

カイラル対称系の実験的観測

～ 質量の起源に実験的に迫る～



槌本 裕二

広島大・クォーク物理研究室

2008-03-28

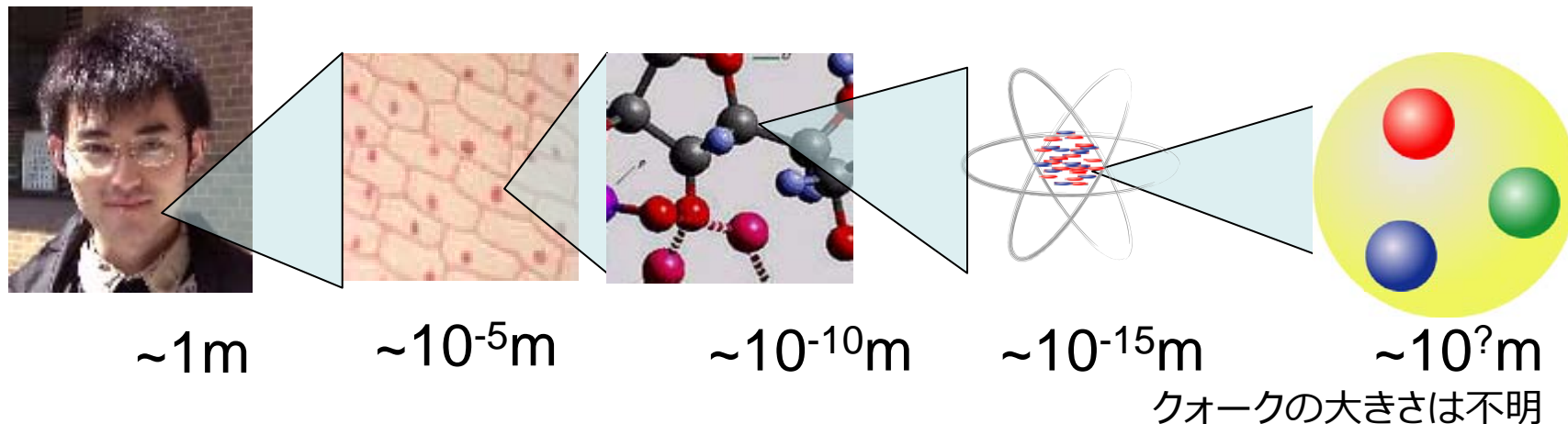
The 2nd Heavy Ion Pub in Hiroshima
高エネルギー原子核衝突におけるカイラル対称性の物理学
- 右も左もわからない初心者のために -

概要

- ハドロン物質の質量は、カイラル対称性の破れから生じている。
- 高温・高密度物質中では、カイラル対称性が部分的に回復すると考えられており、ハドロン物質の質量にも変化があらわれると期待されている。
- 昨今盛んに行われている実験的成果を紹介する。
- また、その一例として、RHIC・PHENIX実験に於けるベクトル中間子観測の手法を紹介する。

クォークとグルーオン

物質を細かくみていくと・・・クォーク(とグルーオン)に辿り着く。



- 核子(陽子・中性子)は、クォーク三つで構成されている。
 - 陽子 = uud, 中性子=udd
 - $m_u \sim m_d \sim 5 \sim 10 \text{ MeV} (\ll m_{p,n}/3)$
 - グルーオンによって結合している(=強い力)

クォークは単独で取り出せない。(グルーオンも)

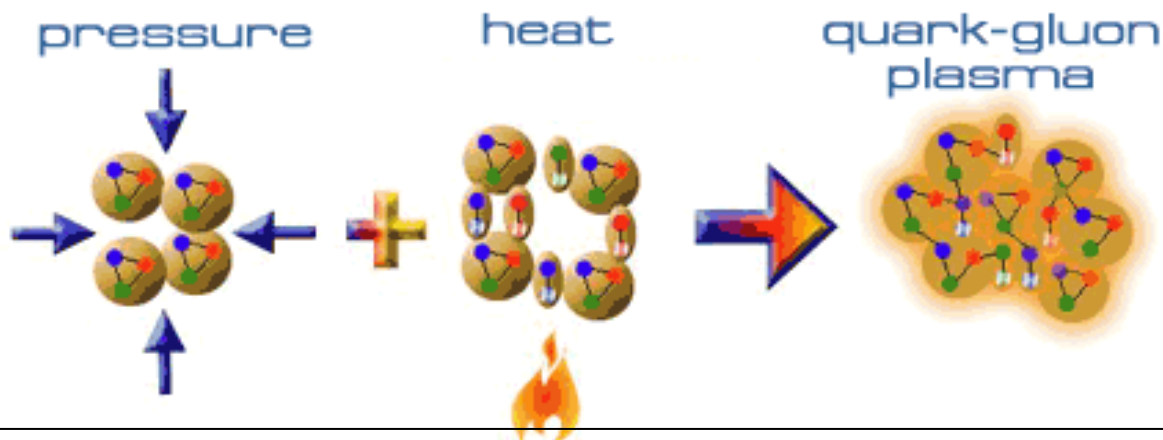
宇宙の歴史と温度

時間[s]	温度[K]	大きさ[m]	支配的な力	出来事
0	∞	~ 0	TOE	すべての力は統一されていたかもしれない。
10^{-43}	10^{32}	10^{-35}	GUT	重力が分離(GUT)
10^{-36}	10^{28}	10^{-31}	強い力	強い力が分離
10^{-33}	10^{25}	10^{-1}		インフレーション
10^{-12}	10^{15}	10^{13}		電弱分離
10^{-5}				クォーク生成(クォークが結合)
10^{-4}				反物質がなくなる
10^2	10^9			原子核生成(核子が結合,核融合) H,He,...
10^{13}	10^3			原子生成(原子核と電子が結合, 晴れ上がり)
10^{17}		10^{21}	星,銀河	
10^{18}	2.7		重元素・生命	

■ 期待される物理現象

- クォークとグルーオンが閉じこめから解放される(QGP)
- カイラル対称性が(部分的に)回復し、核子の有効質量が消える

クォーク・グルーオン・プラズマ



高温/高密度環境で、
QGP相の存在が
QCD理論によって
予言されている

クォーク(とグルーオン)が核子から解放され、強い力が長距離力として支配する系

閉じこめの解消
核子質量の消失

QGPの生成(クォークの核子内閉じこめからの解放)と、カイラル対称性の(部分的)回復は、必ずしも同時に起こるわけではないかもしれないが、同じような温度で起こるらしい。

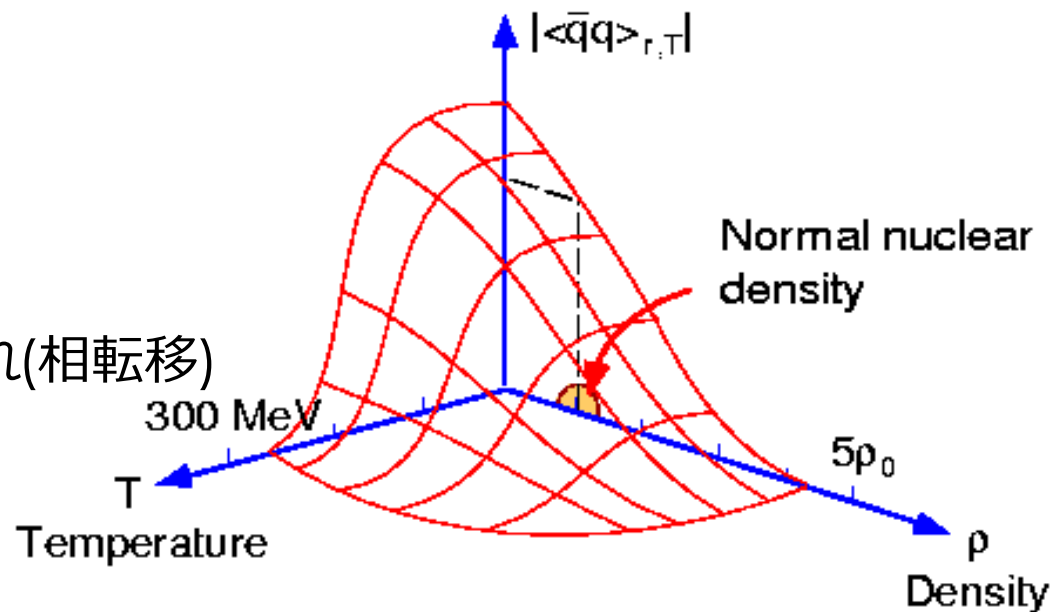
しかし、これには反論があり、同時に起こるべきという理論もある。

ハドロンの有効質量とカイラル対称性

ハドロン質量 ÷ クォーク数
 $m_u \sim m_d = 300 \text{ MeV}/c^2$
 $m_s = 500 \text{ MeV}/c^2$

↑ カイラル対称性の自発的破れ(相転移)

真空中のQuark質量
 $m_u \sim m_d \sim 5 \text{ MeV}/c^2$
 $m_s \sim 100 \text{ MeV}/c^2$



- 核子の質量の98%は、カイラル対称性の破れにより生じると考えられている。
 - 残り2%は、ヒッグス場によるクォーク質量
- 高温/高密度状態下では、カイラル対称性が回復するらしい。

探針としての軽質量ベクトル中間子(LVM)

- 低質量ベクトル中間子(LVM)の質量は、周囲のカイラル対称性の影響を大きく反映しているとの予測があり、カイラル対称性の回復を実験的に探る大きな手がかり。
- レプトン対とハドロン対の2つの崩壊モードがあるため、それぞれの観測の比較ができる。

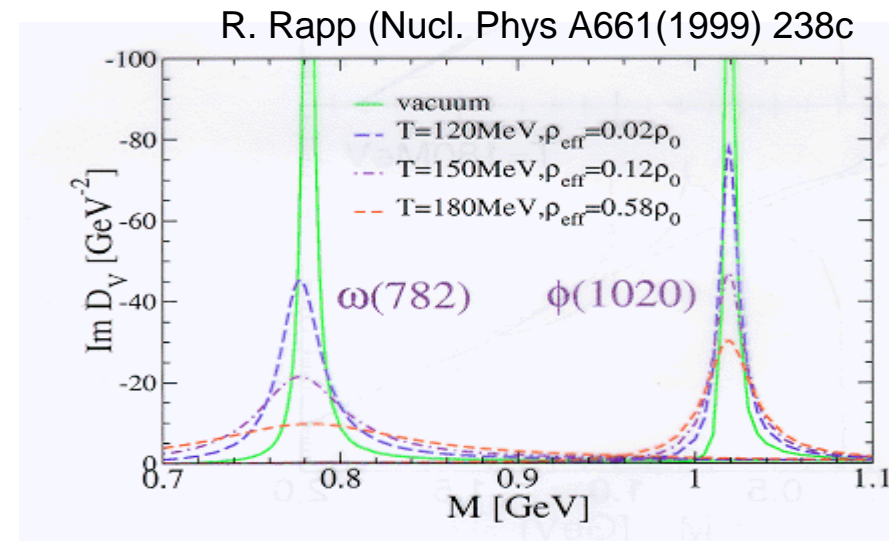
- $\omega \rightarrow ee/\pi\pi\pi$: $782 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 8.4 \text{ MeV}/c^2$

- $\rho \rightarrow ee/\pi\pi$: $769 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 150 \text{ MeV}/c^2$

- 大きな質量変化が期待される

- $\phi \rightarrow ee/KK$: $1019 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 4.2 \text{ MeV}/c^2$

- $\phi \rightarrow KK$ のQ値が小さいため、比較的大きな崩壊比の変化を期待



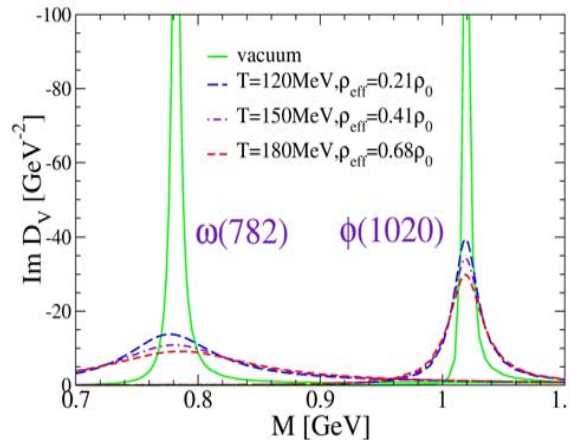
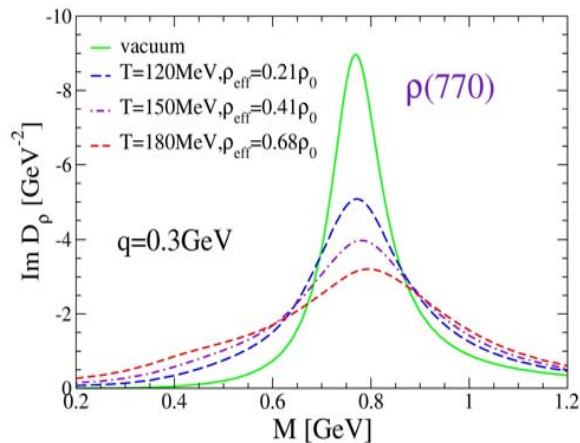
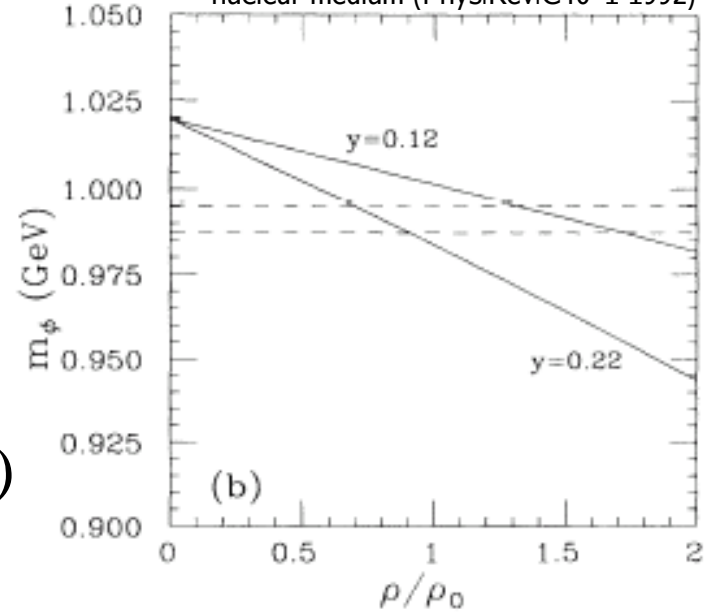
通常原子核密度中での質量変化

- 有限密度中では、密度の1次関数的に質量が減っていくというモデル予言がある。
- このような質量変化を実験的に捉えることはできないか?
- 通常原子核密度を ρ_0 として、質量と幅の変化を1次関数で表現

$$m^* = m_0 (1 - K_1 \rho / \rho_0)$$

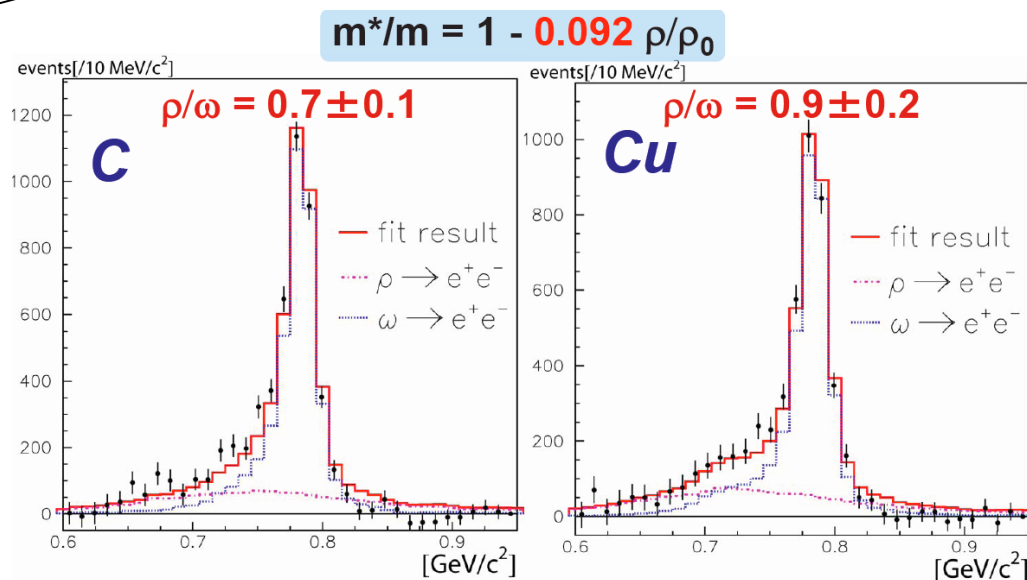
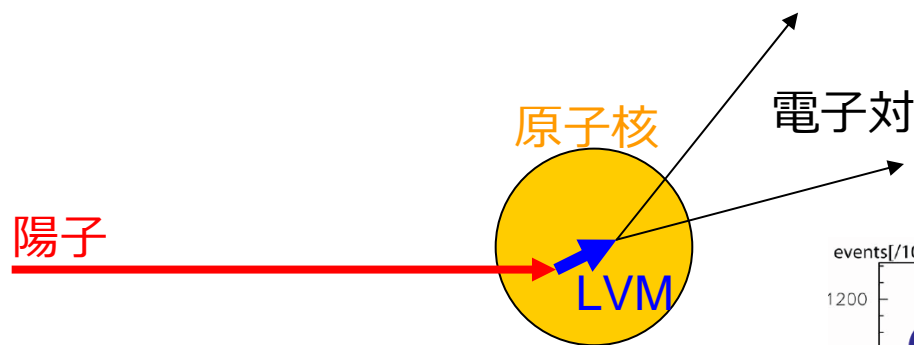
$$\Gamma^* = \Gamma_0 (1 - K_2 \rho / \rho_0)$$

T.Hatsuda and S.Lee
QCD sum rules for vector mesons in the nuclear medium (Phys.Rev.C46-1 1992)



このほかにもいくつかの予言があり、その変化はモデルにより大きく異なるが、質量は小さく、幅は大きくなるという予想が多い。

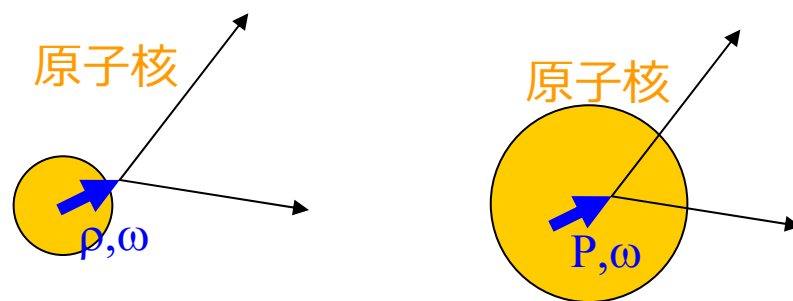
KEK E325実験における ρ/ω 中間子測定



■ KEK-PS E325実験において、原子核中で生成・崩壊させたLVMの質量変化を観測。

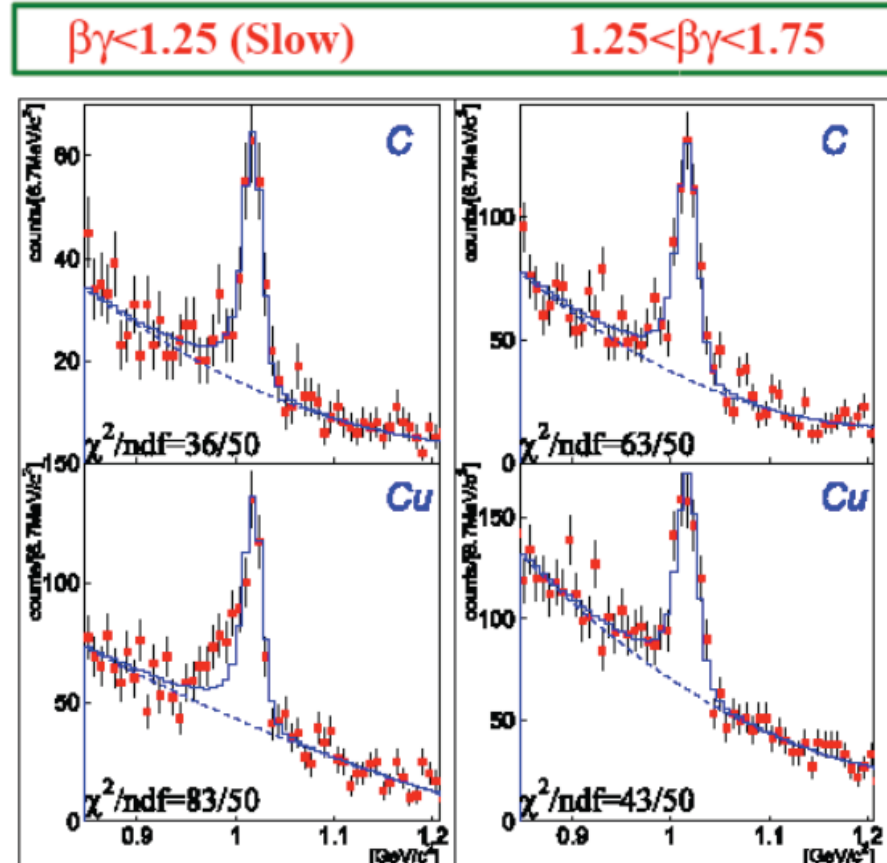
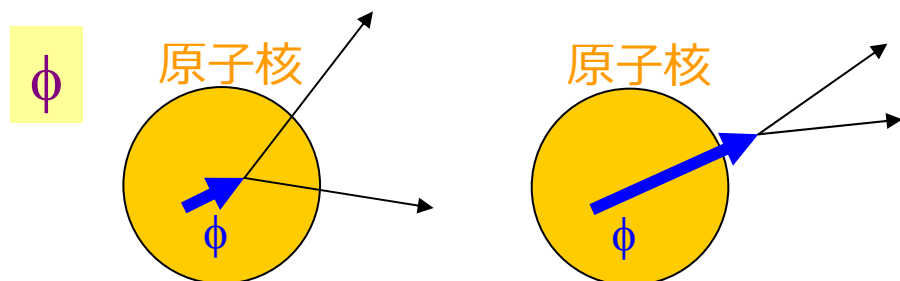
- ω の質量がシフト
- ρ が大きく変化

■ 大きな原子核ほど変化が大きい



KEK E325実験における ϕ 中間子測定

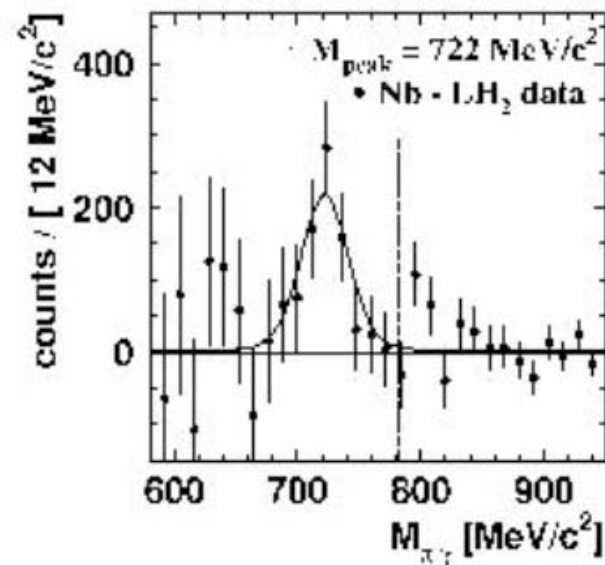
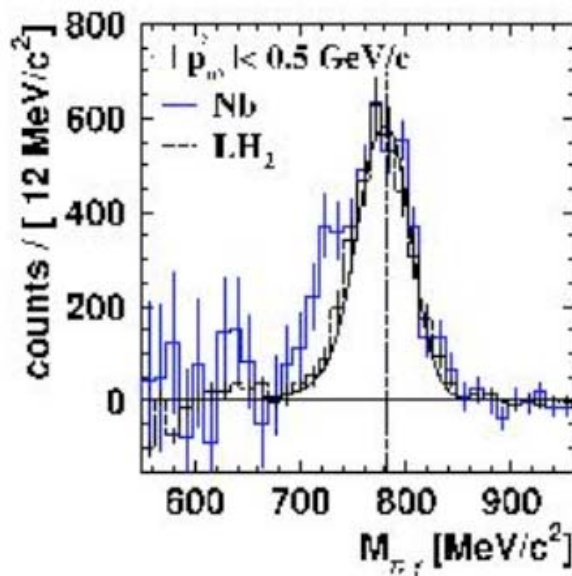
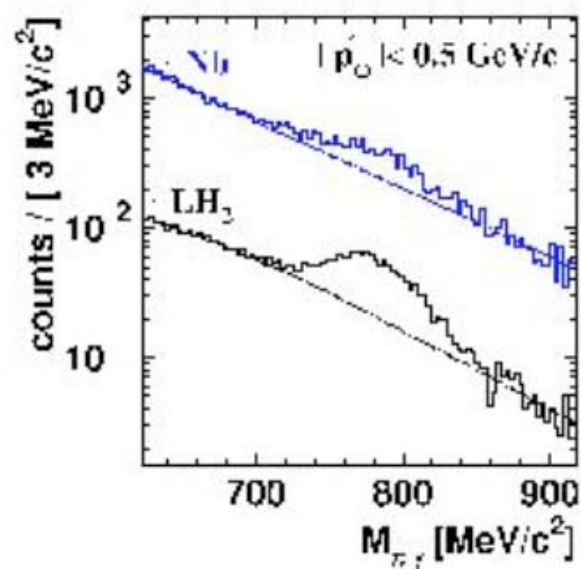
- ϕ 中間子においても、同様の質量変化を観測した。
- 変化は大きな原子核ほど大きく、また遅い中間子ほど顕著に見られた。
 - 低速な ϕ は核内に長く留まるため。



	ρ, ω	ϕ
k_1	$9.2 \pm 0.2\%$	$3.4^{+0.6}_{-0.7}\%$
k_2	0 (fixed)	$2.6^{+1.8}_{-1.2}$

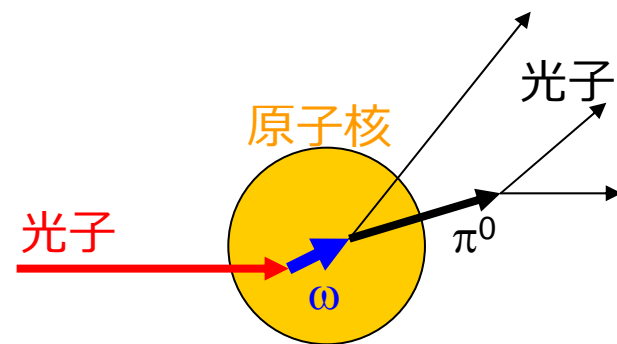
TAPS実験

$$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$$

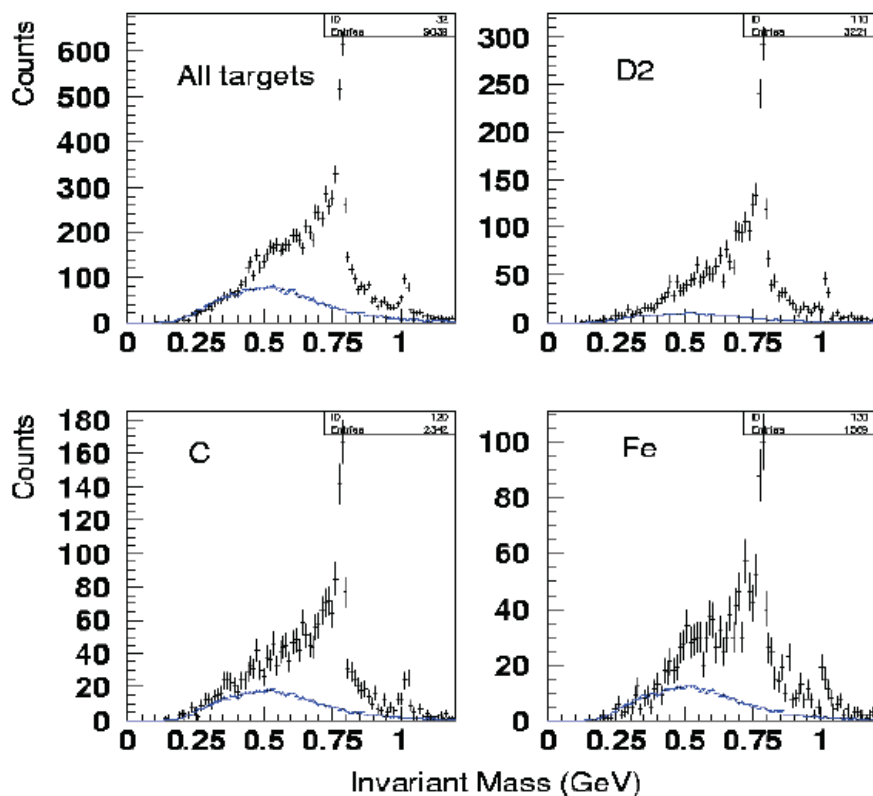


- TAPS実験(光子入射)でも、 $\omega(\omega \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma)$ の質量変化を観測。

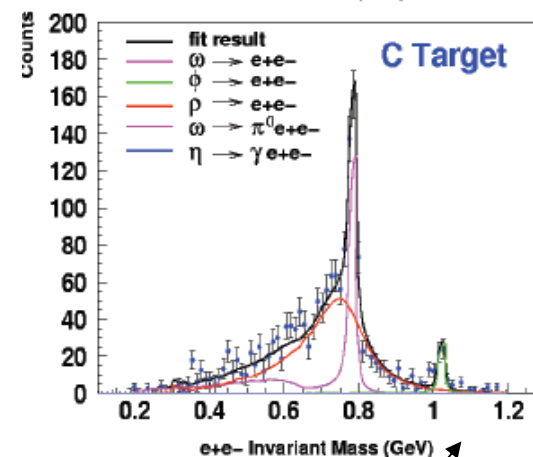
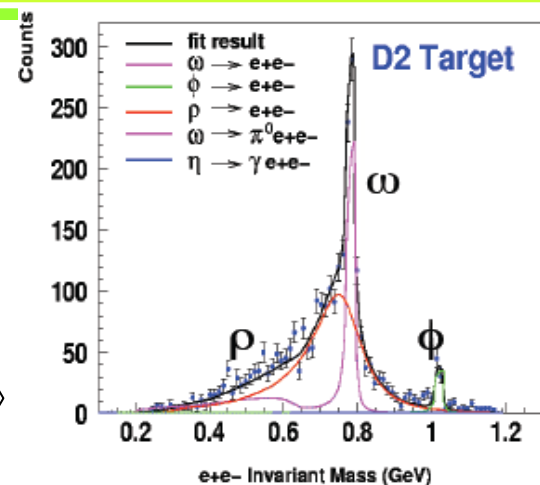
● $K_1 = 14 \pm 1\%$



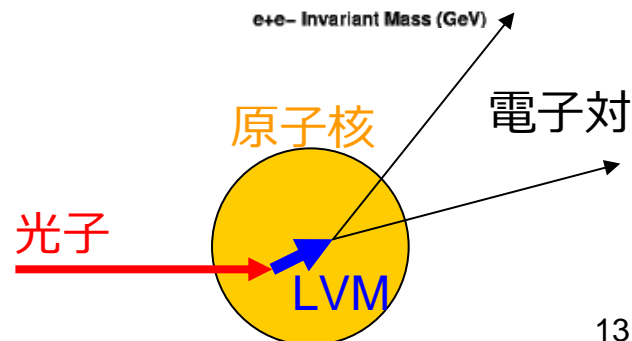
JLab CLAS実験



background subtraction

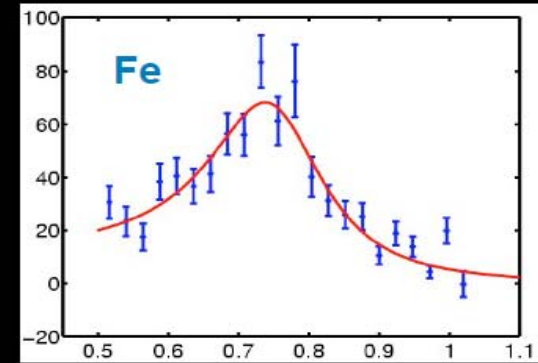
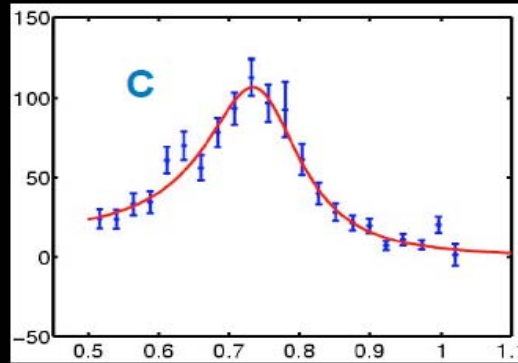
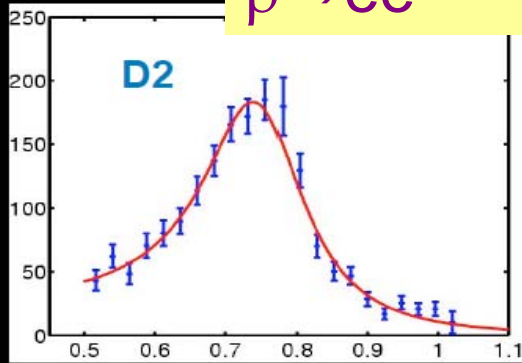


Jlabが昨年、電子対観測の追試を行った。



JLab CLAS実験

$\rho \rightarrow ee$



e^+e^- Invariant Mass (GeV)

Target	Mass (MeV/c ²) CLAS data	Width (MeV/c ²) CLAS data	Mass (MeV/c ²) Giessen Sim.	Width (MeV/c ²) Giessen Sim.
² H	770.3 +/- 3.2	185.2 +/- 8.6	-	-
¹² C	762.5 +/- 3.7	176.4 +/- 9.5	773.8 +/- 0.9	177.6 +/- 2.1
⁴⁸ Ti- ⁵⁶ Fe	779.0 +/- 5.7	217.7 +/- 14.5	773.8 +/- 5.4	202.5 +/- 11.6

The vacuum properties of the ρ meson are: $m=770 \text{ MeV}/c^2$ and $\Gamma=150 \text{ MeV}$.
Broadening of the width is consistent with many-body effects.

■ 鉄原子核でも ρ に大きな変化は見られず。

● $K_1=2 \pm 2\%$

Japanese Exotic Again?

高密度物質中でのLVM測定まとめ

- 変化を観測できたかもしれない。
 - ρ が大きく変化しているか、それに準じる状態ができていないのか。
 - ω と ϕ の一部にも何かあるかも？
- 着眼する力学によって結果は大きく異なってくる。

	KEK	CBELSA/TAPS
Reaction	$\rho A \rightarrow (\rho, \omega, \phi) A'$ $VM \rightarrow e^+e^-$	$\gamma A \rightarrow \omega A'$ $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$
Condition	$\rho=0.53\rho_0, T\sim 0 \text{ MeV}$	$\rho=0.55\rho_0, T\sim 0 \text{ MeV}$
Mass	$\Delta m_\rho \sim -9\%$ $\Delta m_\phi \sim -4\%$	$\Delta m_\omega \sim -14\%^*$
Width	$\Delta \Gamma_\rho = 0 \text{ MeV}$ $\Gamma_\phi(\rho=\rho_0) = 47 \text{ MeV}$	$\Gamma_\omega(\rho=\rho_0) \approx 140 \text{ MeV}$ (new unpublished)
Note	No direct extraction of ρ meson (BKGD)	π^0 FSI Large background

実験	測定モード	結果
		$\left(\frac{m^*}{m} = 1 - k_1 \frac{\rho}{\rho_0} \right)$
KEK-PS E325	$\rho+A \rightarrow \rho/\omega+X(\rho/\omega \rightarrow e^+e^-)$ $\rho+A \rightarrow \phi+X(\phi \rightarrow e^+e^-)$	$K_1 = 9.2 \pm 0.2\%$ $K_1 \sim 4\%$
TAPS	$\gamma+A \rightarrow \omega+X(\omega \rightarrow e^+e^-)$	$K_1 \sim 14 \pm 1\%$
CLAS	$\gamma+A \rightarrow \rho/\omega/\phi+A^*(\rho \rightarrow e^+e^-)$	$K_1 \sim 2 \pm 2\%$ (zero consistent)

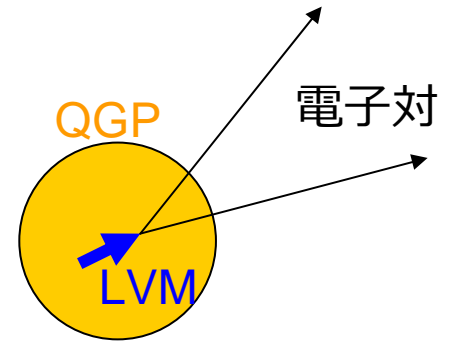
ちょっとまとめ

- ハドロン物質の質量は、カイラル対称性の破れから生じている。
 - 高温・高密度物質中では、カイラル対称性が部分的に回復すると考えられており、ハドロン物質の質量にも変化があらわれると期待されている。
- 各地で実験が行われ、LVMの質量変化を示唆する結果も報告されている。
 - 実験間の比較はまだ難しい。
- 観測しているLVMが、どの様な環境下で崩壊したのかを把握することが重要。
 - 速度の遅い(運動量の小さい)LVMに注目せよ!

運動量の他に注意すべきもの：崩壊モード

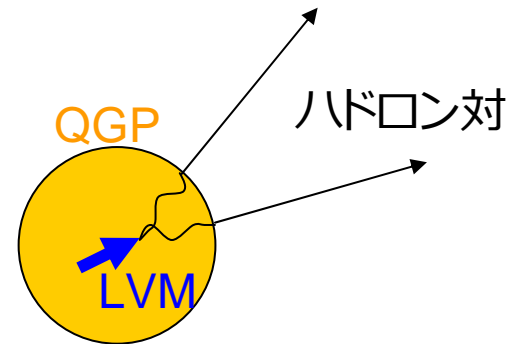
■ レプトンチャンネル

- 強い相互作用をしないため、媒体中のLVMの性質をより良く反映している。
- 崩壊確率が低い ($\sim 0.01\%$)
- 背景電子が少なく、eIDも容易。
- 低 p_T のLVMを測定可能で、統計さえあれば高 p_T も。



■ ハドロンチャンネル

- 崩壊後も強い相互作用による散乱を受ける
- 崩壊確率が高く、高統計(数十%)で高 p_T まで測定可能
- ハドロンIDが困難で、背景も多い。
- $\phi \rightarrow KK$ はQ値が小さいので、 $m_\phi < 2m_K$ になると崩壊できなくなるかも。



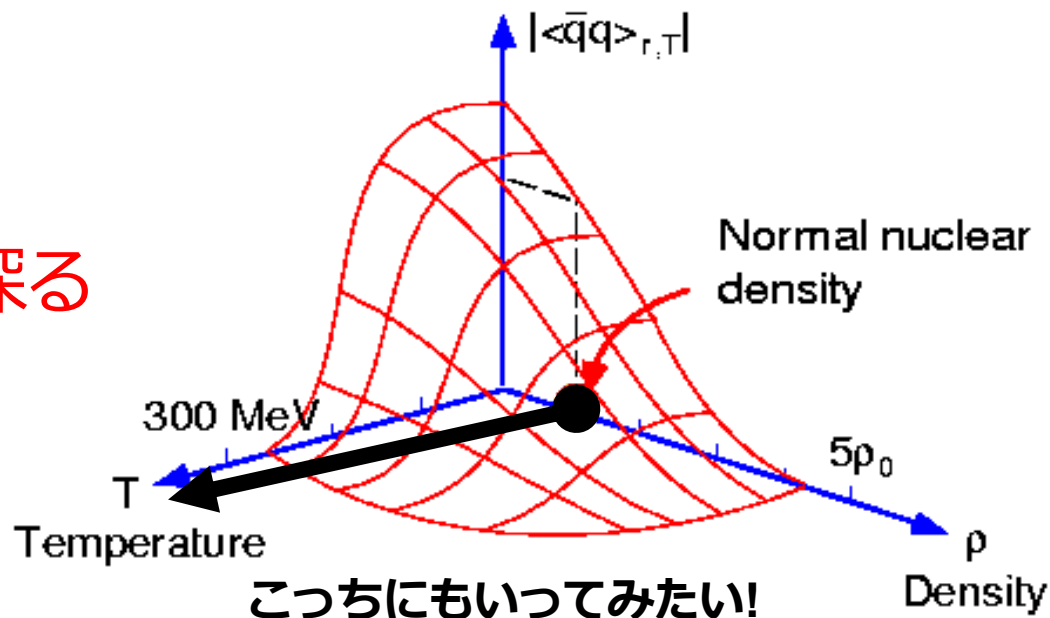
■ 2つのチャンネルで、より広い運動量領域を測定可能。

■ 2つのチャンネルの比較(崩壊比)をすれば、より詳細なLVM(や高温系)の測定ができる。

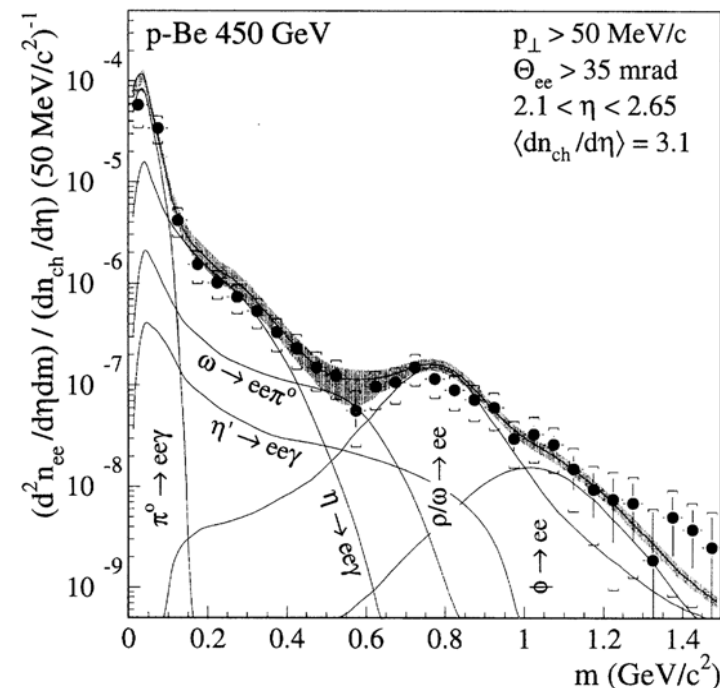
高温環境下での質量観測実験

- RHIC・SPS等の重イオン衝突で生成される高温物質(QGP?)中でも、カイラル対称性の部分的回復が予測されている。
- PHENIX実験に於ける電子対を用いたベクトル中間子観測の手法と最新の結果を紹介する。

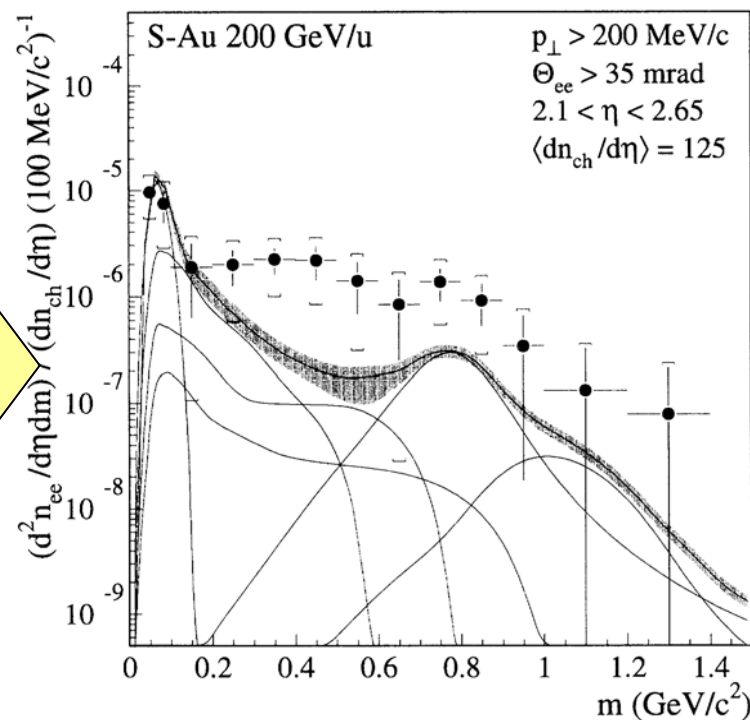
重イオン衝突実験は、
超高温物質の性質を探る
強力なツール



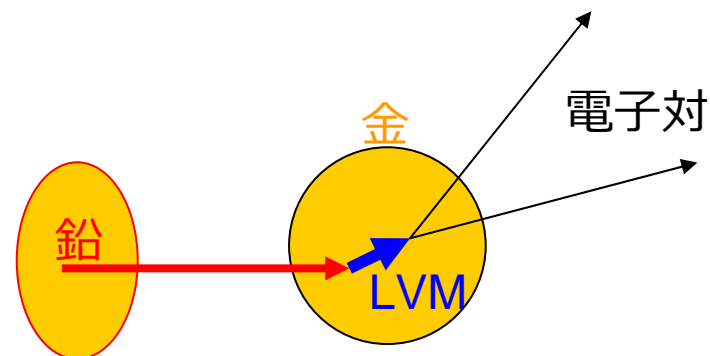
CERN SPS CERES実験



温度を上げると...



- CERES実験@CERN-SPSが、既知の成分の和では説明できない質量分布を電子対で観測。
- 通常核密度ではなく、より高温・高密度環境での実験

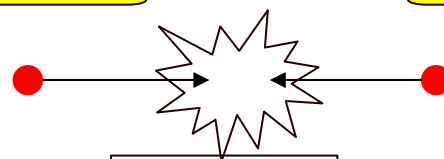


重イオン衝突実験と陽子陽子衝突実験

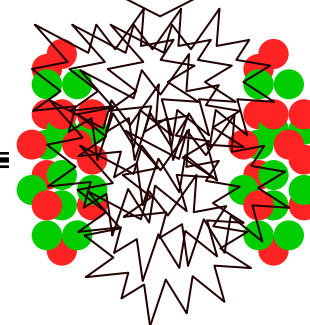
- 測定した生成量や運動量分布などを、Au+Auとp+pで比較する

素過程はQCDで記述可能
粒子は真空中で反応

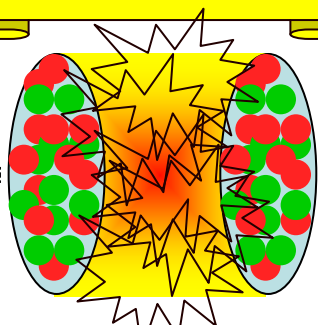
陽子陽子衝突



核子数倍



重イオン衝突

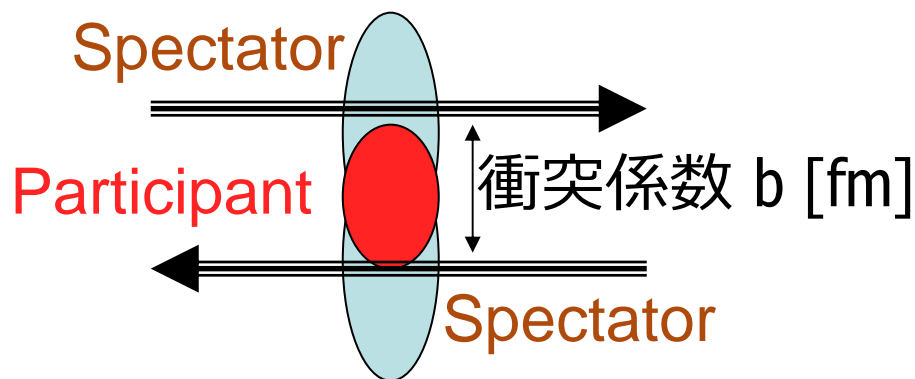


衝突点には、
多数の粒子が発生し、
高温の系ができる。

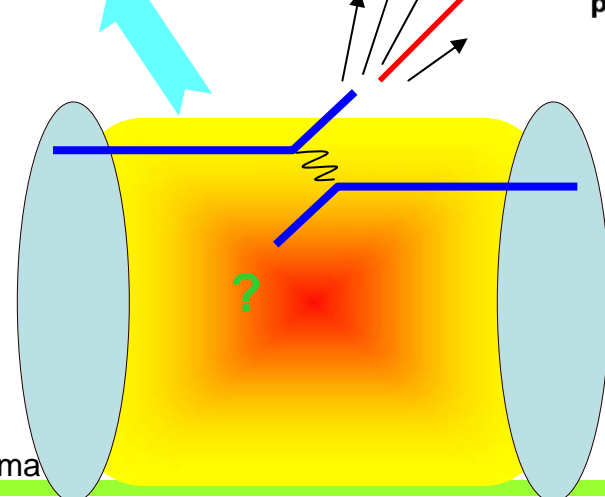
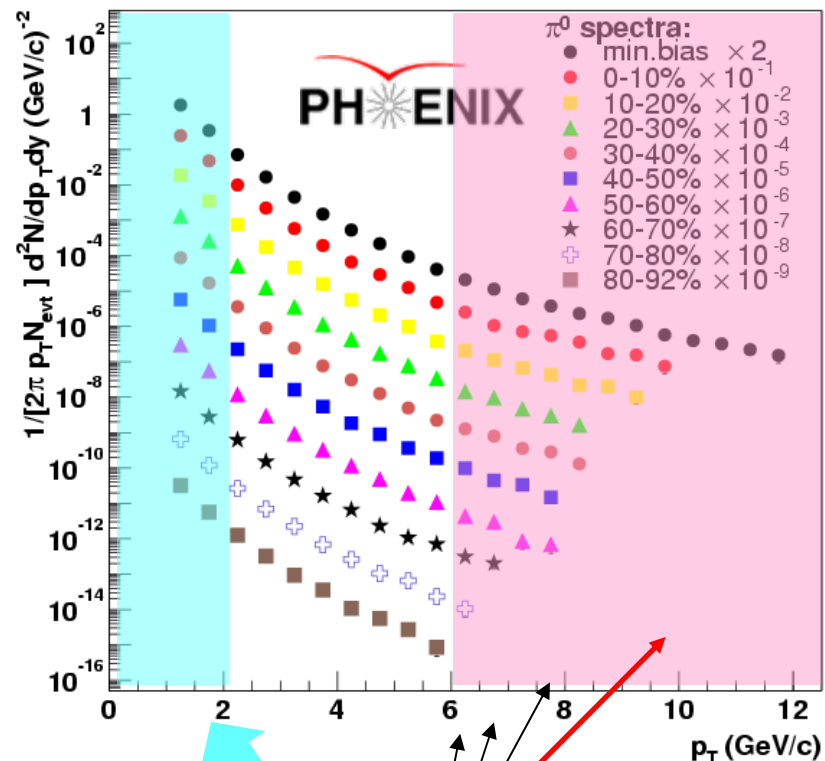
p+p衝突の
重ねあわせ
では説明で
きない、系
による効果
が見えるか

原子核の多重散乱効果の測定のため、p+A(d+A)の測定も重要

2つのスケールファクター n_{part} と n_{col}



- n_{part} (number of participant)
 - participant (衝突に関与した核子) の数
 - $n_{part}(pp) = 2, n_{part}(AuAu) = 2 \sim 2 \times 197$
 - 低い運動量の粒子数をスケール
- n_{col} (number of (binary) collision)
 - 核子同士の衝突の数
 - $n_{col}(pp) = 1, n_{col}(AuAu) = 1 \sim 197^2 (1100)$
 - 高い運動量の粒子数をスケール
- 粒子の運動量が違くと、見ている物理が異なる



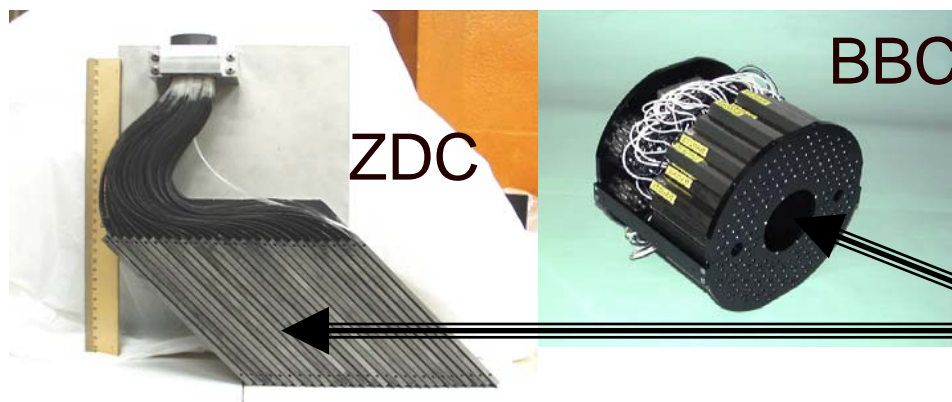
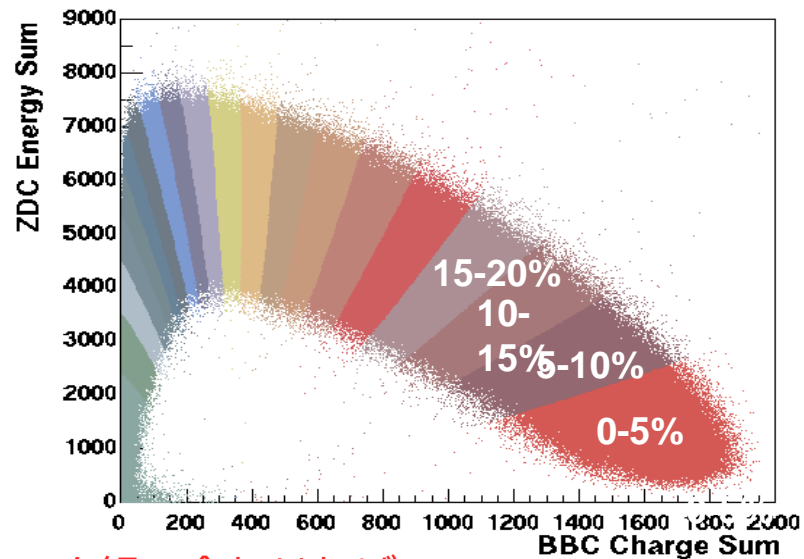
トリガ系検出器(衝突系測定器)

■ Beam Beam Counter

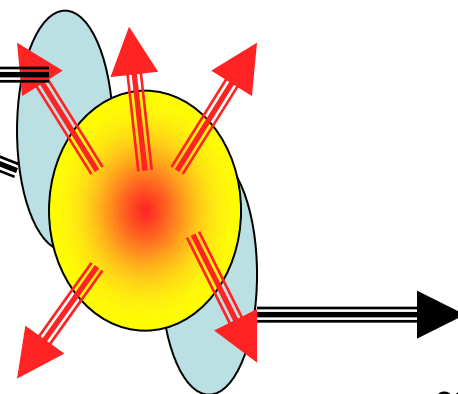
- 衝突によって散乱した陽子等をとらえる。
- 衝突を検出し、衝突点や衝突時刻を測る。
- 衝突に関与した核子数を測る。

■ Zero Degree Calorimeter

- 衝突に関与しなかった中性子をとらえる。



2つを組み合わせれば
衝突中心度(Centrality;衝突係数の関数)を
計ることができる



高温系の温度と大きさのコントロール

- 衝突させる核子を変える
 - p~S~Cu~Au(Pb/U)
- 衝突させるエネルギーを変える
 - $\sqrt{s} = 19\text{GeV(SPS)} \rightarrow 10 \sim 63 \sim 200\text{GeV(RHIC)}$
- 衝突係数を変える(変わる)
 - 中心衝突→周縁衝突
- 異なる崩壊モードで同時観測
 - 特に $\phi \rightarrow \text{KK}$ は $m_\phi < 2m_K$ になると崩壊できなくなる。
- 異なる運動量(m_T)を同時観測
 - 特に低運動量の領域で変化を期待

固定票的実験と衝突実験

■ 固定票的実験

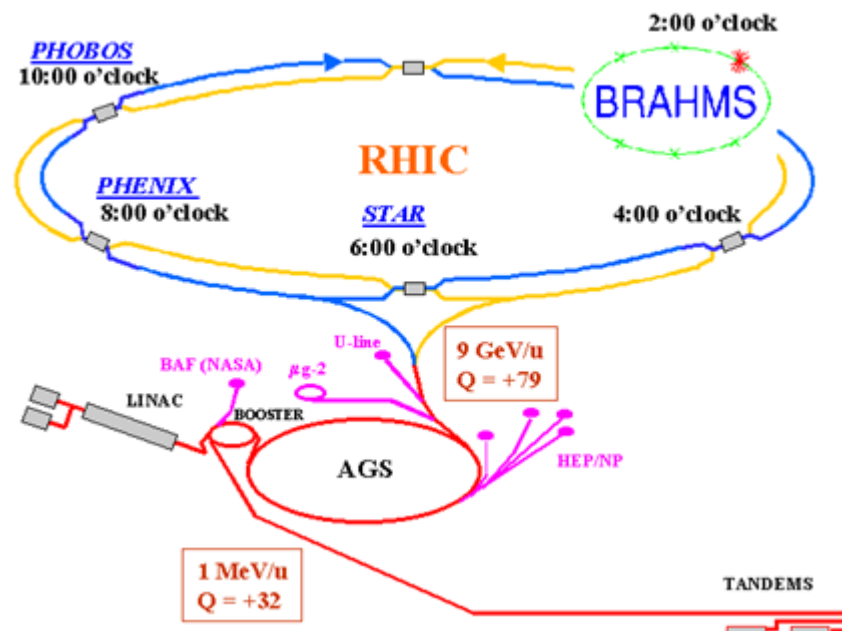
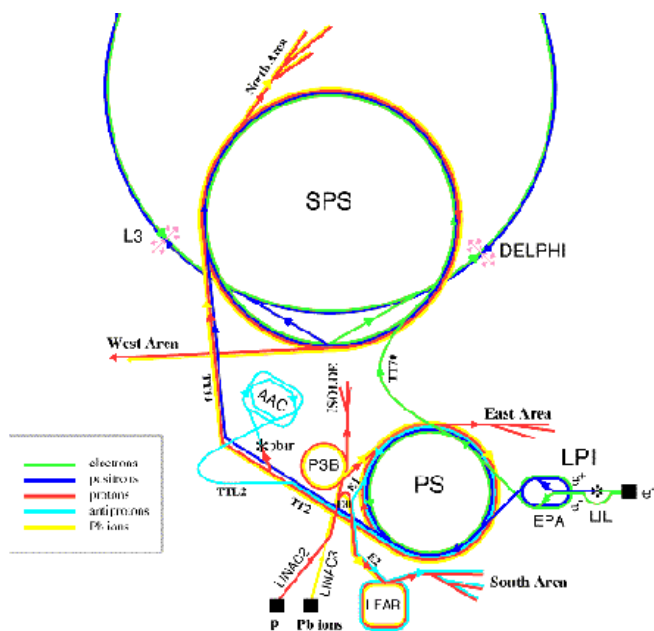
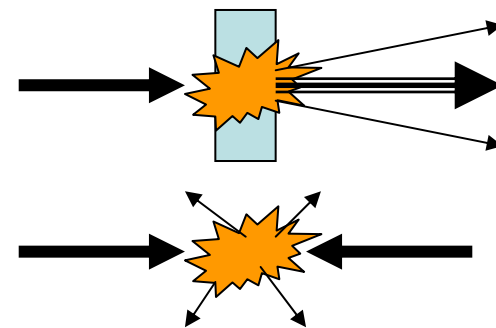
- 加速した粒子を実験室に設置した標的に入射させる実験
- 高い衝突頻度を得ることができる。
- ビームラインを増やせば多くの実験が同時にできる。

■ 衝突実験

- 双方向に加速した粒子を互いに衝突させる実験
- 高い衝突エネルギーを得ることができる。
- 衝突点でしか実験できず、個別にビームをon/offできない。

■ 核子あたりの重心系衝突エネルギー \sqrt{s}

$$\sqrt{s_{NN}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1m_2}$$



ローレンツ不変な指標

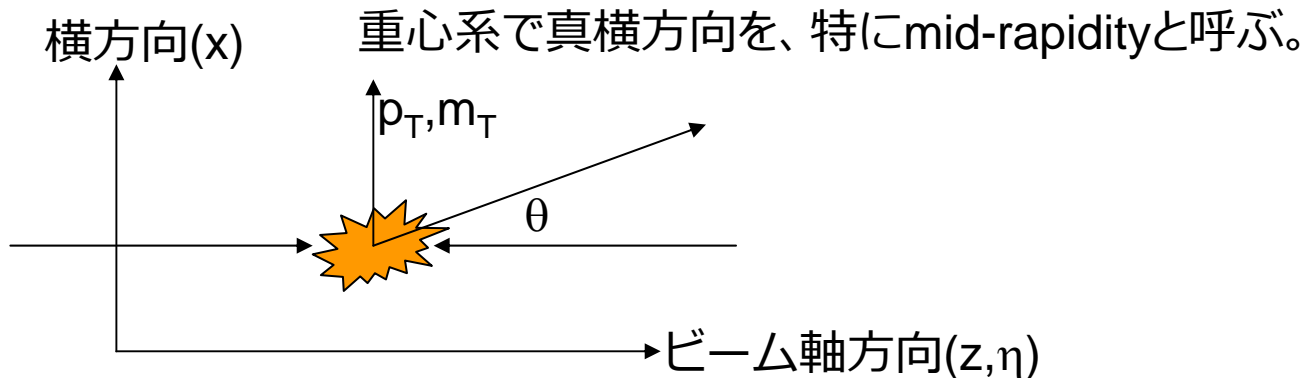
固定票的実験・衝突実験を相互に比較するため、ローレンツ不変の指標を定義する。

■ ラピディティ(y)

- $y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right) = \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{E} \right)$
- dy はローレンツ不変

■ 疑ラピディティ(η)

- $\eta = \lim_{m \rightarrow 0} y = -\ln \tan(\cos \theta)$
- ラピディティは質量(m)の関数なので、 $\eta(m \rightarrow 0)$ 極限



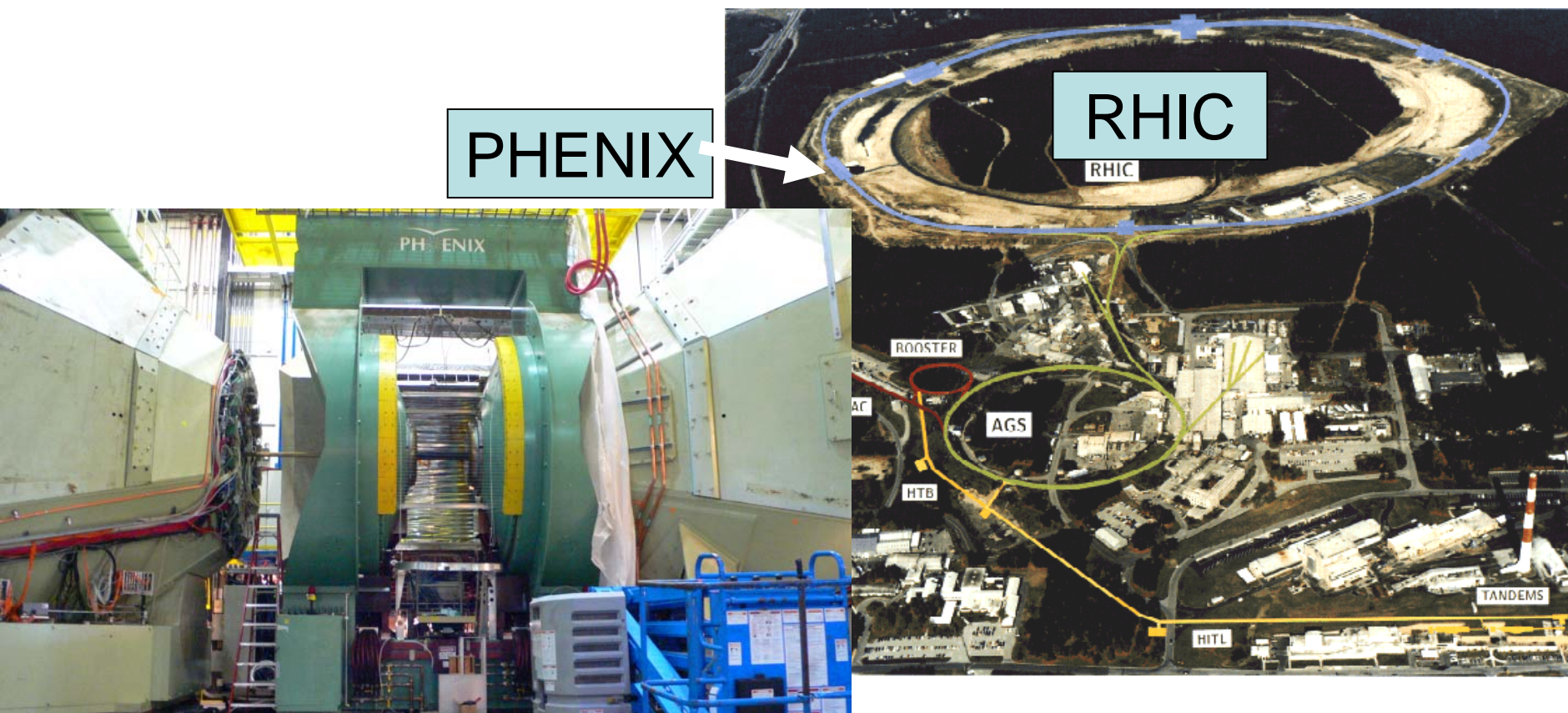
BNL RHIC加速器

- 現時点でのエネルギーフロンティア
- 米国ニューヨーク州にある、ブルックヘブン国立研究所(BNL)
- RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)
- 2つの方向に別々に、陽子を250GeV, 金イオンを100GeVまで加速できる。

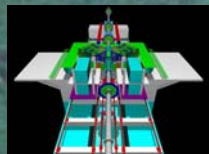


BNL RHIC加速器 と PHENIX実験

- RHIC : 周長3.8km × 2本のリングの衝突型加速器
- 6つの衝突点(衝突点でしか実験できない)
- p+p ~ d+Au ~ Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ (500GeV for p+p)



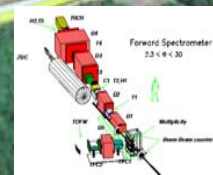
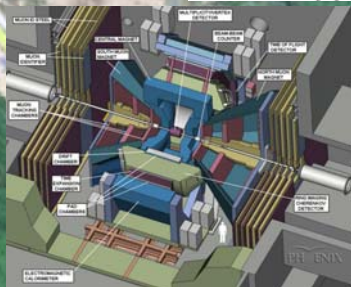
PHENIX実験と、RHICの仲間たち



2本のリング

PHENIX

RHIC



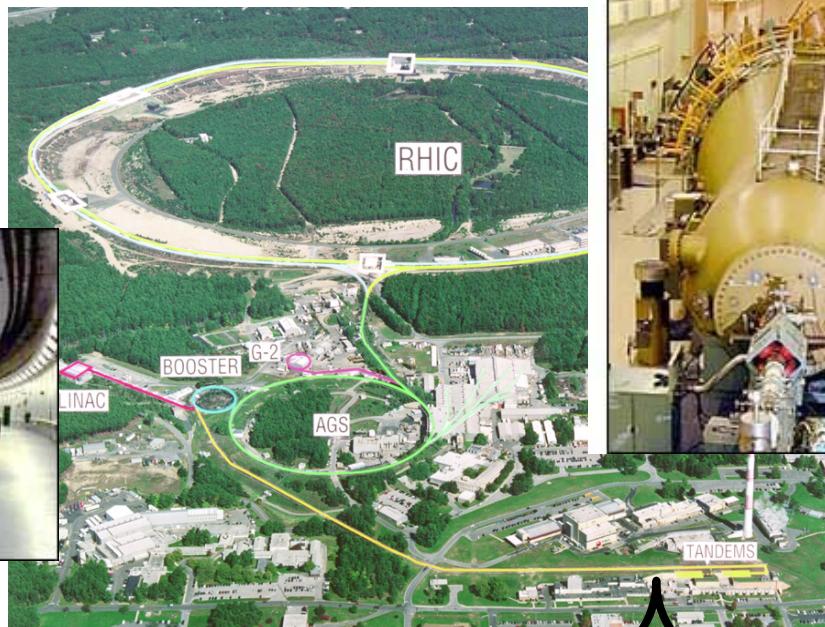
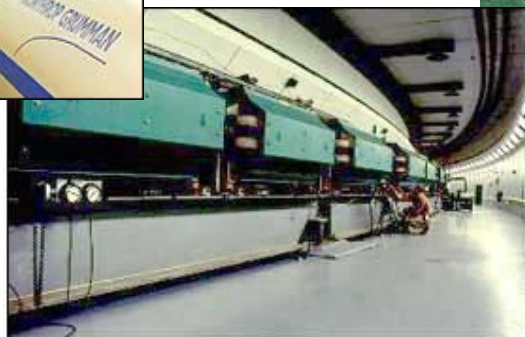
LINAC

BOOSTER

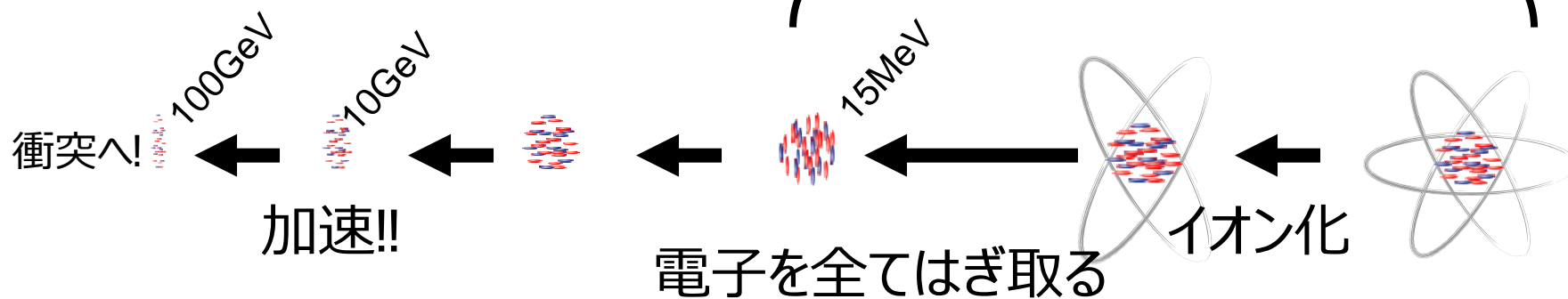
G-2

AGS

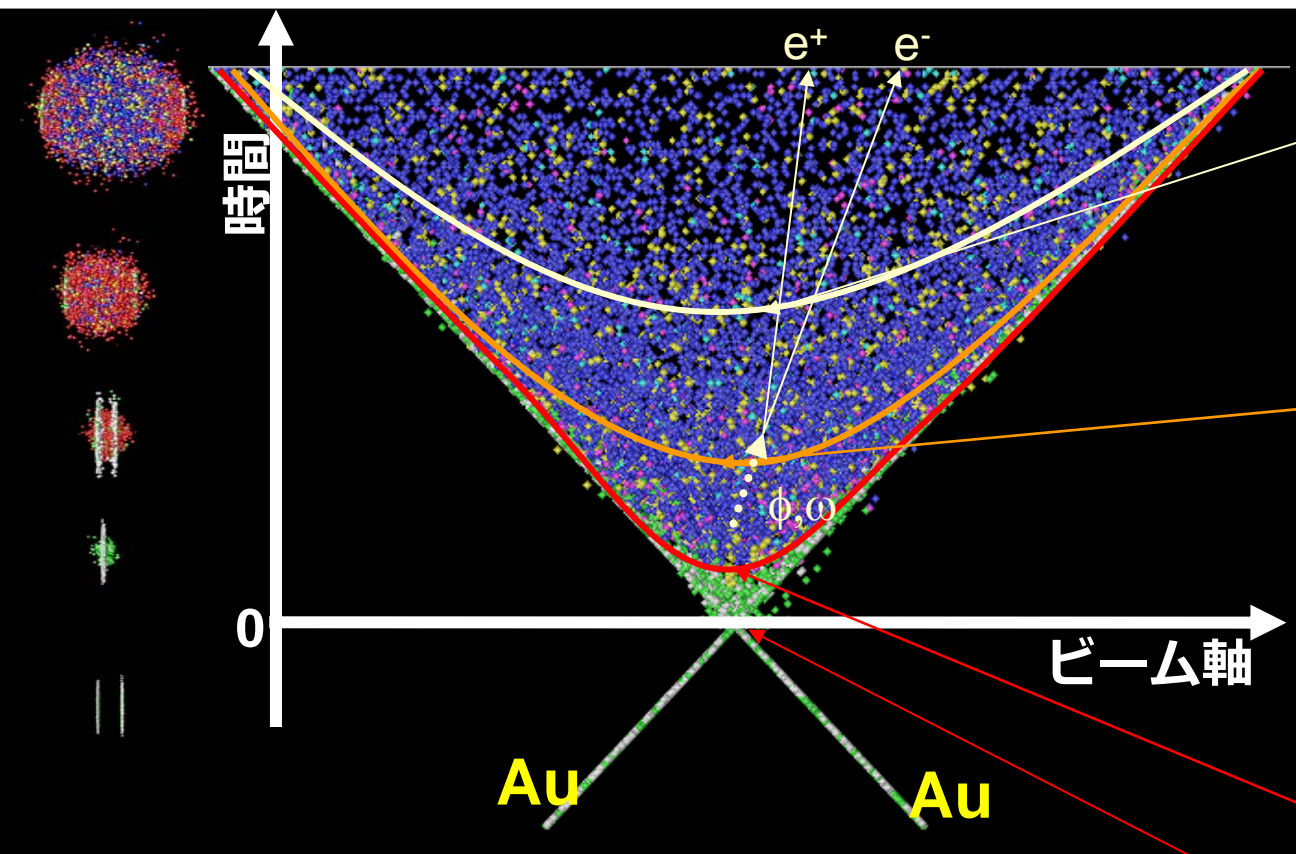
金¹⁹²Au¹⁹²⁺イオンの生成と加速



RHICでは、2本のリングで、
それぞれ陽子～金を加速可能



重イオン衝突(@RHIC)の時系列



■ 熱的凍結

- 運動量分布が決まる

■ 化学凍結(ハドロン化)

- 粒子種分布が決まる

■ 熱平衡(QGP)

■ 衝突

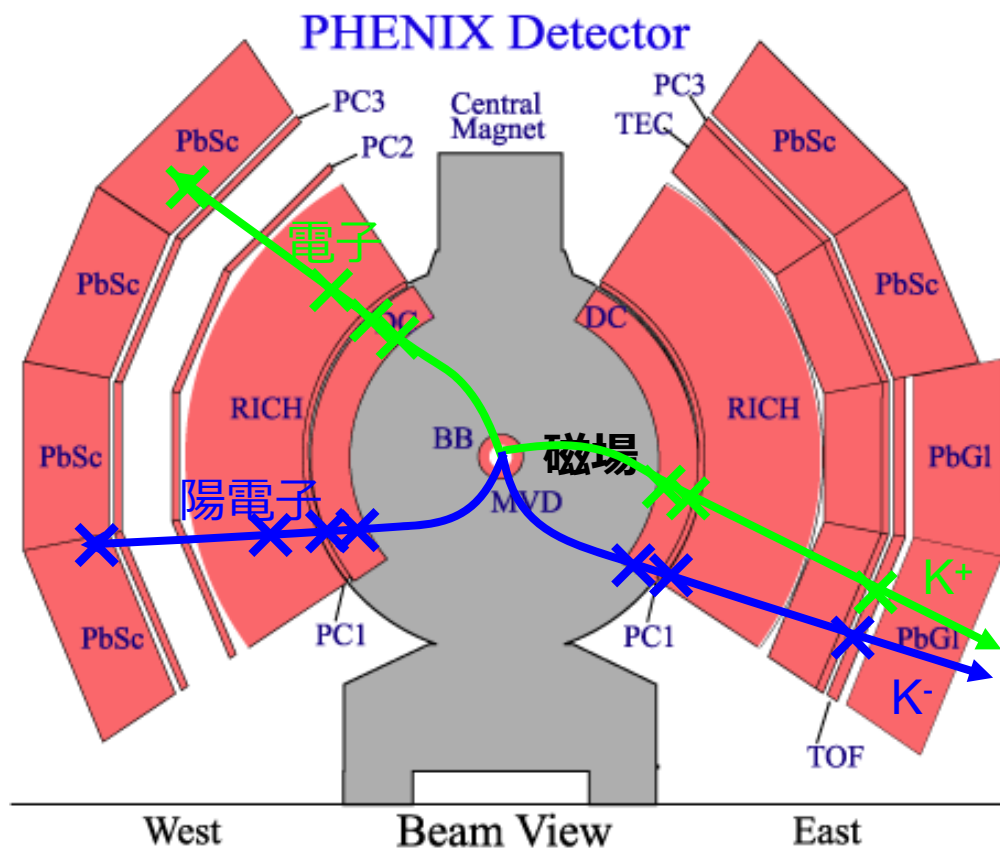
■ 系の大きさ $\sim 10\text{fm}/c$

■ 観測できるのは、凍結後の粒子

PHENIX中央測定器

- 衝突から横方向に放出された、電子、ハドロン、光子を同時に計測可能。
- BBC→MBトリガ/衝突係数/衝突位置
- ドリフトチェンバ(DC)→ p_T
- ガスチェレンコフ(RICH)→電子同定
- ToFカウンタ→ハドロンPID
- 電磁カロリメータ(PbSc/PbGl)→エネルギー測定/ ERT
電子トリガ

多くの実験で、同じような組合せの装置が使われている。



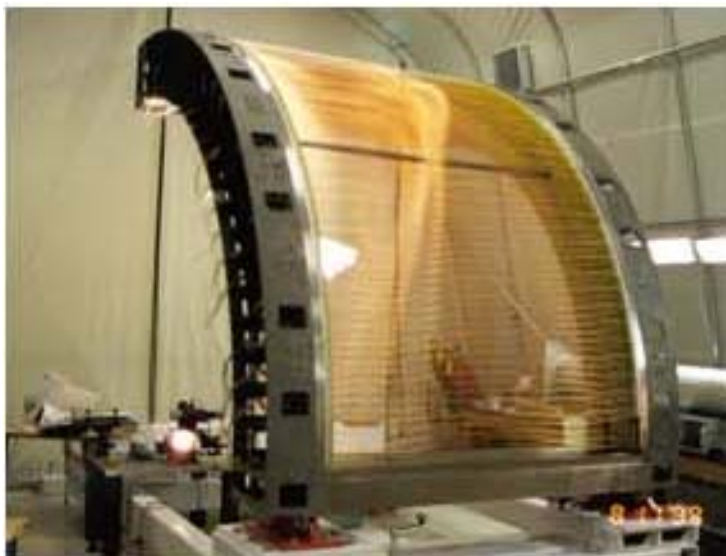
運動量(p_T)測定 - ドリフトチェンバ

- 衝突点付近にかけられた磁場により、荷電粒子が曲げられる。
- DCで検出した飛跡の傾き(α)と磁場から、横方向運動量(p_T)を得る

$$\alpha = K/p_T \quad K \sim 200 \text{ rad GeV}/c$$

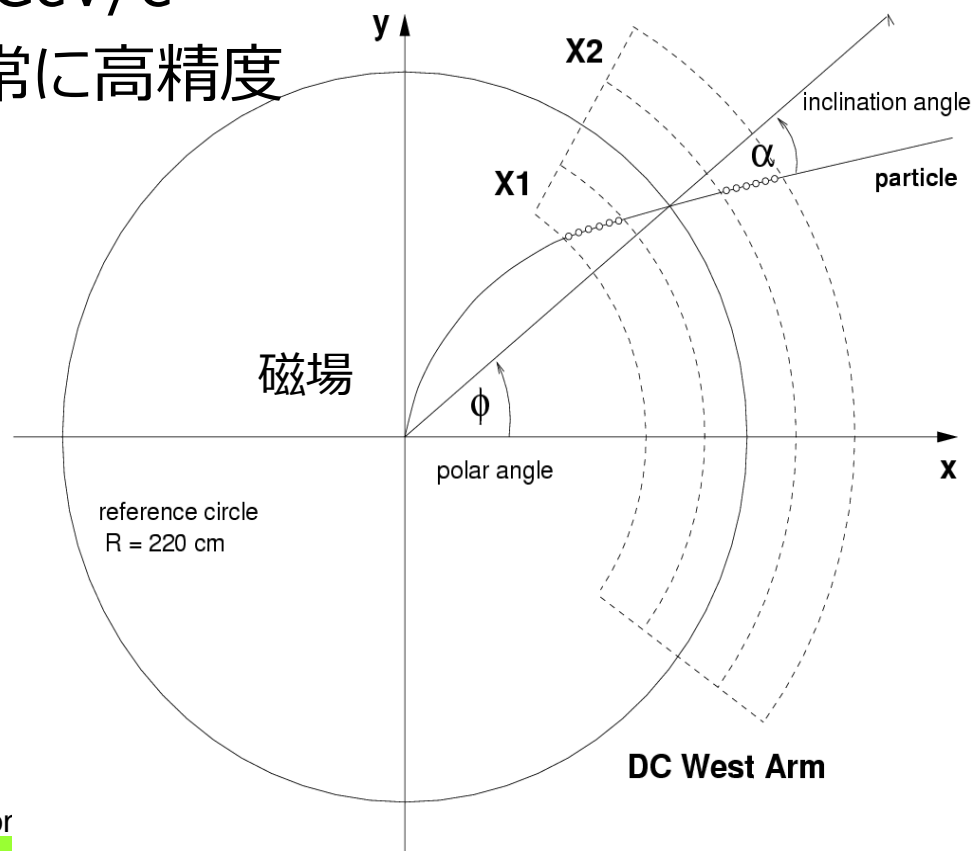
- 運動量分解能は $\sim 0.1\%$ と、非常に高精度

- 主な原因はアライメント精度

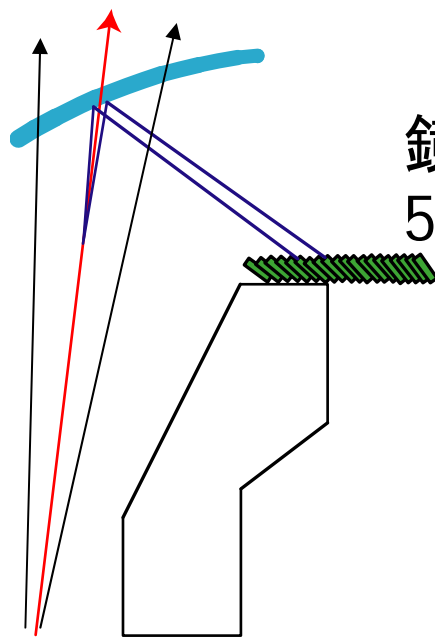
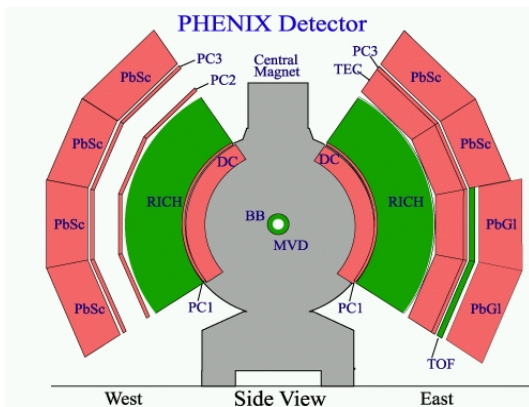


2008-03-28

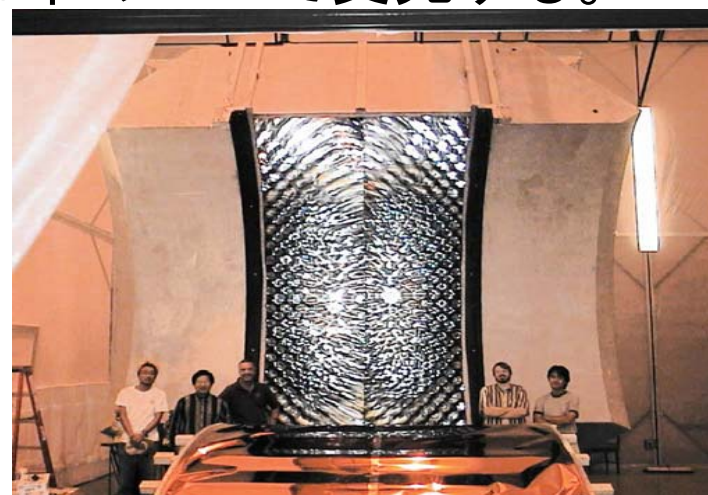
The 2nd Heavy Ion



円像ガスチェレンコフ検出器(RICH)

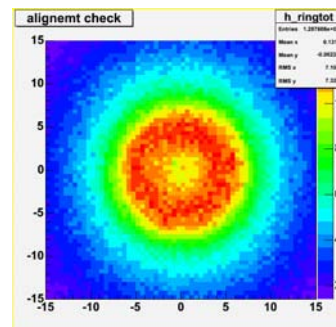


鏡でチェレンコフ光を反射し、5120本のPMTで受光する。



チェレンコフ光の媒質ガス
 CO_2 ($\gamma_{\text{th}} \sim 35$)
eID p_t range : 0.2 ~ 4 GeV/c
使用PMT数
5,120 本
体積40m³

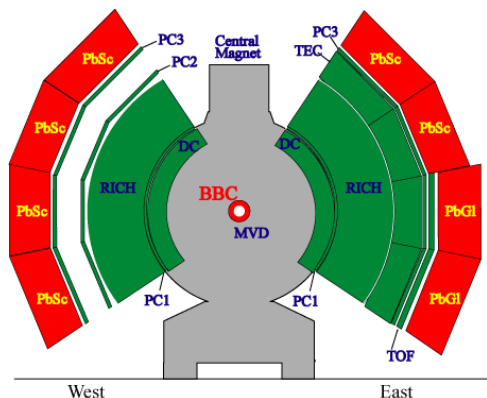
- 電子を識別するための検出器
- 媒質中を光速以上の速度で飛ぶ粒子は、チェレンコフ光を出すことを利用。
- 光速に近い粒子の判別に有用



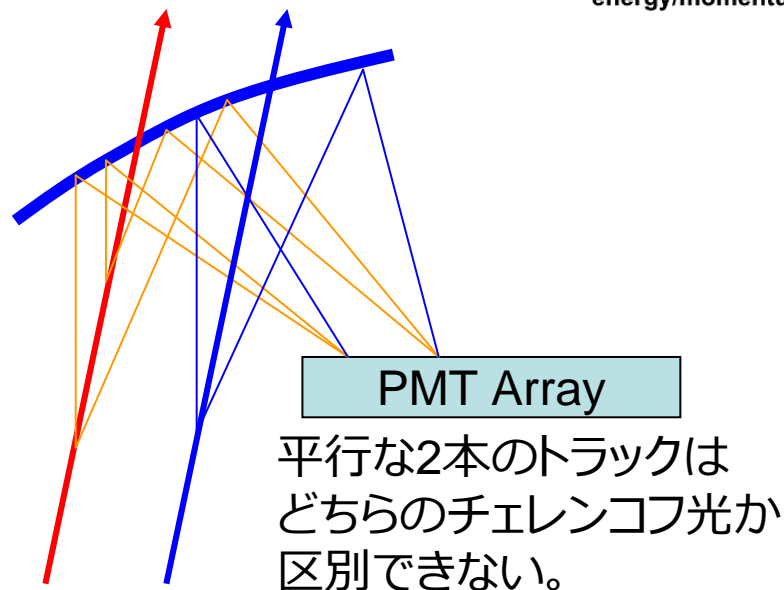
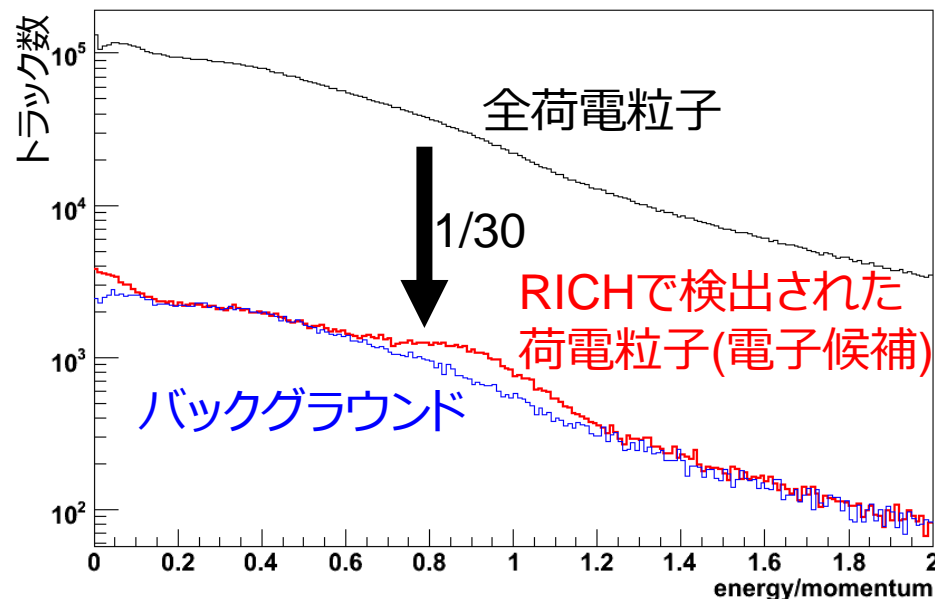
チェレンコフ光は円状に広がる。

RICHとEMCによる電子同定

- RICHを用いることで、荷電粒子の中から電子(と陽電子)を同定することができる。
- EMCで測定したエネルギーと、飛跡から計算した運動量の比をみると、電子が1付近にみつける。
 - ハドロンは電磁カロリメータを透過する(イオン化エネルギーは 270MeV@PHENIX-PbSc)
- RICHは平行に入った2つの粒子を区別できないため、発生粒子数の多い重イオン衝突では、まだバックグラウンドが多い。



EMC(電磁カロリメータ)
電子や光子に電磁シャワーを作らせて、その大きさからエネルギーを測定する



p+p衝突実験における電子対の不変質量分布

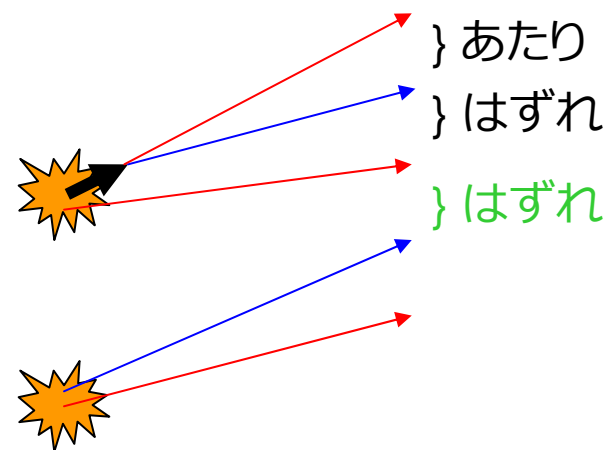
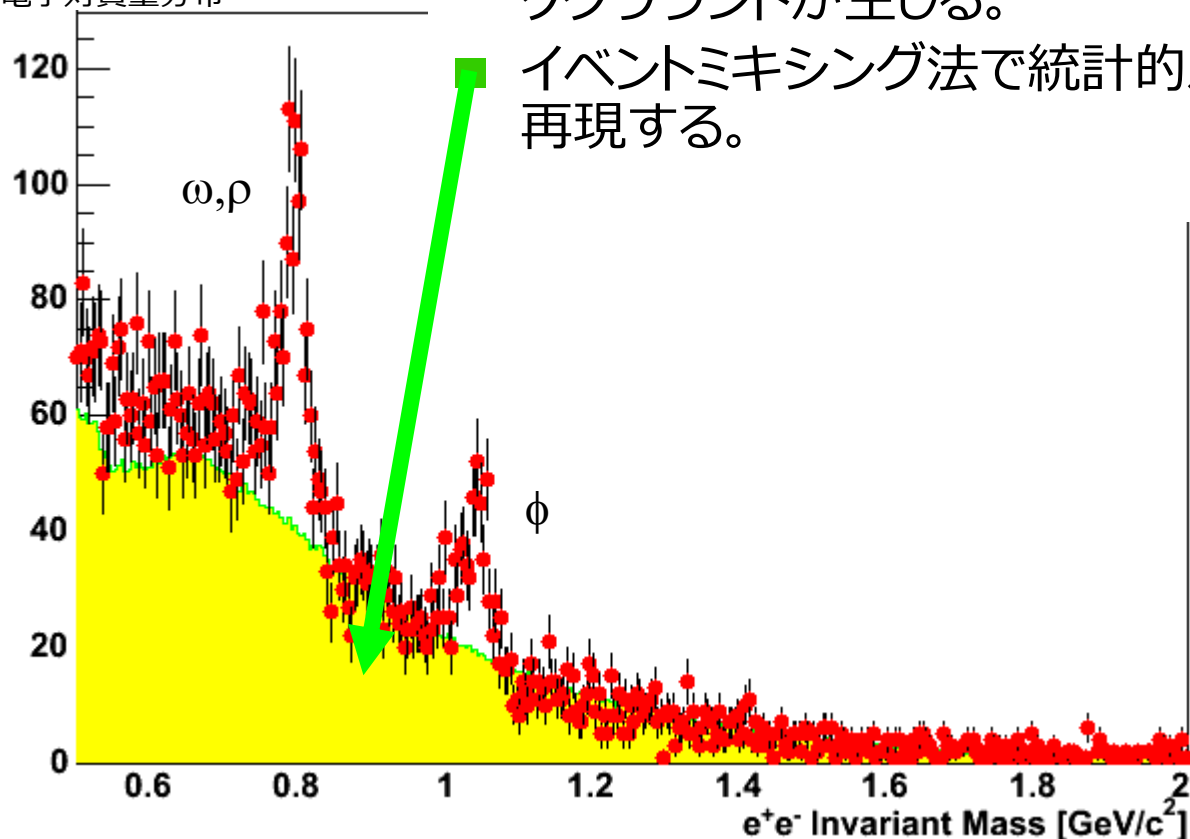
- 測定した電子と陽電子から、不変質量分布を求める。

$$m_{ee}^2 = (E_{e^+}^2 + E_{e^-}^2) - (\vec{p}_{e^+}^2 + \vec{p}_{e^-}^2)$$

- すべての電子対がLVM由来ではないので、統計的バックグラウンドが生じる。

イベントミキシング法で統計的バックグラウンド分布を再現する。

p+p衝突実験に於ける
電子対質量分布



- 異なる衝突イベントから電子・陽電子を選ぶと、バックグラウンドを再現できる。

検出器(検出手法)によるバックグラウンド

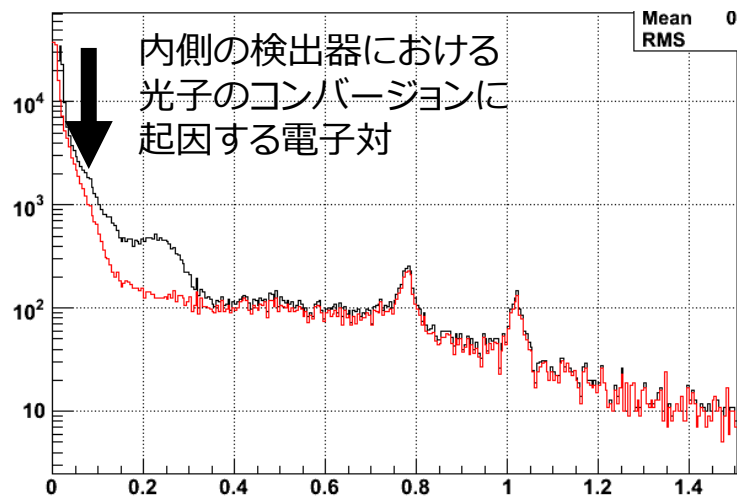
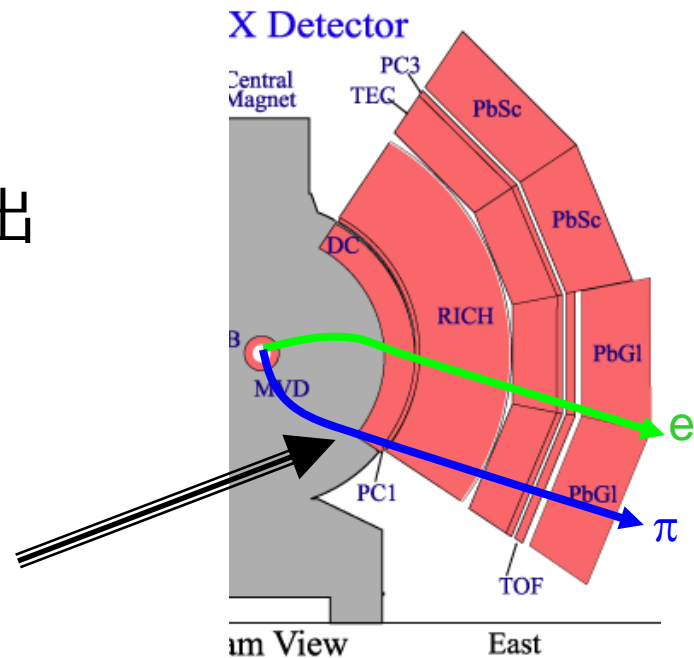
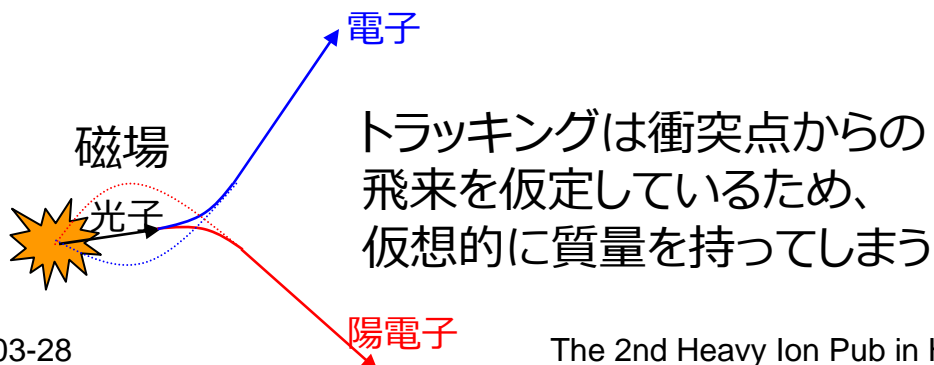
■ 誤トラッキング

- 粒子が2本のワイヤにヒットするなどして、1本のトラックが複数に検出されてしまう

■ RICHリングシェアリング

- 平行に入射した(電荷が逆の)ハドロンが電子と誤判別されてしまう。
- 「平行」条件が質量分布に影響

■ 光子コンバージョン

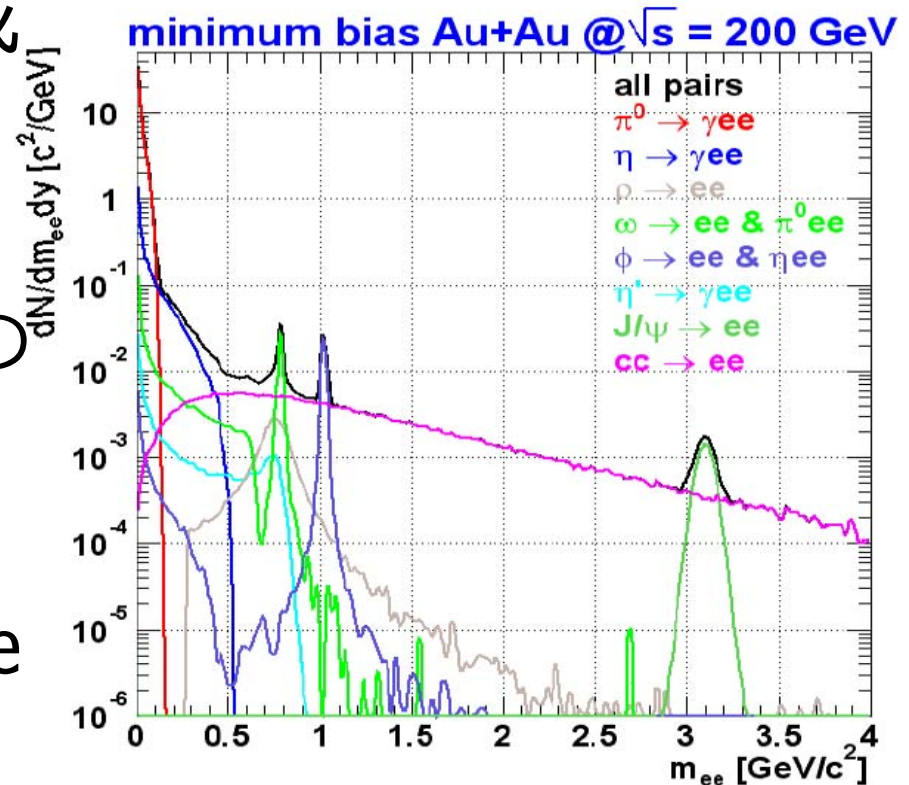


物理的バックグラウンド

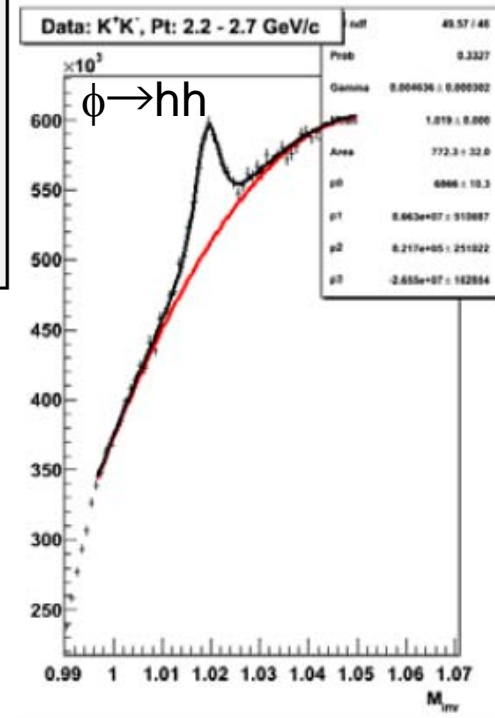
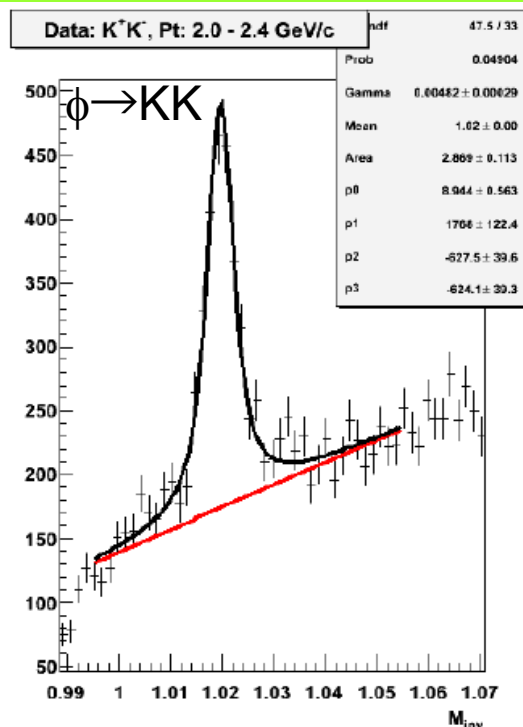
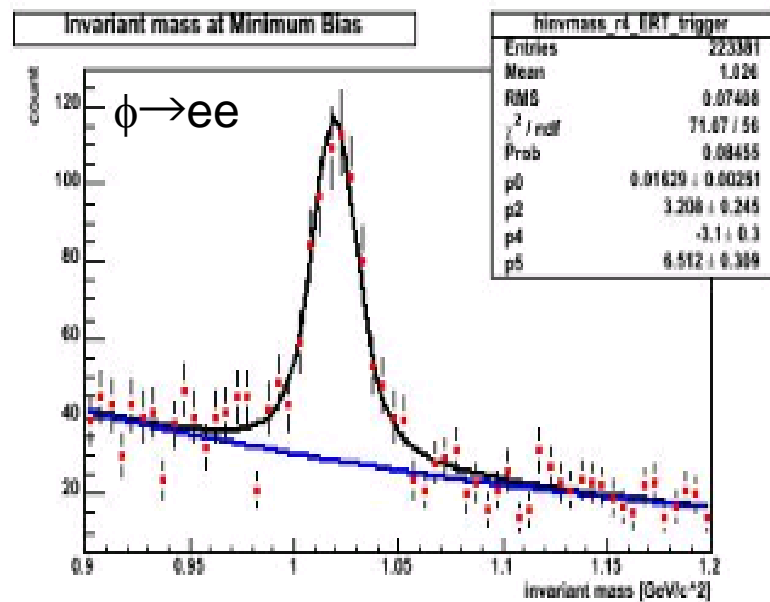
■ LVM以外の電子対生成プロセス

- ダリッツ崩壊
- 熱的電子対(黒体輻射の仮想光子)
- cc対の電子を含む崩壊
- ドレル・ヤン生成 $qq \rightarrow ee$

■ もちろん、これらはそれぞれ物理メッセージを持っている。



陽子+陽子衝突実験に於ける ϕ 観測



■ p+p衝突実験では、LVMのはっきりとしたピークが測定できている。

- 実線は、Breit-Wigner \oplus Gauss 関数でのフィット
- $\phi \rightarrow KK$ に関しては、 $\phi \rightarrow hh(\text{noPID})$ でもピークが見える。

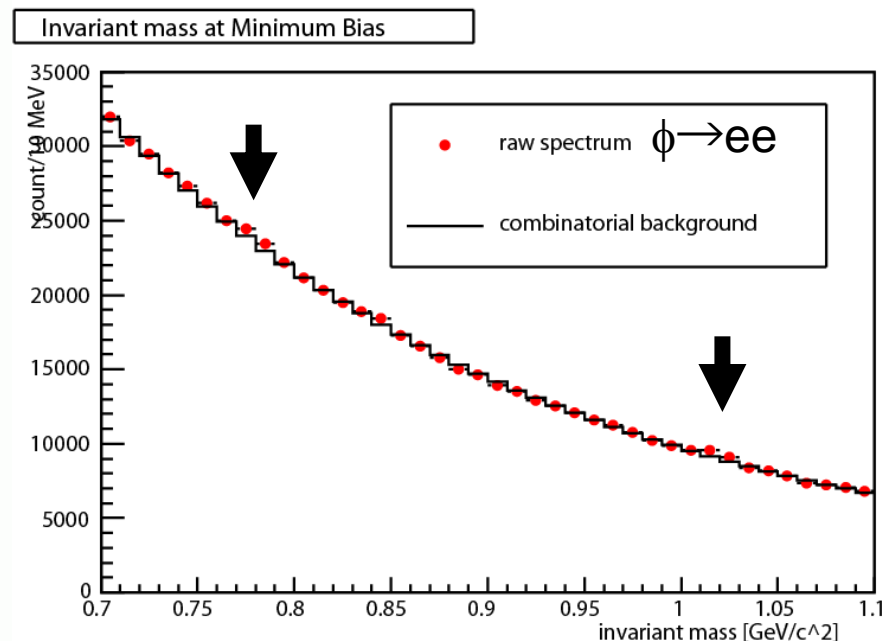
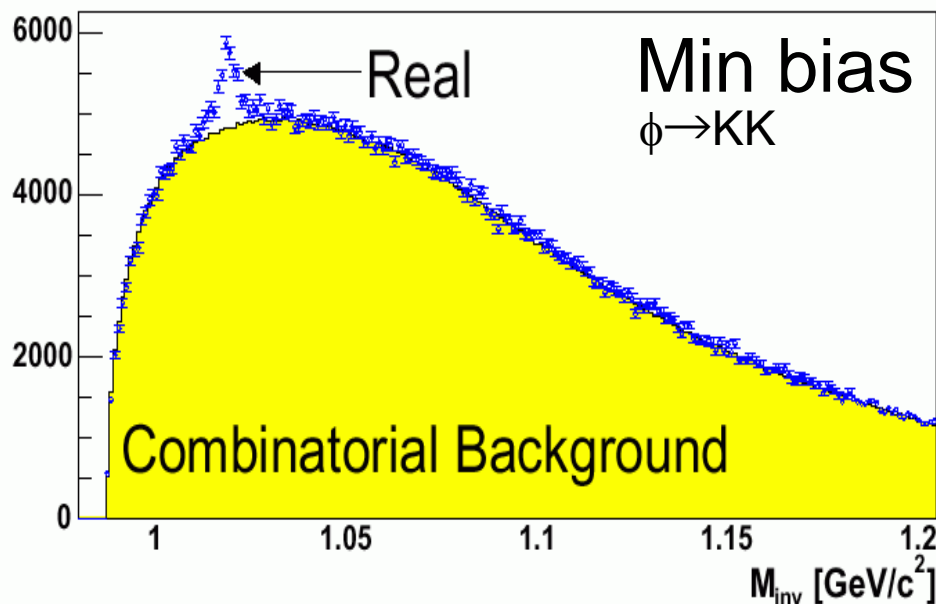
重イオン衝突実験に於ける ϕ 観測

■ 発生粒子数が多くなるので、統計的背景が増大

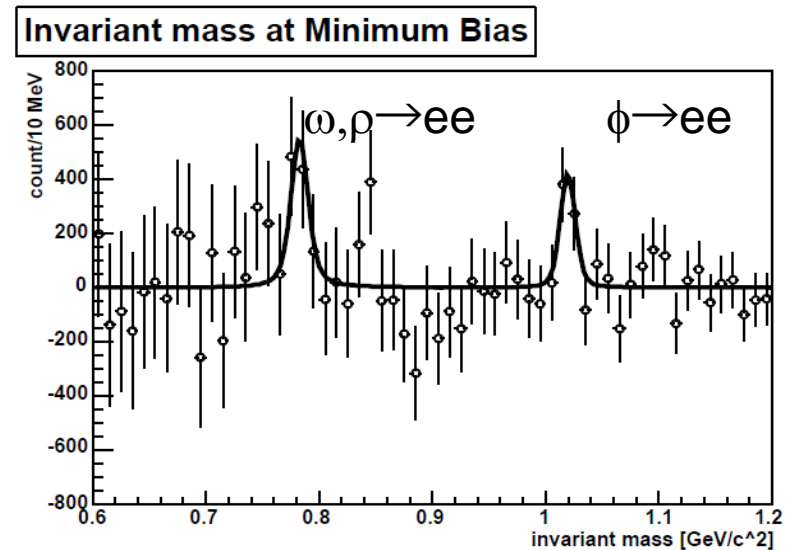
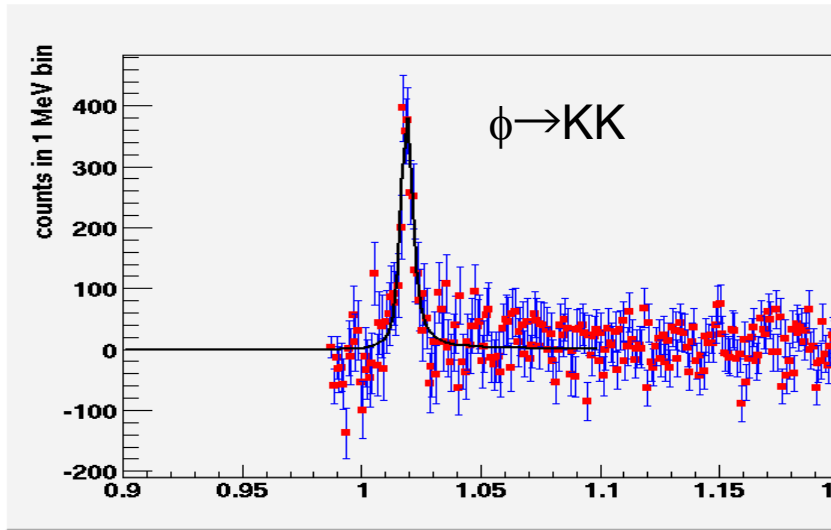
● $S \propto n, B \propto n^2$ (S:信号, B:背景, n:トラック数)

● 優位性 = $\frac{S}{\sqrt{S+B}} \approx \frac{S}{\sqrt{B}} \propto \frac{n}{n} = \text{const}$

■ 有意性はトラック数に依らないので、統計量が十分にあればピークは見えるはず!



$\sqrt{s}=200\text{GeV}$ Au+Au衝突における ϕ 中間子



■ バックグラウンドを引いたあとの質量分布

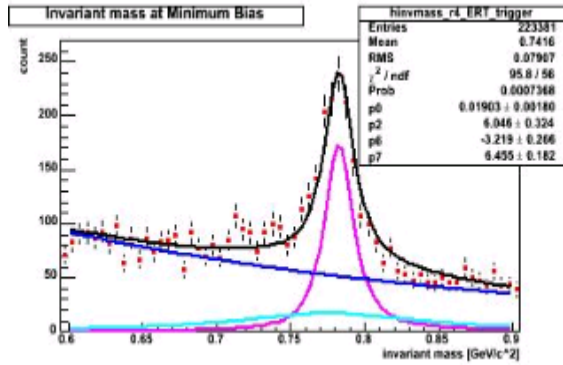
- 現統計では、質量中心・幅ともPDG値と一致
- 幅に関しては、一致を仮定してfitしていたりする。

■ 統計量が上がれば、先行実験と同じように分布の変化に対する議論ができる!

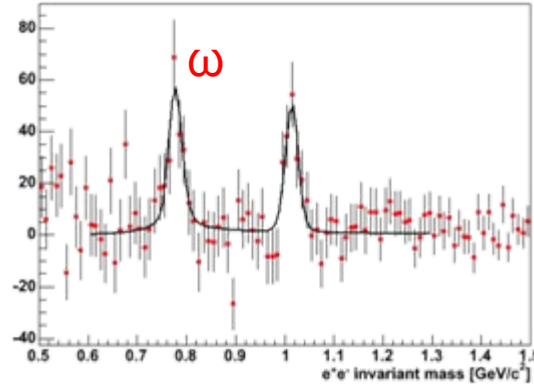
- 波形の変化を議論できる分解能を達成している。

ω 中間子の測定結果

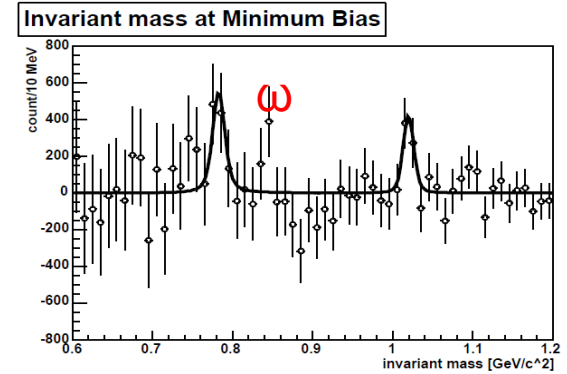
$\omega \rightarrow e^+e^- p+p$



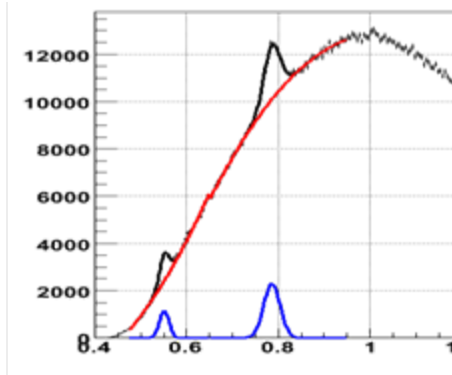
$\omega \rightarrow e^+e^- d+Au$



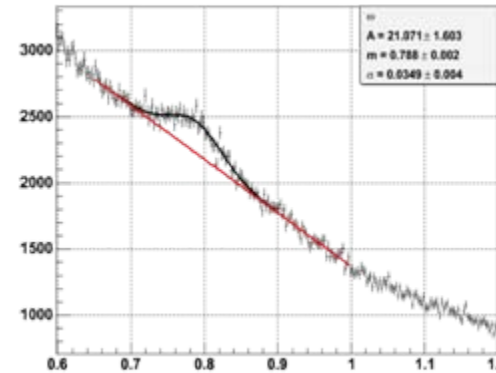
$\omega \rightarrow e^+e^- Au+Au$



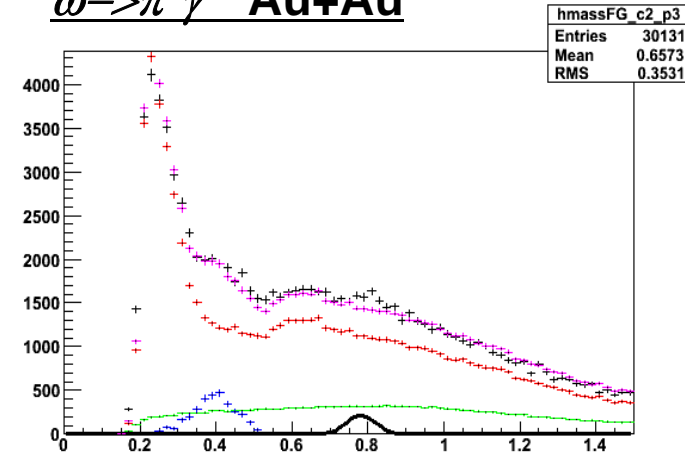
$\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^- p+p$



$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma p+p$

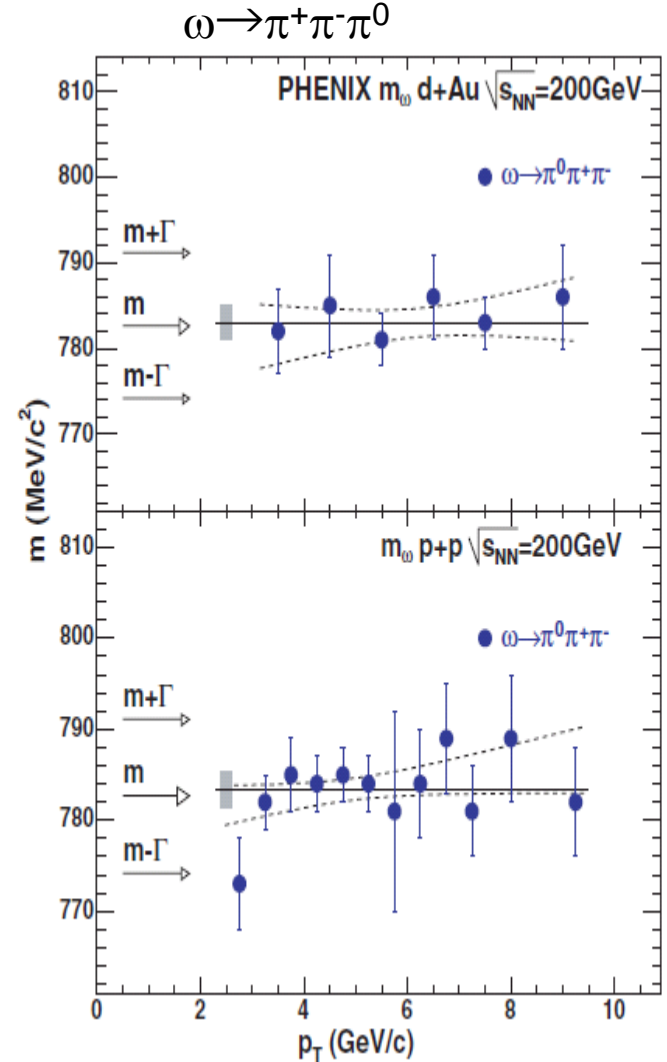
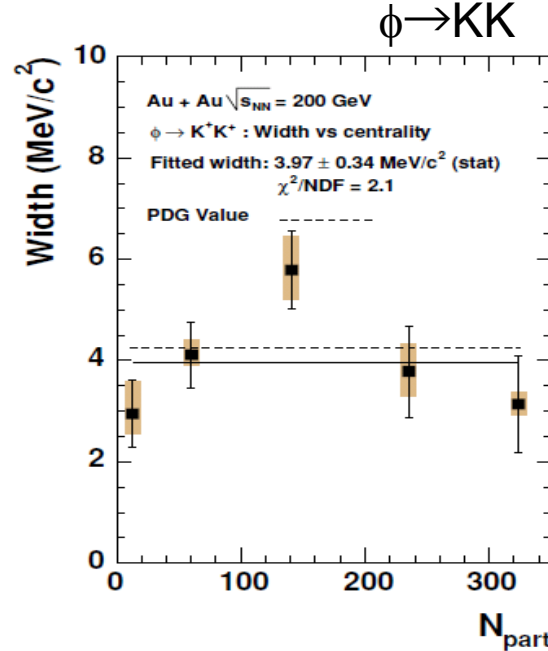
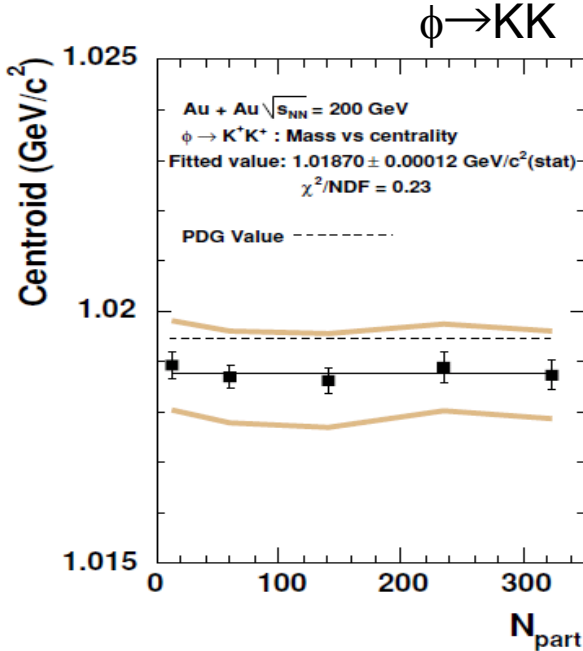


$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma Au+Au$



■ p+p, d+Au, Au+Au衝突実験において、電子対・ハドロン・光子モードで、 ω 中間子の同時観測に成功。

測定質量中心の、衝突中心度依存性



■ 統計量の多いソドロンチャンネルでは、質量中心と幅の衝突中心度依存性が測定できた。

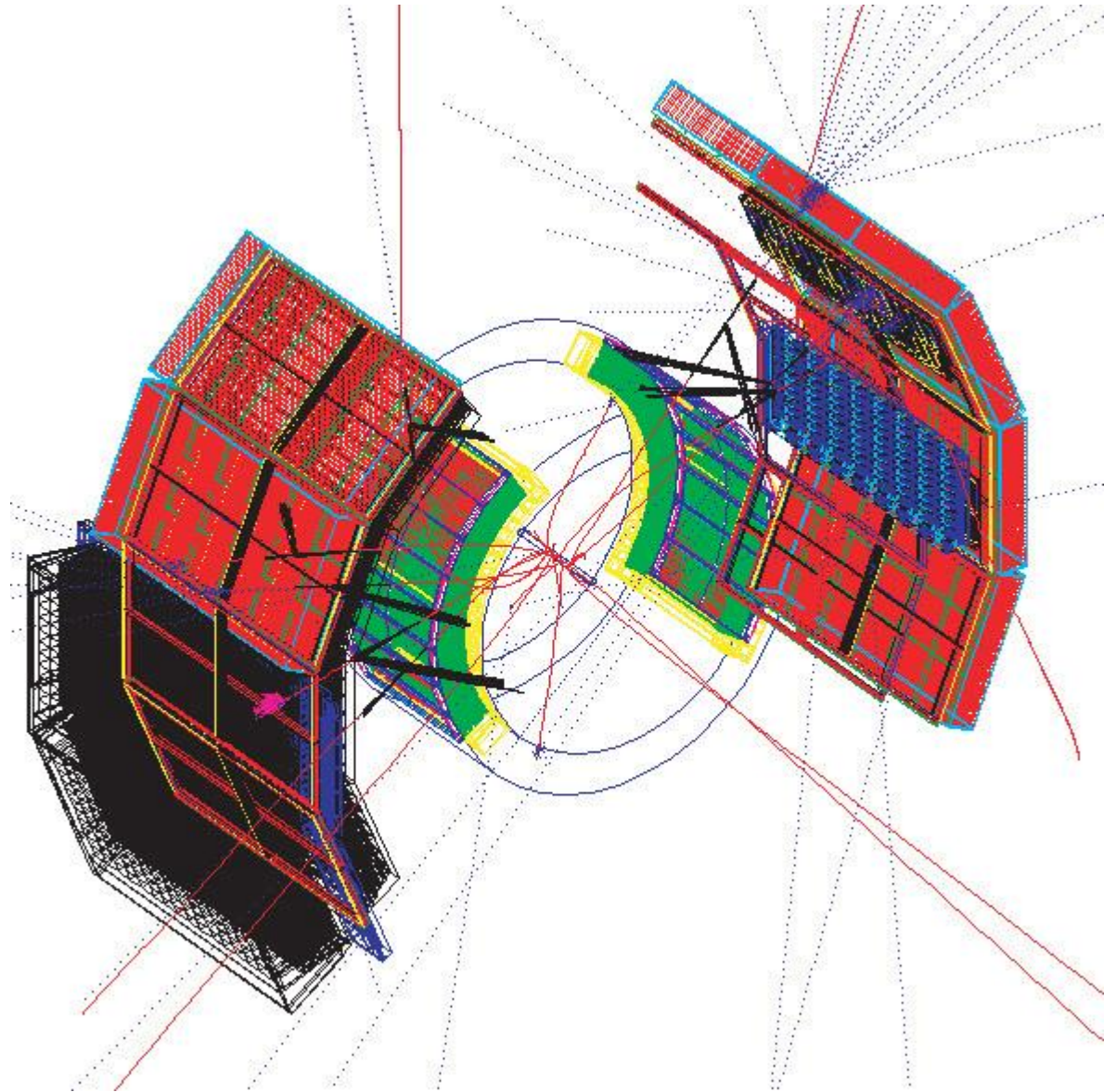
- 今のところ誤差の範囲でPDG値と一致か。
- 今後、レプトンチャンネルの高統計測定が行われれば、比較できる。

検出効率から運動量分布

- 検出数を生成量に直すため、検出器の検出効率を計算する。
- モンテカルロシミュレーションで、運動量毎に検出効率を算出。

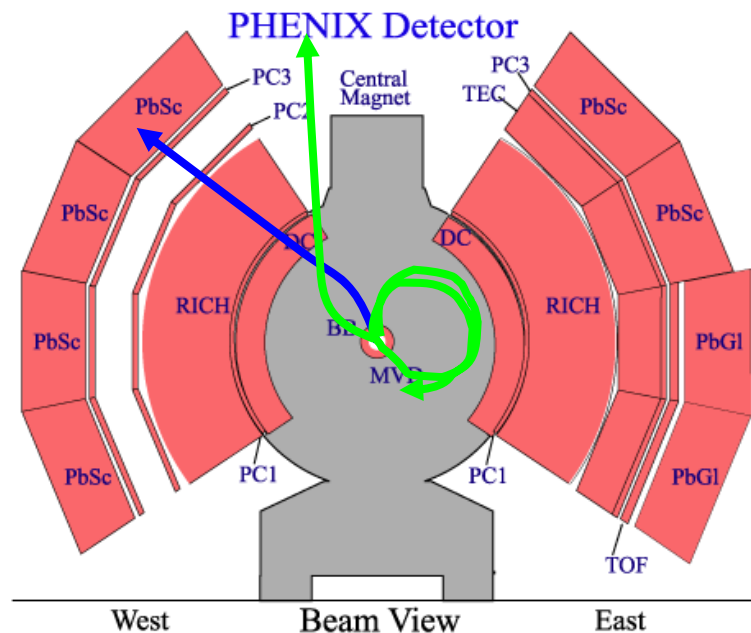
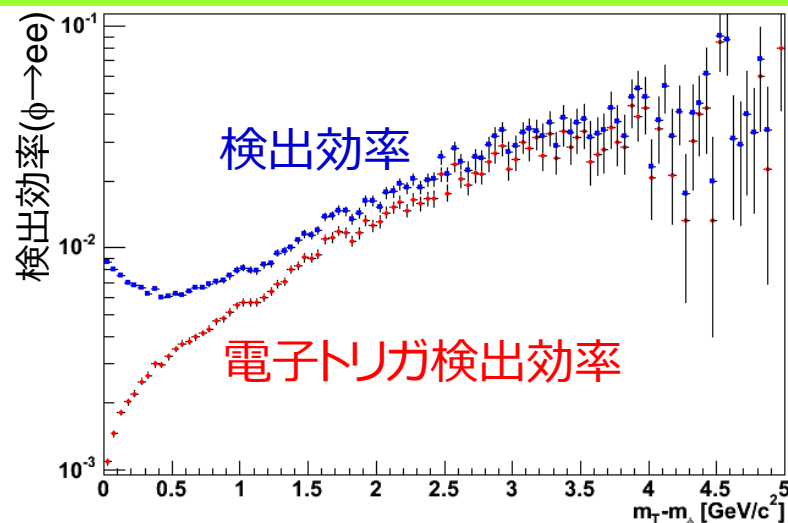
$$\sigma(m_T) = \frac{1}{\varepsilon} N(m_T)$$

- σ : 生成量
- N : 観測量
- ε : 検出効率

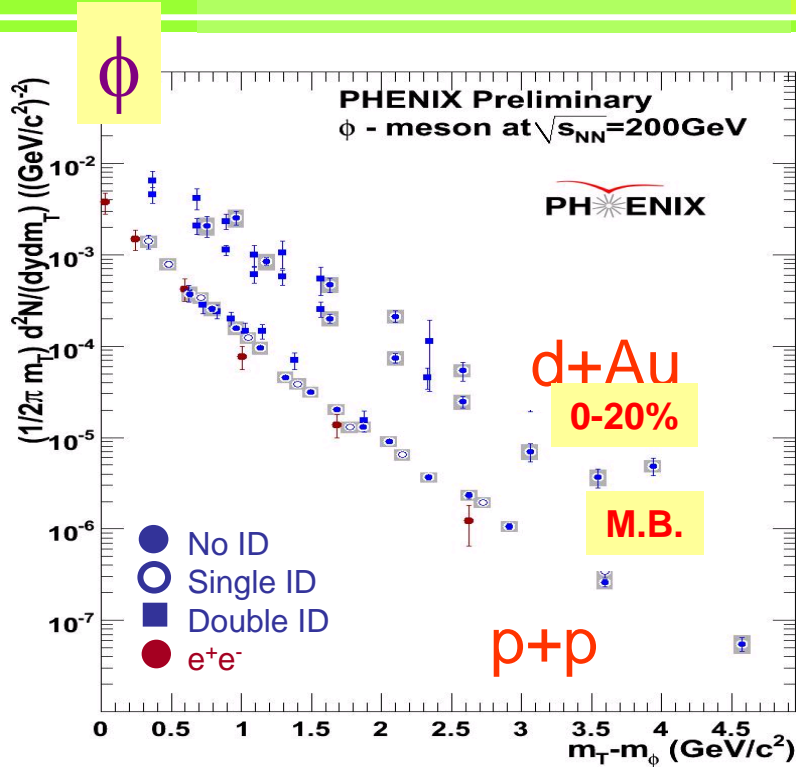


LVM由来の電子対に対する検出効率

- LVM由来の電子対の検出効率は、数パーセント。
 - 崩壊した電子対は逆方向に曲げられるため、なかなか両方とも検出器に入らない
 - 0.2GeV以下の電子(荷電粒子)は、磁場内でコイルしてしまい、観測できない。
 - 静止LVMに由来する電子対も検出可能
- 電子トリガもLVMを捉えるには閾値が低い
 - J/ Ψ にフォーカスした閾値
 - 記録できるデータレートにも依存



横方向エネルギー分布



- 中間子の運動量ごとにを数え、運動量分布を再現する。

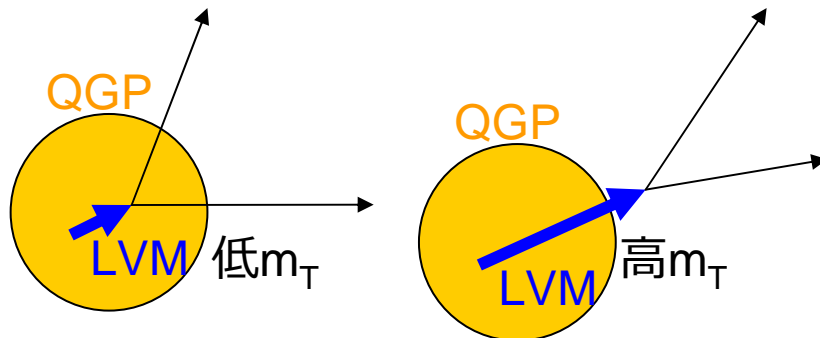
$$m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

■ 低運動量

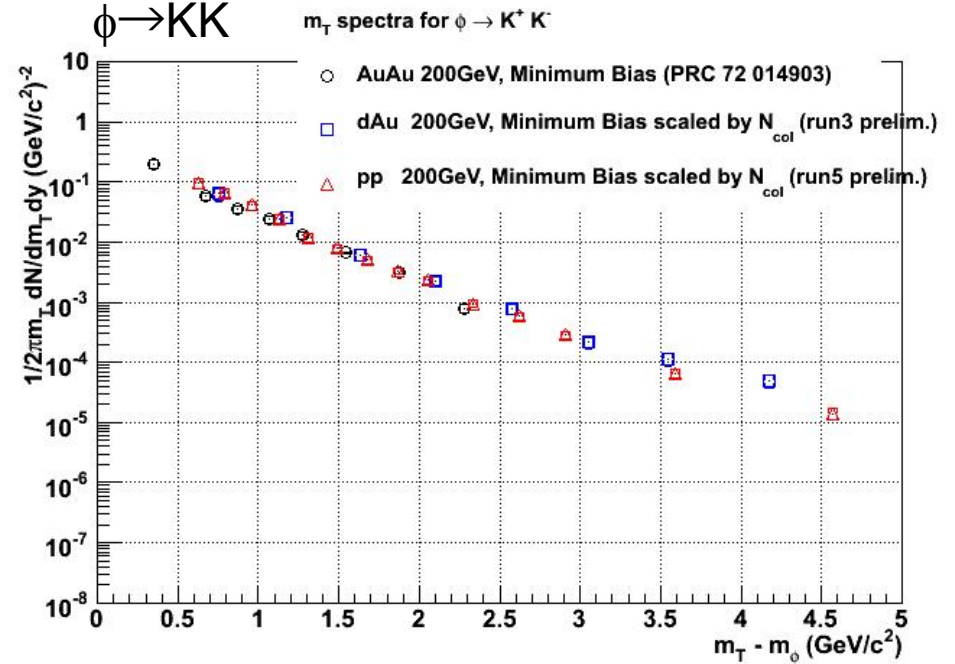
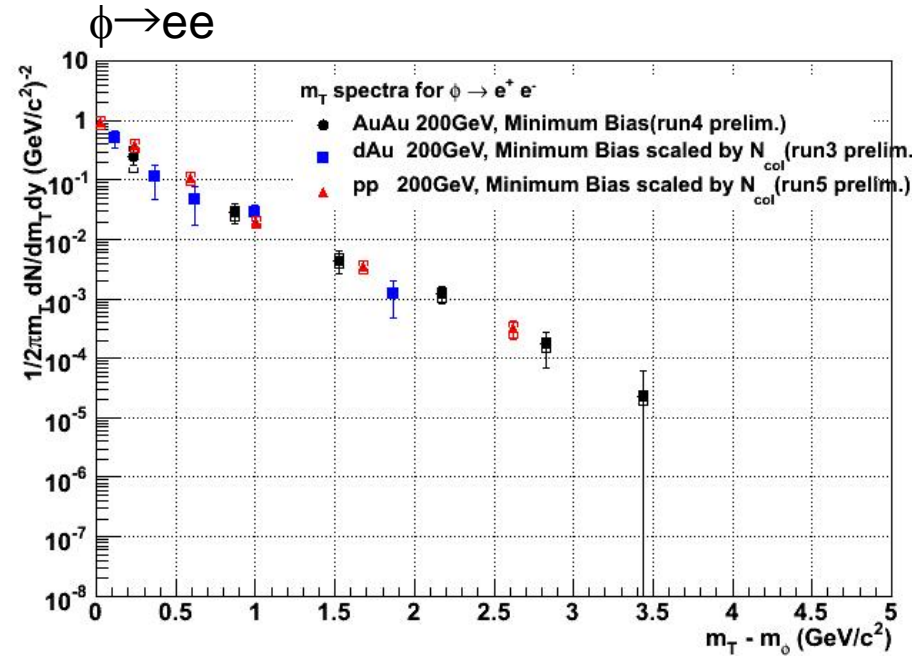
- 系が拡張・冷却されてできた名残
- 凍結時の系の性質を反映

■ 高運動量

- 衝突時に生成され、その後の系からの影響を受けている。



N_{coll} でスケールした運動量分布



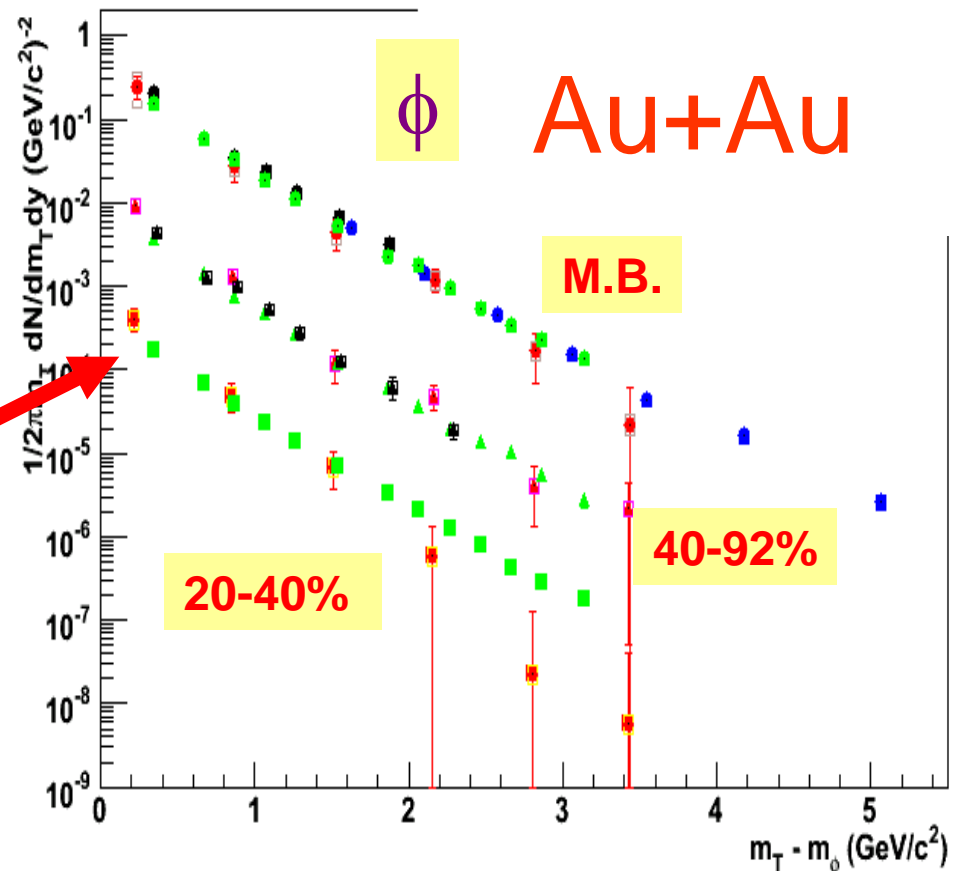
- p+p , d+Au , Au+Au 衝突実験における運動量分布を、 n_{coll} で Au+Au にスケールすると、異なる衝突系での ϕ の生成量を比較できる。
- 実は、low- m_T は、 n_{part} でスケールするべきか？
 - このあたりはまさにいま議論の真っ最中なので、次回の学会をお楽しみに!
- ϕ の生成機構についても理解しなければならない。

衝突中心度毎の運動量分布

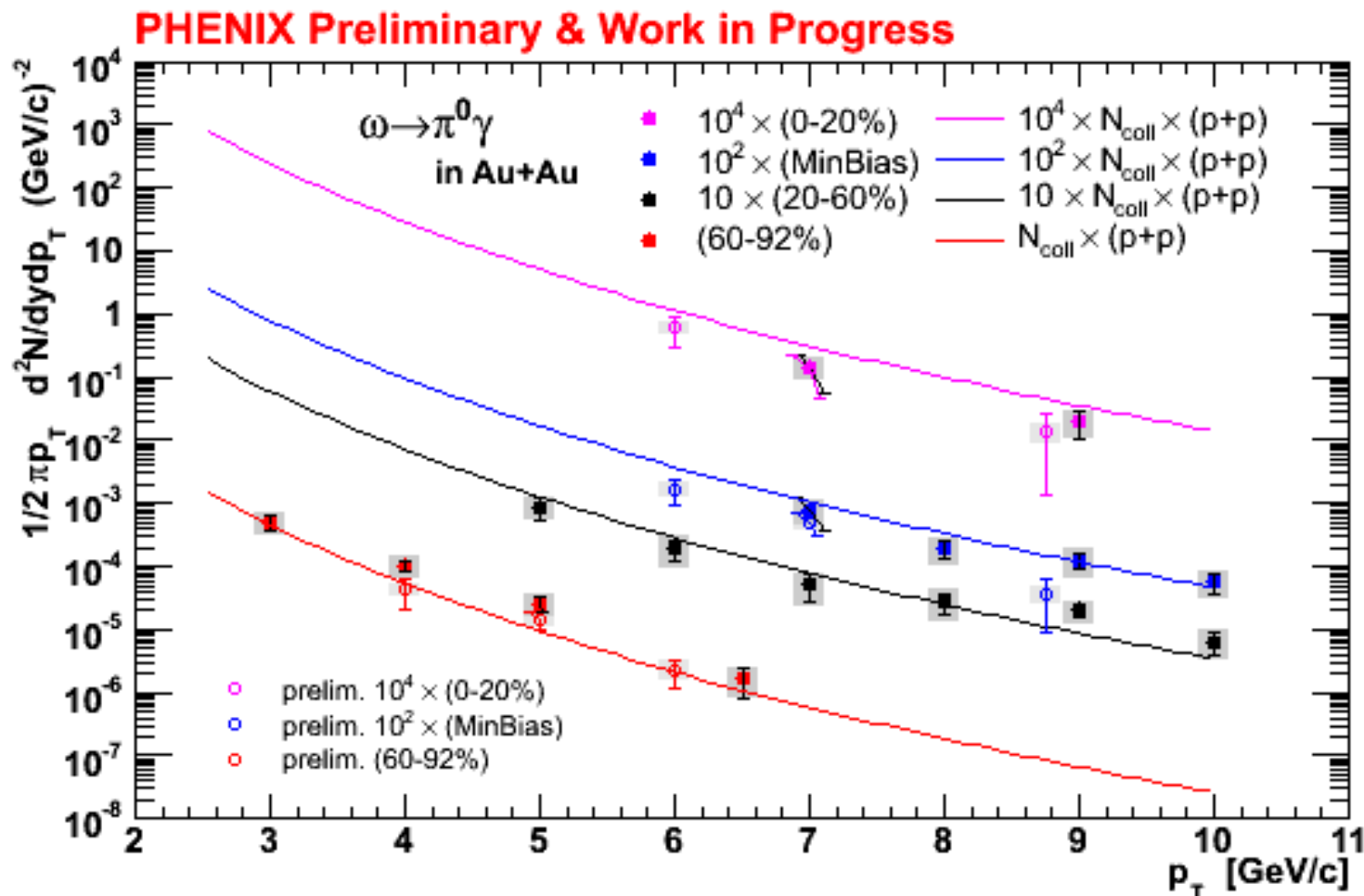
- レプトン対とハドロン対の両方で、 ϕ 中間子の運動量分布を測定できた。(エラーの範囲で一致)

- $\phi \rightarrow e^+e^-$ AuAu MB
- $\phi \rightarrow e^+e^-$ 20-40% $\times 10^{-3}$
- ▲ $\phi \rightarrow e^+e^-$ 40-92% $\times 10^{-1}$
- $\phi \rightarrow K^+K^-$ AuAu MB (no PID)
- $\phi \rightarrow K^+K^-$ AuAu MB (double PID)
- $\phi \rightarrow K^+K^-$ AuAu MB (PRC72 014903)
- $\phi \rightarrow K^+K^-$ 20-40% $\times 10^{-3}$ (double PID)
- ▲ $\phi \rightarrow K^+K^-$ 40-92% $\times 10^{-1}$ (double PID)
- ▲ $\phi \rightarrow K^+K^-$ 40-92% $\times 10^{-1}$ (PRC72 014903)

このあたりで、2つのモードにちがいが
できるかもしれない!?

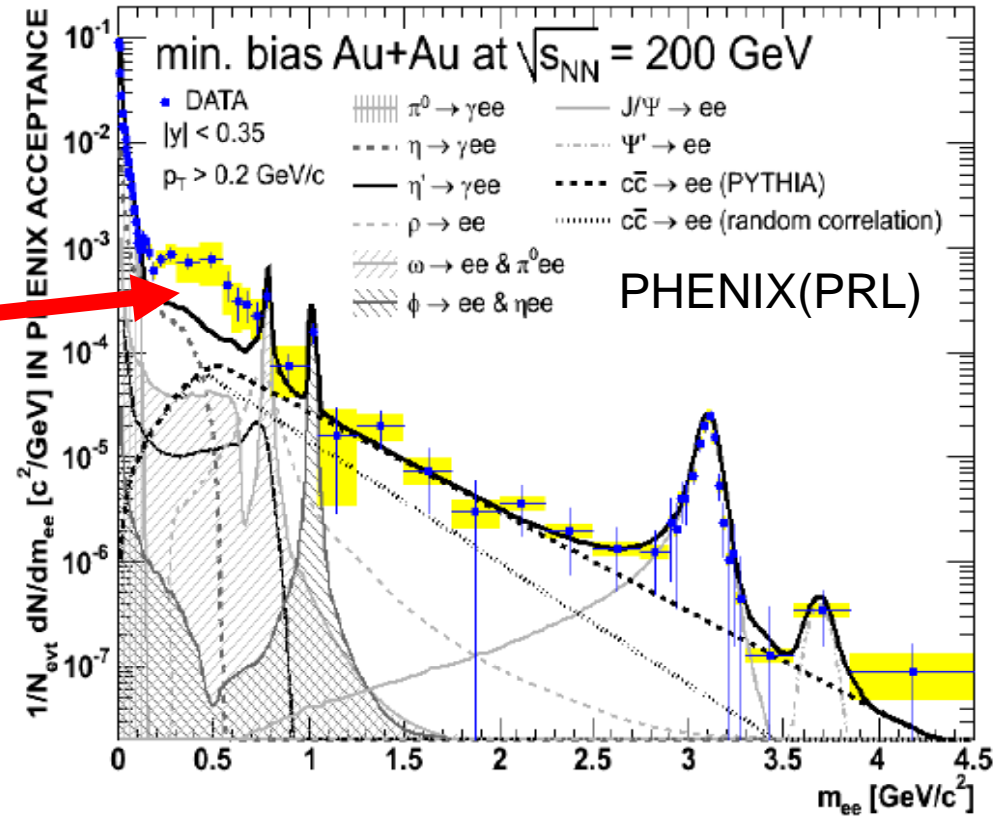
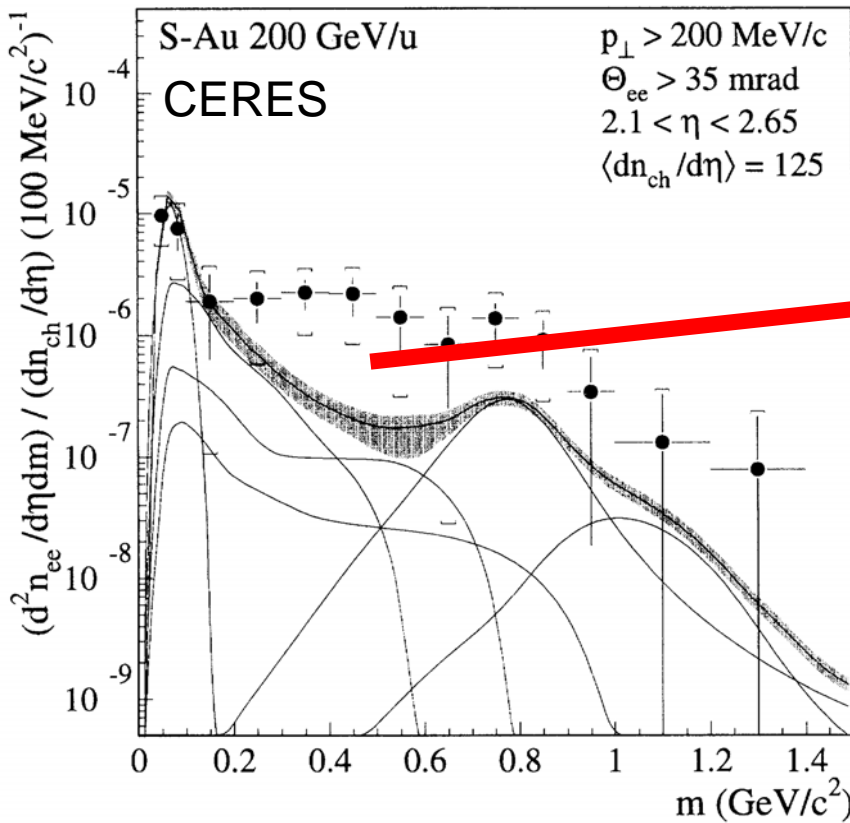


ω の運動量分布



■ 複数の崩壊モードで、 ω 中間子の運動量分布も測定されている。今後電子対チャンネルで低運動量領域の測定も可能になり、さらなる発展が期待されている。

連続質量分布のカクテル解析も進んでいる



- CERES(SPS)で観測された、電子対の増加も見えた。
- 分解能の向上により、LVMピークと連続部分を区別できる。

まとめ

- 核子の質量の98%は、カイラル対称性の自発的な破れにより生み出されている。
- カイラル対称性は高温・高密度環境において(部分的に)回復していると予想され、その影響が中間子の質量にも影響する可能性がある。
- 高温・高密度媒体中に於けるベクトル中間子の測定実験が盛んに行われ、質量変化の兆候も捉えられ始めている。
- RHICにおいても、高温媒質中でのLVM測定が活発に行われており、様々な測定系において幅広いチャンネルと運動量領域に及ぶ測定に成功している。
- 今後もRHICの高統計runや、J-PARK・LHC等での新実験により、さらなる発展も期待されている。

謝辞

- 今日の機会を与えてくださった志垣先生をはじめとする世話人の皆様、会場設営の学生さん、最新のプロットを提供してくれた中宮くん・大内田さん・来島くん、そして今日ここに足を運んでくださった皆様に感謝します。
- また多難な研究生生活を支えてくれた良き友人達にも感謝します。
- 本日はありがとうございました。

おわり

■以降バックアップ

BNLにあるRHICとPHENIX

- BNL - Brookhaven National Laboratory
 - ニューヨーク州にある中規模のアメリカ国立研究所
 - 物理・化学・生物の基礎研究(NASAの実験施設もある)
 - 米エネルギー省の管轄。軍事機密とは縁遠い
 - アメリカ以外からも多くの研究者が滞在
 - 実験グループと理論グループの情報交換も活発
- RHIC - the Relativistic Heavy Ion Collider
 - 相対論的速度(質量の100(~250)倍のエネルギー)で核子を2方向に加速し、衝突させる事のできる加速器
 - BNLの北側に設置されている。周長約2マイル。
- PHENIX - the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment
 - RHICで行われている国際共同実験プロジェクト
 - 400人の研究者と億円単位の運営費

PHENIX



University of São Paulo, São Paulo, Brazil
Academia Sinica, Taipei 11529, China
China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing, P. R. China
Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), Université de Clermont-Ferrand, F-63170 Aubiere, Clermont-Ferrand, France
Dapnia, CEA Saclay, Bat. 703, F-91191, Gif-sur-Yvette, France
IPN-Orsay, Université Paris Sud, CNRS-IN2P3, BP1, F-91406, Orsay, France
LPNHE-Palaiseau, École Polytechnique, CNRS-IN2P3, Route de Saclay, F-91128, Palaiseau, France
SUBATECH, École des Mines at Nantes, F-44307 Nantes, France
University of Muenster, Muenster, Germany
Banaras Hindu University, Banaras, India
Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Bombay, India
Weizmann Institute, Rehovot, Israel
Center for Nuclear Study (CNS-Tokyo), University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739, Japan
KEK, Institute for High Energy Physics, Tsukuba, Japan

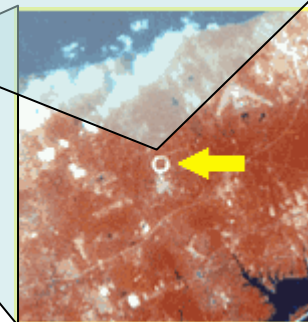
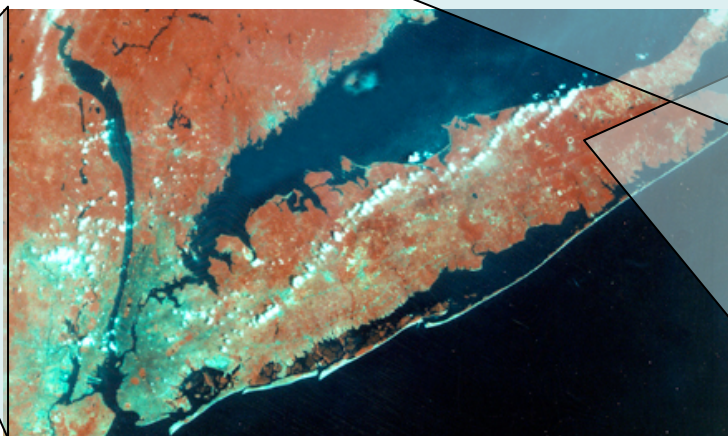
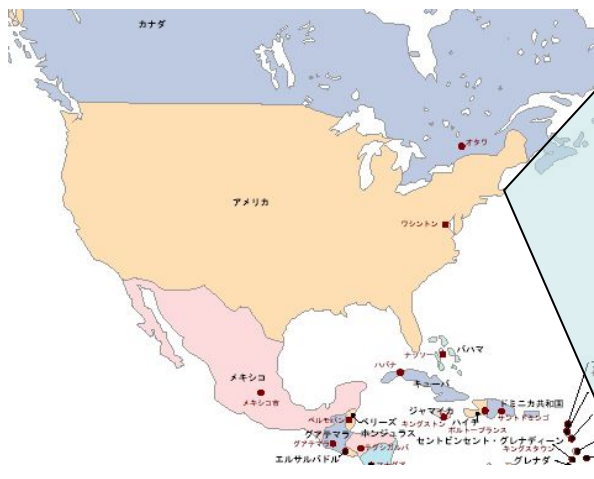
Kyoto University, Kyoto, Japan
Nagasaki Institute of Applied Science, Nagasaki-shi, Nagasaki, Japan
RIKEN, Institute for Physical and Chemical Research, Hirosawa, Wako, Japan
University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan
Tokyo Institute of Technology, Ohokayama, Meguro, Tokyo, Japan
University of Tsukuba, Tsukuba, Japan
Waseda University, Tokyo, Japan
Cyclotron Application Laboratory, KAERI, Seoul, South Korea
Kangnung National University, Kangnung 210-702, South Korea
Korea University, Seoul, 136-701, Korea
Myong Ji University, Yongin City 449-728, Korea
System Electronics Laboratory, Seoul National University, Seoul, South Korea
Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA
Institute of High Energy Physics (IHEP-Protvino or Serpukhov), Protvino, Russia
Joint Institute for Nuclear Research (JINR-Dubna), Dubna, Russia
Kurchatov Institute, Moscow, Russia
PNPI, St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningrad, Russia
Lund University, Lund, Sweden
Abilene Christian University, Abilene, Texas, USA
Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY 11973
University of California - Riverside (UCR), Riverside, CA 92521, USA
Columbia University, Nevis Laboratories, Irvington, NY 10533, USA
Florida State University (FSU), Tallahassee, FL 32306, USA
Georgia State University (GSU), Atlanta, GA, 30303, USA
Iowa State University (ISU) and Ames Laboratory, Ames, IA 50011, USA
Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM 87545, USA
Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA 94550, USA
University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA
New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA
Department of Chemistry, State University of New York at Stony Brook (USB), Stony Brook, NY 11794, USA
Department of Physics and Astronomy, State University of New York at Stony Brook (USB), Stony Brook, NY 11794, USA
Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN 37831, USA
University of Tennessee (UT), Knoxville, TN 37996, USA
Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA

コラボレーション

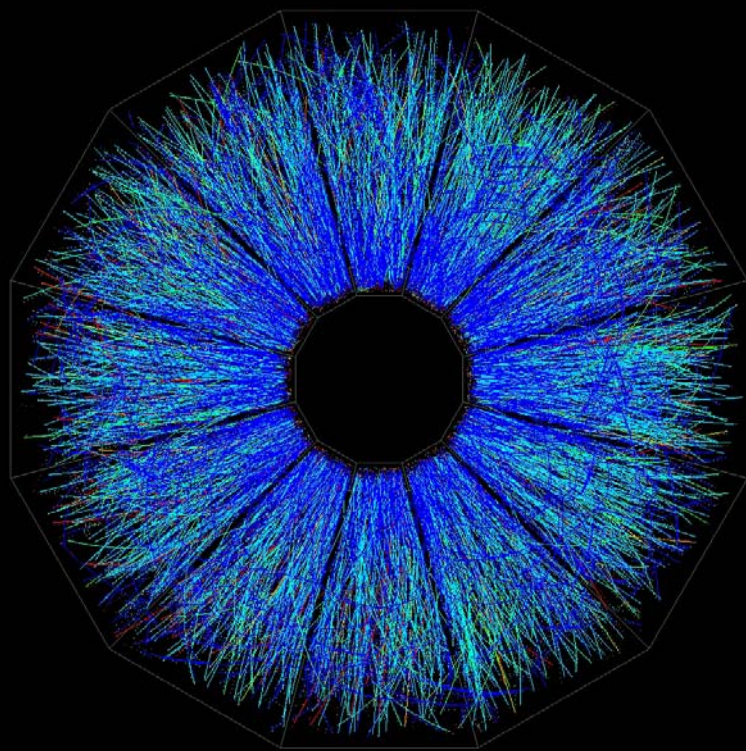
RHICはどこにあるの？

ニューヨーク郊外の閑静な高級住宅地の連なる森の中

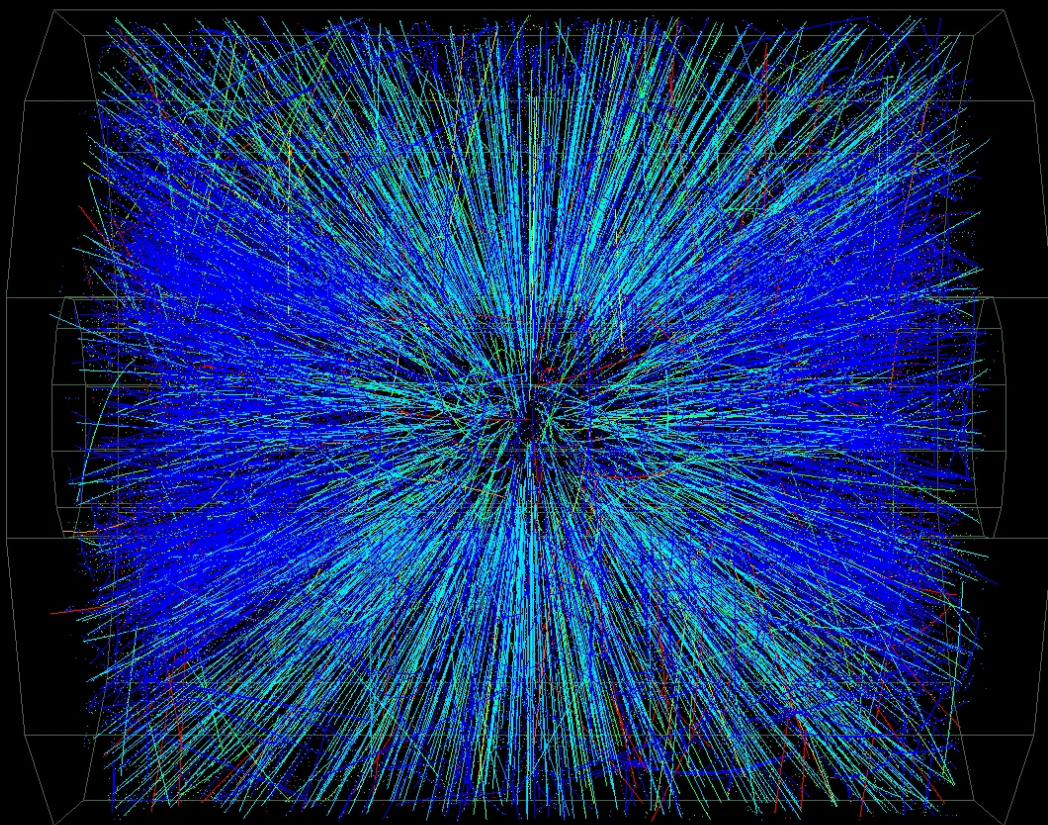
- ワインの産地
- マンハッタンまで電車・高速道路で直結



衝突点から飛来する粒子を検出

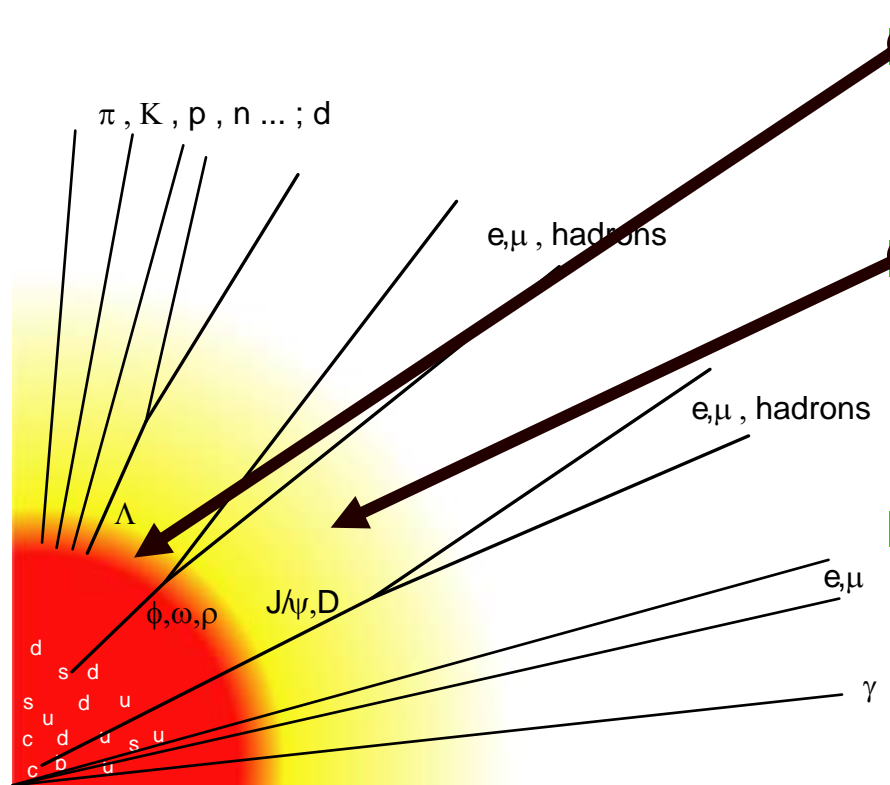


2000年6月25日(STAR)



衝突点から飛来する粒子で、 系の状態を調べる

- 衝突によって発生したグルーオン(やクォーク)が熱平衡(QGP)に達しているようだ。(約1fm/c)
- 温度が下がると、ハドロン化する。(約10fm/c, $T \sim 170\text{MeV}$)



■ 化学凍結

- ハドロン化が終わり、粒子種の比が決定される。

■ 熱的凍結

- 密度が下がって、粒子間の相互作用が無くなり、運動量分布が決定される。

■ 観測できるのは凍結後の粒子

- 崩壊した粒子の力学を再構成
- レプトンや光子は直接飛来する

何を観測するの？

クォークやグルーオンを直接観測できない

■ ハドロン (クォークでできている)(π, K, p, Λ, Ξ)

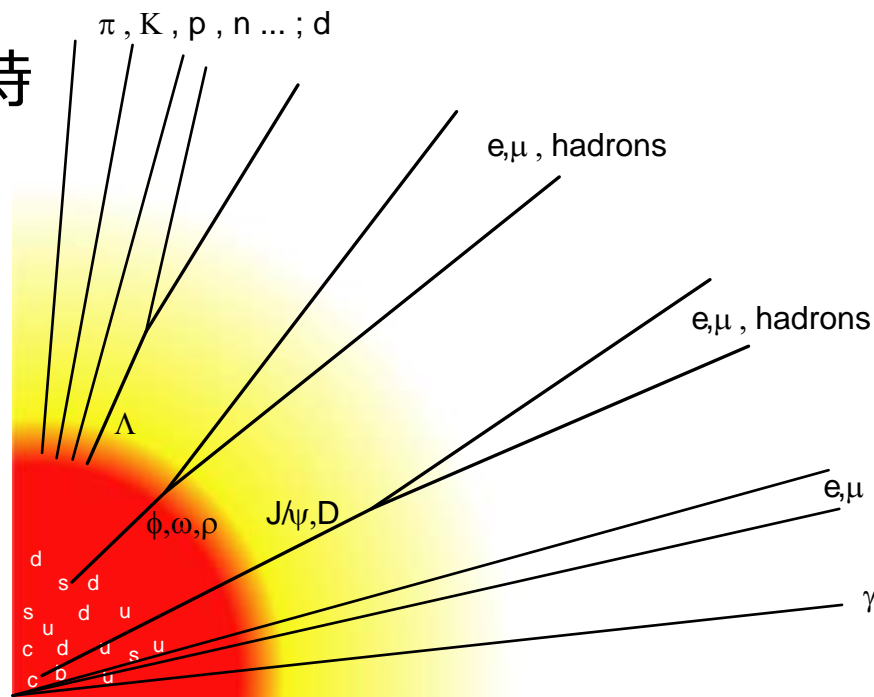
- 流体的集団運動(低運動量)
- 衝突によるジェット(高運動量)

■ レプトン (e, μ)

- 発生時の情報をほぼ保持
- 重いクォークからの寄与

■ ガンマ線(光子)

- 発生時の情報を維持
- 高温相からの熱輻射



RHIC/PHENIXで注目されている事

- 流体的集団運動(v_2)の観測
 - QGP相が非常に早く熱平衡に達していることを示唆
- 重クォーク(c/b)起源の電子の観測
 - 重クォークの流体的動きは小さい
- ジェットの抑制
- 二粒子相関を利用した高温相の大きさの観測(HBT解析法)
- J/ψ 粒子の観測
 - J/ψ 粒子の生成抑制(あるいは増加)がおこるか?
- 熱輻射光子の観測
- ベクトル中間子の質量変化
 - カイラル対称性の回復(核子の有効質量の消失)はおこるのか?
- 粒子分布の偏りの観測(DCC)

発展：なぜこのような現象が期待されるのか調べてみよう

PHENIX実験の測定器

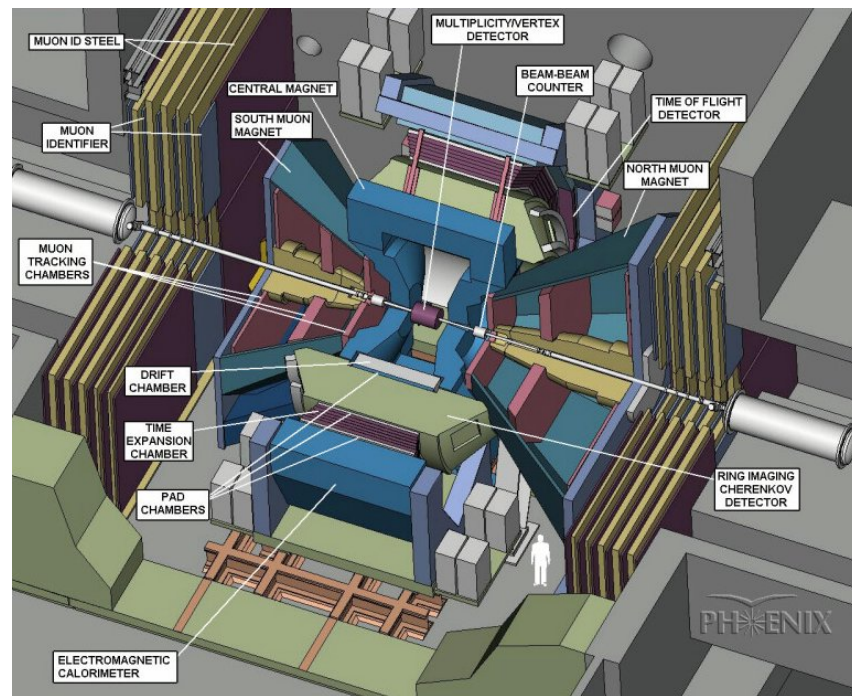
the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment

■ 様々な粒子を同時に観測

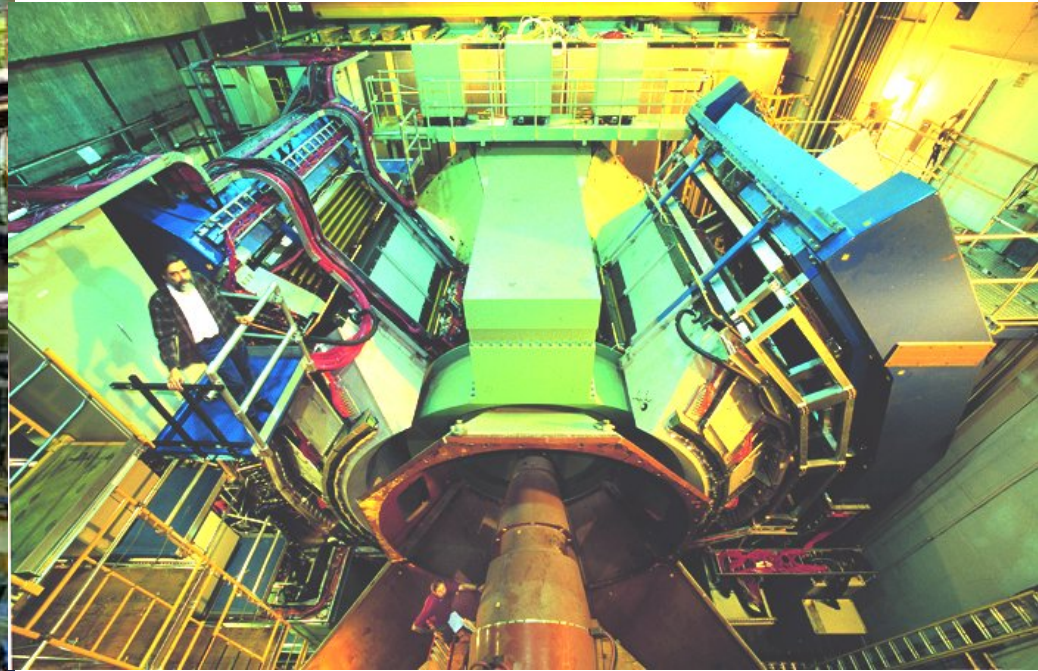
- ハドロン・レプトン・光子を全部観測するため、様々な測定器がてんこ盛り
- 生成量が 10^{10} 倍異なる粒子(やエネルギー)も同時に測定。

■ 高速なデータ収集系(DAQ)

- $\sim 2\text{kHz}$ (300MB/sec)
- 衝突は秒間数万回



PHENIX測定器の様子



PHENIX実験が設置している測定器

■ トリガ系

- 最初に衝突を検知して衝突のパラメータを計測し、データ収集系にデータを取るように指示する
 - ◆ BBC, ZDC, NTC, (FCal, MVD)

■ 荷電粒子トラッキングチェンバー系

- 荷電粒子の飛跡を観測し、磁場中での曲率から運動量(p/m)を測定
 - ◆ DC, PC, MuTr, TEC

■ 全エネルギー計測系

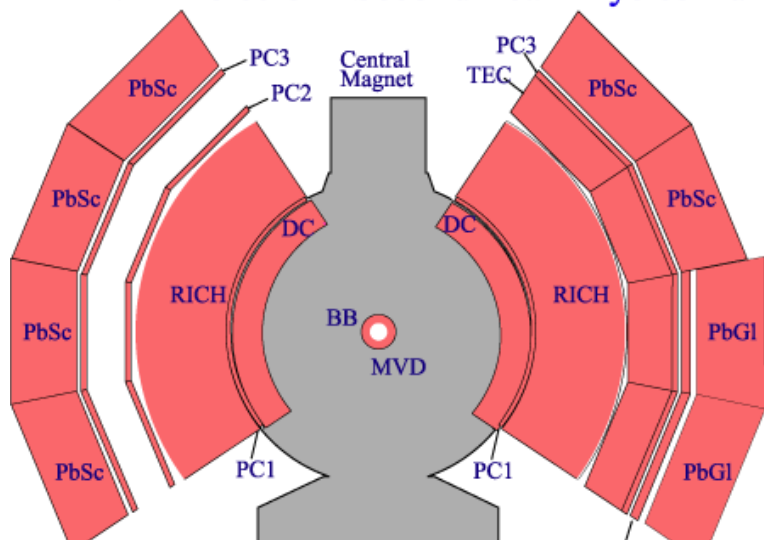
- レプトンや光子を完全に止め、全エネルギーを測定
 - ◆ PbSc, PbGl

■ 粒子種判別(PID)系

- 飛行速度と運動量から、質量を測定
 - ◆ ToF(Sc,MWPC), PbSc
- チェレンコフ放射の有無から、質量の範囲を限定
 - ◆ RICH, AeroGel
- 物質との反応率の違いから、ミュー粒子を限定
 - ◆ MuID

中央測定器

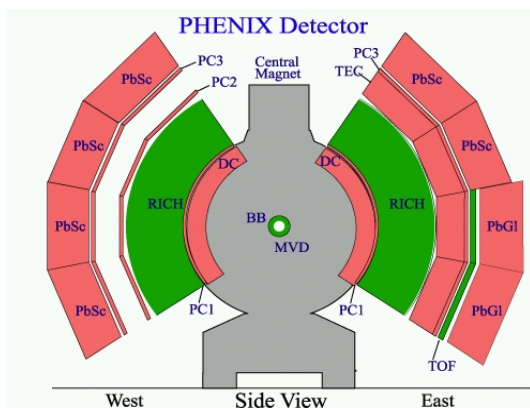
PHENIX Detector - Second Year Physics Run



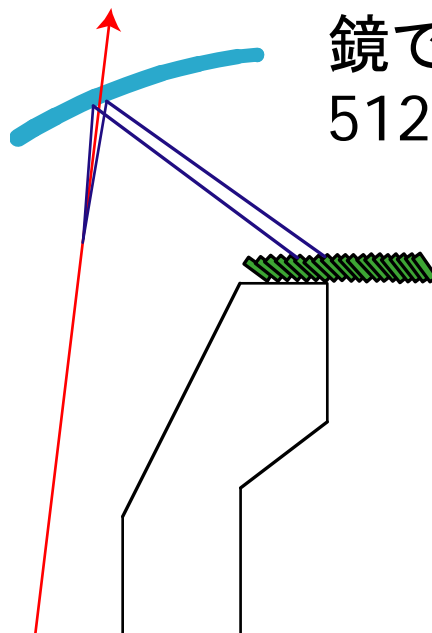
- **DC** – Drift Chamber
- **PC** – Pad Chamber
荷電粒子の飛跡を検出する。
- **RICH, AeroGel**
– チェレンコフ光を利用して
速度を測る
- **TOF** – 荷電粒子の飛行速度を測る
- **EMCal** – 電子や光子のエネルギーを
測る。



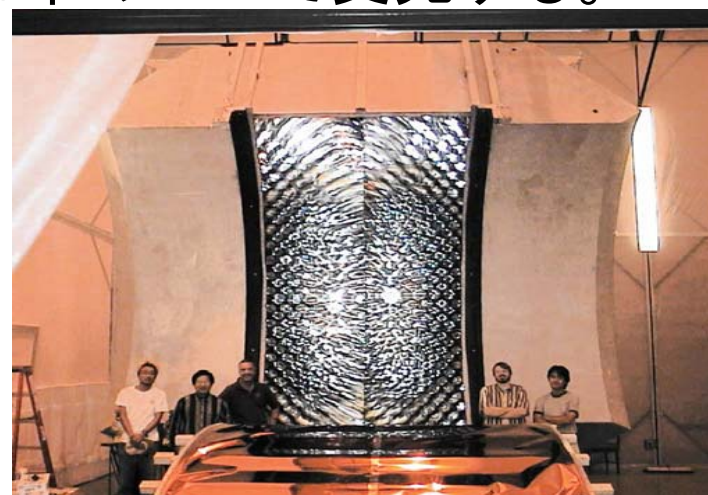
円像ガスチェレンコフ検出器(RICH)



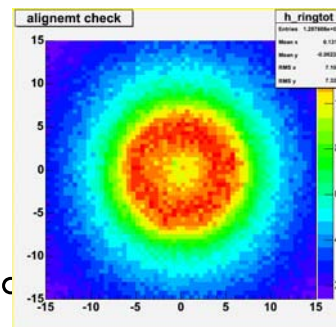
- チェレンコフ光の媒質ガス
 - CO₂($\gamma_{th} \sim 35$)
 - eID p_t range : 0.2 ~ 4 GeV/c
- 使用PMT数
 - 5,120 本
- 体積40m³



鏡でチェレンコフ光を反射し、5120本のPMTで受光する。



電子を識別するための検出器
媒質中を光速以上の速度で飛ぶ粒子は、
チェレンコフ光を出すことを利用。
電子は0.2GeV、 π は4GeVで光りはじめる。



チェレンコフ光は円状に広がる。

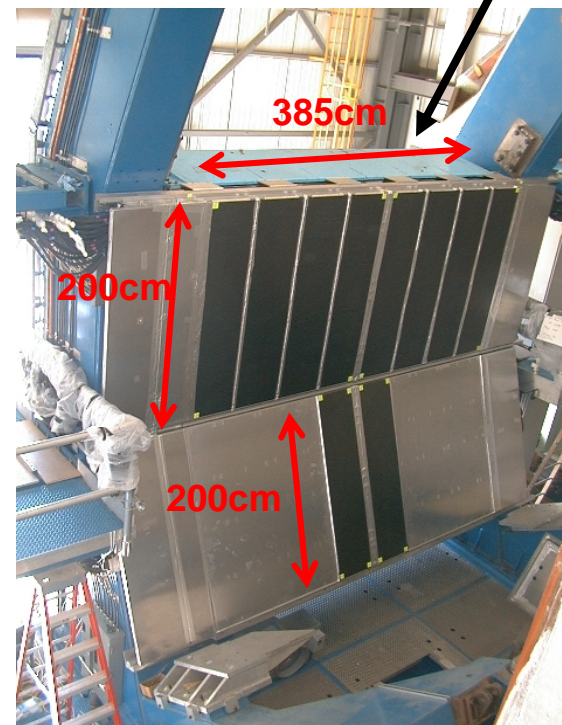
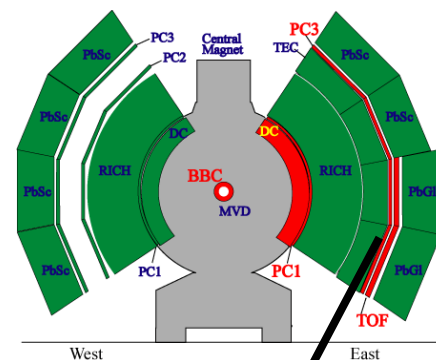
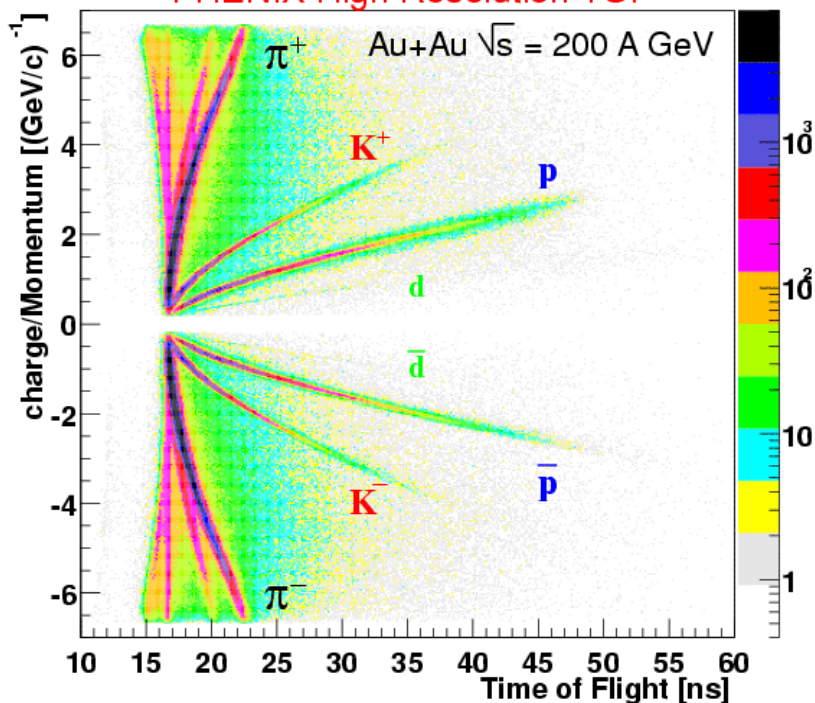
飛行時間測定器 TOF

プラスチックシンチレータ+PMT
 精密な飛行時間+運動量(by DC)で質量測定

$p = \text{運動量}$ $L = \text{飛行距離}$

$$\text{PID} : m^2 = p^2 \left\{ \left(\frac{\text{TOF}}{L} \right)^2 - 1 \right\}$$

PHENIX High Resolution TOF



電磁カロリメータ EMCal

電子や光子を受け止め、その全エネルギーを測定する。(電磁シャワー)
電磁シャワーを小さくするため、密度の高い物質を使用する。

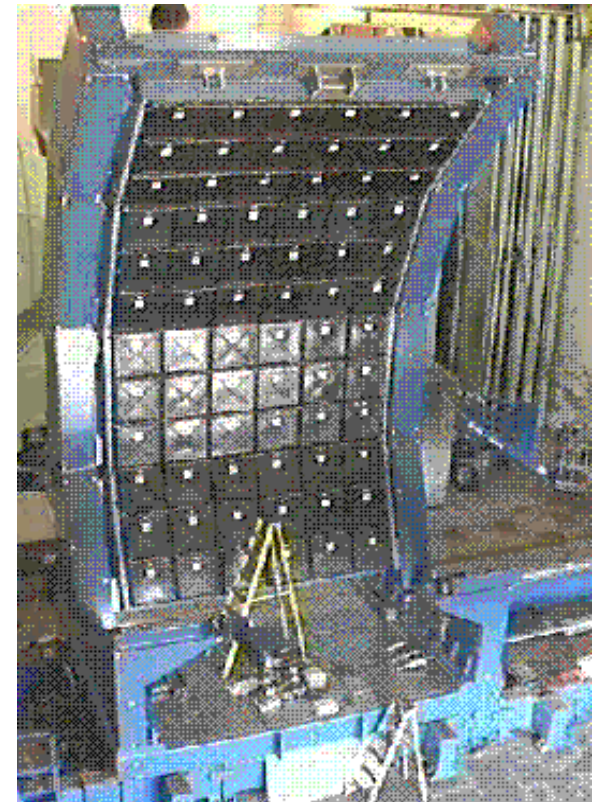
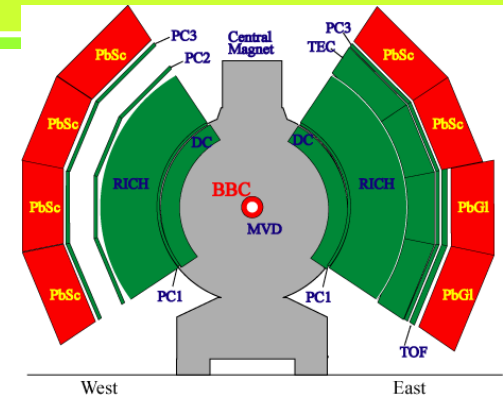
- **PbSc** – 鉛シンチレータ

電磁シャワーを止める鉛と、エネルギーを測るシンチレータを交互に設置する。

- **PbGl** – 鉛ガラス

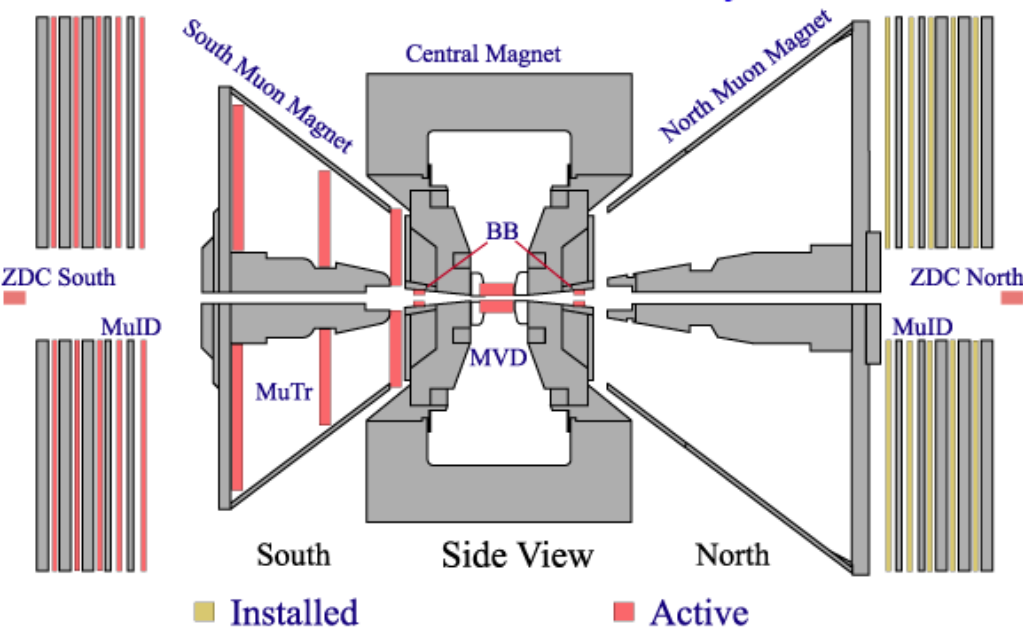
鉛を含む透明なガラスで電磁シャワーを止め、シャワー中の電子のチェレンコフ光を読み取る。

-



ミューオン測定器

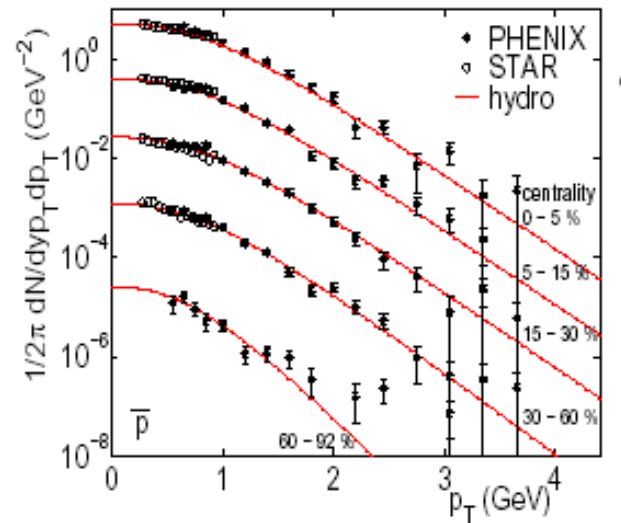
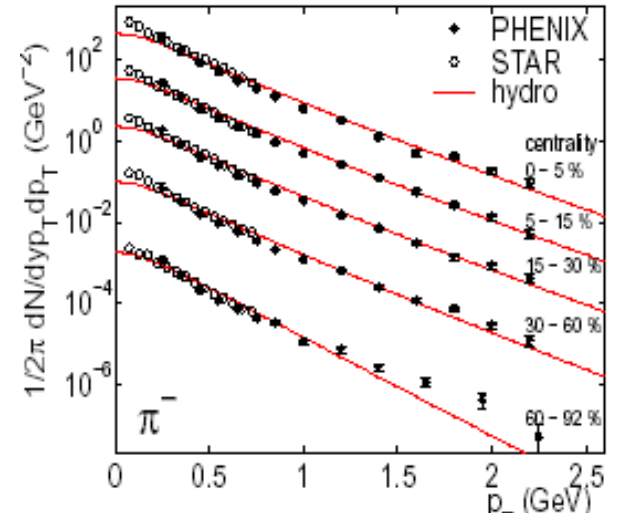
PHENIX Detector - Second Year Physics Run



- **MuTr** – Muon Tracker
- **MuID** – Muon ID
- Nose cone is a main absorber of hadrons
-> Only muon can be reached to MuID

測定器を組み合わせて計測

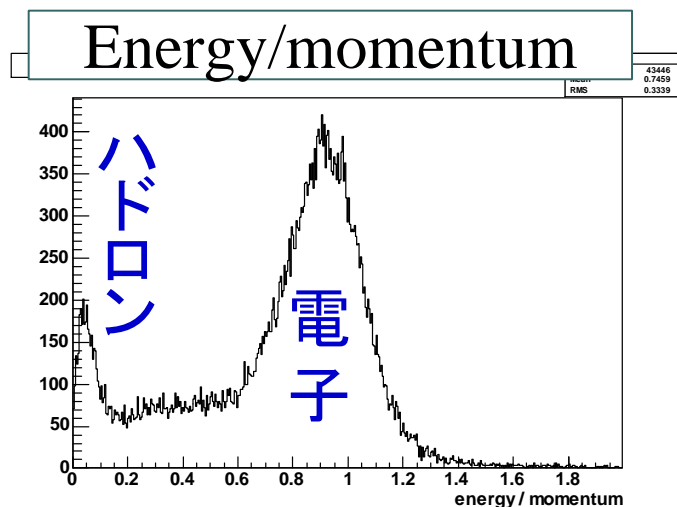
- トラッキングチェンバーで運動量を測定
- 飛行時間測定でPID
- BBCとZDCで衝突中心度を測定
- 振る舞いを理論で検証!!



測定器を組み合わせて計測 その2

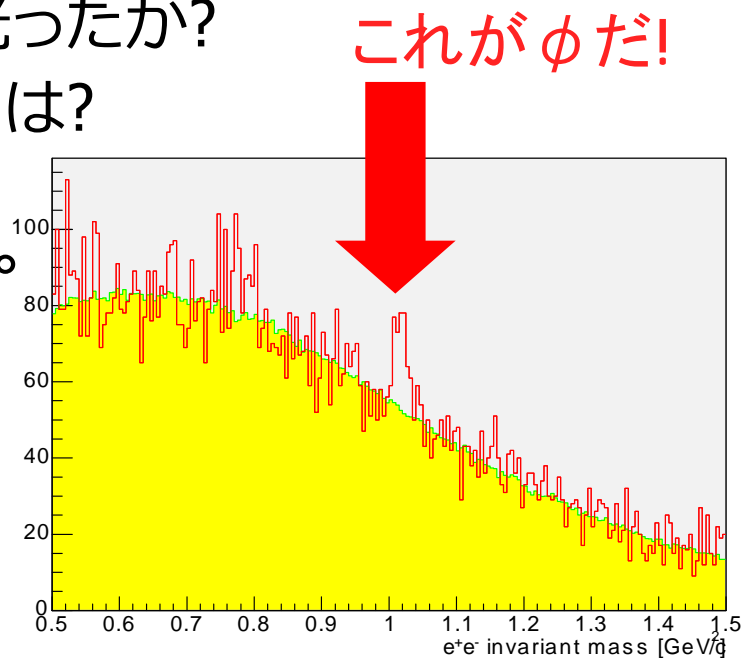
電子対からベクトル中間子を再構成

(ϕ 中間子は0.12%の確率で、電子陽電子対に崩壊, 寿命44fm/c)



- 複数の測定を組み合わせて、粒子同定を行う。
- DC/PCにトラックがあったか?
- E/pは? ($E^2=m^2+p^2$)
- RICHが光ったか?
- 飛行時間は?

- 観測した粒子を組み合わせる。
- 電子と陽電子から、崩壊前の粒子を再構成する。
- ϕ 中間子(寿命44fm)がみえた!



■ 核子スピンの起源

- 核子のスピン $1/2$ の起源を探るため、スピン状態をそろえた陽子を衝突させて、発生する粒子の左右の非対称性を計測

■ 加速器物理

- RHICの最適な運用や、更なる高性能加速器のための研究

■ 高性能の放射線計測用の測定器開発

4つの力と素粒子

	u (5MeV)	c (5MeV)	t (5MeV)
強い力 グルーオンが媒介	d (10MeV)	s (150MeV)	b (5MeV)
弱い力 W,Z粒子が媒介	e (500keV)	μ (100MeV)	τ
電磁力 光子が媒介	ν_e (<1MeV)	ν_μ (5MeV)	ν_τ (5MeV)
重力 重力子が媒介			

Theoretical Prediction

- J/Ψ suppression
 - Mass shift of Vector mesons
 - Direct (thermal) photon and di-lepton
 - Suppression of high Pt particles (Jet Quenching)
 - Hydro-dynamical effect (Flow)
 - Large volume and long duration time (HBT)
 - Centrality dependence of identified hadron yield
- more and more

To observe those predicted effects, we need to measure hadron, electron, photon and muon with highly precise mom. resolution and purely identified power.

- Our purpose is to search for the QGP
- New accelerator, RHIC, at BNL accelerate Au-ion and collide each other with highest energy in the world.
- PHENIX has a capability to measure hadrons, electrons, photons and muons

Basic Techniques

■ Charged Particles

- $|p|$, charge

- ◆ (Almost) always via bend in magnetic field

- Something else to determine a mass

- ◆ Velocity: Energy loss, Time-of-Flight, Cerenkov

- ◆ Energy : Calorimetry

(Really $E \approx p \Rightarrow$ electron)

- Penetration (for muons)

■ Neutrals

- Decay topology: $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$

- Decay reconstruction: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\phi \rightarrow K^+K^-$

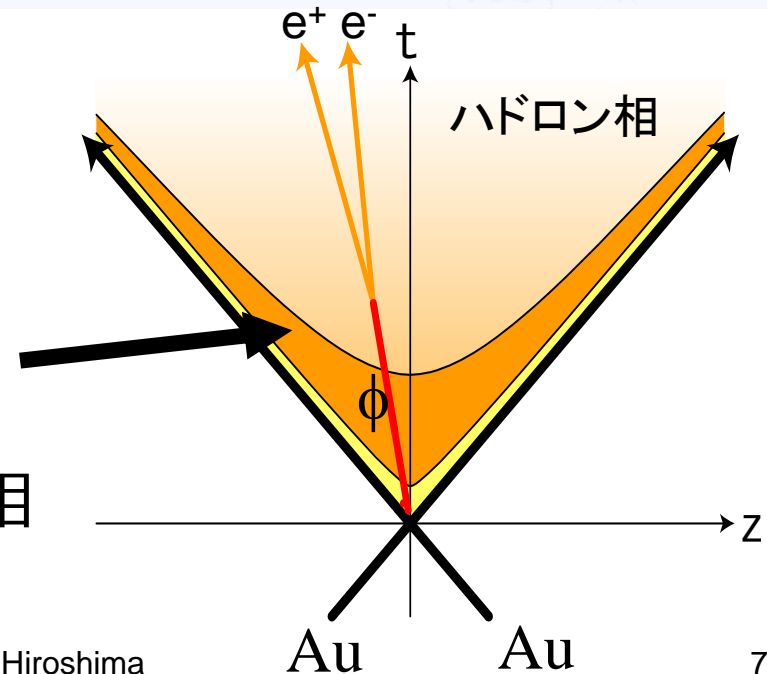
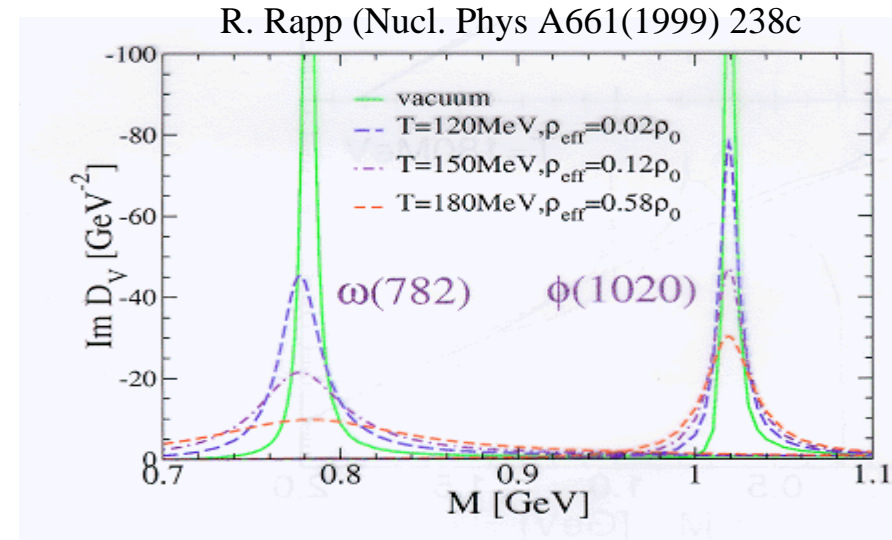
Performed *statistically*, not individually!

- Calorimetry (sometimes, sort of)

- Conversion: $\gamma + \text{stuff} \rightarrow e^+e^-$

探針としての軽質量ベクトル中間子(LVM)

- $\omega \rightarrow ee/\pi\pi\pi$: $782 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 8.4 \text{ MeV}/c^2$
- $\rho \rightarrow ee/\pi\pi$: $769 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 150 \text{ MeV}/c^2$
 - 比較的大きな質量変化が期待される
- $\phi \rightarrow ee/KK$: $1019 \text{ MeV}/c^2$,
 $\Gamma = 4.2 \text{ MeV}/c^2$
 - $\phi \rightarrow KK$ のQ値が小さいため、比較的大きな崩壊比の変化を期待
- 比較的短寿命
(RHICでの高温の系の寿命 $\sim 10\text{fm}/c$)
- 電子対への崩壊モードがある
電子(レプトン)は、ハドロン相で強い相互作用をしない。



BNLにあるRHICとPHENIX

■ BNL – Brookhaven National Laboratory

- ニューヨーク州にある中規模のアメリカ国立研究所
- **物理**・化学・生物の基礎研究(NASAの実験施設もある)
- 米エネルギー省の管轄。
- アメリカ人以外に、日露欧等からも多くの研究者が滞在
- 実験グループと理論グループの情報交換も活発

■ RHIC – the Relativistic Heavy Ion Collider

- 相対論的速度(質量の100(~250)倍のエネルギー)で核子を2方向に加速し、衝突させる事のできる加速器。(核子対当たりの)重心系衝突エネルギー200(~500)GeVを達成できる。
- BNLの北側に設置されている。周長約2マイル×2本。

■ PHENIX – the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment

- RHICで行われている国際共同実験プロジェクト
- 400人以上の研究者で構成される大規模実験

PHENIX



Kyoto University, Kyoto, Japan
Nagasaki Institute of Applied Science, Nagasaki-shi, Nagasaki, Japan
RIKEN, Institute for Physical and Chemical Research, Hirosawa, Wako, Japan
University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan
Tokyo Institute of Technology, Ohokayama, Meguro, Tokyo, Japan
University of Tsukuba, Tsukuba, Japan
Waseda University, Tokyo, Japan
Cyclotron Application Laboratory, KAERI, Seoul, South Korea
Kangnung National University, Kangnung 210-702, South Korea
Korea University, Seoul, 136-701, Korea
Myong Ji University, Yongin City 449-728, Korea
System Electronics Laboratory, Seoul National University, Seoul, South Korea
Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA
Institute of High Energy Physics (IHEP-Protvino or Serpukhov), Protvino, Russia
Joint Institute for Nuclear Research (JINR-Dubna), Dubna, Russia
Kurchatov Institute, Moscow, Russia
PNPI, St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningrad, Russia
Lund University, Lund, Sweden
Abilene Christian University, Abilene, Texas, USA
Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY 11973
University of California - Riverside (UCR), Riverside, CA 92521, USA
Columbia University, Nevis Laboratories, Irvington, NY 10533, USA
Florida State University (FSU), Tallahassee, FL 32306, USA
Georgia State University (GSU), Atlanta, GA, 30303, USA
Iowa State University (ISU) and Ames Laboratory, Ames, IA 50011, USA
Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM 87545, USA
Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA 94550, USA
University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA
New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA
Department of Chemistry, State University of New York at Stony Brook (USB), Stony Brook, NY 11794, USA
Department of Physics and Astronomy, State University of New York at Stony Brook (USB), Stony Brook, NY 11794, USA
Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN 37831, USA
University of Tennessee (UT), Knoxville, TN 37996, USA
Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA

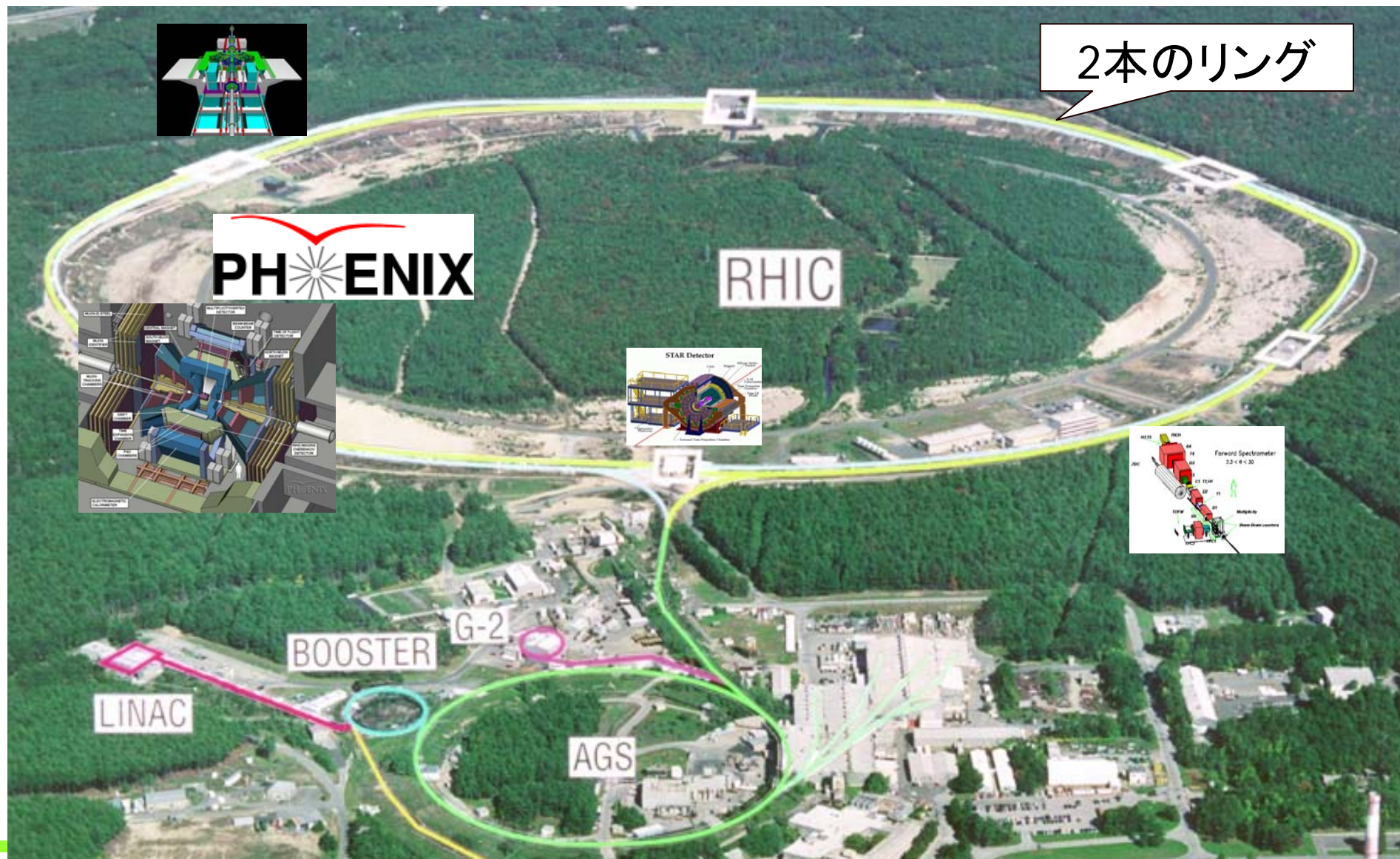
コラボレーション

University of São Paulo, São Paulo, Brazil
Academia Sinica, Taipei 11529, China
China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing, P. R. China
Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), Université de Clermont-Ferrand, F-63170 Aubiere, Clermont-Ferrand, France
Dapnia, CEA Saclay, Bat. 703, F-91191, Gif-sur-Yvette, France
IPN-Orsay, Université Paris Sud, CNRS-IN2P3, BP1, F-91406, Orsay, France
LPNHE-Palaiseau, École Polytechnique, CNRS-IN2P3, Route de Saclay, F-91128, Palaiseau, France
SUBATECH, École des Mines at Nantes, F-44307 Nantes, France
University of Muenster, Muenster, Germany
Banaras Hindu University, Banaras, India
Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Bombay, India
Weizmann Institute, Rehovot, Israel
Center for Nuclear Study (CNS-Tokyo), University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739, Japan
KEK, Institute for High Energy Physics, Tsukuba, Japan

PHENIX実験と、RHICの仲間たち

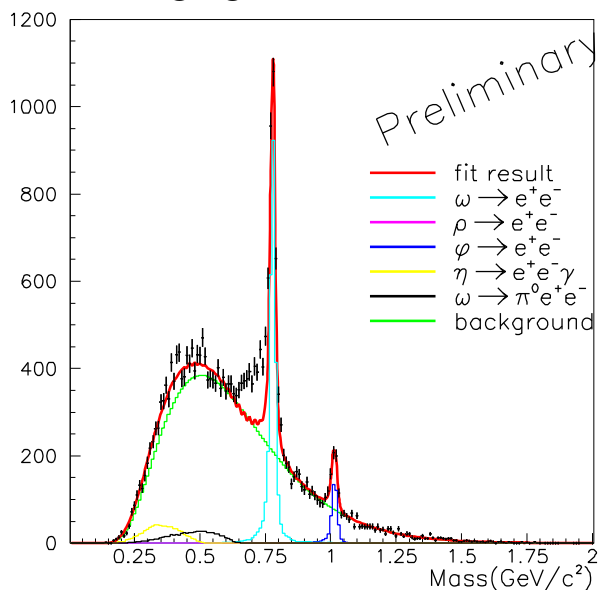
6つの衝突点で実験ができる



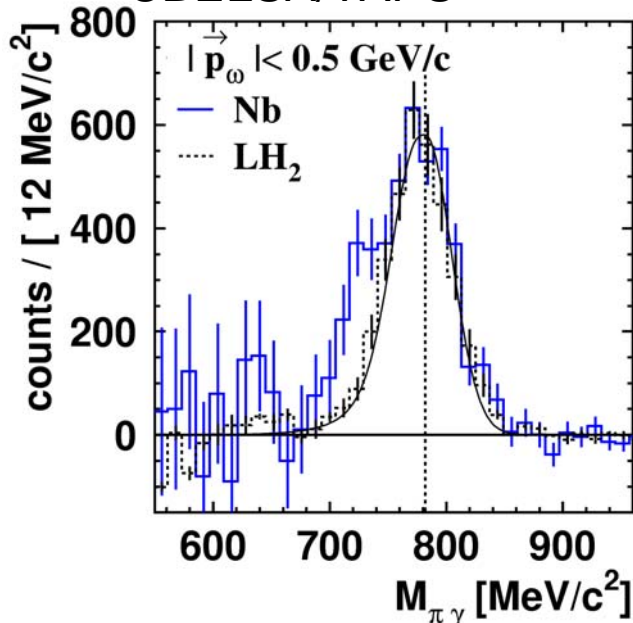
これまでの実験

- 通常核密度中で崩壊したLVMの質量分布に変化が起きていることを示唆する実験報告が多数ある。
- CERNの重イオン衝突実験で、 e^+e^- の質量分布に変化が観測されている。

KEK E325

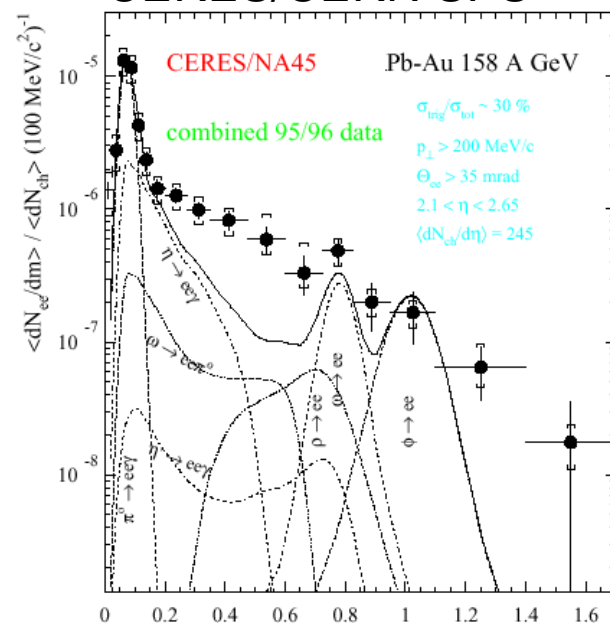


CBELSA/TAPS



PRL 94, 192303 (2005)
CBELSA/TAPS

CERES/CERN SPS



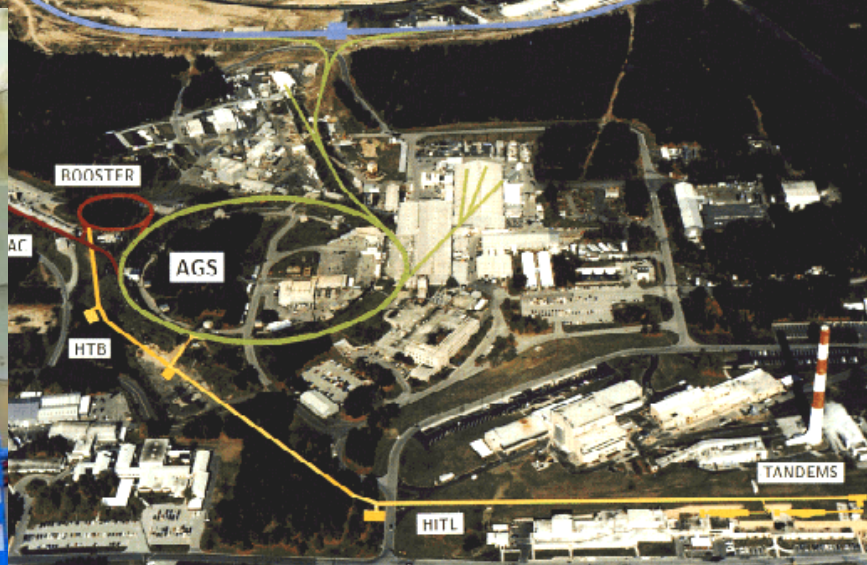
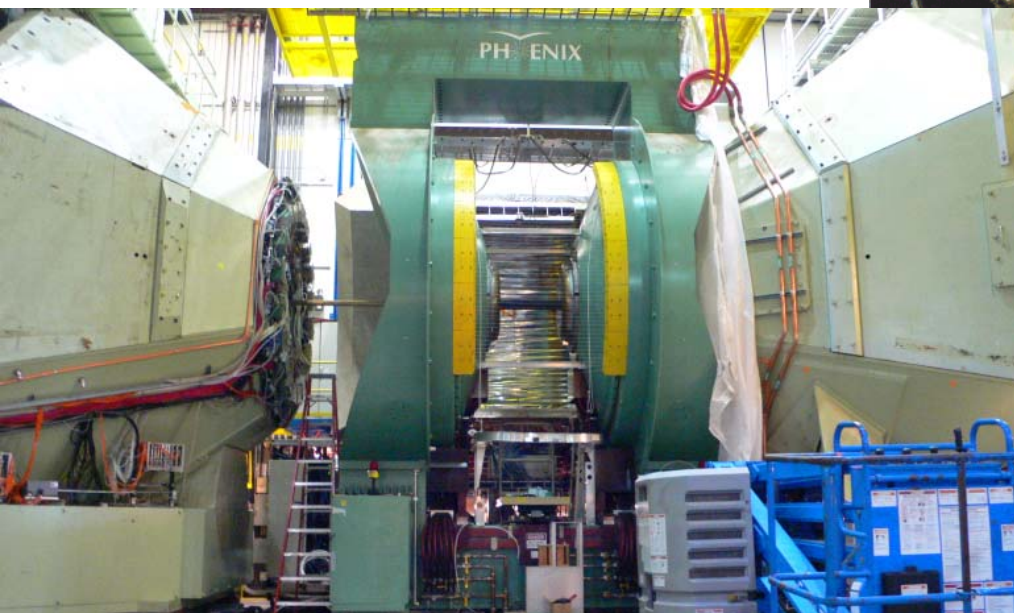
G. Agakichev et al.

Low-mass e^+e^- pair production in 158A GeV Pb-Au collisions at the CERN SPS, its dependence on multiplicity and transverse Momentum ([Phys.Lett.B422:405-412,1998](#))

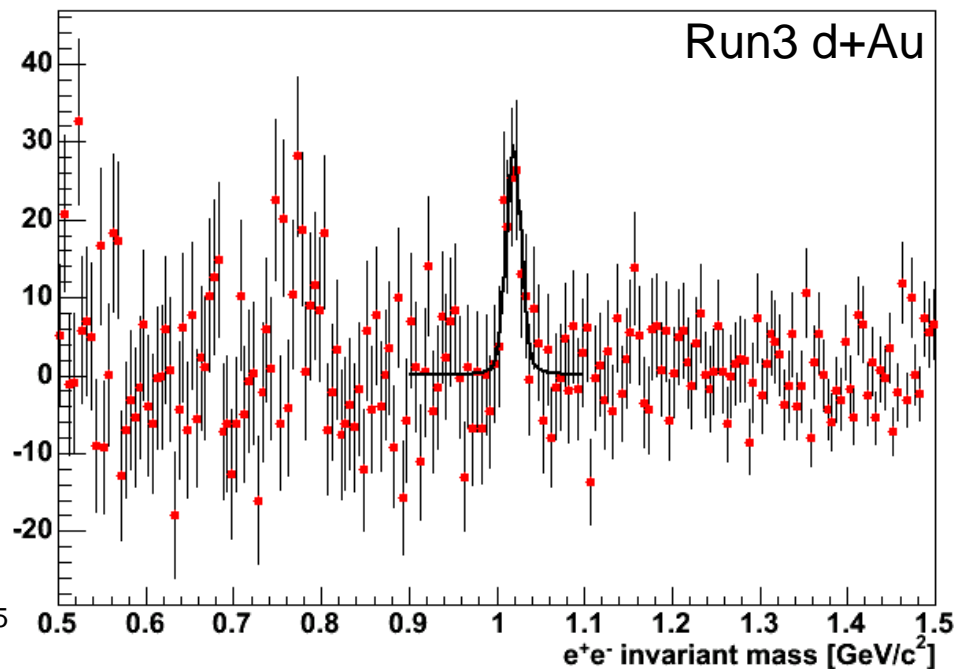
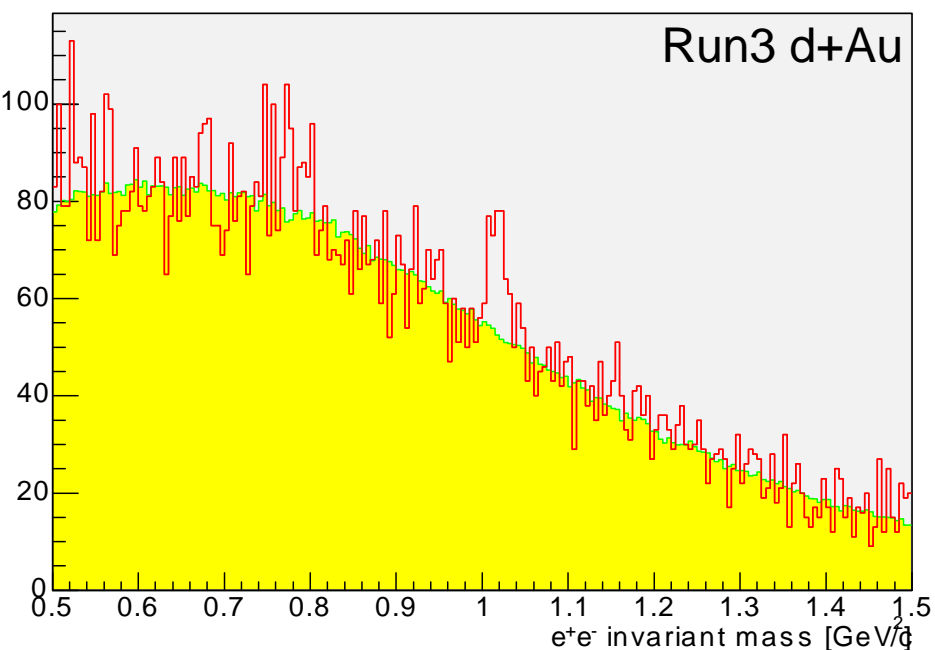
BNL RHIC加速器 と PHENIX実験

- RHIC : 周長3.8km × 2本のリングの衝突型加速器
- 6つの衝突点
- $p+p \sim d+Au \sim Au+Au$ $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ (500GeV for p+p)
(本研究では、d+Au 衝突)

PHENIX



電子対不変質量分布

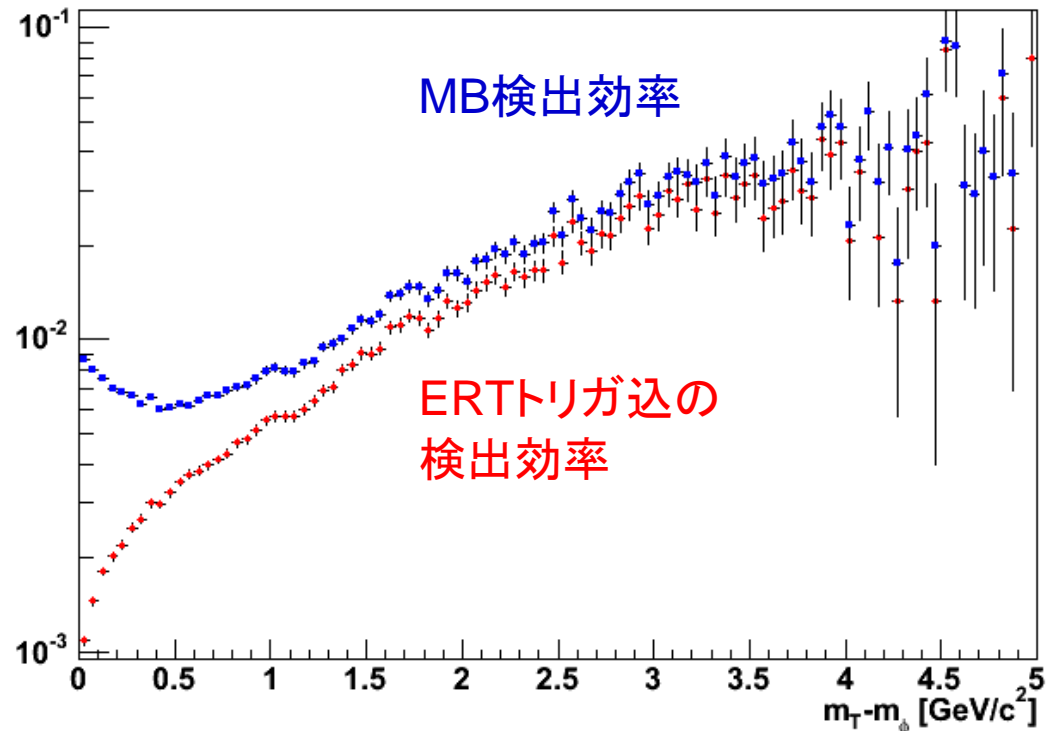


■ イベントミキシング法で、無相関な e^+e^- によるバックグラウンドを再現。

● MinBias+ERTエミュレータ

検出効率(Acceptance)

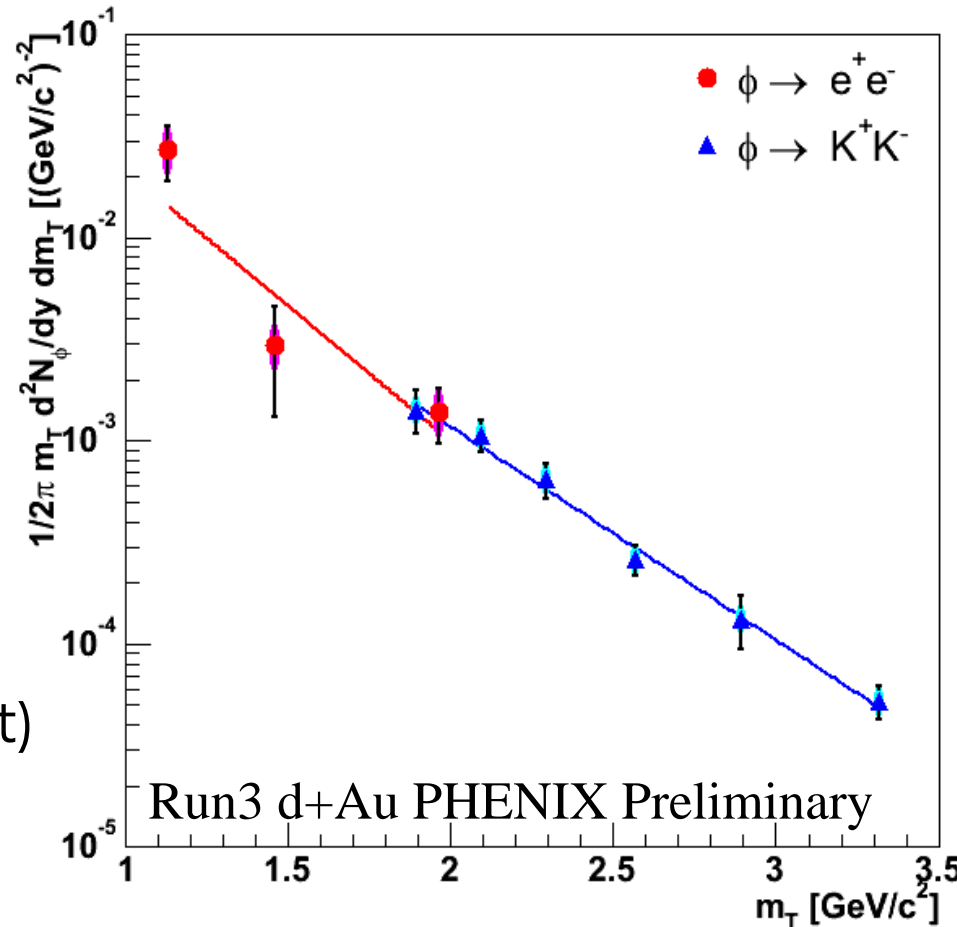
- ϕ 10Mをランダムに発生させ、シミュレータ(GEANT3)に入射し、検出効率を算出。
- 初期運動量分布は、結果を基に作成。(再帰的に)
- すべての測定器等の物質と、ERTトリガを再現。(測定データを元にチューニング)



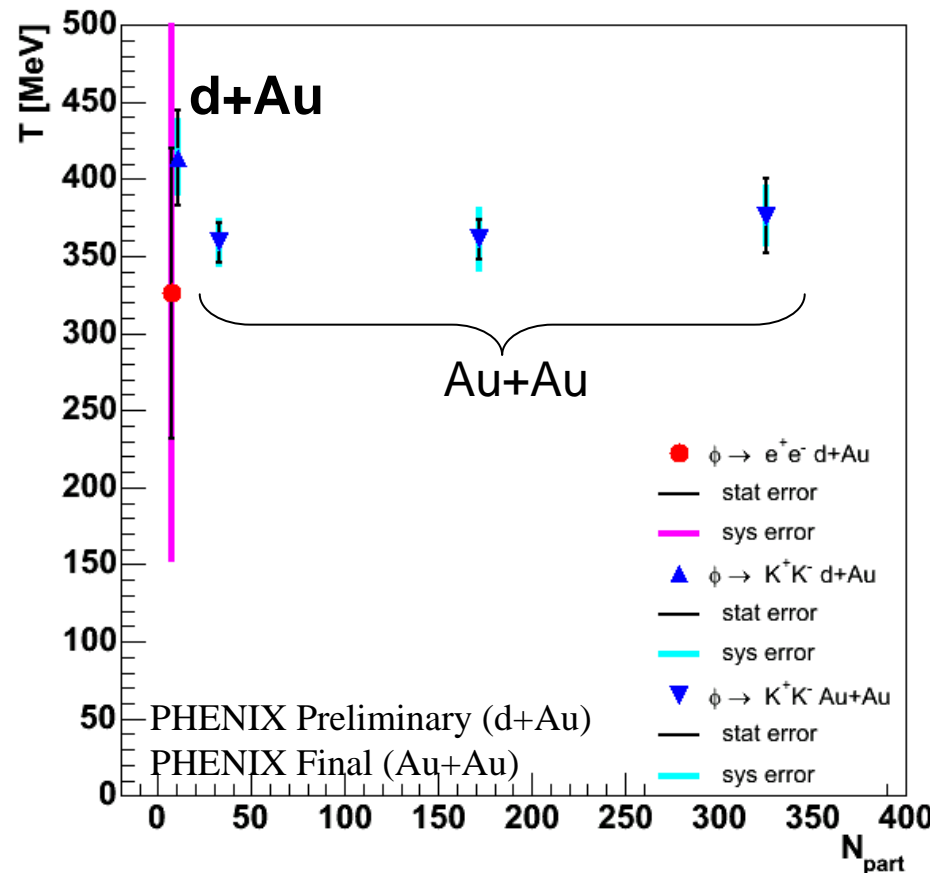
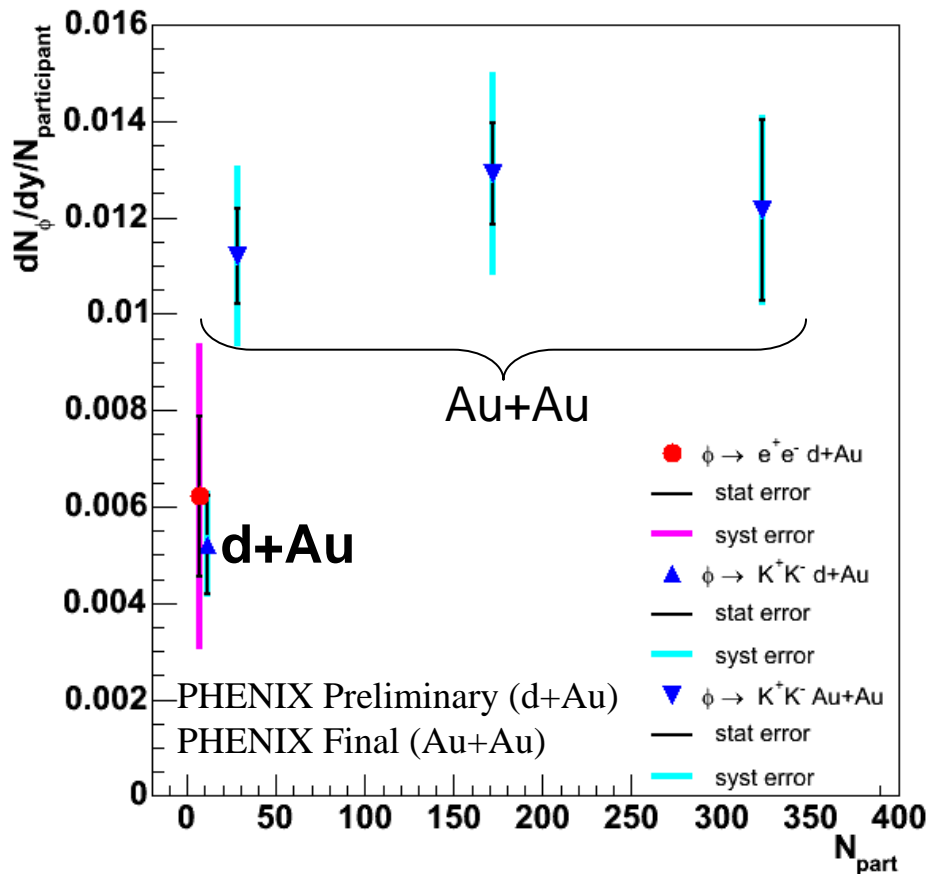
m_T 分布 K中間子モードとの比較

$$m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

- d+Au衝突実験において、 $\phi \rightarrow ee$ と $\phi \rightarrow KK$ での生成量はエラーの範囲で一致
- 電子対モード
 - $dN/dy = 0.056 \pm 0.015(\text{stat}) \pm 50\%(\text{syst})$
 - $T = 326 \pm 94(\text{stat}) \pm 53\%(\text{syst}) \text{ MeV}$
- K中間子モード
 - $dN/dy = 0.0423 \pm 0.0063(\text{stat}) (+0.0076, -0.0073) (\text{syst.})$
 - $T (\text{MeV}) = 429 \pm 27 (\text{stat}) \pm 35 (\text{syst})$



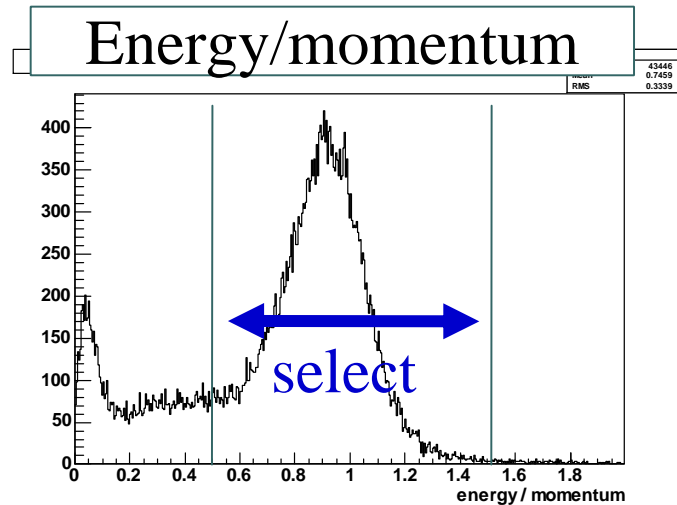
dN/dyと傾きの衝突係数依存性



- $\frac{dN}{dy}_{dAu\phi \rightarrow ee} = .056 \pm .015(\text{stat}) \pm 50\%(\text{syst})$
- d+AuとAu+Auで、約2倍の差 (他のハドロン生成比と一致)

- $T = 326 \pm 94(\text{stat}) \pm 53\%(\text{syst}) \text{ MeV}$
- エラーの範囲で一致

電子の同定と、イベント選定

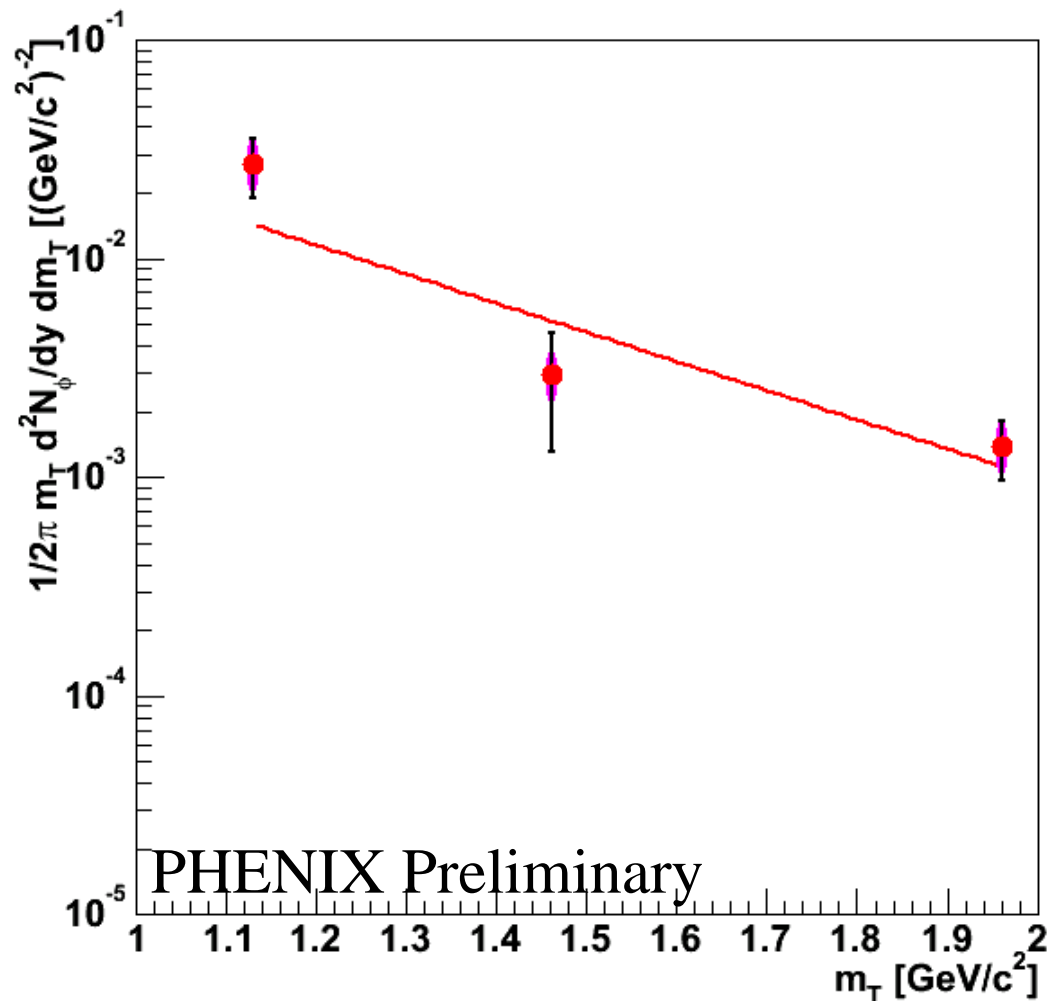


以下の条件で電子を同定

- 位置マッチング $< 4\sigma$
 - $0.5 < E/p < 1.5$
 - nPMT in RICH ≥ 2
 - DCやRICH内部の偽飛跡のカット
 - 光子コンバージョンからくる電子対をカット
- 約18Mイベント(ERT電子トリガ, $E_e > 600\text{MeV}$).
 - $|\text{Vertex}| < 30\text{cm}$
 - $\sim 1\text{G}$ minimum bias (rawトリガ)

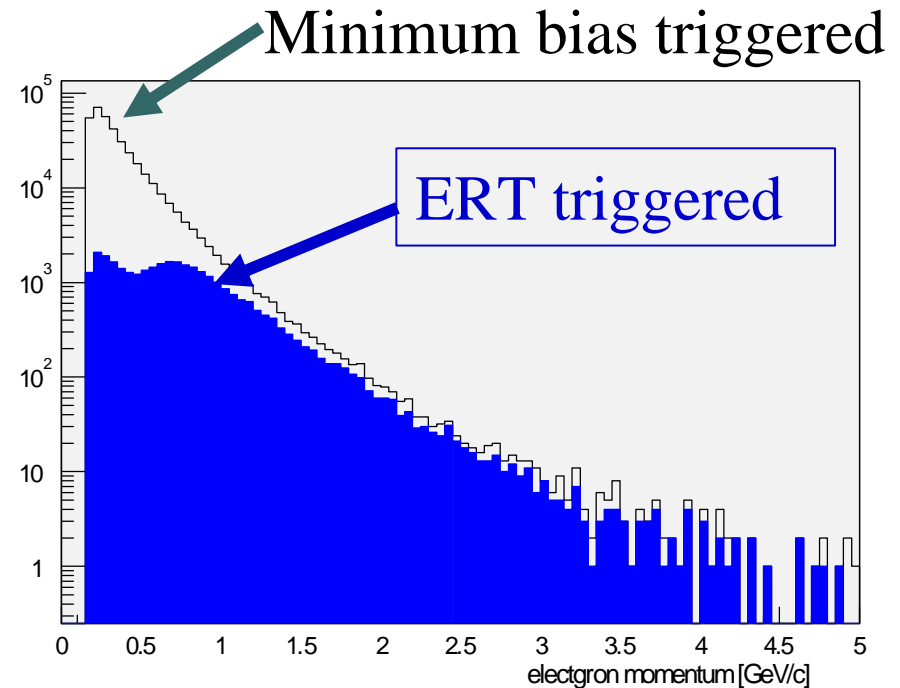
m_T (横エネルギー)分布

- $dN/dy = .056$
 $\pm .015$ (stat)
 $\pm 50\%$ (syst)
- $T = 326 \pm 94$ (stat)
 $\pm 53\%$ (syst) MeV

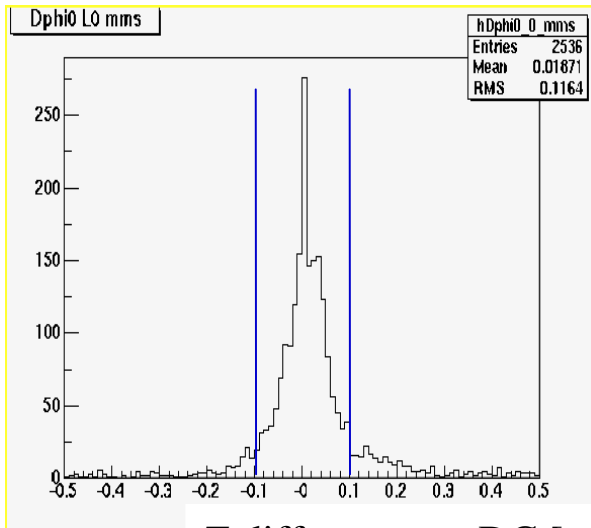


ERT electron trigger

- Front-end electronics and data storage limit trigger and recording rate.
- Give priority for electron events to record.
 - ERT electron trigger by RICH & EMC online

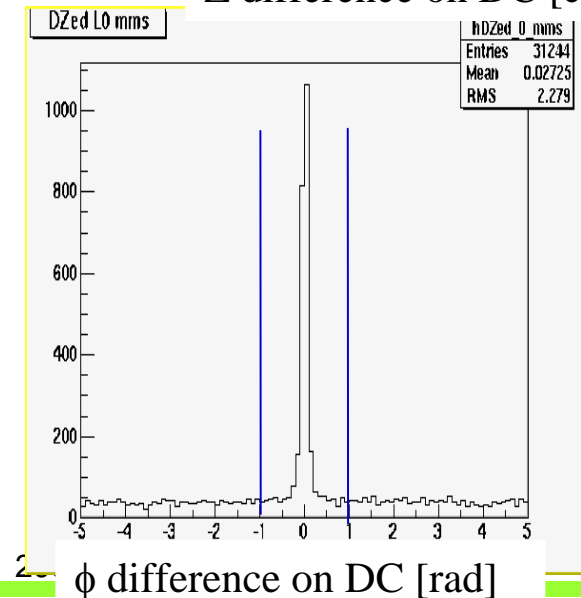


Ghost track rejection



Ghost tracks share a close hit position in the drift chamber. We rejected one of the tracks randomly if $\delta z < 1\text{cm}$ and $\delta\phi < 0.1$

Z difference on DC [cm]

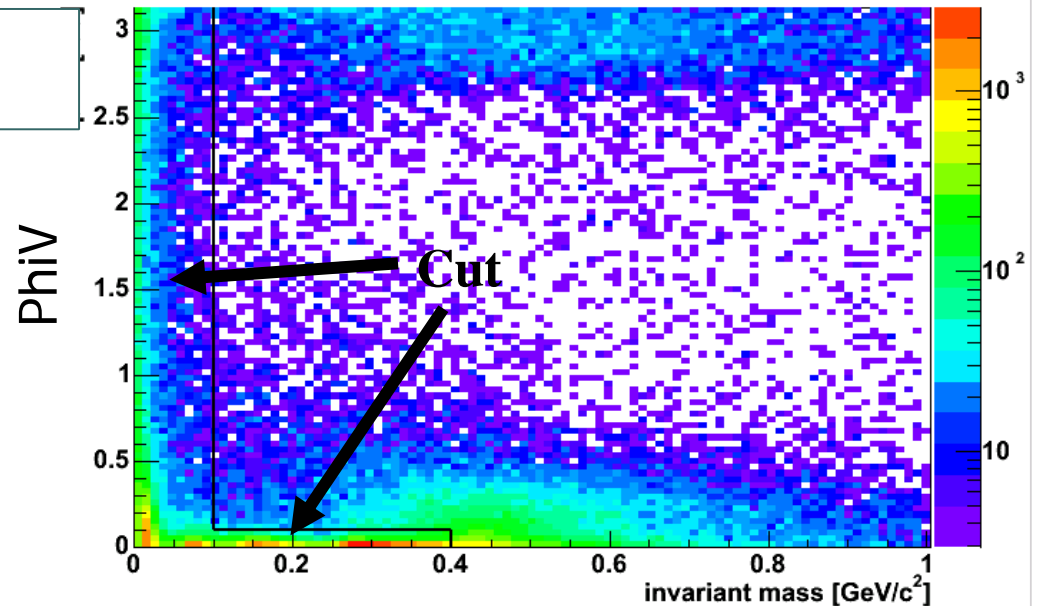
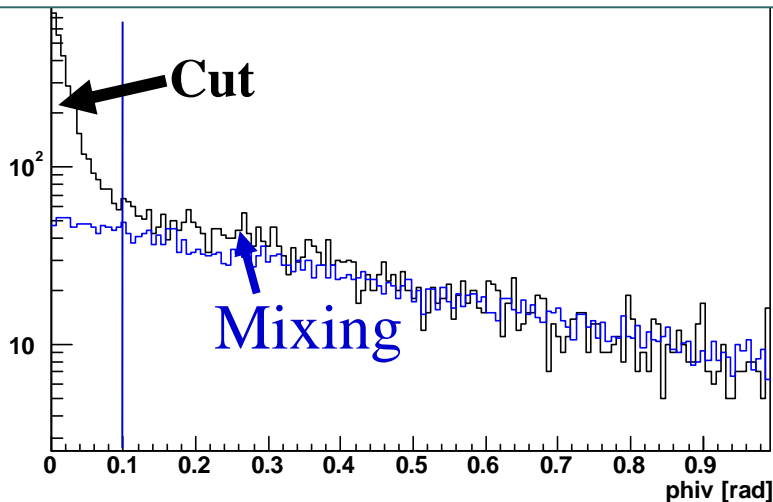


We also cut ring shared tracks if $\delta z < 10\text{cm}$ and $\delta\phi < 0.1$ rad in RICH. We choose better E/p track.

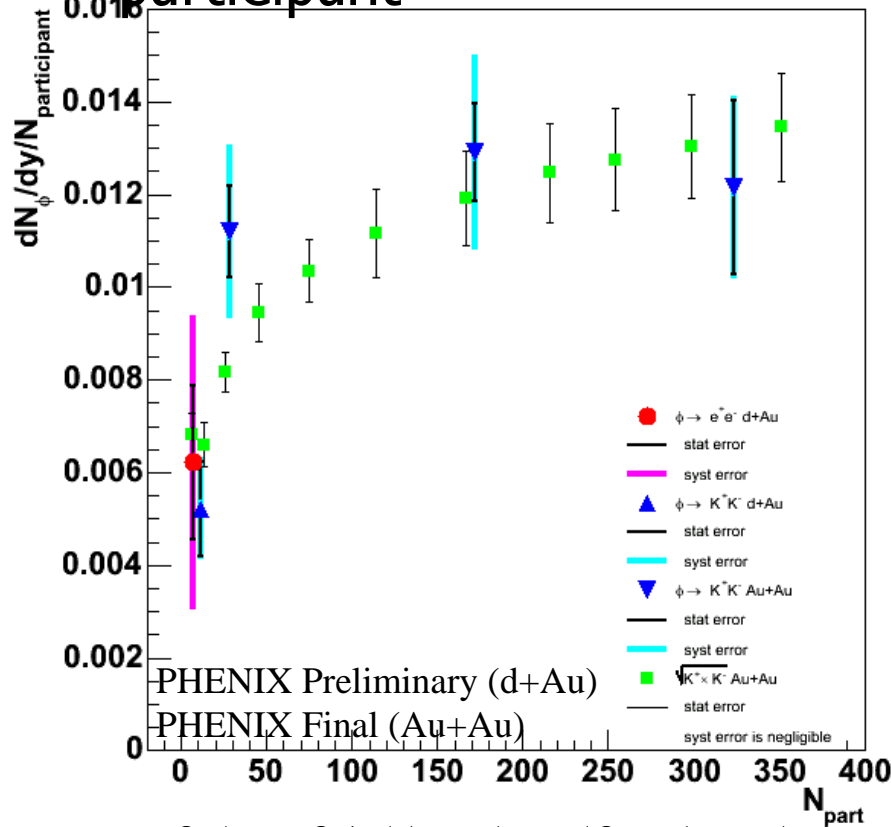
Conversion Rejection by invariant mass and PhiV

- e^+e^- pair from photon conversion has small PhiV and small mass. we cut those pairs at low-background region
 - Kill all tracks if $\text{PhiV} < 0.1$ for $\text{mass} < 400 \text{ MeV}$
 - PhiV is angular orientation between pair tracks' surface and magnet field. Conversion pair has 0 PhiV in principle.
 - Kill all tracks if $\text{mass} < 100 \text{ MeV}$

PhiV ($100 < \text{mass} < 400 \text{ MeV}$)



$dN/dy / N_{\text{participant}}$



- $dN/dy_{dAu \phi \rightarrow ee} = .056 \pm .015(\text{stat}) \pm 50\%(\text{syst})$
- ϕ increases from dAu to AuAu by factor ~ 2
 - this behavior is same as inclusive K yield at Au+Au

PHENIX実験が設置している測定器

■ トリガ系

- 最初に衝突を検知して衝突のパラメータを計測し、データ収集系にデータを取るように指示する
 - ◆ BBC, ZDC, NTC, (FCal, MVD)

■ 荷電粒子トラッキングチェンバー系

- 荷電粒子の飛跡を観測し、磁場中での曲率から運動量(p/m)を測定
 - ◆ DC, PC, MuTr, TEC

■ 全エネルギー計測系

- レプトンや光子を完全に止め、全エネルギーを測定
 - ◆ PbSc, PbGl

■ 粒子種判別(PID)系

- 飛行速度と運動量から、質量を測定
 - ◆ ToF(Sc,MWPC), PbSc
- チェレンコフ放射の有無から、質量の範囲を限定
 - ◆ RICH, AeroGel
- 物質との反応率の違いから、ミュー粒子を限定
 - ◆ MuID

おしまい!

- おしまい!