

T2Kを超えて (液体アルゴンTPC)

(KEK) 木村誠宏、小林 隆、田中雅士、西川公一郎、
長谷川琢哉、丸山和純

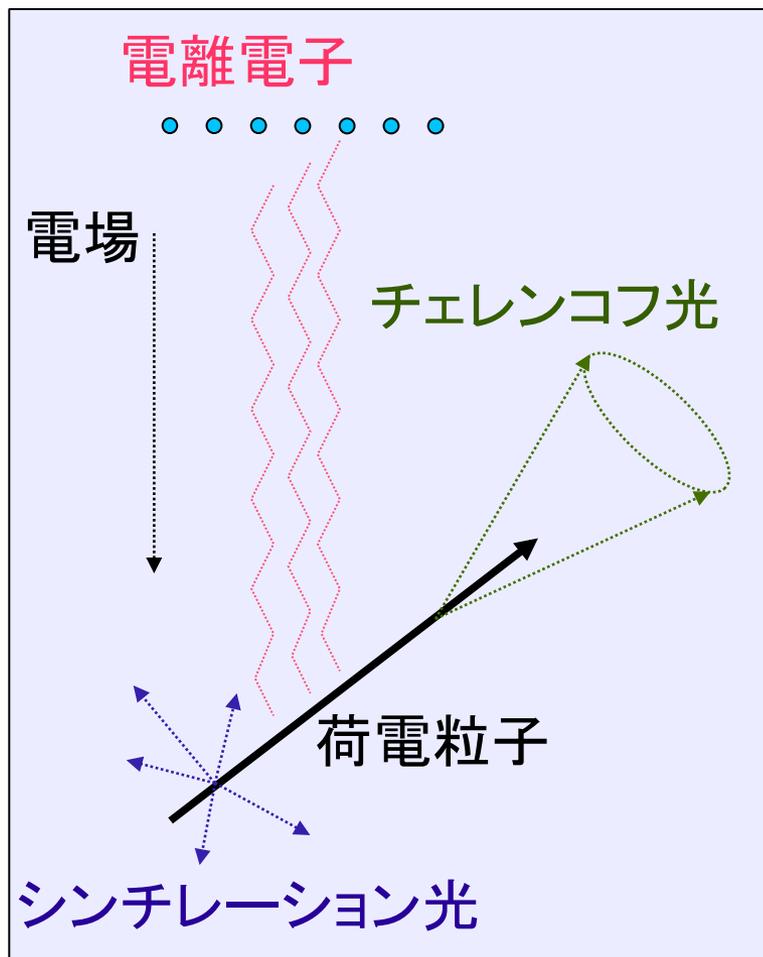
(ETHZ) Andre Rubbia, Alberto Marchionni, Alessandro
Curioni, Filippo Resnati, Devis Lussi, Sousuke Horikawa,
Andreas Badertscher

(早稲田大学) 寄田浩平、岡本迅人、長坂優志、三谷貴
志 (10L、0.4トン他一部のR&Dに参加)

動機

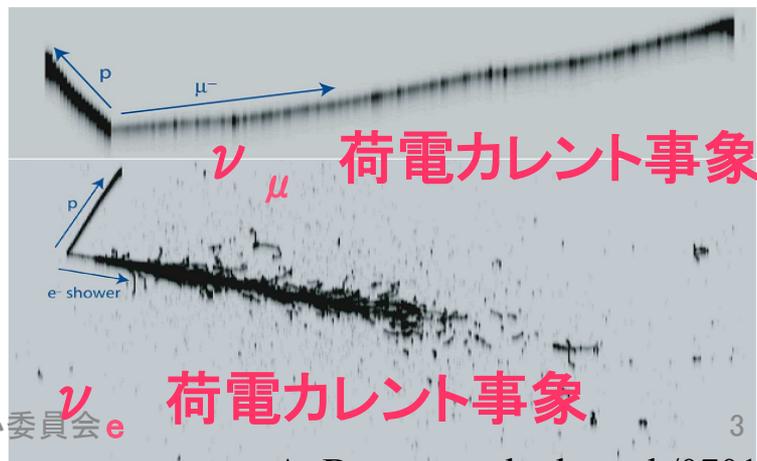
- レプトンセクターのCPの破れと核子崩壊は素粒子物理学の残された最重要課題のうちの2つである。
 - T2Kの先を見据えた将来のニュートリノ実験で性能的に水チェレンコフ検出器を超える性質を持つ液体アルゴンTPC検出器(LAr)設置を考える。同時に核子崩壊実験も行うことも可能である。
 - 液体アルゴンTPC検出器の次世代物理に対する利点
 - CPの破れで重要な(反)電子ニュートリノ事象を、中性カレント π^0 からのガンマと非常に良く識別できる。
 - 陽子崩壊で特に重要な $p \rightarrow K^+ \nu$ 崩壊のKが直接見える。

液体アルゴン検出器概念図



- 電離電子信号

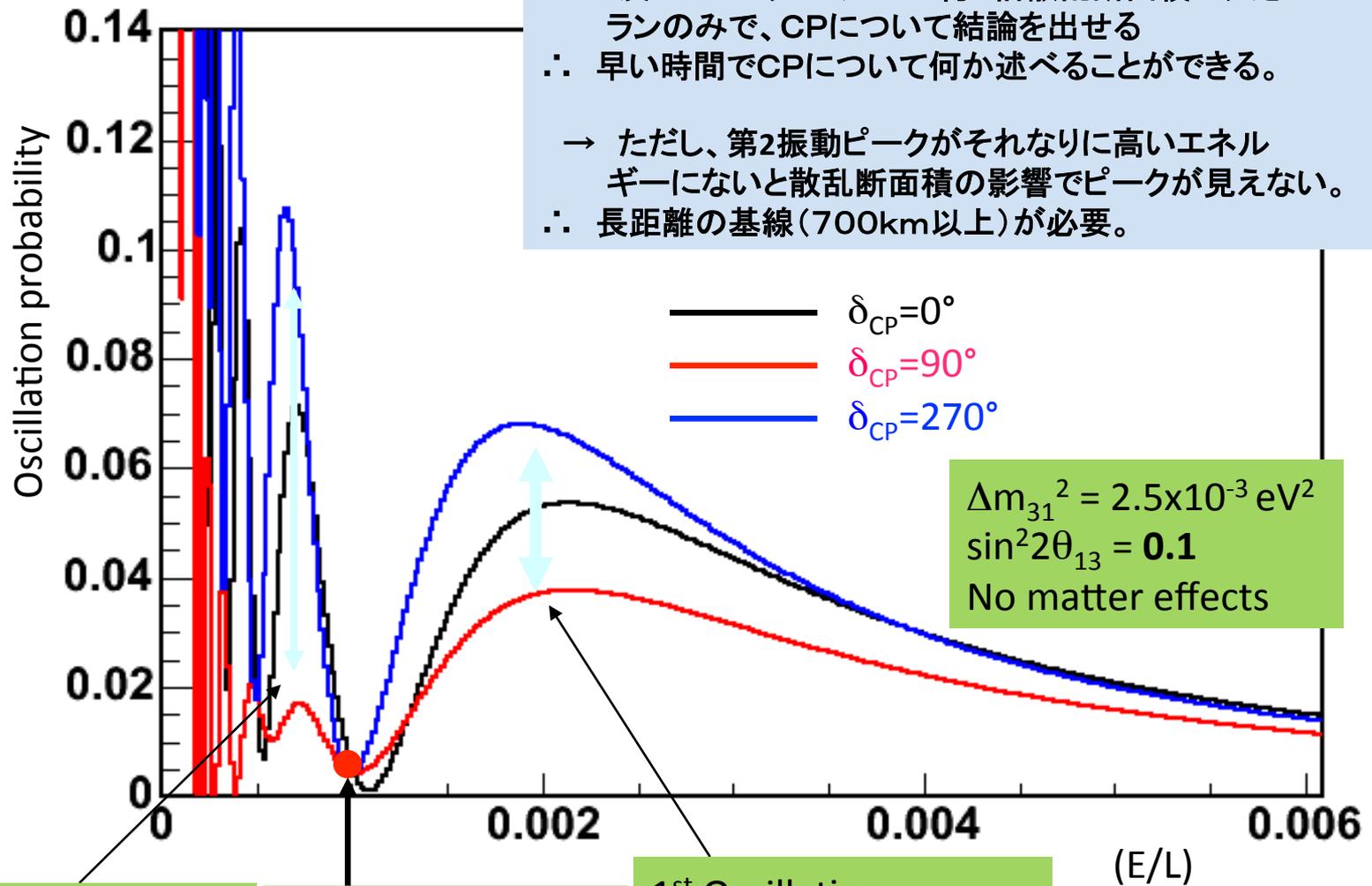
- $\sim 10^5 e/cm$ MIP
- $\sim kV/cm$ の電場により $\sim mm/\mu s$ でドリフト
- 高純度の液体アルゴンでは10m以上のドリフトが可能
- (液体中では増幅無し)
- ドリフト電子のディフュージョン
 - 20 mドリフト後で $< 3 mm$
- TPCとして三次元飛跡再構成



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation probability (on E/L)

エネルギースペクトルを使ったCP非保存項の探索
 → 反ニュートリノに比べて約3倍散乱断面積が大きいニュートリノランのみで、CPについて結論を出せる
 ∴ 早い時間でCPについて何か述べることができる。

→ ただし、第2振動ピークがそれなりに高いエネルギーにないと散乱断面積の影響でピークが見えない。
 ∴ 長距離の基線(700km以上)が必要。



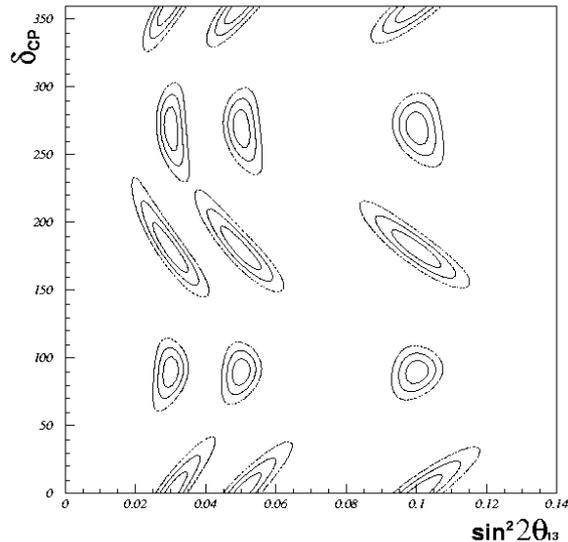
$\Delta m_{31}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
 No matter effects

2nd Oscillation Maximum
 $E/L \sim 1.27 \Delta m^2 * 2/3\pi$

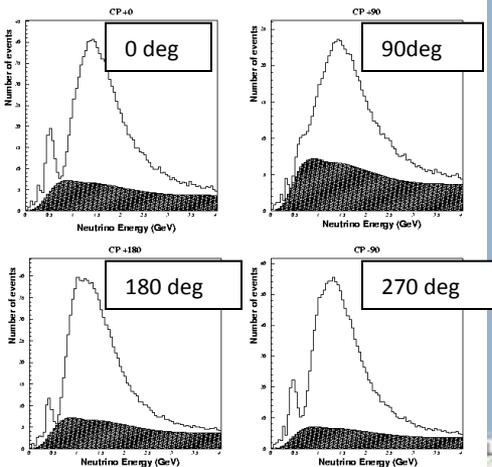
Oscillation Minimum
 $E/L \sim 1.27 \Delta m^2 / \pi$

1st Oscillation Maximum
 $E/L \sim 1.27 \Delta m^2 * 2/\pi$

例： 隠岐島にてCPの破れを測定 (T2Kを超えて)



- Assume J-PARC has 1.66MW beam
- Assume using 100kt LAr TPC detector
- Assume 5 years run for neutrino only
- LAr TPC has signal efficiency of 100% for ν_e Charged Current (CC) events.
- NC π^0 BKG is negligible compared to beam ν_e BKG.
- Background is only due to beam ν_e events.
- Perfect energy resolution is assumed.
- No systematics are considered.



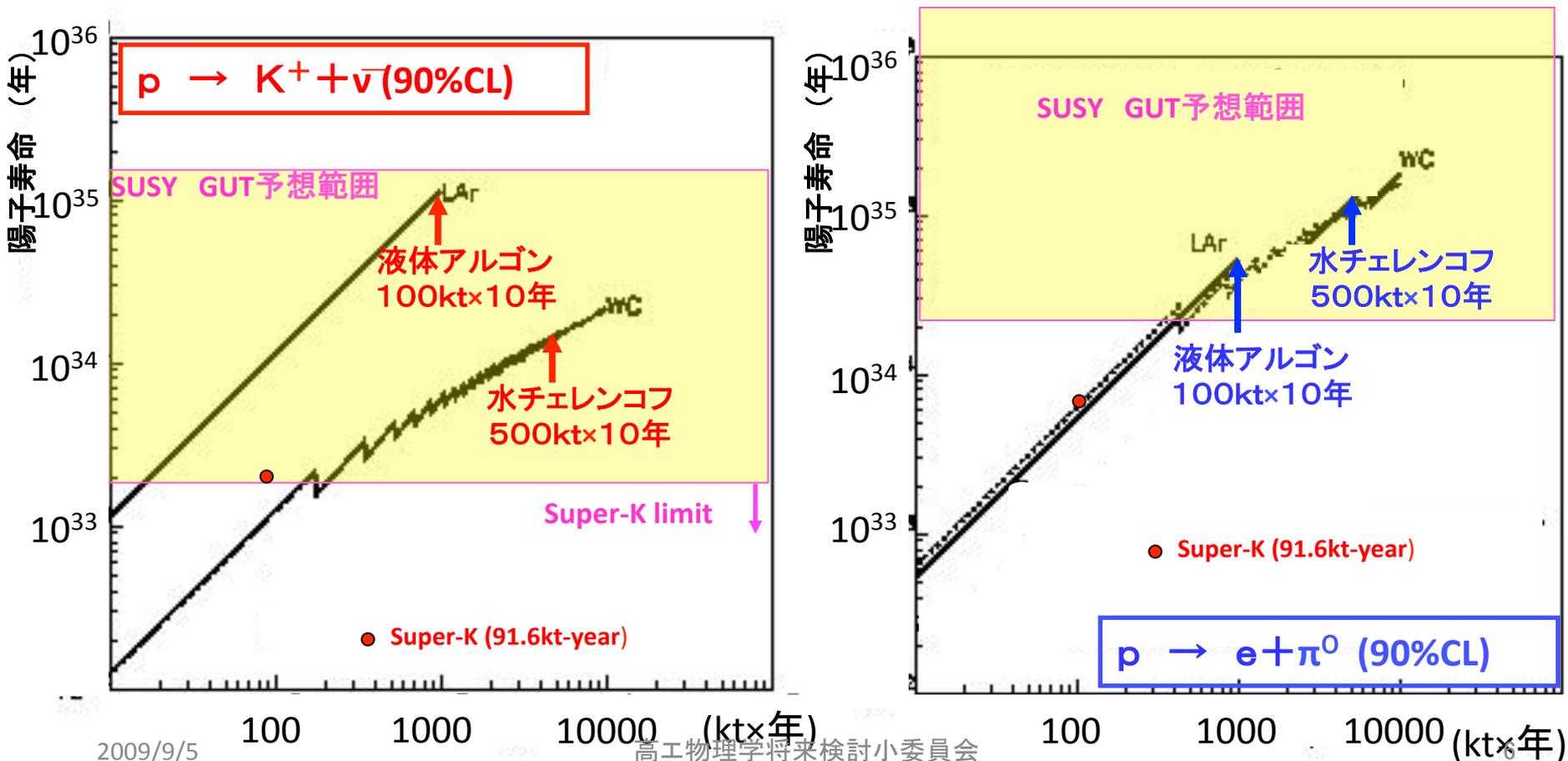
Okinoshima

~658km
~0.8deg. Off-axis

• NP08
arXiv:0804.2111 [hep-ph]

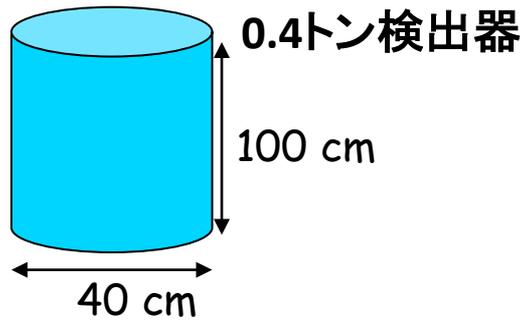
陽子崩壊の感度

- $K^+ + \nu$ モード: $LAr(100kt \times 10年) = \sim 7 \times WC(500kt \times 10年)$
 $LAr 100Kt$ なら $K\nu$ で現在のSUSY GUT (NNN'07 P.Nath) のほぼ全てをカバー
 WC は陽子崩壊時の水素原子からの低エネルギー光子の発行・検出効率でリミット。
- $e + \pi^0$ モード: $LAr(100kt \times 10年) = \sim 1/2 \times WC(500kt \times 10年)$



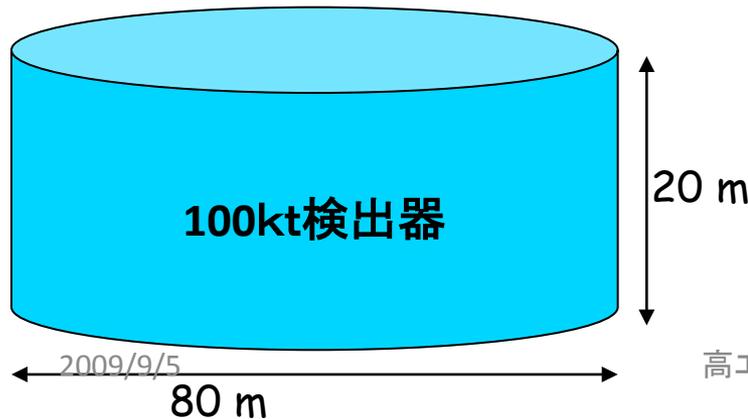
戦略

100kt検出器への戦略



- 100kt検出器を作る前に数個のステップを用意している。
20kg → 0.4トン → 40t~1kt → 100kt

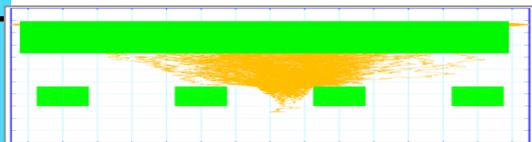
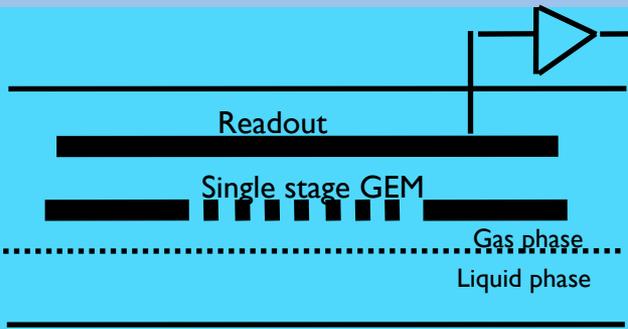
- 最初のステップとして、KEKに20kgのテストベンチを作成し、その後、0.4トンレベルの検出器を電子ビームでビームテスト。(0.4トンはMEGのプロトタイプを使う。計画進行中。)
(検出器R&D、電子ニュートリノ出現に向けた準備)



- 技術要素 (これらは(部分的に)確立されているが、**青字部分**は特に将来性を含めて確認が必要な部分)

- ガス・液体アルゴンの純化方法
- 再結合・ドリフト速度・拡散の性質測定
- 各種スローコントロール・モニター(純度・温度・圧力等)
- ヒットファインディング、トラックファインディング法(一部オンライン)
- シンチレーション光(128nm)検出
- **真空引き無し**で高純度達成／**長距離ドリフト**
- **2相検出(+ガス増幅)**、読み出し
- **容器** (熱流入コントロール)
- **高電圧** (MV程度)
- **長期安定性**

100kt検出器イメージとR&Dコンポーネント

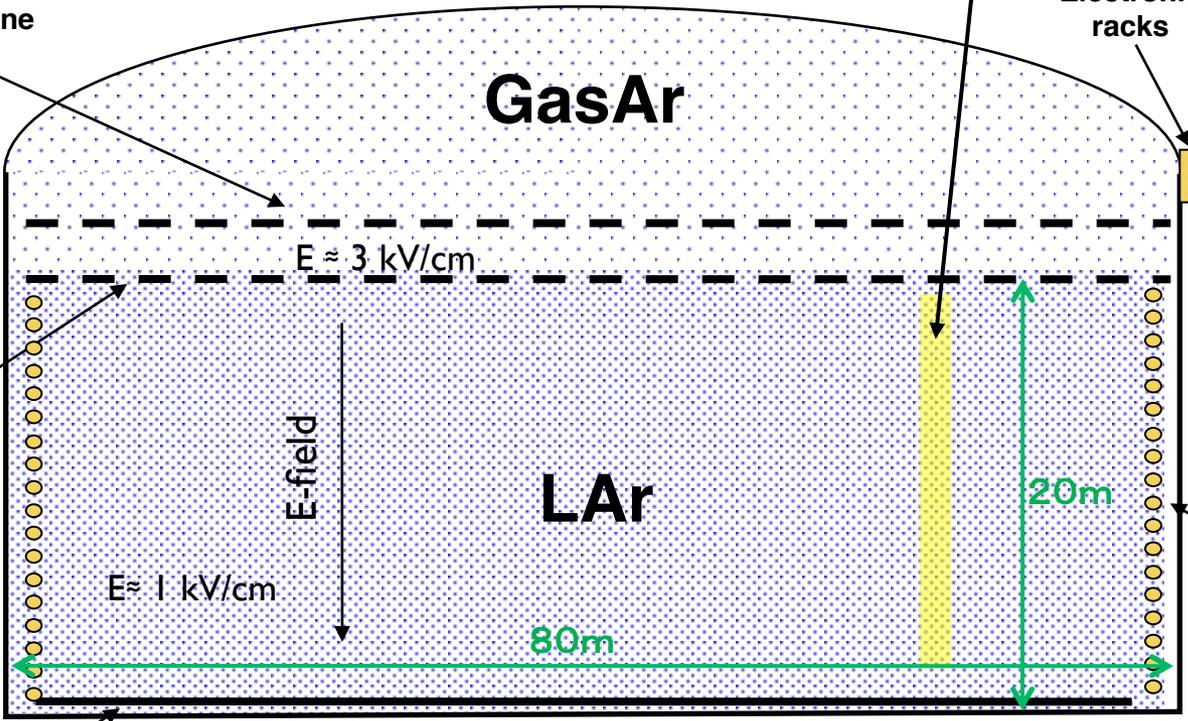


液体相、ガス相の2相を使った読み出し。ガス相ではGEMを使った増幅も考えている。

円筒型のテスト用液体アルゴン検出器を使った長距離電離電子ドリフトのテスト

Charge readout plane

Electronic racks



Extraction grid

Field shaping electrodes



Cathode (- HV)

- 20mドリフトさせるためにはアルゴンは(真空引きなしで)非常に高い純度である必要。
- 高電圧をかけないとドリフト速度が遅くなり、同じ純度でも減衰長が悪化。再結合も悪化
- S/N比を上げるため、気相での電子数増幅

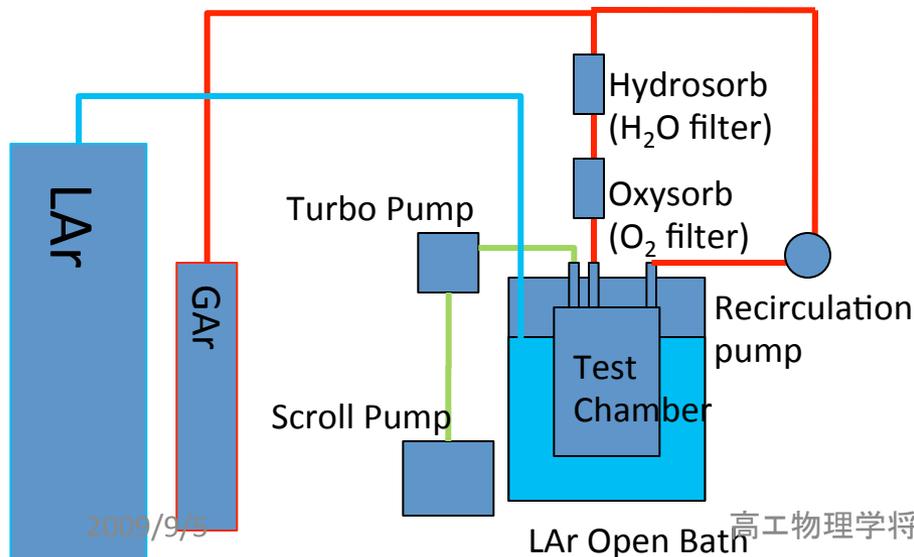
数年以内に達成したいR&D

MVをかけられる高電圧系

現状

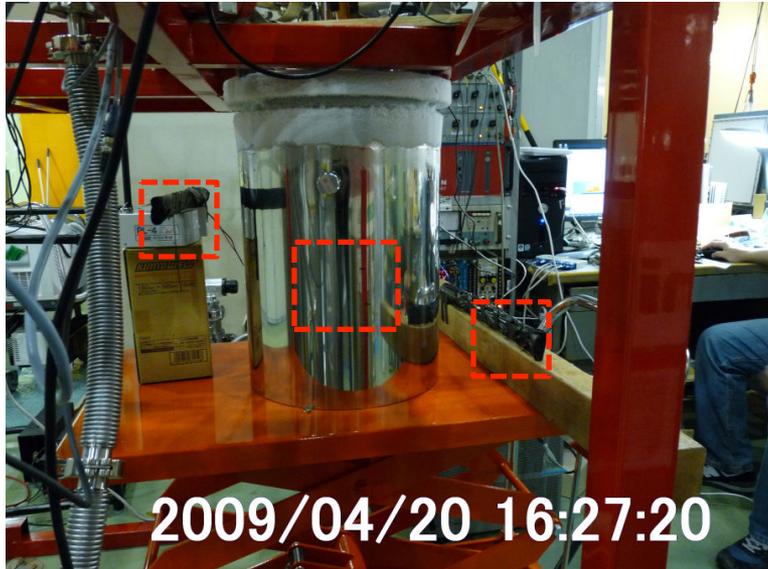
10L Setup

- Refer the system as Carlo Rubbia's paper in 1985
- Main Features
 - Oxysorb (O_2 filter) + Hydrosorb (H_2O filter)
 - Gas purification and liquefaction for initial filling
 - Initial filling and recirculation share the same filter



1st Cosmic Ray TPC Signal in Japan (1 phase)

- チェンバー内に2つの銅版とグリッドを作る。銅版の大きさ約10×10cm

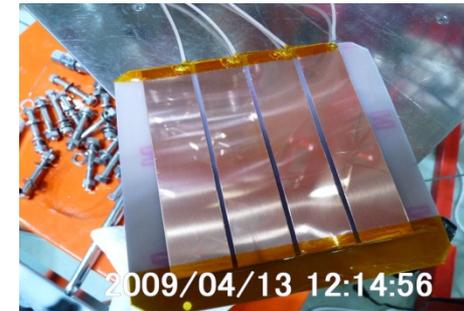
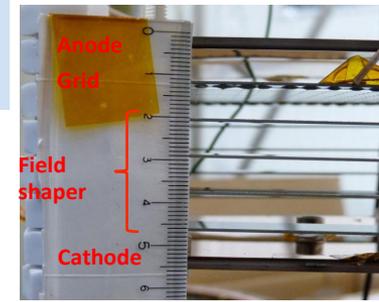


HV setting

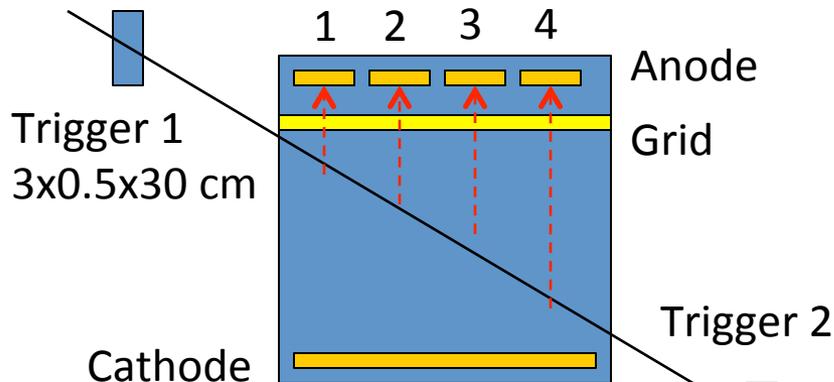
- Cathode -2500 V
- Grid -1000 V
- Cathode-anode; 5cm

Oscilloscope waveform

- Ch1 is the fastest signal
- Drift time ~20 μ s

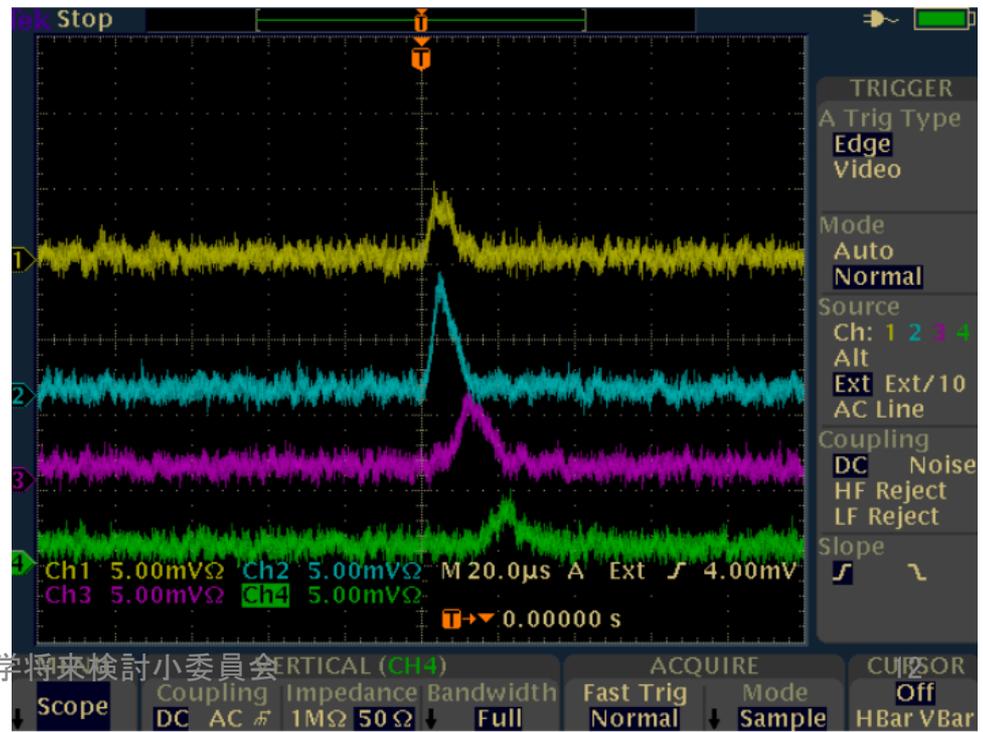


- トリガーカウンタ2つを使ったテスト



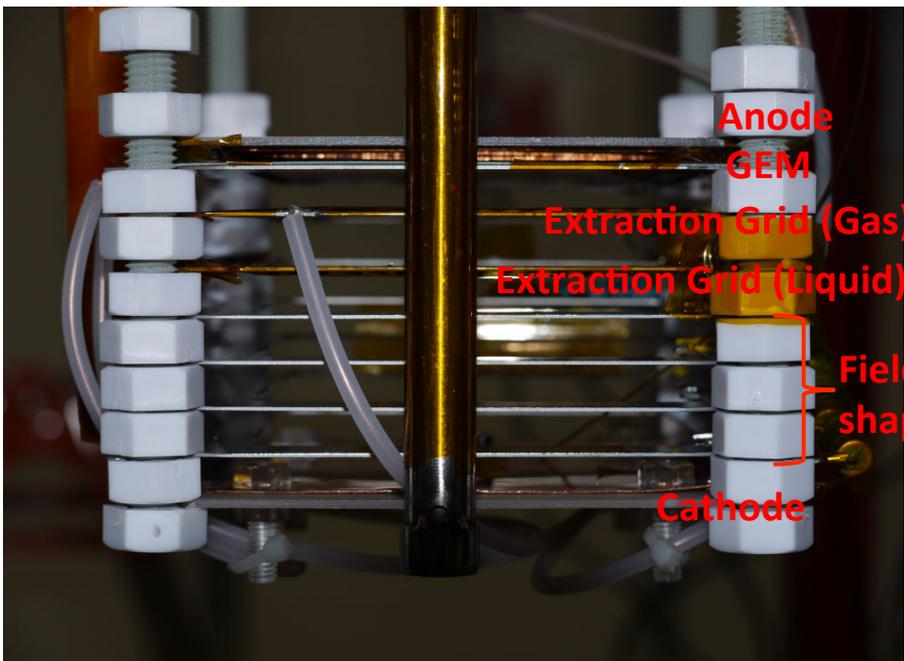
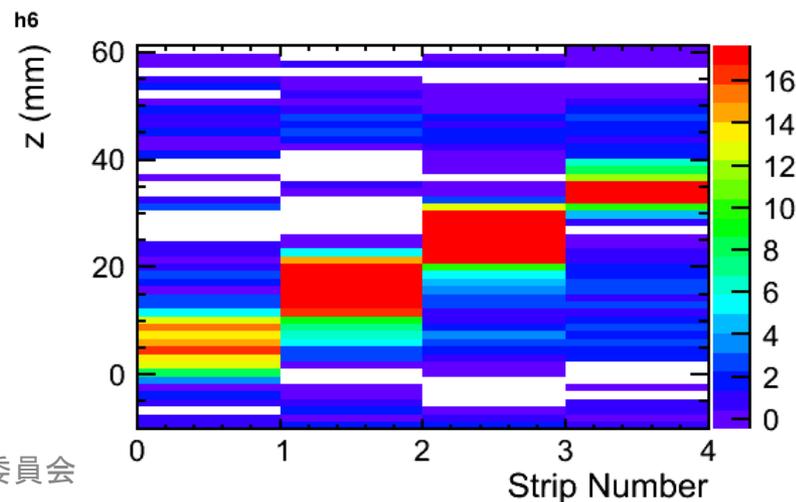
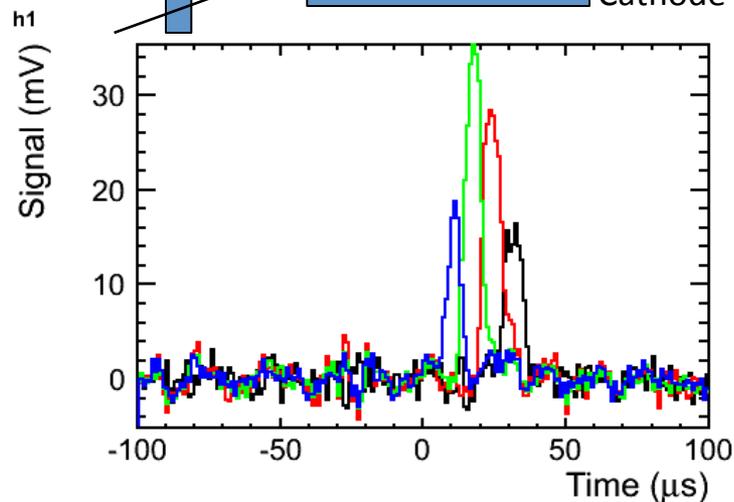
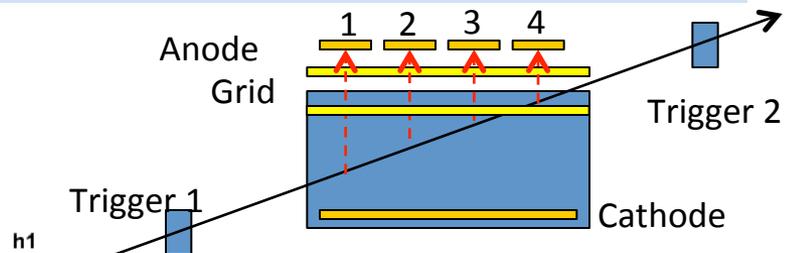
2009/9/5

高工物理学将来検討小委員会



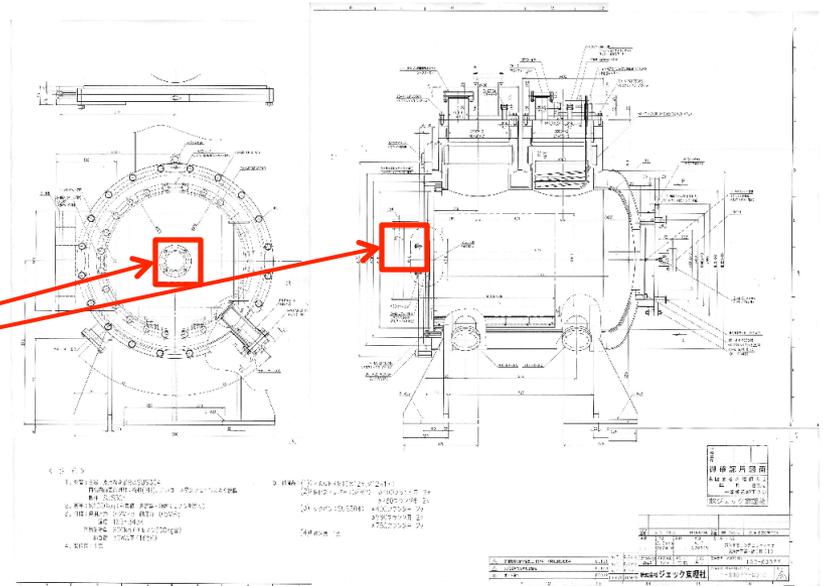
Cosmic Ray Tracks (double phase)

- 液面から電離電子を気面に取り出すために、2つの取り出しグリッドを設置し、その間に液面を保ちつつ(液面付近の大きいポテンシャルを越えるために)高い電場をかける。
- 気相での増幅には、400 μm 厚、300 $\mu\text{m}\phi$ ホール、700 μm ピッチのGEMを使っている。
- GEMのゲインは高温・低圧で下がり、現在測定ゲインは2.5@LAr温度。
- 10倍くらいのS/N比を目指す。後数倍。



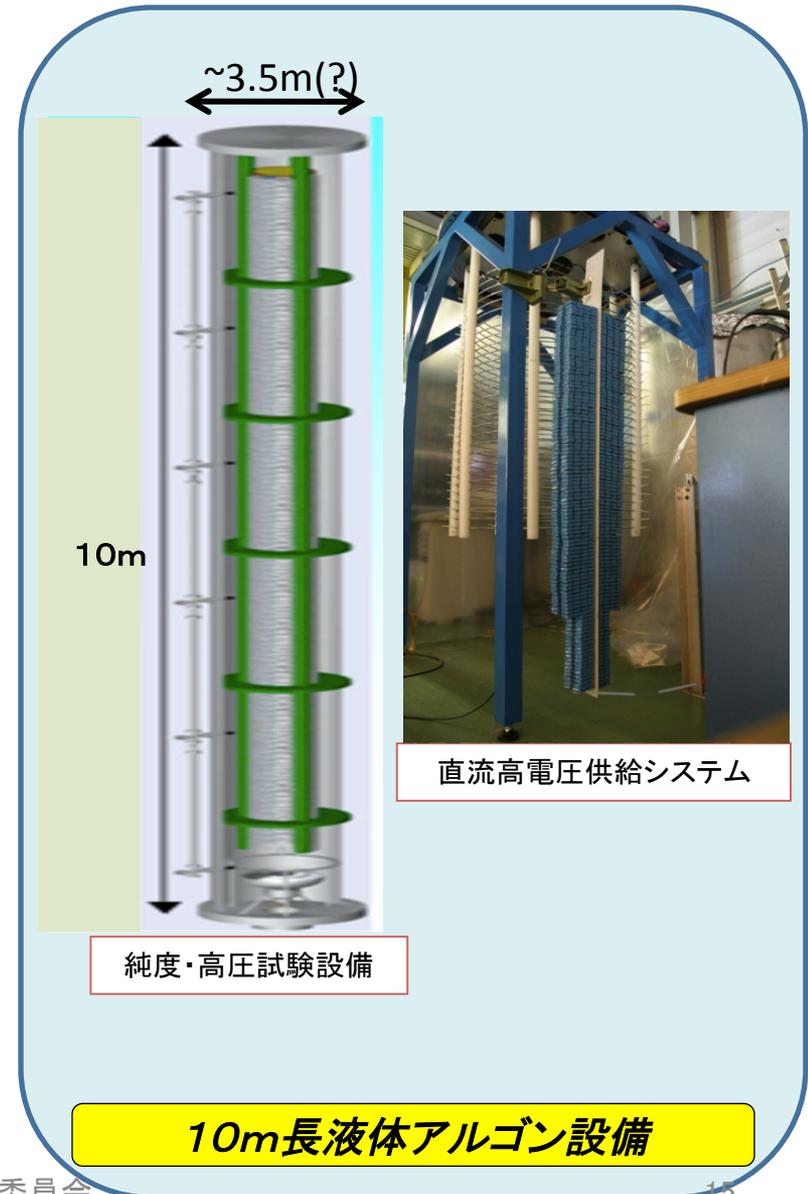
0.4ton 状況

- MEG プロトタイプ容器を借りて、テストビームを行う。
 - 液体キセノン (165K)容器用に作成されたもの
 - ICEPPより借り受ける。(2010年度末までが一回目の借用期限)
 - ビーム窓; $0.16X_0$
 - PSIよりKEKに空輸された(8月19日)、現在、KEK測定器開発室にある。現在、インフラの整備と、真空引きの用意を入念に行っている
- 電子(ニュートリノ)ビームを使った粒子認識能力、局所的電離損失の測定を行う。(1年以内のタイムスケール)
- KEK LArグループ、測定器開発室、低温グループ、ETHZ、早稲田大が共同研究者または協力者として開発研究を進めている



10m長液体アルゴン設備

- テクノロジー的な目的;
 - 1kトン以上の大きさの液体アルゴン施設を作る前の総合的なテクノロジーの最終確認設備
 - クライオスタット
 - 循環・純化装置
 - 冷却(液化)装置
 - 純度モニター装置
 - 高電圧(500kV~1000kV)
- 現在、デザインをスタートした段階。
- 数年以内に総合的なテストを行いたいと考えている。



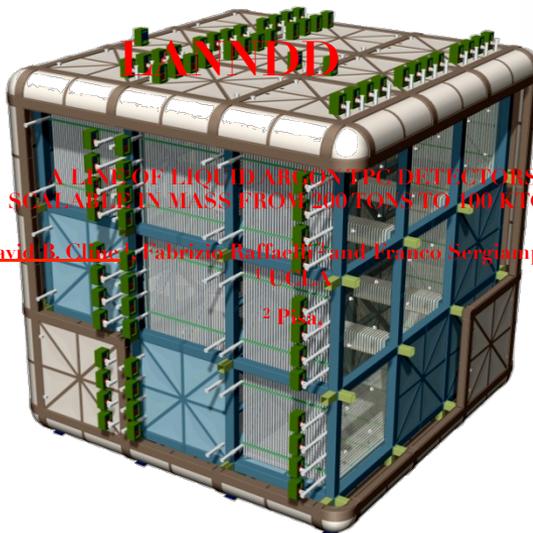
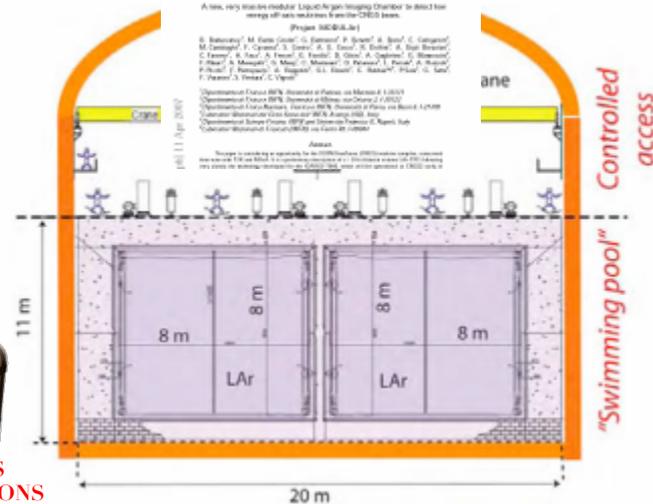
国際的な状況

ICARUS



S. Amersio⁶, S. Amoroso⁶, M. Antonello⁶, P. Aprili⁶, M. Arnesen⁶, F. Arneodo⁶, A. Badierich⁶, B. Balossino⁶, M. Baldo Ceolco⁶, G. Battistoni⁶, B. Bekturov⁶, P. Benetti⁶, E. Bernardini⁶, M. Bischofberger⁶, A. Bortolotto⁶, R. Brunetti⁶, R. Bruzzi⁶, A. Bueno⁶, E. Calligaris⁶, M. Campanelli⁶, F. Carbonara⁶, C. Carpanese⁶, D. Cavali⁶, F. Cavallari⁶, P. Cennini⁶, S. Centon⁶, A. Cosma⁶, C. Chen⁶, D. Chen⁶, D.B. Chen⁶, Y. Chen⁶, R. Cif⁶, D.B. Cline⁶, K. Cieplik⁶, A.G. Cocco⁶, D. Conti⁶, Z. Dai⁶, C. De Vecchi⁶, A. Djibonovska⁶, A. Di Cocco⁶, R. Dolgaj⁶, A. Ekdahl⁶, M. Falcini⁶, A. Ferrellet⁶, A. Ferrari⁶, F. Ferri⁶, G. Fiorillo⁶, S. Galli⁶, D. Garcia Gomez⁶, Y. Ge⁶, D. Gibart⁶, A. Ghigi Bezzola⁶, I. Gil-Botella⁶, K. Graczyk⁶, L. Granda⁶, A. Guglielmi⁶, K. He⁶, J. Holczak⁶, X. Huang⁶, C. Juszczak⁶, D. Kieckhefer⁶, J. Kissel⁶, T. Kordowski⁶, H. Kima⁶, G. Kiskal⁶, M. Laffranchi⁶, J. Lagoda⁶, Z. Li⁶, B. Lisowski⁶, F. Lu⁶, J. Ma⁶, G. Mangano⁶, G. Mannocchi⁶, M. Markiewicz⁶, A. Martinez de la Osa⁶, C. Matthies⁶, F. Maun⁶, D. Mazza⁶, A.J. Melgares⁶, A. Menegolli⁶, G. Meng⁶, M. Mesina⁶, J.W. Mistekci⁶, C. Montanari⁶, S. Muraro⁶, S. Navas-Concha⁶, M. Nieske⁶, J. Nowak⁶, G. Navarra⁶, C. Ocasio⁶, S. Ostrowski⁶, O. Oucina⁶, O. Palamara⁶, D. Passoli⁶, L. Periale⁶, G. Piano Mortari⁶, A. Pizzoli⁶, P. Piccini⁶, F. Pietropolio⁶, W. Pichler⁶, M. Prial⁶, T. Rainald⁶, A. Rappold⁶, G.L. Raselli⁶, J. Rost⁶, E. Roudier⁶, M. Roselli⁶, A. Rubbia⁶, C. Rubbia⁶, P. Sala⁶, R. Santocchi⁶, D. Scannicchio⁶, E. Segreto⁶, Y. Sato⁶, F. Scaramuzza⁶, J. Sobczyk⁶, N. Spinelli⁶, J. Stupianiec⁶, R. Sulej⁶, M. Szepczyk⁶, M. Szarka⁶, M. Ternani⁶, G. Trinchero⁶, R. Velotta⁶, S. Ventura⁶, C. Vignoli⁶, H. Wang⁶, X. Wang⁶, J. Wong⁶, G. Xu⁶, Z. Xu⁶, X. Yang⁶, A. Zaleski⁶, I. Zalipska⁶, C. Zhang⁶, Q. Zhang⁶, S. Zhou⁶, W. Zupski

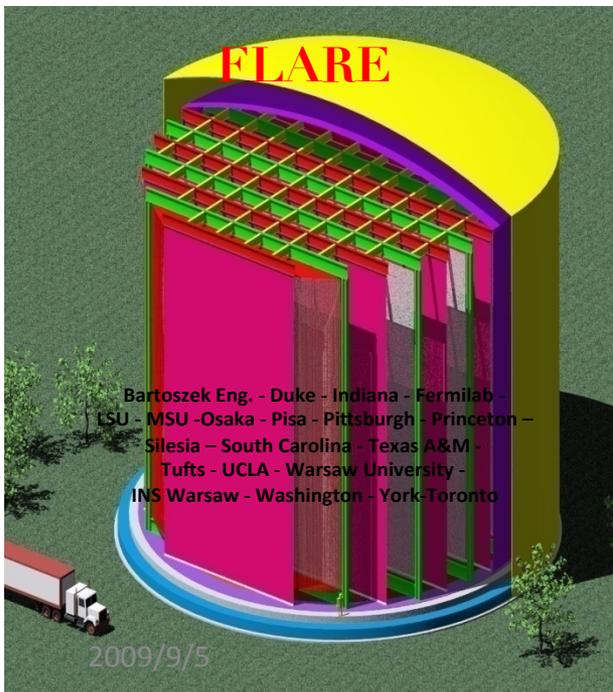
MODULAR



A LIST OF LIQUID ARGON (LAr) DETECTORS
SCALABLE IN MASS FROM 100 TONS TO 100 K TONS

David E. Clug¹, Fabrizio Raffaele² and Franco Sergiampietri^{1,2}

FLARE



Bartoszek Eng. - Duke - Indiana - Fermilab -
LSU - MSU - Osaka - Pisa - Pittsburgh - Princeton -
Silesia - South Carolina - Texas A&M -
Tufts - UCLA - Warsaw University -
INS Warsaw - Washington - York-Toronto

2009/9/5

GLACIER



ETHZ, Bern U., Granada U., INP Krakow, INR Moscow, IPN Lyon,
Sheffield U., Southampton U., US Katowice, UPS Warszawa,
UW Warszawa, UW Wroclaw

高工物理学将来検討小委員会

Towards Huge LAr TPCs

There are several proposals towards Huge LAr TPCs with different approaches:

- a **modulable** or a **scalable** detector for a total LAr mass of 50-100 kton
- **evacuatable** or **non-evacuatable** dewar -> evacuation guarantees the good purity.
- detect ionization charge in LAr **without amplification** or with **amplification** -> affects signal to noise ratio, etc. see later comments.



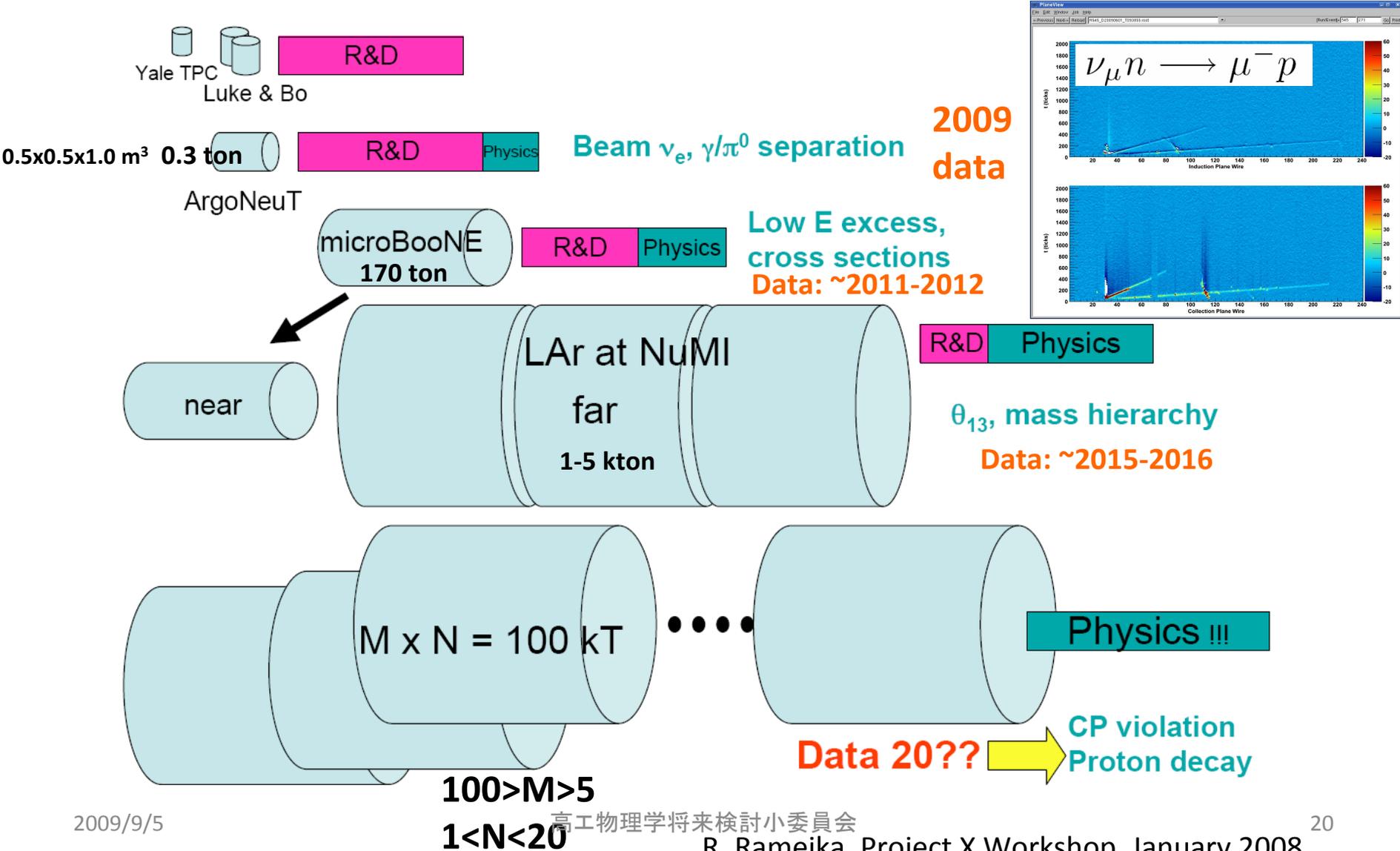
Goal; Keep good physics performance with reasonable total cost for building.

Items to be Proven toward Huge Detector

- Technical Feasibility for Huge Detector (these are important for technology choice)
 - Establish realistic maximum drift distance
 - Tightness of LNG (Liquid Natural Gas) type tank.
 - Purification from non-evacuated large volume.
 - Possible drift high voltage, and effect of the bubble inside the tank
 - Ionization signal distortion for long drift, dE/dx
 - Use of passive insulation (thermal uniformity, stability, ...)
 - Scaling up of purification capacity
 - Pre-cooling, flushing
- Physics Performance
 - Define tolerable charge signal distortion , dE/dx resolution
 - MC study needed (reconstruction,...)
 - Proof with Beam is necessary
 - Calorimetry (energy reconstruction, electric field dependence, energy scale, etc should be investigated with electron/muon beam)
 - Charged pions (hadron interaction in medium, electric field dependence)

Proposed Strategy @ Fermilab

Evolution of the Liquid Argon Physics Program



Example2; LAGUNA (+EUROnu) project

Where?

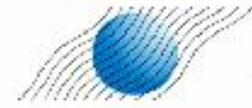


IUS

Institute of Underground Science in Boulby mine, UK



Laboratoire Souterrain de Modane, France



CENTRE FOR UNDERGROUND PHYSICS IN PYHÄSALMI MINE

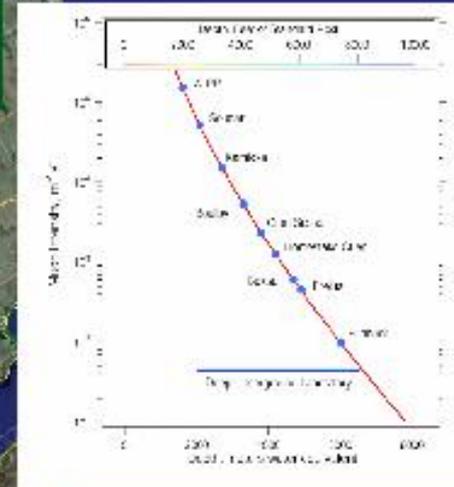
Currently there is no available sight to host very large scale detectors in Europe!

- New facilities will have to be excavated or old one extended

- What depth?

- What other synergies? (beamline distance)

- What is the distance from reactors?



LSC

Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Spain



LNGS

Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy

まとめ・予定

- 液体アルゴンTPC検出器は、今後のニュートリノのCP非保存項探索や、陽子崩壊実験に極めて有望な検出器の一つである。
- ただし、テクノロジー的には達成しなければならない事項がある。特に今後のR&Dで重要な要素は
 - 高純度の達成。(真空なしでの初期の純度を含む)
 - 高電圧のR&D (1MV級)
 - 良いS/N比の達成
 - 物理的な検出器性能の確認
- 現状;
 - 10Lのテストスタンドで、基礎的知識を蓄えたとともに、S/N比についてのR&Dを測定込みでできるようになった。
 - 0.4トン(250L)プロトタイプによって、更なる大きさの検出器のテクノロジーの確認をするとともに、物理的な検出器性能を確認する。
 - 10m長テスト施設によって、大きな検出器に使用するテクノロジーを最終確認する。数年以内で施設のテスト開始を目指したい。
 - パージ・初期純度良化のテストも行っている。
 - 欧州・米国に遅れて開始したR&Dだが、このままのペースでR&Dを進めれば、十分追い越すことができると考える。

バックアップ