5.J-PARCでの
ハドロン実験I

5.J-PARCでのハドロン実験I:内容

- 原子核中でのカイラル対称性回復検証実験
  - 質量の起源
  - KEK-PS E325実験
  - J-PARC E16実験
  - その他ベクター中間子を用いる実験

物質の質量

●物質の構成要素:

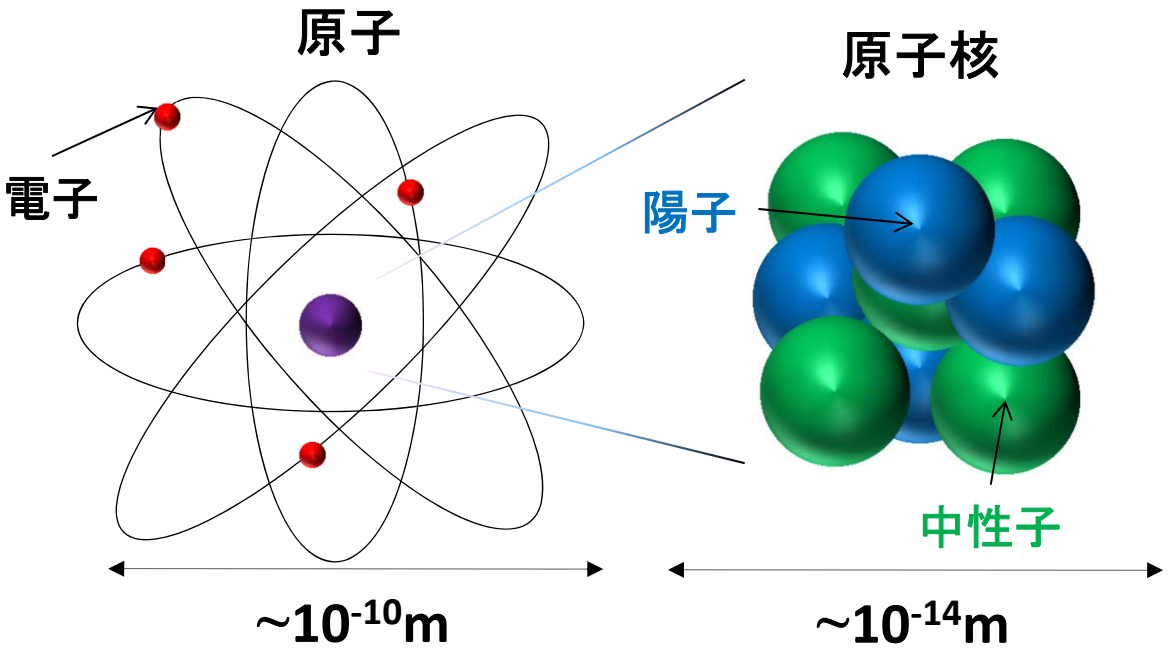
分子 → 原子 → 原子核+電子

→ 核子[陽子/中性子]

●**物質の質量の99.9%以上は、原子核の質量**

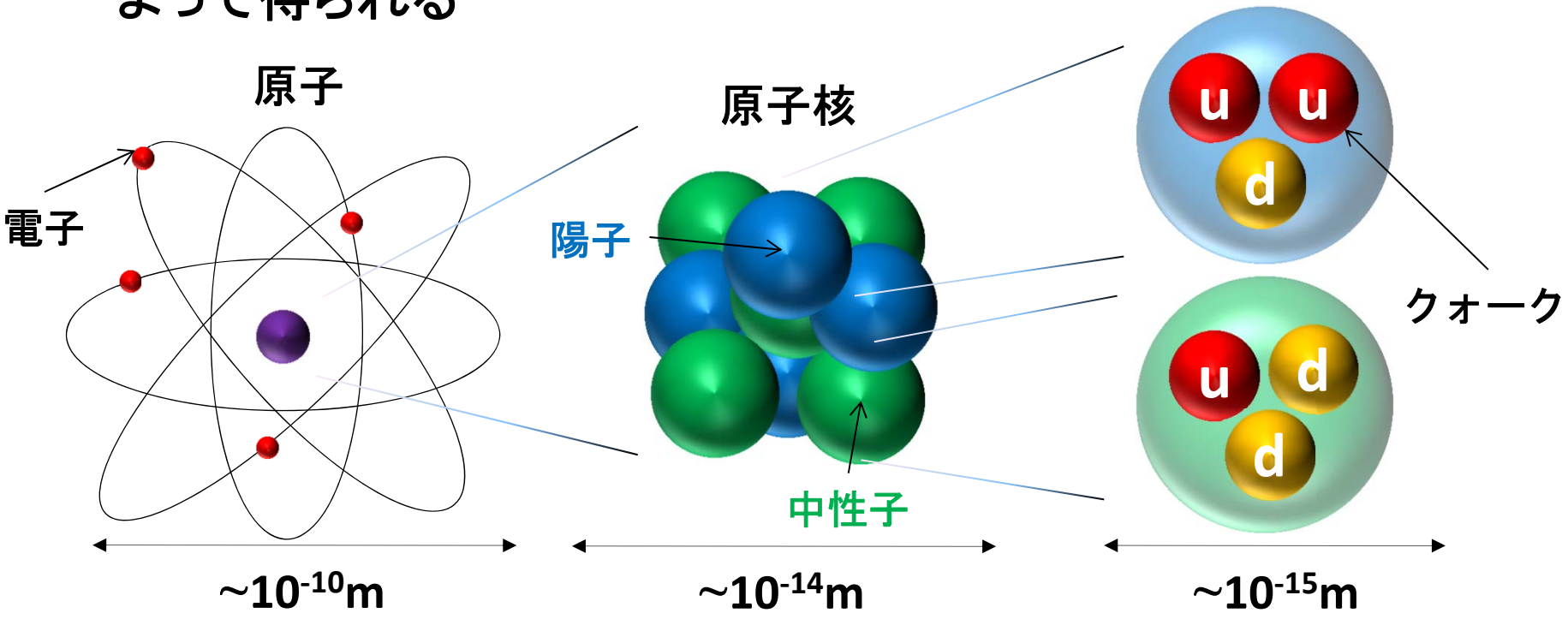
電子 : ~0.5MeV (~9.1×10^{-31}kg)

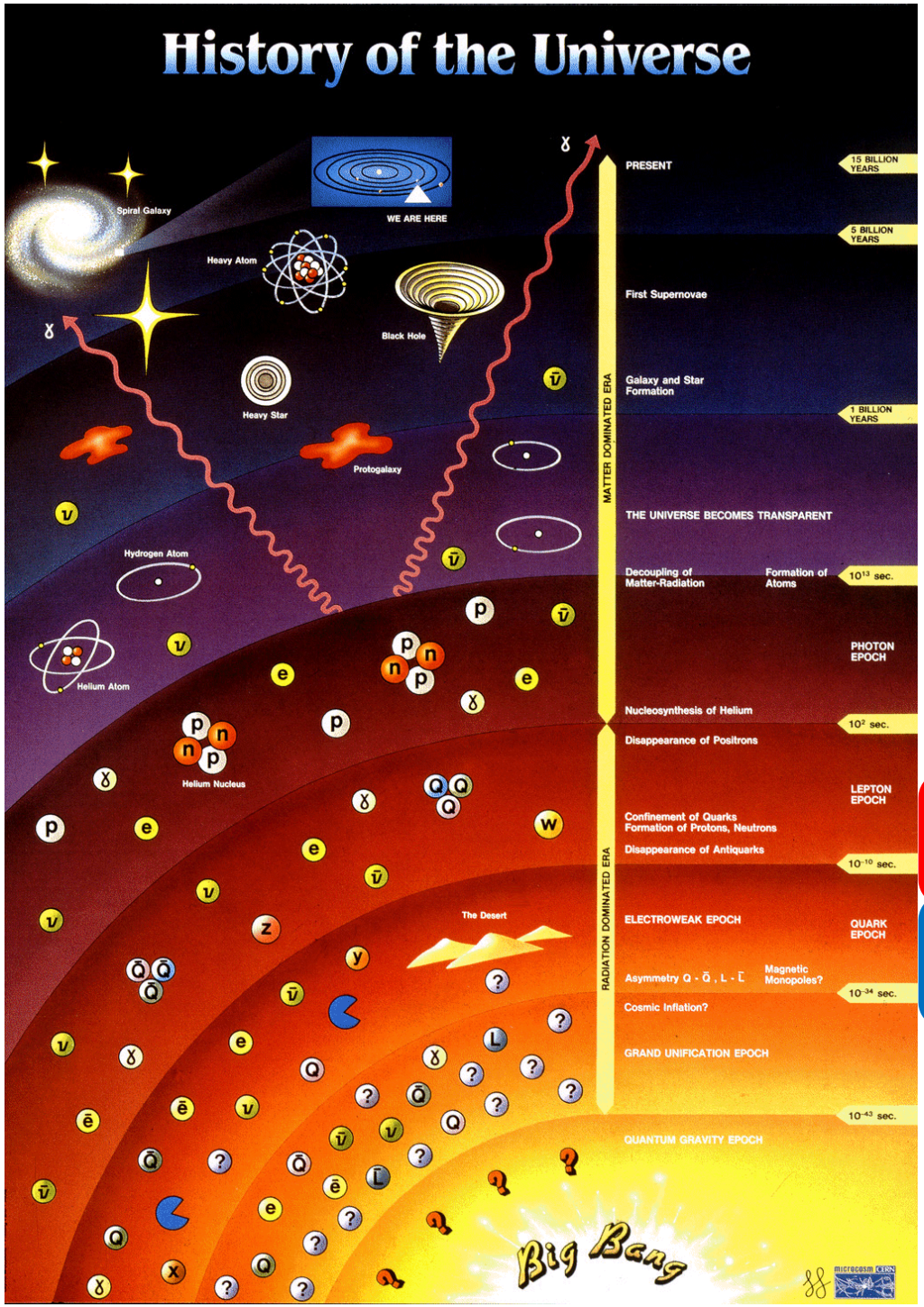
核子[陽子/中性子]: ~940MeV (~1.7×10^{-27}kg)



●核子は3つのクォークから構成される
●クォークは核子の1/3の質量を持つ?

●クォークの”裸”の質量は~3MeVしかない!(ヒッグス機構による)
●残り~98%は強い相互作用(カイラル対称性の自発的破れ)によって得られる



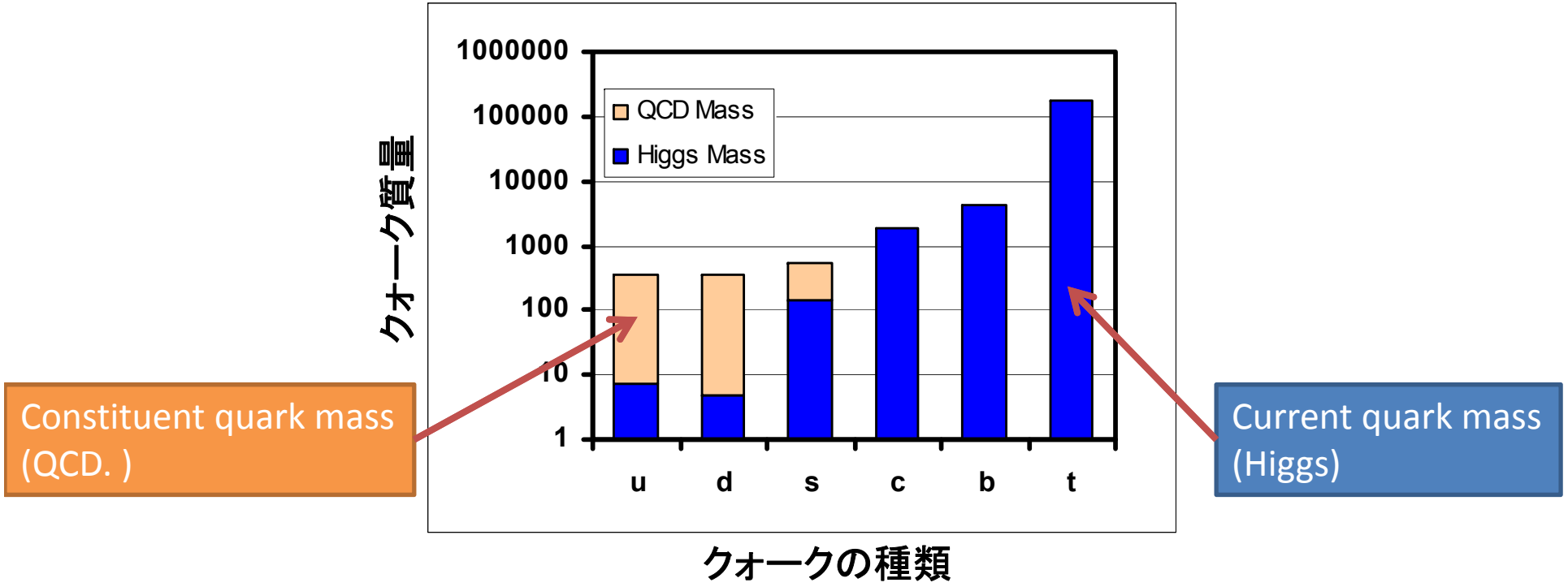


宇宙の歴史

- 現在 (137億年)
- 重い原子の生成
- 軽い原子の生成
- 軽い原子核(He等)の生成
- ハドロンが生成され、質量を獲得 (カイラル対称性=強い相互作用の破れ)
- クォークやレプトンが質量を獲得 (ヒッグス機構=電弱相互作用の破れ)
- 質量0のクォークやレプトンの誕生
- ビッグバン：4つの力は統一していた

質量の起源

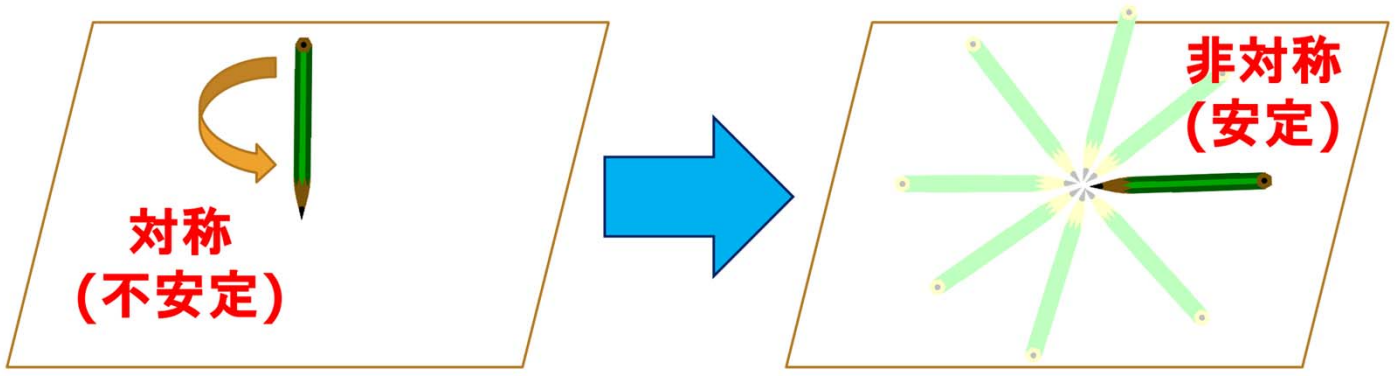
- 質量の起源は2種類ある
  - クォーク･レプトンの質量
    - 電弱相互作用の破れ:ヒッグス機構
  - ハドロンの質量 (有効質量、QCD質量)
    - 強い相互作用の破れ:カイラル対称性の破れ



自発的対称性の破れ

- 質量獲得(ヒッグス機構・カイラル対称性破れ)
  = 自発的対称性の破れ
- 1961年、南部陽一郎のアイデア
  – PhysRev.122.345(1961)、PhysRev.124.246(1961)

自発的対称性の破れは現実の身の回りにあふれている



鉛筆の周り360度が同等
→対称性が保たれている

ある方向に倒れてしまう
→対称性が破れた

カイラル対称性とは

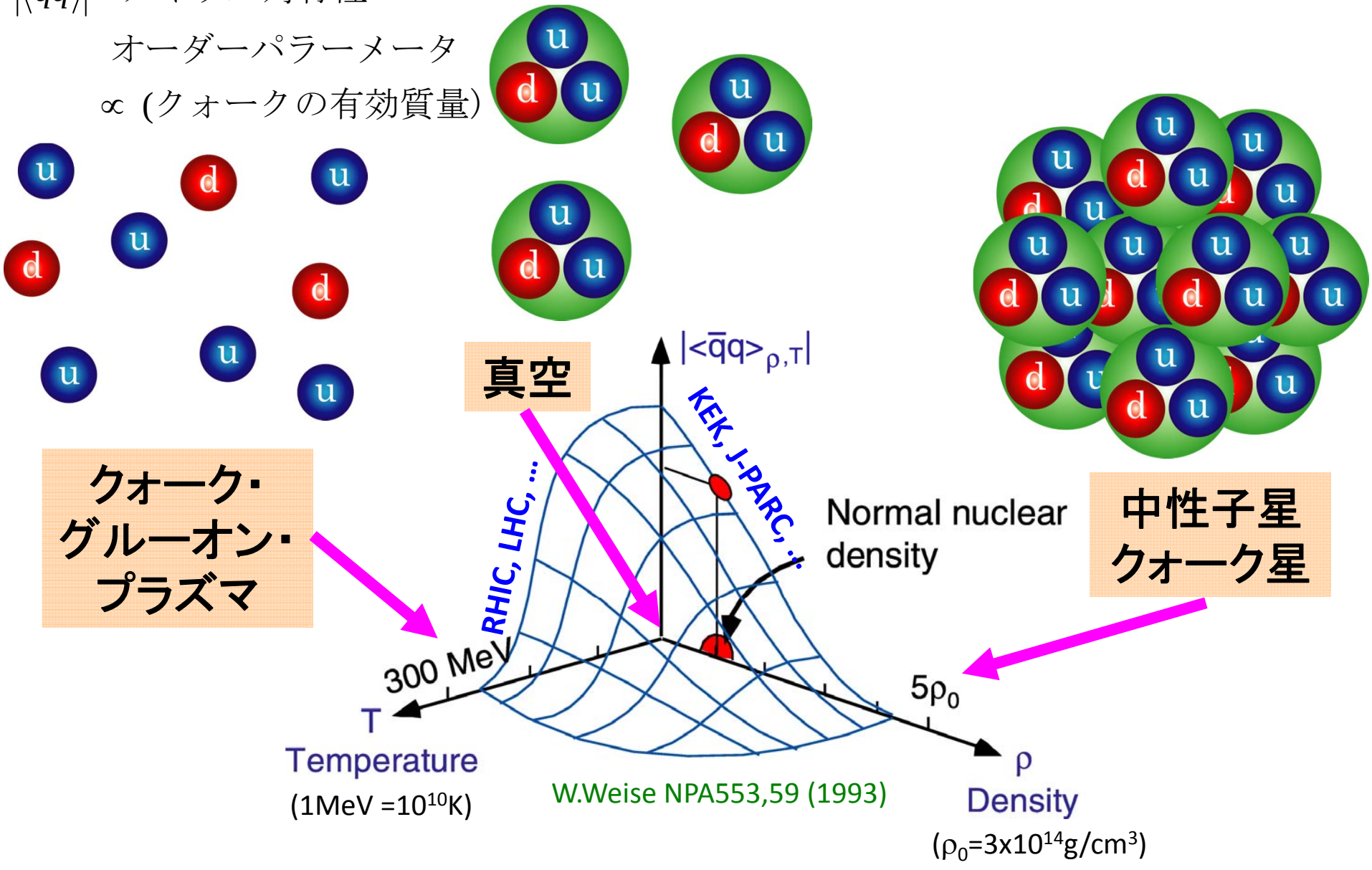
- カイラル対称性 = 量子色力学 (QCD) において、クォークの右巻きスピン成分と左巻きスピン成分で独立に変換する対称性
  - 質量0の粒子
    - 光速で飛ぶ = 右巻き・左巻きは固定
      → 対称性が成り立つ

- 右巻き・左巻き粒子間に相互作用が働くと、粒子が自由に飛ぶことが出来なくなる(光速でなくなる)
  → **カイラル対称性の自発的破れ**
  - 粒子は質量を持つようになる
  - 粒子は真空(クォーク・反クォーク対の海)を自由に飛び回れない
    → **クォーク凝縮**

- 有限な質量を持つ粒子
  - 速度も有限 = 右向き・左巻きは見る系によって変わる
    → 対称性は破れている

QCD質量は周りの環境によって変化する!

$|\langle\bar{q}q\rangle|$ =カイラル対称性の
オーダーパラーメータ
∝ (クォークの有効質量)



質量変化を見るプローブとしては、ベクター中間子が良い

mass

$2xM_{quark}$+(small interaction term)

クォークの有効質量の変化をとらえやすい

$u\bar{u}$,$d\bar{d}$

$\rho(770)$

$I^G(J^{PC})=1^+(1^{--})$
m=775.5MV
Γ=149.4MeV

$\pi\pi$: ~100%
e^+e^- : 4.70×10^{-5}

$\omega(782)$

$I^G(J^{PC})=0^-(1^{--})$
m=782.65MV
Γ=8.49MeV

$\pi^+\pi^-\pi^0$: 89.1%
$\pi^0\gamma$: 8.90%
e^+e^- : 7.18×10^{-5}

from PDG

$s\bar{s}$

$\phi(1020)$

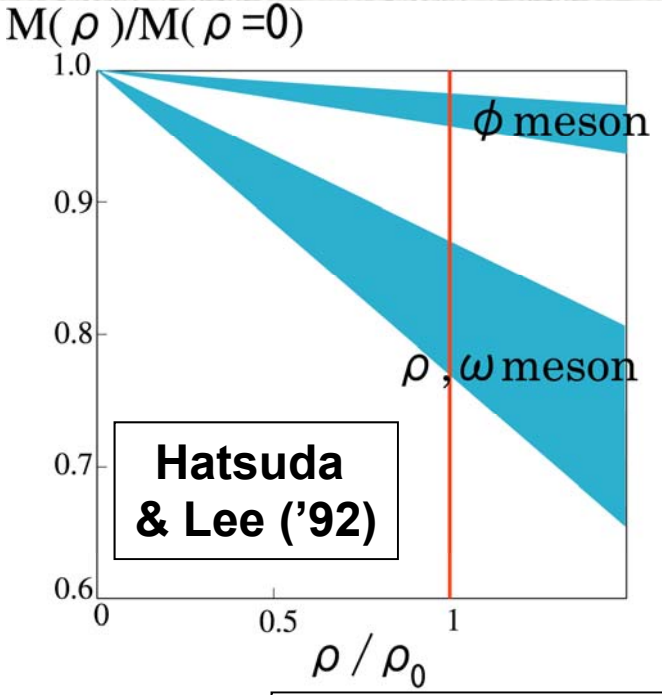
$I^G(J^{PC})=0^-(1^{--})$
m=1019.460MV
Γ=4.26MeV

K^+K^- : 49.2%
$K^0_LK^0_S$: 34.0%
$\rho\pi+\pi^+\pi^-\pi^0$: 15.3%
e^+e^- : 2.97×10^{-4}

Vector Meson Modification

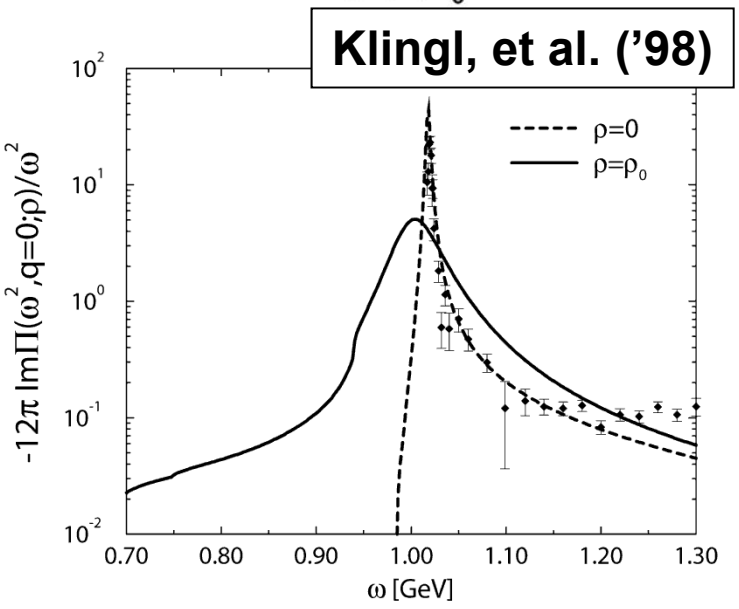
dropping mass

- Brown & Rho ('91)
  - $m^*/m=0.8$ ($\rho=\rho_0$)
- Hatsuda & Lee ('92)
  - $m^*/m=1-0.16\rho/\rho_0$ for ρ/ω
  - $m^*/m=1-0.03\rho/\rho_0$ for ϕ
- Muroya, Nakamura & Nonaka ('03)
  - Lattice Calc.



width broadening

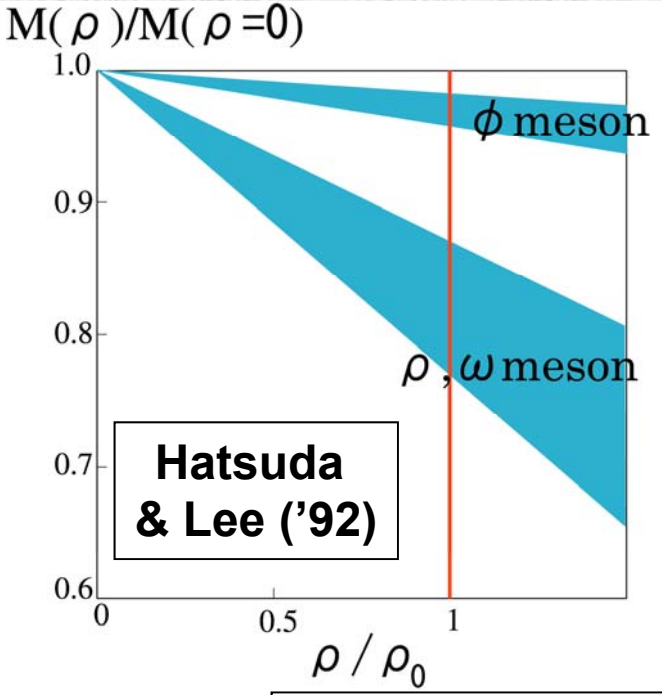
- Klingl, Kaiser & Weise ('97&98)
  - 1GeV> for ρ, 45MeV for ϕ ($\rho=\rho_0$)
- Oset & Ramos ('01)
  - 22MeV for ϕ ($\rho=\rho_0$)
- Cabrera & Vicente ('03)
  - 33MeV for ϕ ($\rho=\rho_0$)



Vector Meson Modification

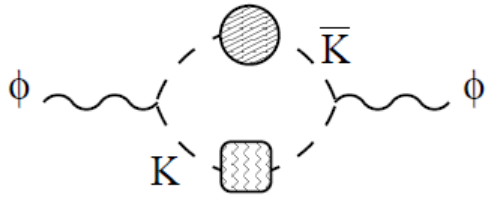
dropping mass

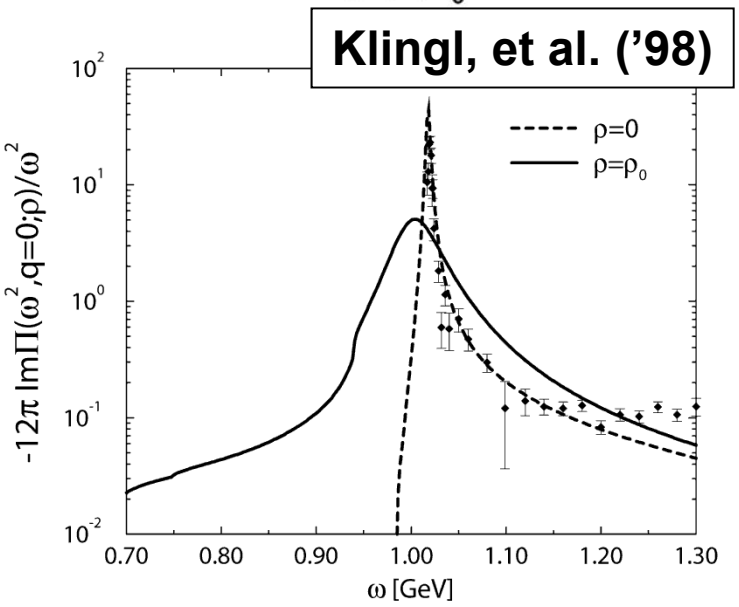
カイラル対称性破れの
回復に伴う質量の減少



width broadening

周りの粒子との相互
作用による幅の変化





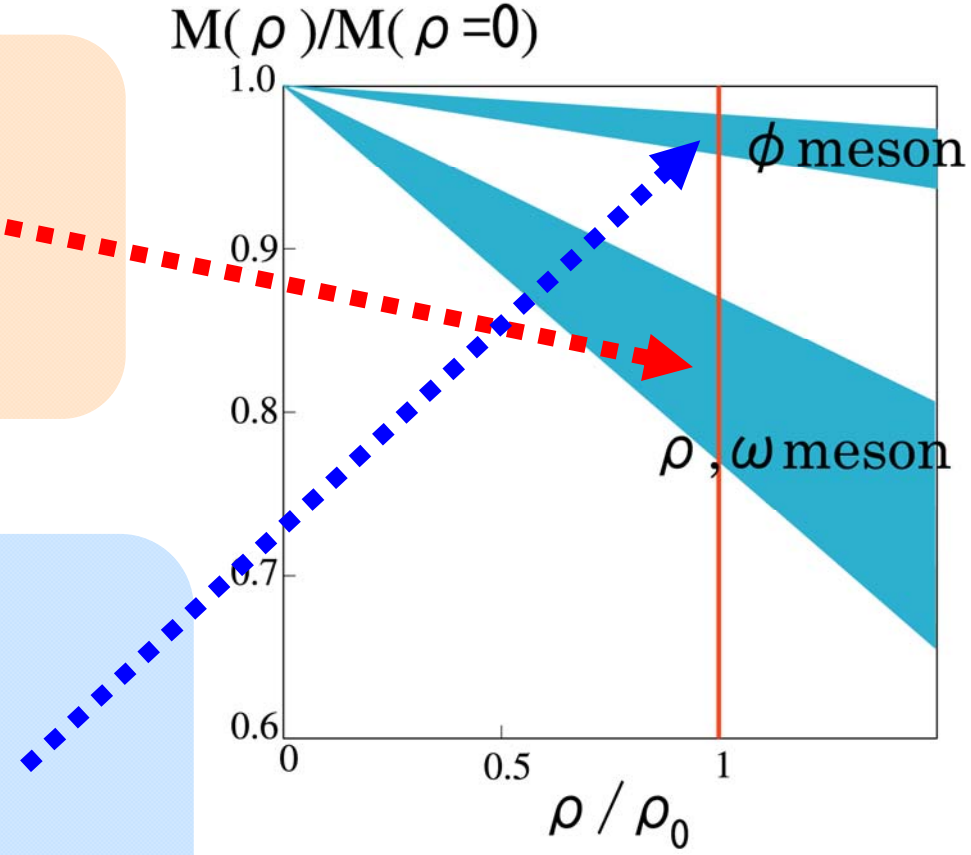
Vector Meson, ρ/ω/ϕ

ρ/ω meson

- 予想される質量の減少
  16% → 130MeV/c^2
- 大きな生成cross-section
- しかし、ρ とωを分けるのは難しい

ϕ meson

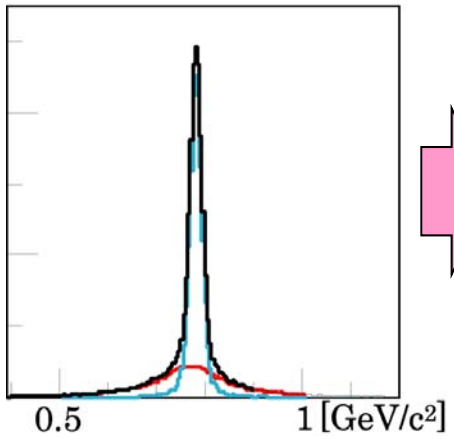
- 予想される質量の減少
  1~4% → 10-40MeV/c^2
- 小さな生成cross-section
- 狭い崩壊幅 (Γ=4.3MeV/c^2),
  ⇒質量スペクトラムの変化に敏感



T.Hatsuda, S.H.Lee,
Phys. Rev. ***C46****(1992)R34.*

ρ, ω Expected Shape

In vacuum



ρ-meson

ω-meson

nuclear density: Woods-Saxon

mass shape: Breit-Wigner

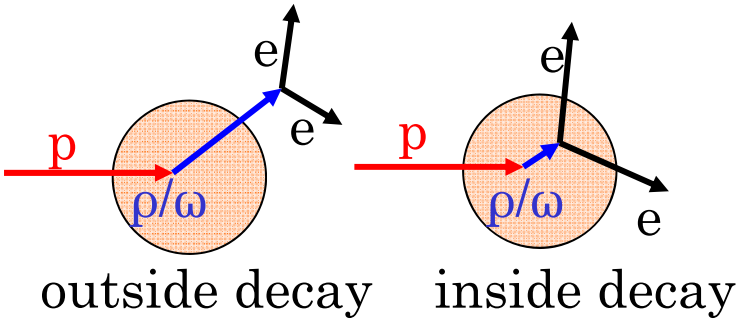
+ mass modification.

($m^*/m=1-0.16\rho/\rho_0$)

generate : 原子核前半球

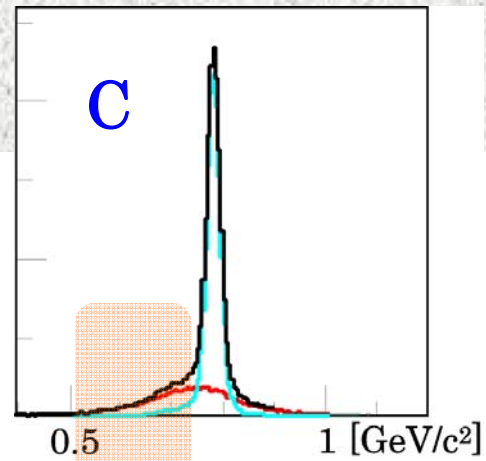
I. JAMより得たmomentumで飛ばし、寿命に従ってe^+e^-にdecayさせる

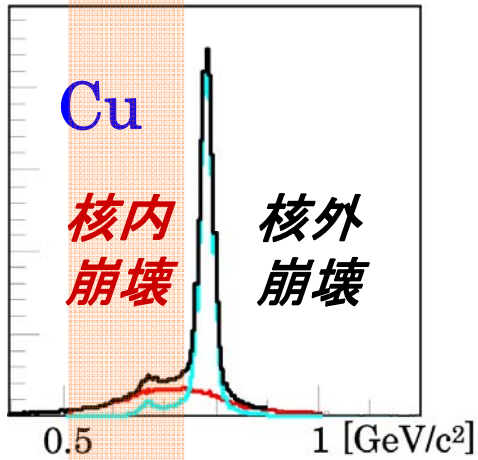
II. decay pointの密度によりmassを求める

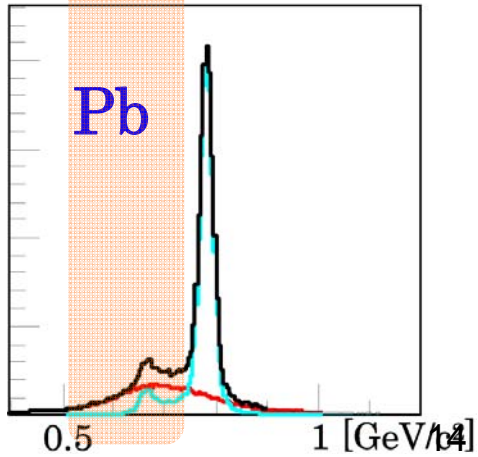


outside decay　inside decay

***detector effectは含まない**







φ Expected Shape

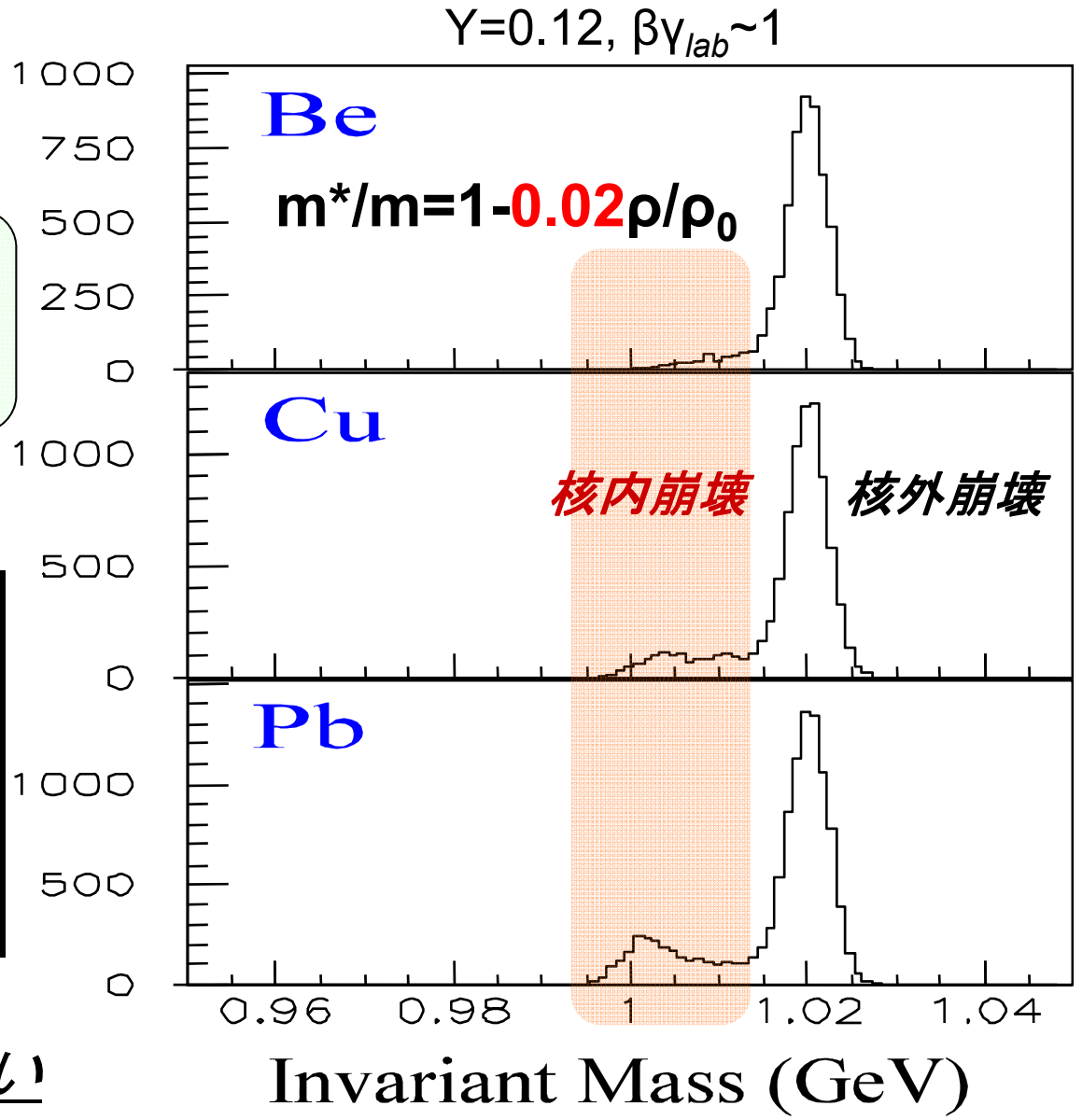
考え方はρ/ωと同様

$m^*/m=1-0.15Y\rho/\rho_0$

$$Y \equiv 2\langle \bar{s}s \rangle_N / \left(\langle \bar{u}u \rangle_N + \langle \bar{d}d \rangle_N \right)$$

particle	Γ(MeV)	c_τ(fm)
ρ	149	1.32
ω	8.44	23.4
φ	4.26	46.3

ρ/ωに比べ、
核内で崩壊する確率は低い



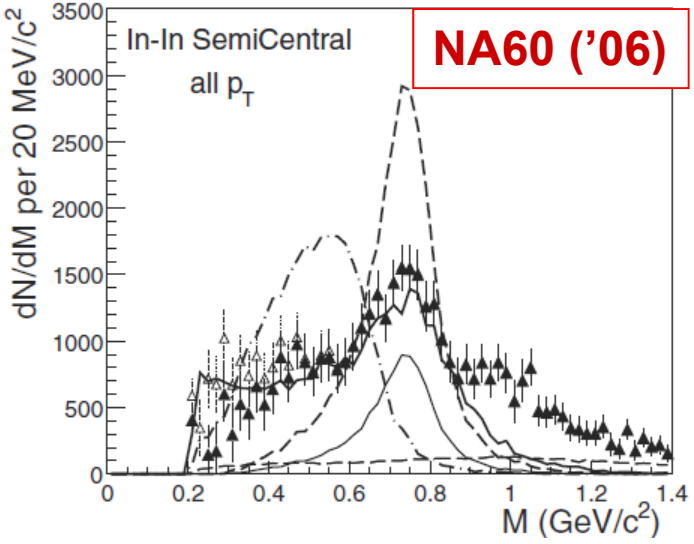
Vector Meson Measurements

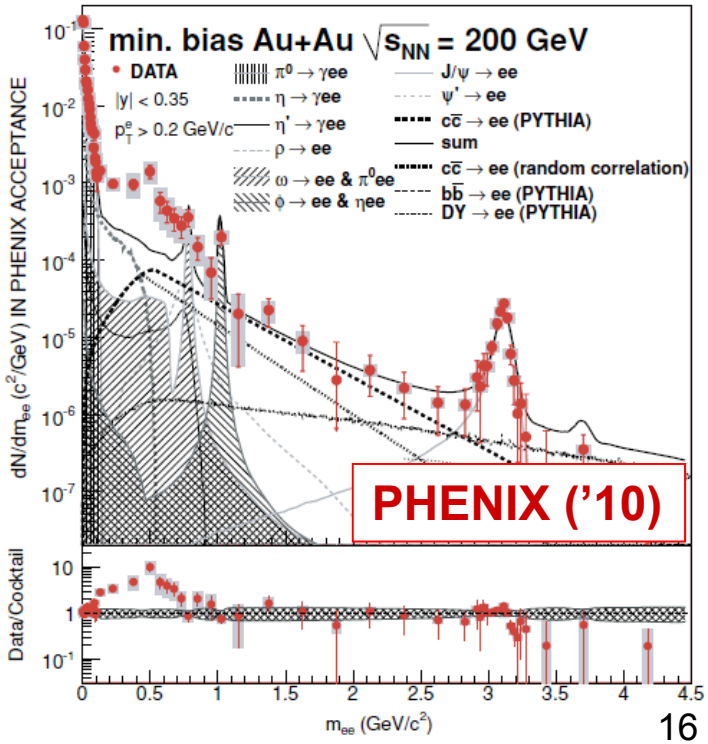
in Hot matter

- **CERES(NA45)@CERN-SPS ('93)**
  - e^+e^-
  - anomaly at lower region of ρ in A+A, not in p+A

- **NA60@CERN-SPS ('06)**
  - $\rho \rightarrow \mu^+\mu^-$
  - width broadening, no mass shift in In+In

- **PHENIX@BNL-AGS ('10)**
  - e^+e^-
  - anomaly at lower region of ρ in A+A, not in p+p

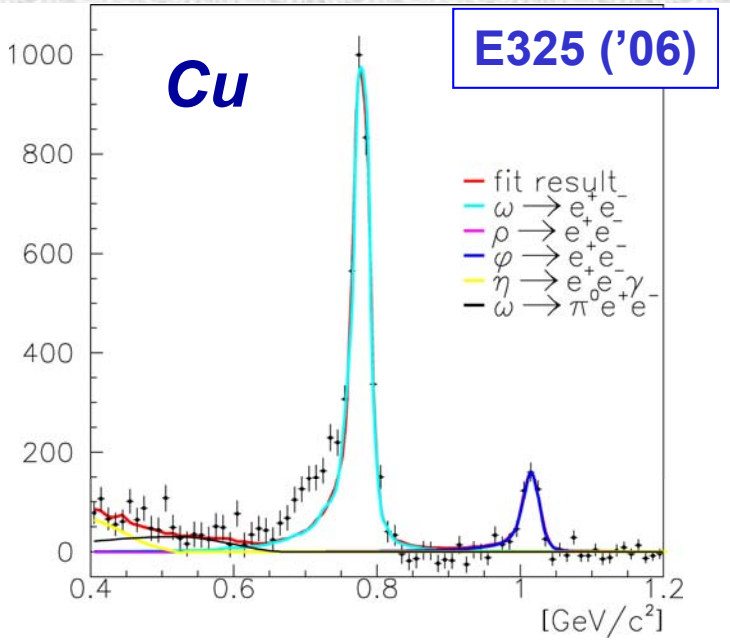


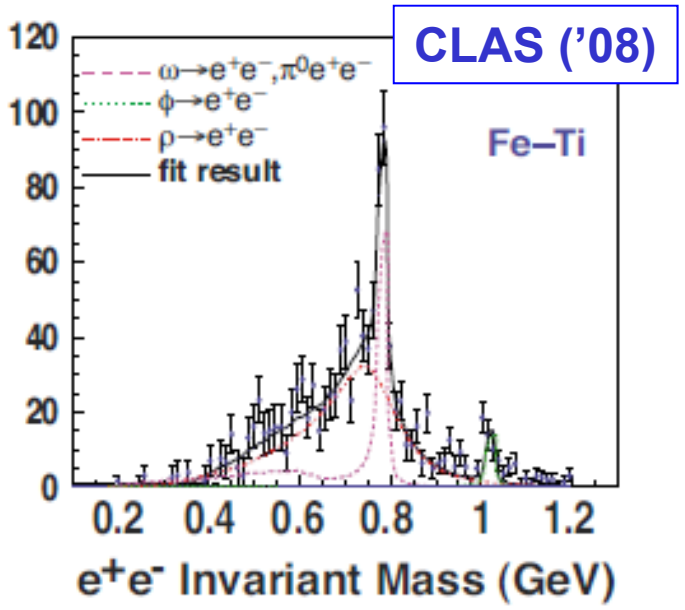


Vector Meson Measurements

in Cold matter

- **TAGX@INS-ES ('98)**
  - $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-$
  - mass shift in γ+A
- **LEPS@SPring-8 ('05)**
  - $\phi \rightarrow K^+K^-$
  - width broadening in γ+A (no mass shift)
- **E325@KEK-PS ('06)**
  - $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$
  - mass shift in p+A
- **CBELSA/TAPS@ELSA ('08)**
  - $\omega \rightarrow \pi^0\gamma(\rightarrow\gamma\gamma\gamma)$
  - width broadening in γ+Nb (no mass shft)
- **CLAS g7@J-Lab ('08)**
  - $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$
  - width broadening in p+A (no mass shift)





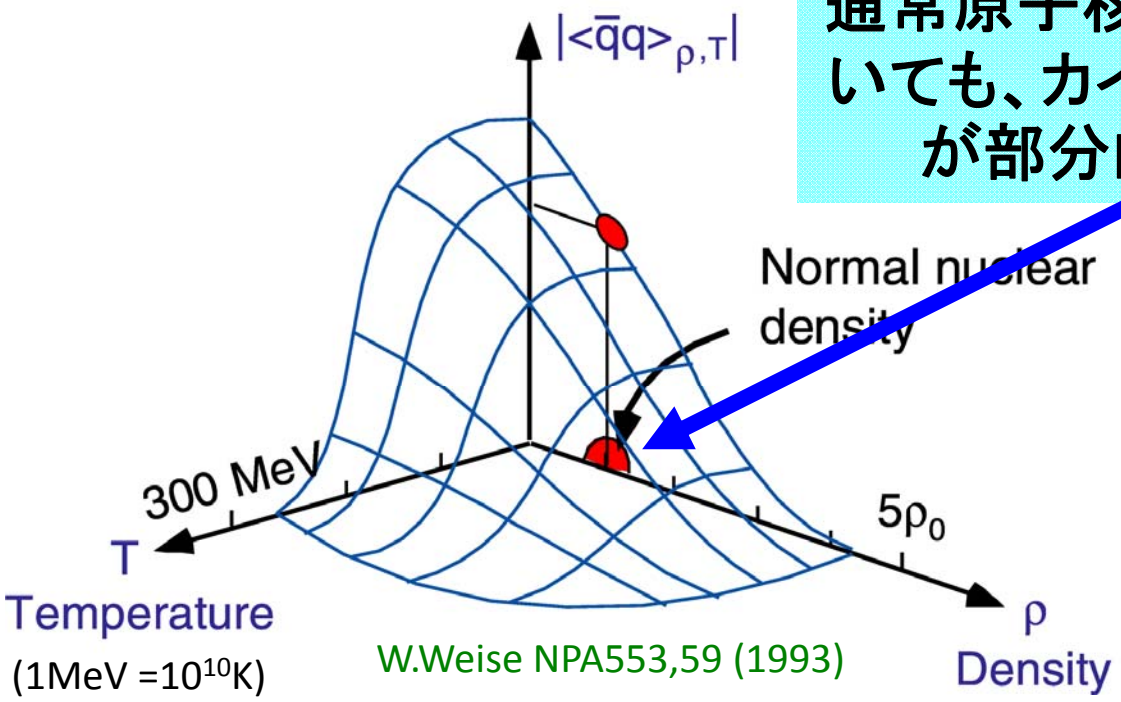
Experimental Results on the In-medium Mass and Width of the ρ, ω and ϕ meson

R.S.Hayano and T.Hatsuda, Rev. Mod. Phys. 82, 2949 (2010)

		Invariant mass		Attenuation		
	KEK-PS E325	Jlab CLAS g7	CBELSA/TAPS	Jlab CLAS g7	Spring8 LEPS	
Reaction	pA 12 GeV	γA 0.6 – 3.8 GeV	γA 0.7 – 2.5 GeV	γA 0.6 – 3.8 GeV	γA 1.5 – 2.5 GeV	
Momentum	0 > 0.5 GeV/c	p > 0.8 GeV/c	p < 0.5 GeV/c	0.4 < p < 1.7 GeV/c	p > 0.8 GeV/c	1.1 < p < 2.2 GeV/c
ρ	$\Delta m(\rho_0)/m = -9\%$	$\Delta m \sim 0$ broadening				
ω	no broadening		$\Delta m \sim 0$	$\Gamma_\omega(\rho_0) = 130\text{–}150 MeV/c^2$ → $\sigma_{\omega N} \sim 70mb$		
ϕ	$\Delta m(\rho_0)/m = -3.4\%$ $\Gamma_\phi(\rho_0)/\Gamma \sim 15 MeV/c^2$				$\sigma_\phi N \sim 20mb$ → $\Gamma_\phi(\rho_0) \sim 45 MeV/c^2$	$\sigma_\phi N \sim 35mb$ → $\Gamma_\phi(\rho_0) \sim 80 MeV/c^2$

KEK-PS E325 実験 (1997-2002)

通常原子核密度下においても、カイラル対称性が部分的に回復

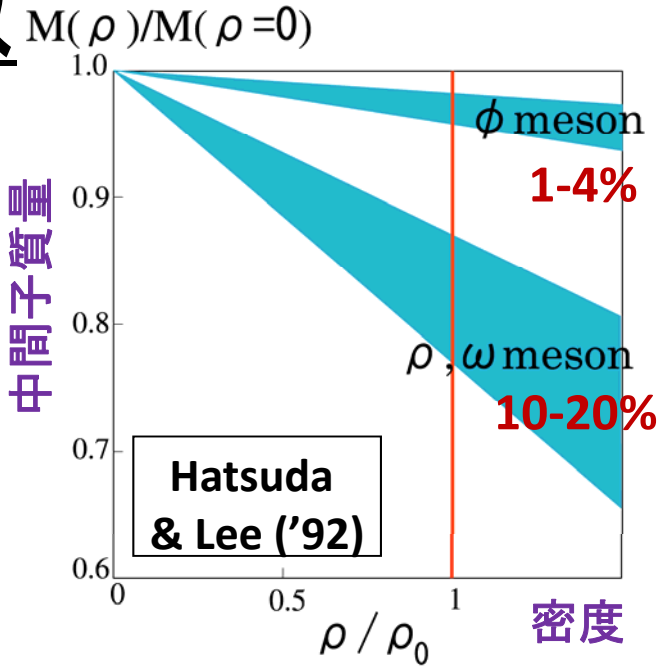


W.Weise NPA553,59 (1993)

ねらう物理と実験の特徴

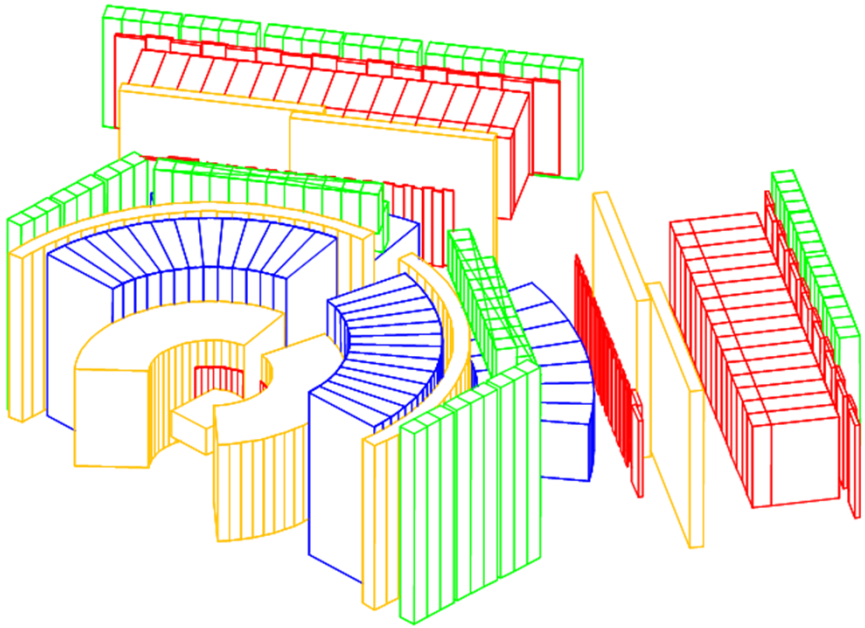
QCDに基づく理論計算：
ベクトル中間子(ρ,ω,ϕ)が密度に比例して
軽くなる

**原子核中でのベクトル中間子質量を
計ることによって、
クォークの有効質量の変化を測定する**



12GeV p + A → ρ, ω, ϕ + X
Invariant Mass of e^+e^-, K^+K^-

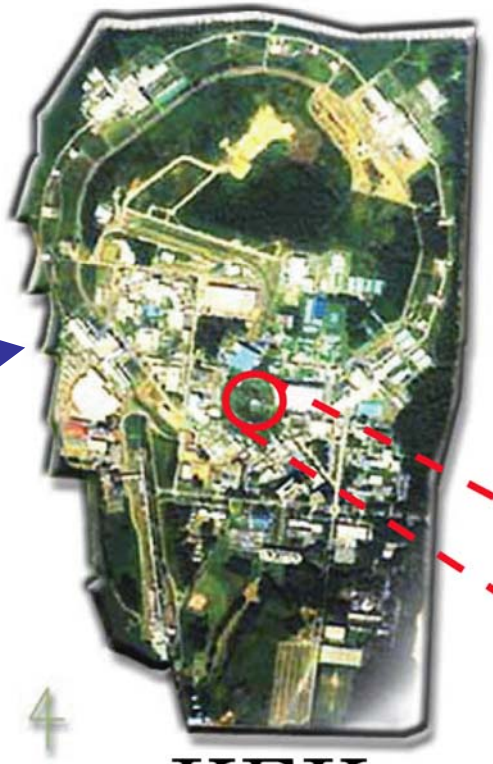
標的原子核との相互作用が小さく、
崩壊直前の情報を得られる利点



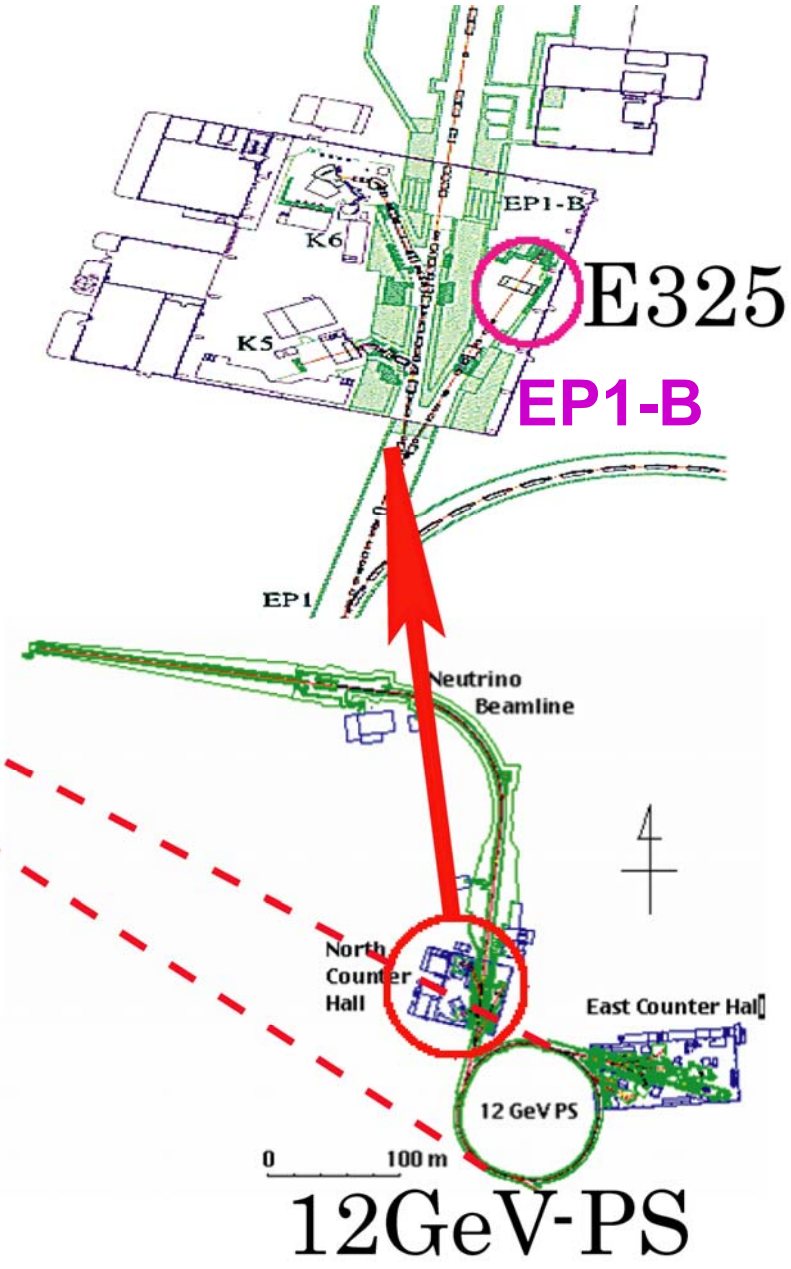
原子核内で崩壊する確率が大きい
2GeV/c程度の遅いベクターメソンを
低物質量・大立体角検出器で測定

E325 Experiment

JAPAN



KEK



12GeV-PS

KEK-PS E325 Collaboration

●京大

深尾祥紀、舟橋春彦、北口雅暁、三輪浩司、宮下卓也、
村上哲也、名倉照直、佐久間史典、外川学、山田悟、
吉村義朗

●KEK

千葉順成、家入正治、佐々木治、関本美智子、田中万博

●理研

延與秀人、武藤亮太郎、成木恵、田原司睦、四日市悟

●東大CNS

浜垣秀樹、小沢恭一郎

●東大ICEPP

石野雅也、三原智

●東北大

神田浩樹

計26名 (D論7本)

E325 Experiment

12GeV p + A → ρ, ω, ϕ + X
Invariant Mass of e^+e^-, K^+K^-

- **原子核内で崩壊する確率が大きい**
  2GeV/c程度の遅いベクターメソンを測定

- 薄いターゲット:
  int. length: 0.2% / 0.05% (C / Cu)
  rad. length: 0.4% / 0.6% (C / Cu)

- primary proton beam ~10^9/spill/1.8s

薄いターゲットと大強度ビームの組み合わせによって、γ-conversionからのbackgroundを減らすことが可能になる

History

'93 proposed
'96 construction start
- ✓ *NIM, A457, 581 (2001).*
- ✓ *NIM, A516, 390 (2004).*

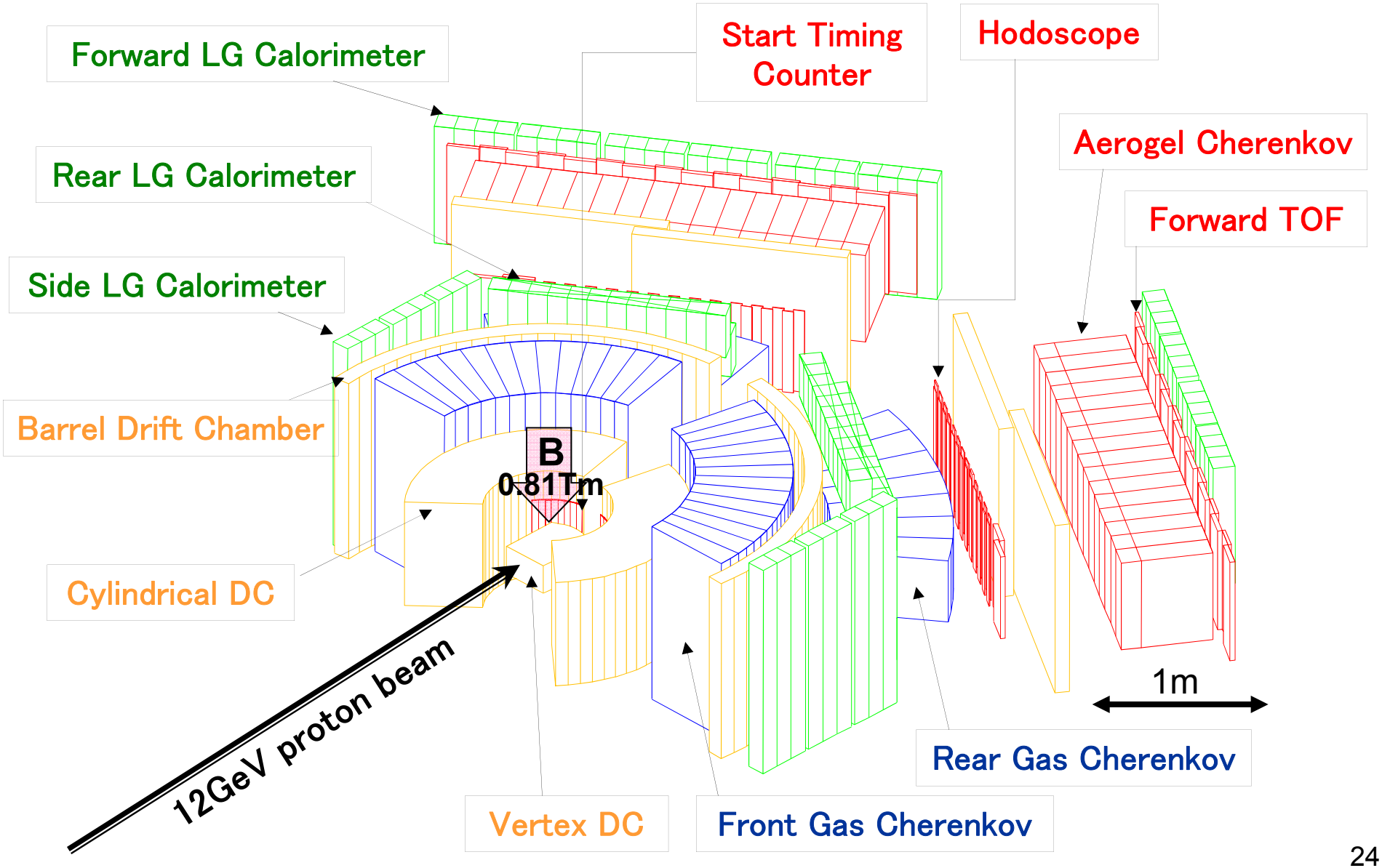
'97 first K^+K^- data
'98 first e^+e^- data
- ✓ *ρ/ω: PRL, 86, 5019 (2001).*

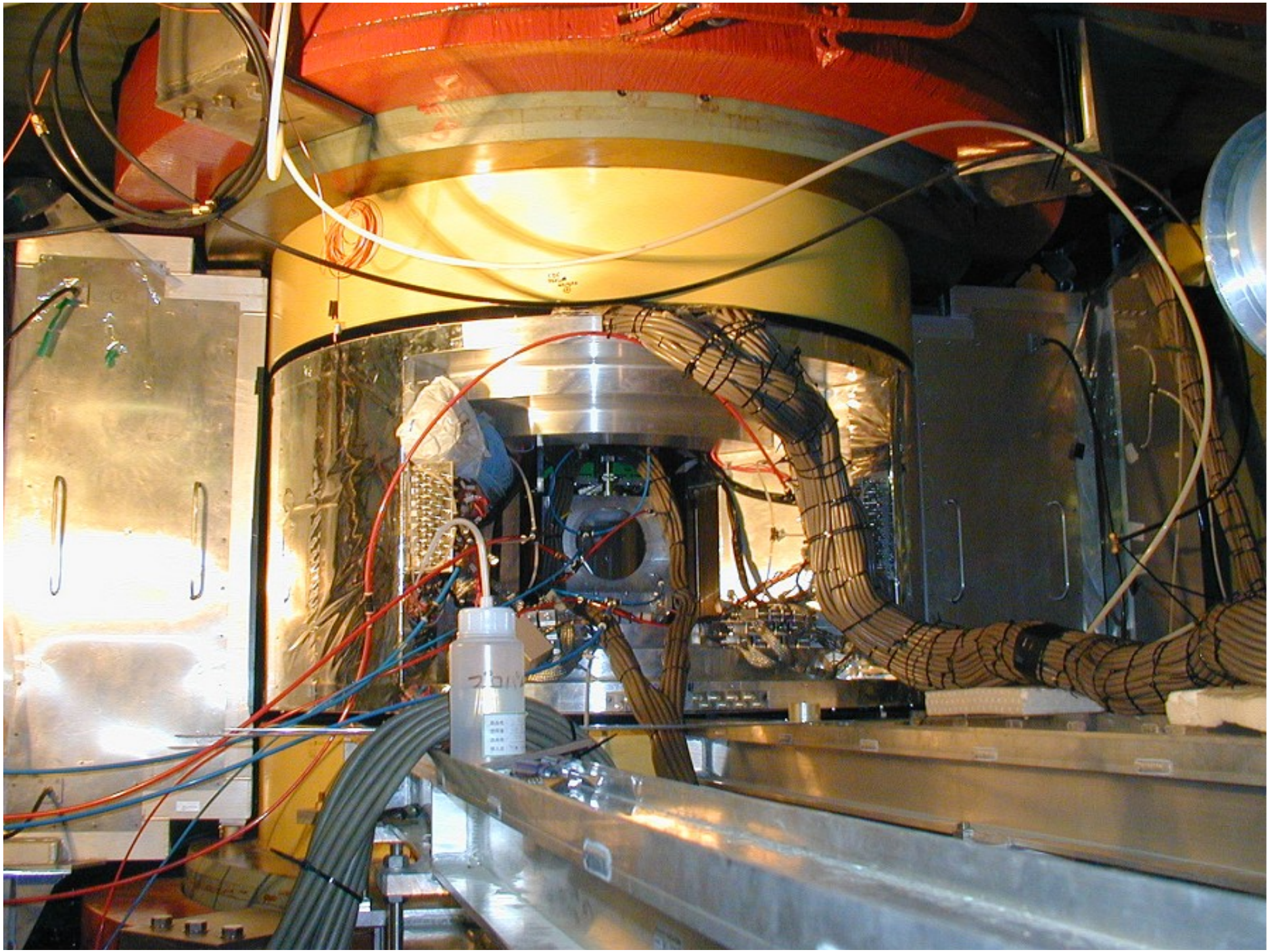
'99~'02
x100 statistics in e^+e^-
- ✓ *ρ/ω: PRL 96, 092301 ('06).*
- ✓ *ϕ→ee: PRL 98, 042501 ('07)*
- ✓ *α : PRC, 75, 025201 ('06)*

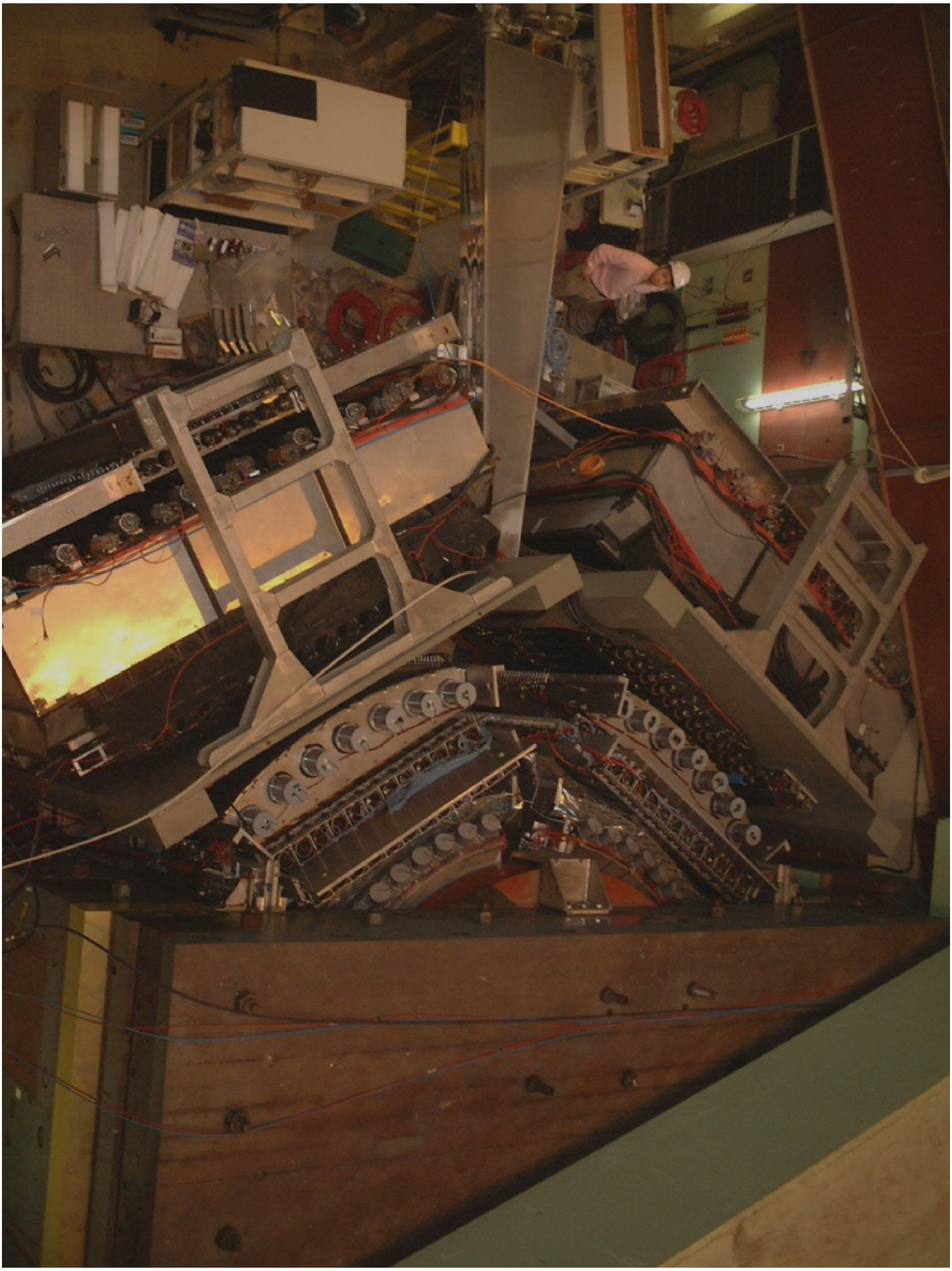
x6 statistics in K^+K^-
- ✓ *ϕ →KK, α : PRL 98, 152302 ('07)*

Detector Setup

M.Sekimoto *et al.*, NIM, A516, 390 (2004).



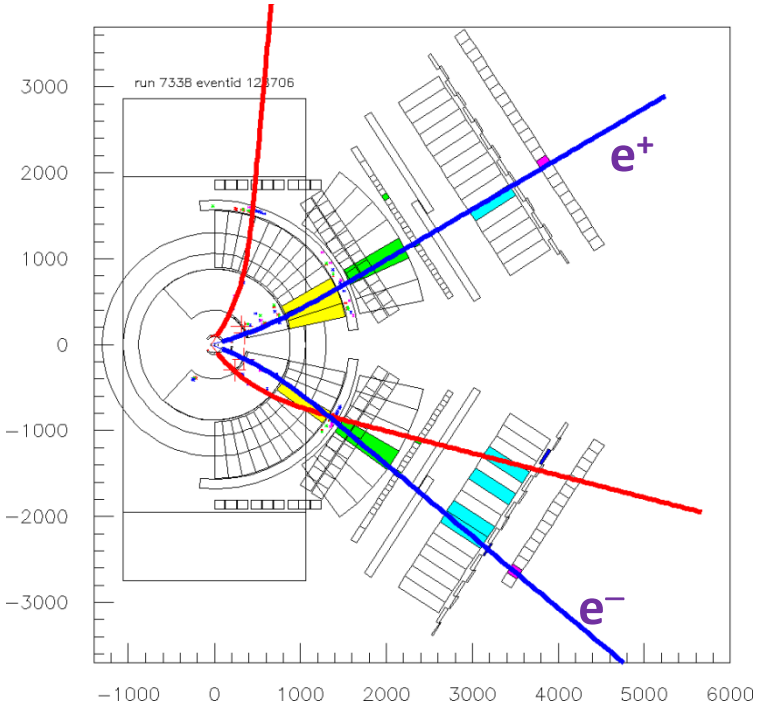


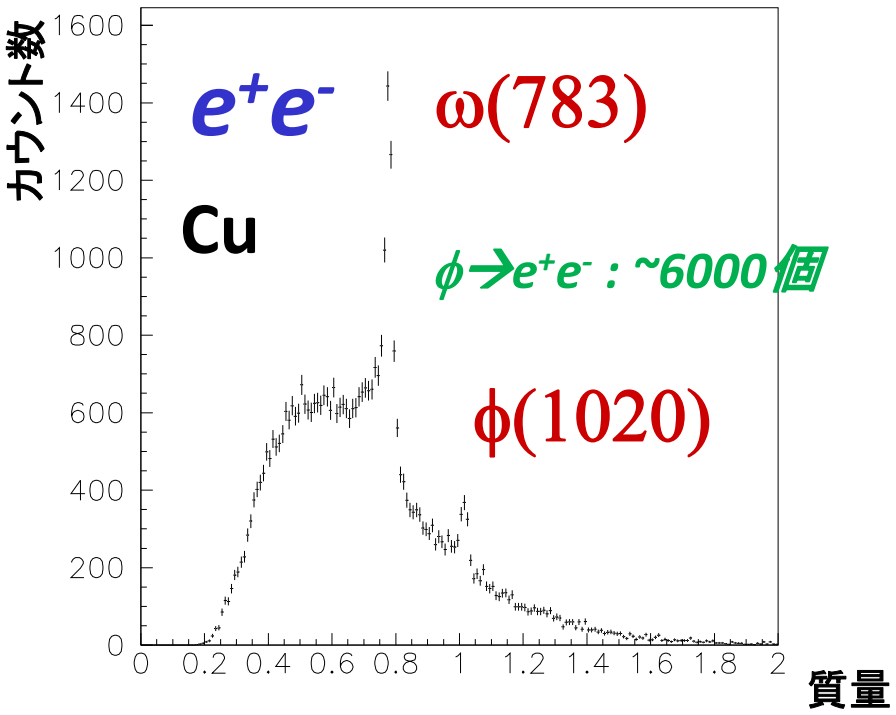


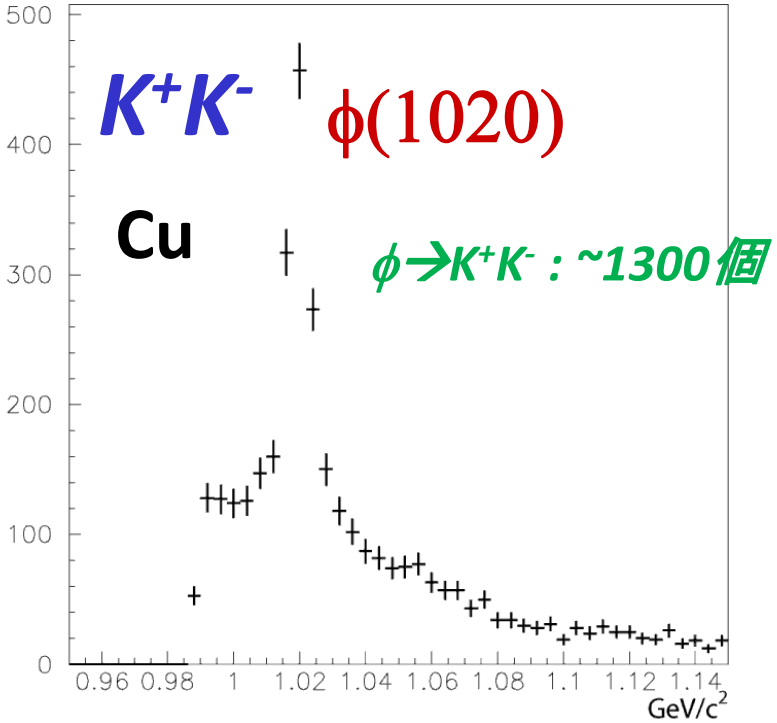
実験結果

e^+e^-/K^+K^-の運動量から親粒子の運動量・質量を求める

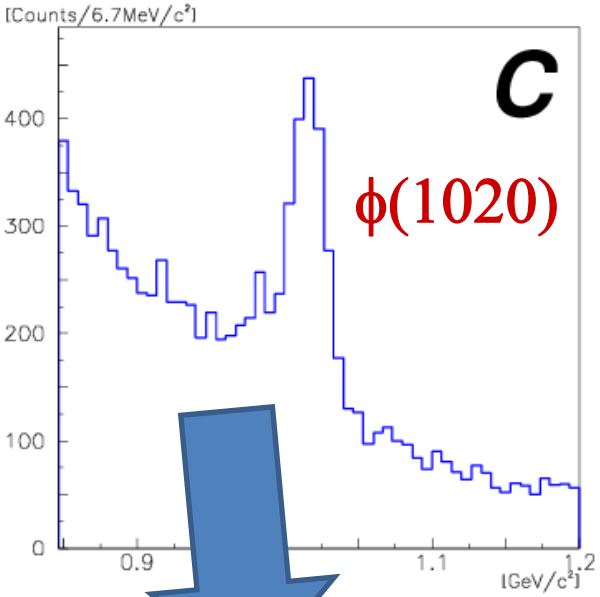
質量分解能~1%[$\phi \rightarrow e^+e^-$]は世界最高の測定



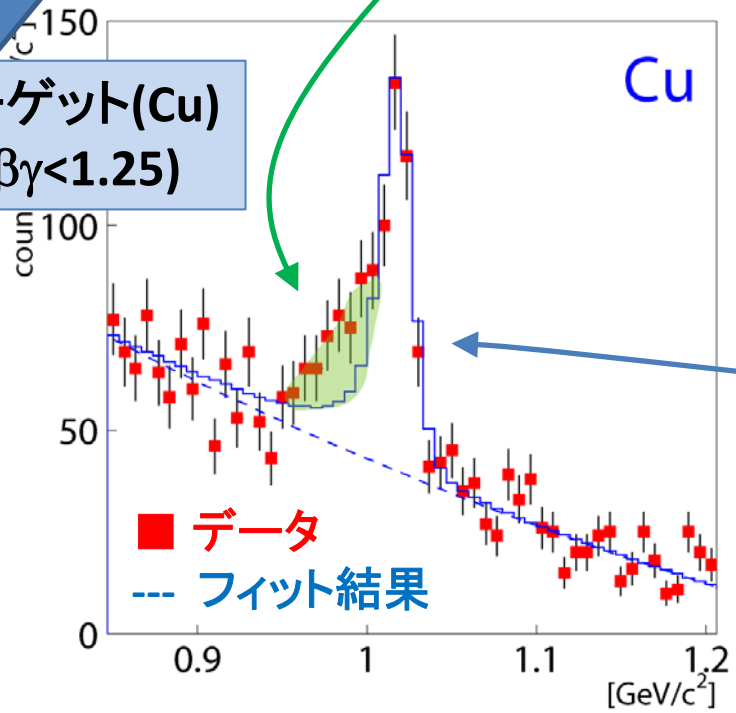


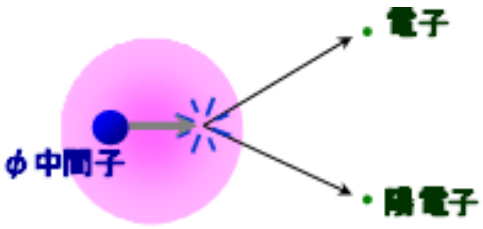


$\phi \rightarrow e^+e^-$の結果

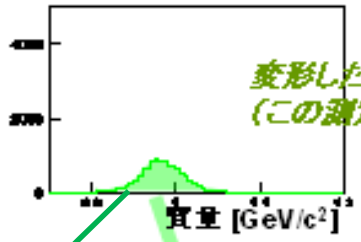


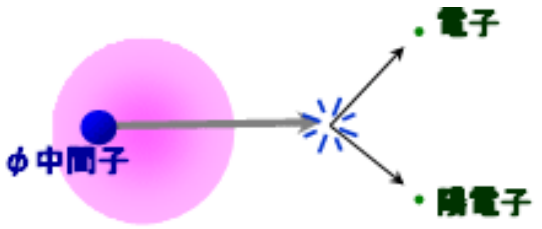
大きいターゲット(Cu)
遅い領域($\beta\gamma$<1.25)



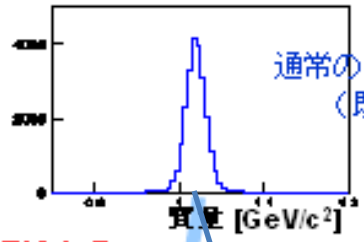


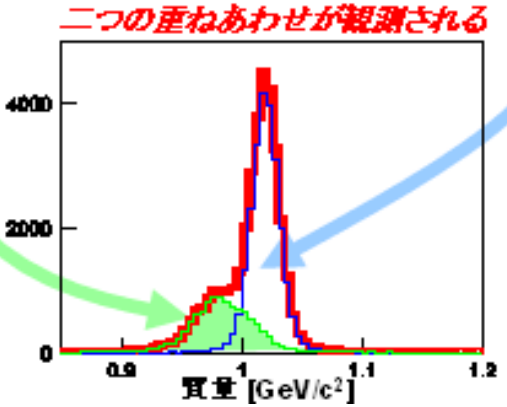
原子核内で崩壊したφ中間子





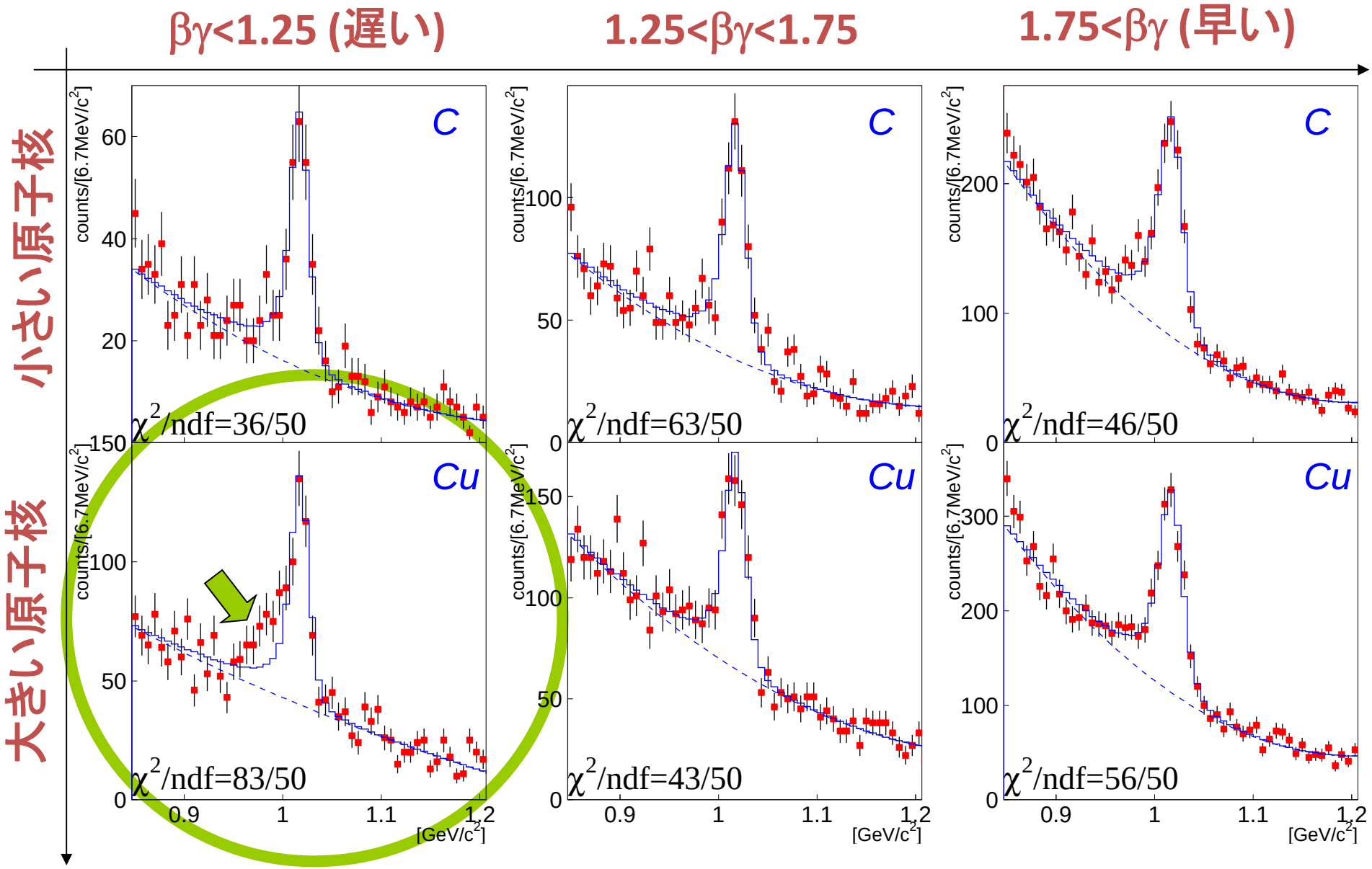
真空中に出たあと崩壊したφ中間子





大きい原子核・遅い中間子
で顕著になるはず

質量の変化が見えた!
(φ中間子で世界初)

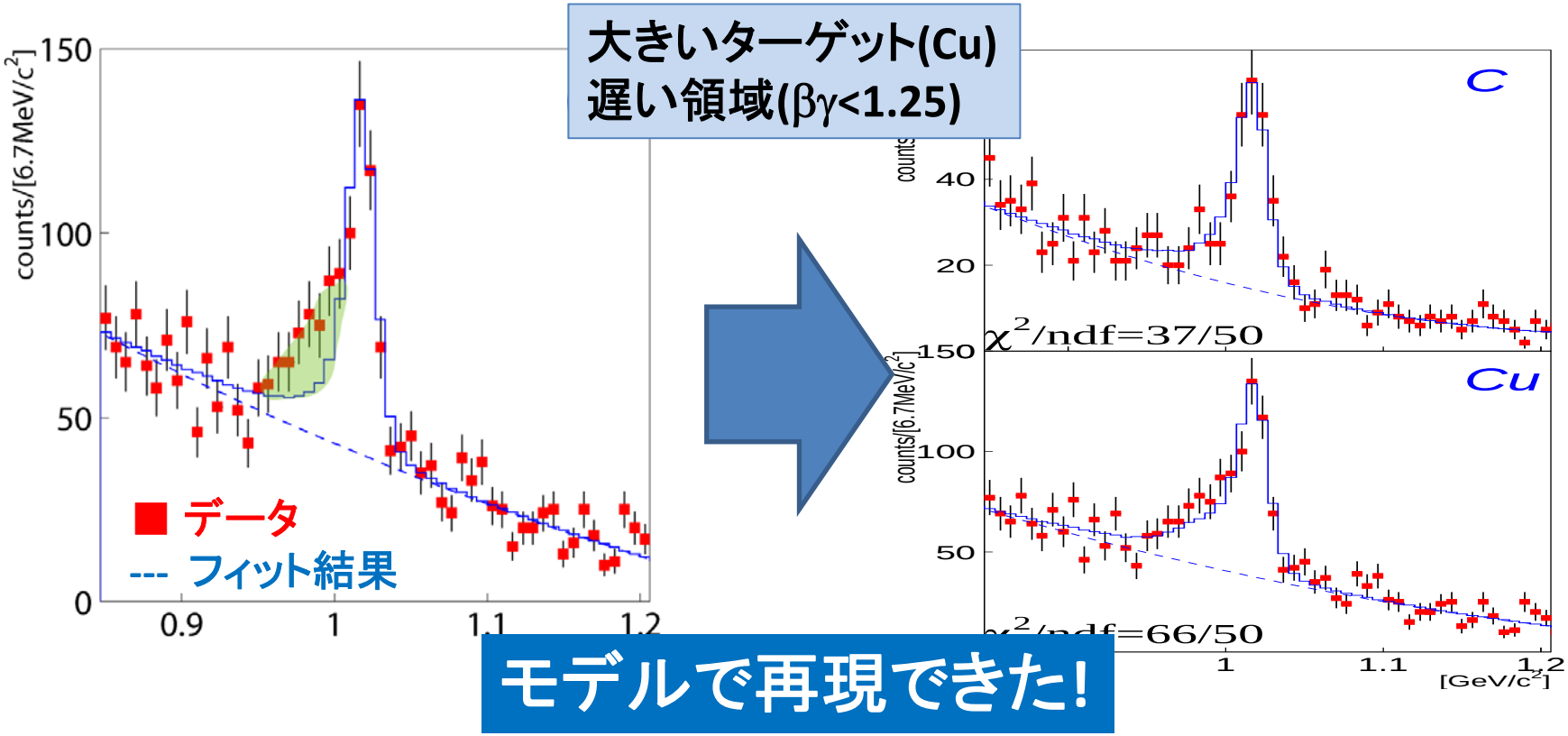


予想通り、大きい原子核・遅い中間子でのみ質量が変化している

理論モデルに基づく質量変化の再現

- 密度に依存する質量変化の理論式
- 核密度分布
- 中間子運動量分布

これらを組み合わせ、予想される形を
計算してデータをフィットする

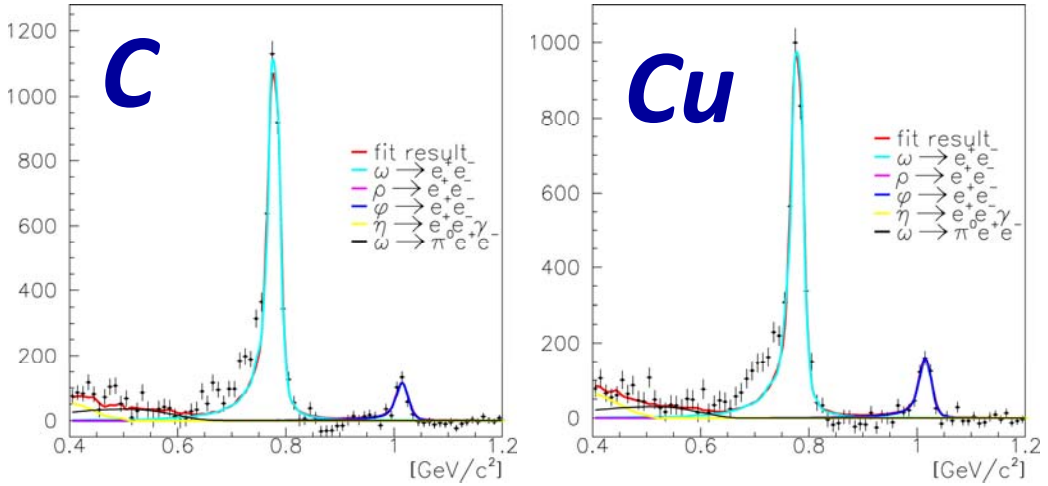


モデルで再現できた!

質量　　：$3.4^{+0.6}_{-0.7}$% 減少

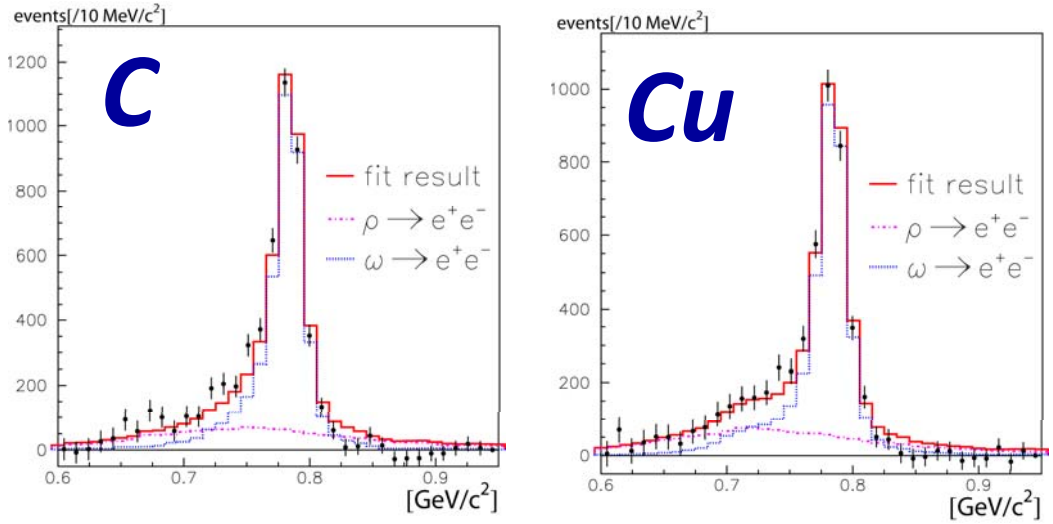
崩壊幅：$3.6^{+1.8}_{-1.2}$倍増加

ρ/ω→e⁺e⁻の結果

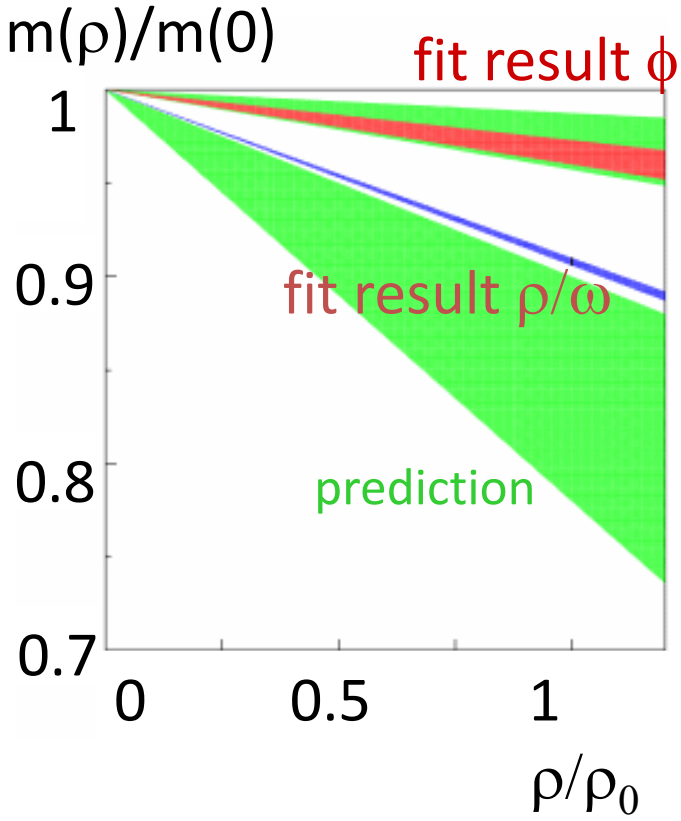


質量　：9.2$^{+-0.2}$% 減少

崩壊幅：変化無し

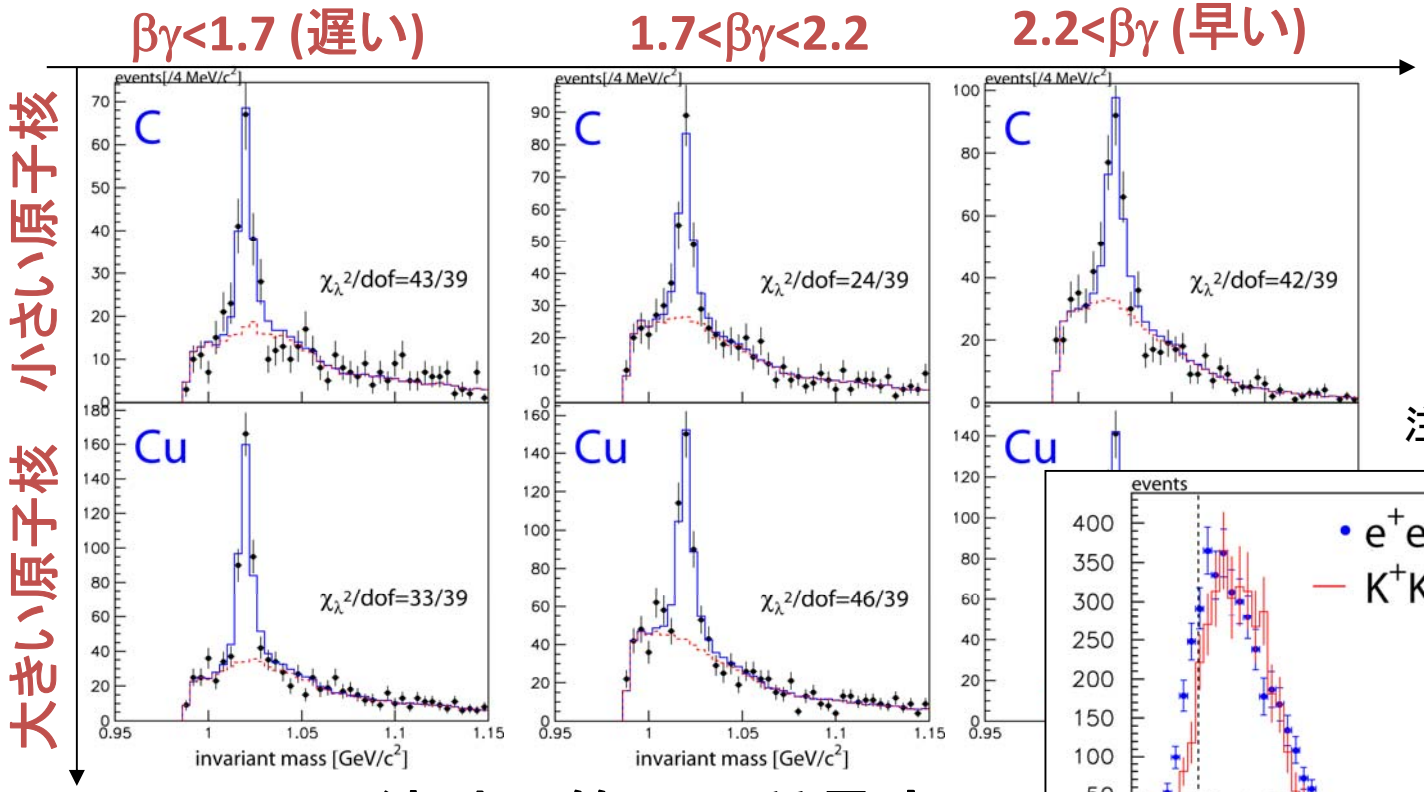


理論予想との比較

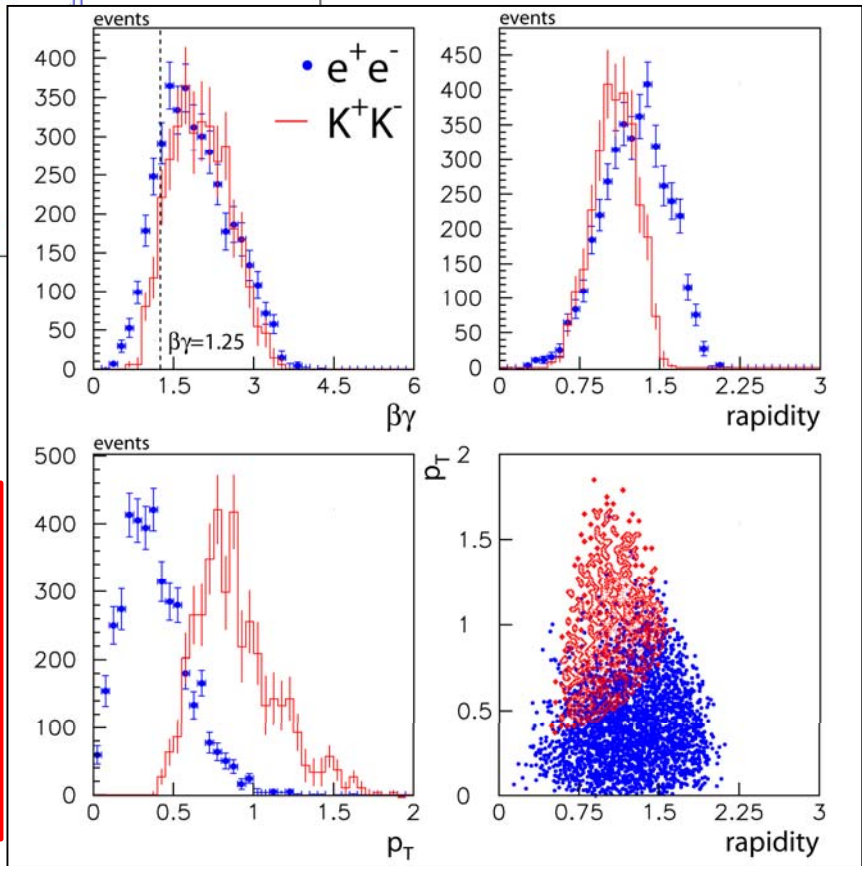


理論予想と矛盾しない結果

$\phi \rightarrow K^+K^-$の結果



注：$\phi \rightarrow K^+K^-$ は3倍してある



K+K-では統計の範囲で質量変化は見られず

- 見ているアクセプタンスがe+e-とK+K-では異なる
- e+e-で変化している遅く動く領域(βγ<1.25)は、K+K-の統計がものすごく少ない

→結果に矛盾はない

φ中間子には特有のおもしろさがある

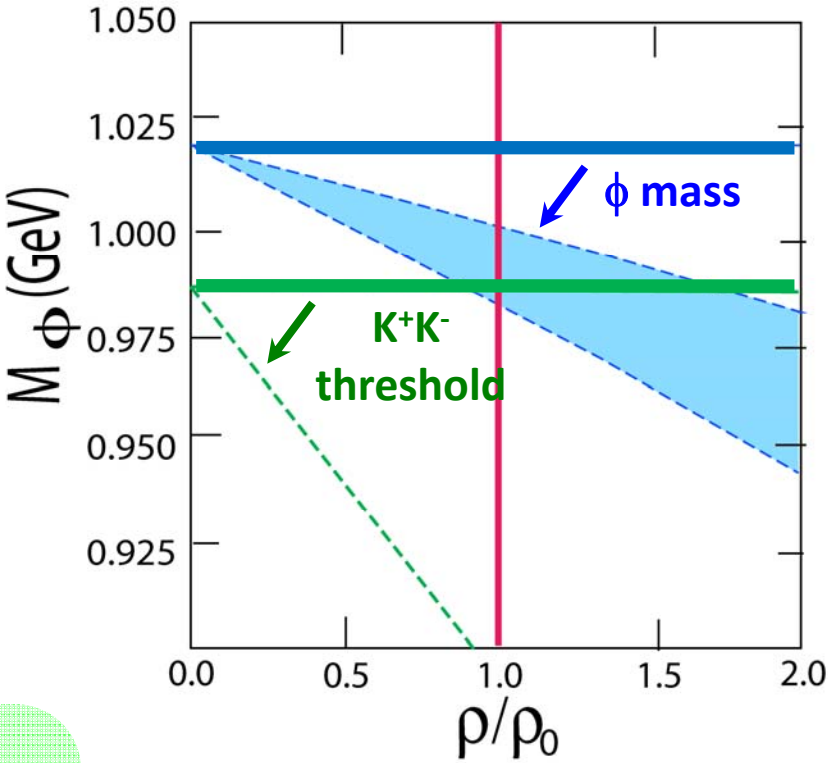
φ→e^+e^-/K^+K^-の崩壊比

φ→K^+K^- : 49.2%
φ→e^+e^- : 0.0297%

●φ中間子の質量 : 1019MeV
●K^+K^-の合計質量 : 987MeV

たった32MeVの差

➔ φ又はKの質量が変化することによって、崩壊比が変化する可能性



ρ_0:normal nuclear density

簡単な例として、

■φの質量が減少
→ K^+K^-への崩壊比が小さくなる

■Kの質量が減少
→ K^+K^-への崩壊比が大きくなる

φ : *T.Hatsuda, S.H.Lee, Phys. Rev. C46(1992)R34.*

K : *H.Fujii, T.Tatsumi, PTPS 120(1995)289.*

Vector Meson, ϕ

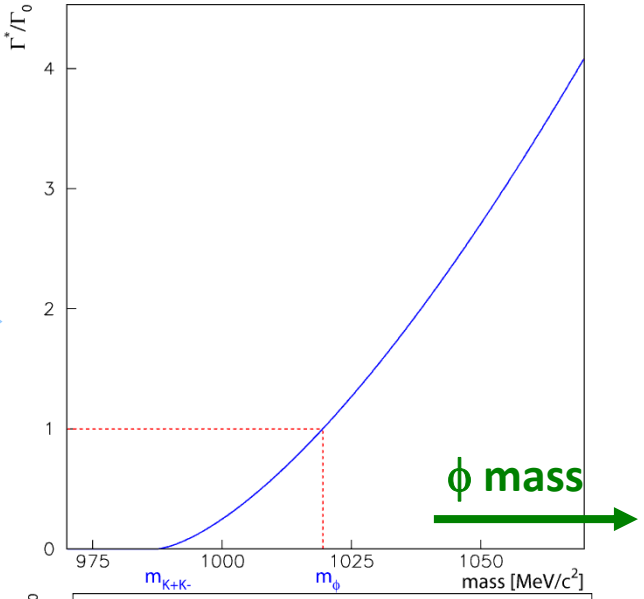
J.D.Jackson, Nuovo Cimento 34, 1644 (1964).

m_Kが変化しないと仮定

$$\Gamma^* / \Gamma_0 = \left(q/q_0\right)^3 \left(m_0/m^*\right)$$

$$q = \sqrt{m^{*2}/4 - m_K^2}$$

$$q_0 = \sqrt{m_0^2/4 - m_K^2}$$

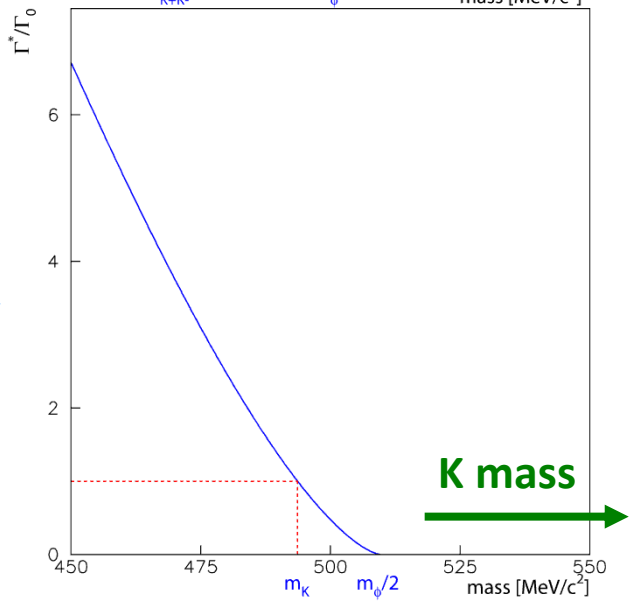


m_ϕが変化しないと仮定

$$\Gamma^* / \Gamma_0 = \left(q/q_0\right)^3$$

$$q = \sqrt{m_0^2/4 - m_K^{*2}}$$

$$q_0 = \sqrt{m_0^2/4 - m_K^2}$$

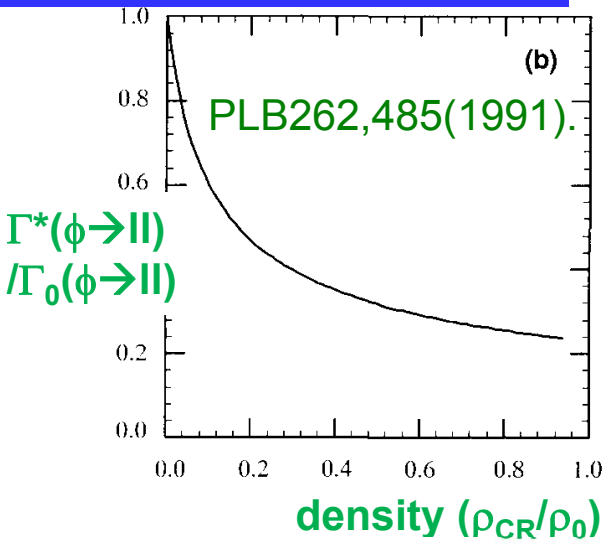


φ Puzzle

核物質中でのφまたはKのスペクトラル関数の変化によって、φ→ll/KKの崩壊幅が変化するのではないか？

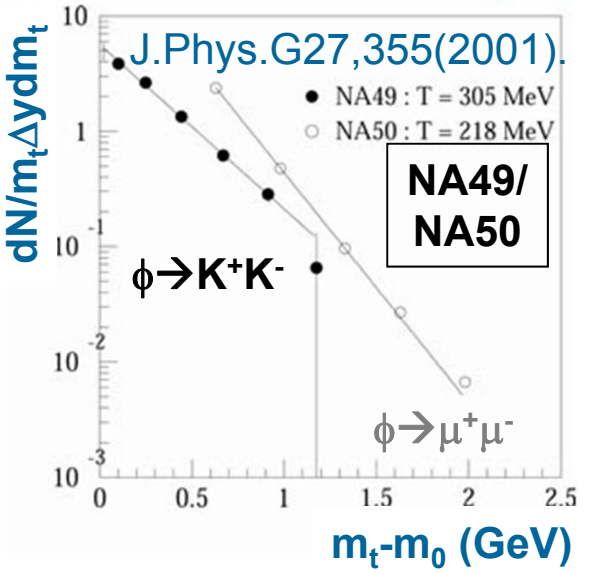
●theoretical predictions

- D.Lissauer and V.Shuryak, PLB253,15(1991).
  Γ(φ→KK)/Γ*(φ→ll) の増加*
- P.-Z. Bi and J.Rafelski, PLB262,485(1991).
  Γ(φ→KK)/Γ*(φ→ll) の増加*
- J.P.Blaziot and R.M.Galain, PLB271,32(1991).
  Γ(φ→KK)/Γ*(φ→ll) の減少*
- etc.



●NA49/NA50@CERN-SPS

- PLB491,59(2000).; PLB555,147(2003).; J.Phys,G27,355(2001).
- φ→K⁺K⁻/μ⁺μ⁻, 158AGeV Pb+Pb
- production CS's are ***inconsistent***



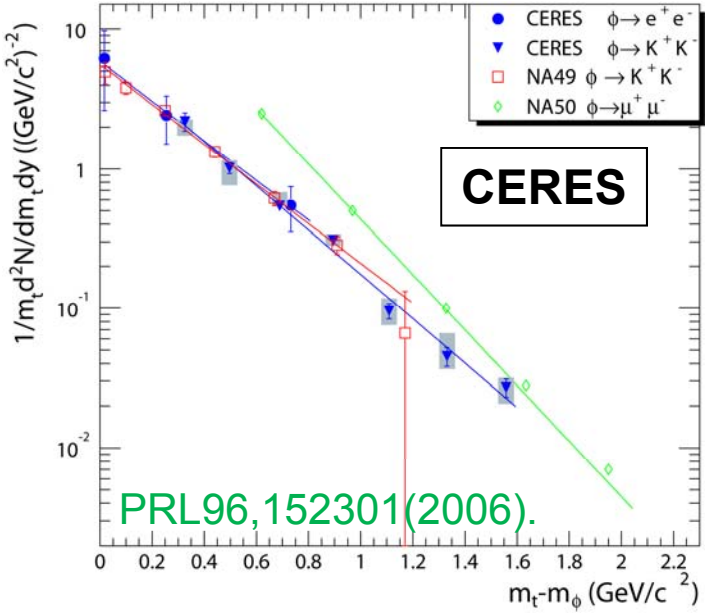
ϕ Meson Measurements

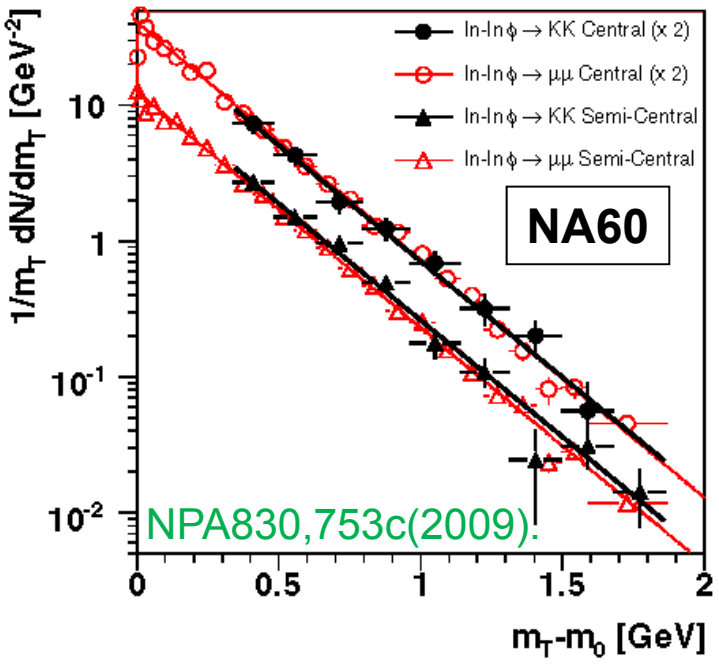
Hot Matter

- **CERES(NA45)@CERN-SPS**
  - PRL96,152301(2006).
  - $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$, 158AGeV Pb+Au
  - production CS's are ***consistent***
- **PHENIX@BNL-RHIC**
  - EPJ,A31,836(2007).
  - $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$, sqrt($s_{NN}$)=200GeV Au+Au
  - production CS's are ***consistent***
- **NA60@CERN-SPS**
  - NPA830,753c(2009).
  - $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-/K^+K^-$, 158AGeV In+In
  - production CS's are ***consistent***

Cold Matter

- **E325@KEK-PS**
  - PRL98, 152302(2007).
  - $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$, 12GeV p+C/Cu





$\Gamma_{\phi\to K^+K^-}/\Gamma_{\phi\to e^+e^-}$ and Nuclear Mass-Number Dependence α

- $\Gamma_{\phi\to K^+K^-}/\Gamma_{\phi\to e^+e^-}$ が原子核中で大きくなる場合を考える
  - ➔ 測定される$N_{\phi\to K^+K^-}/N_{\phi\to e^+e^-}$が大きくなる
- 大きな原子核において、このような効果が大きくなる

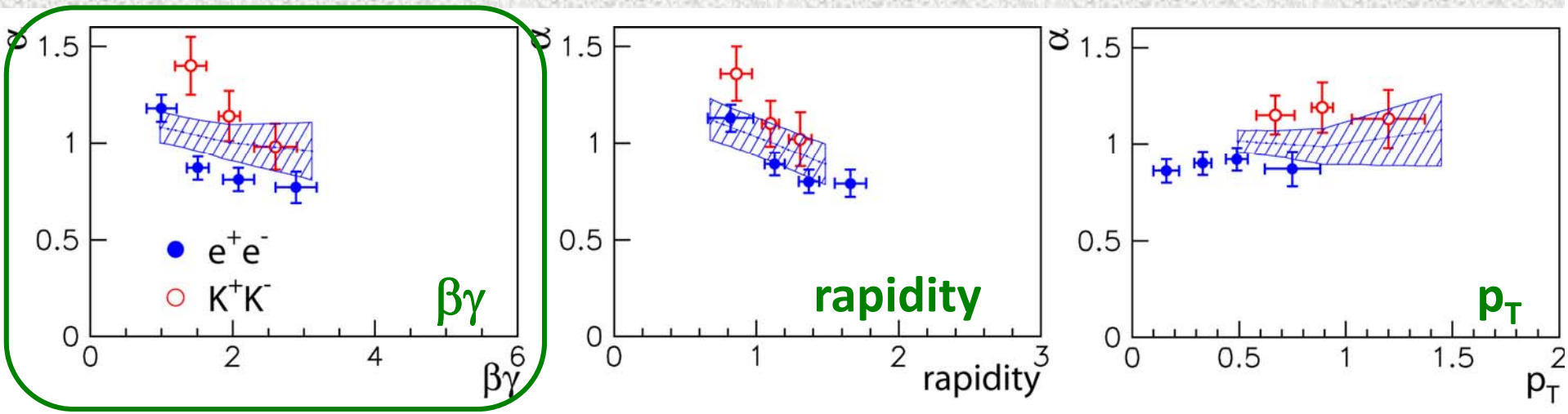
$$\sigma(A) = \sigma_0 \times A^{\alpha}$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{\phi\to K^+K^-} - \alpha_{\phi\to e^+e^-} \qquad (A_1 > A_2)$$

$$= \ln\left[\frac{N_{\phi\to K^+K^-}(A_1)}{N_{\phi\to e^+e^-}(A_1)} \Big/ \frac{N_{\phi\to K^+K^-}(A_2)}{N_{\phi\to e^+e^-}(A_2)}\right] \Big/ \ln(A_1/A_2)$$

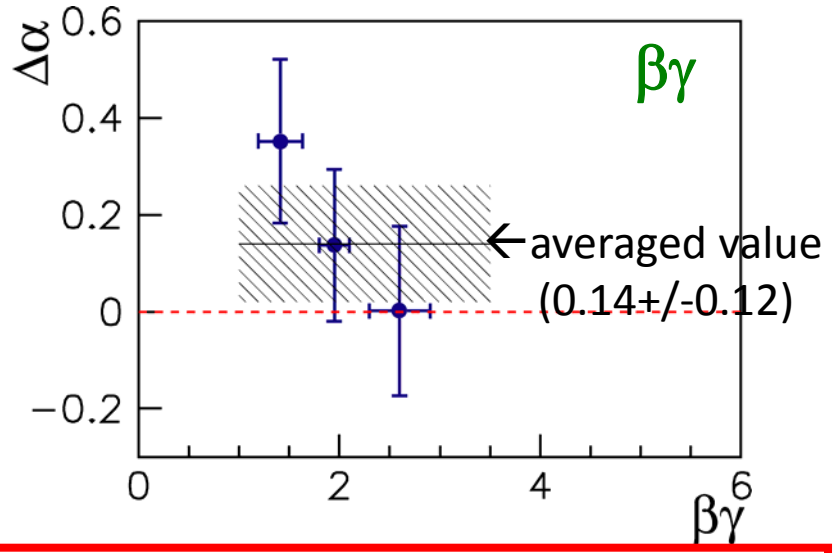
- $\alpha_{\phi\to K^+K^-}$は$\alpha_{\phi\to e^+e^-}$より大きくなる
- このαの違いは、遅く動くφ中間子において顕著になる

Results of Nuclear Mass-Number Dependence α



= K^+K^-アクセプタンスへ補正した$\alpha_{e^+e^-}$

$\Delta\alpha$ = ○ (K+K-) − ▭ (corrected e+e-)



$\alpha_{\phi\to K^+K^-}$と$\alpha_{\phi\to e^+e^-}$は統計の範囲で一致

崩壊幅の変化の制限

崩壊幅の変化が密度に比例すると仮定

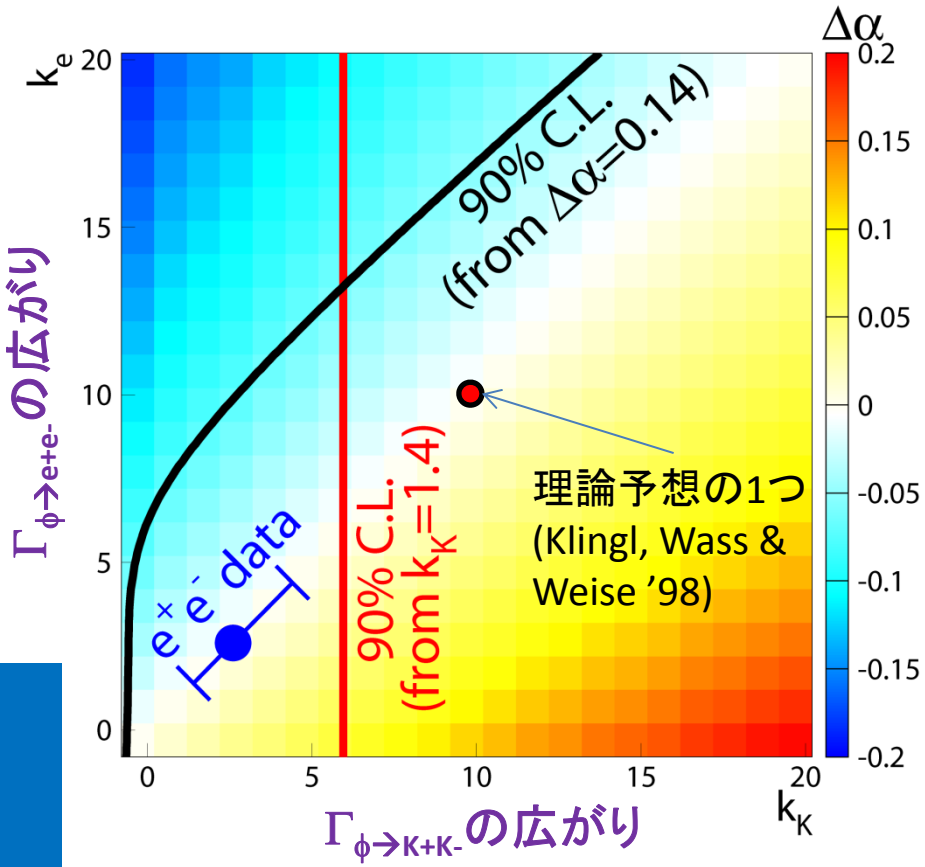
$$\Gamma^*_\phi / \Gamma^0_\phi = 1 + k_{\rm tot}(\rho/\rho_0),$$
$$\Gamma^*_{\phi\to K^+K^-} / \Gamma^0_{\phi\to K^+K^-} = 1 + k_K(\rho/\rho_0),$$
$$\Gamma^*_{\phi\to e^+e^-} / \Gamma^0_{\phi\to e^+e^-} = 1 + k_e(\rho/\rho_0)$$

① 崩壊幅が変化したときのΔαをシミュレーションで計算する
→k_e, k_K (**2次元コンタープロット**)

② Δαから制限を得る
→k_e, k_K (黒線)

③ $\phi\to_{K+K-}$の質量分布から制限を得る
→k_K (**赤線**)

$k_{\rm tot}$ □ k_K



崩壊幅の変化の制限が、実験的にはじめて得られた

KEK-PS E325実験の結論

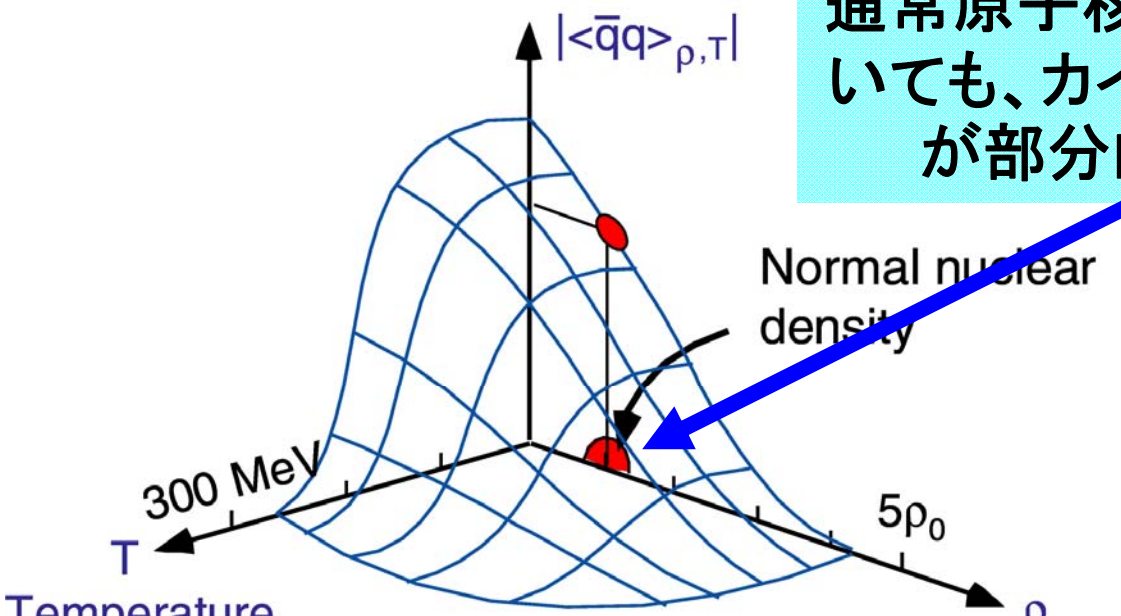
- 世界最高の質量分解能と高統計なデータを用いて、通常原子核密度下における**ベクトル中間子質量への核物質効果を検証した**

- **原子核中でのρ/ω/φの質量減少を見出した**
  - →これらの質量変化は理論的な予想を取り入れたモデル計算により再現できた
  - →**φ中間子では世界初の観測**

- 原子核中での崩壊幅の変化はφ中間子生成のe^+e^-/K^+K^-崩壊チャンネルにおける原子核依存性の違いとして現れると考えられるが、統計の範囲内で両者(e^+e^-/K^+K^-)は一致する結果が得られた
  - →得られたΔαを基にして、**φ中間子の崩壊幅の変化の制限が、実験的にはじめて得られた**

J-PARC E16 実験 (2014?-)

通常原子核密度下においても、カイラル対称性が部分的に回復



W.Weise NPA553,59 (1993)

“mass modification” から physics へ

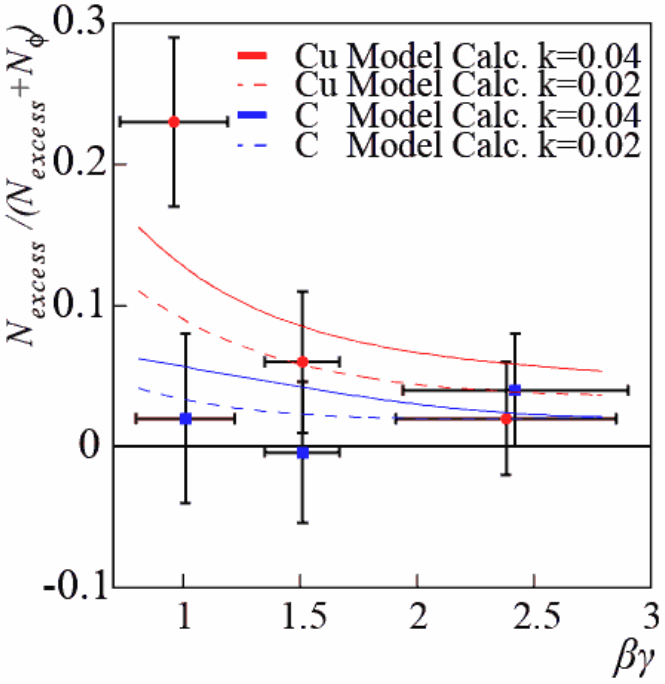
- 核物質中での中間子質量の変化は存在した (E325/CLAS-G7/(TAPS) at the lower energy, NA60/CERES/PHENIX in HI collision)
  - しかし、解釈は異なる
    - mass dropping and/or width broadening
    - 物質サイズ / 温度 / 密度の違いの影響を interpretation model に依存してはいないだろうか。
  - physics に決着がつかない
    - ハドロン多体効果か？ あるいは カイラル対称性の回復か？
- Next step in the invariant-mass approach
  - $\phi \rightarrow e^+e^-$: に重点 ： ρ/ω より不定性が少ない
    - ρ's broad and complicated shape, ρ–ω interference, ρ/ω ratio, etc.
  - 質量分布変化の系統的測定
    - 核物質サイズ依存性： さらに大小の核， 衝突径数
    - 運動量依存性 ： 予言はあるが未だ測定されず
  - … interpretation model の妥当性の check

J-PARC E16 = 100 x KEK-E325

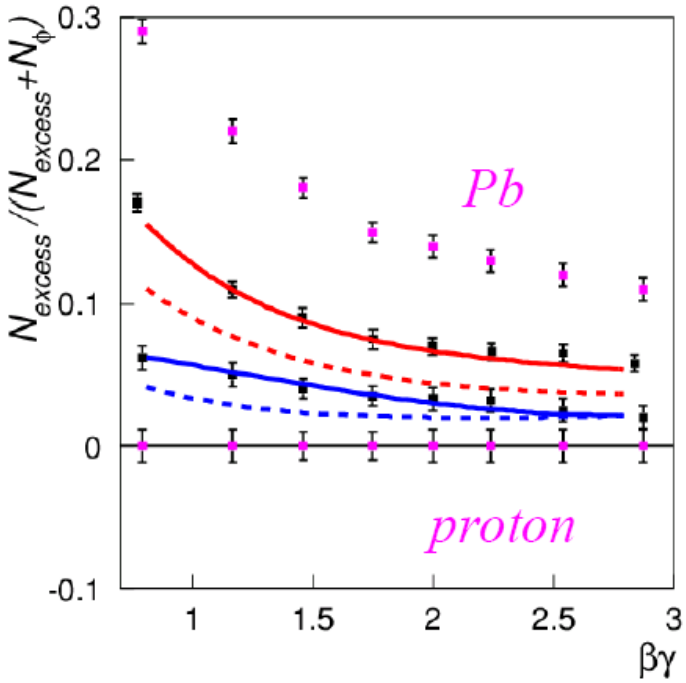
- Systematic study
  - $\beta\gamma$ dependence.
  - Target size dependence

Target	A ~r^3	~r
p	1	1
C	12	2.3
Cu	64	4
Pb	207	6

KEK

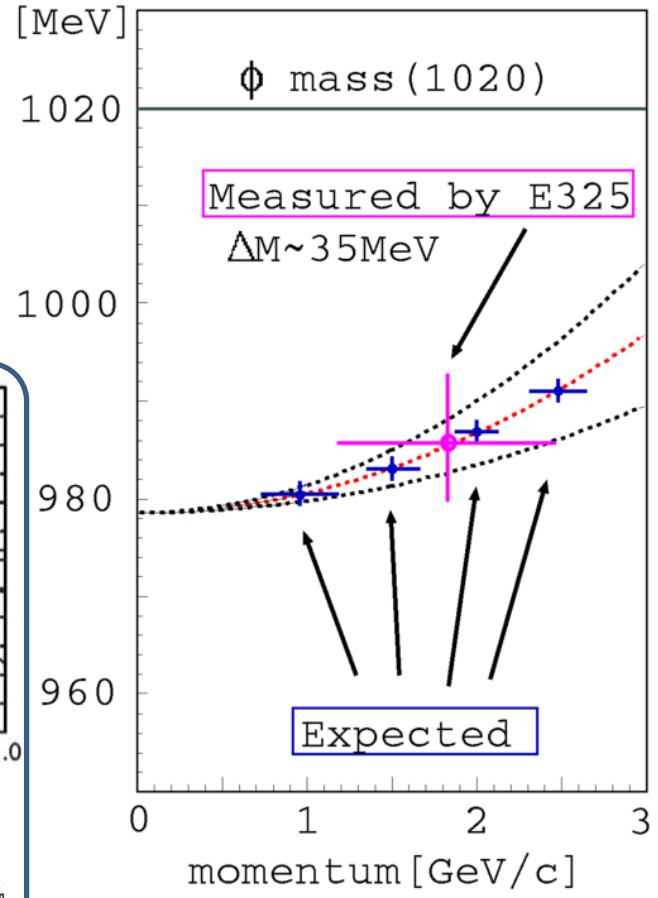


J-PARC



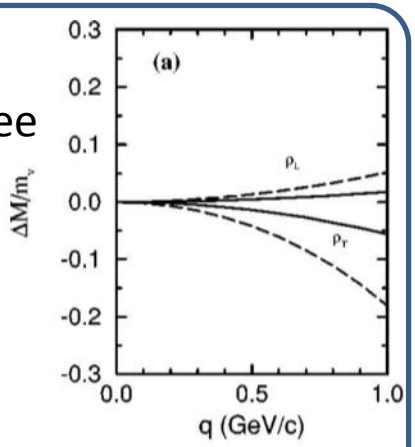
J-PARC E16 = 100 x KEK-E325

- Dispersion relation
  - Prediction by S.H. Lee. [Phys.Rev.**C57**,927(2007)]
  - Qualitatively new information to show that the modification is from chiral symmetry restoration.

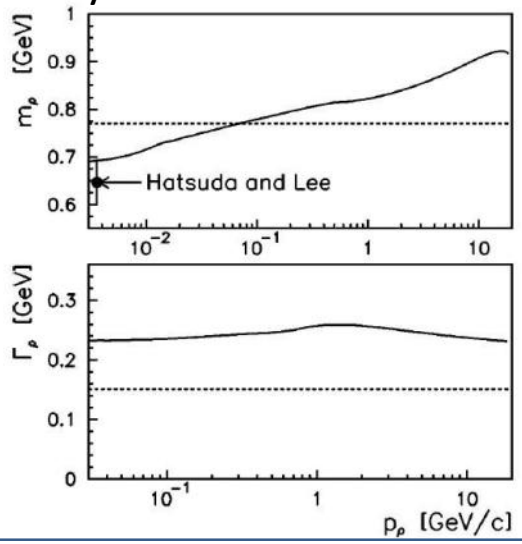


Dispersion relation for ρ mesons

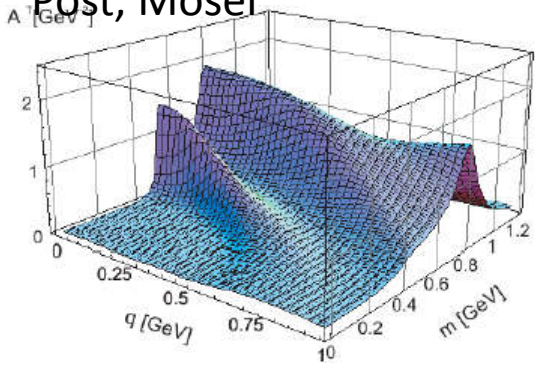
S.H. Lee



Kondratyuk



Post, Mosel



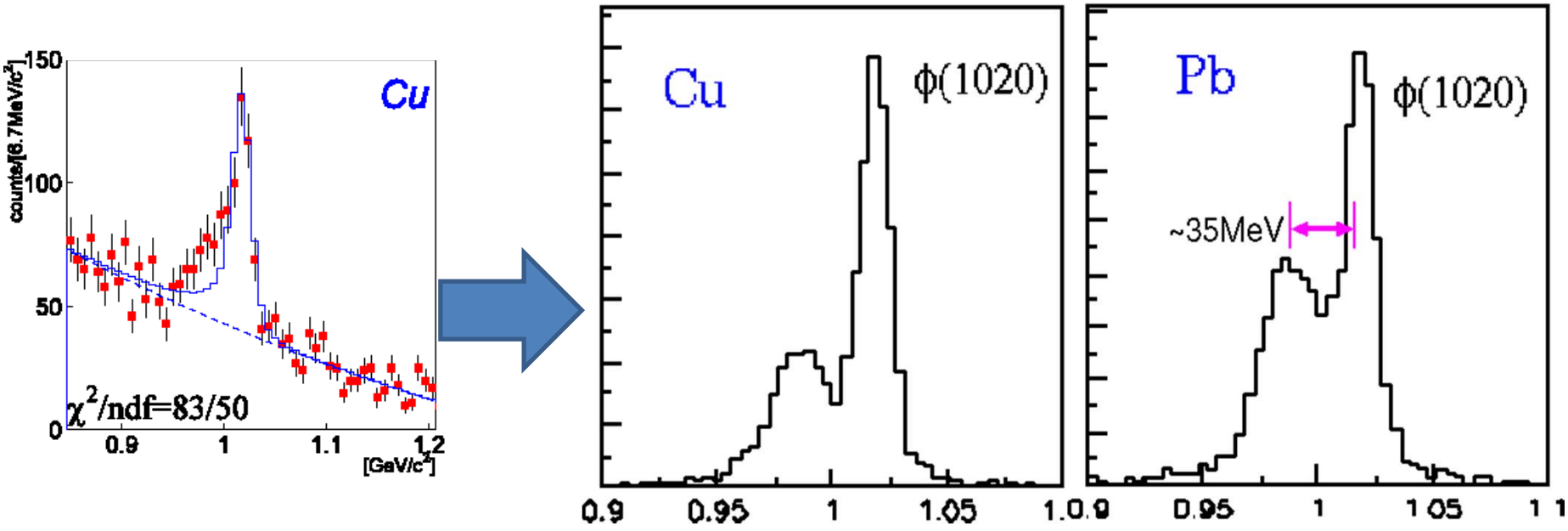
Double peak, not a tail.

- Distinct peak, not tail. Mass modification unambiguously shown.

$\beta\gamma < 1.25$ —Slower ϕ meson→ $\beta\gamma < 0.5$

σ = 10MeV → σ = 5MeV

x 2 better resolution.



To achieve 100 times in statistics.

	KEK- E325	J-Parc E16
Proton beam	10^9 / spill 12GeV	10^{10} / spill 30 GeV
Acceptance	(defined as) 1	5
data taking	~100 shifts	~ 100 shifts
ϕYield	~2000	~ 2×10^5

x 10

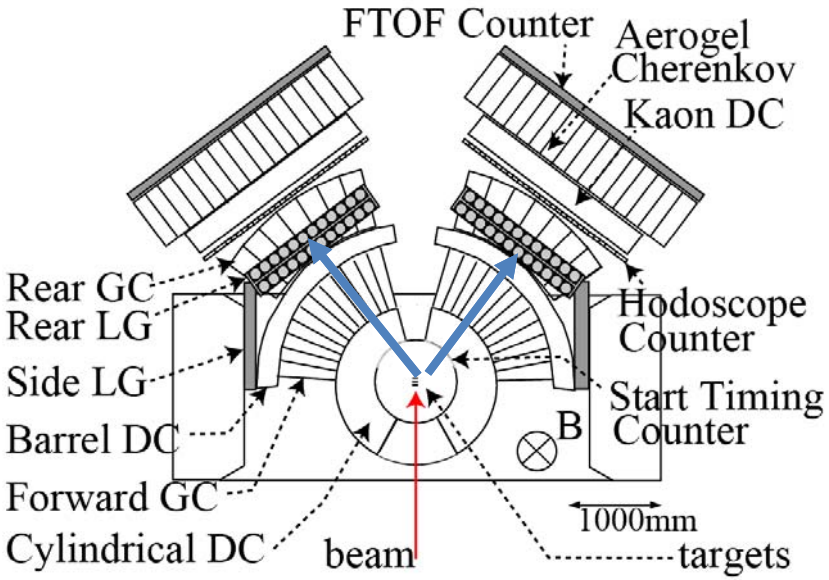
x 2 (x-sec)

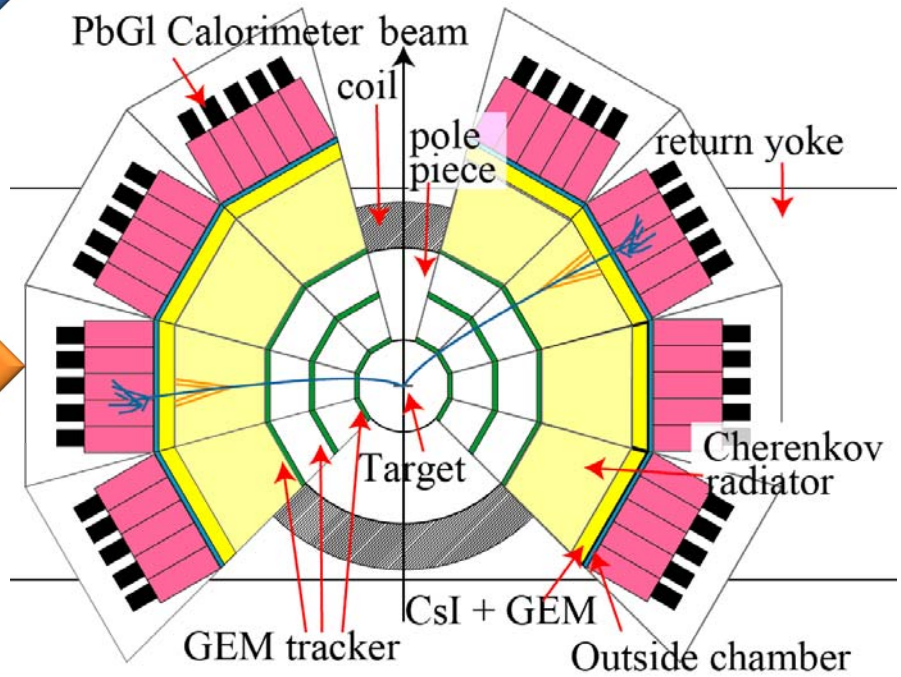
x 5

yield x 100

High rate capability ~5kHz/mm^2

Large acceptance spectrometer



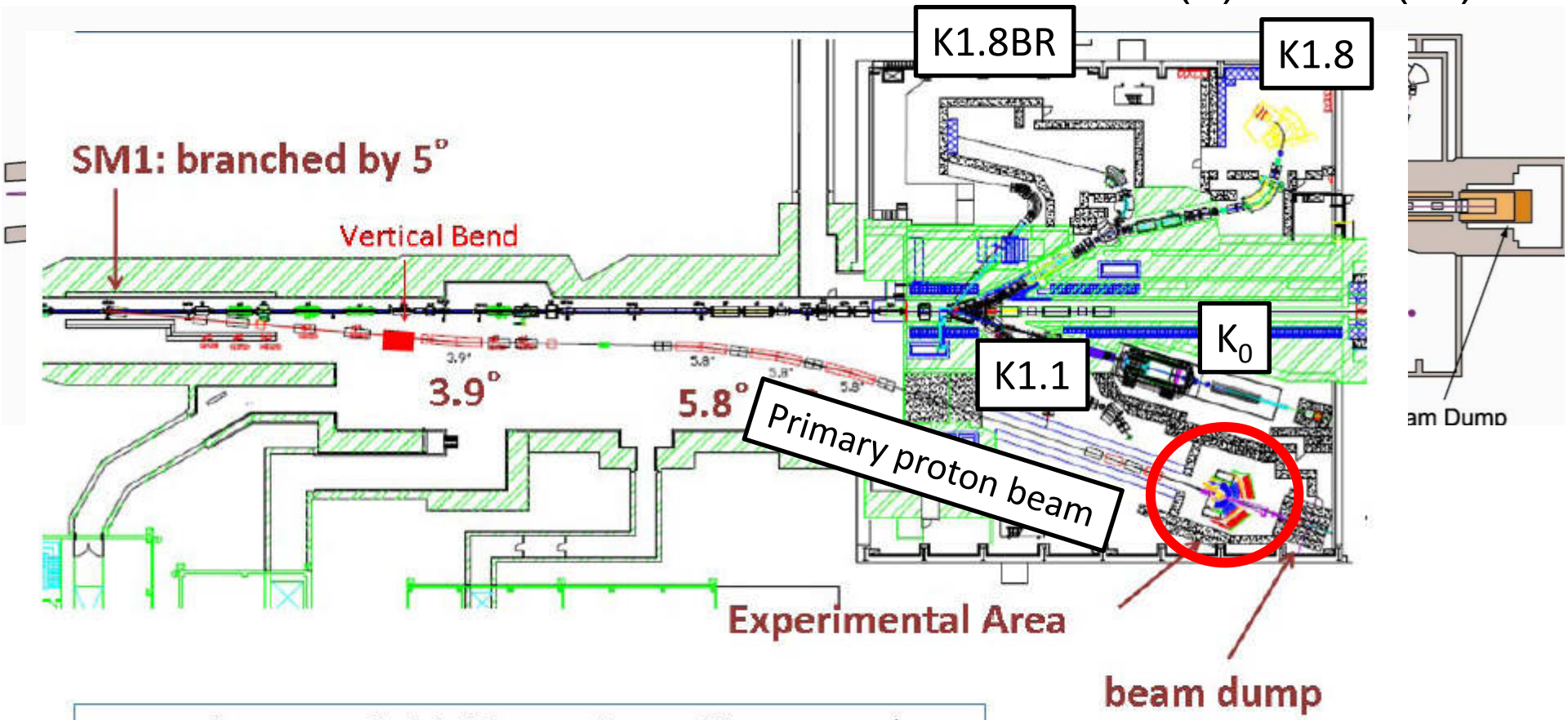


J-PARC E16 Collaboration

- RIKEN
  - S. Yokkaichi (spokesperson)
  - H. En'yo
  - F. Sakuma
  - K. Aoki
  - J. Kanaya
  - T. Takahashi
  - Y. Aramaki
  - D. Kawama
- Univ. of Tokyo
  - Y. Watanabe
  - Y. Komatsu
  - S. Masumoto
  - A. Takagi
  - W. Nakai
  - K. Kanno
- CNS (Univ. of Tokyo)
  - H. Hamagaki
- KEK
  - M.Sekimoto
  - S. Sawada
  - K. Ozawa
  - M. Naruki
  - R. Muto
- JASRI
  - A. Kiyomichi
- Hiroshima Univ.
  - K. Shigaki
- Kyoto Univ.
  - S. Dairaku

Beam Line

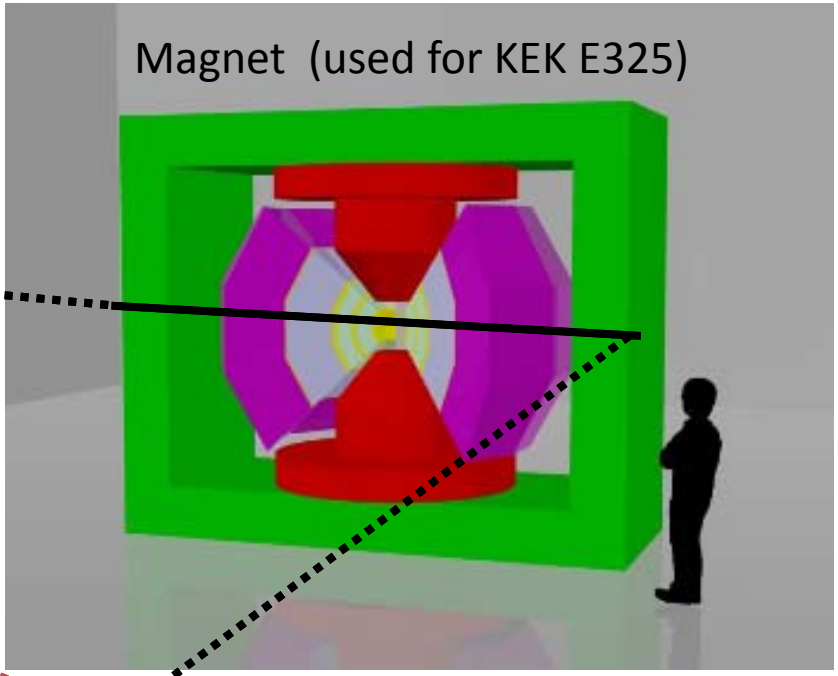
NP-HALL
56m(L) × 60m(W)

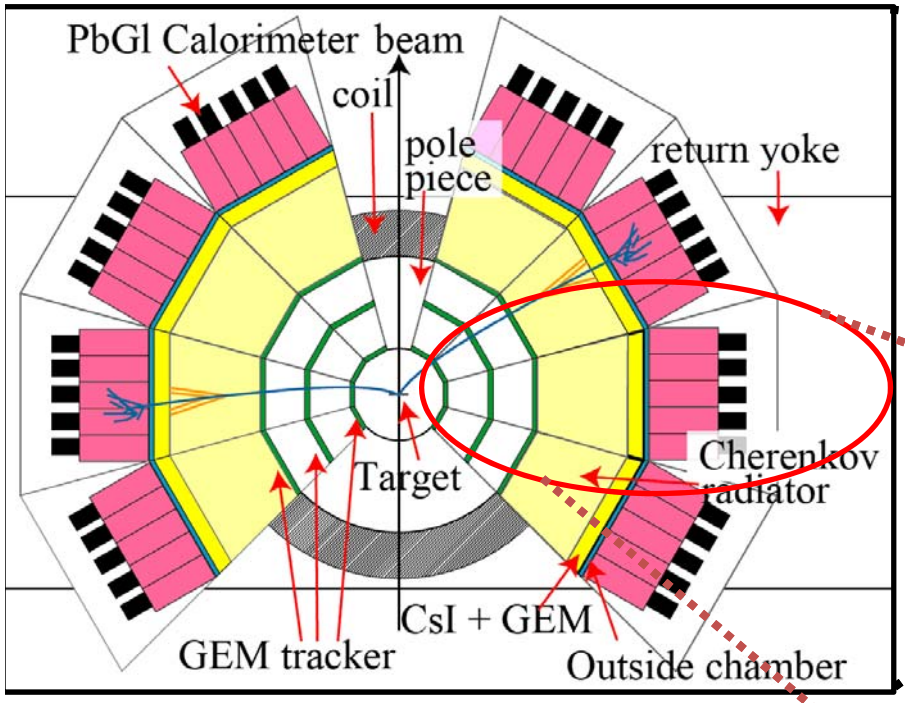


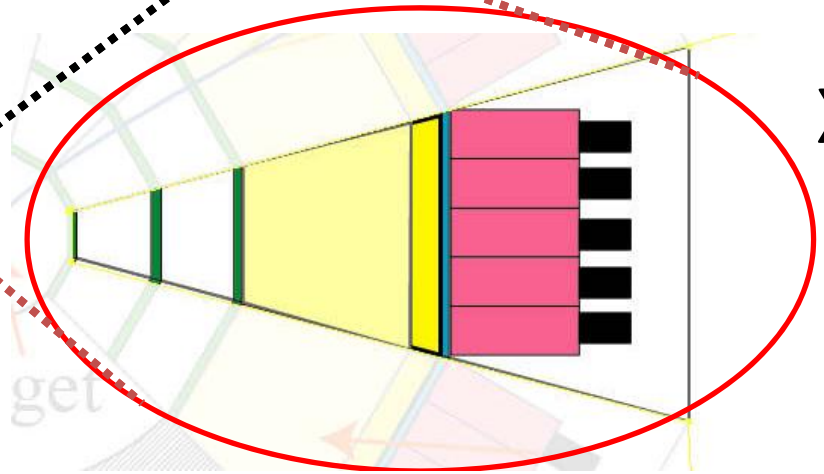
Beam dump and shields are for 10^{10} protons/s

by R. Muto

The J-PARC E16 spectrometer

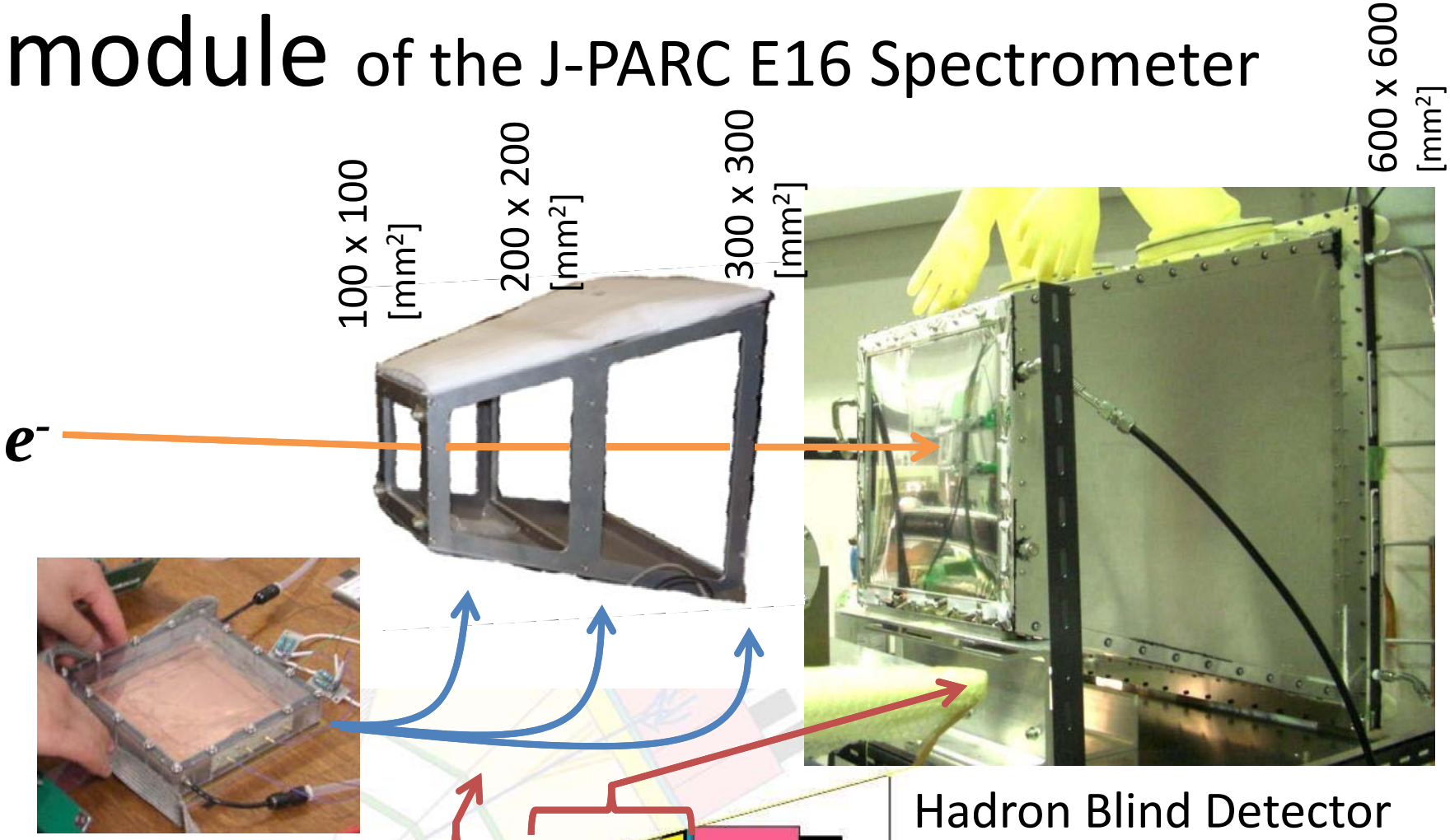






X 26

A module of the J-PARC E16 Spectrometer



GEM tracker

- 100 μm resolution
- 5kHz/mm2 rate capability

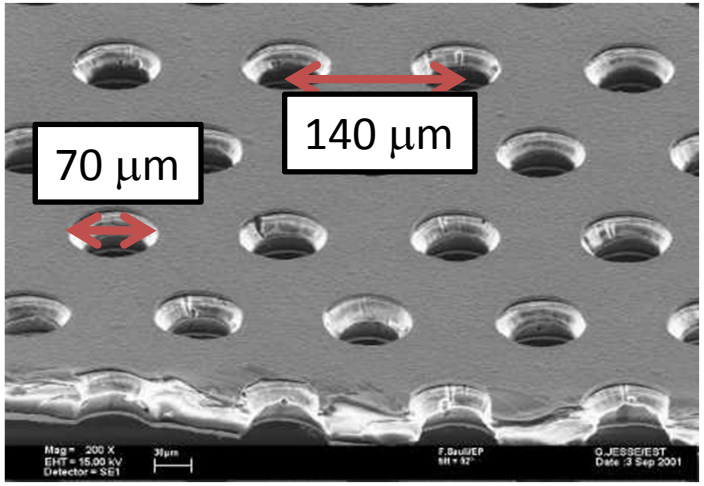
Hadron Blind Detector (Cherenkov Detector. CsI-GEM photocathode.)

Pion rejection x 100

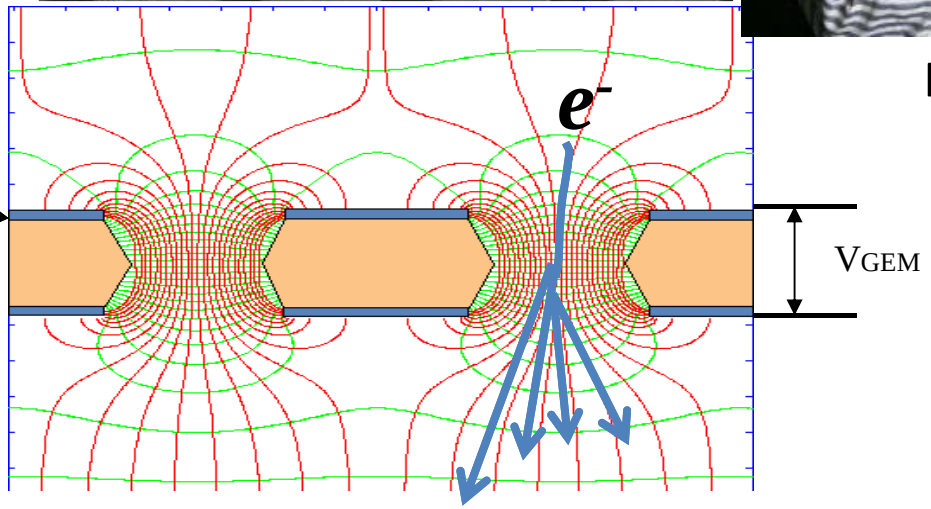
Pion rejection x 25

Gas Electron Multiplier (GEM)

- Mechanically it is a flexible circuit board with many holes.



F. Sauli (CERN)



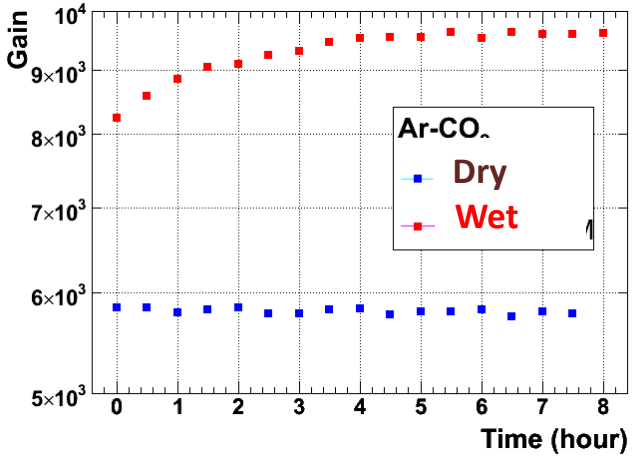
Electrode (Cu)

Insulator
(Kapton or LCP)
t = 50, 100μm or more..

Can be cascaded to obtain Higher gain.

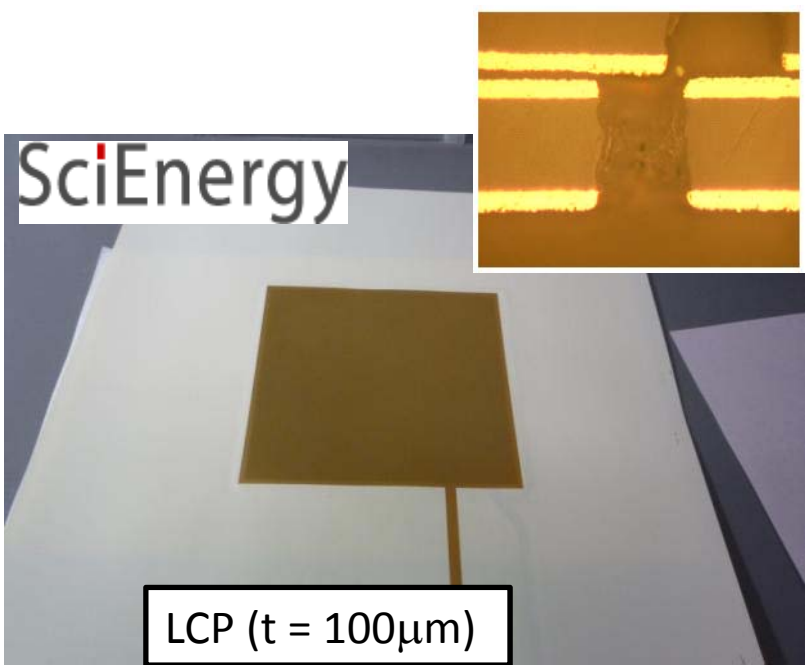
GEMs made in Ja

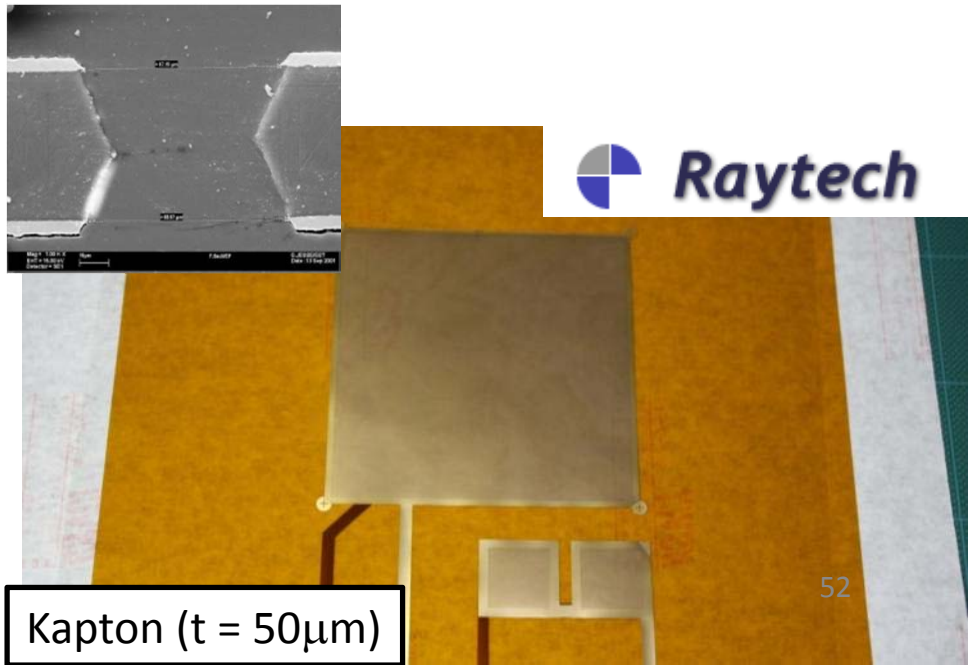
Two types. Both work



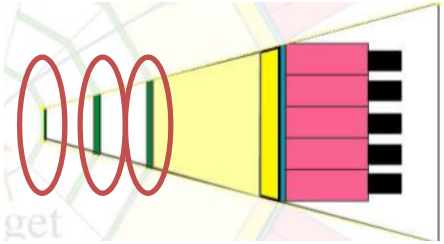
- Laser etching
- Heat-resistance <280 ℃
- Gain ~500 (420V/50μm CF_4)
- No gain rise

- Chem
- Heat-
- Gain ~10 (500V/50μm CF_4)
- Gain rise ~3hours.



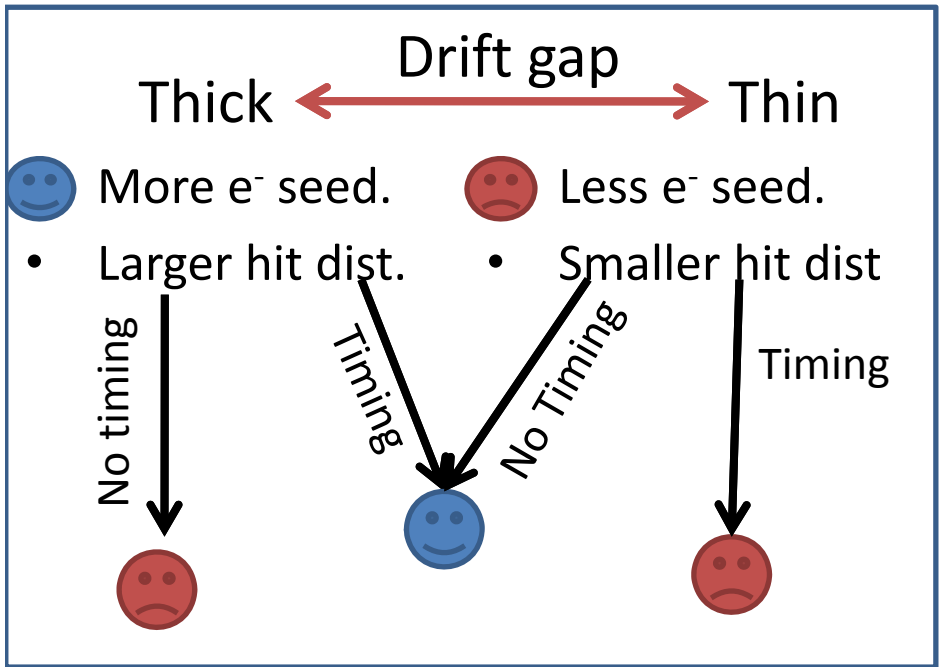


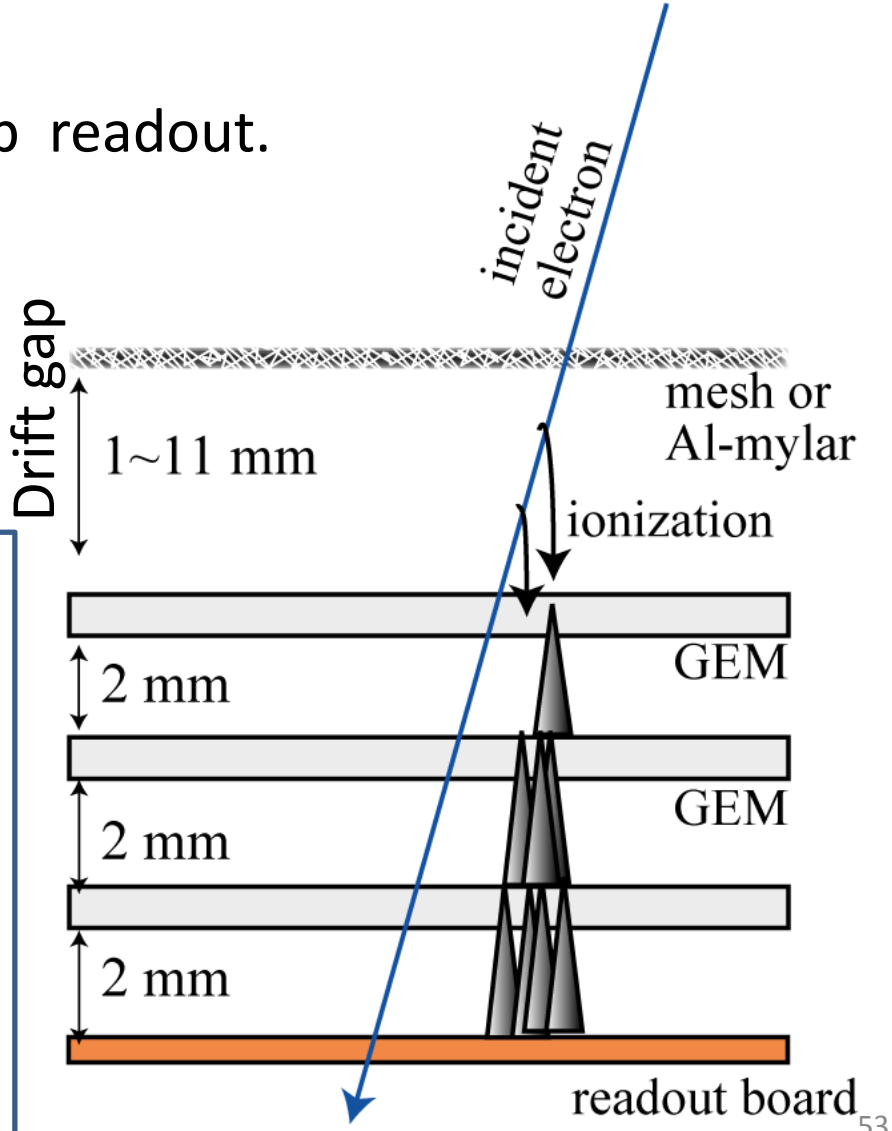
GEM Tracker



- Triple kapton-GEM
- Gas: [Ar / CO_2 (30%)]
- 700 μm or 350 μm pitch 2D strip readout.

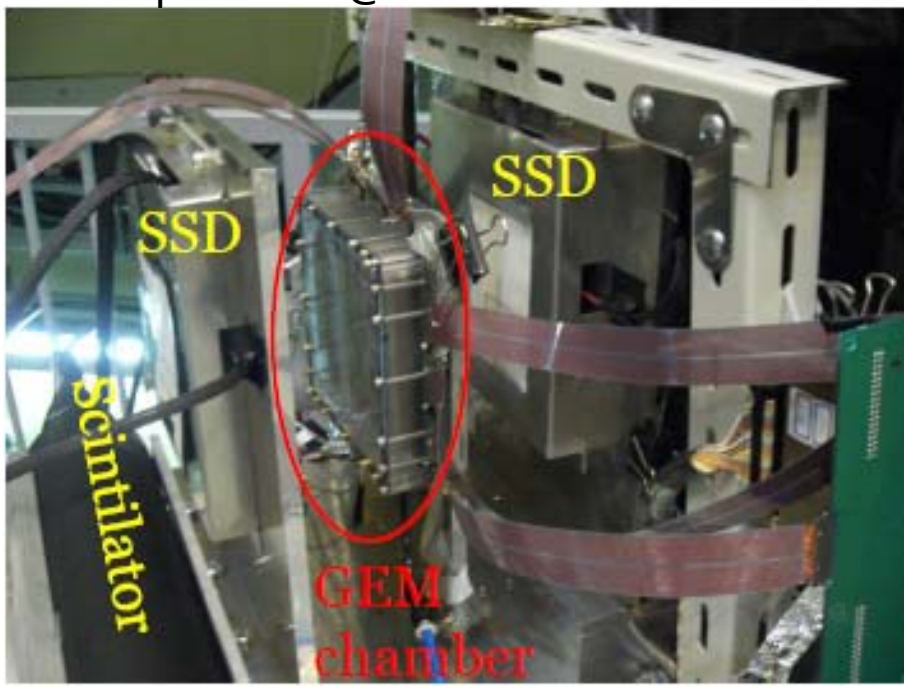
- 100 μm resolution is required.
  For 0 ~ 30 deg incident angle.

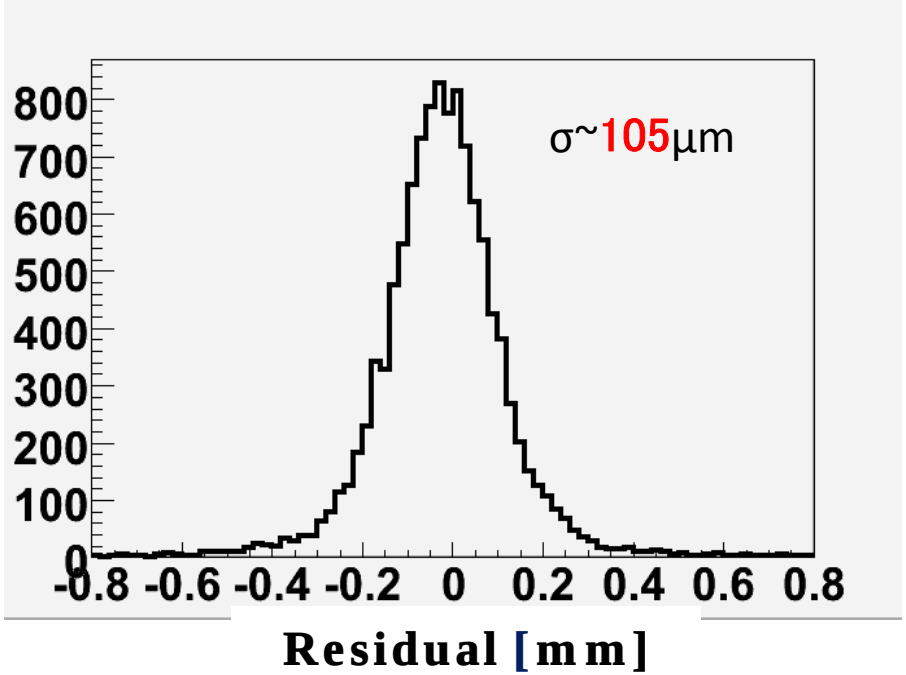




GEM tracker
test results @ KEK, Tohoku Univ.

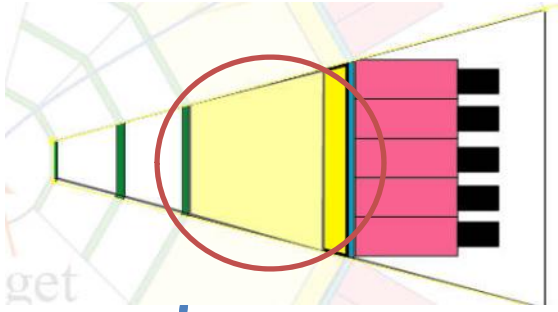
Test experiment @ KEK.



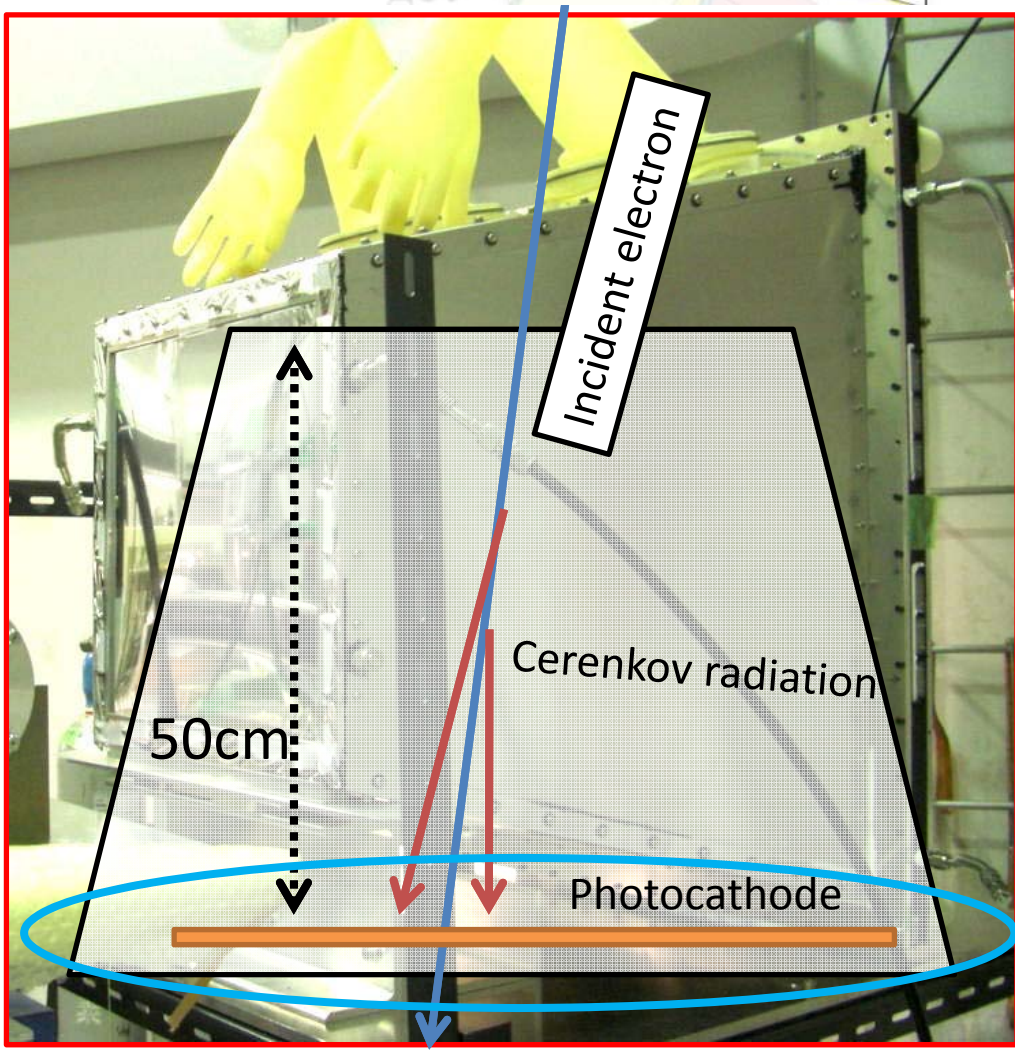


- Required resolution (100μm) is achieved for 0, 15 deg.
- ~170μm is achieved for 30 deg.
  - Drift gap = 6mm, 350μm pitch readout, timing information.
  - Effect on mass due to angle dependence is under study.
    - Degradation of mass resolution is small.

Hadron Blind Detector (Gas Cerenkov detector)



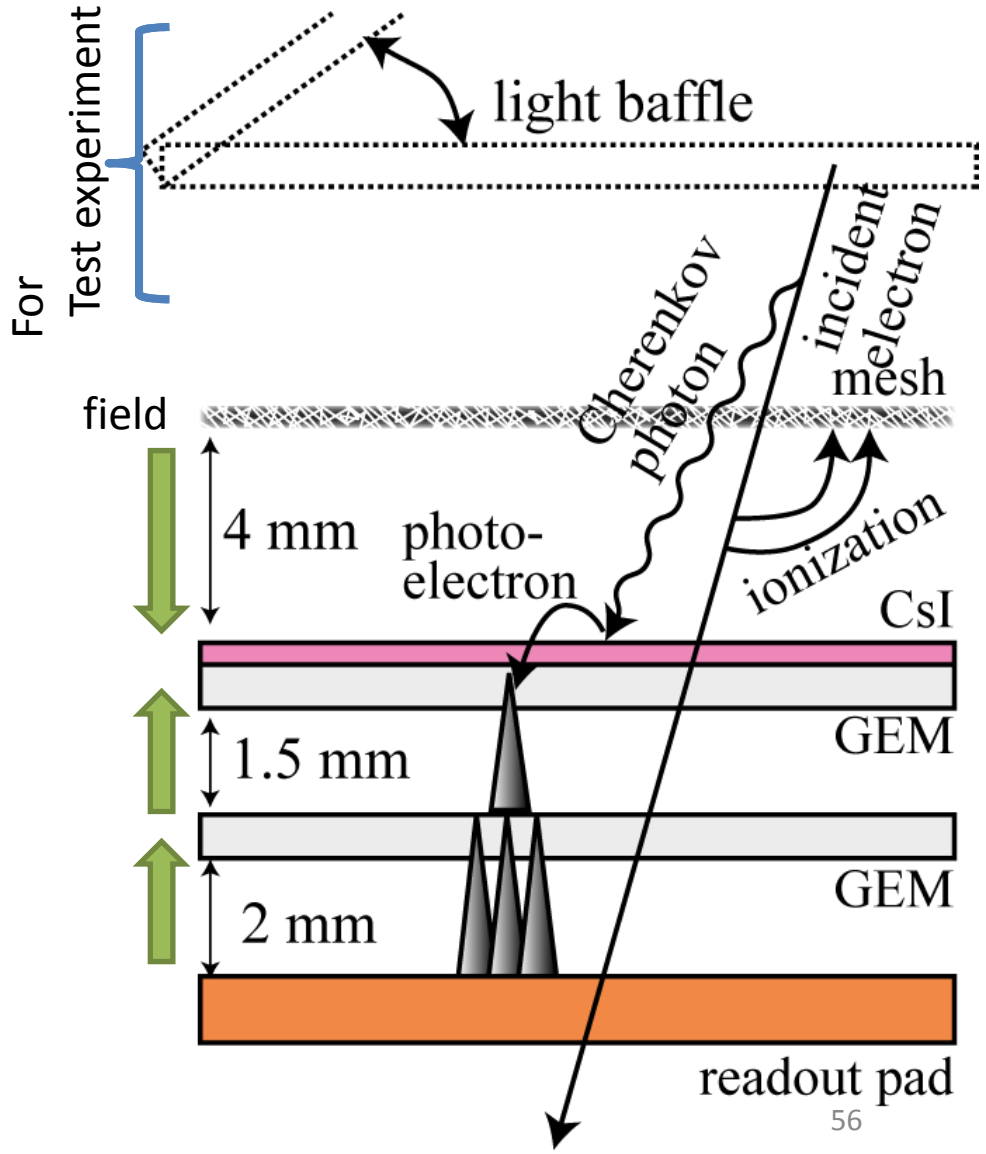
- **CF_4** gas
  - Cerenkov radiator
    - index = 1.0006
    - π threshold = 4 GeV/c
    - Photoelectron ~22 achieved at PHENIX experiment.
  - Amplification gas
    - ***Windowless***
- Photocathode covers the bottom of the detector.
  - ***Mirrorless***
- Windowless, mirror less
  - No complicated optical design
  - Small dead area for large coverage



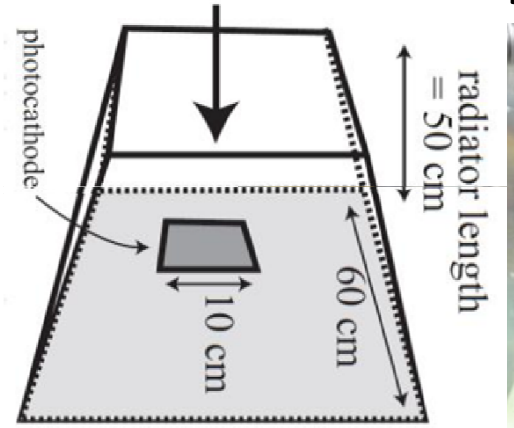
Photocathode of HBD.

- Gas Electron Multiplier (**GEM**) for amplification
- **CsI** is evaporated on top GEM
  - Photocathode (> ~6eV)
- **Reverse bias field** is applied to sweep out electrons from ionization.
  - e : ionization, Cerenkov
  - π (<4GeV): ionization only.

→ Hadron Blind.



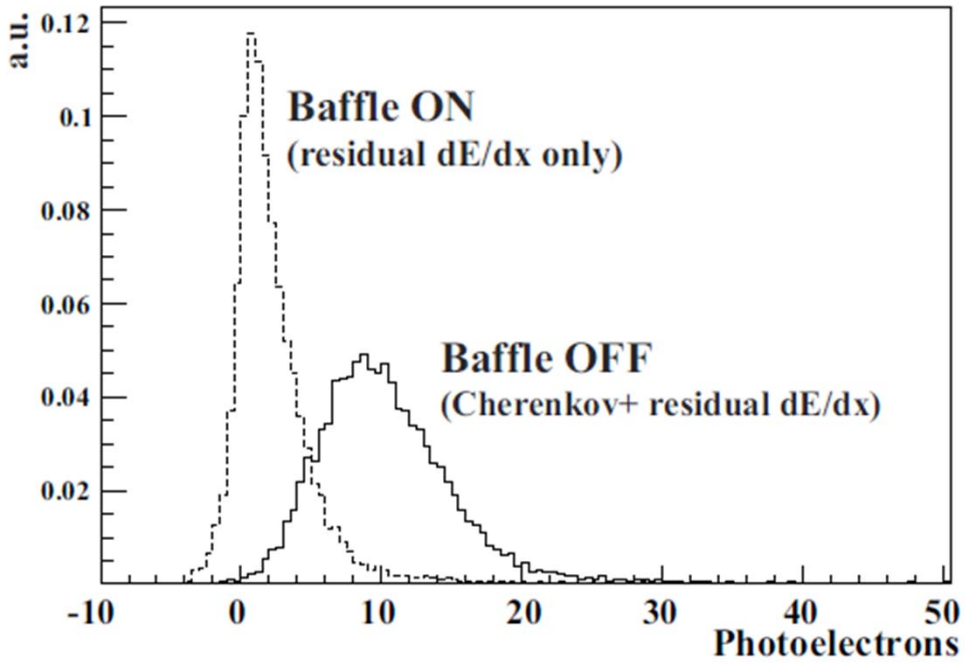
Photograph of HBD prototype Vessel and glove box at the same time.



The results of the test experiment

- Difference between charge dist. with and without the light baffle
  - Cherenkov radiation!
  - ～10 photoelectrons
  - HBD works!

– However, needs more..



- Threshold at 16 p.e. leads to Rejection Power (RP) 100 which is needed.
- Threshold at 10 leads to RP= 50. (eff= 50%)
- (cf) PHENIX ～20 p.e.

Status

- J-PARC PACにてstage-1獲得(2007)
- stage-2を取るべく、検出器の最終的なR&Dを進めている
  - Experimental feasibility review
  - budget (grant-in-aid $2.5M in hand. More $2.5M….)
  - Prospects for beam line
- Detector R&D
  - GEM tracker
    - 分解能は大丈夫そう
    - Larger size (100x100, 200x200 → 300x300mm^2) : on-going
  - Hadron Blind Detector (HBD)
    - Prototype successfully detect Cherenkov radiation.
    - Improvement in QE : on-going.
    - Larger size (100x100 → 300x300mm^2) : on-going
  - Lead-Glass Calorimeter (EMCAL)
- スペクトロメーターの最終デザインは今年度決定予定

E16実験でφ→K^+K^-測定も

●J-PARC E16 実験

→ 核媒質中でのφ中間子の質量変化を電子対を用いて調べる

φ中間子に関する話題

✓ レプトン対スペクトラムにおける質量変化

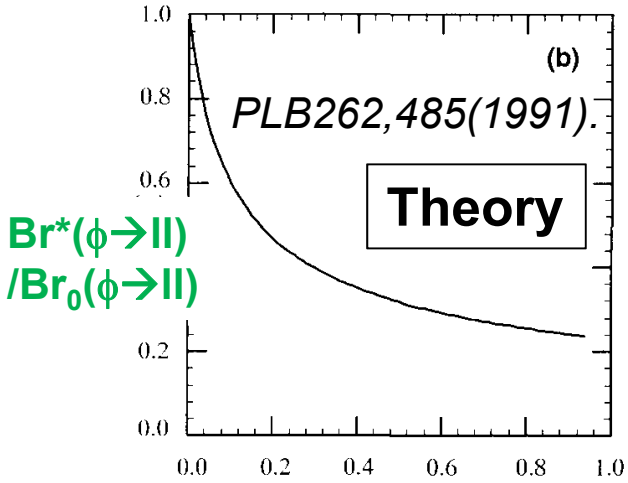
✓ $Q_{\varphi\to K^+K^-}$が小さい(32MeV/c^2)ことにより、φ/K中間子のスペクトル変化が崩壊幅に影響を及ぼす,

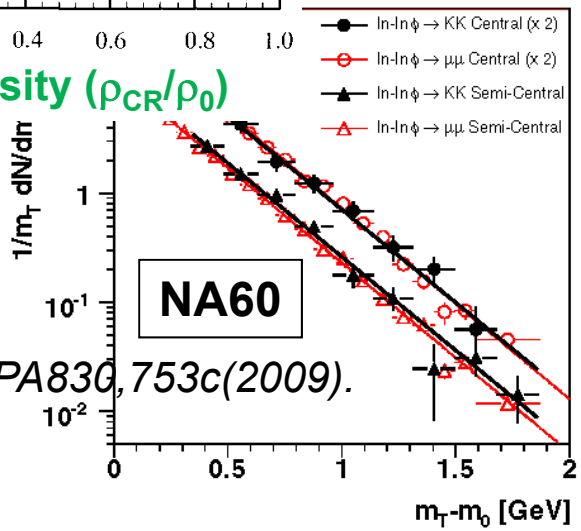
i.e., $\Gamma_{//}$ vs Γ_{KK} [φパズル]

●e^+e^-測定に加えてK^+K^- 測定も行うことは、核媒質中でのφ/K中間子の性質を調べる上で非常に重要となる

E16実験における ハドロンスペクトロメーター の導入を考える

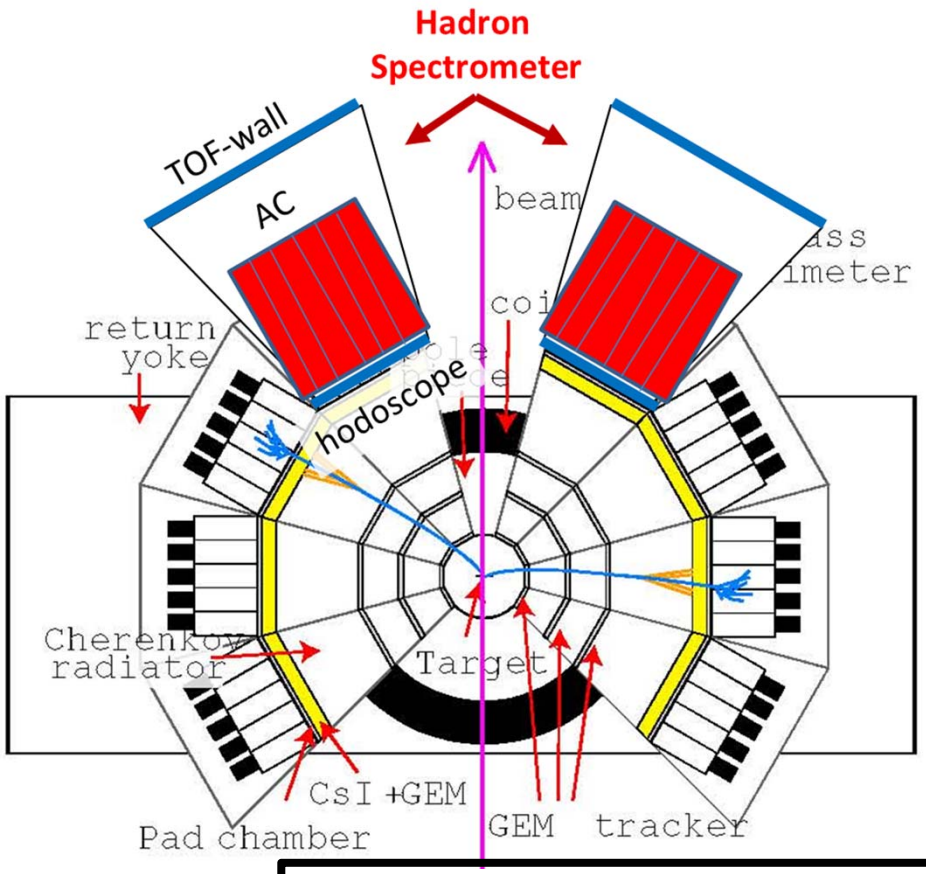
φ/K中間子のスペクトラム変化に起因する、φ→ℓℓ / KK の崩壊幅の変化?

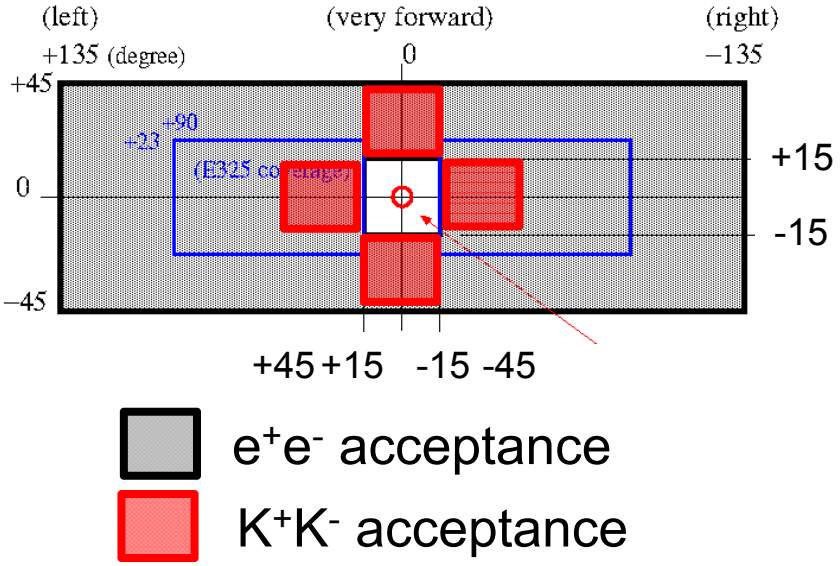




- AA反応(高温側)での結果は否定的。
- pA反応(通常核密度)では?

E16ハドロンスペクトロメーター・アップグレード





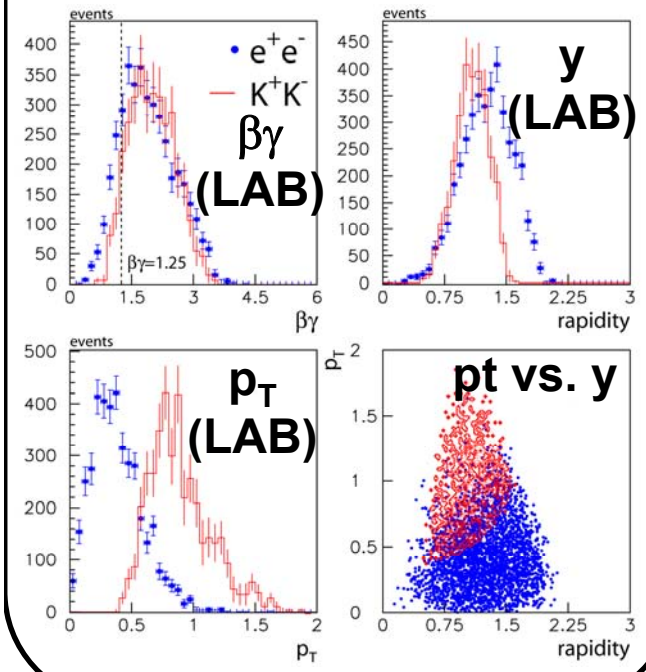
--- K中間子同定検出器に対する要求 ---

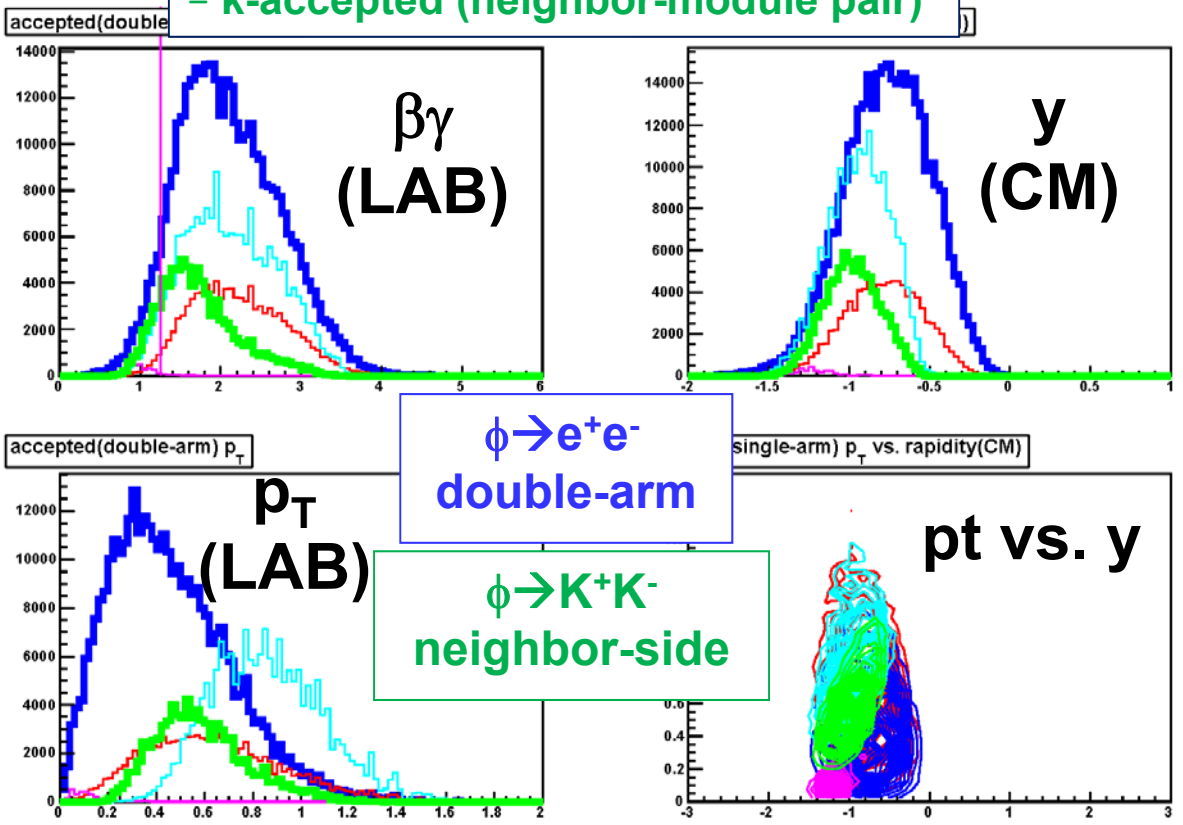
1. **KKトリガーを生成する、閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器 (veto counter)**
2. **磁場中で動作**
3. **小さく、コンパクトな分割型検出器**

$\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ acceptance

- e-accepted (double-arm)
- e-accepted (single-arm)
- k-accepted (opposite-module pair)
- k-accepted (same-module pair)
- k-accepted (neighbor-module pair)

E325 acceptance





$\phi \rightarrow e^+e^-$ double-arm

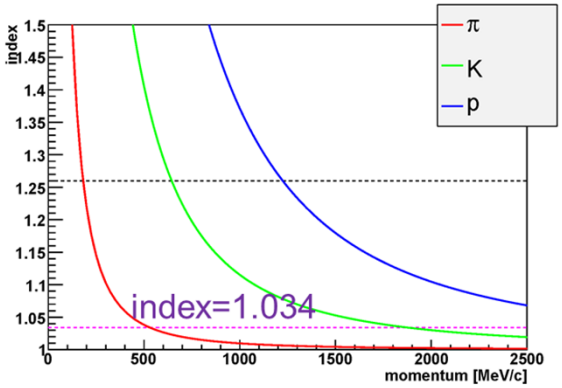
$\phi \rightarrow K^+K^-$ neighbor-side

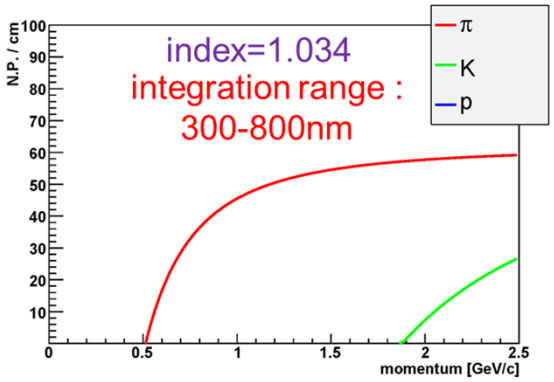
Improvement of the acceptance overlap between e^+e^- and K^+K^-

エアロゲル・チェレンコフ検出器

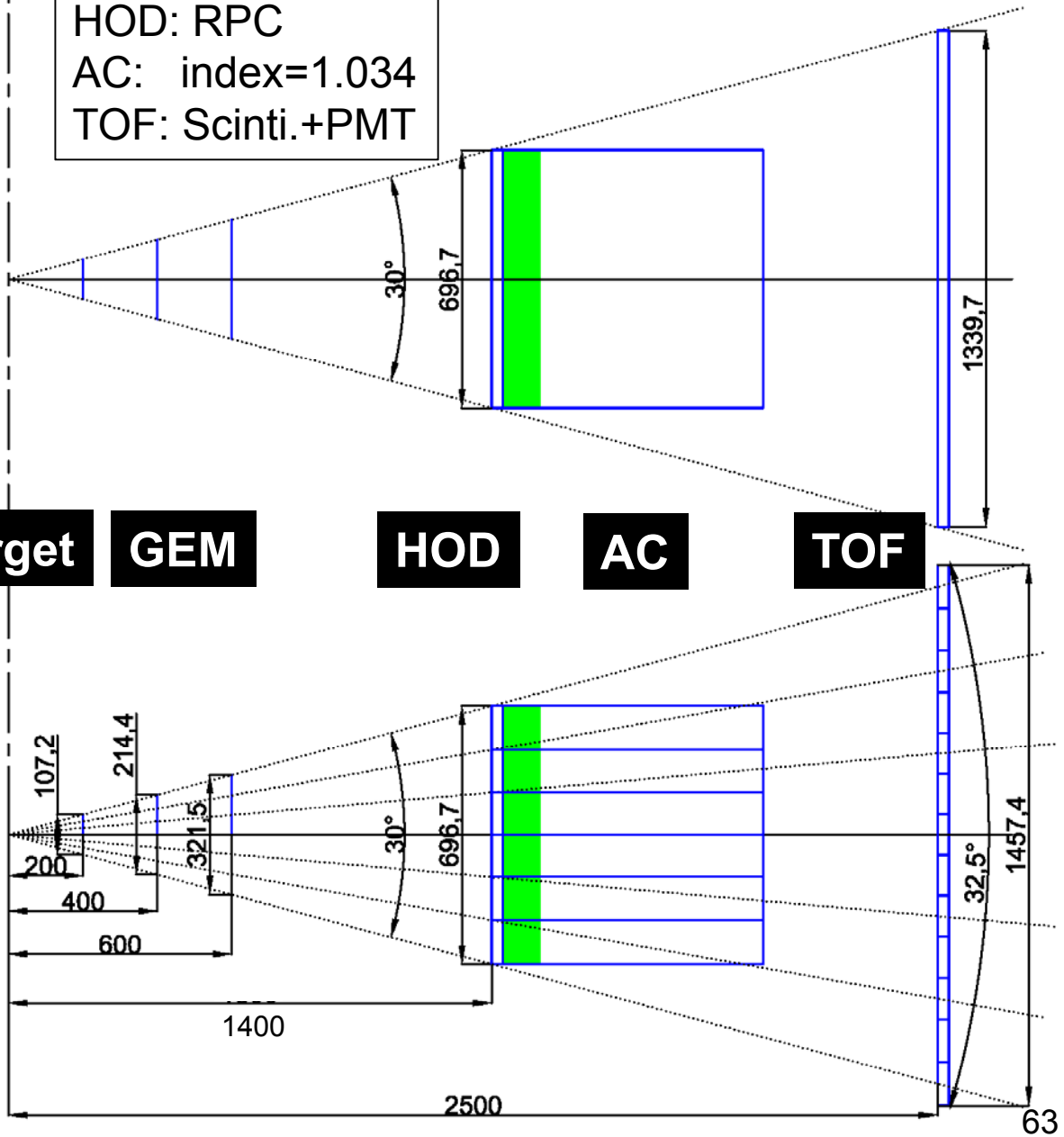
エアロゲル・チェレンコフ検出器

- ✓ KEK-PS E325実験と同じn=1.034を使用
- ✓ 70x70cm^2 を6つに分割
- ✓ 3インチFM-PMT(R5543)を使用

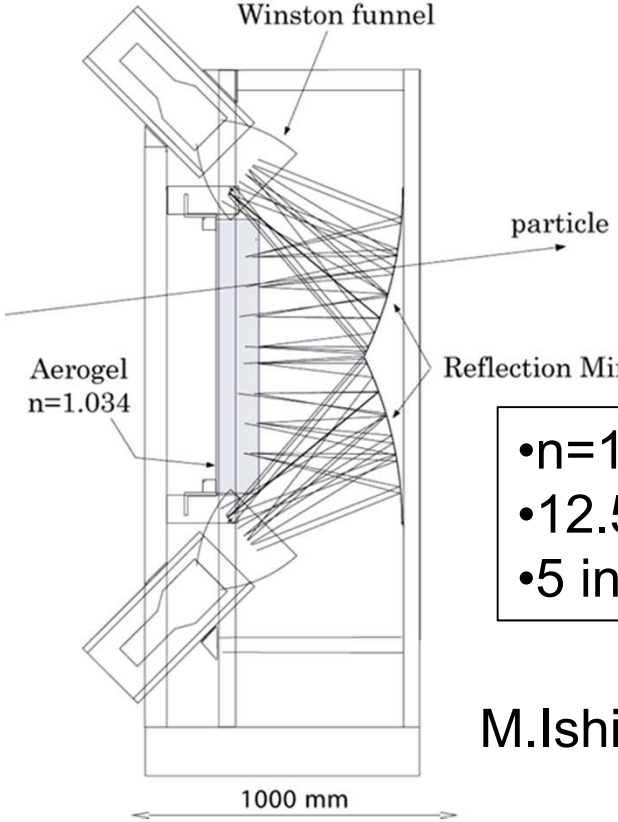


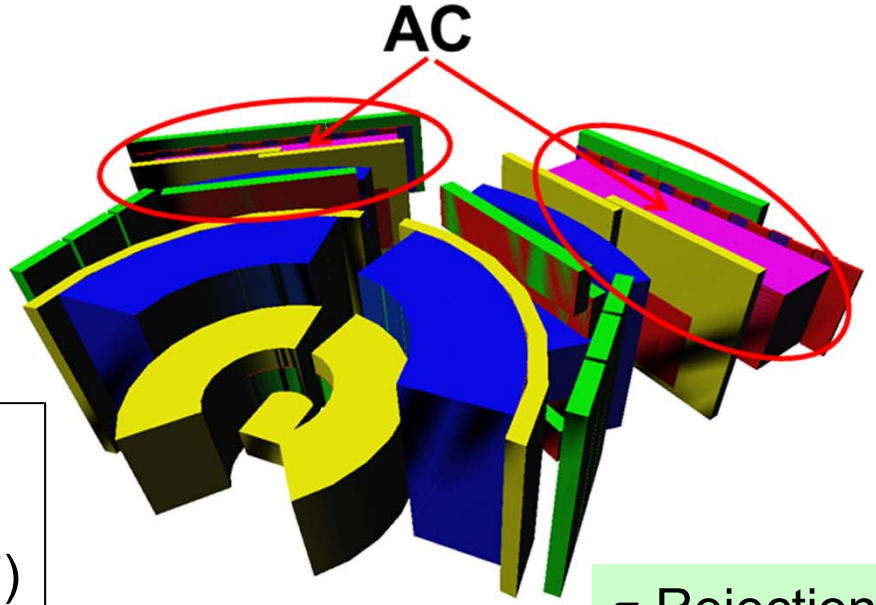


HOD: RPC
AC: index=1.034
TOF: Scinti.+PMT



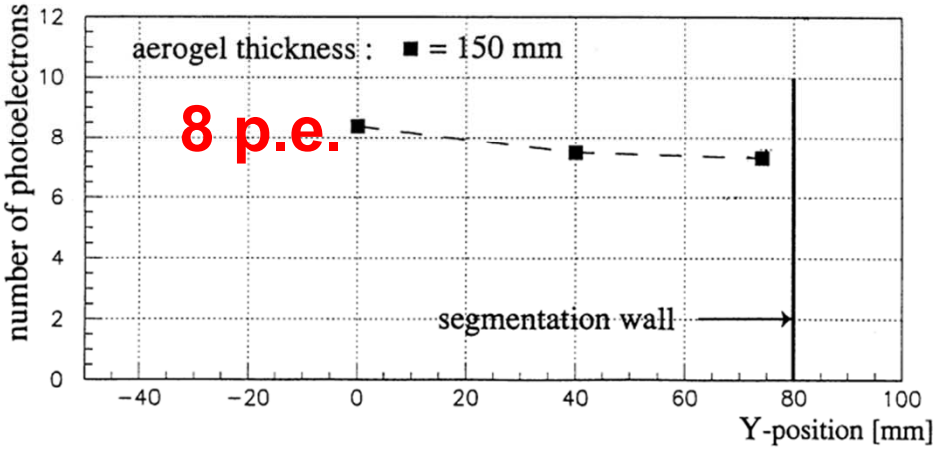
Minimum Goal : KEK-PS E325 AC

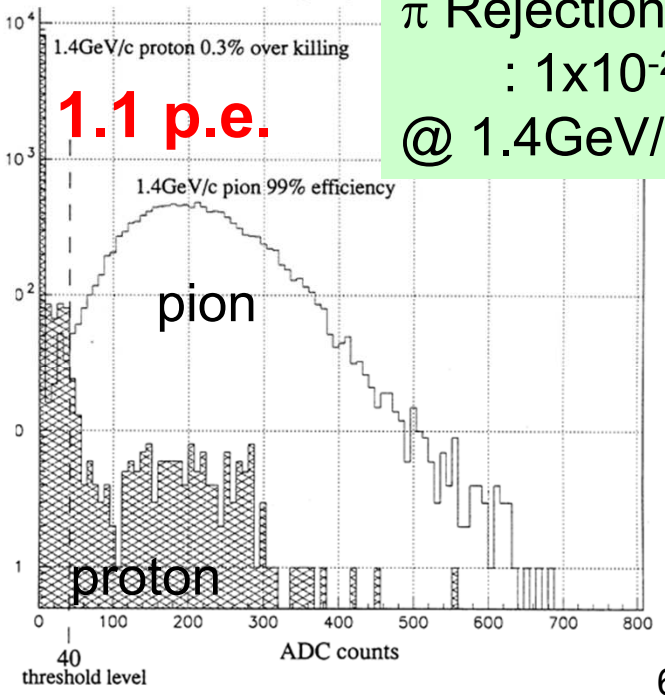




- n=1.034
- 12.5cm Aerogel
- 5 inch PMT (H6527)

M.Ishino *et al.*, NIM **A457**, 581



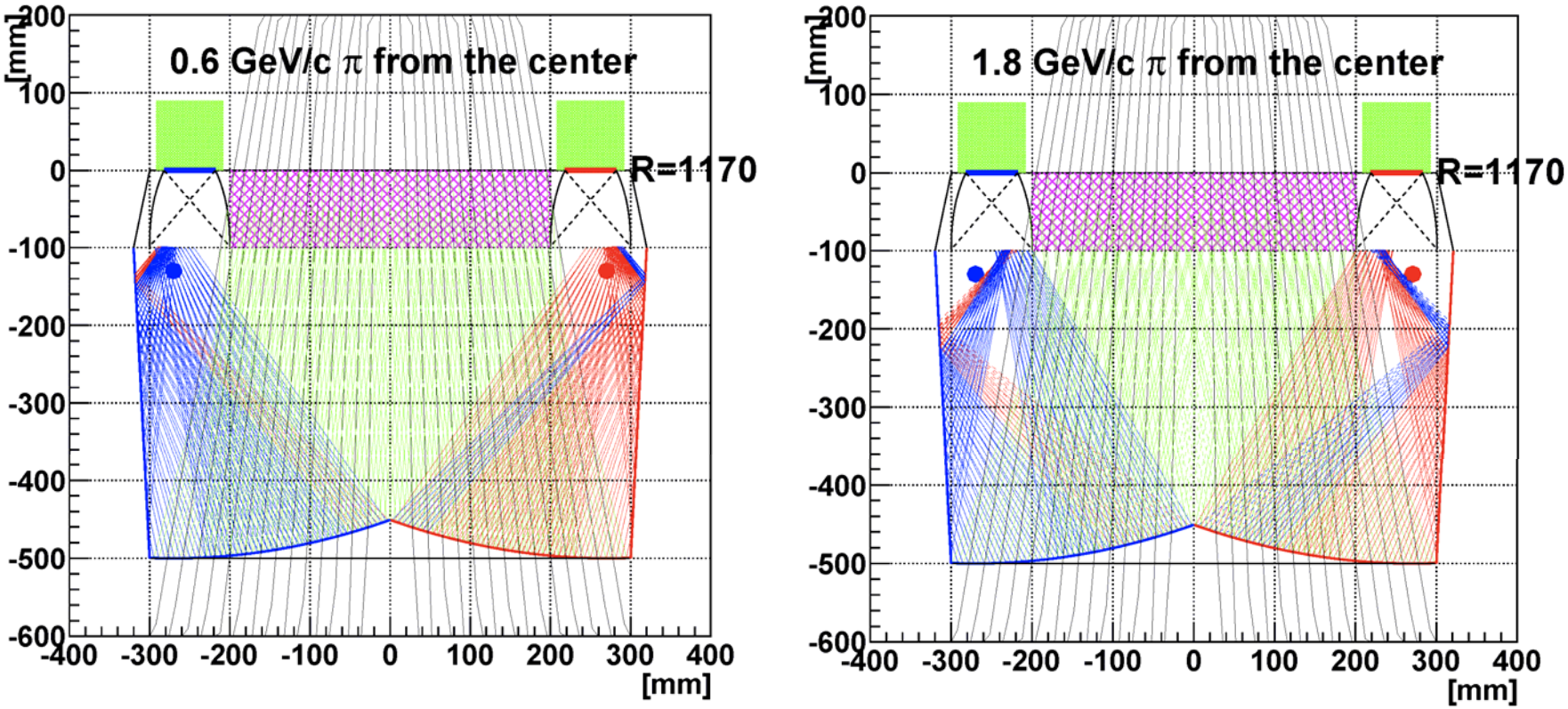


π Rejection
: 1×10^{-2}
@ 1.4GeV/c

エアロゲル・チェレンコフ検出器の光学計算

まずは、小型プロトタイプで性能評価

K中間子の運動量0.6~1.8GeV/cで集光率100%を目指す。(小型化が課題)

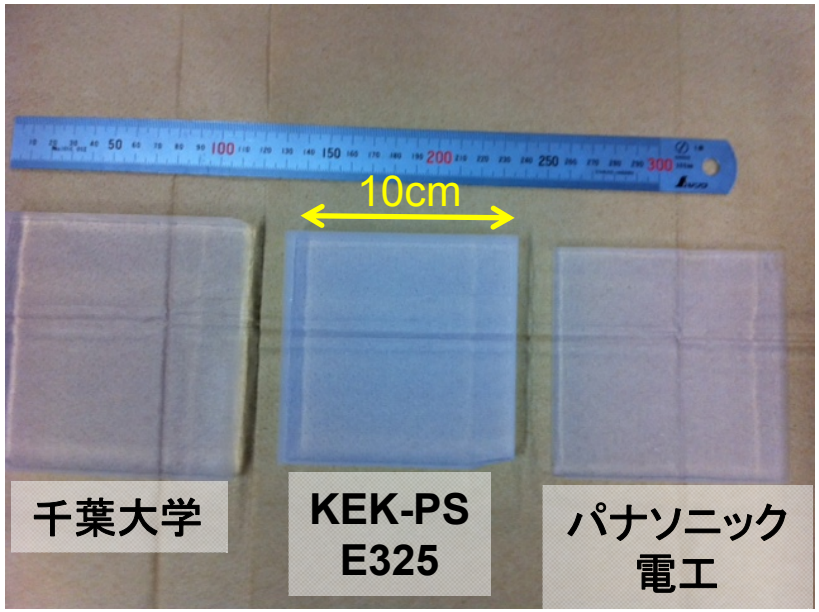


parabolic mirror + flat mirror + Winston Cone

用いたエアロゲルとプロトタイプ

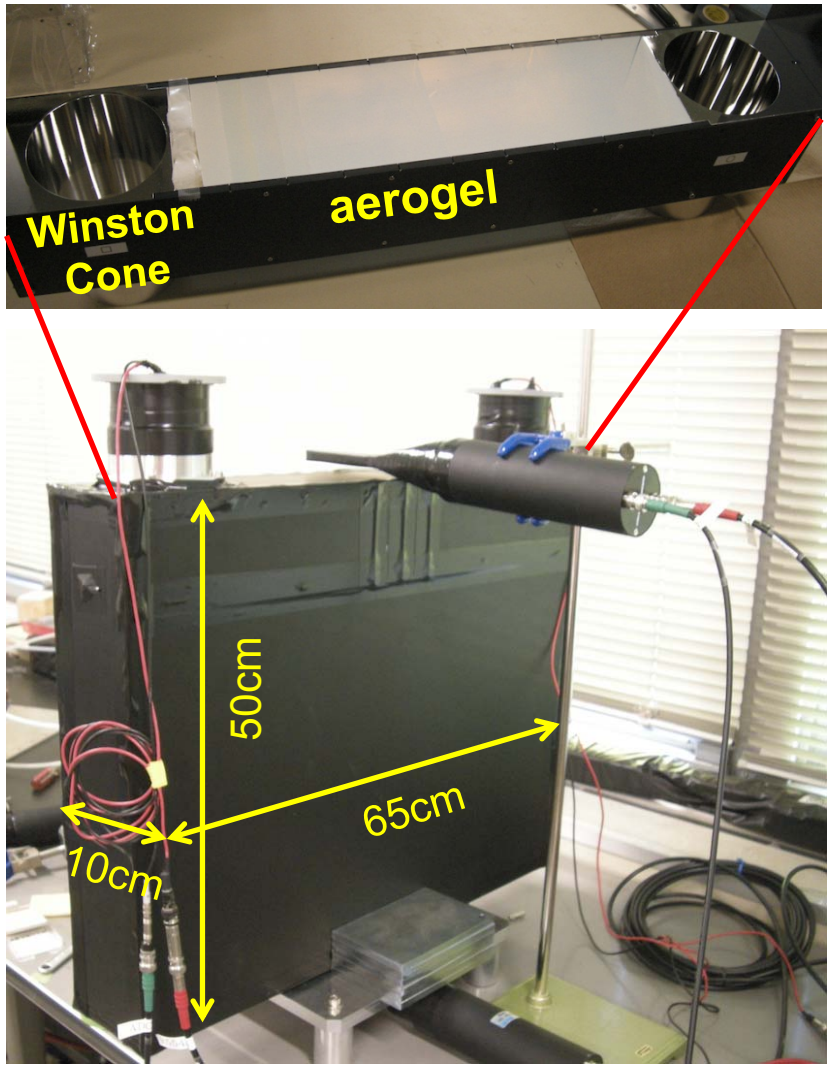
3つのエアロゲルで性能評価:
(n~1.034):

- ●千葉大学 ← この結果を報告
- ●KEK-PS E325
- ●パナソニック電工



Transmission length @400nm

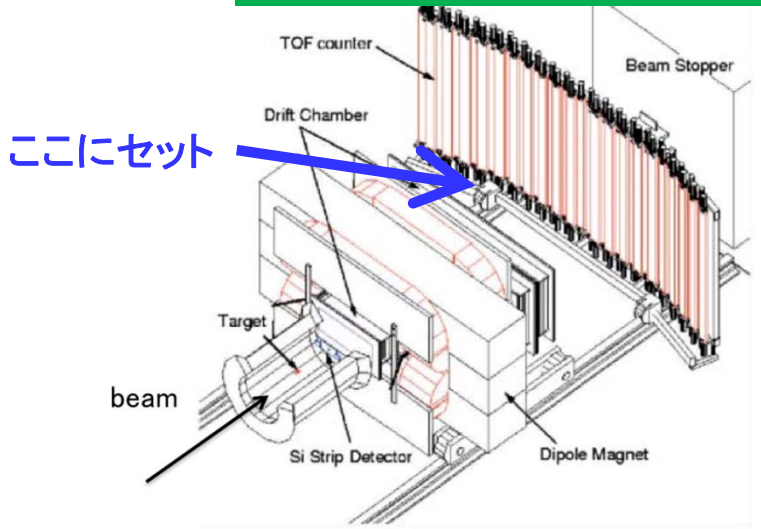
千葉大学	KEK	パナソニック
65±2mm	25±4mm	21±2mm

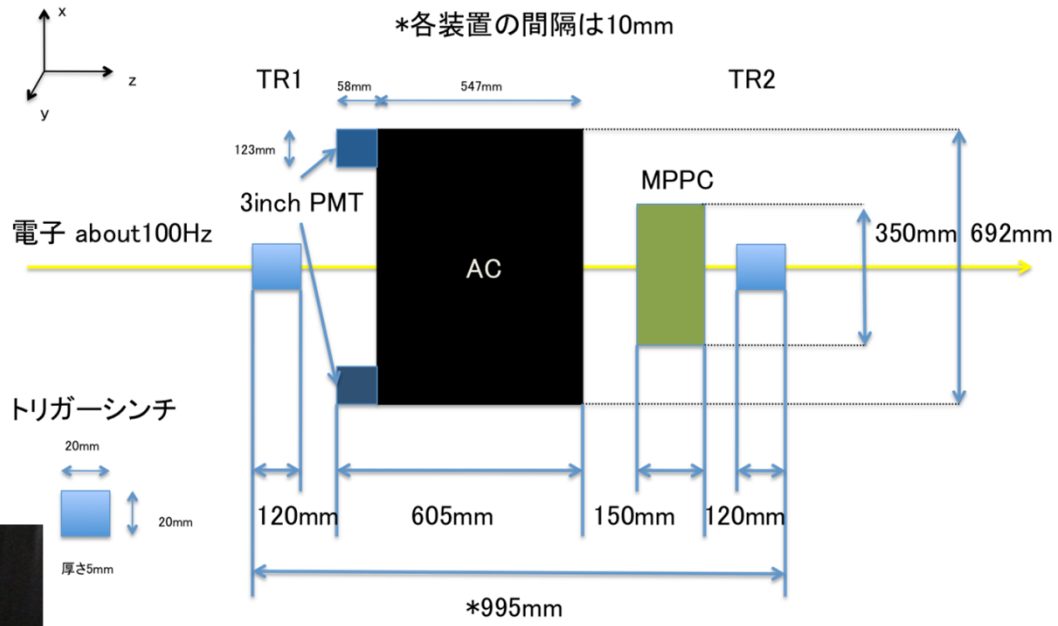


千葉大エアロゲル:PMTのQ.E.とtrans. len.の掛け合わせからは、L=11cm/β=1の時に# of p.e. ~ 34が期待される

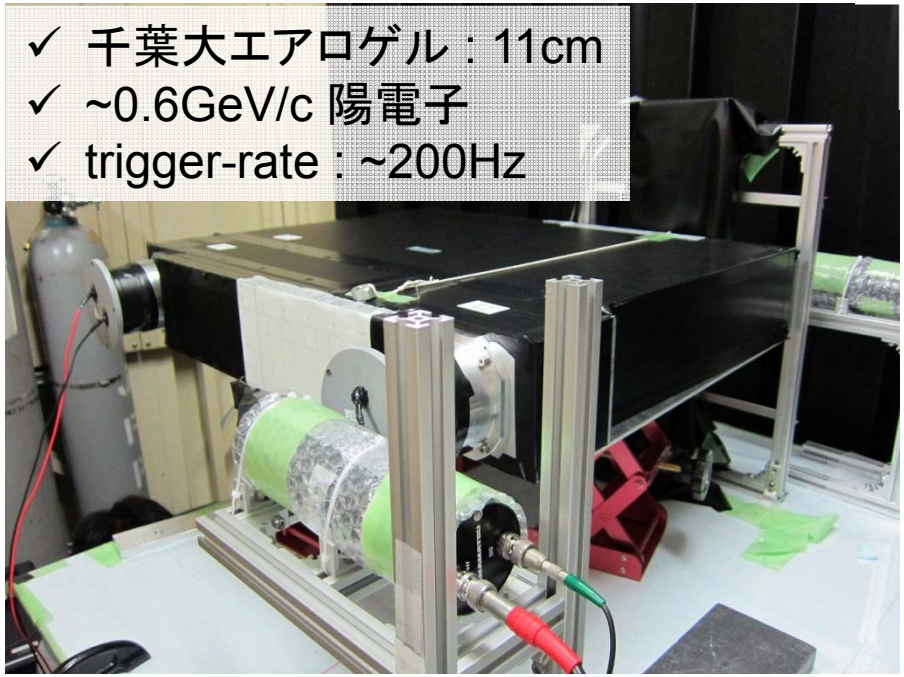
SPring-8/LEPSでのテスト実験

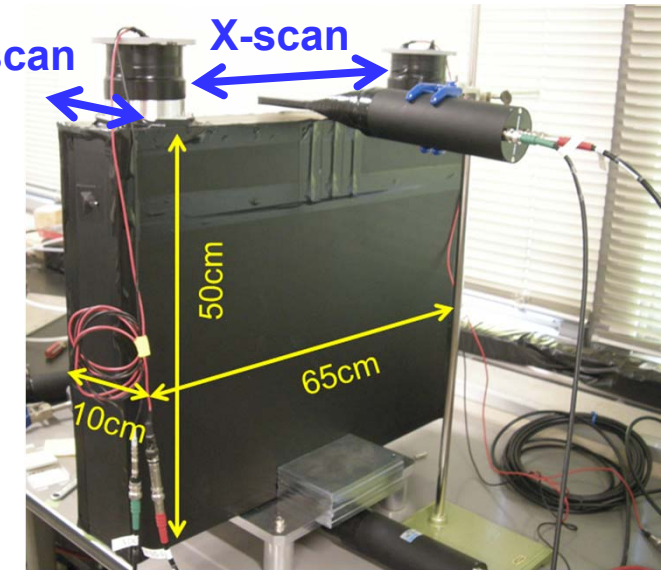
光量/効率の入射位置依存性を見ることが主な目的



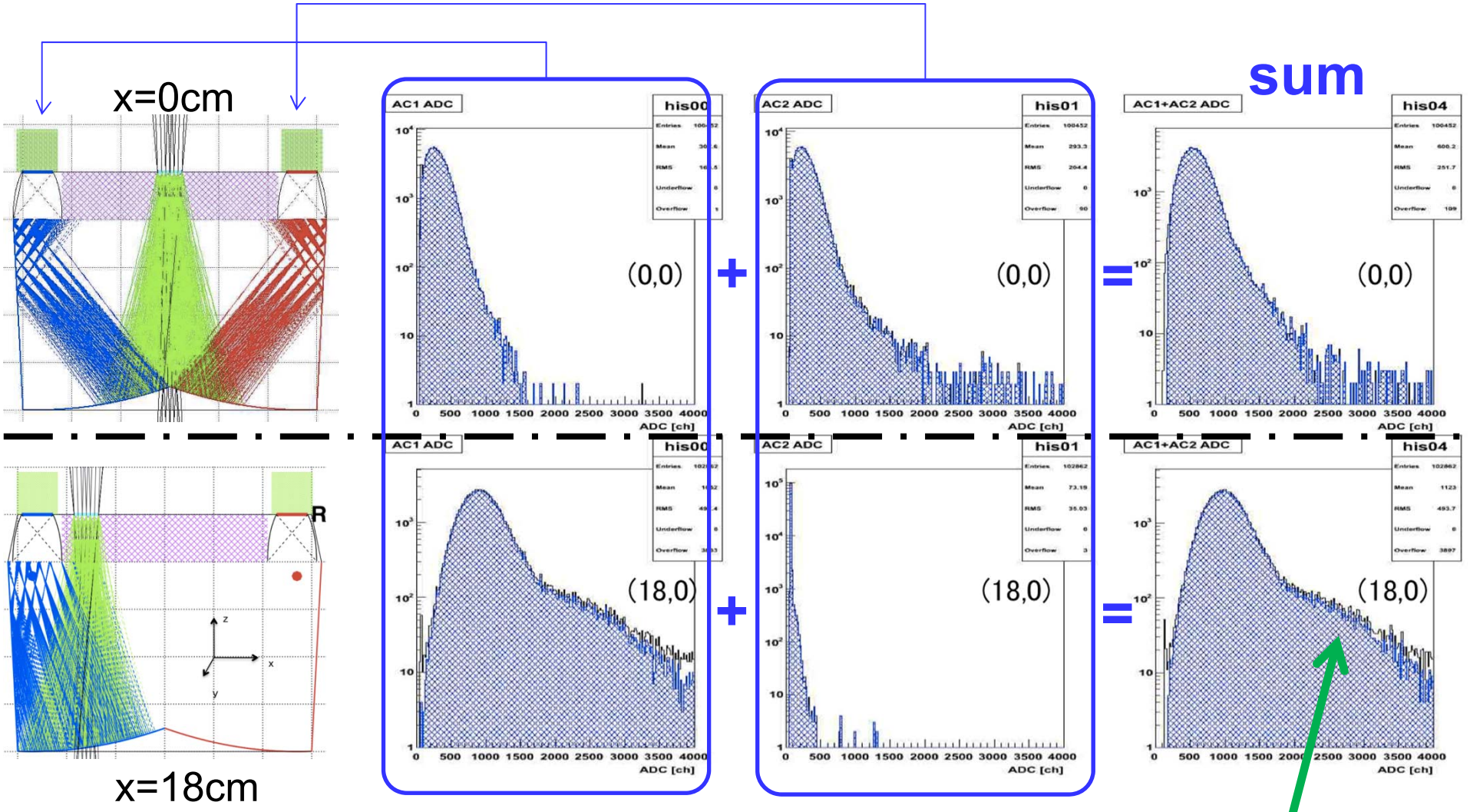


- ✓ 千葉大エアロゲル：11cm
- ✓ ~0.6GeV/c 陽電子
- ✓ trigger-rate : ~200Hz





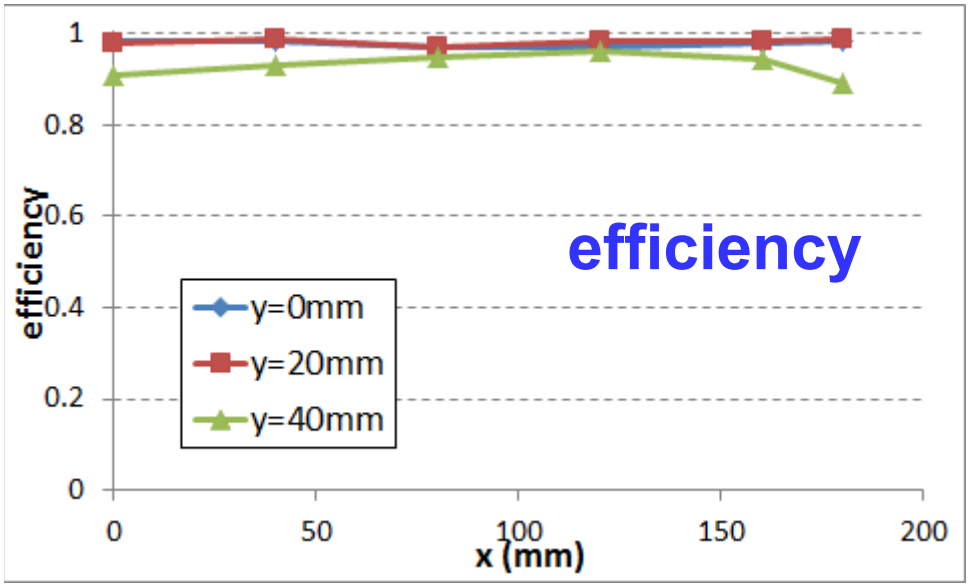
例)ADCスペクトラム

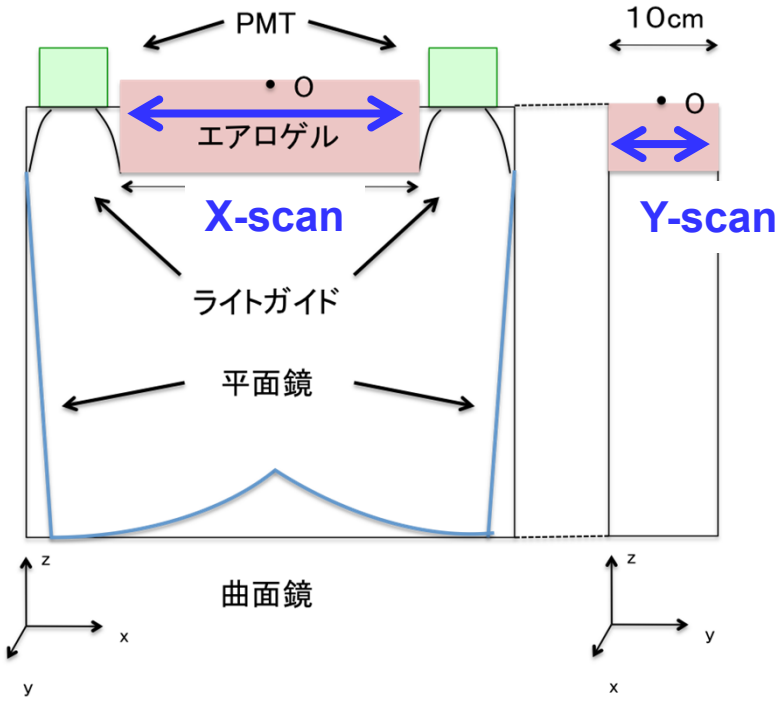


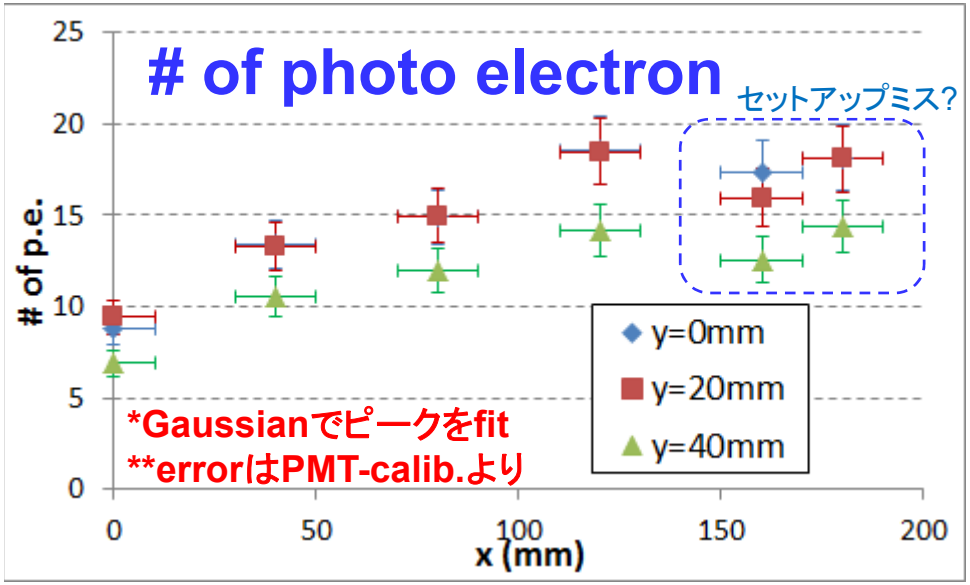
- Gainで横軸をp.e.に直して光量を得る
- どちらかのPMTに1p.e.相当以上の光量がある場合をhitと見なす。

10%程度、2track以上が1eventに混入？

効率/光量の位置依存性







- y=0/20ではeff.>95%を達成。しかしy=40で90%程度まで低下。ウィンストンコーンの開口率が問題か?
- y=0/20では~10p.e.以上を達成。しかしy=40の時は2/3程度まで低下。
- 中心部分ほど光量が低下する。反射回数が多くなるためだと思われる。

J-PARC E16実験のまとめ

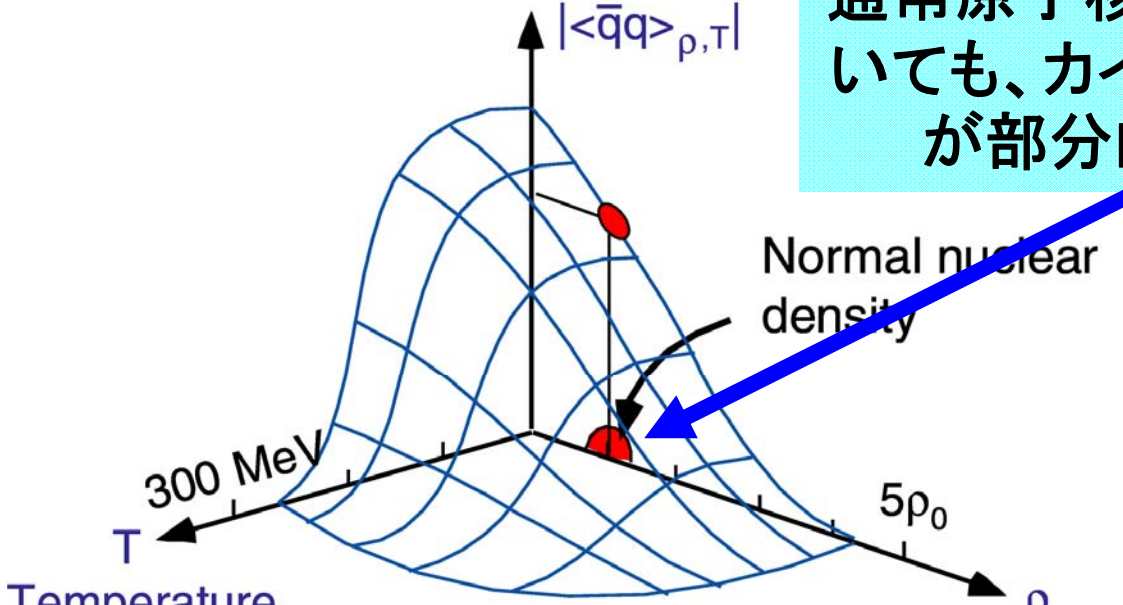
- 世界最高の質量分解能と高統計なデータを用いて、通常原子核密度下における**ベクトル中間子質量への核物質効果**を検証する
  - ✓ $\phi \rightarrow e^+e^-$測定が主な目的
  - ✓ E325実験結果に比べて
    - ➢ 100倍の統計
    - ➢ 2倍の質量分解能
  - ✓ 質量変化の運動量依存性、原子核依存性など

- 2014年頃から実験が始まる予定であり、現在検出器の最終R&Dが進められている

- $\phi \rightarrow K^+K^-$測定も行うべく、エアロゲル・チェレンコフ検出器導入準備を進めている (2016?-)
  - ✓ ハドロン測定が可能になる
  - ✓ 多目的スペクトロメーターとして、様々な物理が展開可能

その他、ベクター中間子を用いる実験@J-PARC (2014?-)

通常原子核密度下においても、カイラル対称性が部分的に回復



W.Weise NPA553,59 (1993)

Other scientific programs at J-PARC

H. Ohnishi J-PARC E29
K 1.1 beam line

ϕ Bound state :
Missing mass spectroscopy.

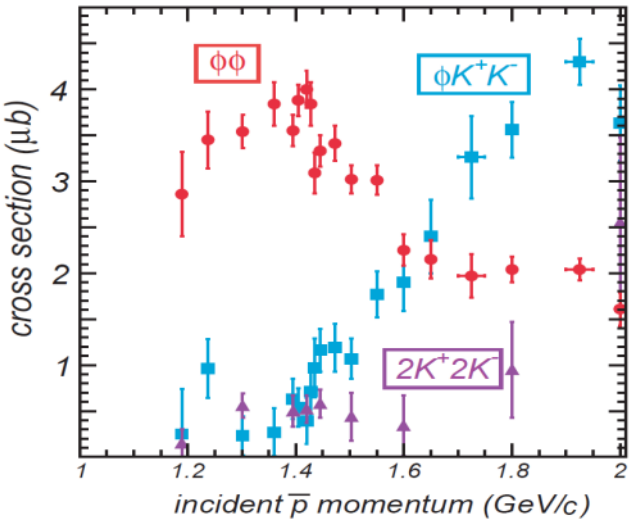
$\bar{p} + p \rightarrow \phi$ (in nucleus) + ϕ (forward)

$\phi \rightarrow K^+ \Lambda$, $\Lambda \rightarrow p\,\pi^-$

$\phi \rightarrow K^+K^-$

Missing mass

Strange > 3

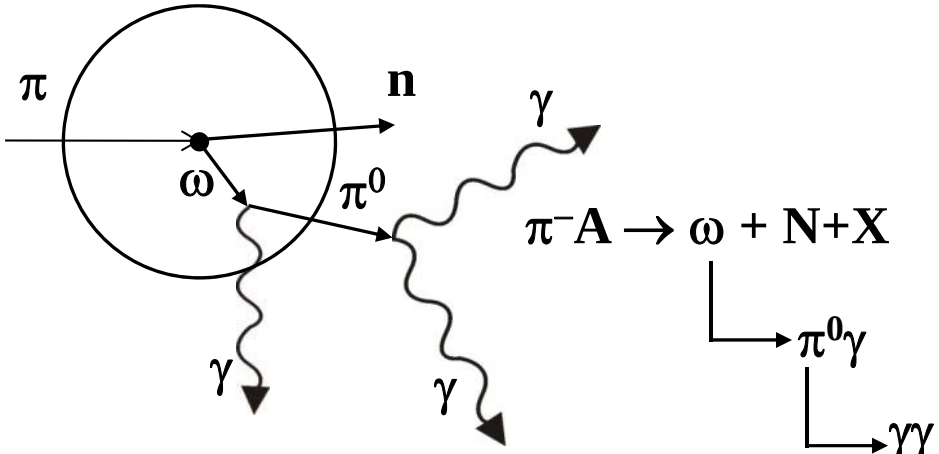


$\bar{p}$ beam ~1.1 GeV/c
1×10^6 /spill

Detected.

Stopped ω meson : Invariant and missing mass

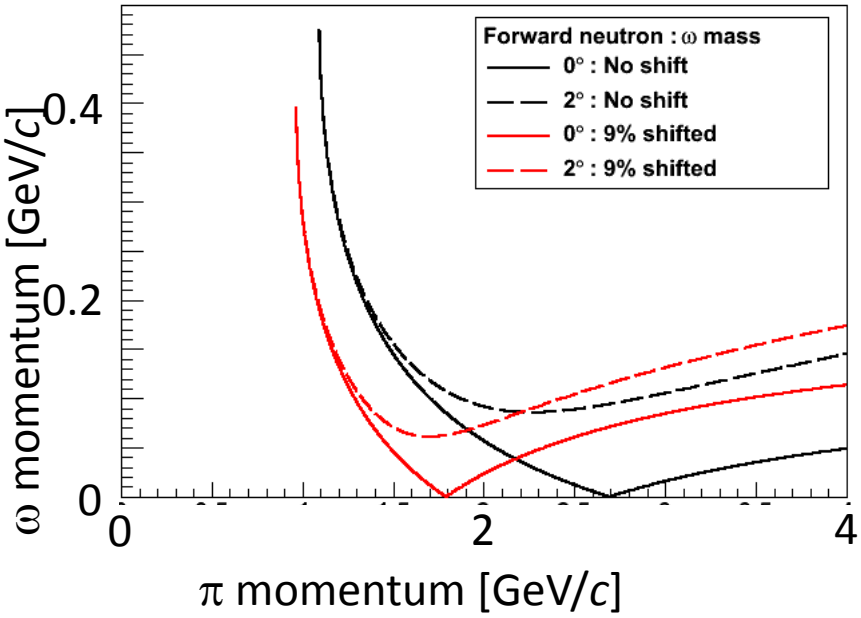
K. Ozawa J-PARC E26
K1.8 beam line.



$$m_\omega = \sqrt{(p_\pi + p_\gamma)^2}$$

Generate ω meson using π beam.
Emitted neutron is detected at 0°.
Decay of ω meson is detected.

To generate stopped modified ω meson, beam momentum is ~ 1.8 GeV/*c*. (K1.8 can be used.)
9% mass decrease(70 MeV/c^2) expected according to KEK-E325.



π beam ~2 GeV/c
1 x 10^7 /spill