{13}=0.11$ (best fit) for normal mass hierarchy
  - $\sin^2 2\theta_{13}=0.14$ (best fit) for inverted mass hierarchy

θ_{13} 現状

G.L. Fogli, et. al., arXiv:1106.6028



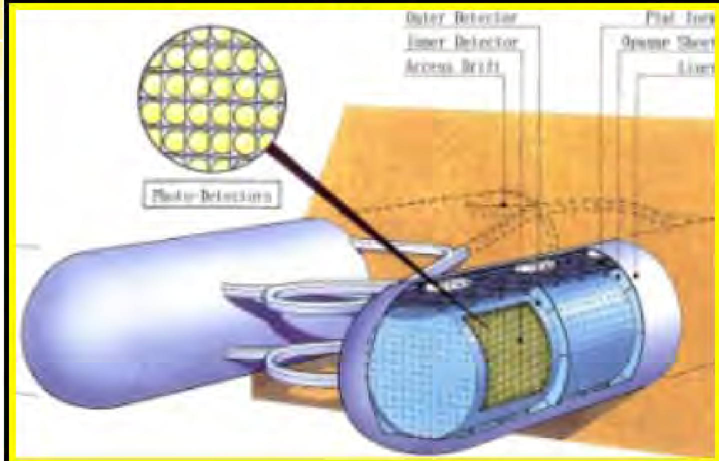


- θ_{13} *is the key to study* ***ν CP violation.***
  - **We have the key!**
  - **T2K aims to firmly establish ν_e appearance.**

Beyond T2K

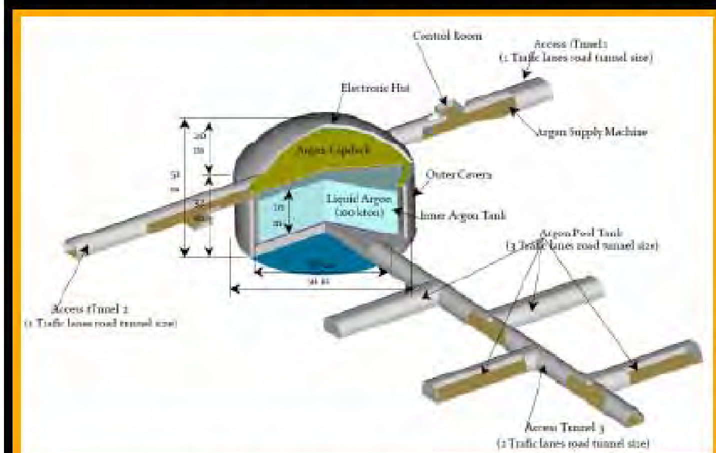
小林@東大タウンミーテング
中平@J-PARCタウンミーテング

J-PARC+HK @ 神岡 L=295km OA=2.5deg

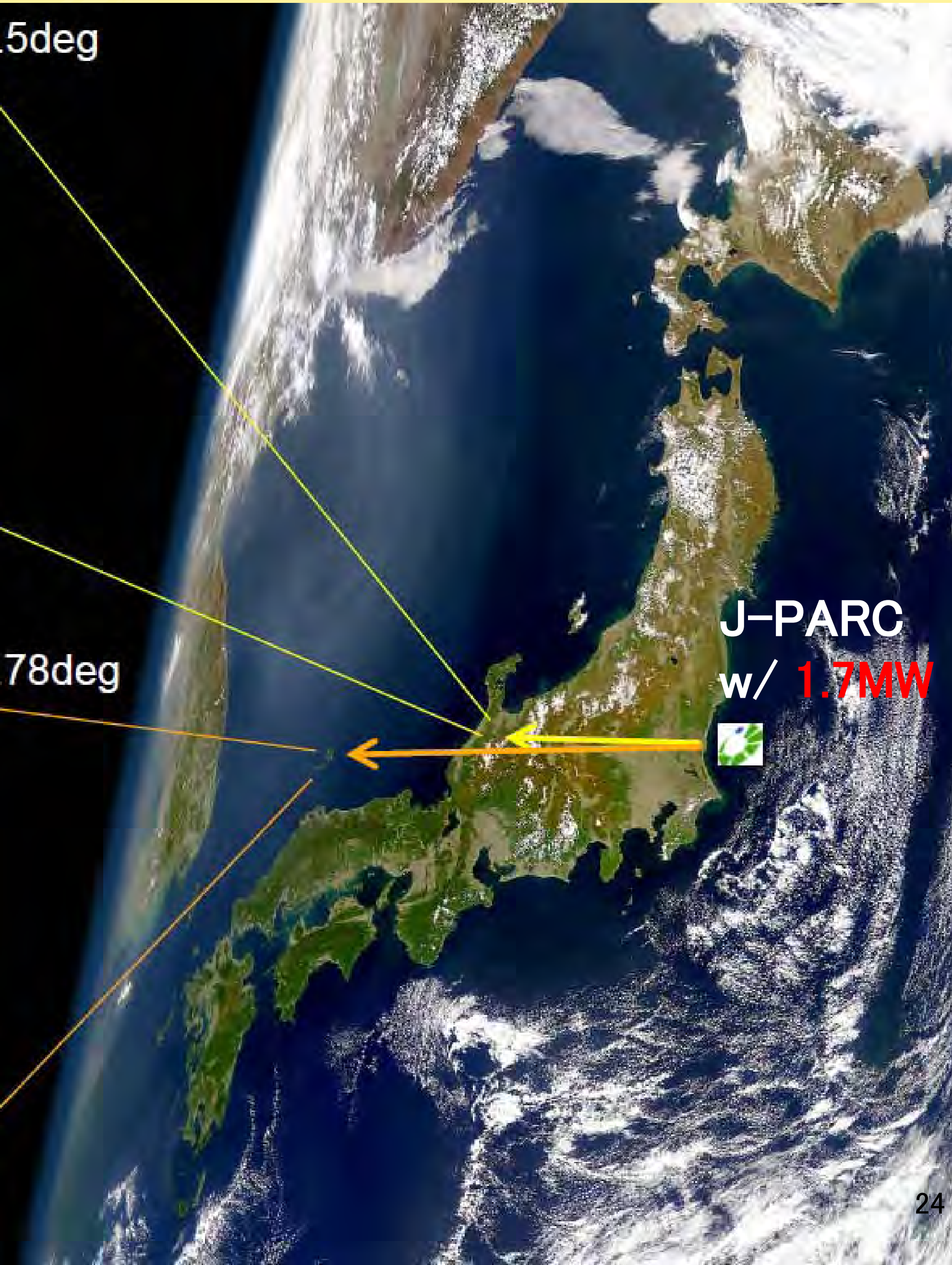


arXiv:: 1109.3262

J-PARC+LAr @ 隠岐 L=658km OA=0.78deg



P32 proposal (Lar TPC R&D)
Recommended by J-PARC PAC
(Jan 2010). arXiv:0804.2111



Letter of Intent:

The Hyper-Kamiokande Experiment

— Detector Design and Physics Potential —

K. Abe,[12,14] T. Abe,[10] H. Aihara,[10,14] Y. Fukuda,[5] Y. Hayato,[12,14] K. Huang,[4]
A. K. Ichikawa,[4] M. Ikeda,[4] K. Inoue,[8,14] H. Ishino,[7] Y. Itow,[6] T. Kajita,[13,14] J. Kameda,[12,14]
Y. Kishimoto,[12,14] M. Koga,[8,14] Y. Koshio,[12,14] K. P. Lee,[13] A. Minamino,[4] M. Miura,[12,14]
S. Moriyama,[12,14] M. Nakahata,[12,14] K. Nakamura,[2,14] T. Nakaya,[4,14] S. Nakayama,[12,14]
K. Nishijima,[9] Y. Nishimura,[12] Y. Obayashi,[12,14] K. Okumura,[13] M. Sakuda,[7] H. Sekiya,[12,14]
M. Shiozawa,[12,14,*] A. T. Suzuki,[3] Y. Suzuki,[12,14] A. Takeda,[12,14] Y. Takeuchi,[3,14]
H. K. M. Tanaka,[11] S. Tasaka,[1] T. Tomura,[12] M. R. Vagins,[14] J. Wang,[10] and M. Yokoyama[10,14]

(Hyper-Kamiokande working group)

[1] *Gifu University, Department of Physics, Gifu, Gifu 501-1193, Japan*

[2] *High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, Japan*

[3] *Kobe University, Department of Physics, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan*

[4] *Kyoto University, Department of Physics, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan*

[5] *Miyagi University of Education, Department of Physics, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan*

[6] *Nagoya University, Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan*

[7] *Okayama University, Department of Physics, Okayama, Okayama 700-8530, Japan*

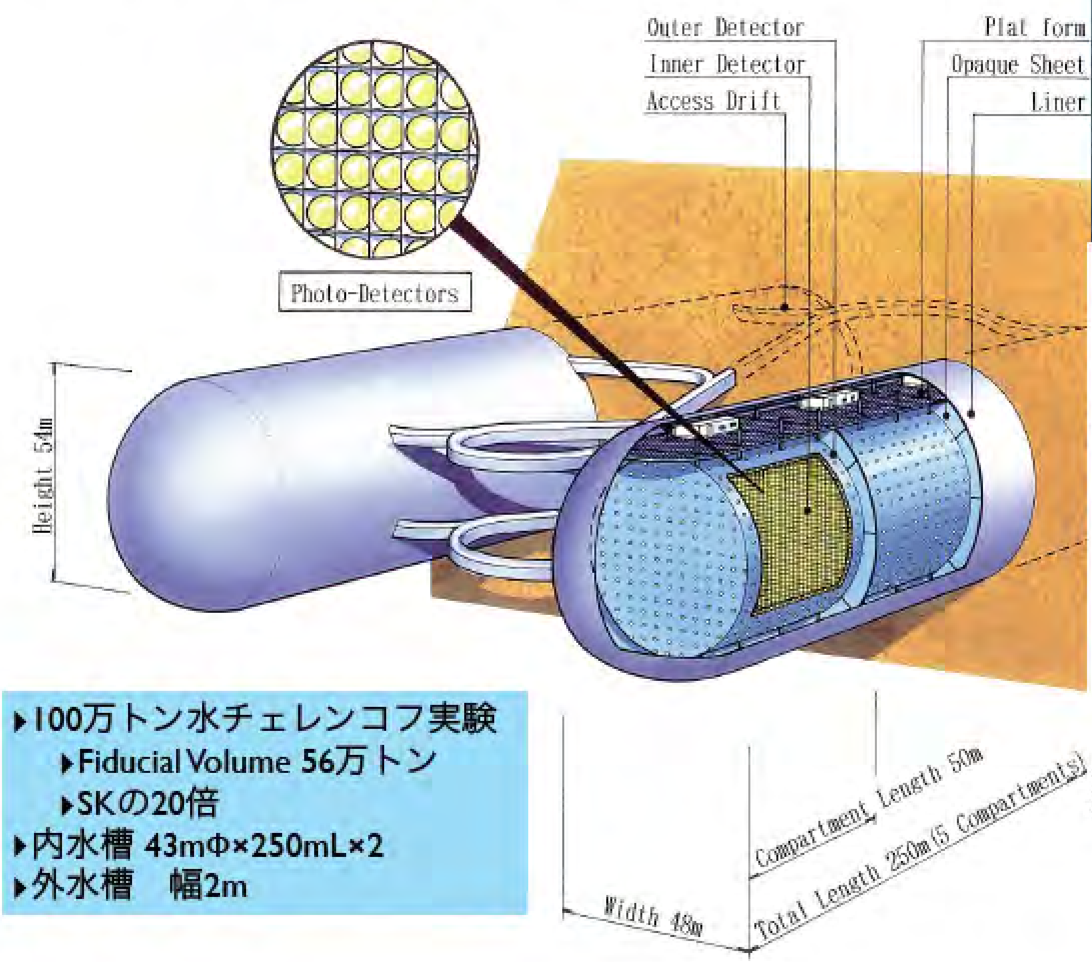
[8] *Tohoku University, Research Center for Neutrino Science, Sendai 980-8578, Japan*

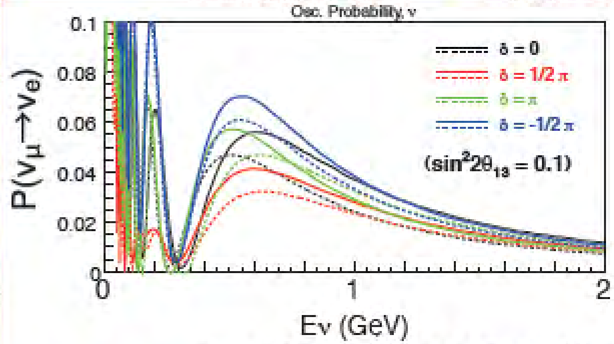
[9] *Tokai University, Department of Physics, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan*

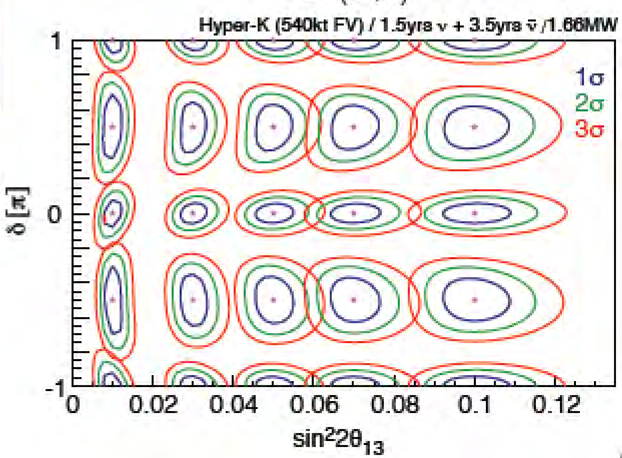
[10] *University of Tokyo, Department of Physics, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

arXiv:1109.3262v1 [hep-ex] 15 Sep 2011

ハイパーカミオカンデ
(水チェレンコフ検出器)







- 100万トン水チェレンコフ実験
  - Fiducial Volume 56万トン
  - SKの20倍
- 内水槽 43mΦ×250mL×2
- 外水槽　幅2m

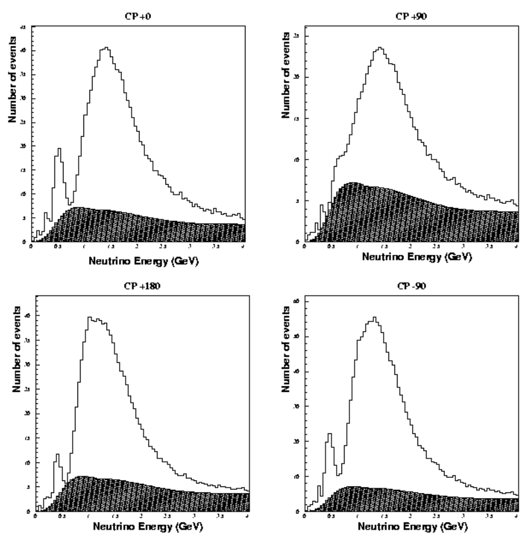
塩澤@IPMUタウンミーテング
早戸、横山、J. Wang、K.P. Lee、三浦、池田@JPS 18aSY

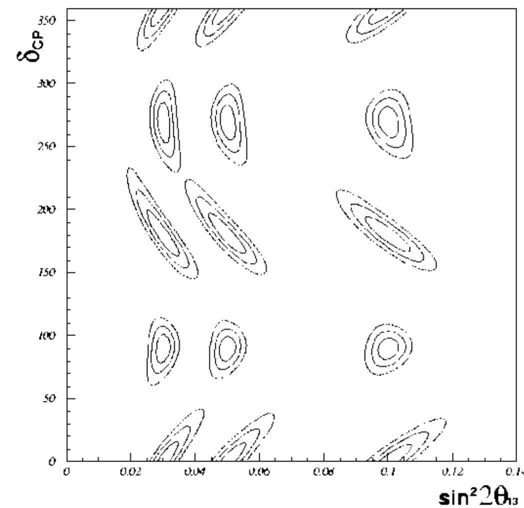
SUBMITTED TO J-PARC PAC

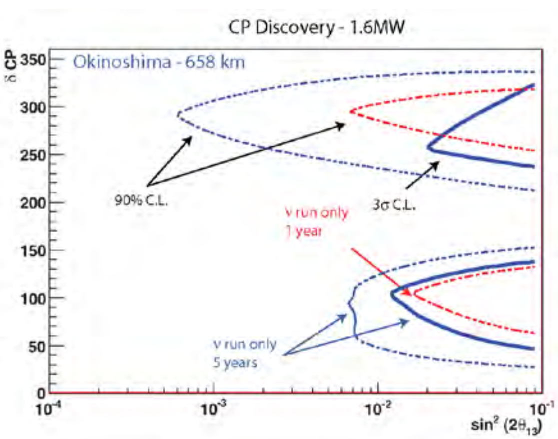
Towards a Long Baseline Neutrino and Nucleon Decay Experiment with a next-generation 100 kton Liquid Argon TPC detector at Okinoshima and an intensity upgraded J-PARC Neutrino beam

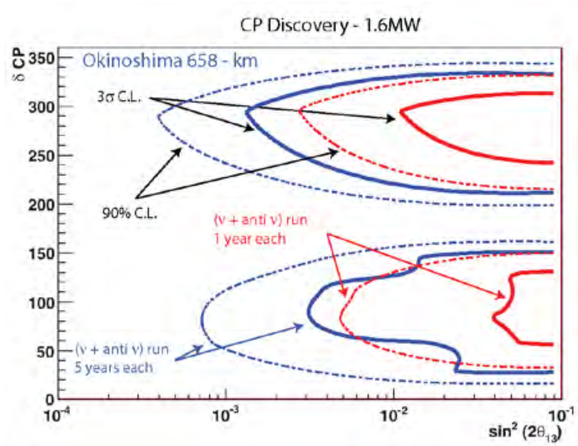
A.Badertscher[1], *A.Curioni*[1], *S.DiLuise*[1], *U.Degunda*[1], *L.Epprecht*[1], *L.Esposito*[1], *A.Gendotti*[1], *T.Hasegawa*[2], *S.Horikawa*[1], *L.Knecht*[1], *T.Kobayashi*[2], *C.Lazzaro*[1], *D.Lussi*[1], *A.Marchionni*[1], *A.Meregaglia*[1*], *T.Maruyama*[2], *G.Natterer*[1], *K.Nishikawa*[2], *F.Resnati*[1], *A.Rubbia*[1†], *C.Strabel*[1], *M.Tanaka*[2], and *T.Viant*[1]

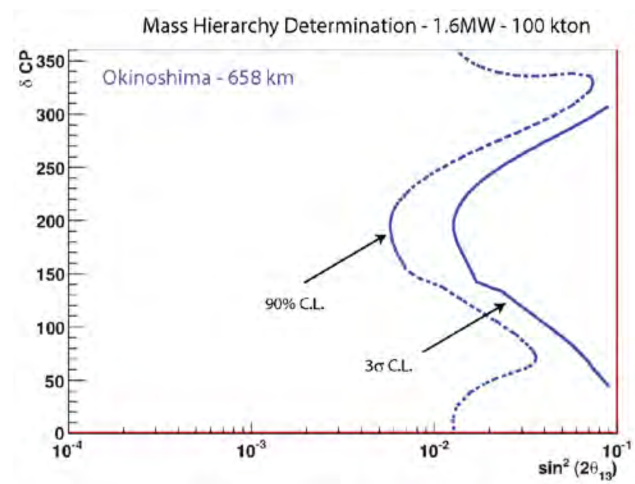
(1) ETH Zurich, (2) KEK IPNS





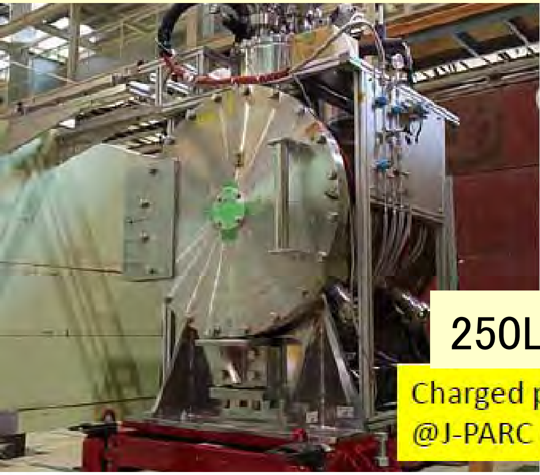


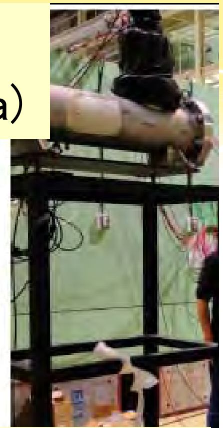




R&D toward realizing 100kt LArTPC

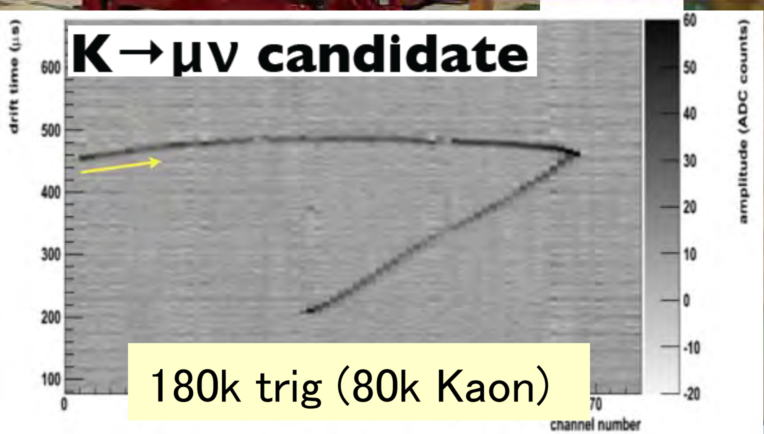
J-PARC T32 exp
(ETHZ/KEK/Iwate/Waseda)





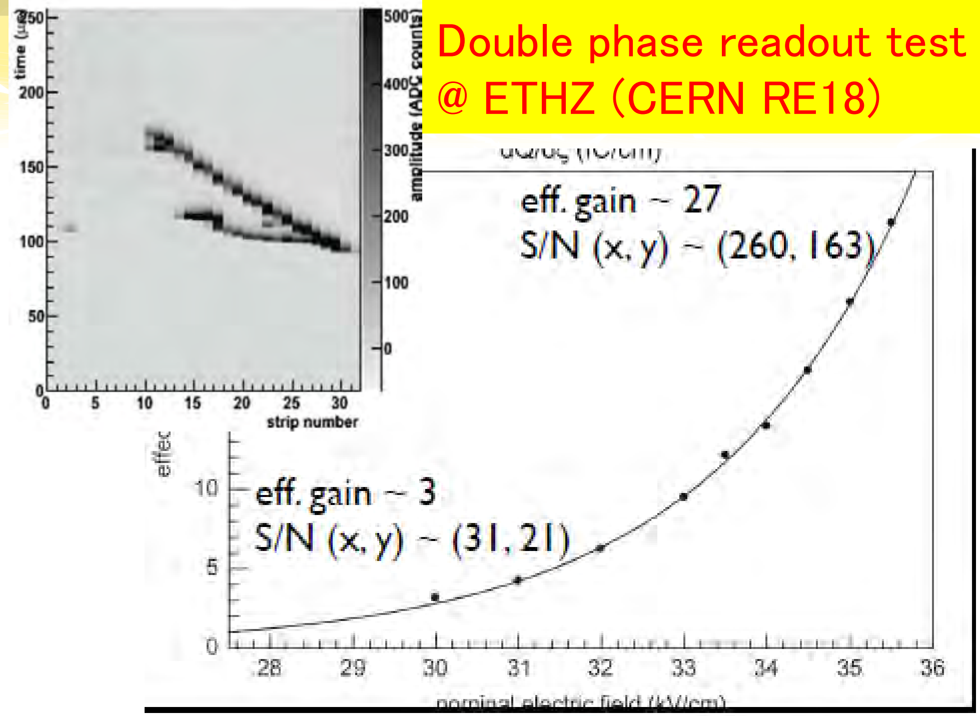
250L LAr TPC

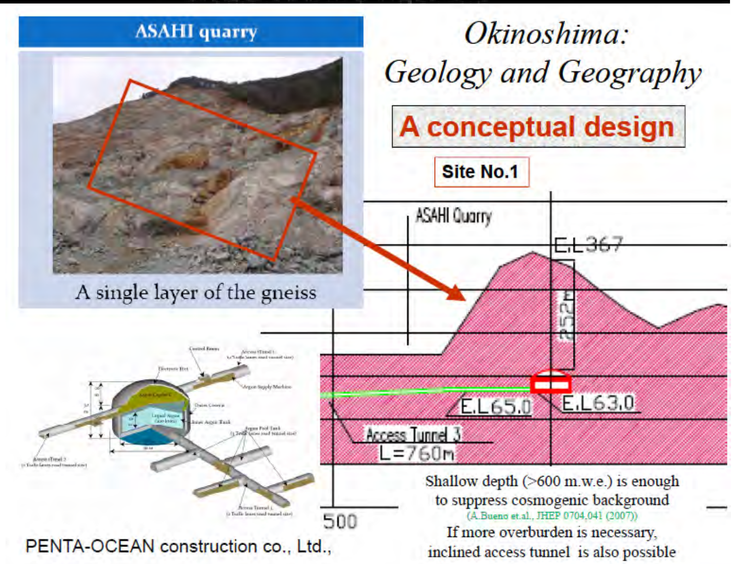
Charged particle test-bean
@J-PARC (Oct/24-31)



180k trig (80k Kaon)

Double phase readout test
@ ETHZ (CERN RE18)





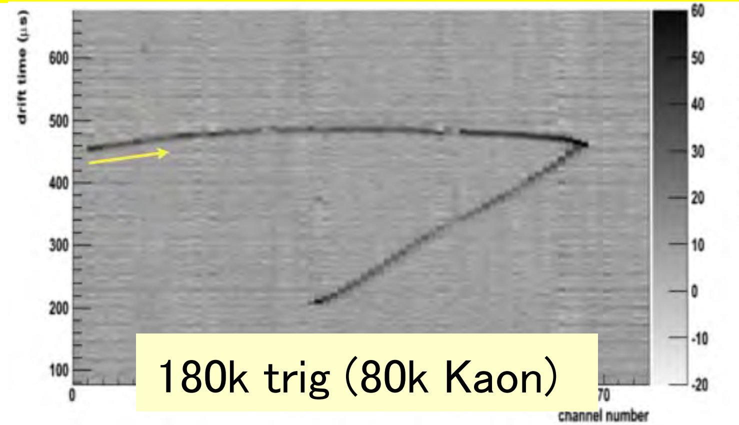
Site visit

J-PARC T32 exp (ETHZ/KEK/Iwate/Waseda)

250L LAr TPC

7000 800MeV/c K+ events w/ 2 LGs
35000 800MeV/c K+ events w/ one LG
40000 800MeV/c K+ w/ 1 LG and 1LB
70000 200MeV/c π+ events w/o degraders
2500 800MeV/c e+ events
1500 800MeV/c proton events

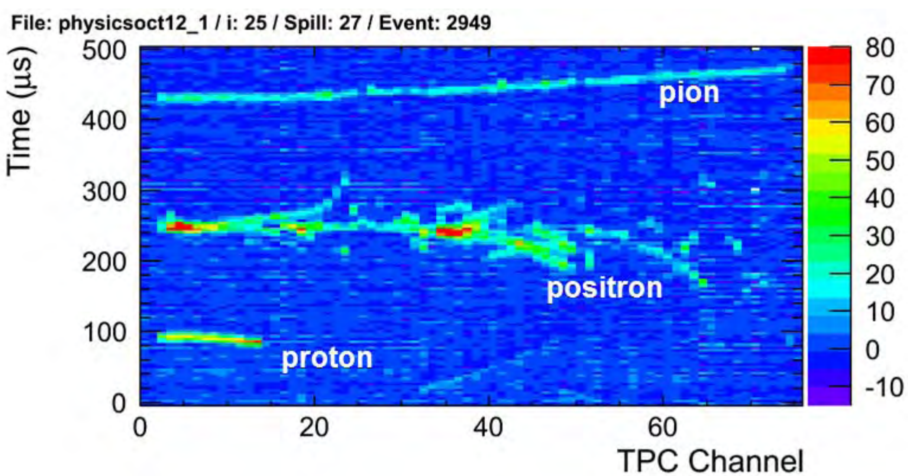
World largest Kaon sample ever taken by Lar TPC

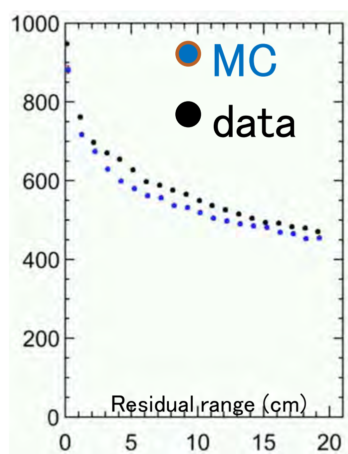


180k trig (80k Kaon)

Charged particle test-beam @J-PARC T32 (data-taking during Oct/24-31)

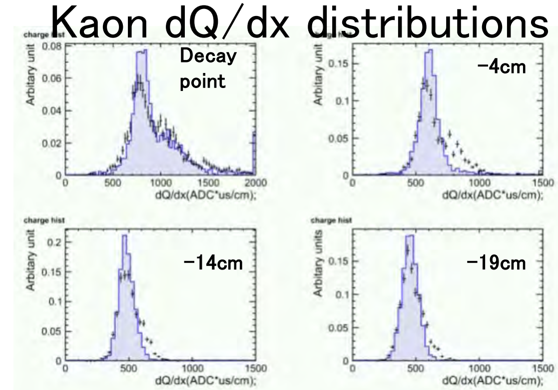
Intensive analysis on-going





ction of
Residual range (cm)

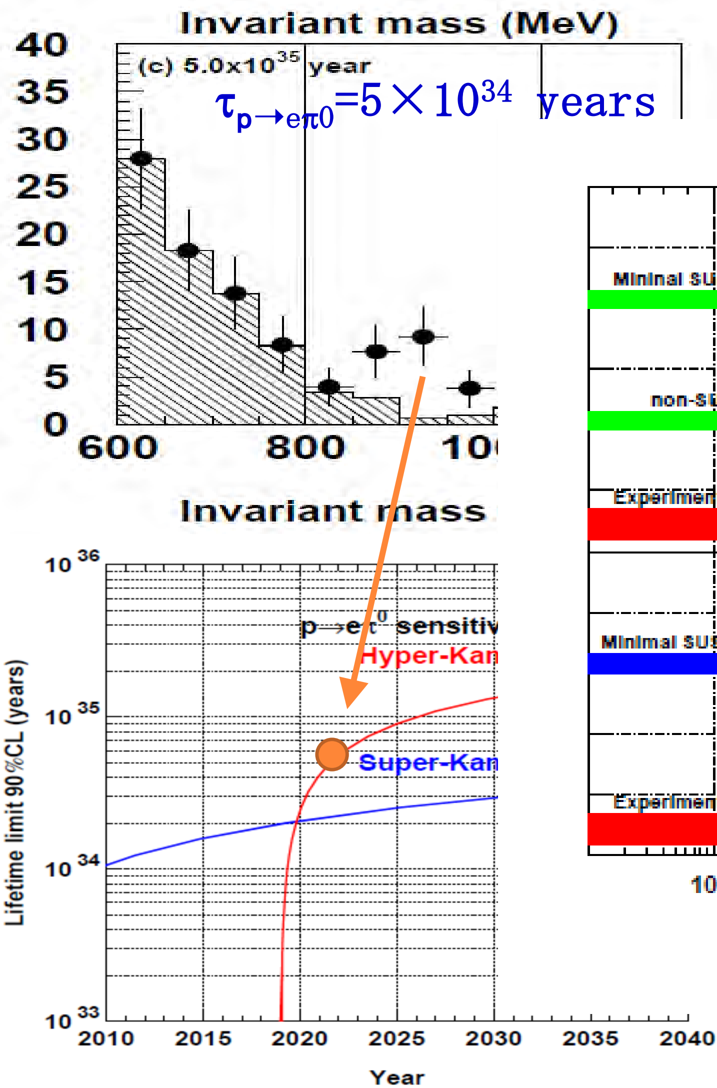
Kaon dQ/dx distributions

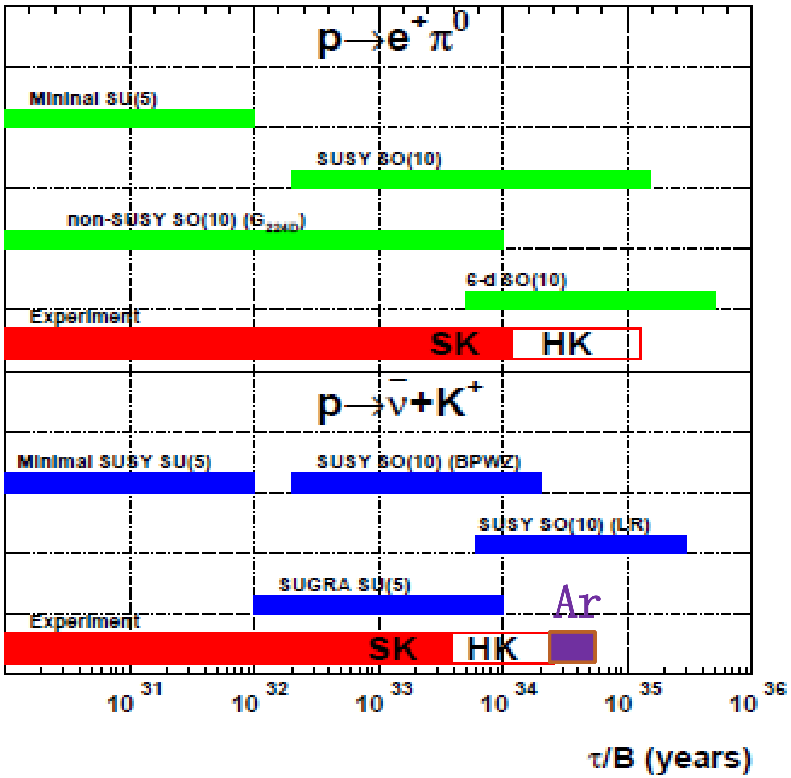


Charge / strip

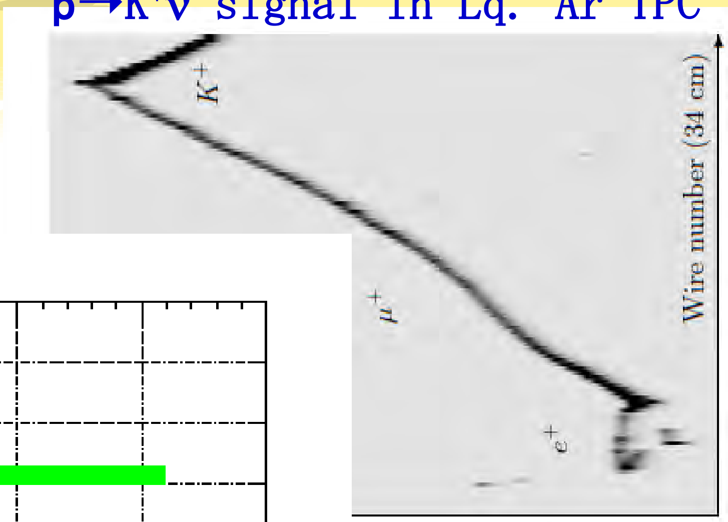
Proton Decay + more!

$p \rightarrow e\pi^0$ signal in Hyper-K

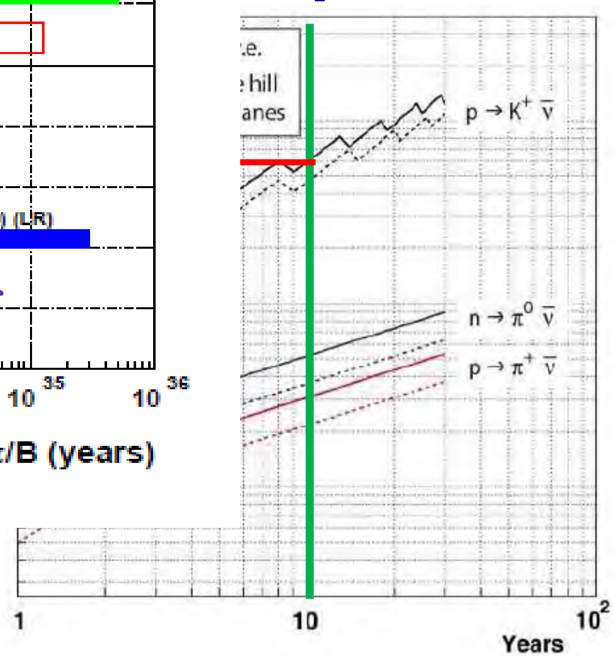




$p \rightarrow K^+\nu$ signal in Lq. Ar TPC

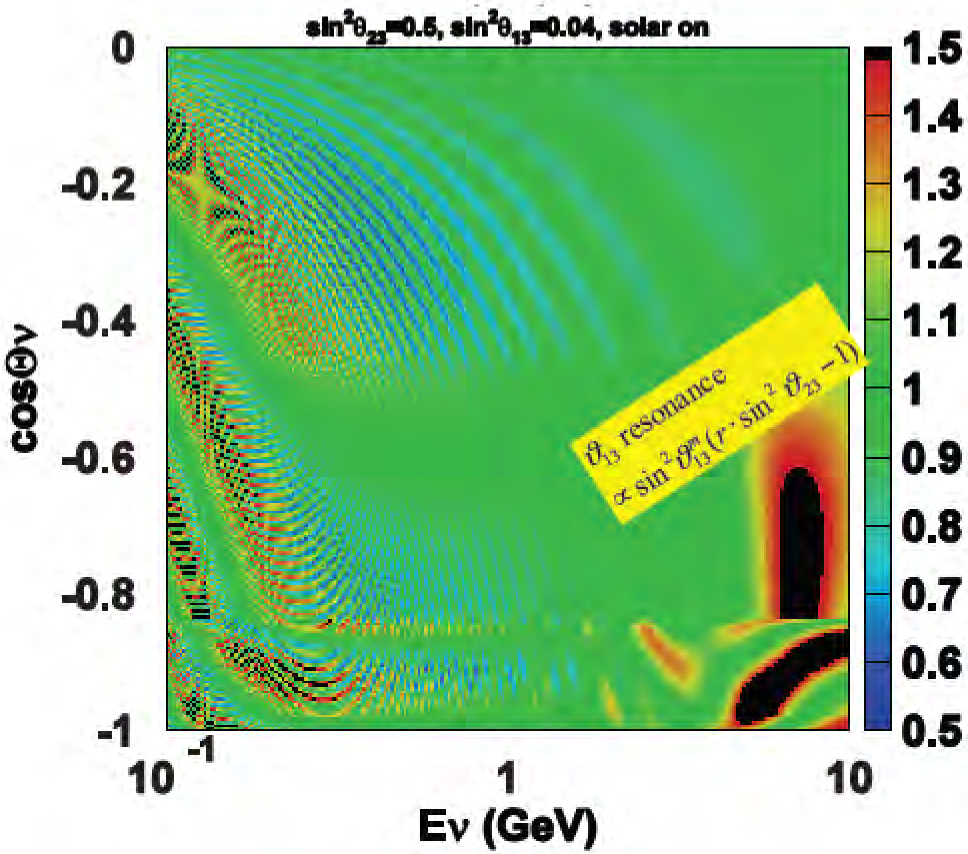


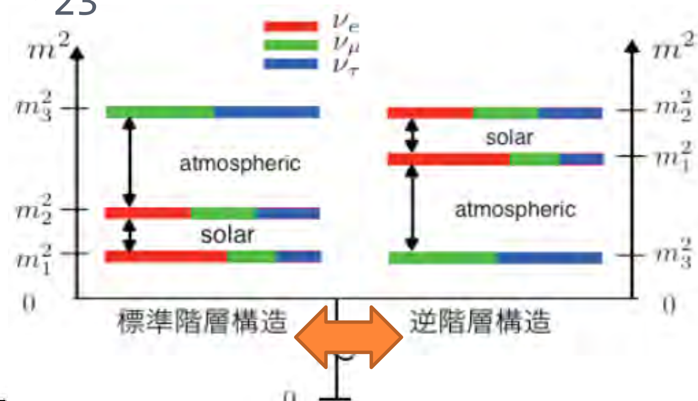
Lq. Ar TPC

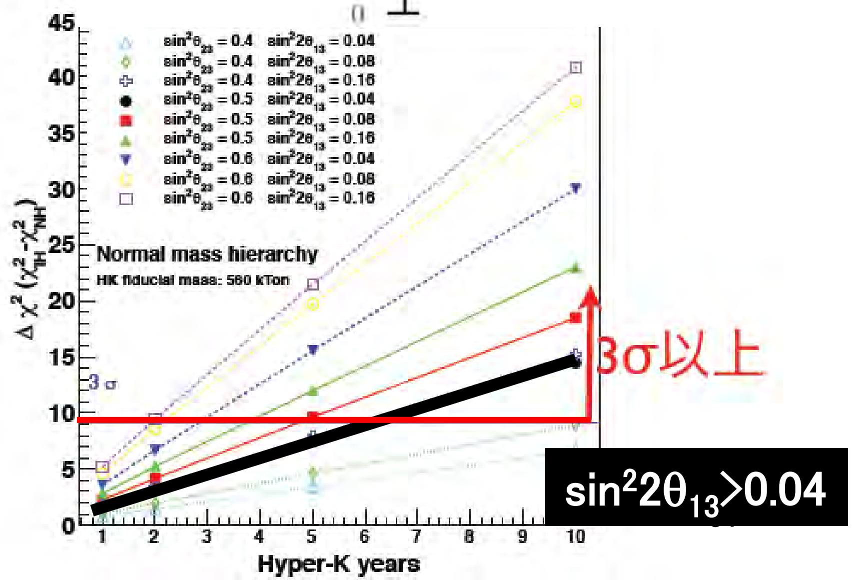


More physics in the large ν detector

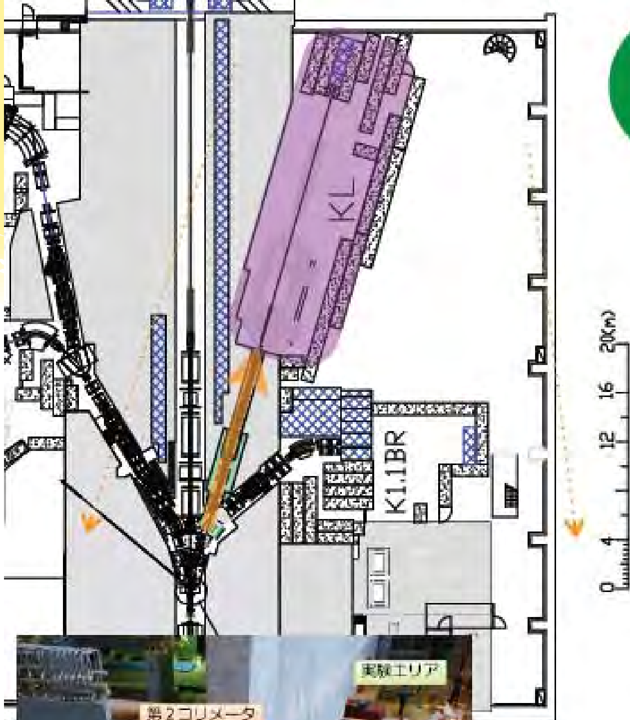
- 宇宙起源ニュートリノ（超新星、太陽、、、）
- 大気ニュートリノ(νe appearance)
  - CPV, mass hierarchy, and θ_{23}><45°







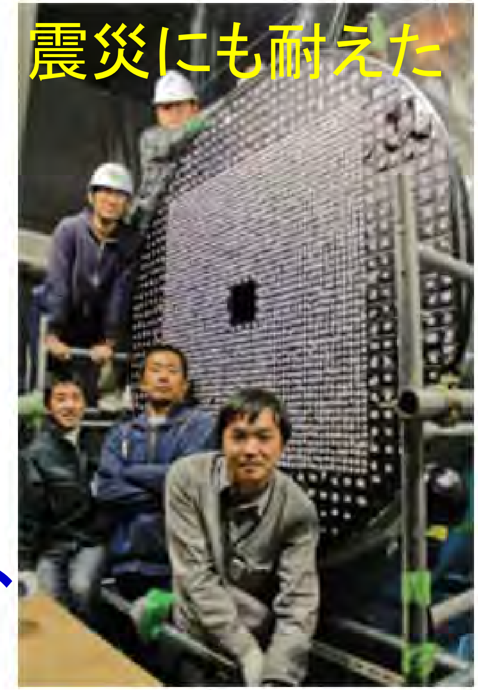
南 K0TO実験



実験エリアを構築して
カロリメータを建設（2010年度）

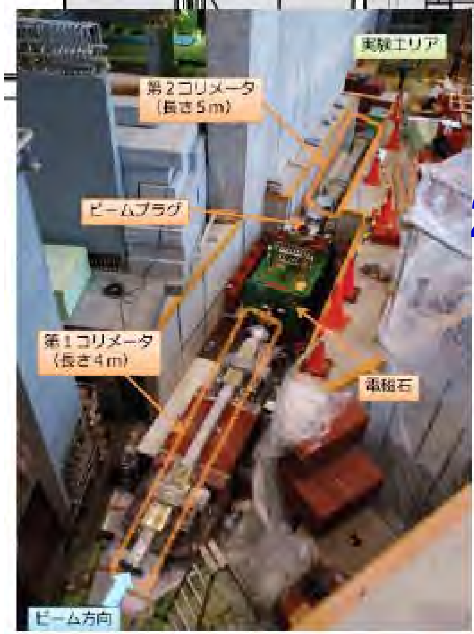
2011年2月

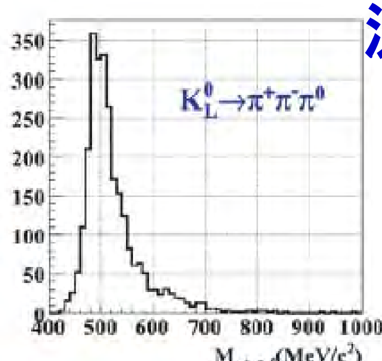
震災にも耐えた



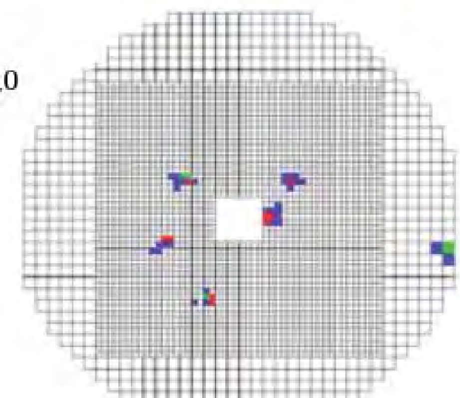
$$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

2011～2012：本実験開始に向け、測定器製作の終盤

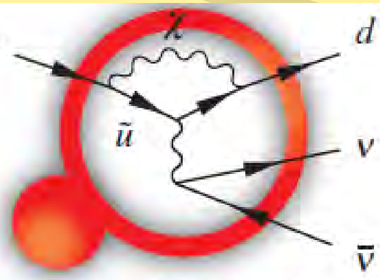




$K_L^0 \to \pi^0\pi^0\pi^0$

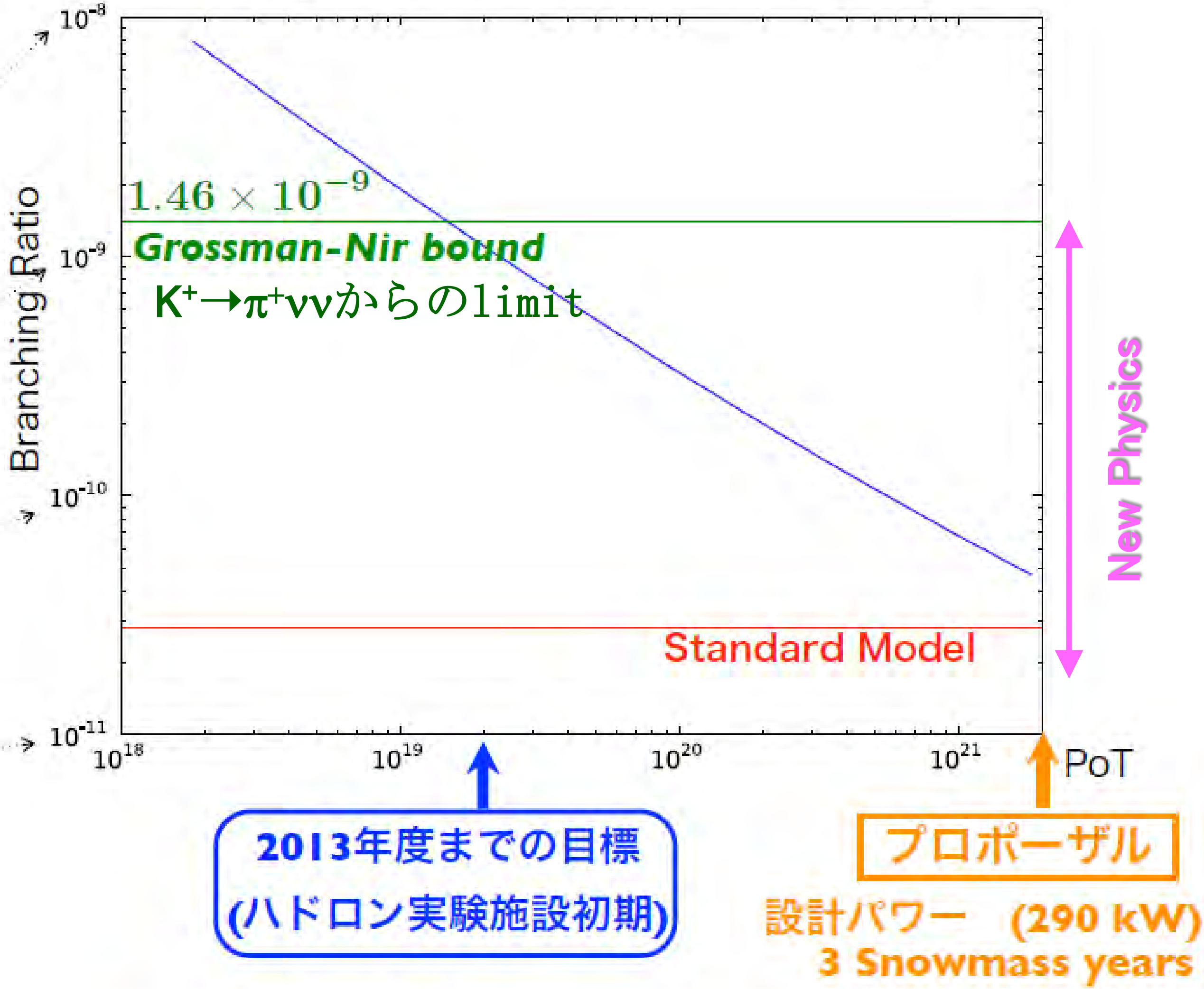


ホール南側に新しいKLビームラインを建設し
中性K中間子ビームの生成を確認（2009年度）



新しいCP対称性の破れ

$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ "3σ" discovery



2009年に実測した KL のflux はプロポーザルの 2.3 倍

$1.83 \times 10^7 \ / \ 200Tp$

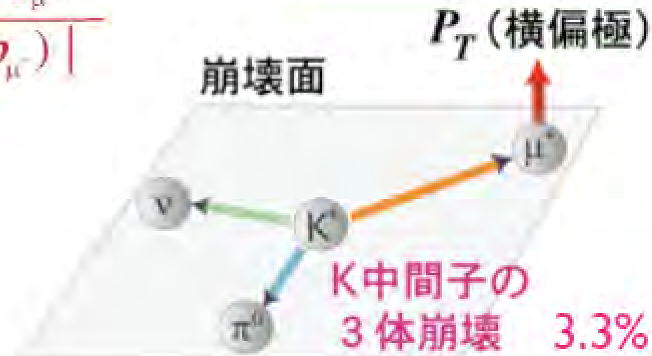
TREK実験

- E06　プロポーザル： 290kW, 1 Snowmass year

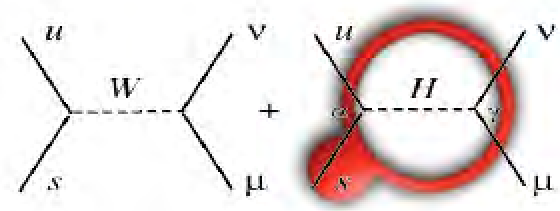
Transverse μ^+ polarization in $K_{\mu 3}$

$$P_T = \frac{\sigma_\mu \cdot (p_{\pi^0,\gamma} \times p_{\mu^+})}{|(p_{\pi^0,\gamma} \times p_{\mu^+})|}$$

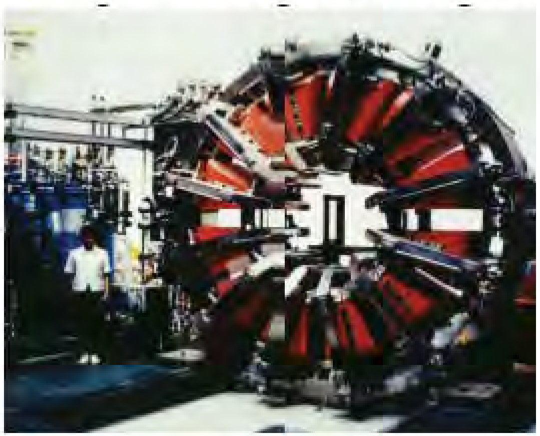
T-odd

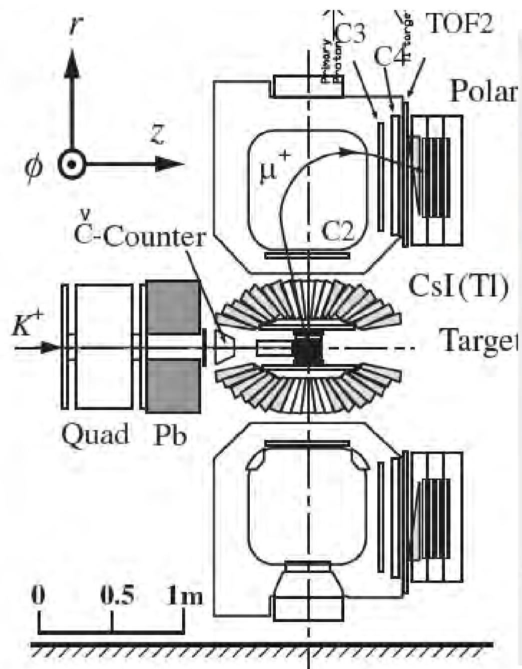


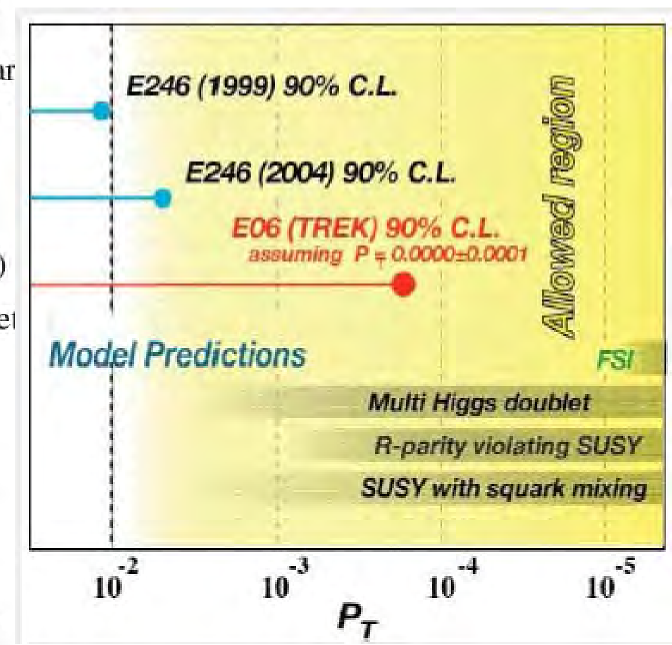
Goal: δPt～10^{-4}



- トロイダルスペクトロメータ
  (KEKPSのE246測定器)を移設







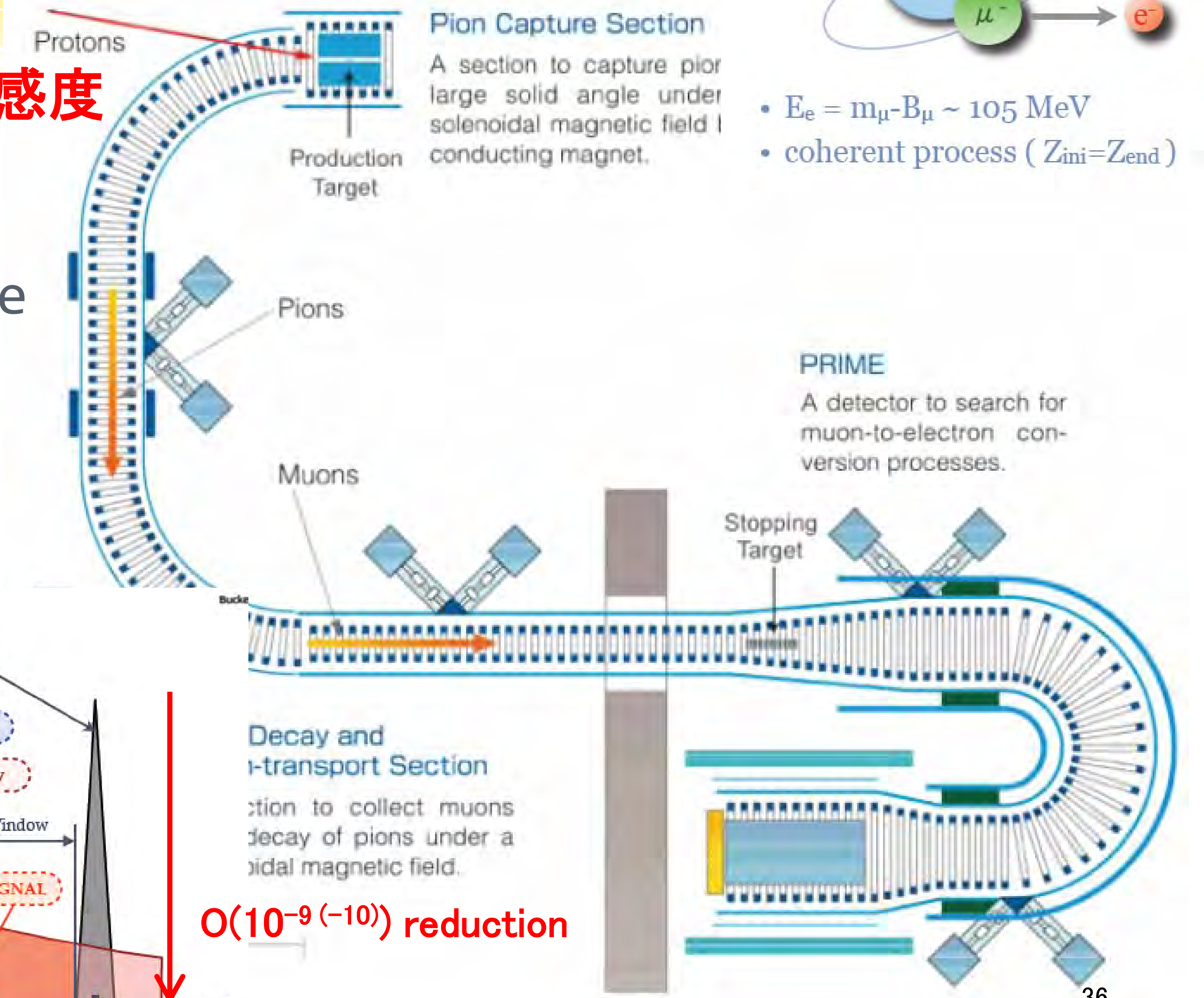
μとnの物理

JPS 18aSJ

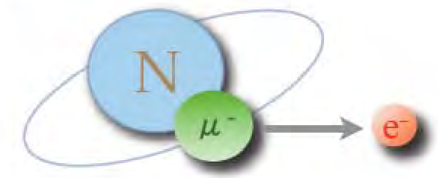
- 素粒子実験領域シンポジウム
  - 「LHC時代のPrecision Physics」
    荷電レプトンフレーバーと双極子モーメントの物理

COMET ($\mu N \to eN$)

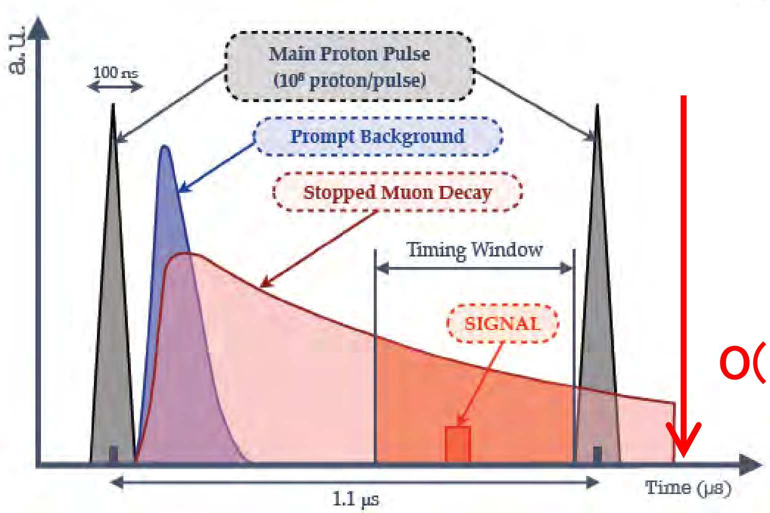
- **2.6×10^{-17} の感度**
- Bunched SX
  - 56kW(8GeV)
- $\pi \to \mu$ capture by solenoid



- **Signal**



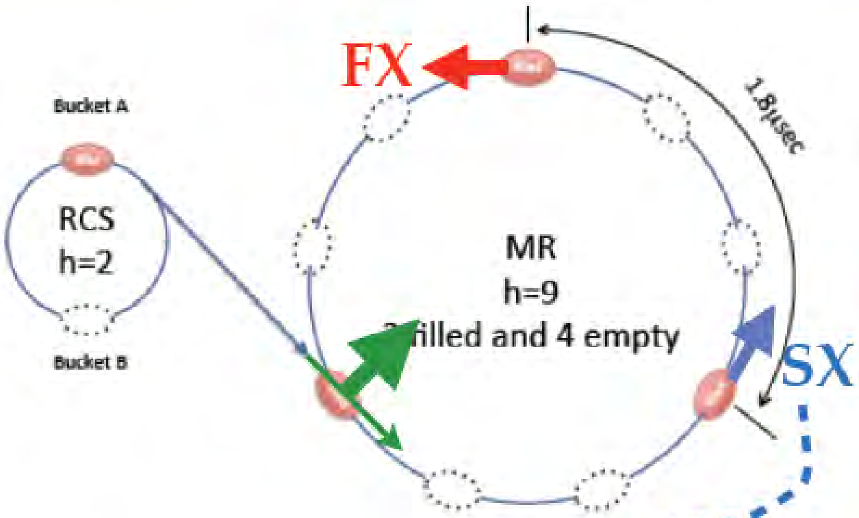
- $E_e = m_\mu - B_\mu \sim 105$ MeV
- coherent process ($Z_{ini} = Z_{end}$)



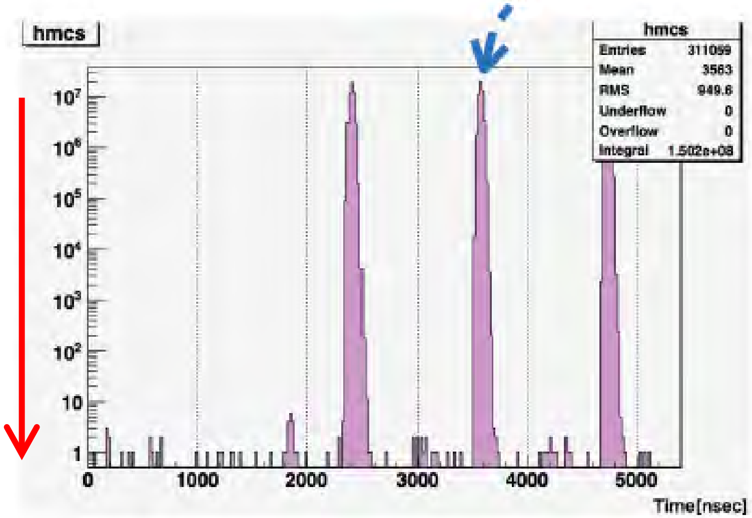
O($10^{-9\,(-10)}$) reduction

COMET実験：Status

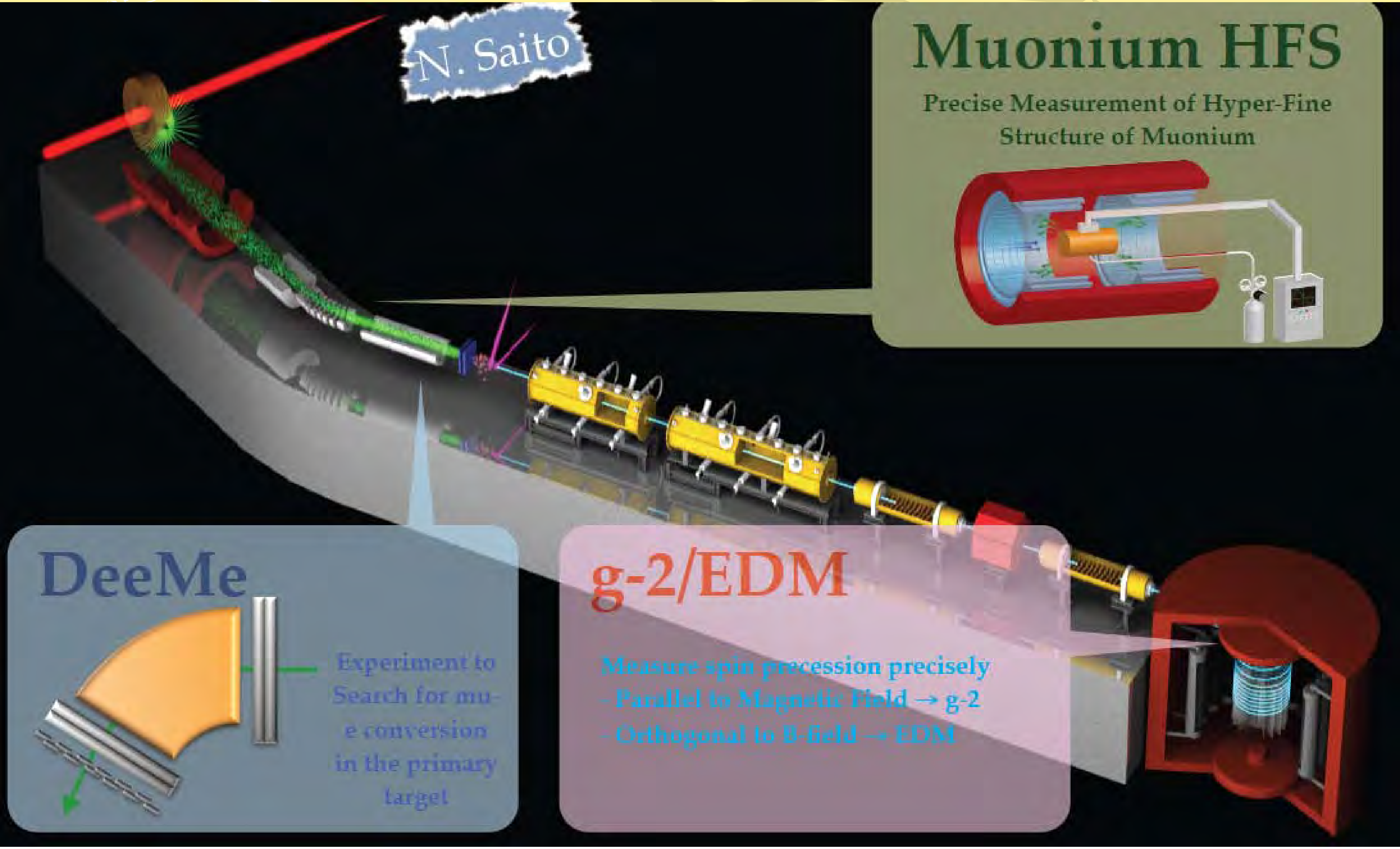
- Extinction を実際にJ-PARCで測定(2010)
  - FX : abort line でスタディ
  - SX : ハドロンホールで実測
    - **Extinction <~ *O*(10⁻⁷)**
  - double kicking を検証
    - **更なる *O*(10⁻⁶) 向上を確認**
- Superconducting Solenoidデザイン
  - コイル線材スタディ
  - 中性子照射試験
  - コイルエンジニアリング設計
- 検出器R&D
  - Crystalテストビーム実験
  - 真空中でのトラッカーR&D



O(10⁻⁷) reduction

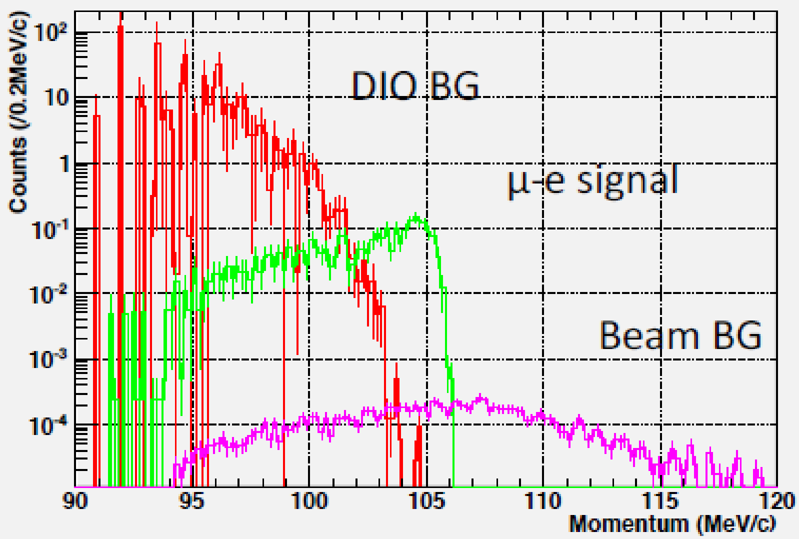


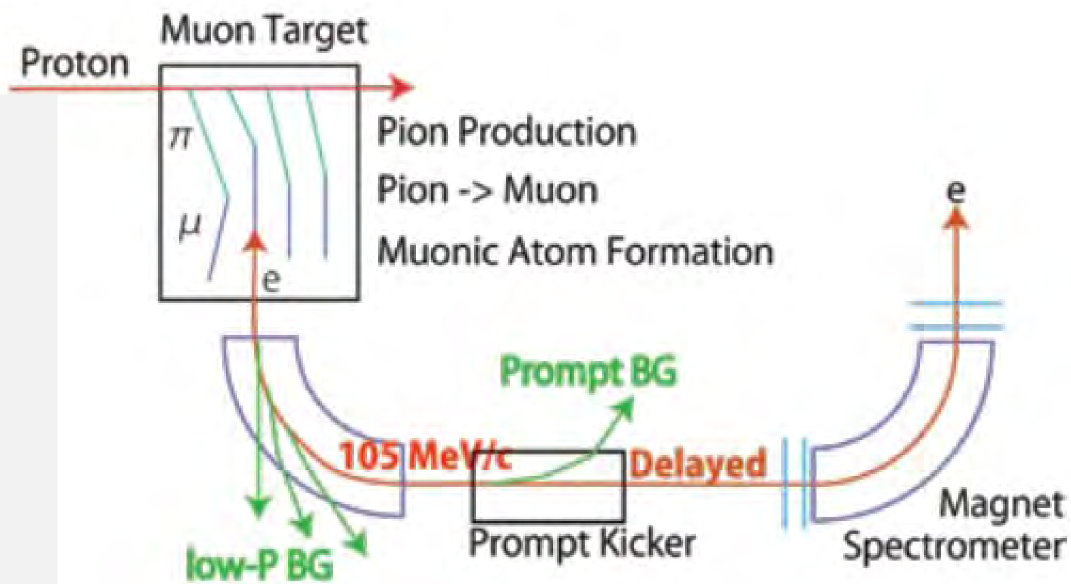
3 μ experiments: DeeMe/g-2(EDM)/HFS @ MLF



DeeMee (μN→eN): P41

- DIO(Decay in Orbit)
- Beam BG





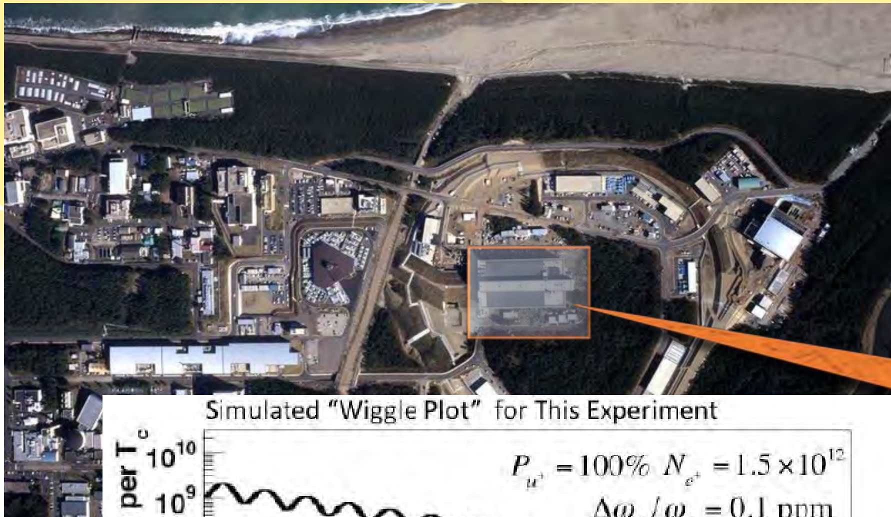
標的から出てくるモノクロ運動量(105MeV/c)の電子を探索

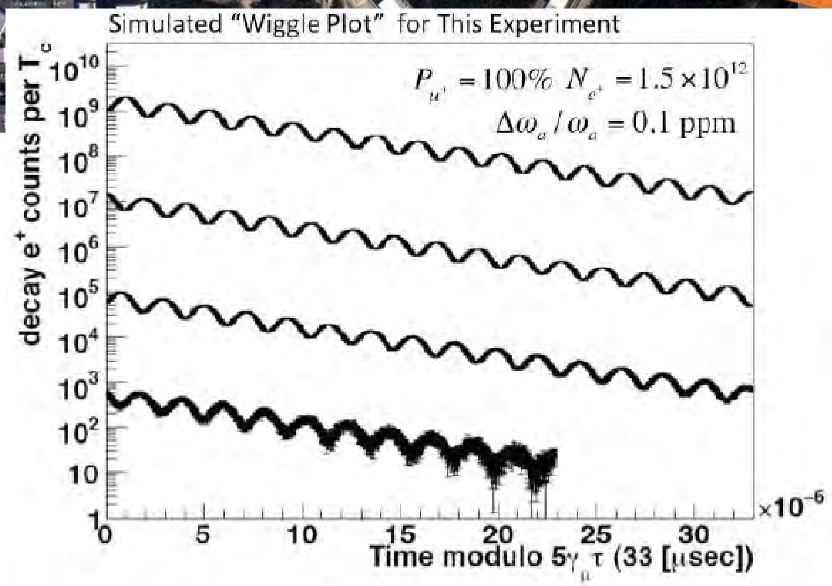
目標感度:2E-14

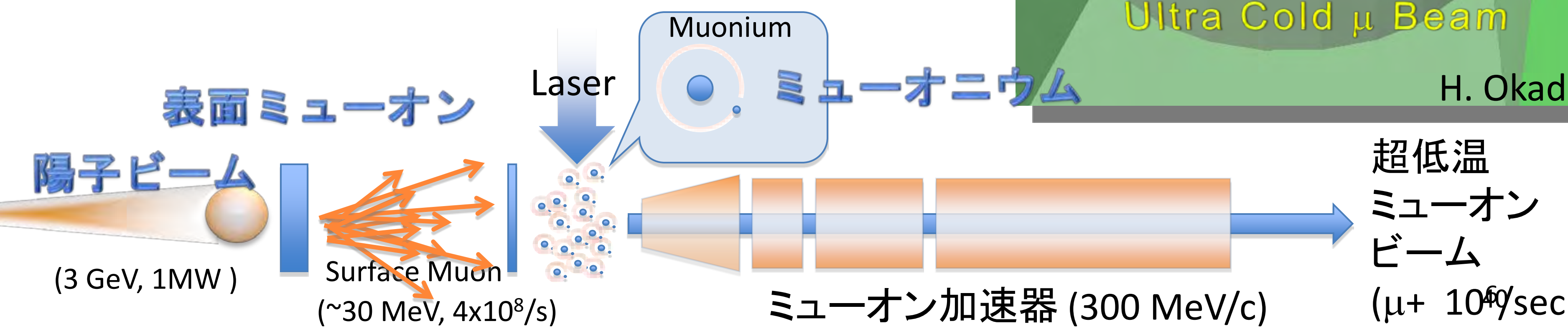
- シンプルな装置で、早く安価に実験できることが売り！

- 低運動量部分：ビームラインでカット
- 高運動量部分：スペクトロメータで測定
- 主パルス：キッカーで排除
- アフタープロトン：
  - RCSからの高品質パルスビーム（原理的に無い筈）
  - $R_{AP}<10^{-17}$ (要検証実験)

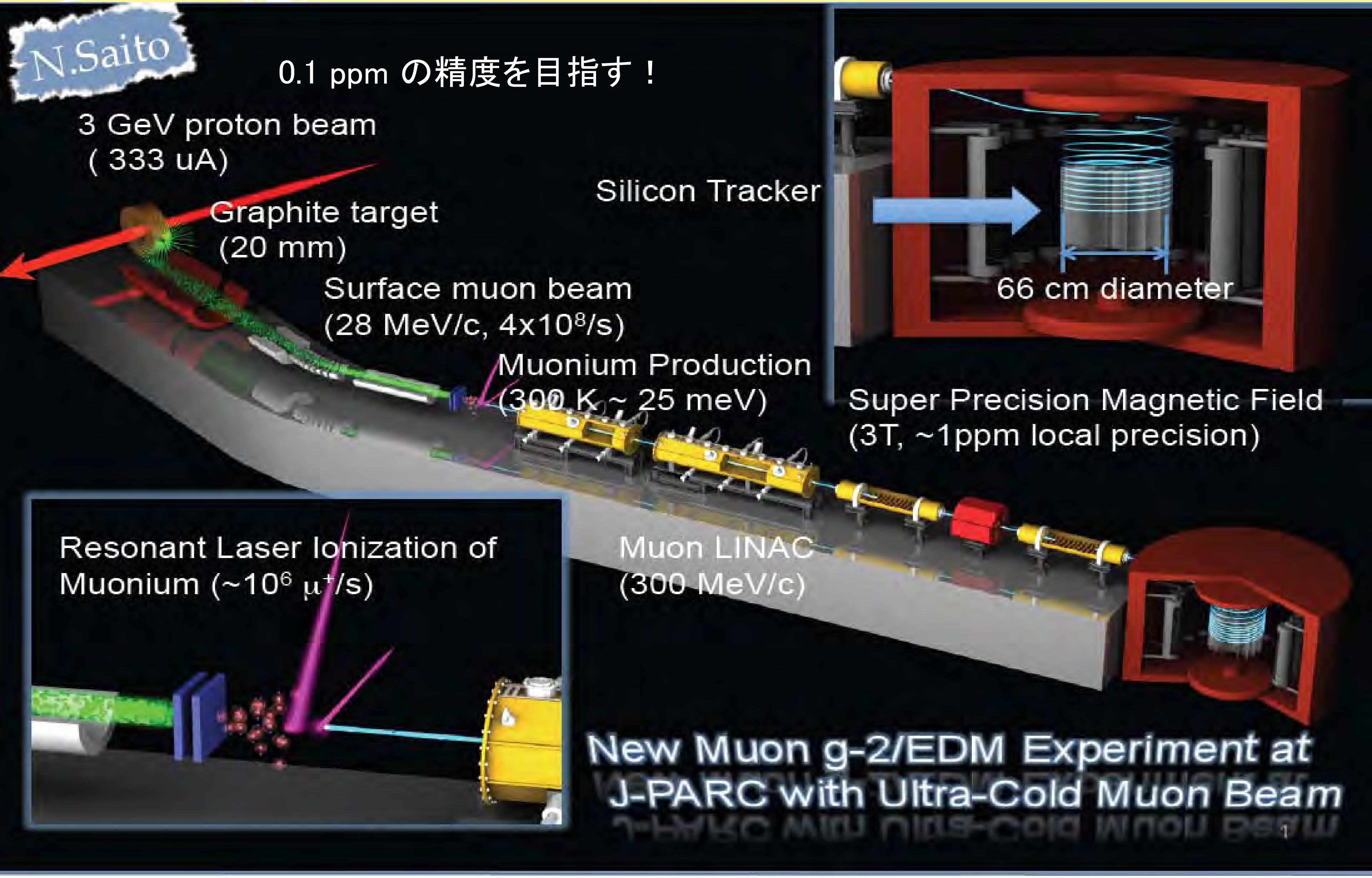
ミューオン磁気・電気双極子能率の新世代超精密測定







μ g-2(/EDM) - 現在 ~3.4σの異常が見えている -

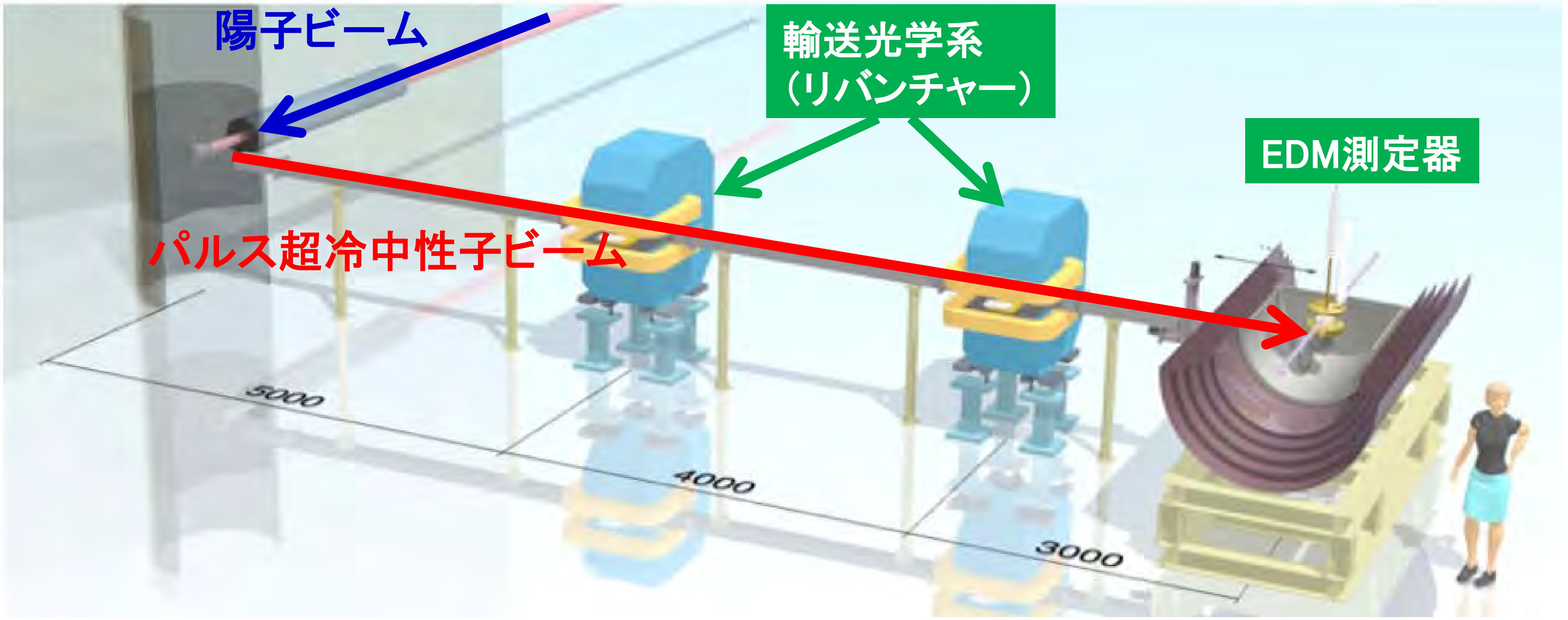


nEDM at J-PARC

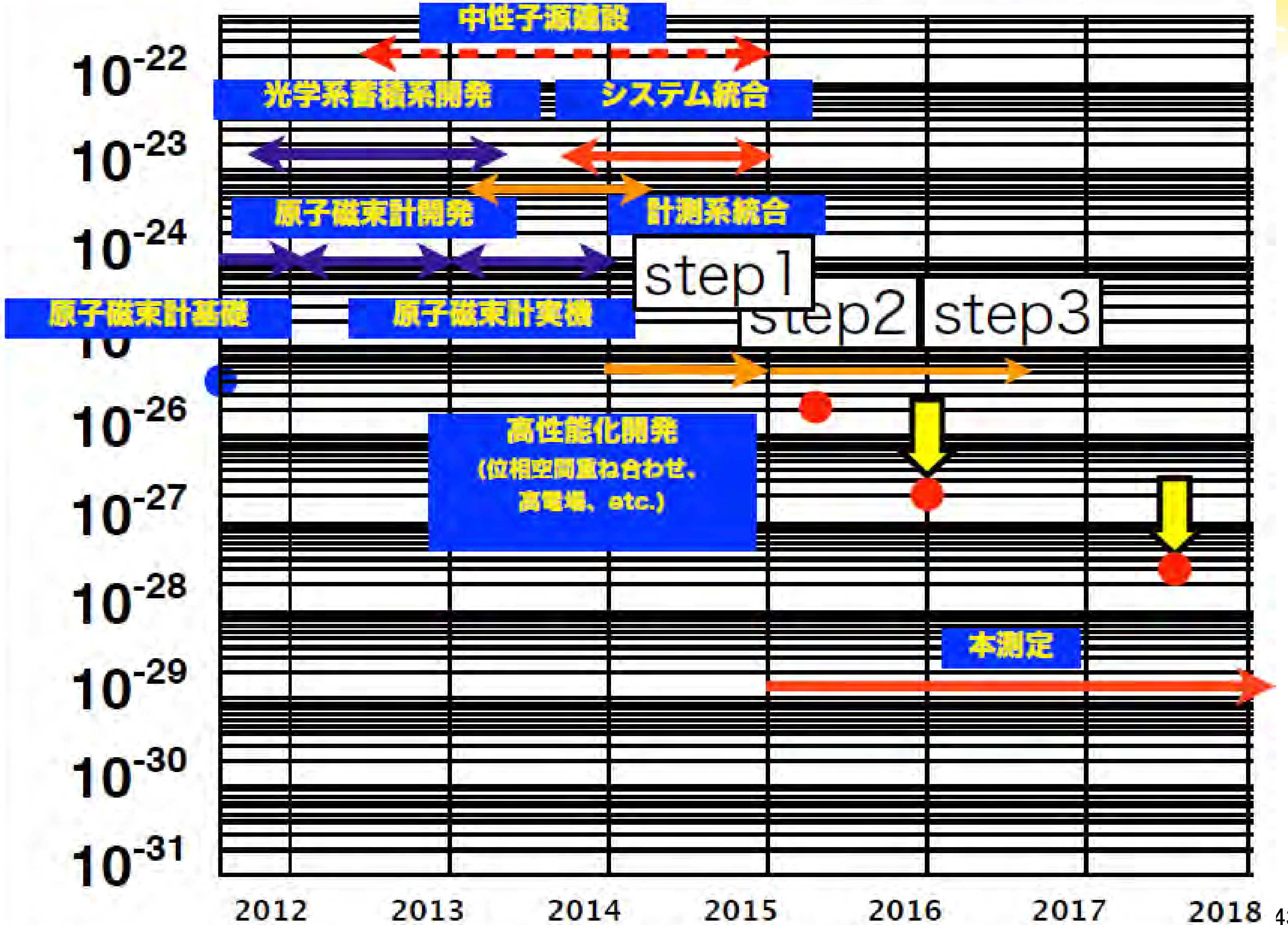
J-PARC 線形加速器の陽子ビームを
専用ターゲットに直接入射、
超冷中性子に変換し
光学系を駆使して蓄積容器に高密度で
超冷中性子を輸送する

J-PARC UCN

J-PARC PAC に
プロポーザルを提出(P33)

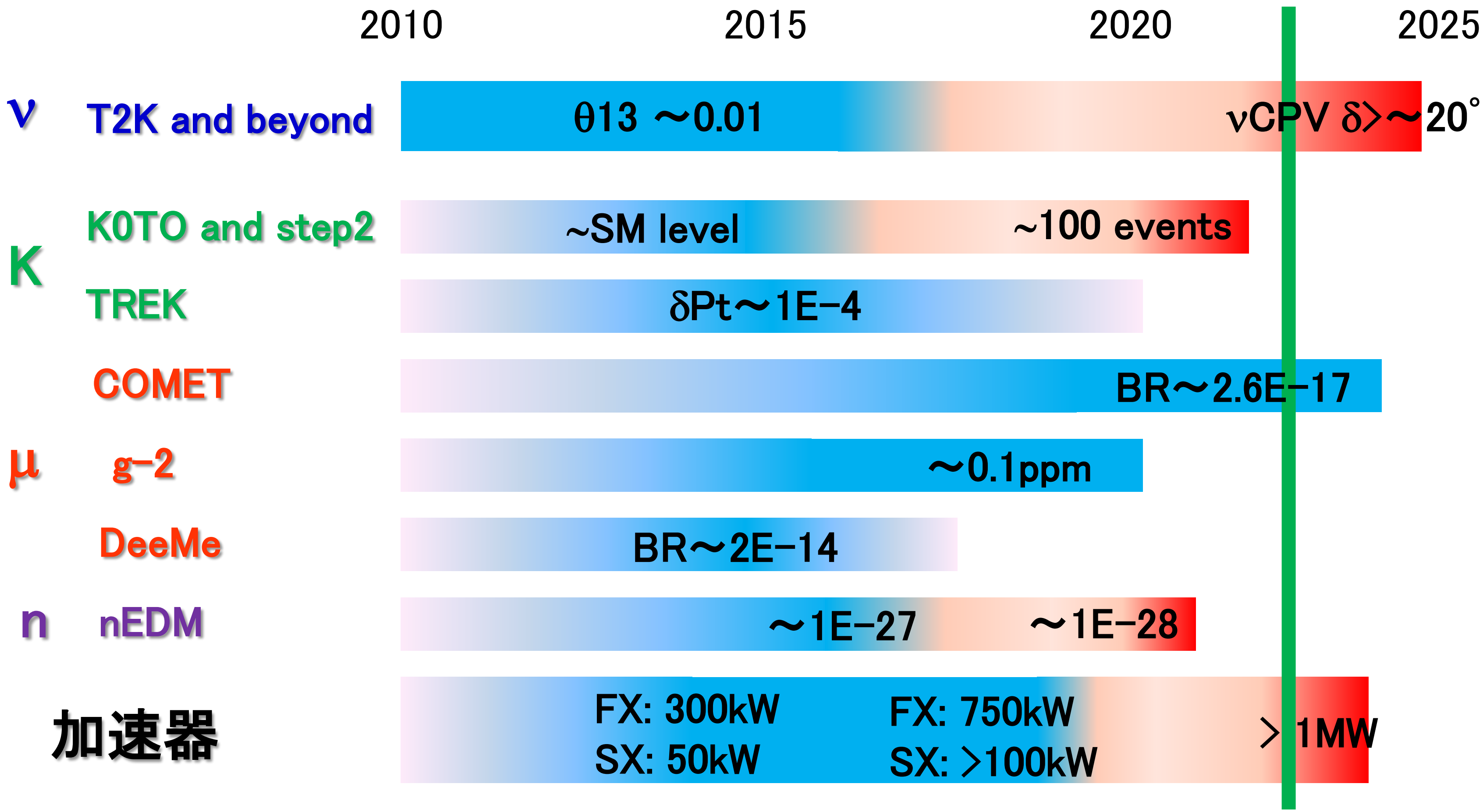


nEDM at J-PARC 年表



Schedule

- T2K(E11) and K0TO(E14) are approved and start collecting data.
- TREK(E06) and COMET(E21) are in the stage 1 approval.
- DeeMee(P41), g-2(P34), and nEDM(P33) are under review.



最後に

- 戸塚先生のメッセージ@NP08
  - *"Impress people (including ourselves) by showing the important and fascinating scientific results as quickly as possible."*
  - *"Think big and make cheap"*
- 重要なこと
  - The MW accelerator with high quality beams and stable operations.
  - Timely
    - 旬を逃がさない（θ_{13}の発見、$\mu \to e\gamma$の発見があれば？、g-2 anomaly[3.4σ]）。
  - Action
    - **重要かつ実現可能**な実験は、どんどん進めて行く。
    - **小規模実験：政治的後押しよりも、おそらくマンパワー、技術開発の方がクリティカル！**
    - **中・大規模実験： + Strategy!**
  - Flexibility
    - 新しいアイデアの創出。
    - 本流から派生する、様々な小規模実験も重要。