

E16実験におけるKK対測定を検討

理研・先端中間子研究室
佐久間 史典

- physics motivation (ϕ パズルについて)
- KEK-PS E325実験でのKK対測定とその結果
- J-PARC E16実験でのKK対測定
- まとめ

Physics Motivation

Vector Meson, ϕ

- 予想される質量の減少

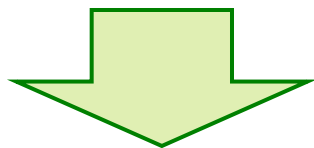
→ $20\text{-}40\text{MeV}/c^2$ @ $\rho=\rho_0$

- 狭い崩壊幅 ($\Gamma=4.3\text{MeV}/c^2$)

→ 質量スペクトラムの変化に敏感

- 小さい崩壊Q値 ($Q_{K^+K^-}=32\text{MeV}/c^2$)

→ ϕ 又は K が核物質効果を受けることによって、崩壊比が変化する可能性



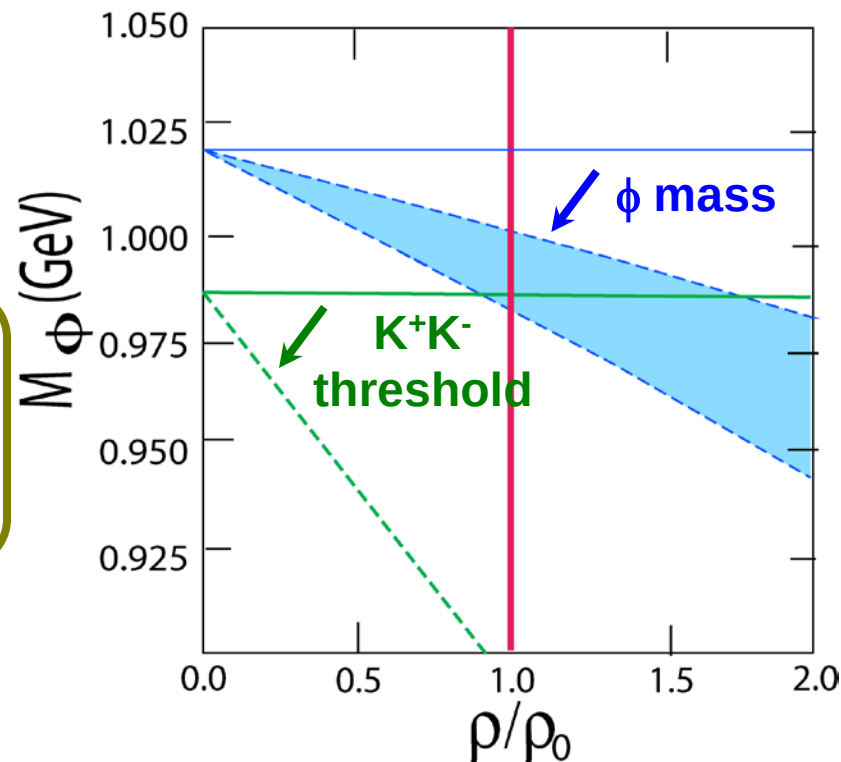
非常に簡単な例として、

■ ϕ の質量が減少

→ $\Gamma_{\phi \rightarrow K^+K^-}$ は小さくなる

■ K の質量が減少

→ $\Gamma_{\phi \rightarrow K^+K^-}$ は大きくなる



ρ_0 : normal nuclear density

ϕ : T.Hatsuda, S.H.Lee,
Phys. Rev. C **46**(1992)R34.

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

Vector Meson, ϕ

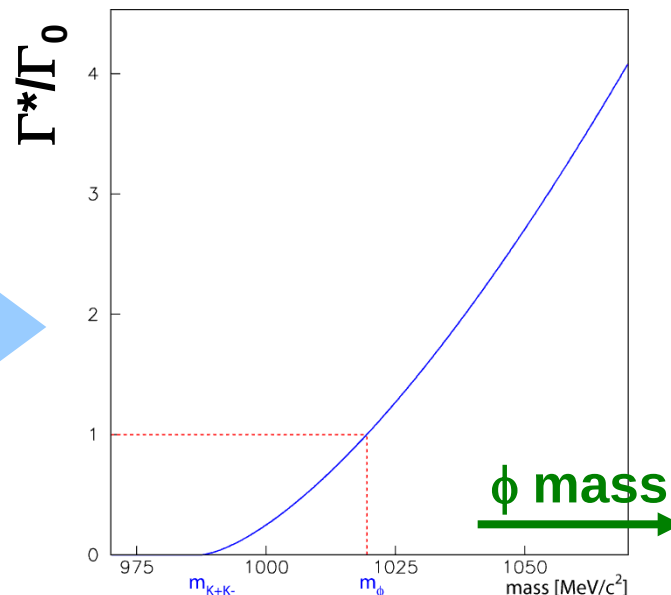
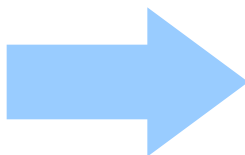
J.D.Jackson, Nuovo Cimento 34, 1644 (1964).

m_ϕ が変化

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

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

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

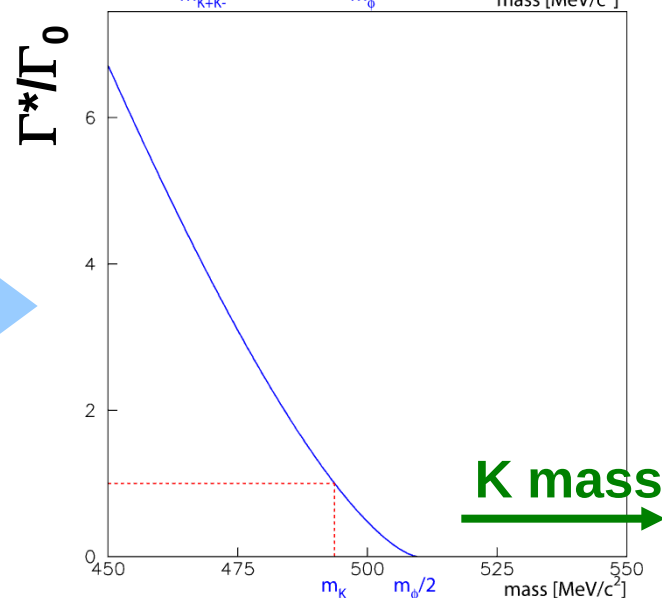
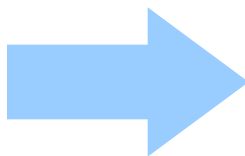


m_K が変化

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

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

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



ϕ Puzzle

核物質中での ϕ または K のスペクトル関数の変化によって、 $\phi \rightarrow \Pi/KK$ 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).

$\Gamma^*(\phi \rightarrow KK)/\Gamma^*(\phi \rightarrow \Pi)$ の増加

– P.-Z. Bi and J.Rafelski, PLB262,485(1991).

$\Gamma^*(\phi \rightarrow KK)/\Gamma^*(\phi \rightarrow \Pi)$ の増加

– J.P.Blaziot and R.M.Galain, PLB271,32(1991).

$\Gamma^*(\phi \rightarrow KK)/\Gamma^*(\phi \rightarrow \Pi)$ の減少

– etc.

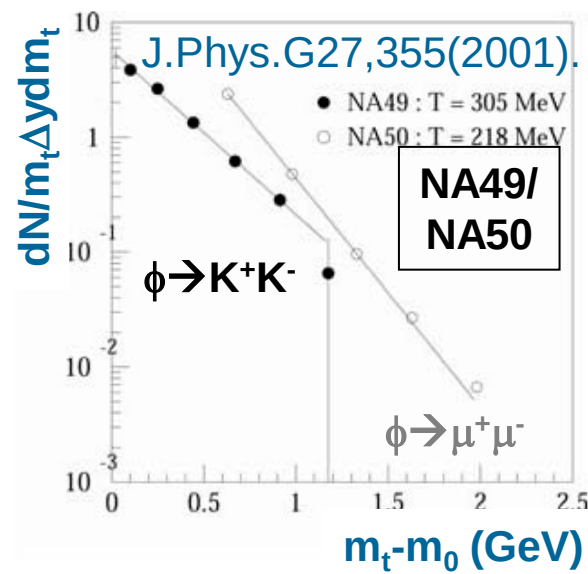
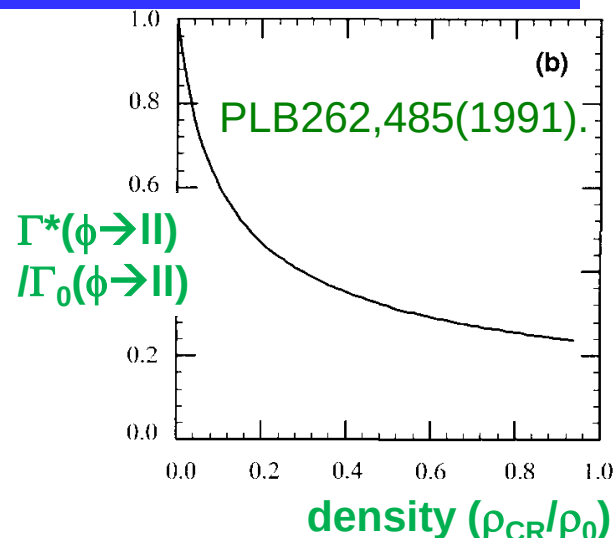
●NA49/NA50@CERN-SPS

– PLB491,59(2000).; PLB555,147(2003).;

J.Phys,G27,355(2001).

– $\phi \rightarrow K^+K^-/\mu^+\mu^-$, 158A GeV Pb+Pb

– production CS's are inconsistent



ϕ Meson Measurements

Hot Matter

●CERES(NA45)@CERN-SPS

- PRL96,152301(2006).
- $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$, 158 AGeV Pb+Au
- production CS's are consistent

●PHENIX@BNL-RHIC

- EPJ,A31,836(2007).
- $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$, $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au
- production CS's are consistent

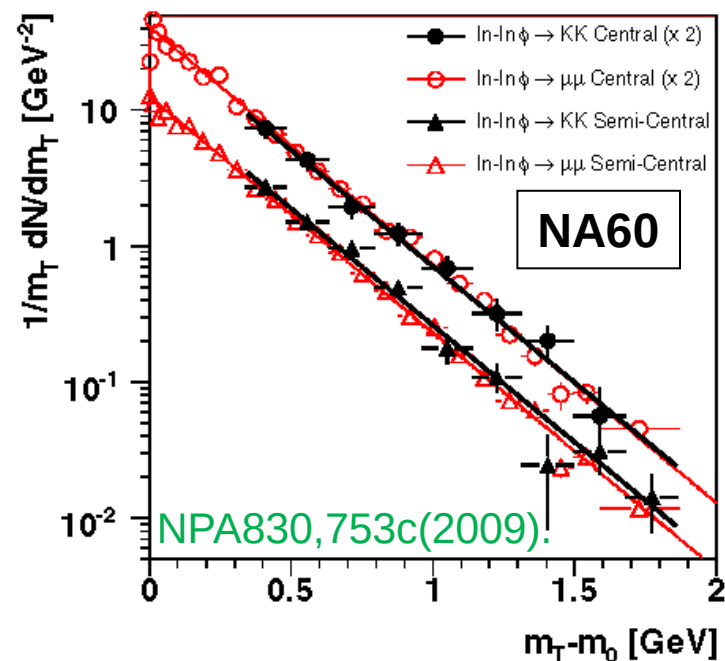
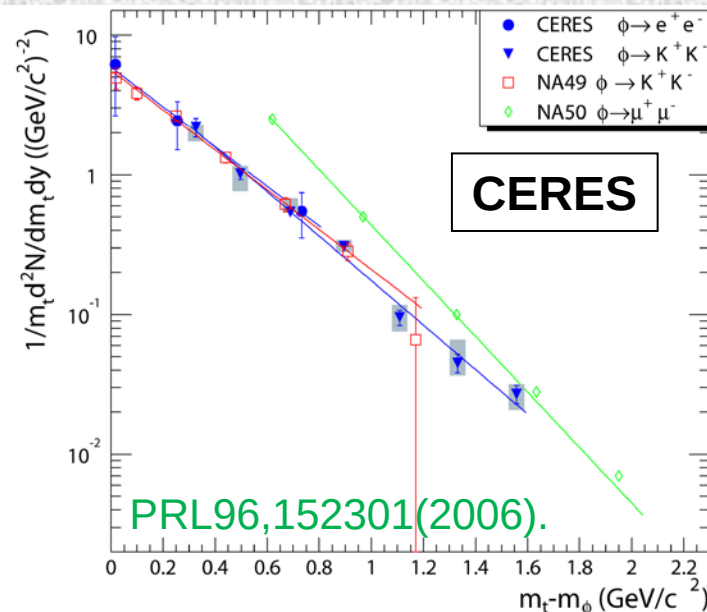
●NA60@CERN-SPS

- NPA830,753c(2009).
- $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-/K^+K^-$, 158 AGeV In+In
- production CS's are consistent

Cold Matter

●E325@KEK-PS

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



KEK-PS E325実験での KK対測定

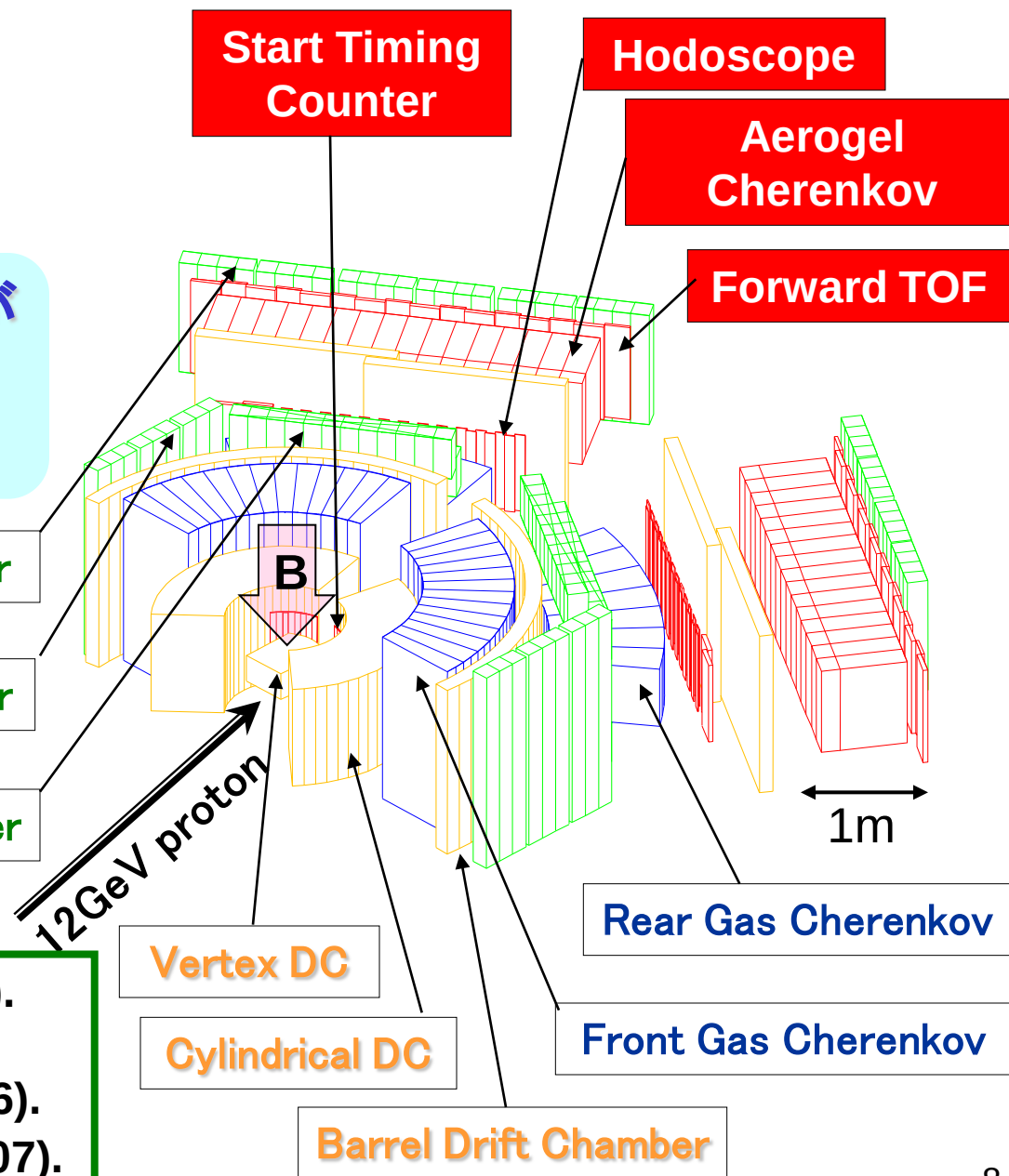
KEK-PS E325 Experiment

Measurements

$12\text{GeV } p+A \rightarrow \rho, \omega, \phi + X$

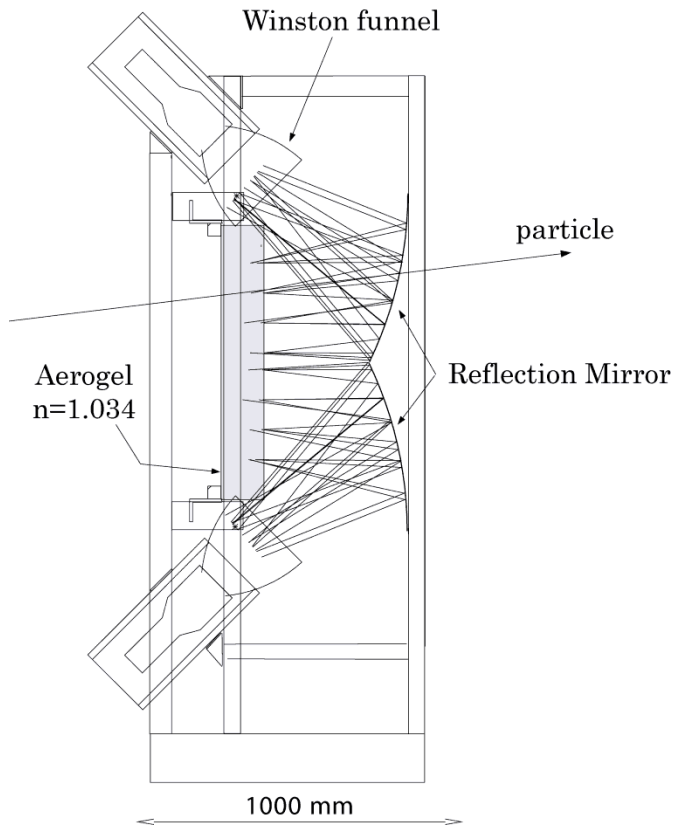
e^+e^-, K^+K^- の不変質量分布

原子核内で崩壊する確率が
大きい $2\text{GeV}/c$ 程度の遅い
ベクター中間子を測定



$\rho/\omega \rightarrow e^+e^-$: PRL, C96, 092301 (2006).
 $\phi \rightarrow e^+e^-$: PRL 98, 042501 (2007).
 $\omega, \phi \rightarrow e^+e^- \alpha$: PR, C74, 025201 (2006).
 $\phi \rightarrow e^+e^- K^+K^- \alpha$: PRL 98, 152302 (2007).

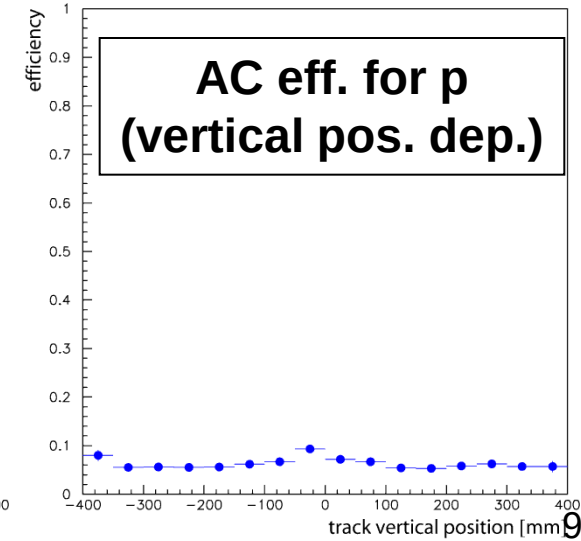
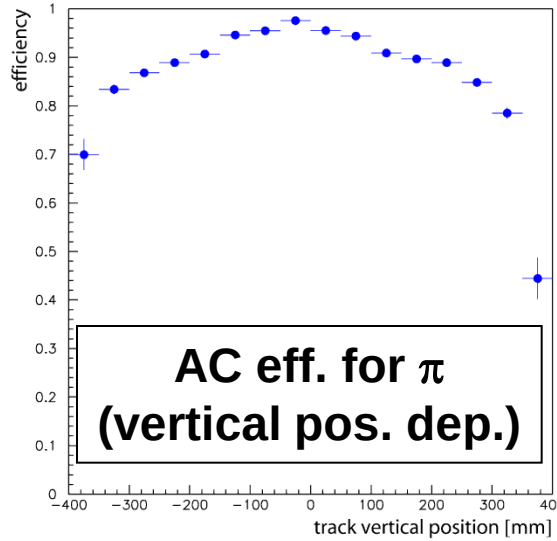
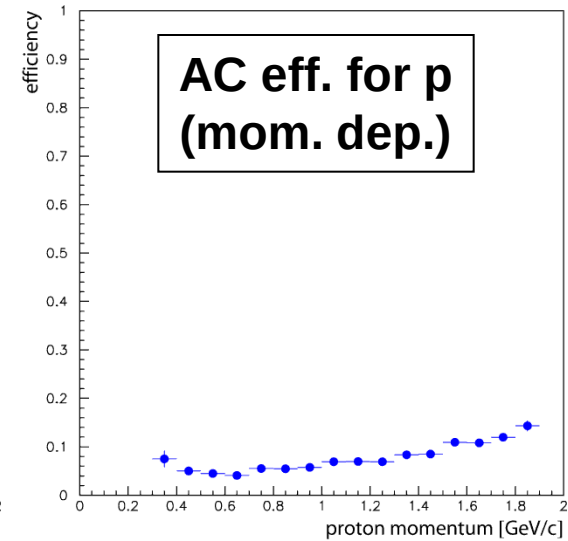
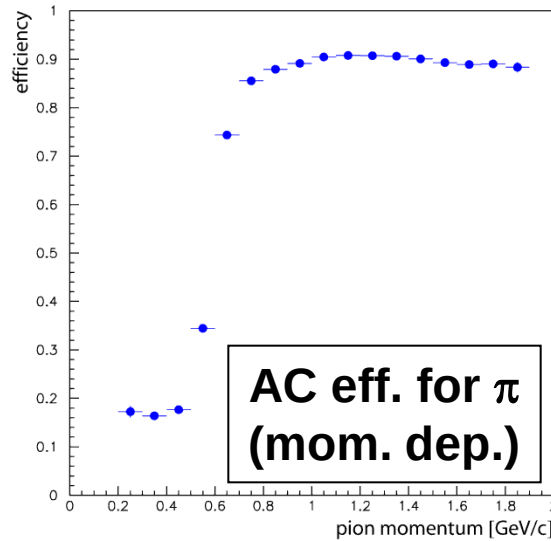
Kaon ID



- 12.5cm Aerogel
- 5 inch PMT (H6527)

To trigger kaons,
AC ($n=1.034$) was used
→ π, K threshold =
0.53, 1.88 GeV/c

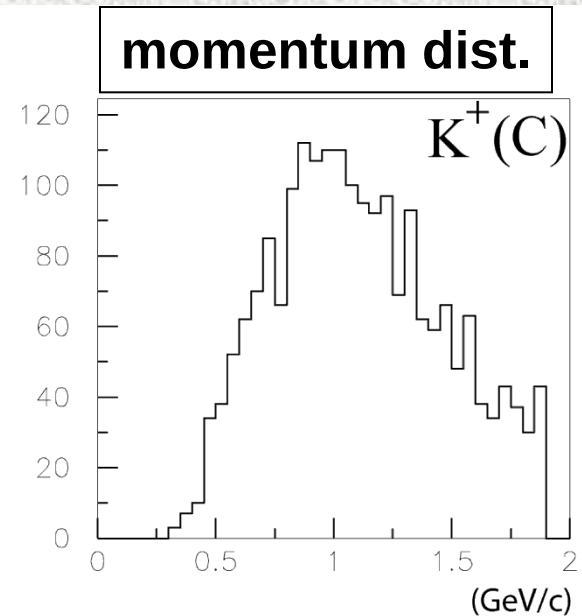
● pion rejection of AC $\sim 1 \times 10^{-2}$
@ 1.4 GeV/c, threshold = 1.1 p.e.



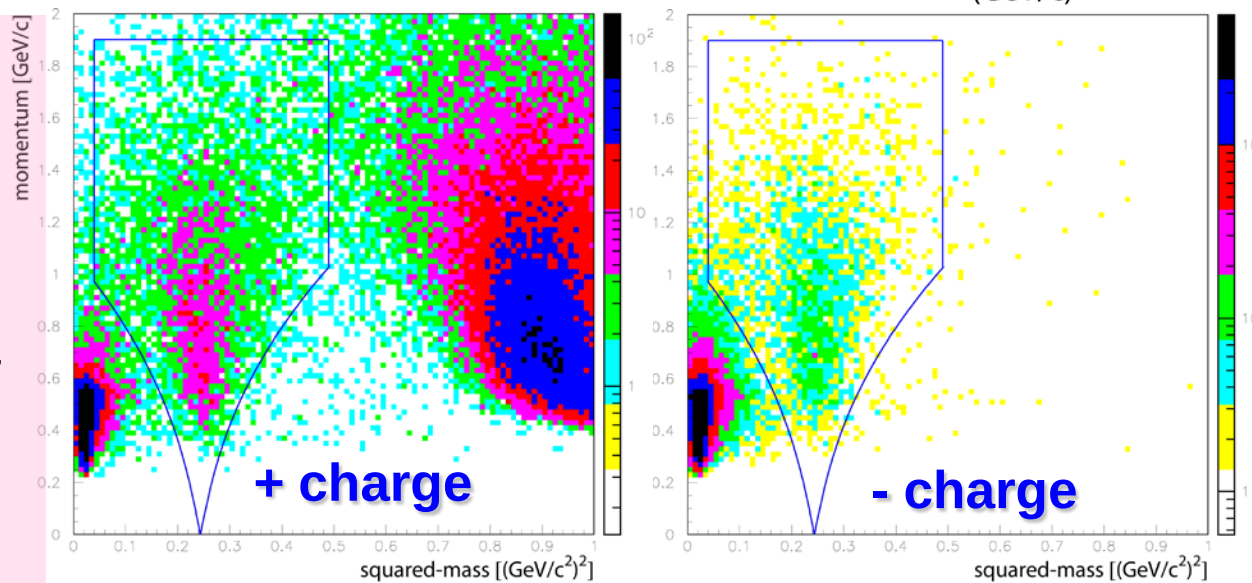
Kaon ID (Cont'd)

kaon ID cut

- ✓ position matching in TOF counters
- ✓ without hits in AC
- ✓ TOF cut
- ✓ mass square cut
- ✓ momentum < 1.9 GeV/c
- ✓ K^+ and K^- in one arm



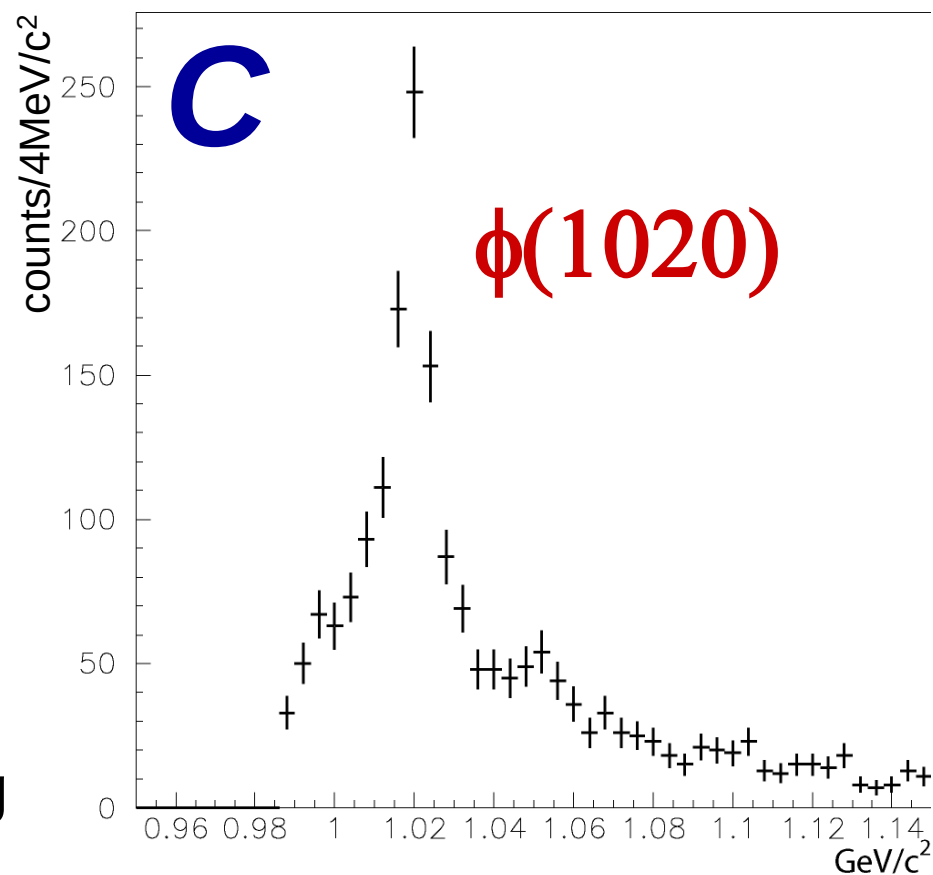
- TOF resolution ~ 400 ps
- kaon purity (%)
 - $K^+ : 93.4 \pm 3.4 \pm 0.6$
 - $K^- : 91.7 \pm 3.7 \pm 0.5$
 - $K^+K^- : 85.6 \pm 4.7 \pm 0.7$
- Kaon ID efficiency (%)
 - $\phi \rightarrow K^+K^- : 87\%$



mass square vs. momentum (w/ AC veto)

$\phi \rightarrow K^+ K^-$ Invariant Mass Spectra

- 2001 run data
- C & Cu targets
- acceptance uncorrected
- fit with
 - simulated mass shape of ϕ
 - combinatorial background obtained by the event mixing method



→ examine the mass shape as a function of β_γ

Fitting Results of $\phi \rightarrow K^+ K^-$

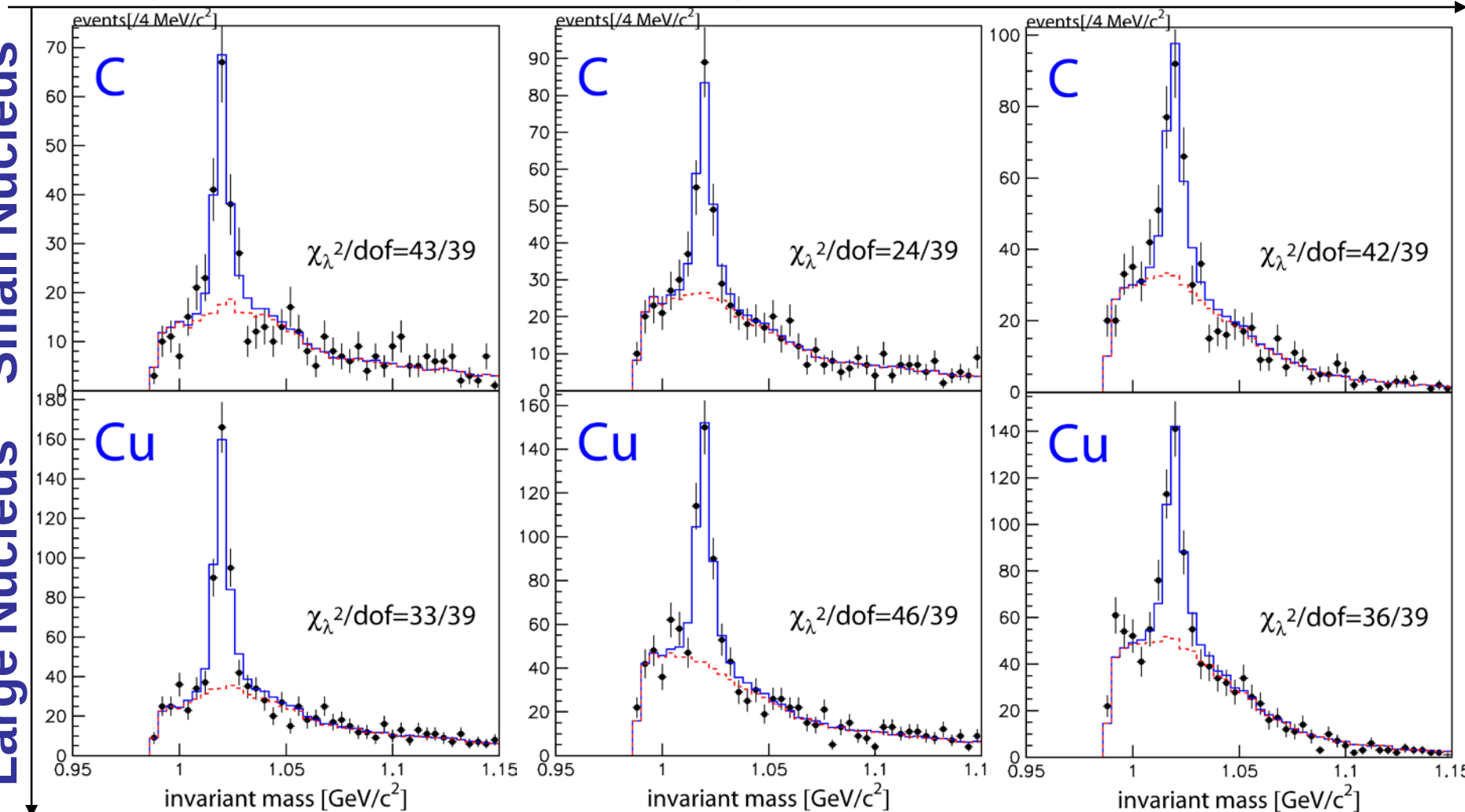
$\beta\gamma < 1.7$ (Slow)

$1.7 < \beta\gamma < 2.2$

$2.2 < \beta\gamma$ (Fast)

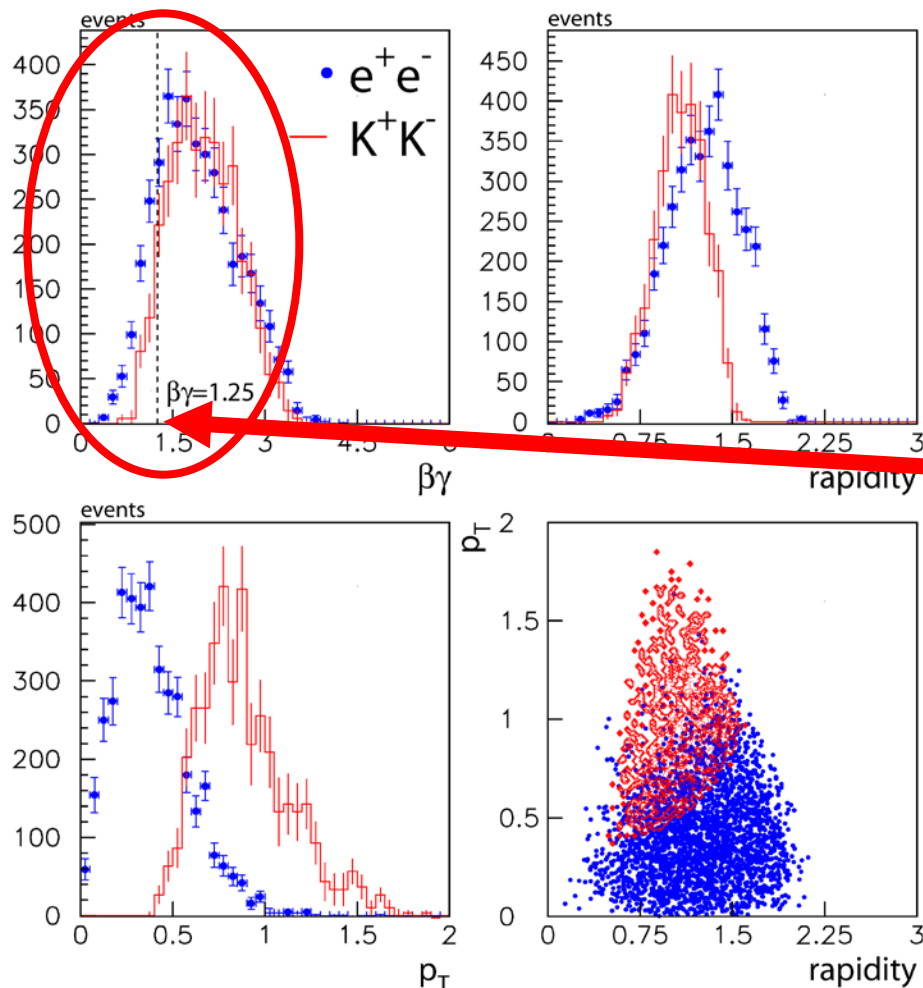
Small Nucleus

Large Nucleus



質量スペクトラムの変化は統計的に有意ではない

Kinematical Distributions of observed ϕ



●検出器のアクセプタンスが e^+e^- と K^+K^- で異なる

● $\phi \rightarrow e^+e^-$ で質量スペクトラムの変化が見られた $\beta\gamma < 1.25$ において、 $\phi \rightarrow K^+K^-$ の統計は非常に限られる

● $\phi \rightarrow K^+K^-$ で変化が見えないことは $\phi \rightarrow e^+e^-$ の結果と矛盾しない

注： $\phi \rightarrow K^+K^-$ は3倍してある

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

- 大きな syst.err. により、 $e+e^-/K+K^-$ の微妙な cross-section の違いは見づらい
- 大部分の syst.err. はターゲットにかかわらず共通
→ 原子核依存性 α を用いる事により、syst.err. からの影響を減らす事が出来る

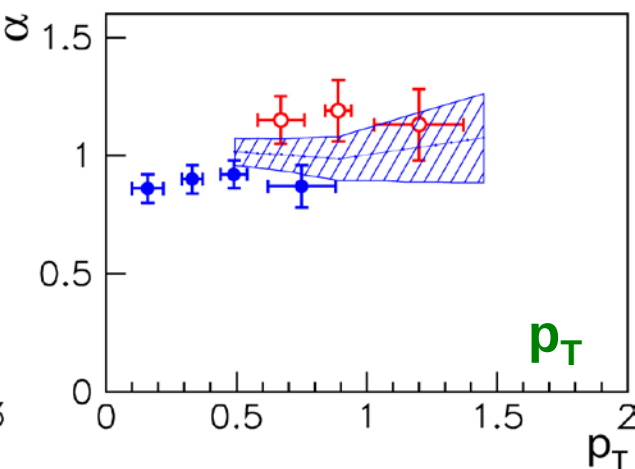
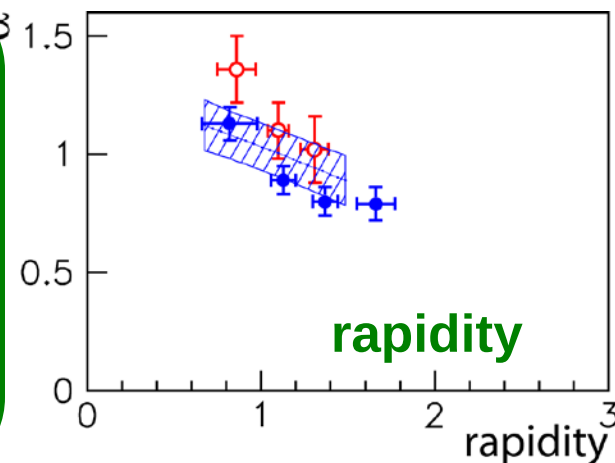
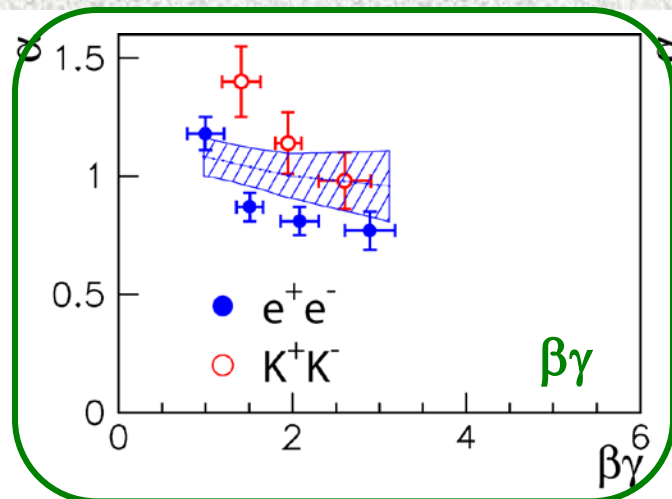
$$\sigma(A) = \sigma_0 \times A^\alpha$$

- $\Gamma_{\phi \rightarrow K+K^-} / \Gamma_{\phi \rightarrow e+e^-}$ が原子核中で大きくなる場合を考える
→ 測定される $N_{\phi \rightarrow K+K^-} / N_{\phi \rightarrow e+e^-}$ 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

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha_{\phi \rightarrow K^+K^-} - \alpha_{\phi \rightarrow e^+e^-} \quad (A_1 > A_2) \\ &= \ln \left[\frac{N_{\phi \rightarrow K^+K^-}(A_1)}{N_{\phi \rightarrow e^+e^-}(A_1)} \bigg/ \frac{N_{\phi \rightarrow K^+K^-}(A_2)}{N_{\phi \rightarrow e^+e^-}(A_2)} \right] \bigg/ \ln(A_1/A_2) \end{aligned}$$

- $\alpha_{\phi \rightarrow K+K^-}$ は $\alpha_{\phi \rightarrow e+e^-}$ 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

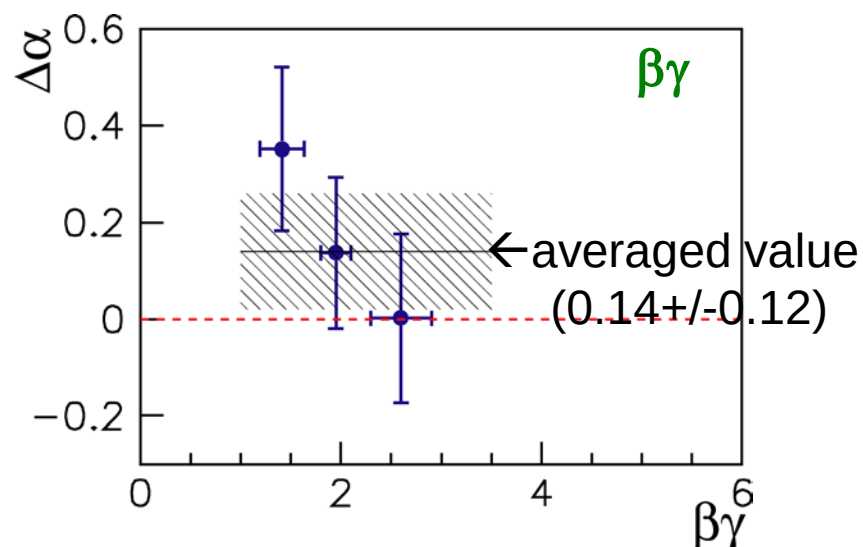
Results of Nuclear Mass-Number Dependence α



= K^+K^- -アクセプタンスへ補正した $\alpha_{e^+e^-}$

$$\Delta\alpha = \text{red circle} - \text{shaded blue rectangle}$$

K^+K^- - corrected e^+e^-



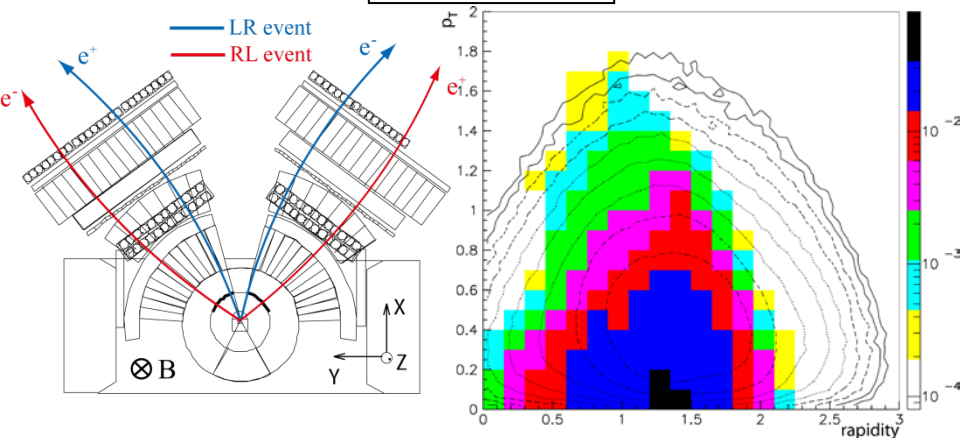
$\alpha_{\phi \rightarrow K+K^-}$ と $\alpha_{\phi \rightarrow e^+e^-}$ は統計の範囲で一致

E325実験でのKK対測定の問題点

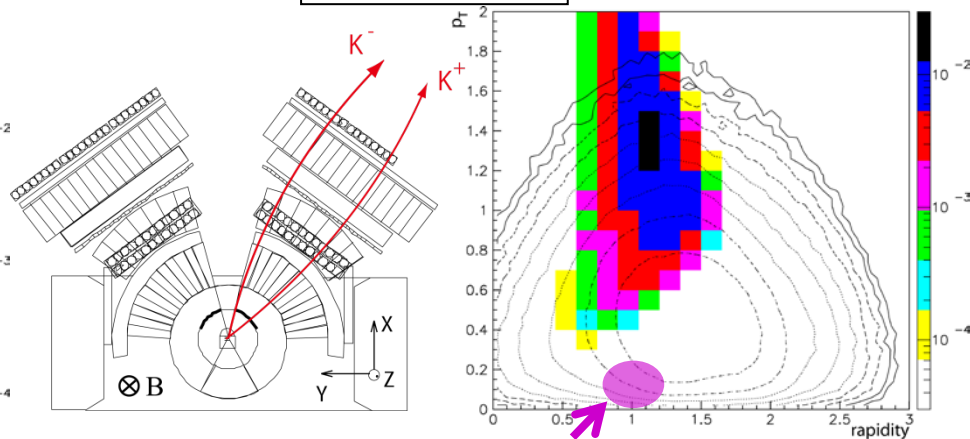
① e^+e^- と K^+K^- でアクセプタンスが大きく異なる

→event-patternの選択に改善の余地有り!

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



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



②統計が少ない

→KK-triggerの改善の余地有り!

1st-level: 58k/spill → **1/50 pre-scale** → 0.8k/spill → 2nd-level: 0.5k/spill

AC-veto & matrix-coincidence

Kaon-mass trigger

最終的には 2×10^8 eventのKK-trigger (~1 month, ee/KK-trigger)

→ ~5kの K^+K^- 、~1.3kの $\phi \rightarrow K^+K^-$

E16実験にてこれらの問題を克服する必要がある!!!

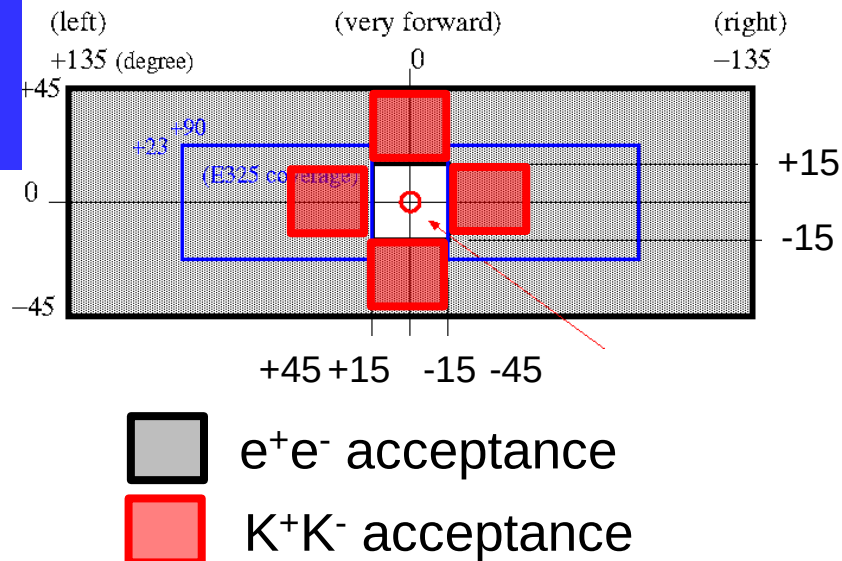
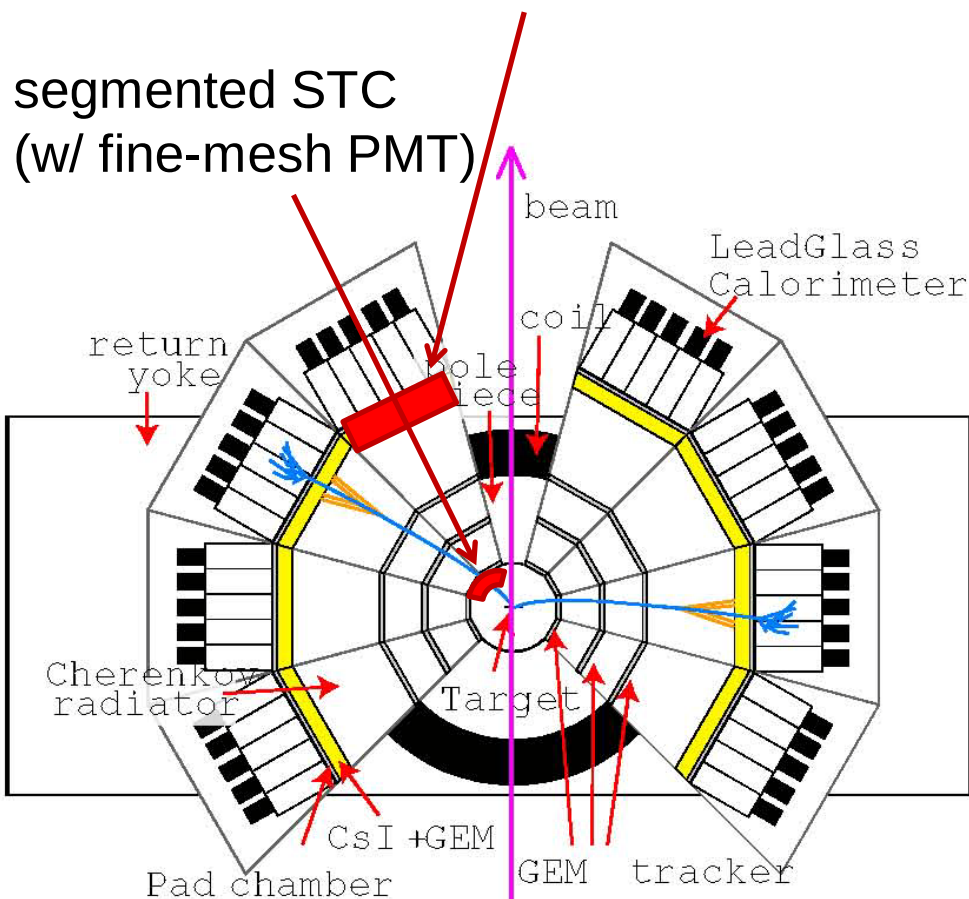
J-PARC E16実験での KK対測定

Forward Kaon Spectrometer

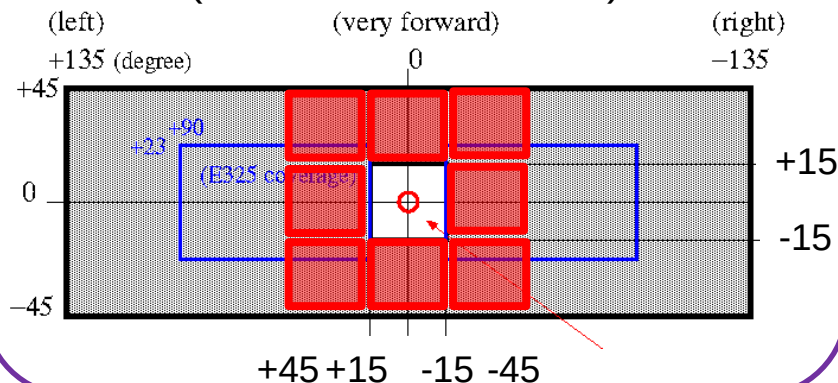
LGとHBDの間の狭いスペース
(~10cm)にどう入れるのが鍵となる

AC($n=1.034$) w/ SiAPD or fine-mesh PMT
+ TOF counter (RPC or plastic-scintillator)

segmented STC
(w/ fine-mesh PMT)



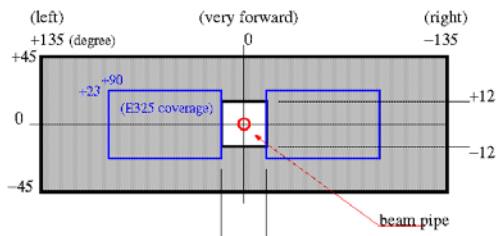
贅沢version
(計算はしていないが...)



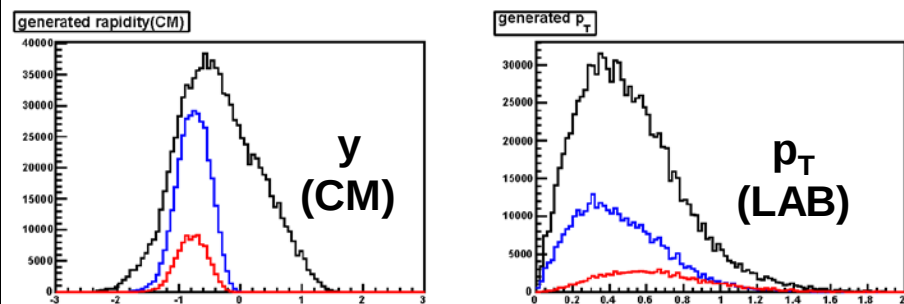
$\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ acceptance

- Simple Monte-Carlo Study
- 30GeV/c proton + Copper
- w/o detector effects, kaon decay

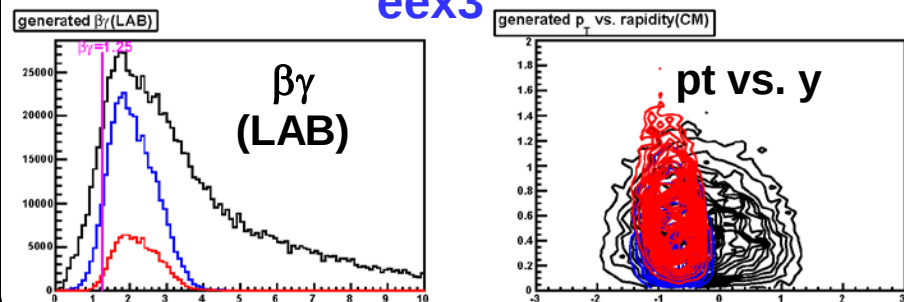
$\phi \rightarrow e^+e^-$



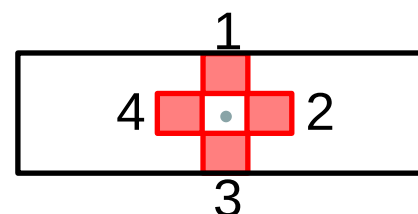
- generated
- e-accepted (double-arm)
- e-accepted (single-arm)



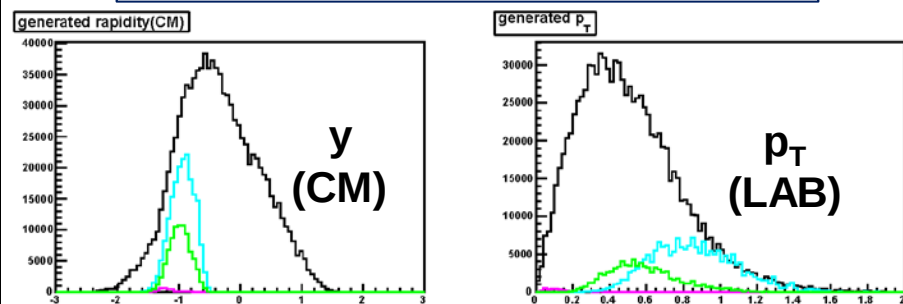
eex3



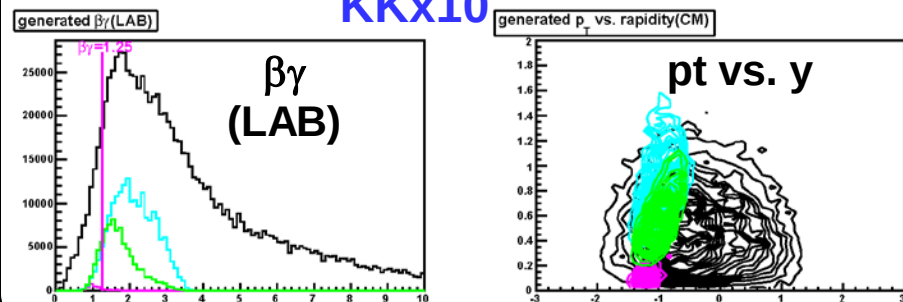
$\phi \rightarrow K^+K^-$



- generated
- k-accepted (opposite-side) e.g. 1&3
- k-accepted (same-side) e.g. 1&1
- k-accepted (neighbor-side) e.g. 1&2

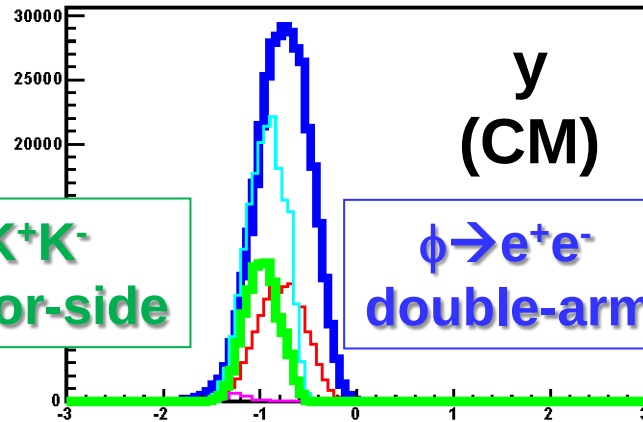


KKx10

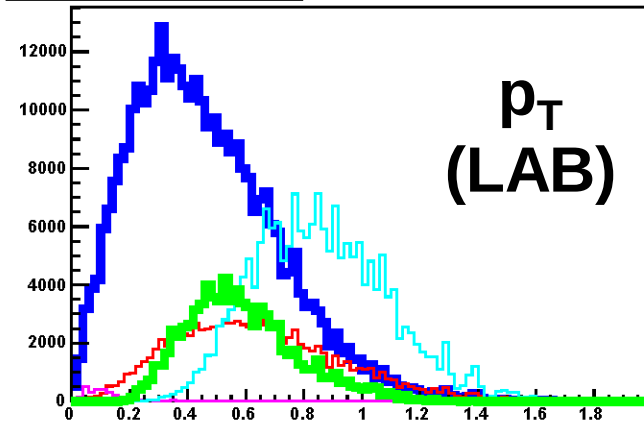


$\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ acceptance (Cont'd)

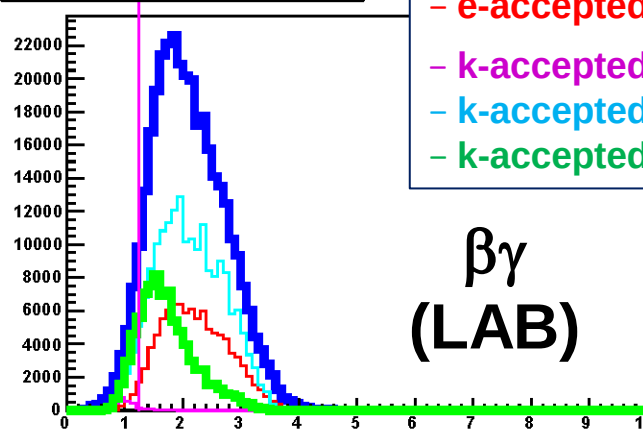
accepted(double-arm) rapidity(CM)



accepted(double-arm) p_T

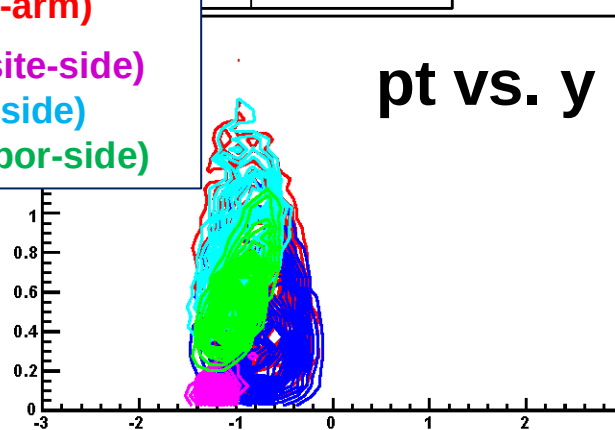


accepted(double-arm) $\beta\gamma$ (LAB)



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

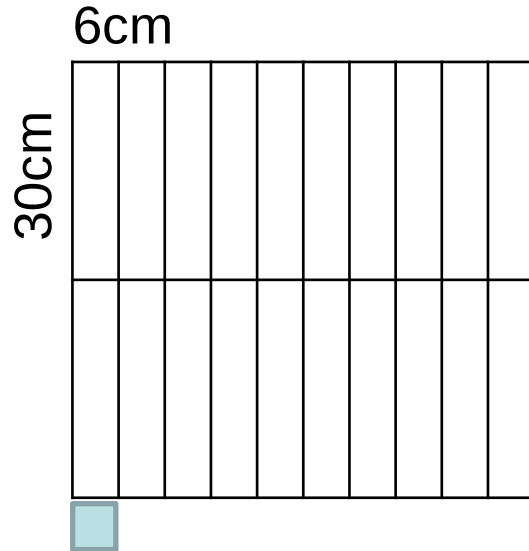
accepted(double-arm) p_T vs. rapidity(CM)



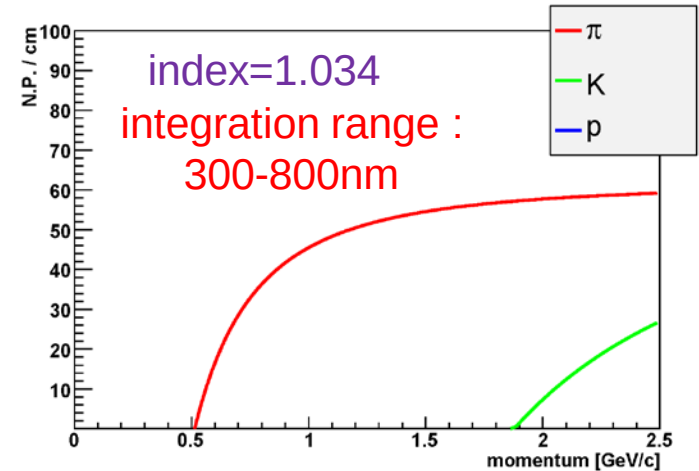
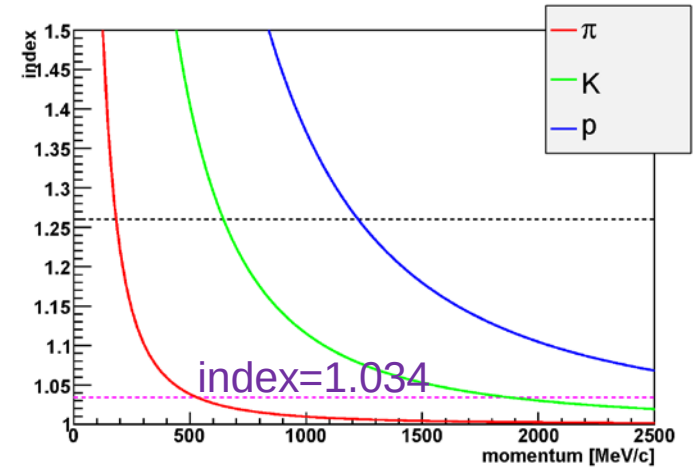
2つのセクションでKを要求することによって、 $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ のアクセプタンスをある程度そろえることができる(青/緑)

Aerogel Cherenkov Counter

- E325と同じ、 $n=1.034$ を使用
- AC厚み: $\sim 3\text{cm}$ --.SiAPD, $\sim 10\text{cm}$ →PMT
- 60x60cmを下記のように10x2分割



SiAPD (S8664) or fine-mesh PMT



調べること

- 長手方向30cmで本当に読み出せるか?
- どれくらいのphoto-electron稼げるか?
- だめなときは6x15cm程度に小分け(10x4分割)して、裏から読み出せるか?
→ spaceの都合上SiPADを用いる(要温度調整機構)

KK-trigger

Trigger Scheme

- GEM-tracker中層のhit情報と、AC/TOFでmatrixを組む
- 2つのセクションでKを要求
→reduction of miss-trigger
- (ee-triggerは基本double-arm)

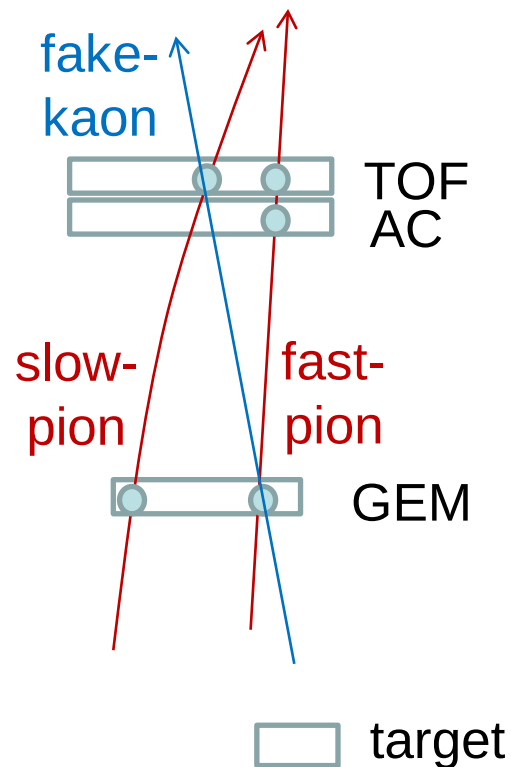
point

- どれだけBGを落とせるか?
- 2nd-levelを用いないで”賢い”KK-triggerを作れるか?

■Monte-Carloを用いた定量的なstudyを始めたばかり。
■KK-triggerは難しいが、E325と同レベルの物(trigger,統計)でもアクセプタンスの改善により楽しい物理は引き出せる!!!

Background

slow-pionとfast-pionの組み合わせなどで、ACが鳴らないKと誤認する



もちろんprotonと500MeV/c以下のpionは純粋にBG!

まとめ

Summary

- **J-PARC E16実験**は通常原子核密度下における中間子質量への核物質効果を検証する目的で行われる。

- E16の先行実験であるKEK PS-E325では、 $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ でそのアクセプタンスが大きく異なったために、通常原子核密度下での“ ϕ パズル”を解き明かすヒントを得るにとどまった。

- E16実験に新たに K^+K^- スペクトロメーターを組み込み、 $\phi \rightarrow e^+e^-/K^+K^-$ のアクセプタンスをそろえた上で、引き続き通常原子核密度下での“ ϕ パズル”の探求を行う。

- 申請している課題研究においては
 - **エアロゲル検出器のプロトタイプ開発**
 - **効率の良い K^+K^- -trigger開発**の2点に絞って研究を進めていく。

Backup

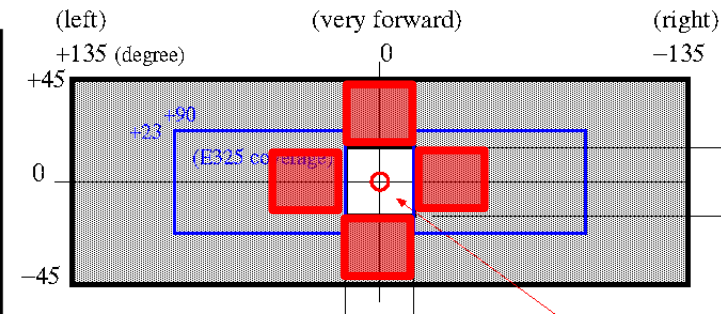
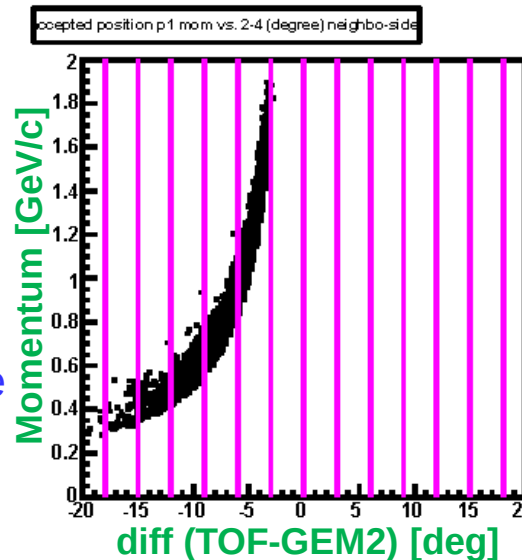
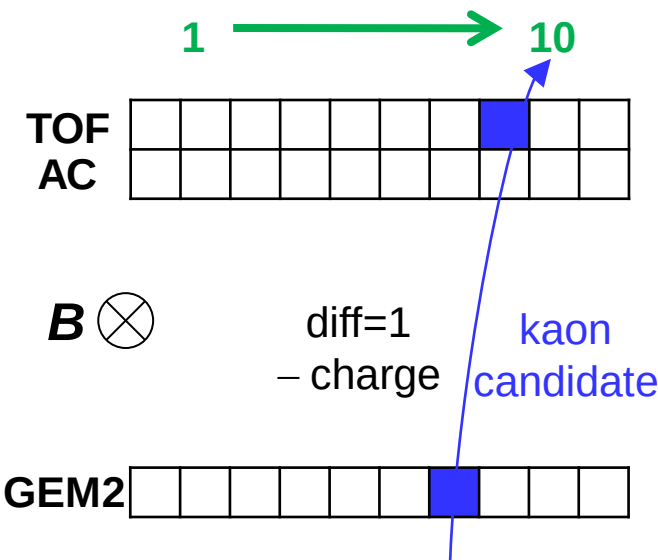
KK-trigger Scheme

- ① TOF($r=120\text{cm}$)にhitがあり、直前のACにhitが無いパターンを探す
- ② GEM-tracker2層目($r=40\text{cm}$, 横方向に10分割)のhitを探し、そのhit-segmentの差diffを求める
- ③ このときdiffの符号によりchargeを求める
- ④ 2-sectionで以上のhitを要求し、さらにchargeが $\pm$ 両方あることを要求する

JAM (nuclear cascade code) を用いた

30GeV/c p+Cu reaction
では、 4×10^{-3} のevent rejection-powerを確認

→ 10^6 interactionで 4×10^3 trigger



- 2-sectionでkaon-candidate
- $\pm$ 両方あること

Discussion on $\Gamma_{\phi \rightarrow K^+K^-}$ and $\Gamma_{\phi \rightarrow e^+e^-}$

崩壊幅の変化の上限を導く

2つの手法を用いて上限を求めていく

- A) $\Gamma_{\phi \rightarrow K^+K^-}$ と $\Gamma_{\phi \rightarrow e^+e^-}$ が核物質中で変化すると、 $\Delta\alpha$ が変化する
部分崩壊幅が変化したときの $\Delta\alpha$ の変化を計算し、データ
($\Delta\alpha = 0.14 \pm 0.12$) と比較することにより、 $\Gamma_{\phi \rightarrow K^+K^-}^* / \Gamma_{\phi \rightarrow e^+e^-}^*$ の上限を
求めることが出来る
- B) e^+e^- のデータが示唆するように、核物質中で Γ_{ϕ} が増えると ϕ 中間子の
ピークの左側に excess が見えるはずである
 K^+K^- スペクトラムを e^+e^- 解析と同様に解析することにより excess の
数の上限値を出し、 Γ_{ϕ}^* の上限を求めることが出来る

理論予言

10 倍程度までの broadening
(Klingl, Kaiser & Weise など)

Discussion on $\Gamma_{\phi \rightarrow K+K^-}$ and $\Gamma_{\phi \rightarrow e+e^-}$

- 核内での崩壊幅は密度に比例して変化すると仮定

$$\Gamma_{\phi}^* / \Gamma_{\phi}^0 = 1 + k_{\text{tot}} (\rho / \rho_0),$$

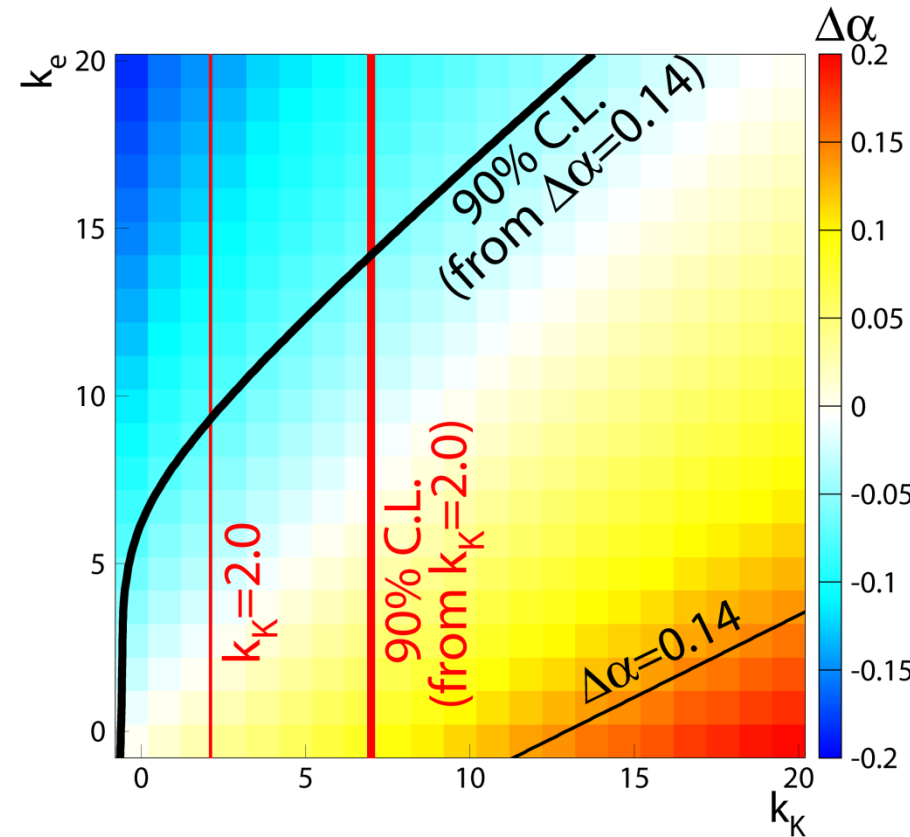
$$\Gamma_{\phi \rightarrow K^+ K^-}^* / \Gamma_{\phi \rightarrow K^+ K^-}^0 = 1 + k_K (\rho / \rho_0),$$

$$\Gamma_{\phi \rightarrow e^+ e^-}^* / \Gamma_{\phi \rightarrow e^+ e^-}^0 = 1 + k_e (\rho / \rho_0)$$

- Γ_{ϕ} の変化率が $\Gamma_{\phi \rightarrow K+K^-}$ と等しいと仮定

$$k_{\text{tot}} \sim k_K$$

- 前述のA),B)により (k_e, k_K) 平面に2本の上限の線を引くことが出来る



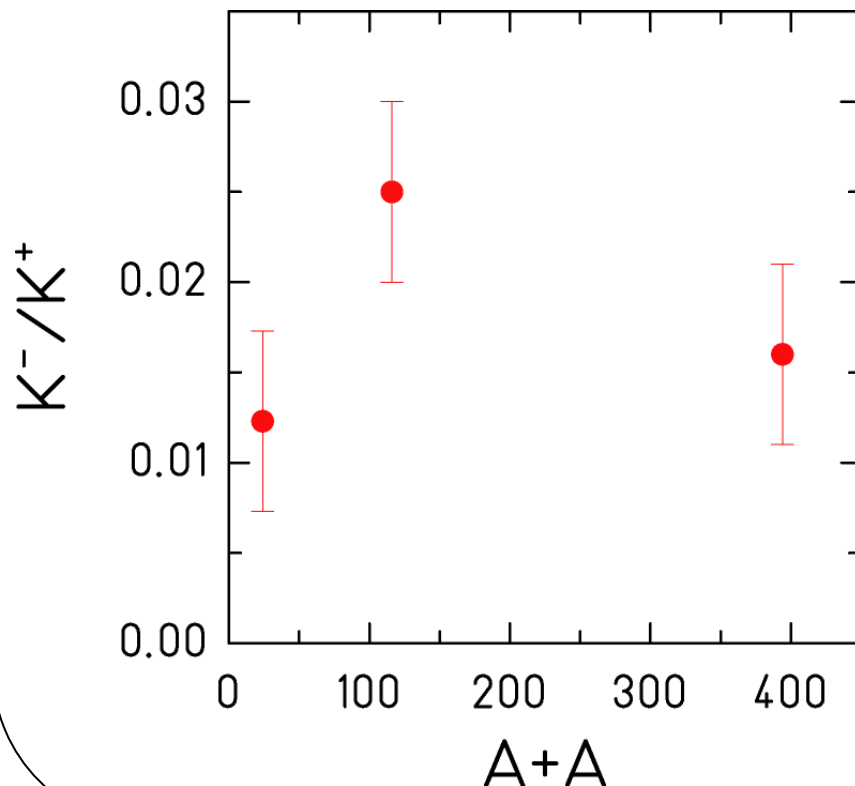
$\Gamma^*/\Gamma < 0$ な領域を除くようにリノーマライズして得た90%C.L.

部分崩壊幅の核物質中でのbroadeningの上限値が、
実験的にはじめて得られた

Kaon Re-scattering from KaoS Results

J.Phys. G27 (2001) 275.

KaoS experiment at SIS/GSI
C+C, Ni+Ni, Au+Au, 1.5A GeV



K^- のabsorption-ratioは原子核の大きさによって異なるはずなのに、dataはほぼ一定の値!

(mean free path of K^- = 1.5fm)



geometrical-modelによると、AuはCに比べ、 $K^-N \rightarrow Y\pi$ ($Y=\Lambda, \Sigma$)は10倍以上大きい



もし、 K^- のeffective-massが小さくなると、上述のprocessはsuppressされる



つまり、核物質効果によって” **K^- のeffective-massが小さくなった結果**”

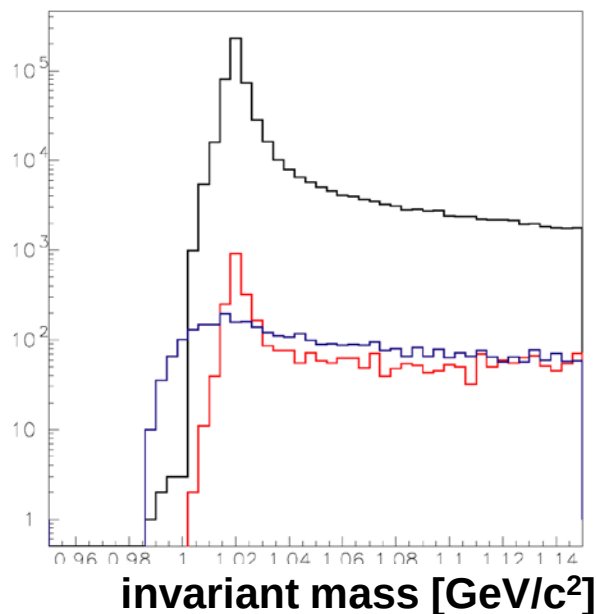
➤ K^- productionがenhance

➤ K^- absorptionがsuppress

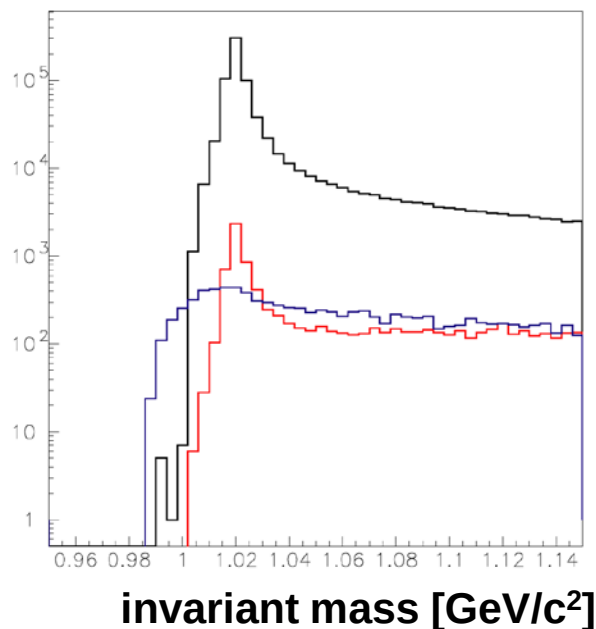
されていると考えられる

Kaon Absorption / Rescattering from JAM Study

^{12}C



^{63}Cu



No detector effects

- all
- w/ rescattering before
- w/ rescattering after

$[\text{K}^+ \text{ or } \text{K}^- \text{ absorbed}] / [\text{all } \phi \rightarrow \text{K}^+ \text{K}^-]$

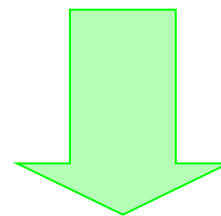
$^{12}\text{C} :: 1.4\%$

$^{63}\text{Cu} :: 4.2\%$

$[\text{K}^+ \text{ or } \text{K}^- \text{ rescattered}] / [\text{all } \phi \rightarrow \text{K}^+ \text{K}^-]$

$^{12}\text{C} :: 1.3\%$

$^{63}\text{Cu} :: 1.5\%$



- small effect on the mass shape
- small effect on α ($\delta\alpha = -0.02$)

Consistency Check for α

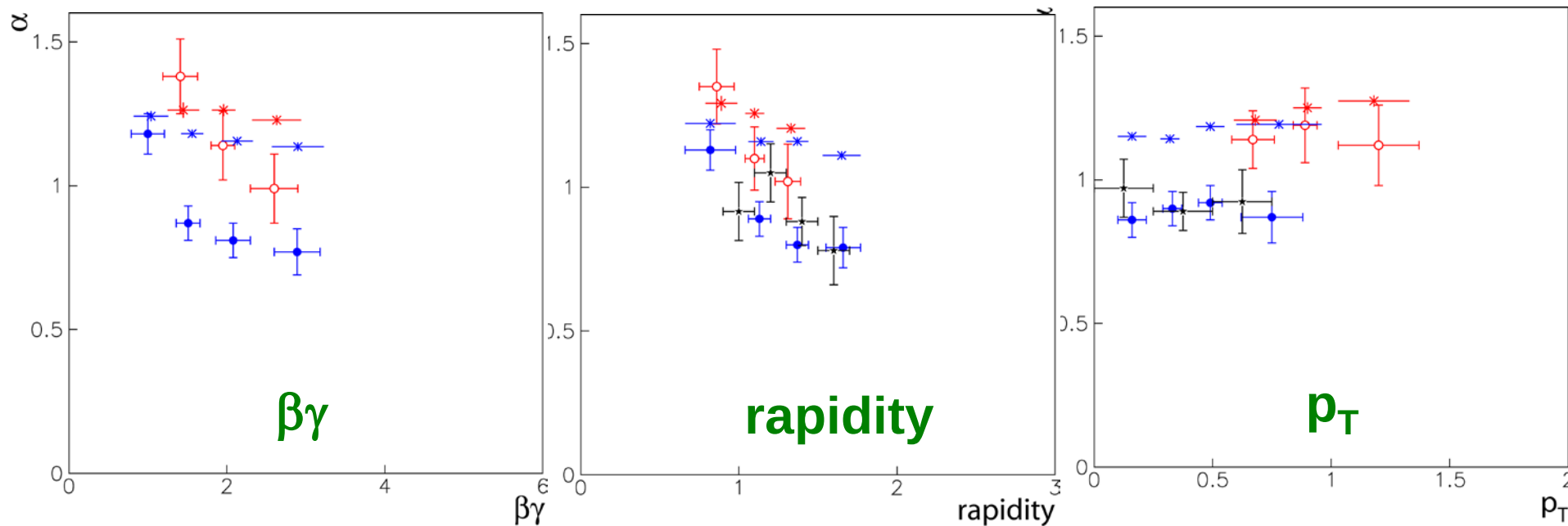
● $\phi \rightarrow e^+e^-$

○ $\phi \rightarrow K^+K^-$

★ $\phi \rightarrow e^+e^-$ PRC,74,025201(2006).

* $\phi \rightarrow e^+e^-$ (JAM)

* $\phi \rightarrow K^+K^-$ (JAM)



Inside-Nucleus Decay (=at $\rho/\rho_0 > 0.5$)

Probability for ϕ

w/o detector acceptance

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

Γ_{tot}	C	Cu
X1	0.01	0.03
X11	0.08	0.21
X21	0.14	0.33
x41	0.22	0.46

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

$\Gamma_{ee} \times 1$		$\Gamma_{ee} \times 11$	
C	Cu	C	Cu
0.01	0.03	-	-
0.01	0.03	0.08	0.21
0.01	0.03	0.08	0.21
0.01	0.03	0.08	0.21

$\Delta\alpha$ for Mass-Shifted ϕ

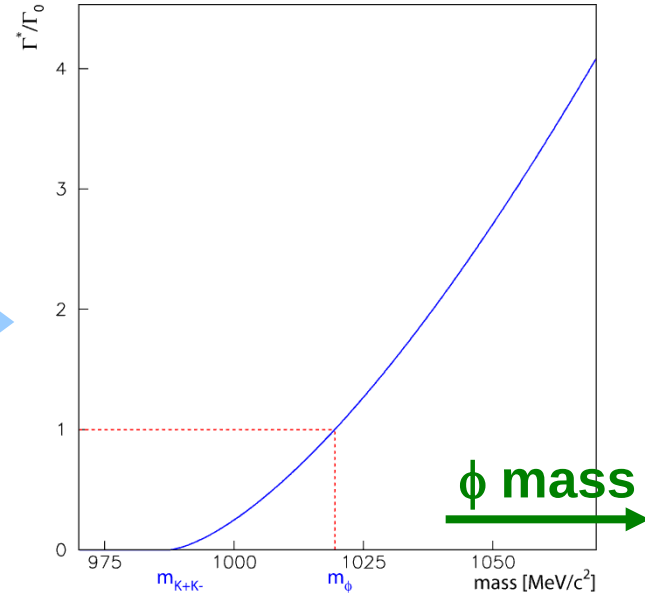
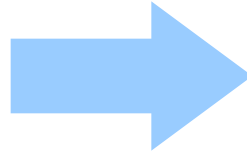
J.D.Jackson, Nuovo Cimento 34, 1644 (1964).

m_K が変化しないと仮定

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

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

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



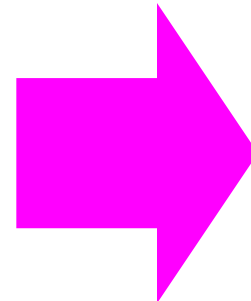
- $m^*/m_0 = 1 - 0.034(\rho/\rho_0)$

from $\phi \rightarrow e^+e^-$, PRL,98,042501(2007).

- m_K が変化しないと仮定

- ϕ -mass=BW

- mod. mass < $2m_K$ のとき、 $\phi \rightarrow K^+K^-$ が suppressされると仮定

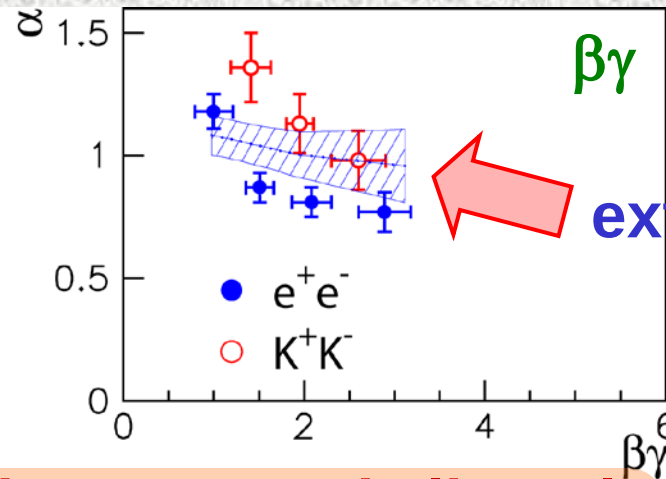
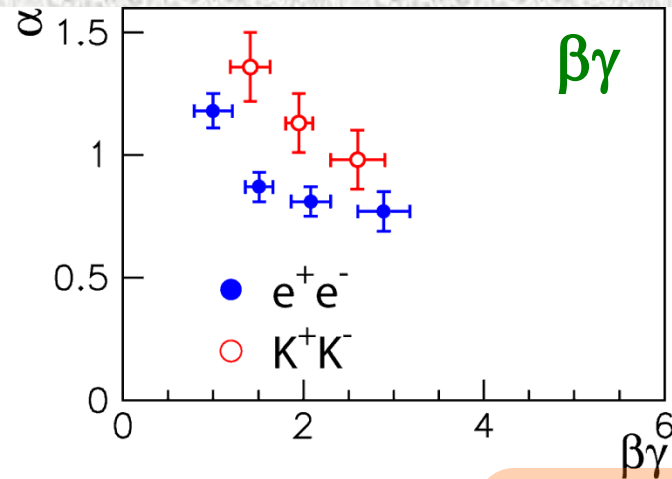


$$\Delta\alpha = -0.02$$

[K-acceptance]

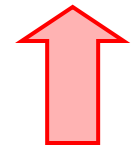
元々の核内崩壊率が低いために、小さな値

Acceptance Correction for α



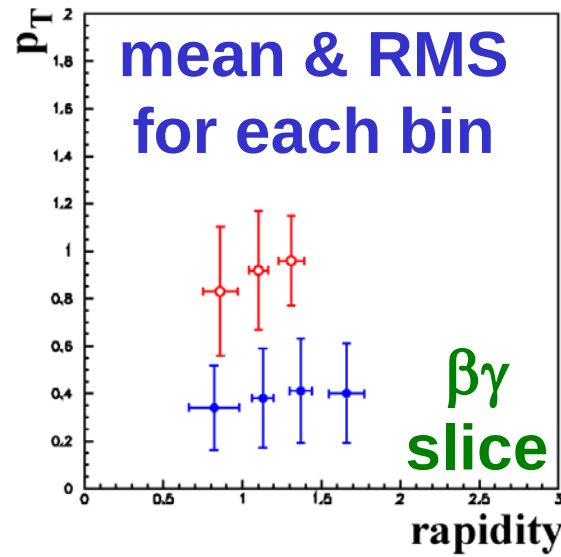
extrapolate $\alpha_{\phi \rightarrow e^+e^-}$
for the kaon
acceptance

assumption : $\alpha_{\phi \rightarrow e^+e^-}$ is linearly
dependent on the y - p_T plane in
our detector acceptance



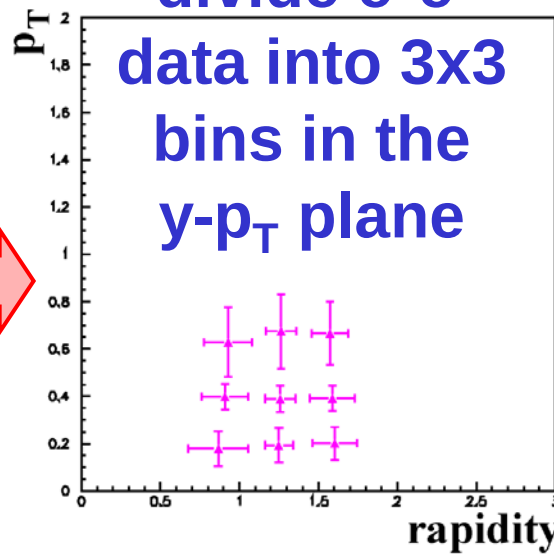
values of

mean & RMS
for each bin

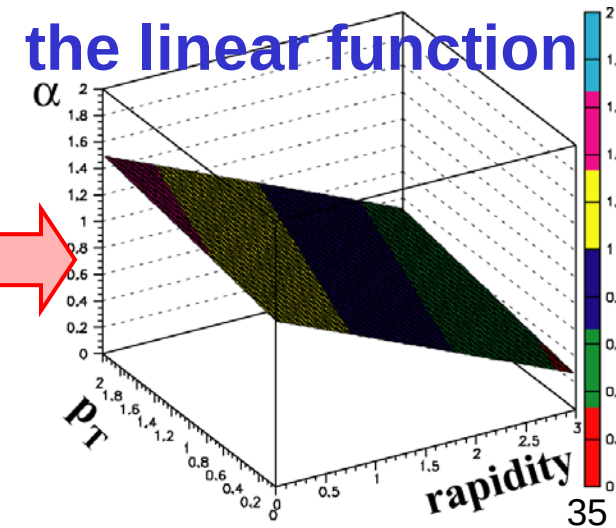


divide e^+e^-

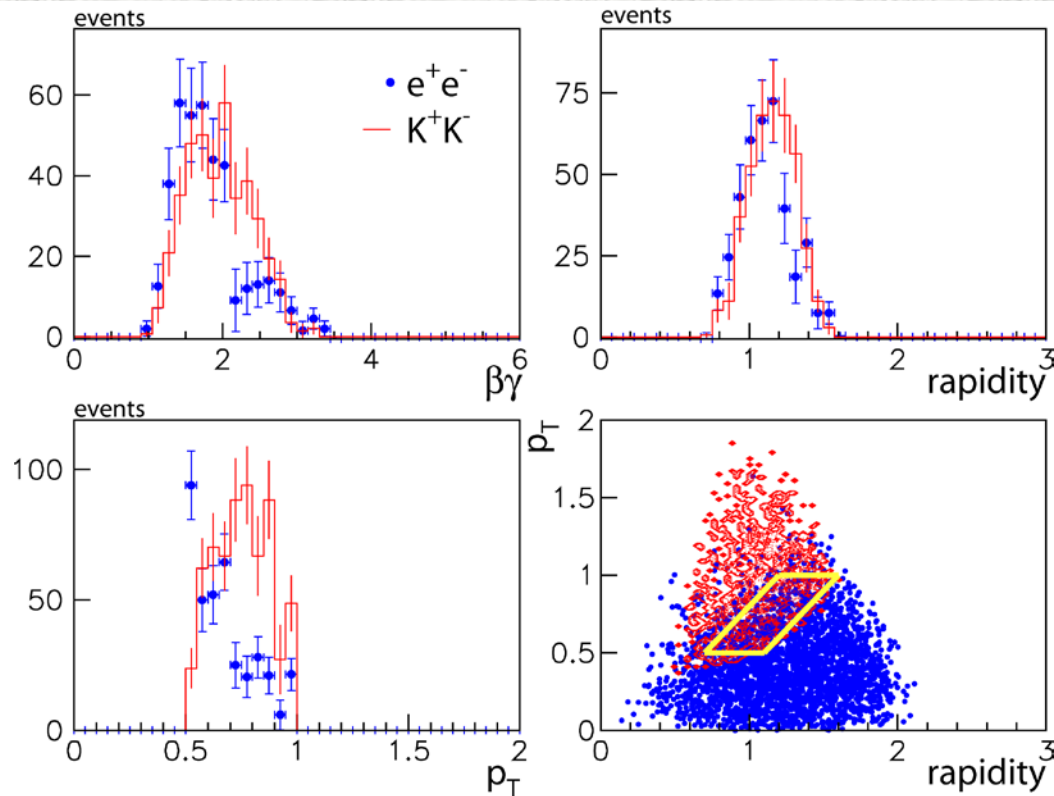
data into 3x3
bins in the
 y - p_T plane



fit the data with
the linear function



α in overlapped acceptance



$$\phi \rightarrow e^+e^- : \alpha = 0.91 \pm 0.10 \pm 0.01$$

$$\phi \rightarrow K^+K^- : \alpha = 1.10 \pm 0.09 \pm 0.02$$

$$\Delta\alpha = 0.18 \pm 0.14$$

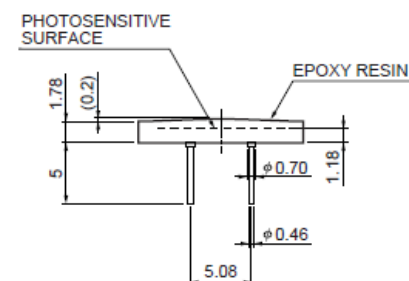
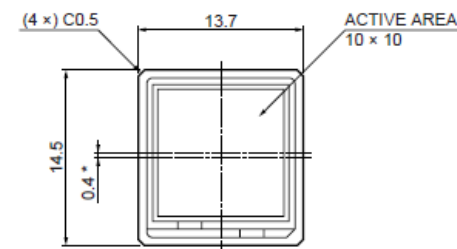
$\alpha_{\phi \rightarrow K^+K^-}$ と $\alpha_{\phi \rightarrow e^+e^-}$ は統計の範囲で一致

SiAPD Hamamatsu S8664

General ratings / Absolute maximum ratings

Type No.	Dimensional outline Window material *1	Package	Effective *2 active area size (mm)	Effective active area (mm ²)	Absolute maximum ratings	
					Operating temperature T _{opr} (°C)	Storage temperature T _{stg} (°C)
S8664-02K	①/K	TO-5	φ0.2	0.03	-20 to +60	-55 to +100
S8664-05K			φ0.5	0.19		
S8664-10K			φ1.0	0.78		
S8664-20K			φ2.0	3.14		
S8664-30K	②/K	TO-8	φ3.0	7.0		-20 to +80
S8664-50K			φ5.0	19.6		
S8664-55	③/E	Ceramic	5 × 5	25		
S8664-1010	④/E		10 × 10	100		

④ S8664-1010



Electrical and optical characteristics (Typ. T_a=25 °C, unless otherwise noted)

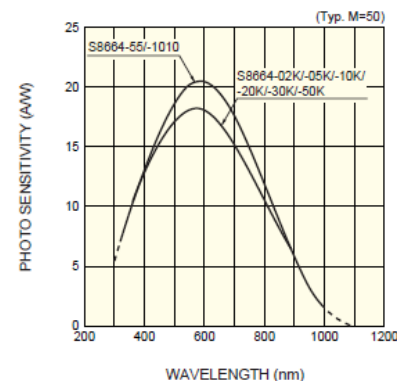
Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak *3 sensitivity wavelength λ _p (nm)	Photo sensitivity S M=1 λ=420 nm (A/W)	Quantum efficiency QE M=1 λ=420 nm (%)	Breakdown voltage V _{BR} I _D =100 μA		Temperature coefficient of V _{BR} (V/°C)	Dark *3 current I _D		Cut-off frequency f _c (MHz)	Terminal *3 capacitance C _t (pF)	Excess Noise index λ=420 nm	Gain M λ=420 nm
					Typ. (V)	Max. (V)		Typ. (nA)	Max. (nA)				
S8664-02K	320 to 1000	600	0.24	70	400	500	0.78	0.1	1	700	0.8	0.2	50
S8664-05K								0.2	1.5	680	1.6		
S8664-10K								0.3	3	530	4		
S8664-20K								0.6	6	280	11		
S8664-30K								1	15	140	22		
S8664-50K								3	35	60	55		
S8664-55								5	50	40	80		
S8664-1010								10	100	11	270		

*1: K: Borosilicate glass E: Epoxy resin

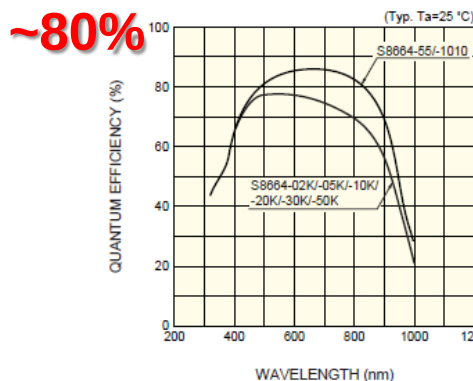
*2: Area in which a typical gain can be obtained.

*3: Values measured at a gain listed in the characteristics table.

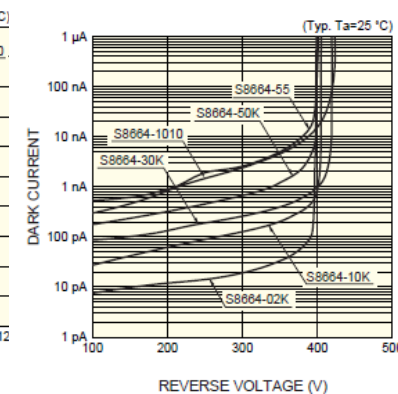
Spectral response



Quantum efficiency vs. wavelength



Dark current vs. reverse voltage



Gain vs. reverse voltage

