J-PARCにおける原子核中でのΦ中間子の質量変化の研究

TCHoU会議 2025/7/8

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹
筑波大学数理物質科学研究科・客員
佐甲博之

1. 目的
2. 国内外の状況
3. 実験の方法
4. 準備状況
5. スケジュール
6. まとめ

E88/SAΦRE Collaboration

- H. Sako (Spokesperson), S. Sato, M. Ichikawa (ASRC/J-PARC, JAEA)
- K. Aoki, Y. Morino, W. Nakai, K. Ozawa (KEK/J-PARC)
- W. C. Chang, M. L. Chu, C. Y. Hsieh, S. H. Yao (Academia Sinica, Taiwan)
- P. J. Lin (National Central University, Taiwan)
- T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, T. Nonaka, R. Sato (Univ. of Tsukuba)
- M. Inaba (Tsukuba Univ. of Technology)
- R. Koike, M. Naruki, S. Nagafusa, S. Nakasuga, N. Tomida (Kyoto Univ.)
- T. Sakaguchi (BNL)
- T. Hashimoto, T. Ishikawa, K. Mizutani, H. Noumi, S. Y. Ryu, K. Shirotori, K. Suzuki, T. N. Takahashi (RCNP, Osaka Univ.)
- T. Murakami, S. Yokkaichi (RIKEN)
- Y. Ichikawa, F. Oura, S. Hayakawa (Tohoku Univ.)
- T. Hachiya, M. Shimomura (Nara Women's Univ.)
- J.K. Ahn, W. Jung (Korea Univ.)
- S.H. Kim (Kyungpook National Univ.)

Collaboration of E16 and E95 members, and new collaborators

高密度ハドロン・クォーク物質の研究

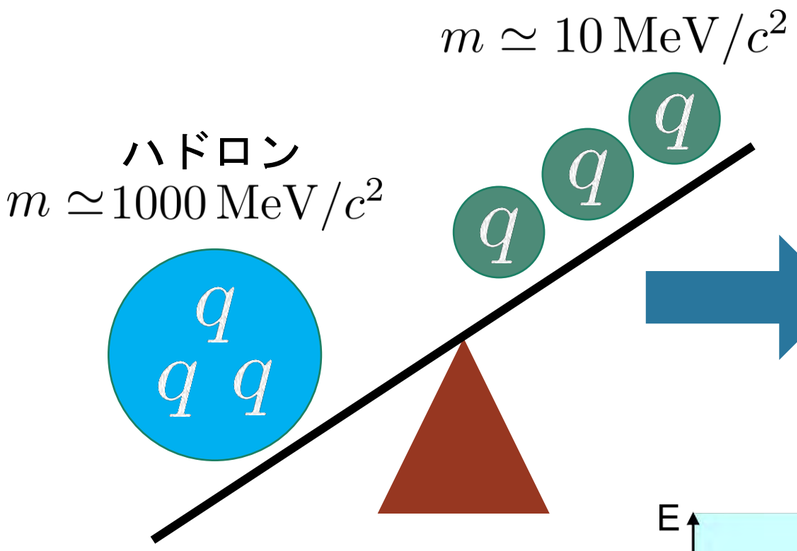
- 高密度における相構造の探索
  - 相転移線
  - 臨界点
  - カラー超伝導相
- ハドロンの質量変化
  - 南部理論（カイラル対称性の自発的破れ）によるハドロン質量生成機構の検証
  - 原子核中、または重イオン衝突による高密度環境

強い相互作用の相図

ϕ中間子研究の目的

ハドロン質量獲得機構の解明

宇宙の通常物質の99%の質量はハドロンが占める

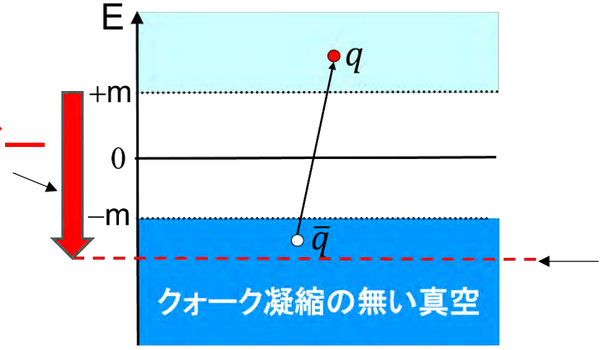


南部理論

カイラル対称性の
自発的破れ

クォーク凝縮（秩序変数） $\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$

このシナリオは
理論的に確立しているが、
実験的に未検証

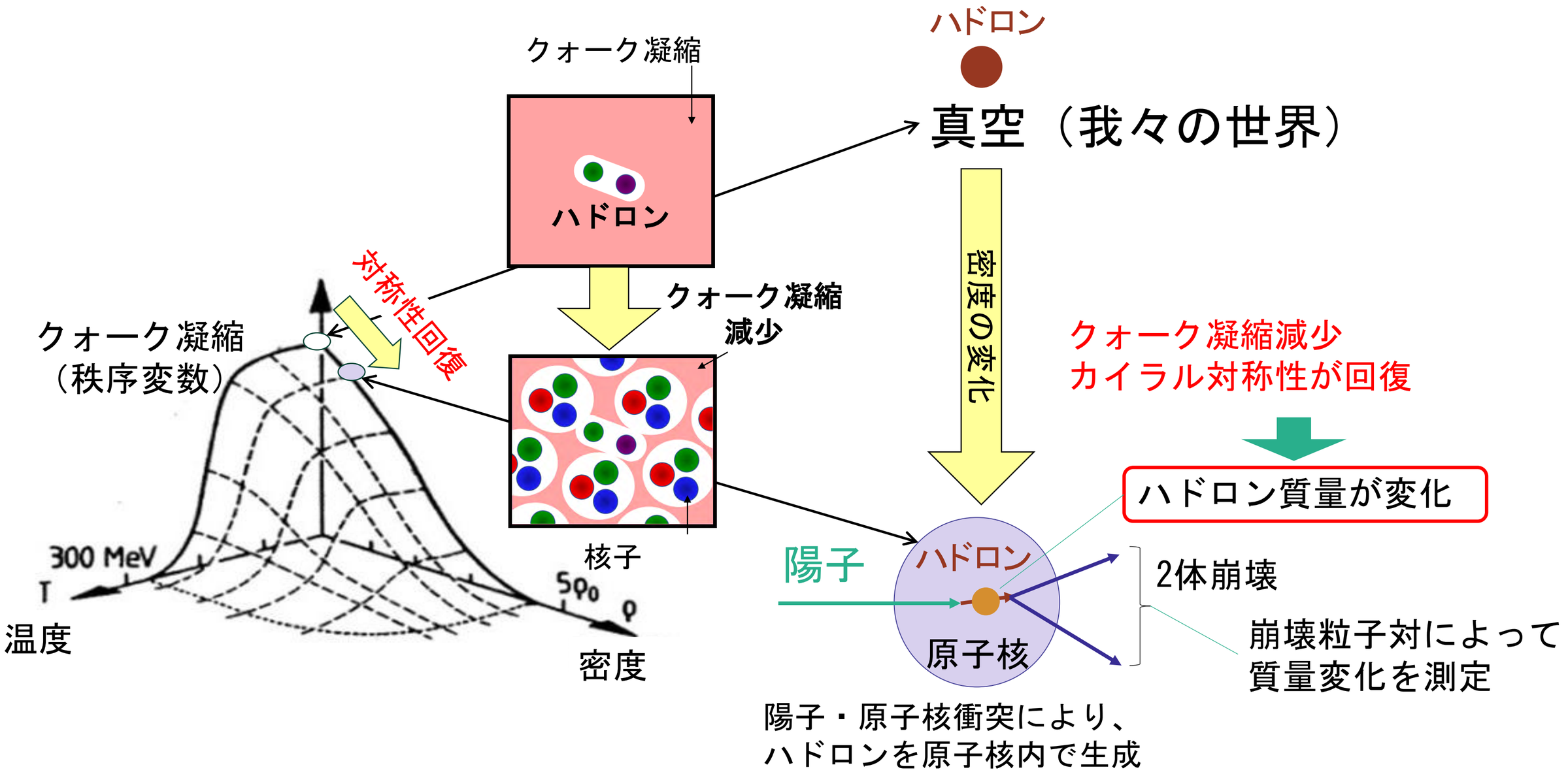


q-$\bar{q}$間束縛エネルギー
$-\alpha_s^2 m/4$

低エネルギーで$\bar{q}$-q結合定数（α_s）大
⇒クォーク凝縮（$\bar{q}q$）が発生した状態が
真空の基底状態

ハドロンはクォーク凝縮の
抵抗を受けて質量獲得

ハドロン質量獲得機構の実験的検証



国内外の状況

カイラル対称性回復の実験的検証→未解決

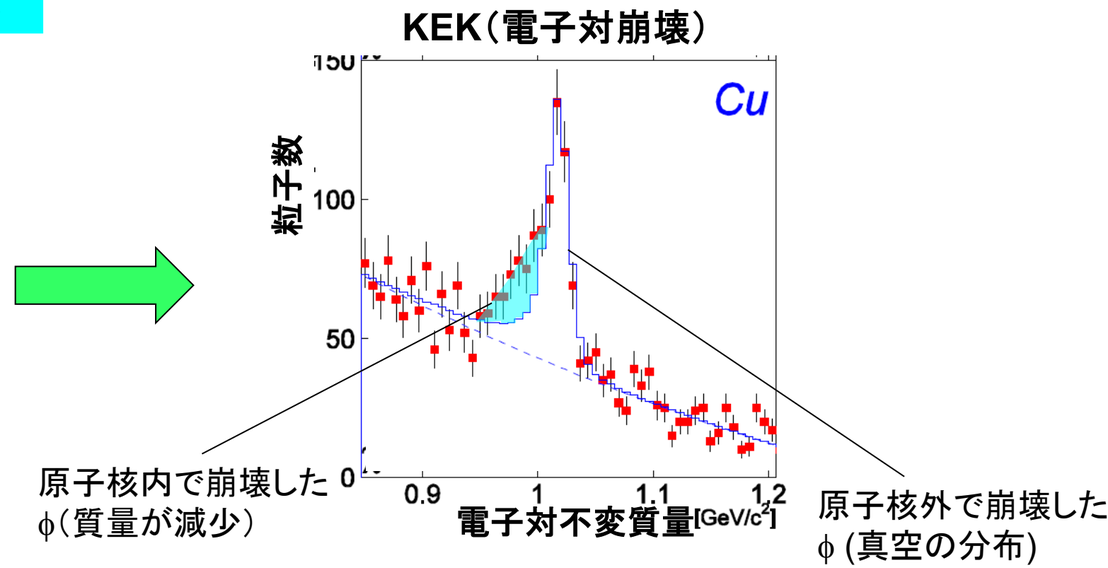
・ 国内外の実験における30年以上にわたる挑戦
  - 重イオン衝突、光子・原子核衝突実験（CERN, BNL, GSI, 理研, Spring-8）における中間子質量変化の研究等

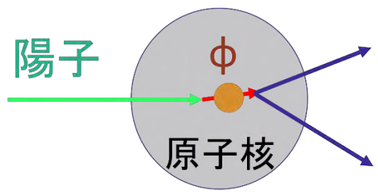
ϕ 中間子（$s\bar{s}$）：崩壊幅が4MeV/c^2と狭いため質量変化に敏感

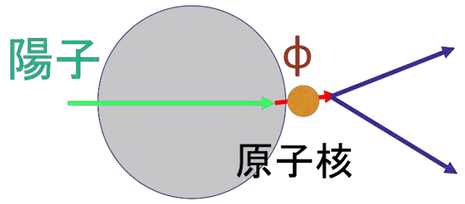
陽子・原子核衝突によるϕ中間子の電子対崩壊実験

- KEK-E325（過去）
  - 原子核内での質量の減少を示唆
  - 統計不足

- J-PARC E16
  - 統計量をKEK実験の10倍以上に増加
  - J-PARCの旗艦実験
  - 2025年より本実験開始予定



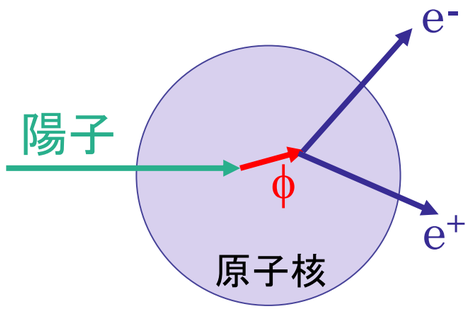




ϕ中間子の質量変化の測定

従来：ϕ→e+e-崩壊
KEK-E325（過去）
J-PARC E16 (2025年開始)

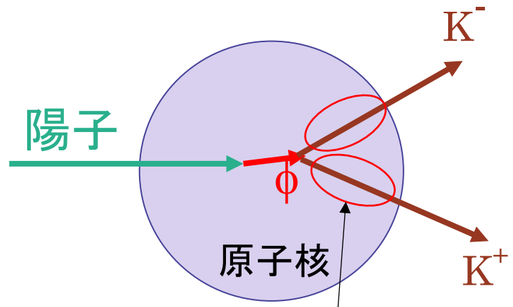
崩壊確率低 → 少統計
KEK：2400事象
J-PARC E16：3万事象



電子・原子核反応無し
⇒質量スペクトルの歪み無し

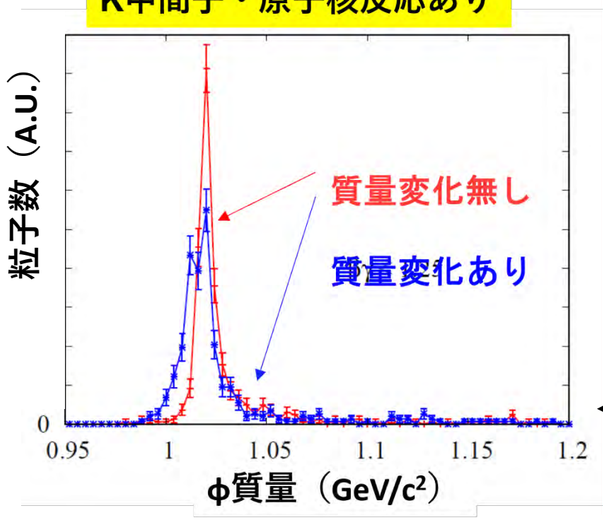
新実験(J-PARC E88)
ϕ →K+K-崩壊

崩壊確率高 → 超高統計（108万事象）



K中間子と原子核の反応
⇒質量スペクトルの歪み?

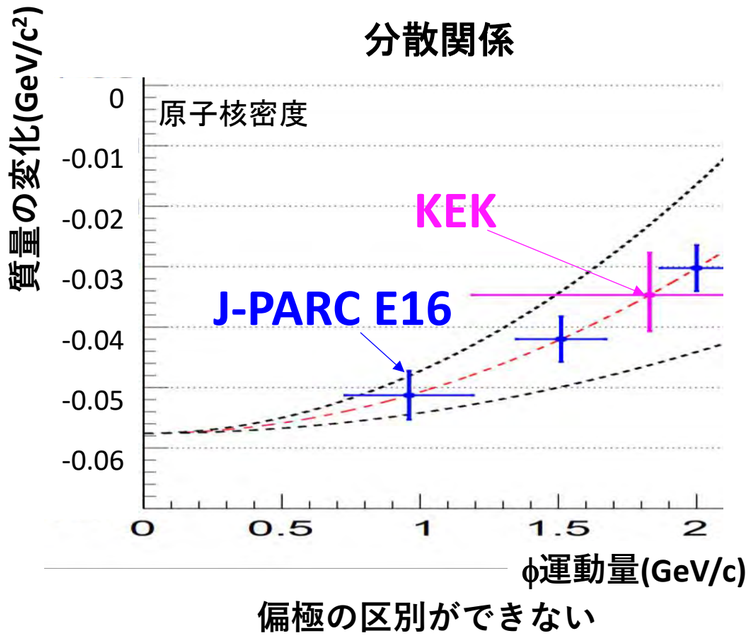
K中間子・原子核反応あり



最新の理論研究（Gubler, 2022-）：
質量スペクトルの歪みは10%程度と評価
→原子核内の質量変化の測定は可能

本研究の目標：φ中間子質量の運動量と偏極依存性の測定

φ→e+e-
KEK（実験データ）
J-PARC E16（シミュレーション）



偏極の区別ができない

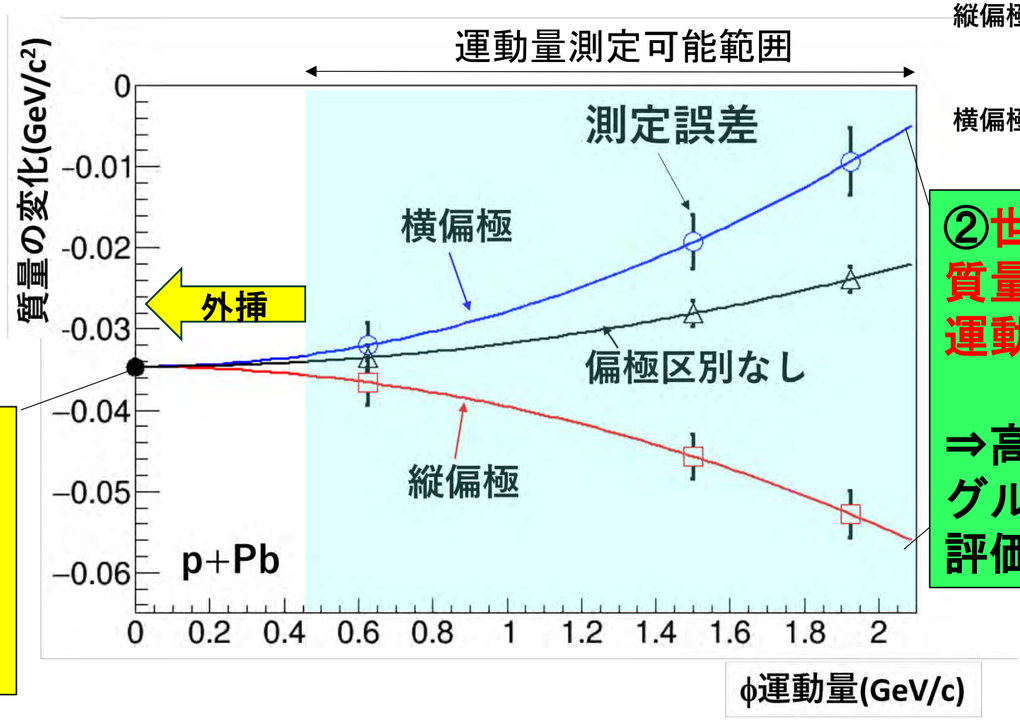
高統計K中間子対データ
統計誤差の圧倒的向上

本課題：φ→K+K–
（シミュレーション）

φ中間子：スピン１粒子
偏極を持つ

縦偏極φ　K-　K+

横偏極φ　K+　K-



①質量変化の
ゼロ運動量外挿

⇒sクォーク凝縮
決定

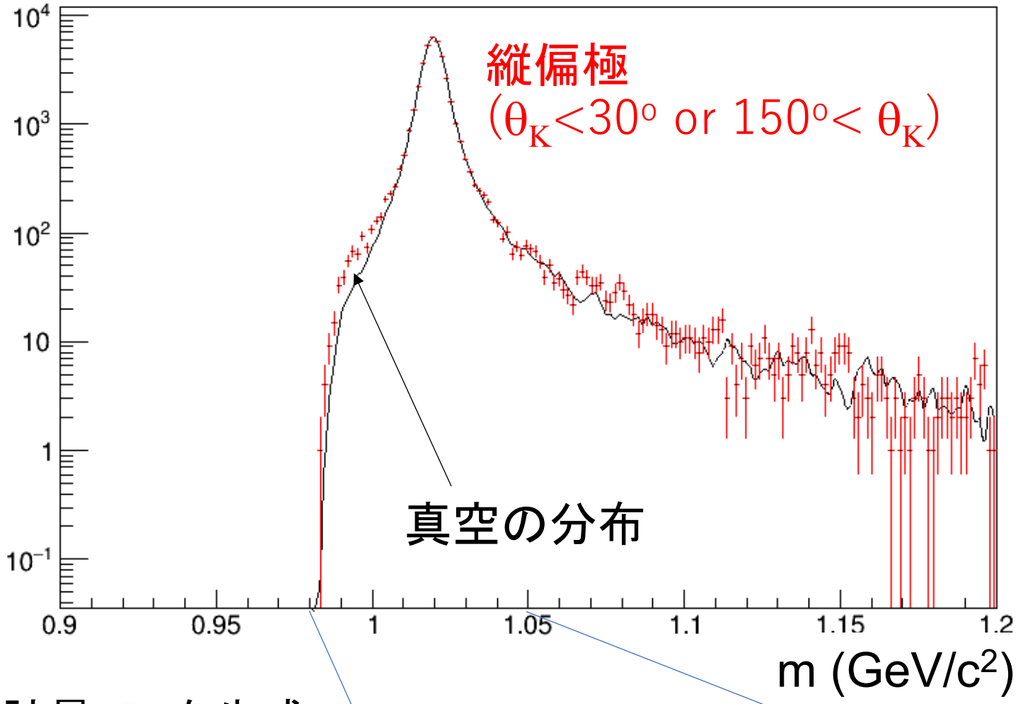
②世界初の測定
質量変化の偏極・
運動量依存性

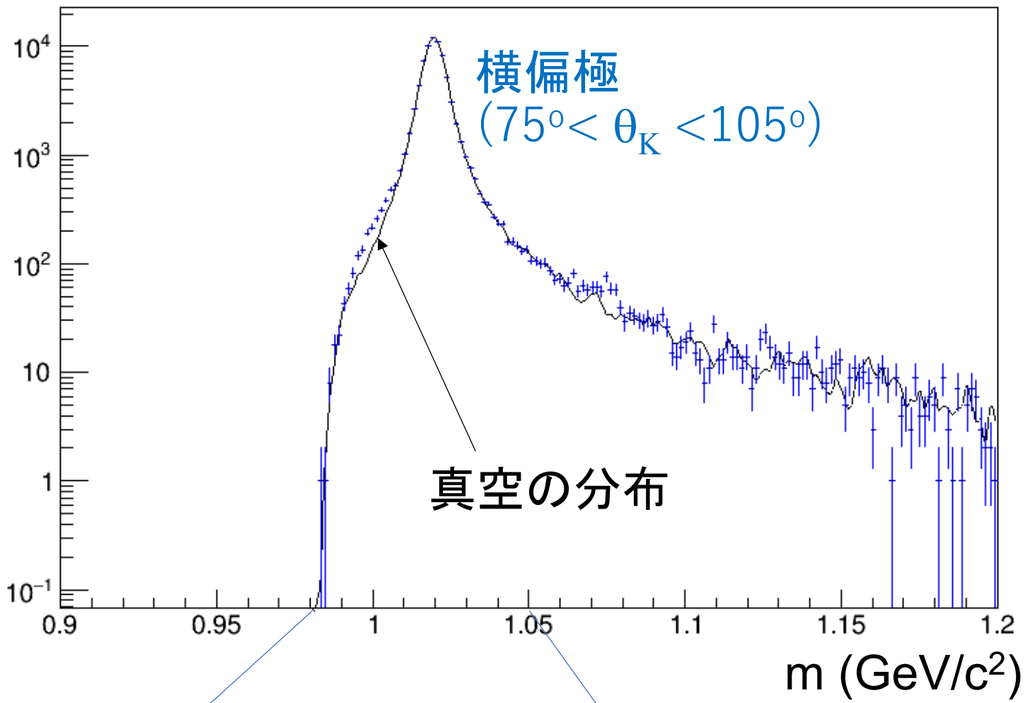
⇒高次クォーク・
グルーオン凝縮の
評価

有限密度における真空構造とハドロン質量の関係を明らかにする

Toy model (陽子・鉛衝突)

1.25<βγ<1.75

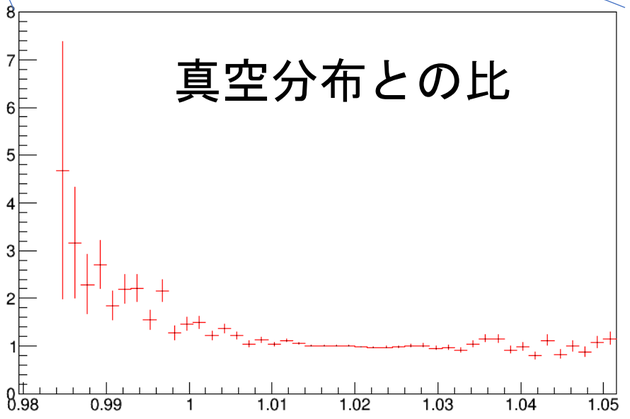


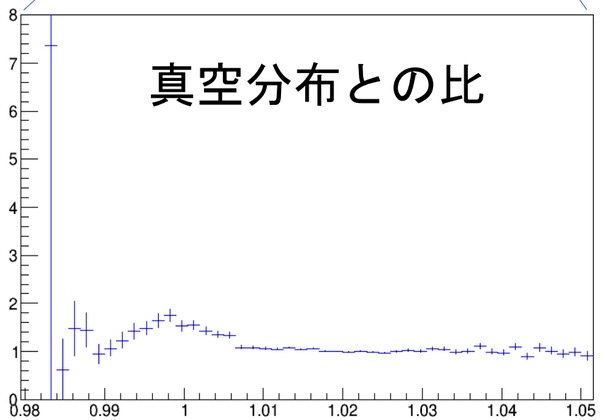


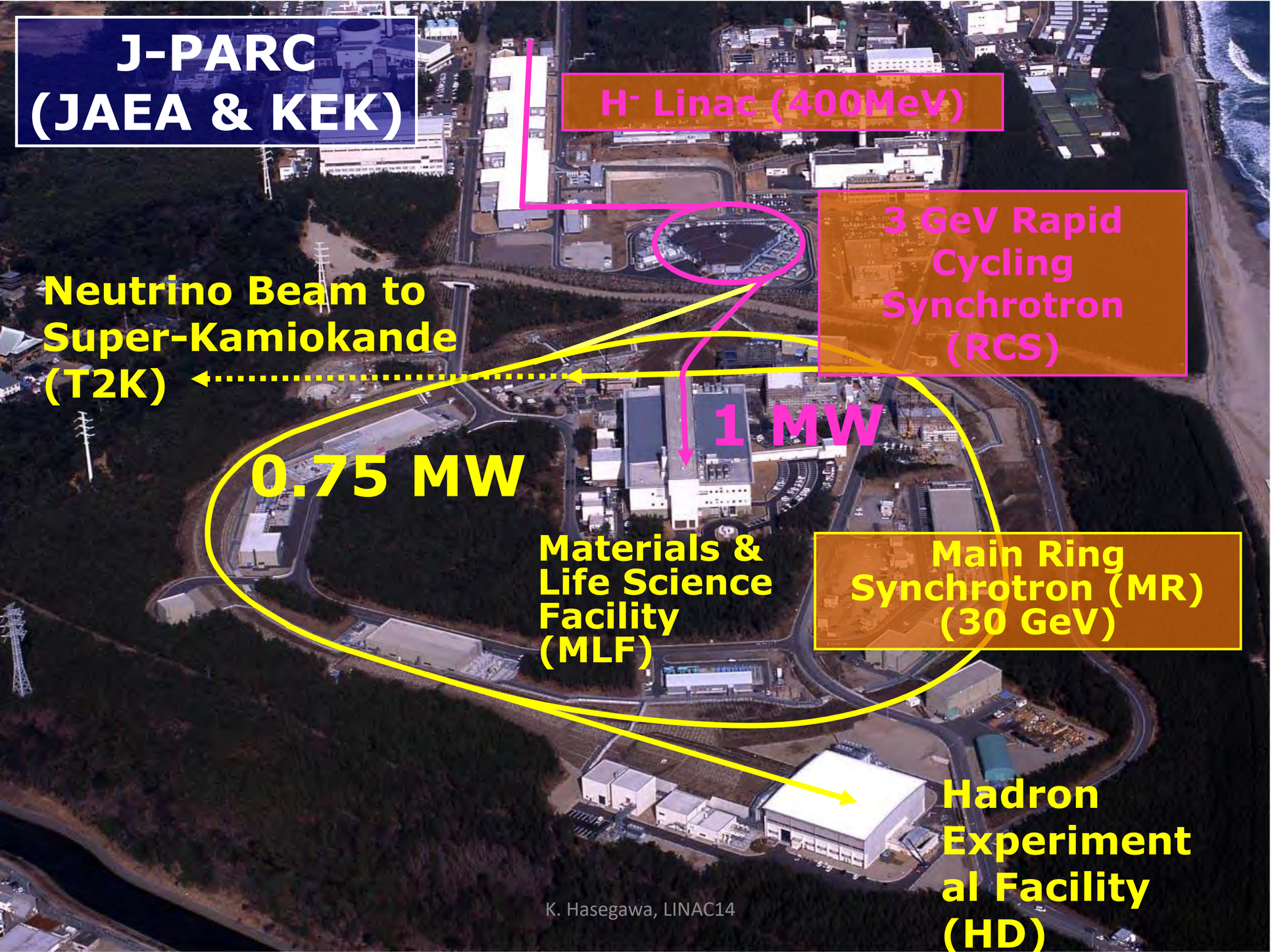
- 実験で得られる統計量でϕを生成
- QCD和則の分散関係

$$\frac{m(\rho)}{m(0)} - 1 = \left(a + b^{L/T} p^2\right) \frac{\rho}{\rho_0}$$

- PHSD模型に基づくϕの運動学分布
- 原子核のWoods-Saxon 密度分布
- 不変質量分解能：2 MeV/c^2
- KN反応は含まない

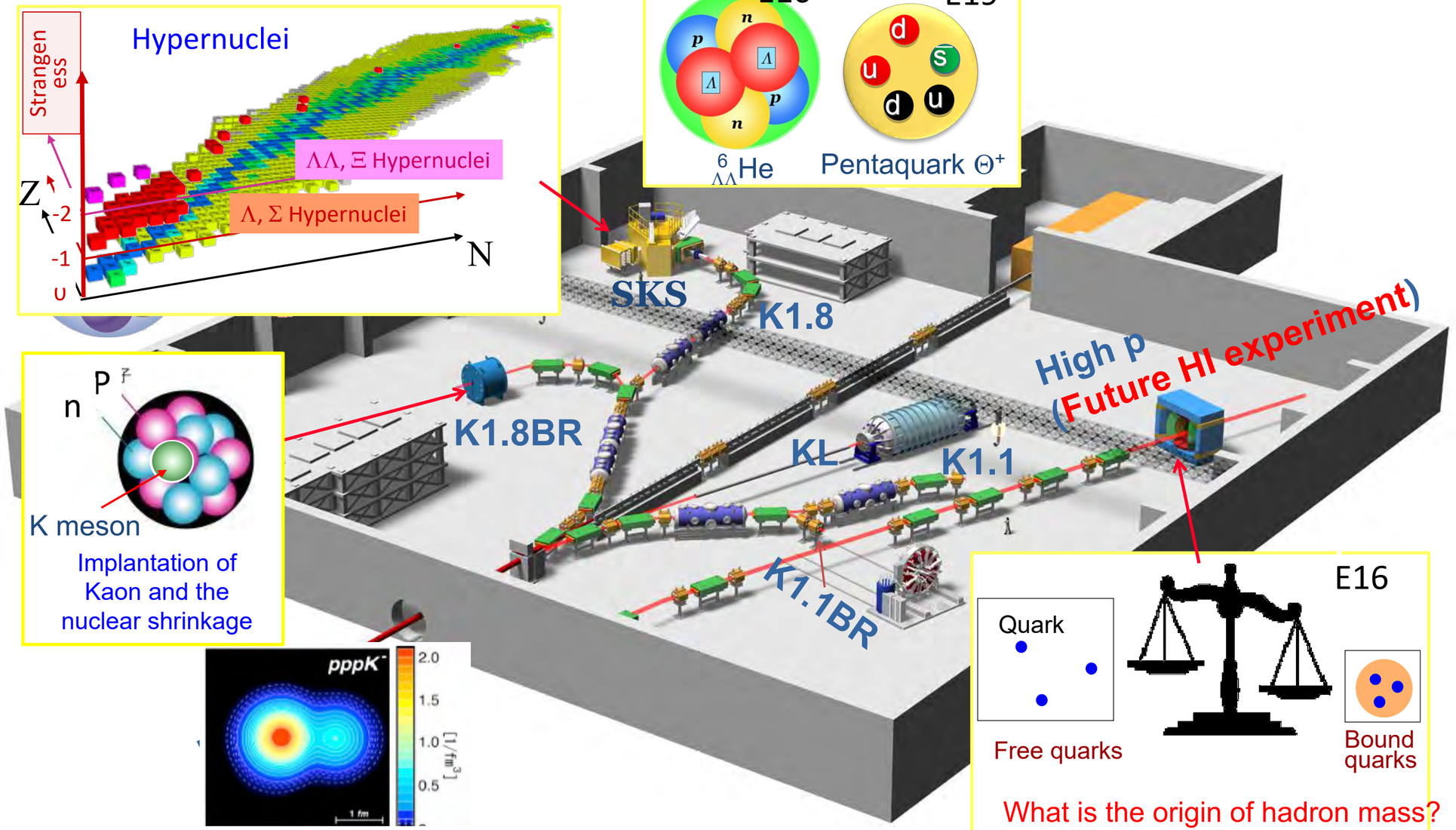






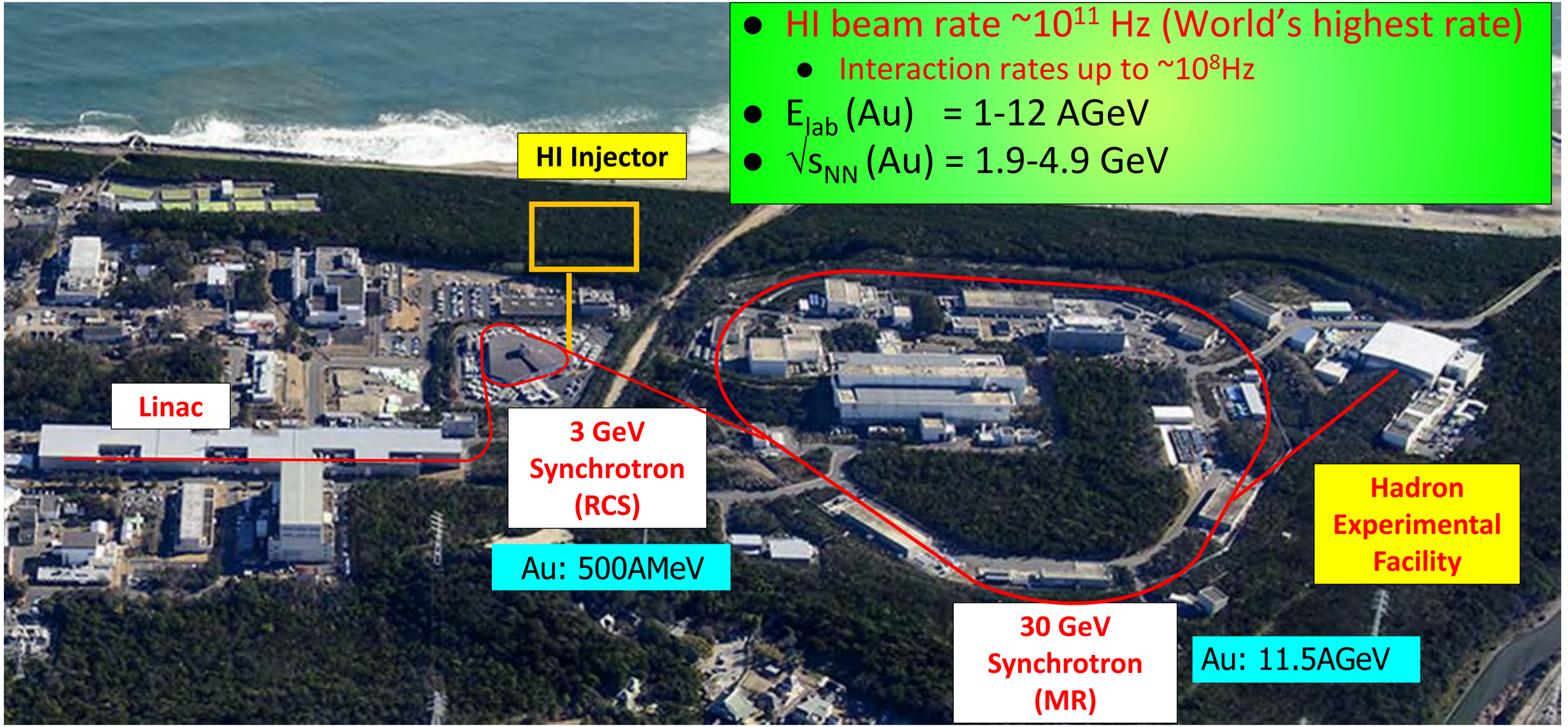
J-PARC
茨城県東海村
日本原子力研究開発
機構内

J-PARCハドロン実験施設



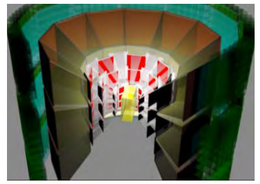
J-PARC HI WS, K. Ozawa

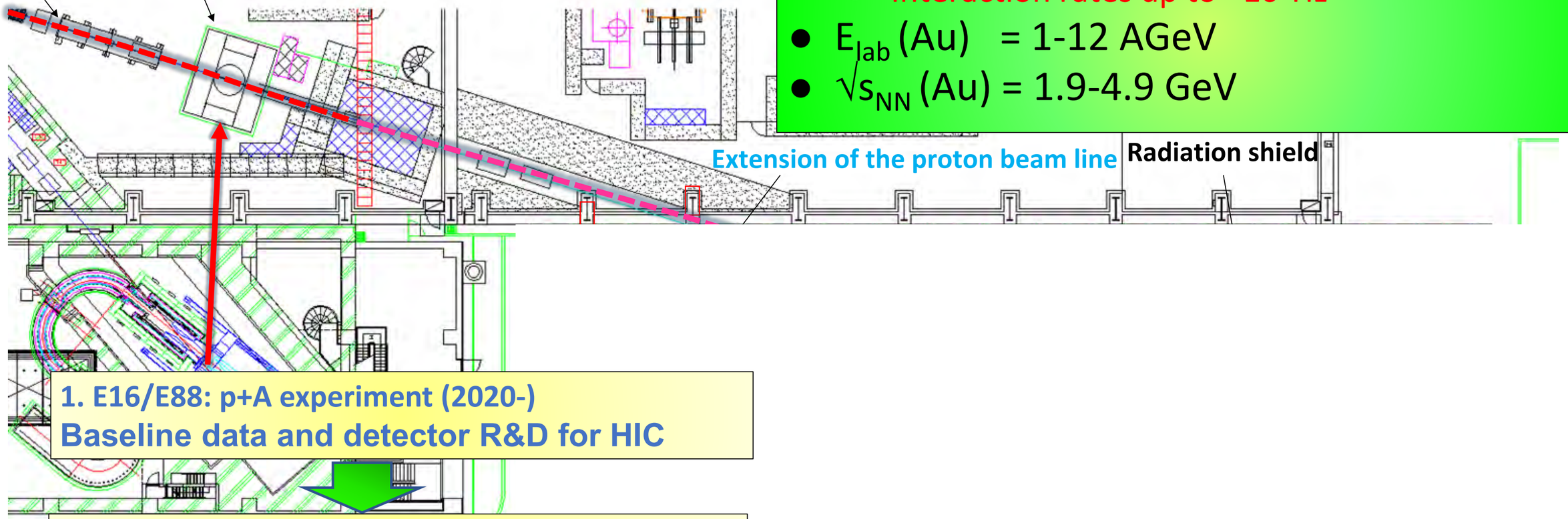
J-PARC-HIにおける重イオン加速の検討



- HI beam rate ~10^{11} Hz (World's highest rate)
  - Interaction rates up to ~10^{8}Hz
- E_{lab} (Au) = 1-12 AGeV
- $\sqrt{s_{NN}}$ (Au) = 1.9-4.9 GeV

J-PARC-HI ステージング計画 (実験)





- HI beam rate ~10^{11} Hz (World's highest rate)
  - Interaction rates up to ~10^{8}Hz
- E_{lab} (Au) = 1-12 AGeV
- $\sqrt{s_{NN}}$ (Au) = 1.9-4.9 GeV

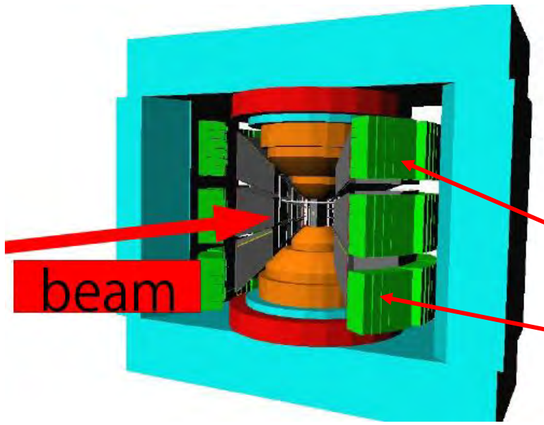
1. E16/E88: p+A experiment (2020-)
Baseline data and detector R&D for HIC

2. J-PARC-HI Phase-1
Upgraded E16
Low-rate HIC (up to ~10^{8} Hz HI beams)

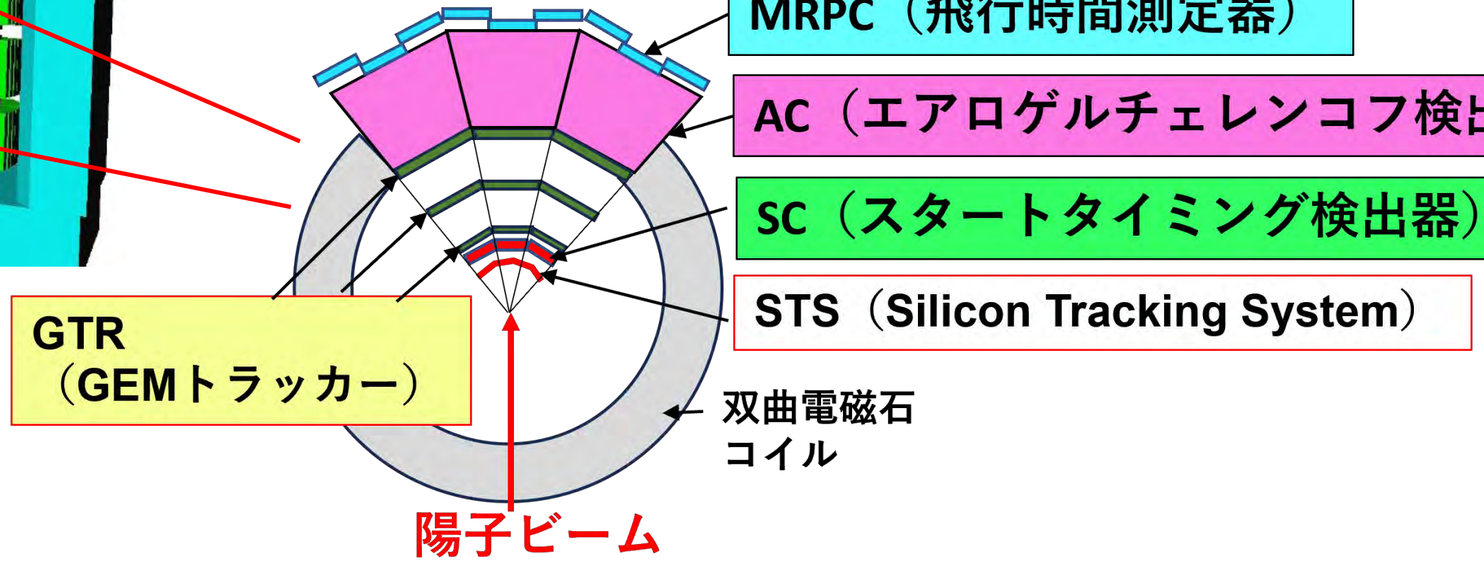
3. J-PARC-HI Phase-2
Large acceptance high-rate spectrometer
(up to ~10^{11} Hz HI beams)

E88実験

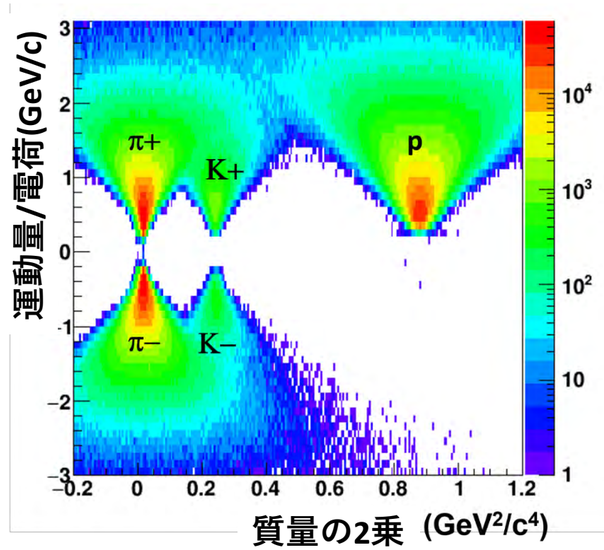
E16検出器群
（電子対測定）



上・下段（K中間子対測定）



K中間子識別性能（シミュレーション）



本課題における検出器製作

- K中間子識別検出器（MRPC, SC, AC）6モジュール製作
- 飛跡検出器（GTR）：2モジュール製作
- 1か月のビームタイムにおいて108万事象を収集
  陽子・炭素(A=12), 陽子・銅(A=63), 陽子・鉛(A=82)

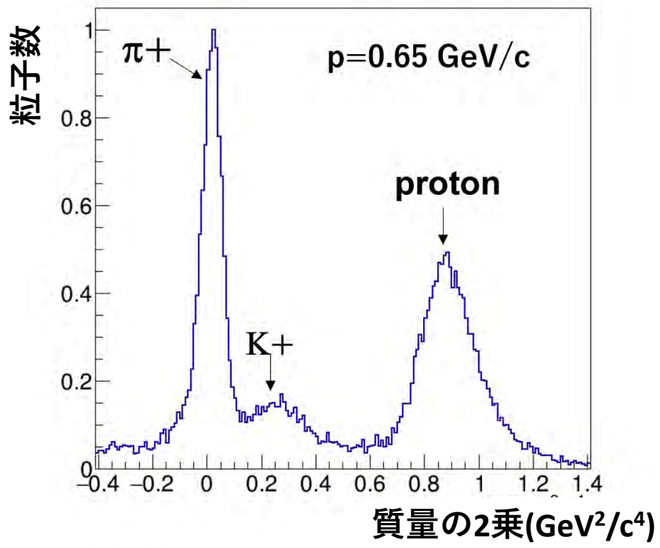
準備状況

- J-PARC実験審査

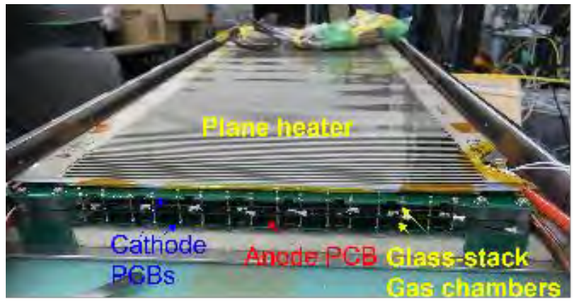
  Stage-1（物理重要性）採択済(2021年)
- K中間子識別検出器の開発完了

  ⇒2025年度より量産予定
- E16検出器群におけるK中間子識別試験（2024年4-6月）

  ⇒K中間子の識別に成功



飛行時間測定器（MRPC）



ガラス昇温による耐高レート化
時間分解能70ps達成

スタートタイミング検出器（SC）

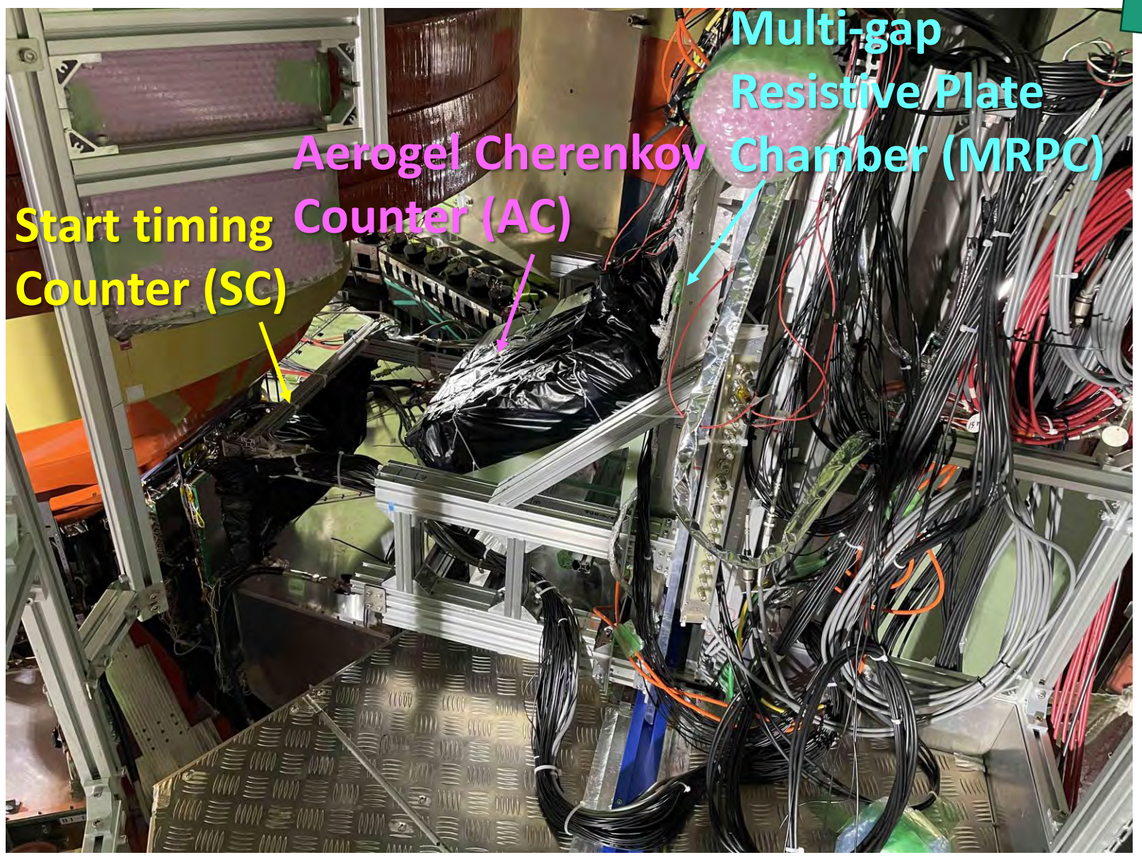
時間分解能55ps達成

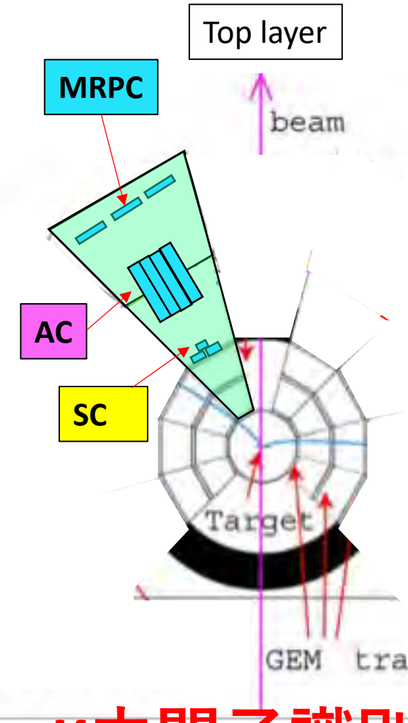
エアロゲルチェレンコフ検出器（AC）

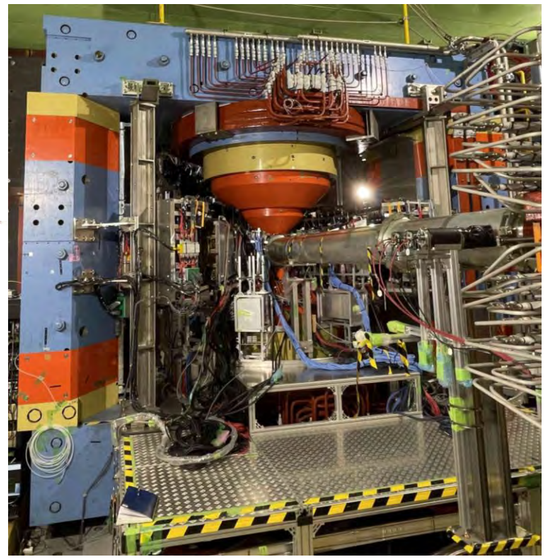
屈折率1.15のエアロゲル放射体
（φ中間子運動量<2GeV/cを選択）
90%以上の検出効率達成

E16におけるK中間子識別検出器の試験（2024年4-6月）

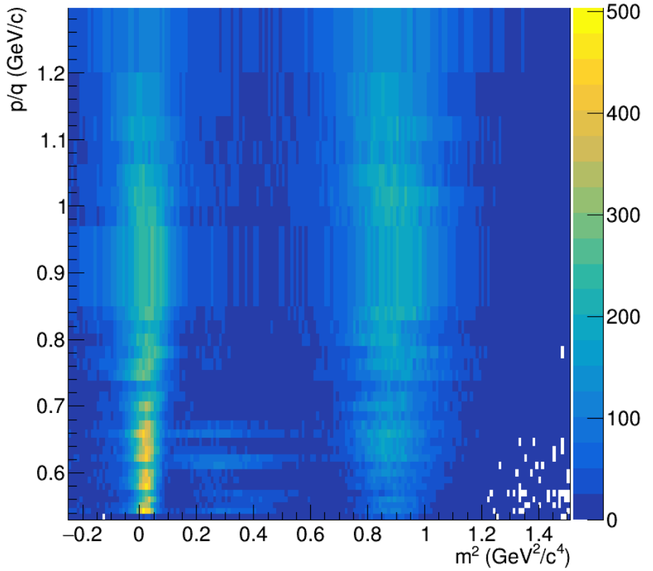
- 3台のMRPC, 4台のAC, 3台のSCをE16検出器群に設置して試験を行った。

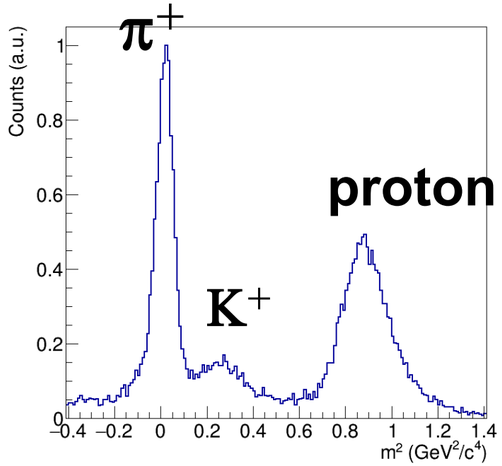




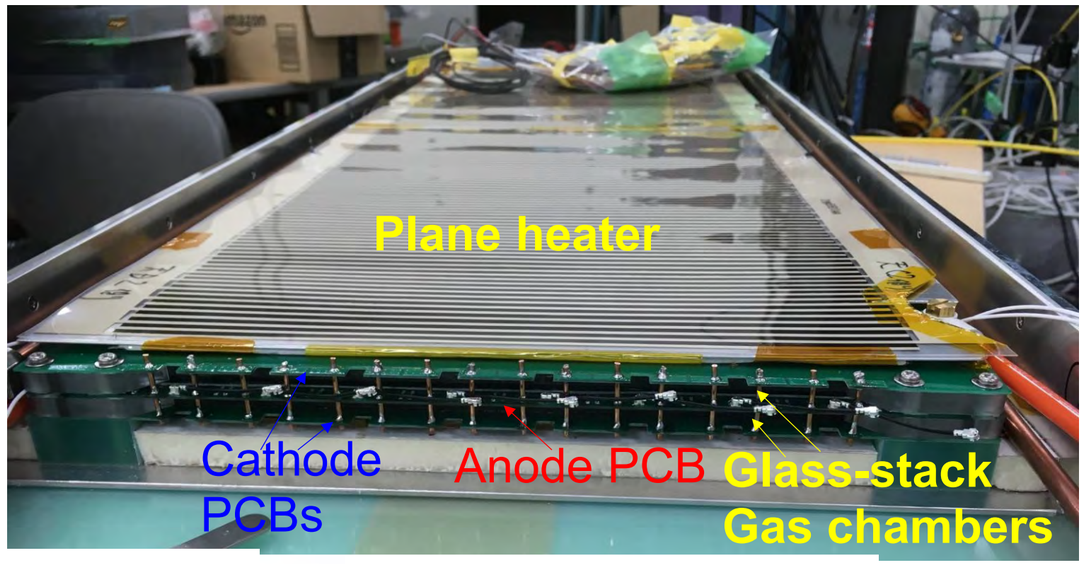


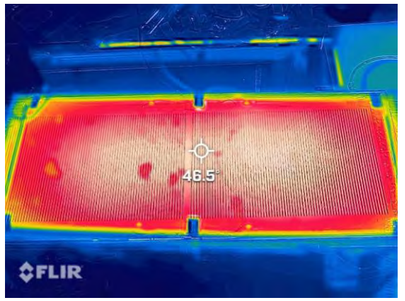
K中間子識別に成功



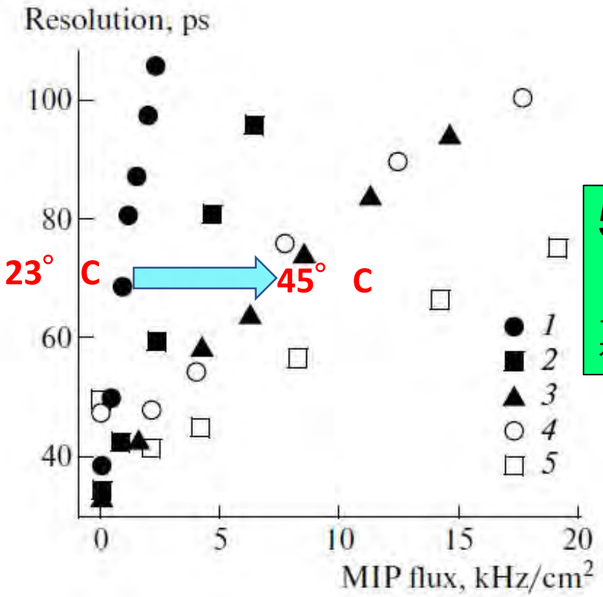


MRPC



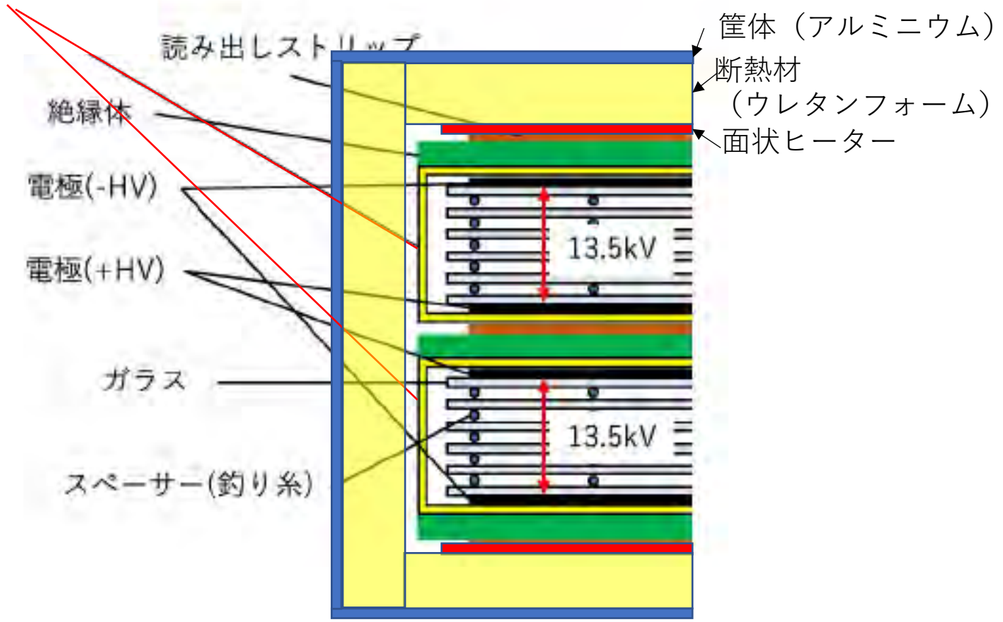


V.A. Gapienko et al
Inst. Exp. Tech. 56
265-270 (2013)



5倍の耐高レート化が期待される

ガスチェンバー（ガラスエポキシ）

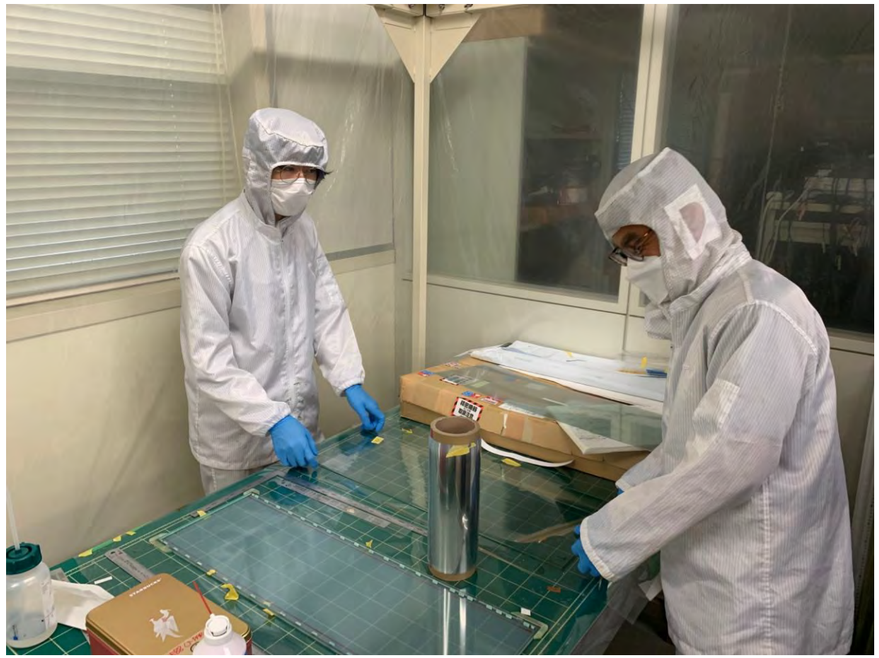


耐高レート化

- ガラス板の昇温→抵抗率低下

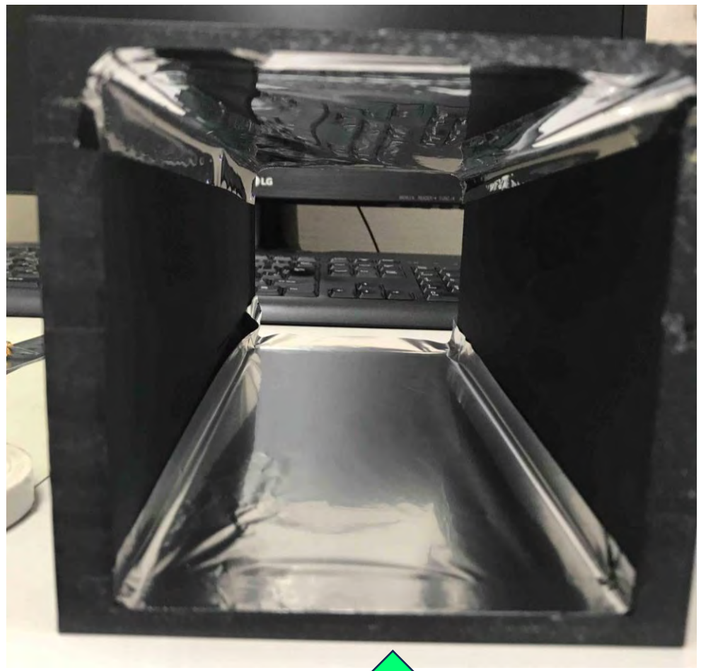
→粒子通過時の電子雪崩からの回復速度向上

MRPC製作の様子（筑波大）

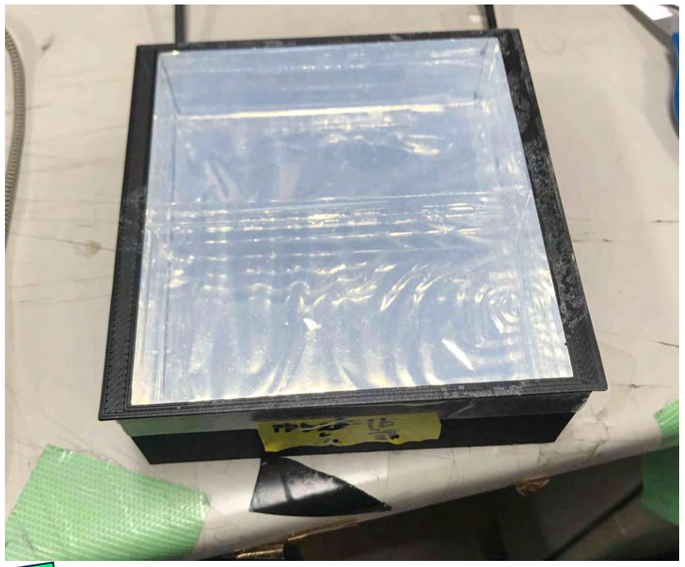


Aerogel Cherenkov Counter (AC)

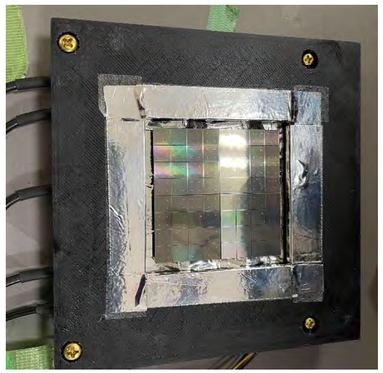
Light collection cone



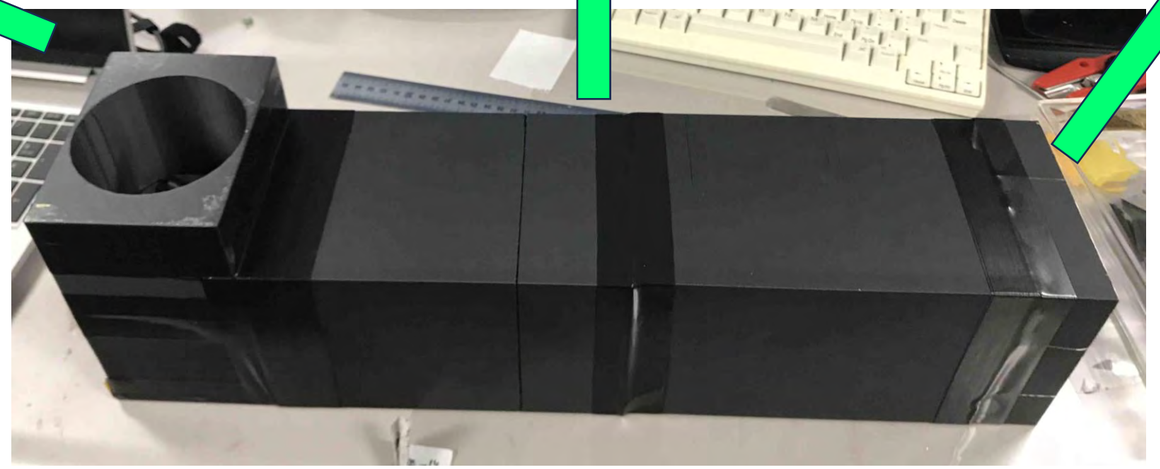
Aerogel n=1.15
t=30mm



SiPM (MPPC)



Fine-mesh PMT

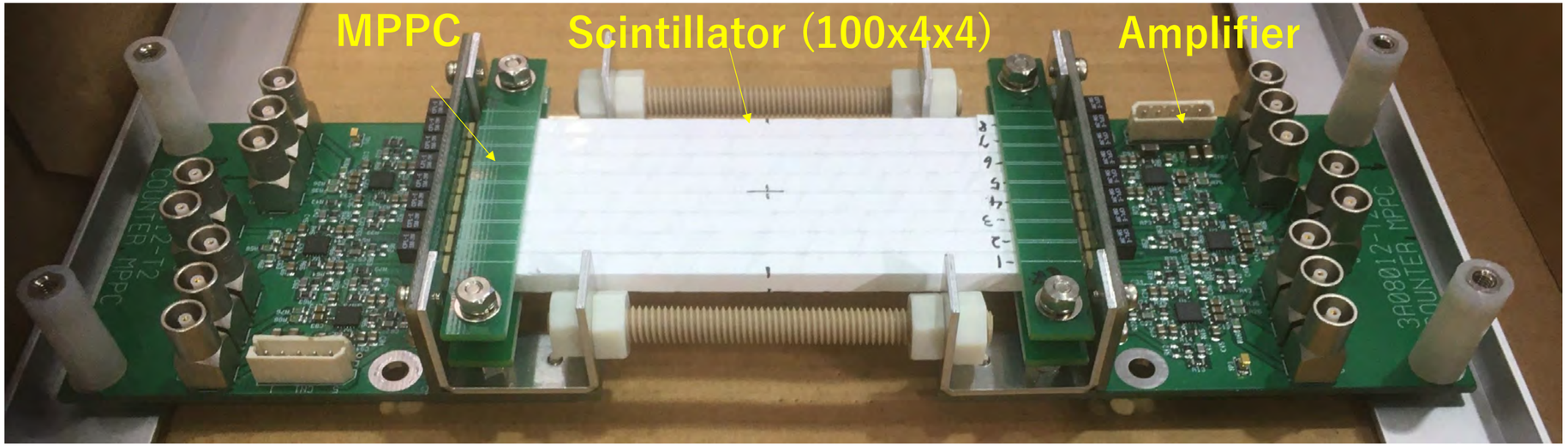


宇宙線による試験
Efficiency ~90%

Start-timing Timing Counter (SC)

- シンチレーターアレイ
  - Slat： 4mmx4mmx100mm (EJ-228)
  - SiPMs による両端での光子検出 (MPPC S13360-3050, 3mmx3mm)
- ^{90}Sr ベータ線源による試験
  - 時間分解能：55 ± 4 ps
- 実験で予想されるヒットレート

~ 100 kHz/slat



筑波大における宇宙線試験のセットアップ

まとめ

ϕ中間子のK中間子対崩壊を未踏の高統計で測定

⇒世界最高精度の質量変化の運動量・偏極依存性を測定

⇒sクォーク凝縮を決定、高次クォーク、グルーオン凝縮を評価

有限密度での真空構造とϕ中間子質量の関係を明らかにする

ハドロンの質量獲得機構の解明を目指す
2026年度 実験開始予定