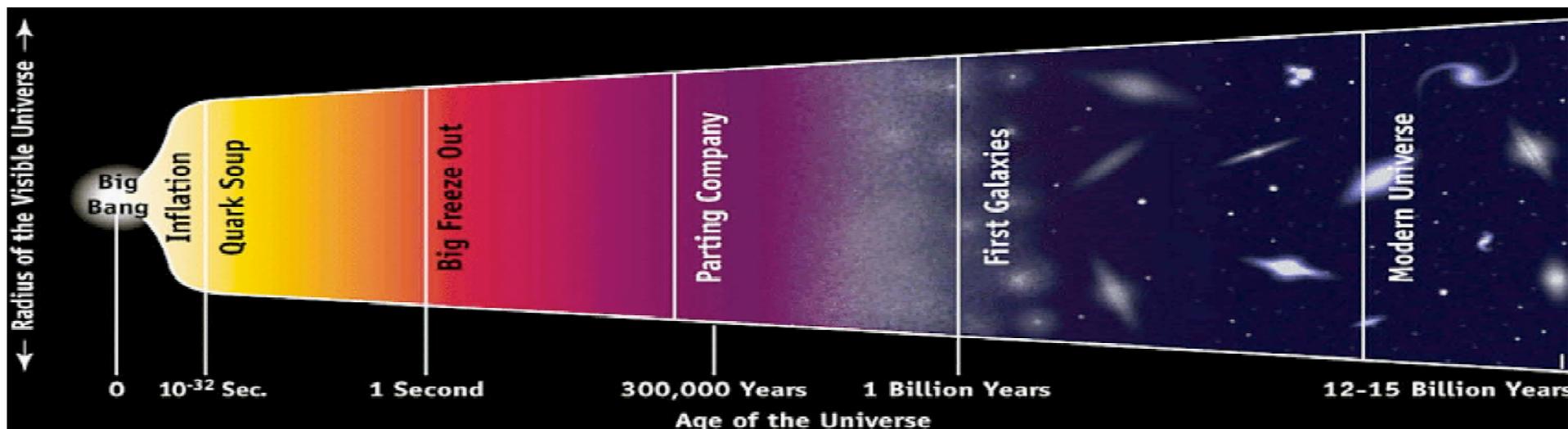


クォークグルーオンプラズマの生成

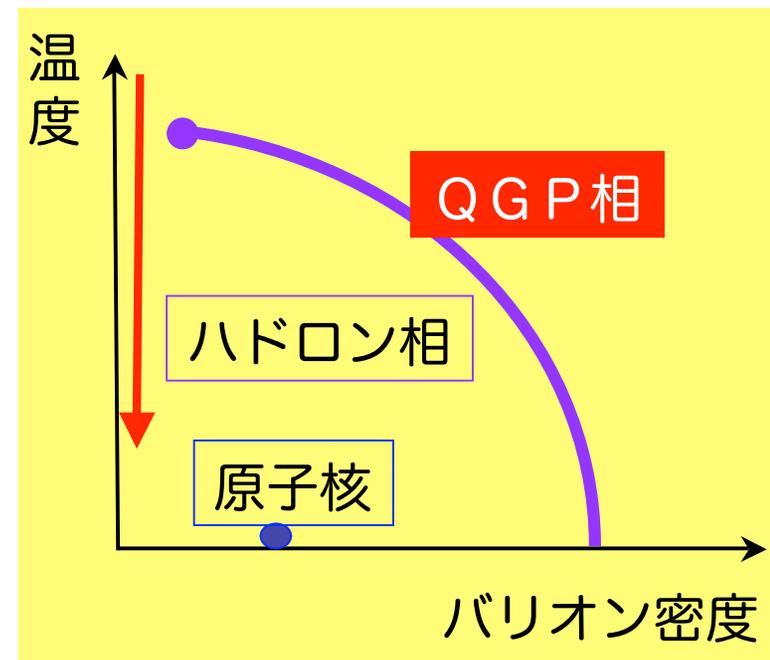
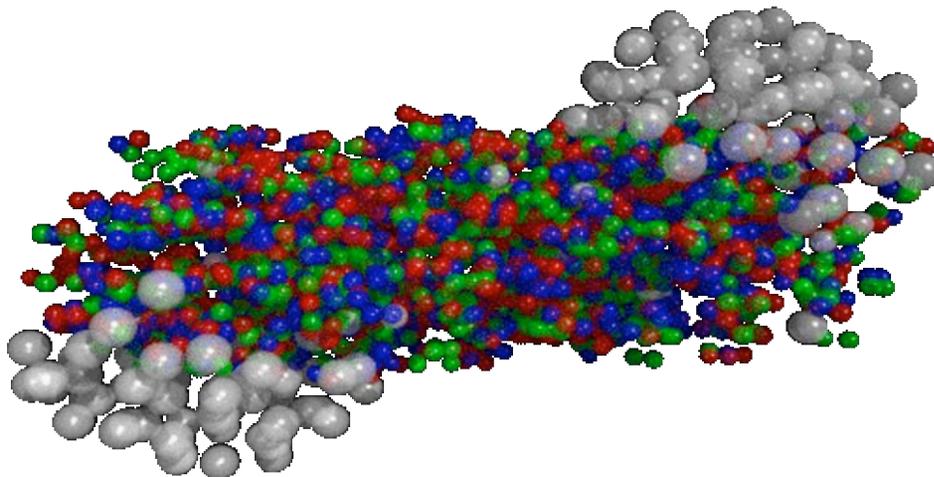
中條 達也

理化学研究所・放射線研究室

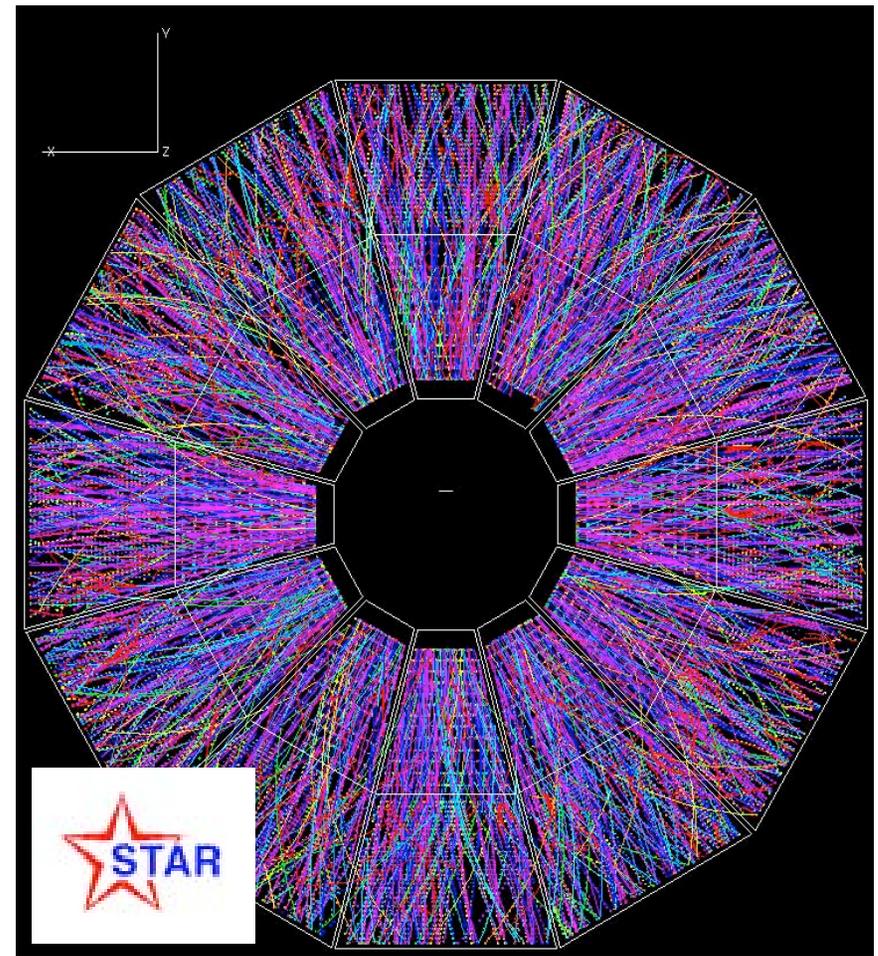
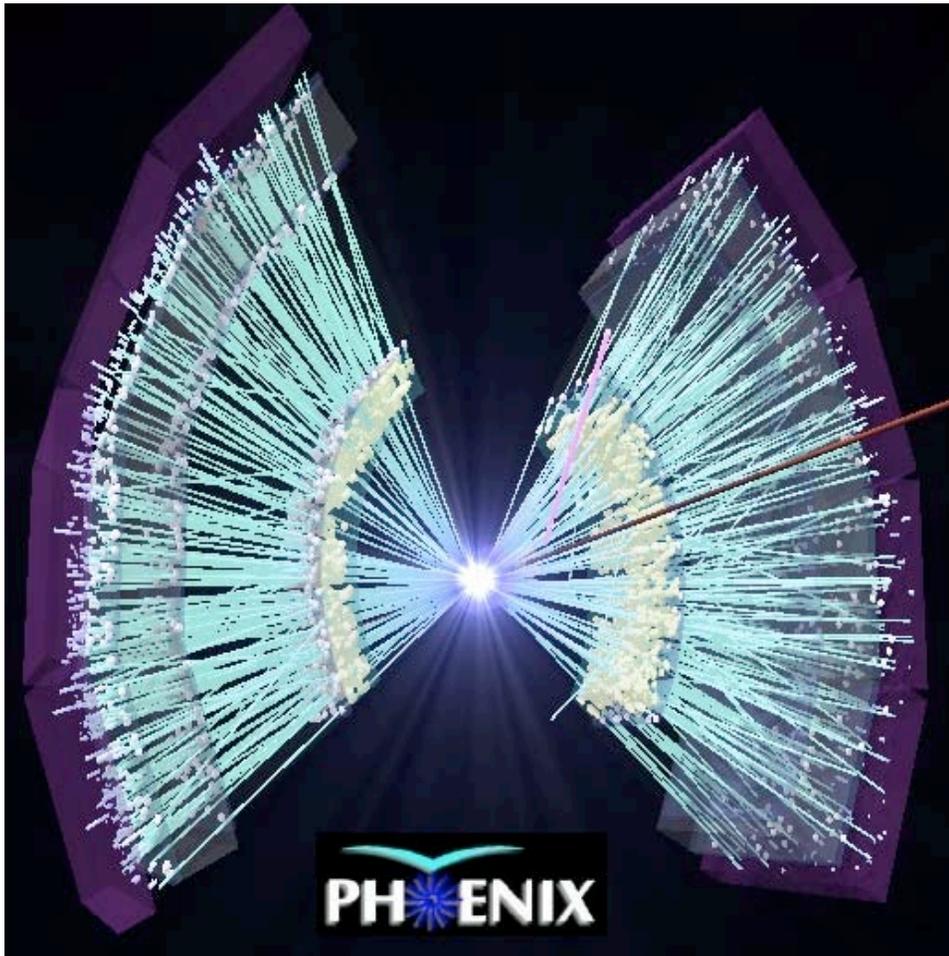


RHIC加速器における高エネルギー重イオン核物理

- 格子QCD計算の予言：臨界温度 $T_c \approx 170 \pm 10 \text{ MeV}$ ($10^{12} \text{ }^\circ\text{K}$)、臨界エネルギー密度 $\epsilon_c \approx 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ でクォークとグルーオンが閉じ込めから解放された状態、クォーク・グルーオンプラズマ状態 (QGP) への相転移がおこる。
 - ビックバンの 10^{-6} sec 後に存在。
 - 相対論的重イオン加速器 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) を用いて実験室上で高温・高エネルギー密度QCD核物質を生成しその性質を研究。



Display Event in PHENIX and STAR



金原子核衝突で約 6 0 0 0 個の荷電粒子が生成

RHIC における最初の 3 年間

ハドロン精密測定の時代表

$\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^{*0}, K_s^0, p, d, \rho^0, \phi, \Lambda, \Omega, \Xi$ (+ 反粒子) ...

主な測定物理量

- 粒子多重度、横方向エネルギー
- 粒子比、収量
- 横運動量分布
- 2 粒子HBT相関
- 方位角非等方性
- ジェット生成
- etc ...



2000	(Run-01):	Au+Au	130 GeV
2001/2002	(Run-02):	Au+Au	200 GeV
		p+p	200 GeV
2002/2003	(Run-03):	d+Au	200 GeV
		p+p	200 GeV

p+p, d+Auなどの系統的な測定も行う。

PHENIX実験の目標と現状

Conceptual Design Report (29-Jan-1993)

目標:

多様なチャンネルで物理量を同時測定し、**QGP**のシグナルを包括的に捕らえる。

– ハドロン、電子、ミューオン、光子

過去3年間の物理測定で当初計画の主要ハドロン測定をほぼ終了。

– 論文数：22

(2003年11月現在、e-print含む)

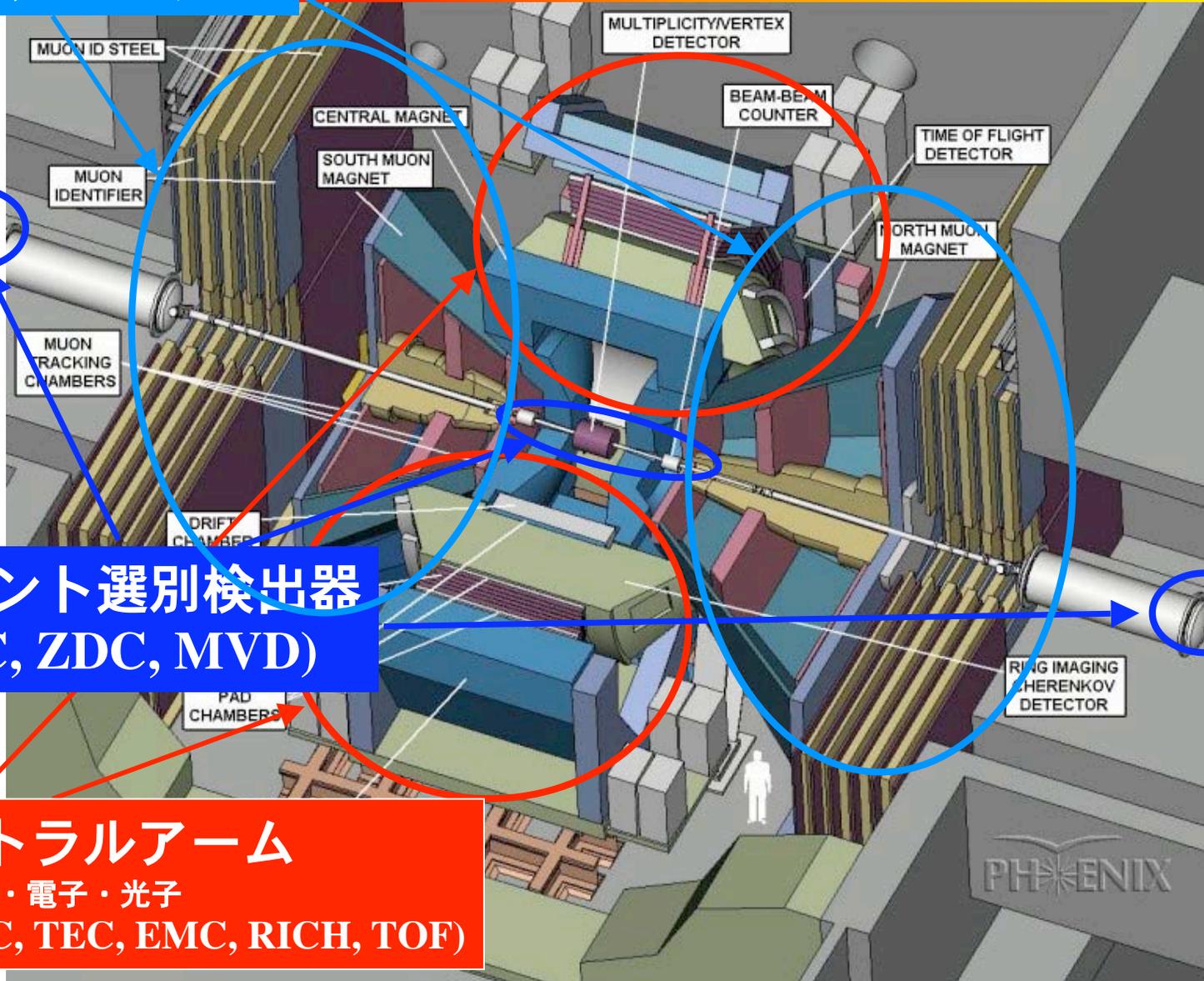
Quantity to be Measured	Category*	Physics Objective
$e^+e^-, \mu^+\mu^-$		
<ul style="list-style-type: none"> $\rho \rightarrow \mu^+\mu^- / \rho \rightarrow \pi\pi, d\sigma/dp_{\perp}$ $\omega \rightarrow e^+e^- / \omega \rightarrow \pi\pi, d\sigma/dp_{\perp}$ ϕ-meson's width and $m_{\phi \rightarrow e^+e^-}$ $\phi \rightarrow e^+e^- / \phi \rightarrow K^+K^-$ ϕ-meson yield (e^+e^-) $J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ $\psi' \rightarrow \mu^+\mu^-$ $\Upsilon, \rightarrow \mu^+\mu^-$ $1 < m_T(l^+l^-) < 3 \text{ GeV}$ (rate and shape) $m_{l+l-} > 3 \text{ GeV} \rightarrow \mu^+\mu^-$ $\sigma \rightarrow \pi\pi, e^+e^-, \gamma\gamma$ 	BCD QGP QGP ES QGP, QCD ES, QGP QCD QGP QGP	Basic dynamics (T, τ , etc.) for a hot gas, transverse flow, etc. Mass shift due to chiral transition (C.T.) [2] Branching ratio change due to C.T. [3] Strangeness production ($gg \rightarrow s\bar{s}$) Yield suppression and the distortion of p_T spectra due to Debye screening in deconfinement transition (D.T.) [4] Thermal radiation of hot gas, and effects of QGP [5, 6, ?] A -dependence of Drell-Yan, and thermal $\mu^+\mu^-$ [5, 6, 7, 8] Mass shift, narrow width due to C.T. [2]
$e\mu$ coincidence		
<ul style="list-style-type: none"> $e\mu, e(p_T > 1 \text{ GeV}/c)$ 	QCD, QGP	$c\bar{c}$ background, charm cross section [9]
Photons		
<ul style="list-style-type: none"> $0.5 < p_T < 3 \text{ GeV}/c \gamma$ (rate and shape) $p_T > 3 \text{ GeV}/c \gamma$ π^0, η spectroscopy $N(\pi^0)/N(\pi^+ + \pi^-)$ fluctuations High $p_T \pi^0, \eta$ from jet 	ES, QGP QCD BCD QGP QGP	Thermal radiation of hot gas, and effect of QGP [6, 7] A -dependence of QCD γ Basic dynamics of hot gas, strangeness in η Isospin correlations and fluctuations [10, 11] Reduced dE/dx of quarks in QGP [12]
Charged Hadrons		
<ul style="list-style-type: none"> p_T spectra for $\pi^{\pm}, K^{\pm}, p, \bar{p}$ $\phi \rightarrow K^+K^-$ K/π ratios $\pi\pi + KK$ HBT 	BCD QGP ES, QGP ES BCD QGP QGP	Basic dynamics, flow, T , baryon density, stopping power, etc. Possible second rise of $\langle p_T \rangle$ [13] Branching ratio, mass width [3, 14] Strangeness production Evolution of the collision, R_{\perp} Long hadronization time ($R_{\text{out}} \gg R_{\text{side}}$) [15] High baryon susceptibility due to C.T.? [16] Reduced dE/dx of quarks in QGP [12]
Global		
<ul style="list-style-type: none"> N_{tot} (total multiplicity) $dN/d\eta, d^2N/d\eta d\phi, dE_T/d\eta$ 	BCD BCD QGP	Centrality of the collision Local energy density, entropy Fluctuations, droplet sizes [17]

* BCD = Basic collisions dynamics. ES = Thermodynamics at early stages.
QGP = Effect of QGP phase transition. QCD = Study of basic QCD processes.

ミュオンアーム (MuTr, MuID)

PHENIX実験

- 多種多様な検出器群
- 選別的トリガーと高い DAQ rate 能力
e.g.) electron, muon, gamma trigger, 100MB/sec on Disk (pp)

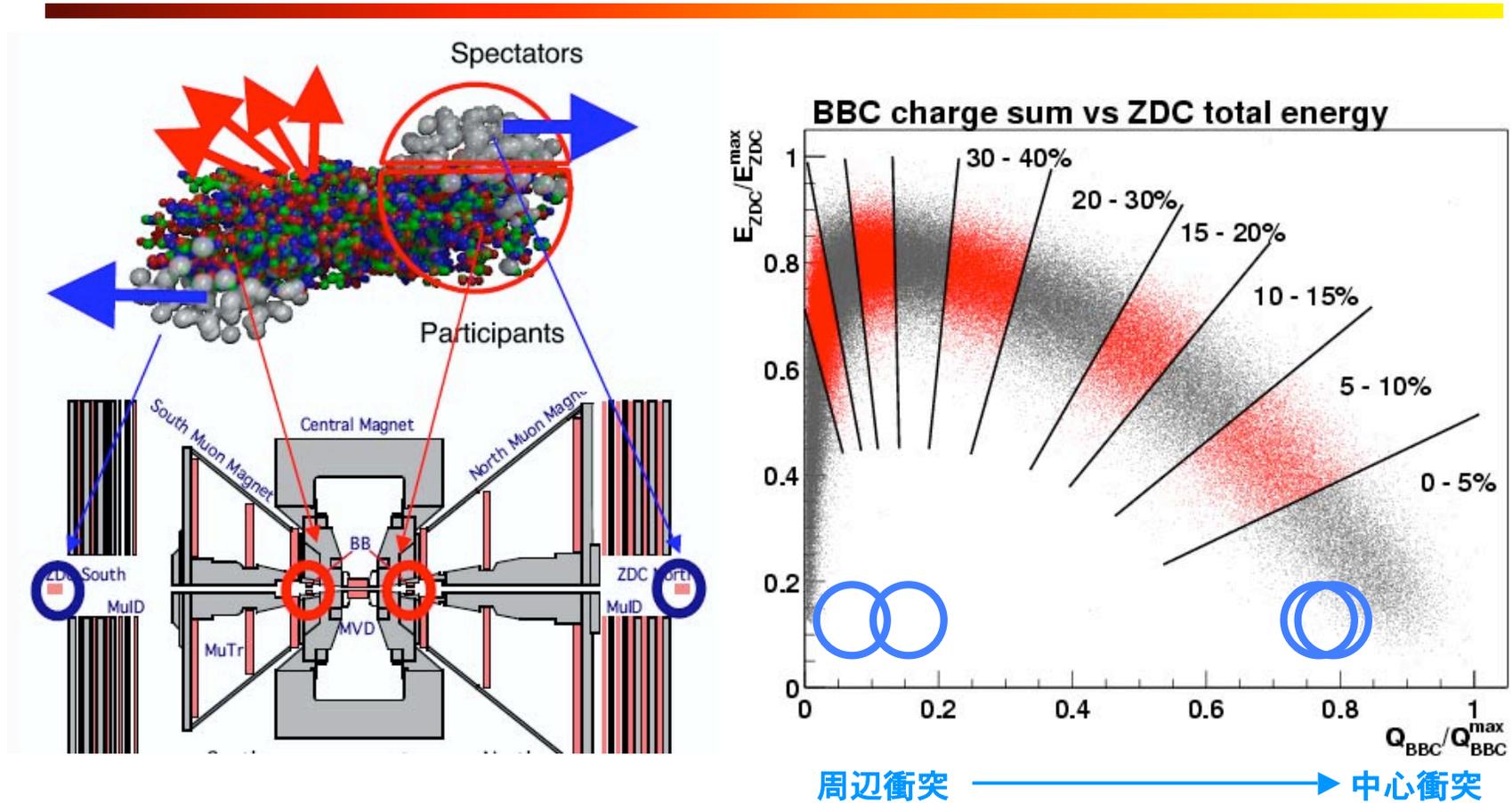


イベント選別検出器 (BBC, ZDC, MVD)

セントラルアーム ハドロン・電子・光子 (DC, PC, TEC, EMC, RICH, TOF)



衝突イベントの選別



- 重イオン衝突では衝突のジオメトリーを決定することが必須。
- ビームカウンター (BBC) の荷電粒子数とゼロ度方向カロリメータ (ZDC) の中性子がおとしたエネルギー相関によって中心衝突度を測定。

ハドロンの粒子識別

電磁カロリメータによる π^0, η 中間子の識別

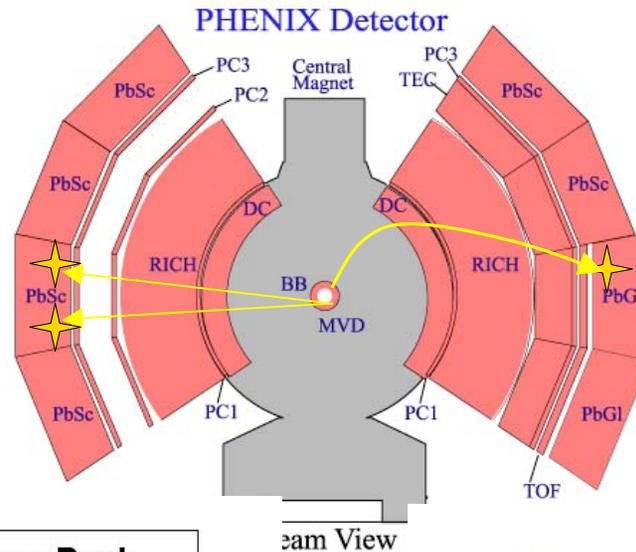
via $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ($1 < p_T < 10 \text{ GeV}/c$)

6 lead- Scintillator (PbSc) sectors

2 lead- glass (PbGl) sectors

$\Delta\phi = \pi$

$\Delta\eta = 0.7$



飛行時間測定器による 荷電粒子識別

(DCH+PC1+TOF+BBC)

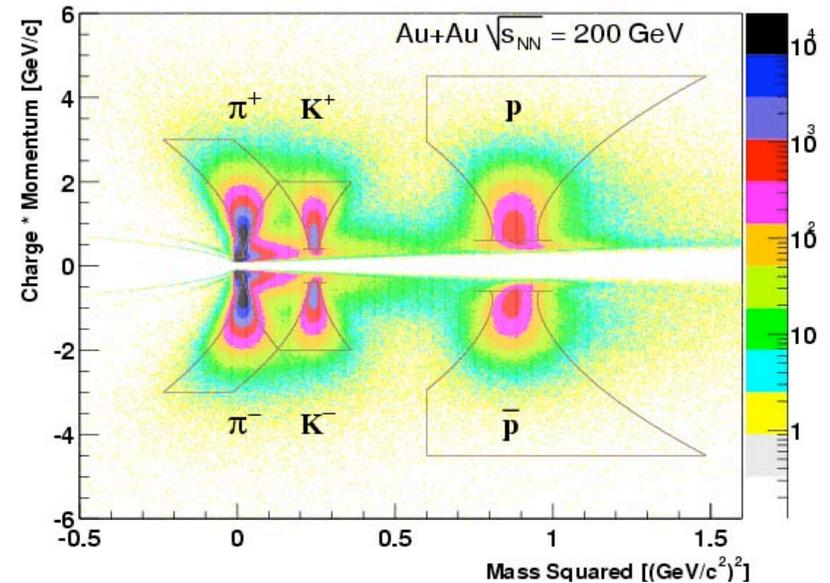
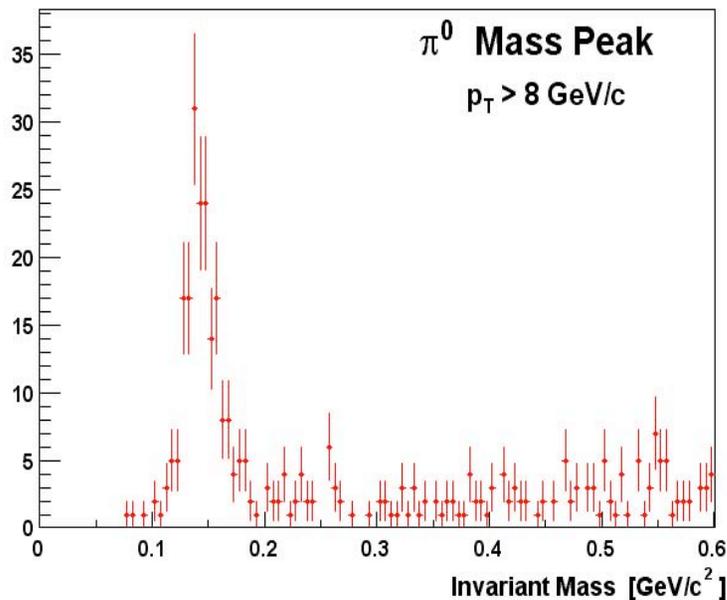
$\pi/K < 2 \text{ GeV}/c, K/p < 4 \text{ GeV}/c$

$\Delta\phi = \pi/8$

飛行時間分解能: $\sim 115 \text{ ps}$

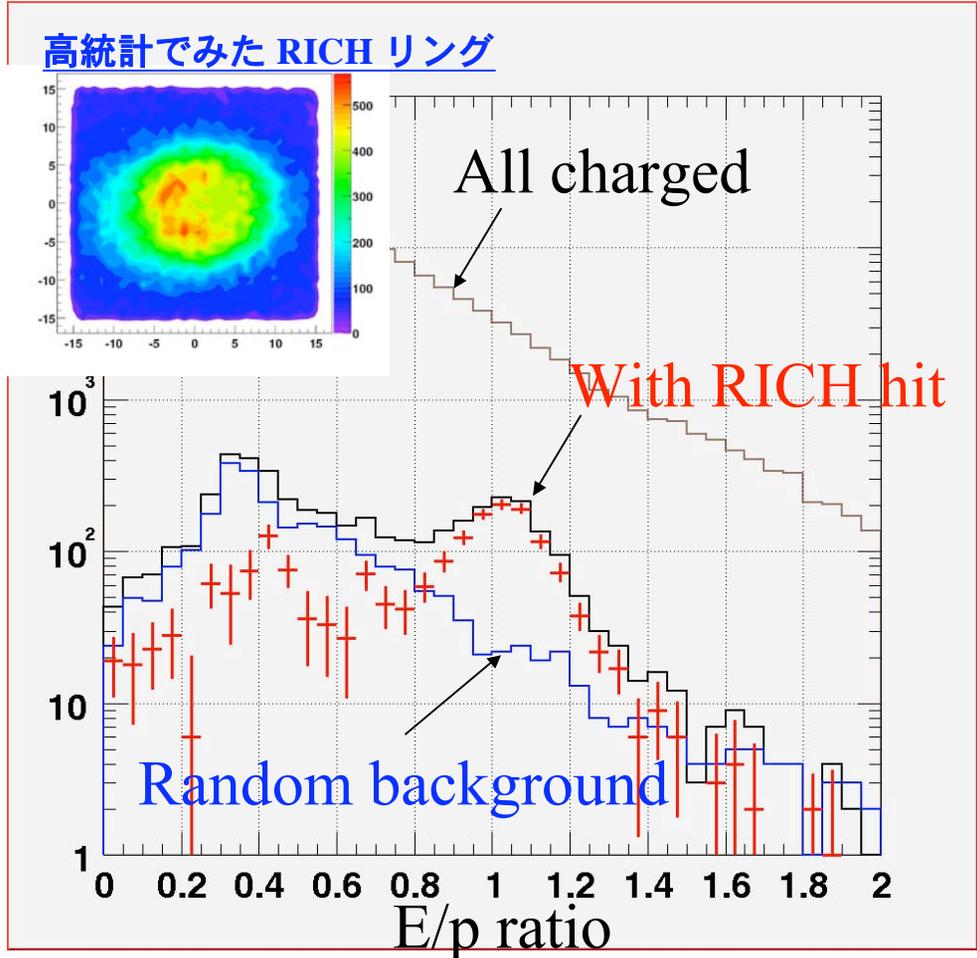
運動量分解能:

$\delta p/p \approx 0.7\% \oplus 1.0\% \times p \text{ (GeV}/c)$

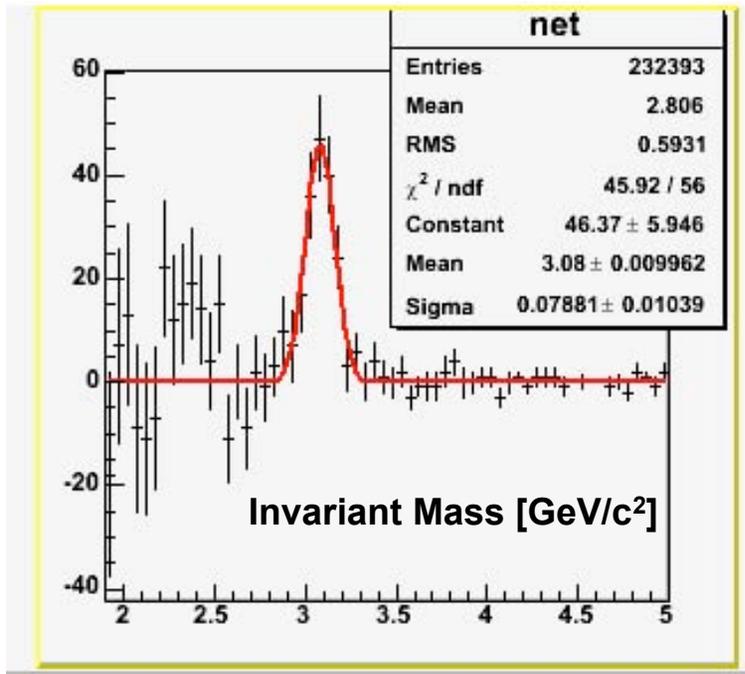


電子の識別

0.8GeV < p < 0.9GeV



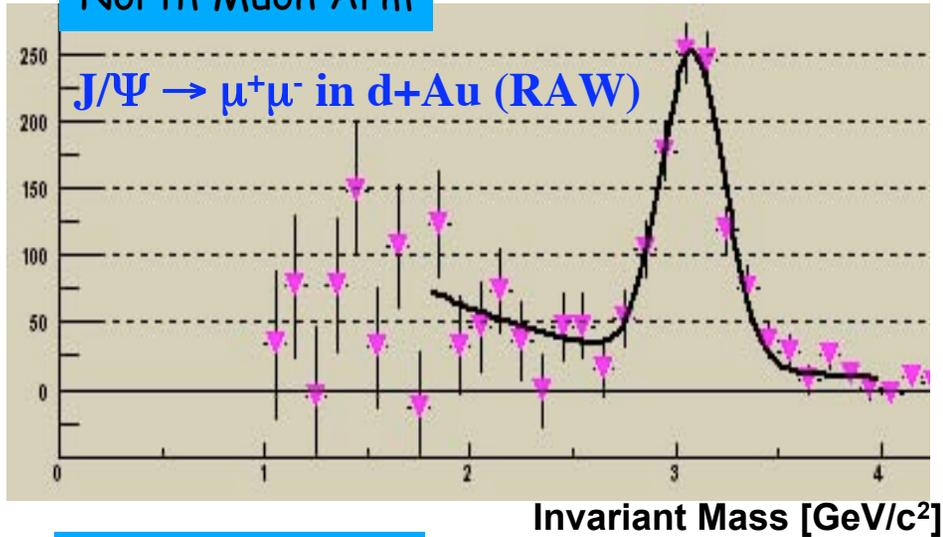
J/Ψ → e⁺e⁻ in d+Au (RAW)



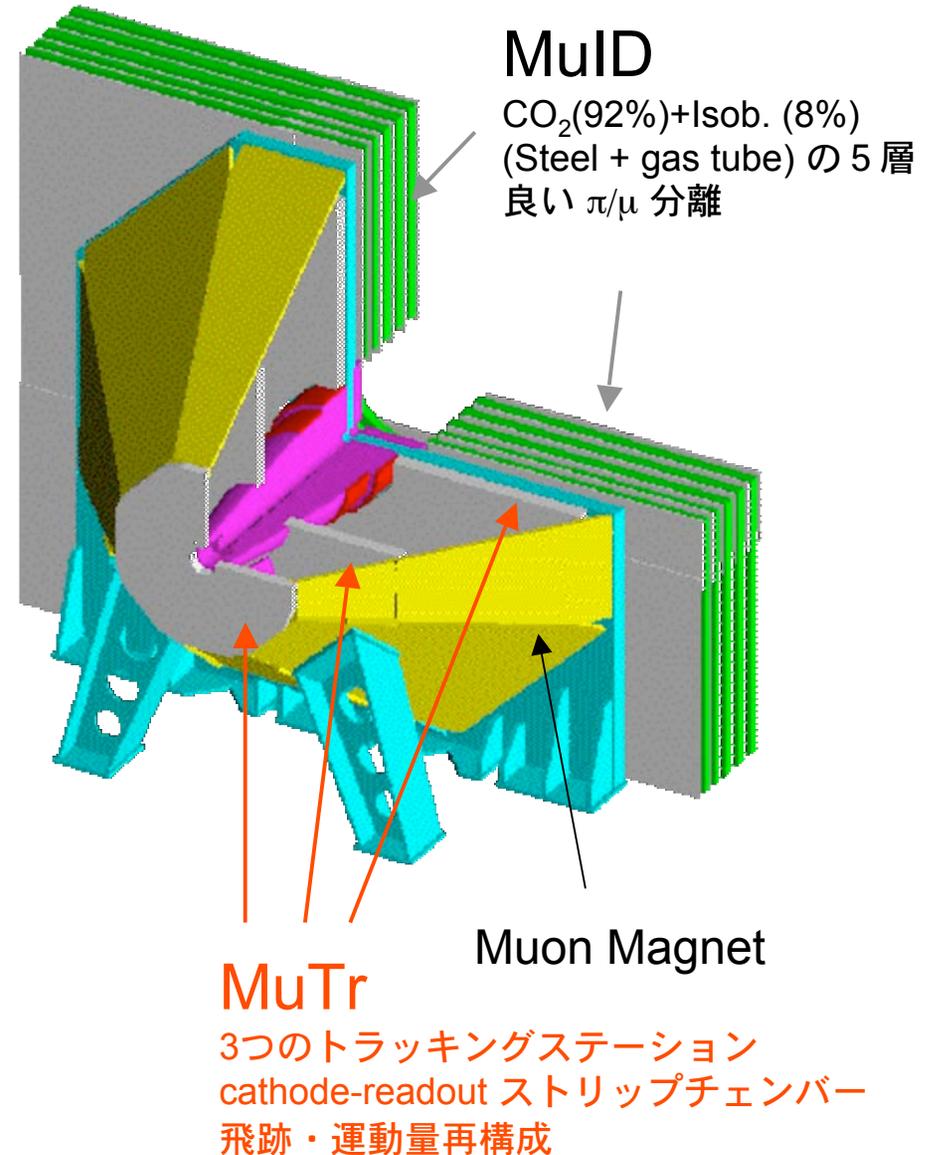
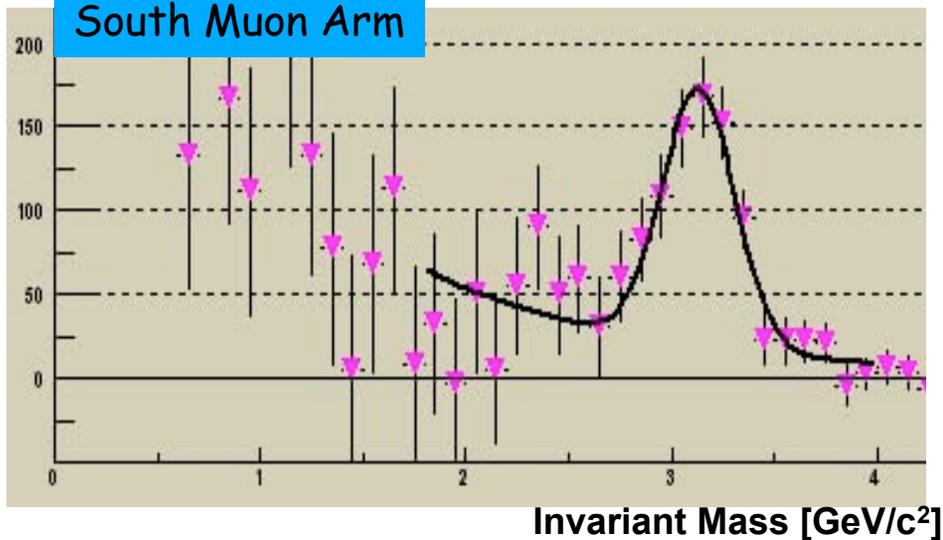
- ガス : CO₂
- e-ID p_T range : 0.2 ~ 4.9 GeV/c
- RICH と EMC を用いて 電子識別 (RICHのヒット、E/p カットを要求)。

ミュオンアームで見た J/ψ

North Muon Arm



South Muon Arm



これまでにわかったことのハイライト (ハドロン物理より)

RHIC でのエネルギー密度は十分？

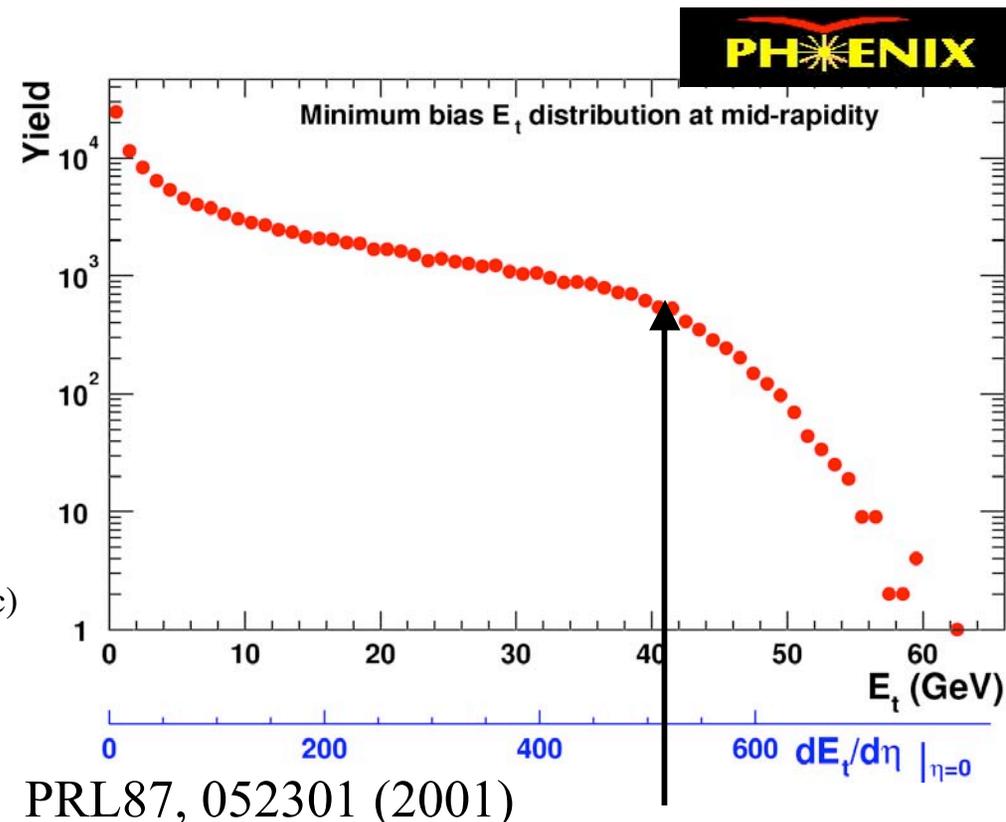
Bjorken Formula:

$$\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{c\tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

$$\approx 4.6 \text{ GeV/fm}^3$$

$$> \varepsilon_c \approx 0.6 - 1.2 \text{ GeV/fm}^3$$

* τ_0 : Effective thermalization time (0.2 - 1.0 fm/c)



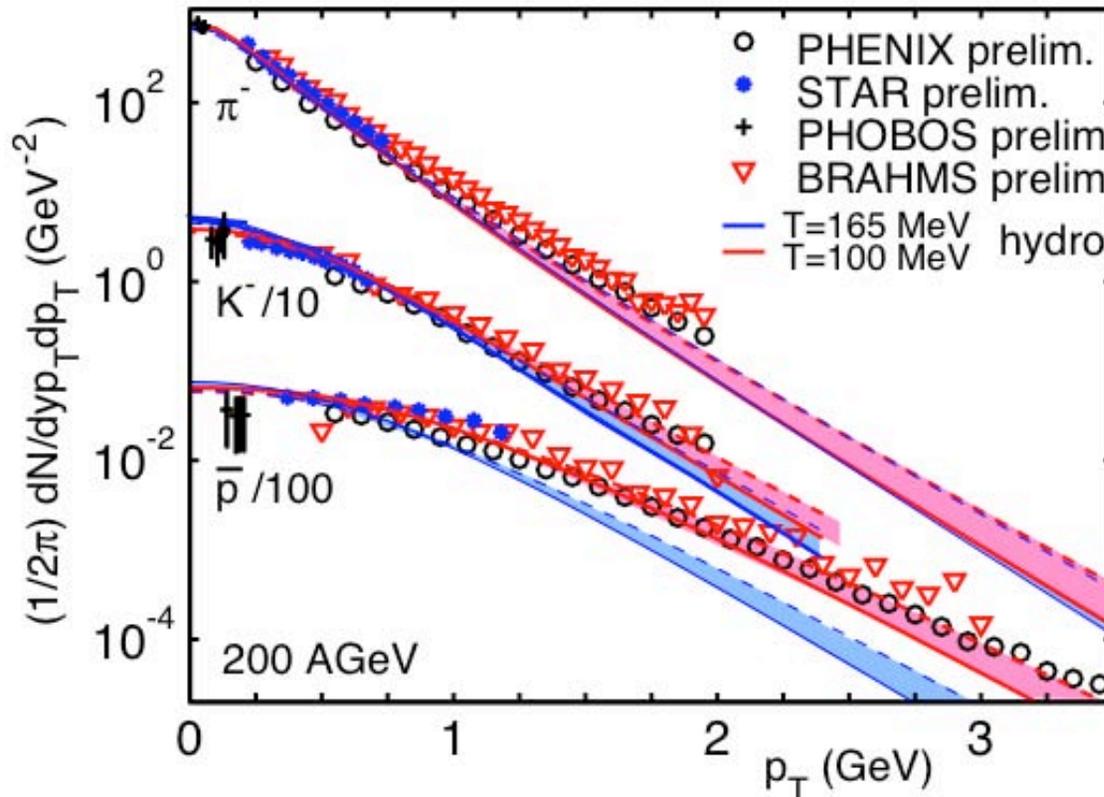
→ $\varepsilon \geq 4.6 \text{ GeV/fm}^3$ (130 GeV Au+Au)

5.5 GeV/fm^3 (200 GeV Au+Au)

相転移を起こすのに十分なエネルギー密度！

横運動量分布と流体力学計算

Data: PHENIX: NPA715(03)151; STAR: NPA715(03)458; PHOBOS: NPA715(03)510; BRAHMS: NPA715(03)478
 Hydro-calculations including chemical potentials: P.Kolb and R. Rapp, Phys. Rev. C 67 (03) 044903



* Note: all data points are preliminary results (QM02).

横運動量(p_T)分布：
 終状態における系の運動学的な温度や膨張をみるのに有効。(e.g. ボルツマン分布)

流体計算との比較：
 (初期条件)
 QGPタイプの状態方程式
 衝突初期の圧力が非常に高い
 ハドロン相へ急激に転移 (~10 fm/c)

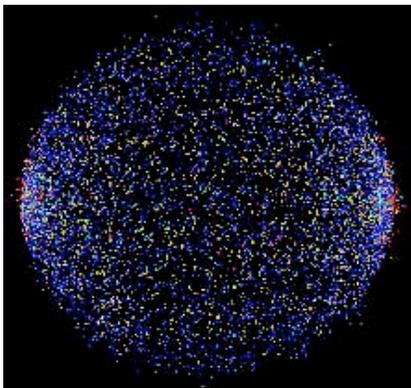
QGPを仮定した流体力学計算は $p_T < 2 \text{ GeV}/c$ 以下のすべての粒子の p_T 分布をよく記述する。

粒子比からわかる相図

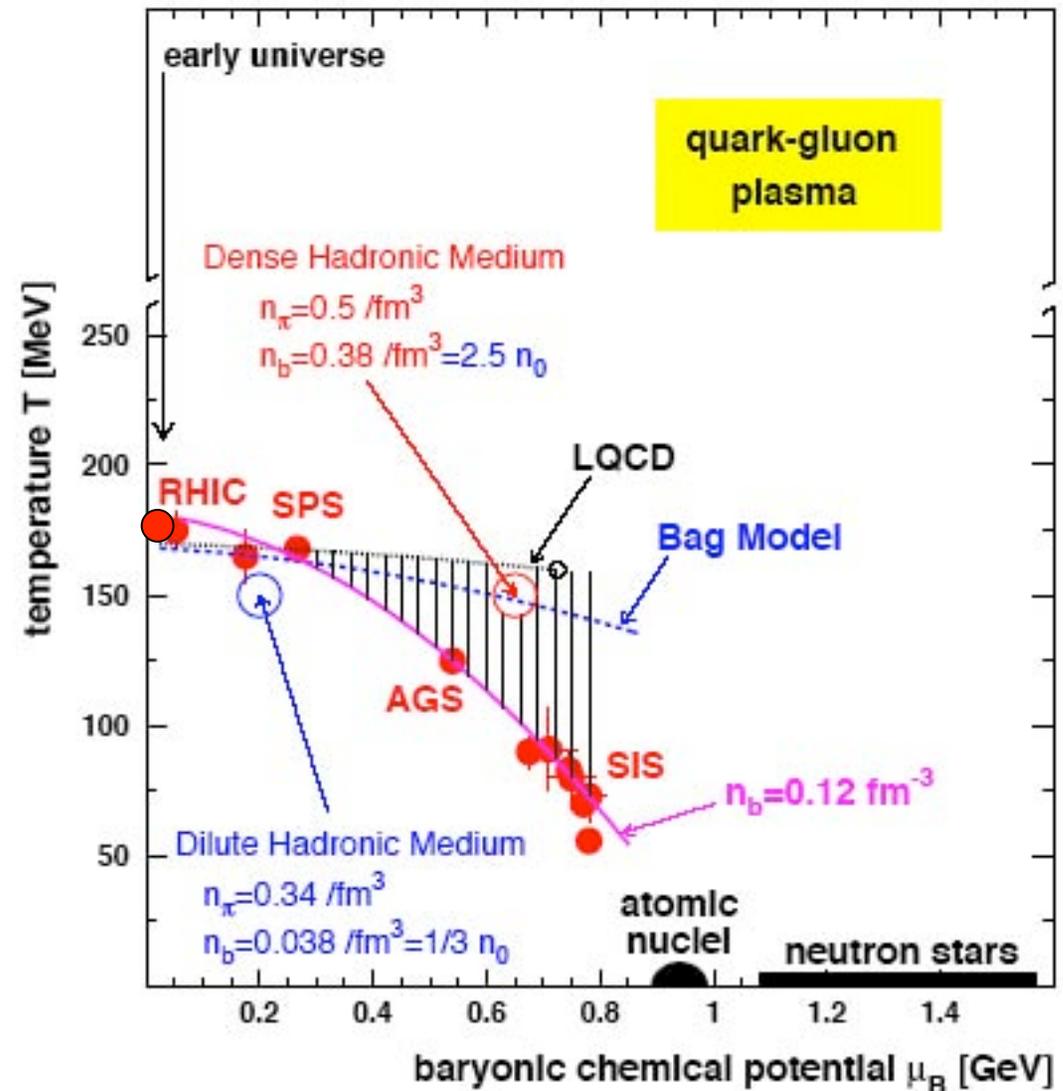
•統計的熱力学モデル

$$\rho_i = \frac{g_i}{2\pi} \int \frac{p^2 dp}{\exp(E_i - \mu_i/T_{ch}) \pm 1}$$

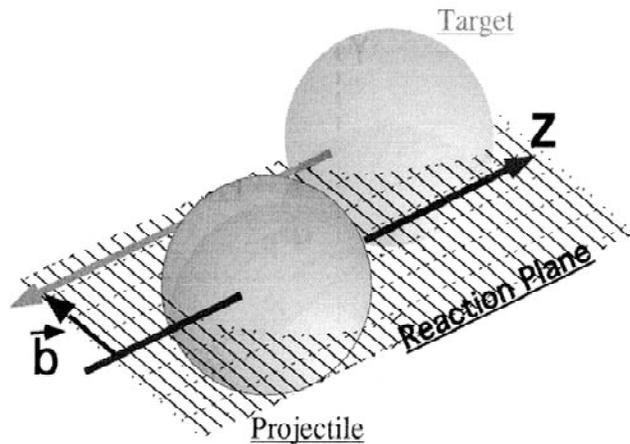
• RHIC と SPS のデータは格子QCDの phase boundary と非常に近い



PBM, J. Stachel, nucl-th/0112051, J. Phys. G28, 1971 (2002)



衝突初期の情報に迫る



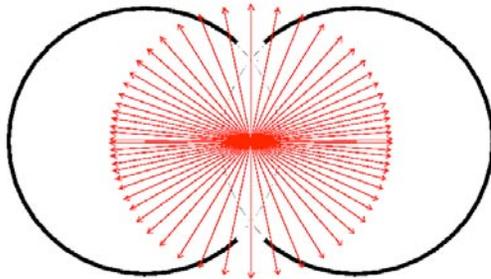
金原子核同士の非中心衝突に着目!

利点:

空間的非等方性は衝突時のジオメトリーで決まるため、衝突初期の情報（圧力勾配、状態方程式など）を含む。

実験手法:

実験的に反応平面を決定し、その平面に対する発生粒子の方位角分布を測定。



反応平面内で圧力勾配より高いため平面内でより多くの粒子が発生。



運動量空間での非等方性: elliptic flow (v_2)

$$\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2v_2 \cos 2(\phi - \Psi_R)$$

クォークレベルでの集団運動？

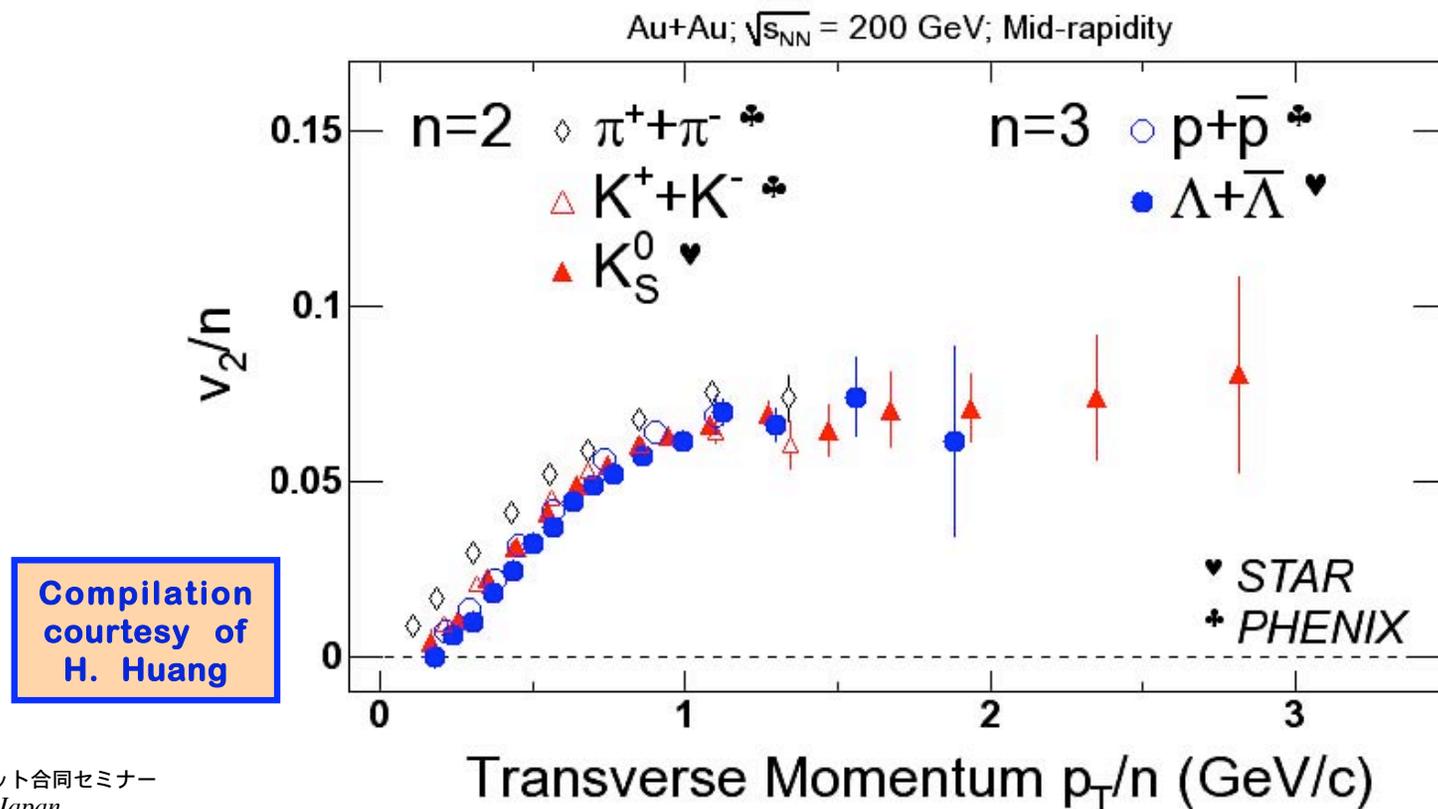
測定したElliptic flow (v_2) を p_T の関数としてプロット：

複雑なパターンを示し、いっけん統一性がないように見える。

(注) 流体力学計算は低い p_T 領域でよく記述。

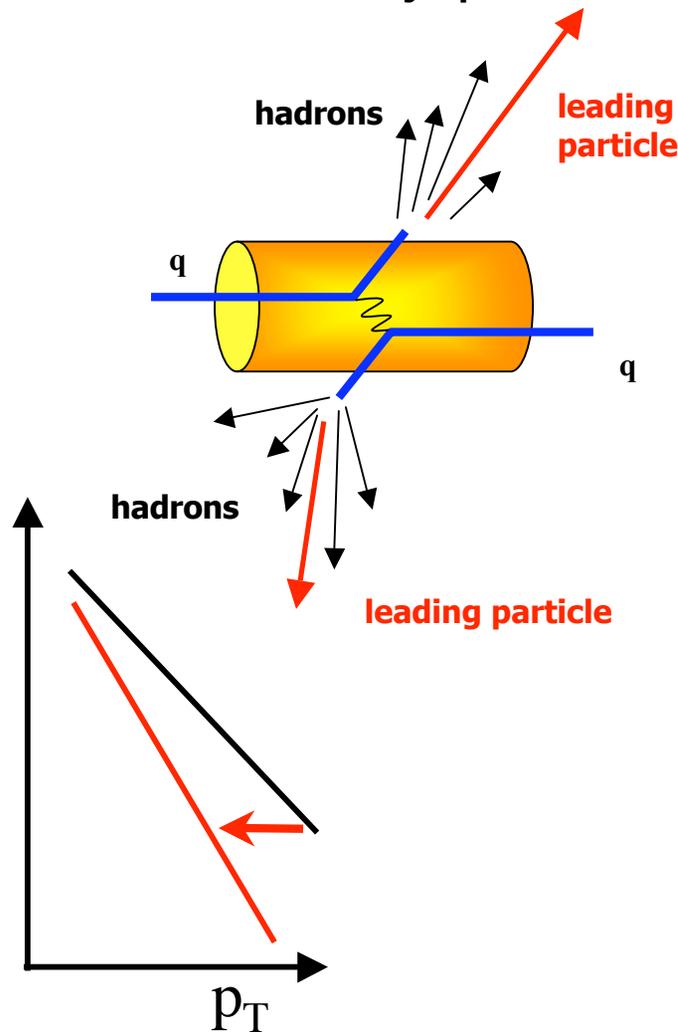
もし集団運動がクォークのレベルで成立しているとする...

$p_T \rightarrow p_T / n$, $v_2 \rightarrow v_2 / n$, $n = 2$ (中間子), 3 (重粒子)



High p_T ハドロンをプローブとして

schematic view of jet production



- なぜ “high p_T ハドロン” ?
 - High p_T ハドロンは、核子を構成するパートン同士の大きな momentum transfer によりクォークとグルーオンがフラグメントすることで作られる (ジェット生成) ので、**反応初期のパートン相のプローブとして最適**。
- もし何も媒質がなければ、high p_T ハドロンの収量は核子・核子衝突の重ね合わせで記述できるはず。
- **もし QGP が存在すれば**、パートンは媒質中でのグルーオン放射によりエネルギーを損失し、結果として high p_T のハドロン生成が抑制される (= **ジェット抑制効果**) 。

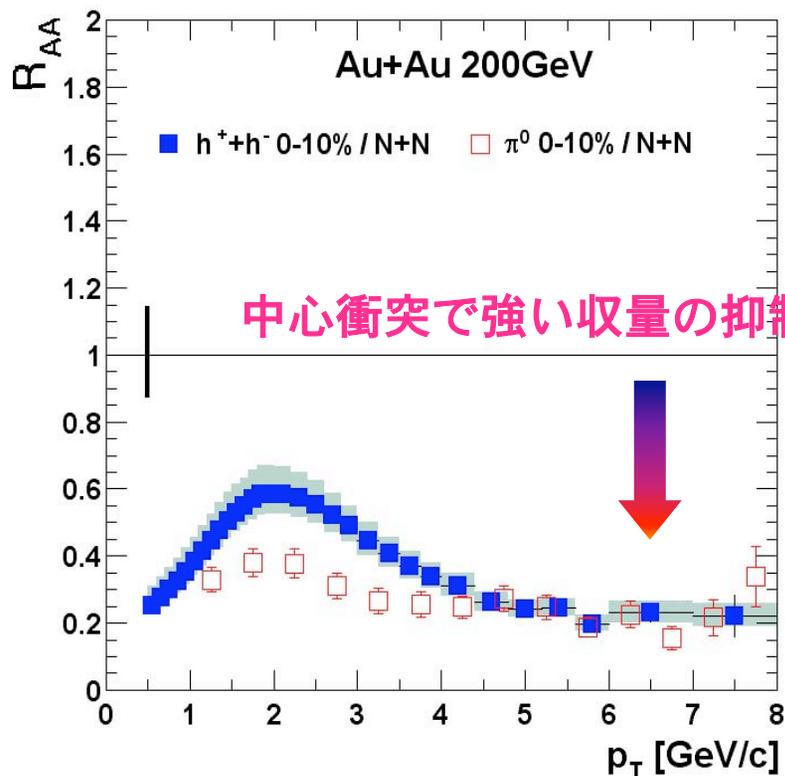
実験上の利点

- 同じ実験装置、衝突エネルギーで測定した p+p データを reference として用い、少ない系統誤差で Au+Au 衝突での媒質効果を測定できる。

π^0 と荷電ハドロン の収量抑制

$$R_{AA} = \frac{\text{Yield}_{\text{AuAu}} / \langle N_{\text{binary}} \rangle_{\text{AuAu}}}{\text{Yield}_{\text{pp}}}$$

R_{AA} : Nuclear Modification Factor
核子同士の重ね合わせだと $R_{AA} = 1$

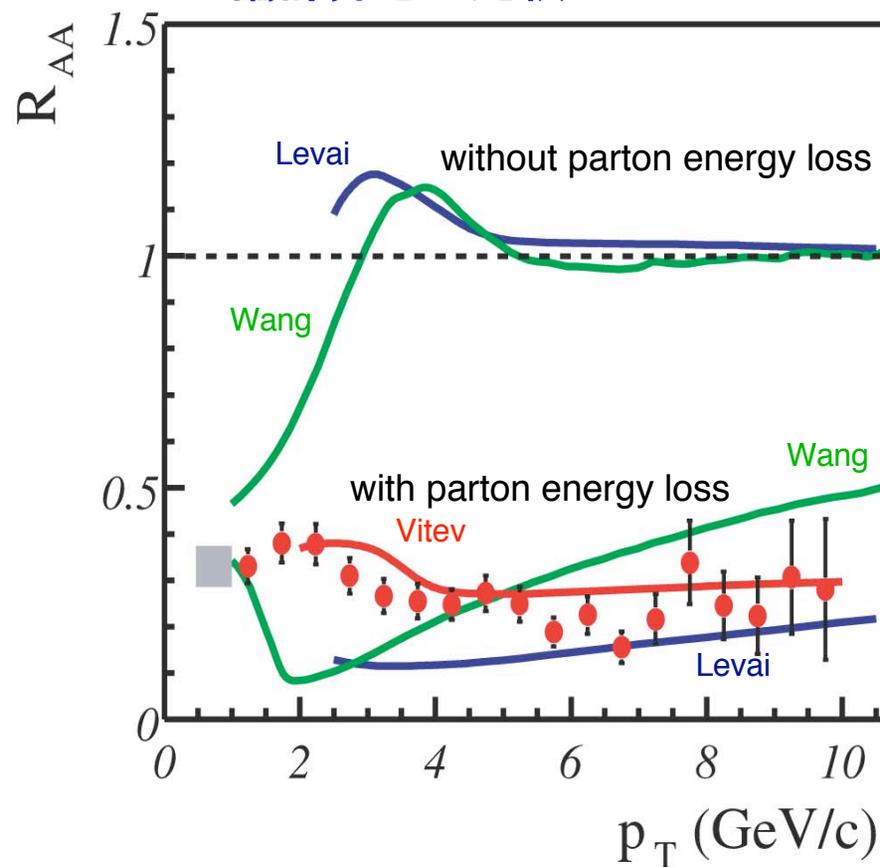


PHENIX AuAu 200 GeV

π^0 data: PRL 91, 072301 (2003), nucl-ex/0304022.

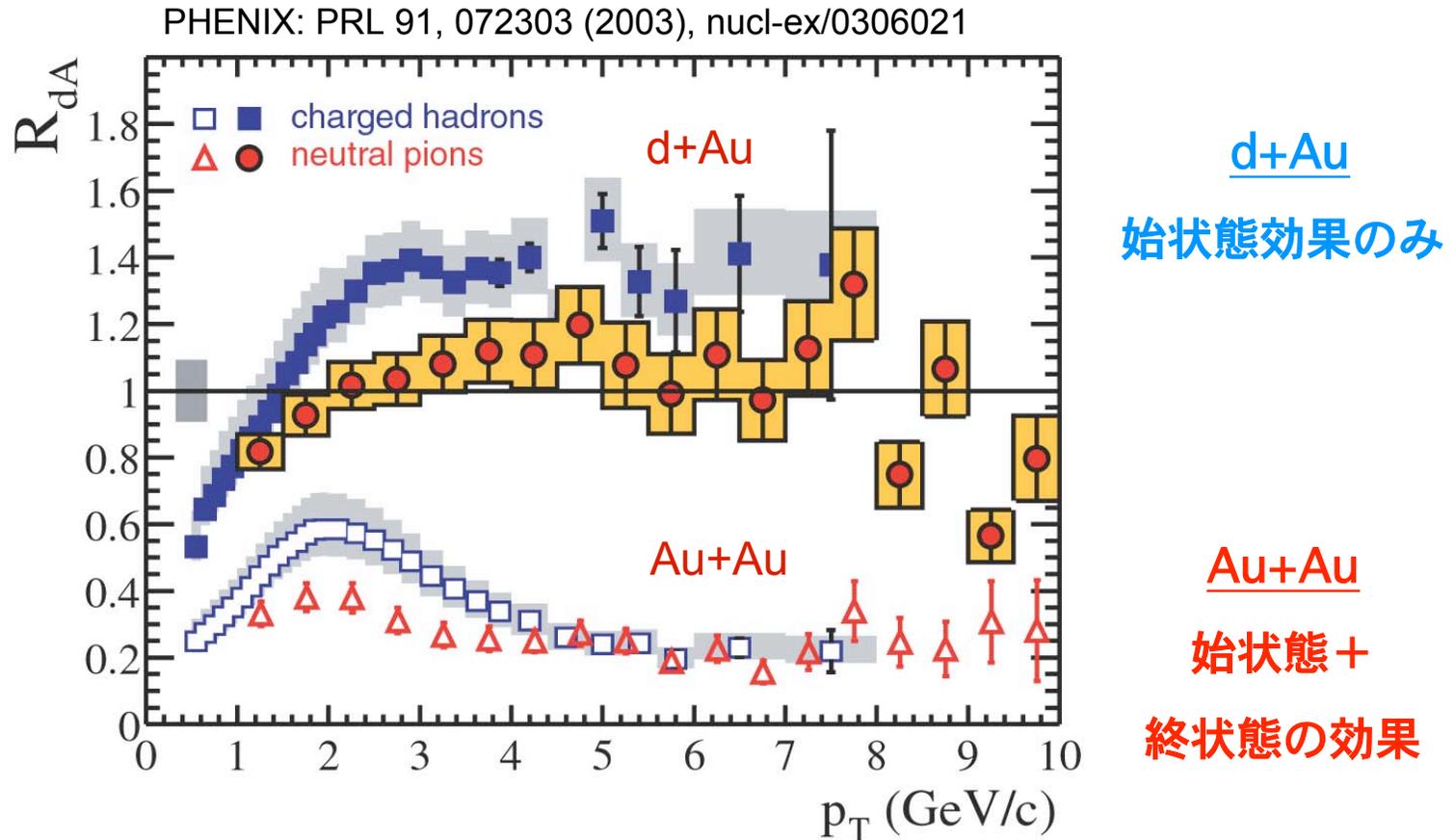
charged hadron: submitted PRC, nucl-ex/0308006.

理論計算との比較



Au+Au $\rightarrow \pi^0 + X$ at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

最近の d+Au 実験でわかったこと



- **d+Au ではハドロン**の収量抑制効果はみられず！
- 従ってAu+Au 中心衝突で見られた大きな収量の抑制は QGP 生成などの終状態の効果によるものと考えられる。

まとめと今後の展望

- これまでのデータ収集・解析により、RHICにおける金原子核中心衝突でQGP生成を示唆する興味深いデータが示されている。

さらなるQGP生成の確証をつかむために

1. 閉じ込めに敏感なプローブを用いる。
 - J/Ψ & Ψ' (c-cbar の束縛状態) の収量の変化
 2. 電磁相互作用のみをプローブとして、反応初期の情報をみる。
 - 光子、電子、ミューオンの精密測定
- 今年の12月から高統計 Au+Au 物理ラン (J/Ψ ラン) を開始予定。エネルギースキャンや軽イオン衝突などの系統的測定も計画中。