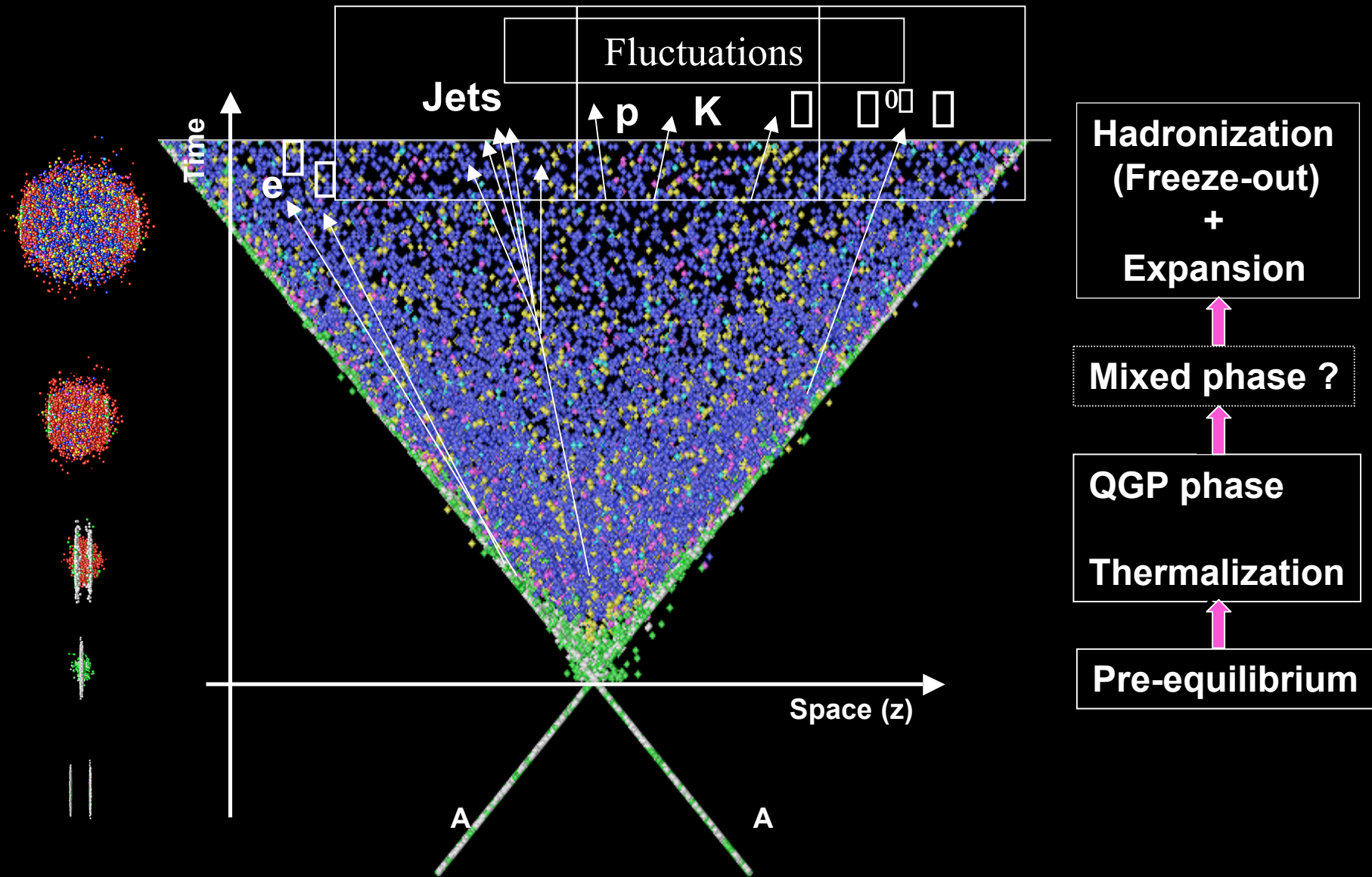


観測量 と 証拠

Space-time Evolution of A+A collision



Hadrons reflect the bulk property of collision system and its evolution. Jets carry information at the early stage of the evolution.

主な観測量と証拠

時間 (fm)	~0	~1	~5	数10	
温度 (MeV)		250	150	150	110
状態	前平衡	---QGP--	--混合相-	- ハドロン相-	

	初期エネルギー密度	----- バリオン分布、 dE_T/dy , dN/dy -----
	初期バリオン密度 化学平衡	--粒子比：ストレンジネス, 粒子/反粒子--
	熱平衡	----- 粒子スペクトル、フロー -----
Jet Quenching	-- Jet 生成 \rightarrow energy loss -- Jet の測定、leading baron の測定	
J/ \square Suppression	----- 生成 \rightarrow Debye screening + absorption -- J/ \square の収量；衝突の中心度依存性、質量依存性	
Chiral transition	----- vector meson (ρ, ω, ϕ) \rightarrow lepton-pair	
Charm/bottom	-- initial+thermal(?) --	

系の初期条件

初期エネルギー密度、初期バリオン密度

- 初期エネルギー密度
 - $dE_T/dy, dN/dy \rightarrow$ 推定
 - Bjorken's formula (scaling 領域で)
 - カスケード計算
- バリオン密度
 - dN_B/dy

$dN/dy, dE_T/dy$

と

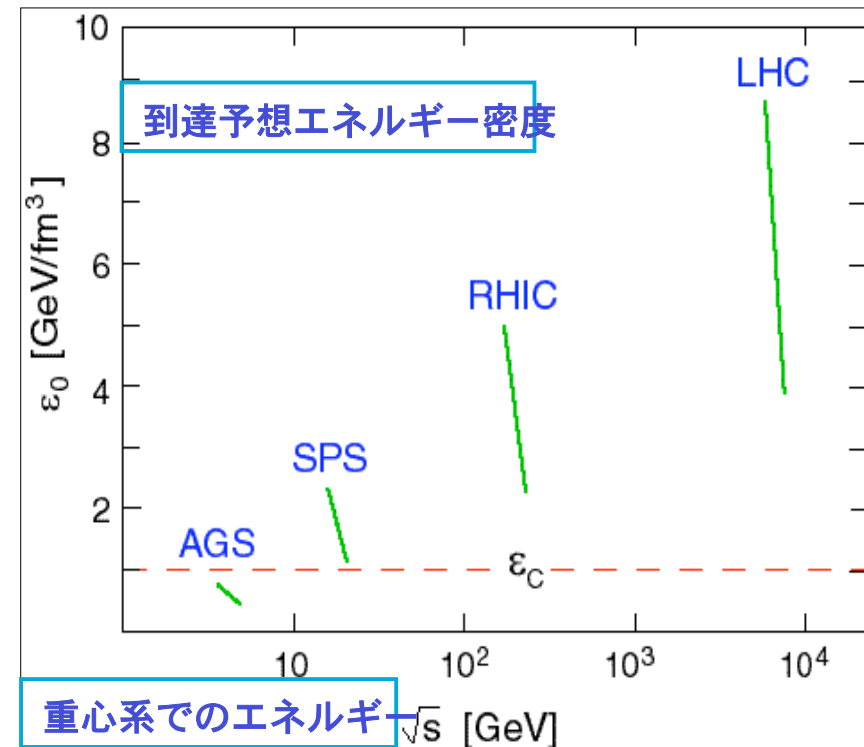
初期エネルギー密度

初期エネルギー密度

$$\rho_0 = 0.11 A^{-2/3} \ln[\sqrt{s} / 2m_p]$$

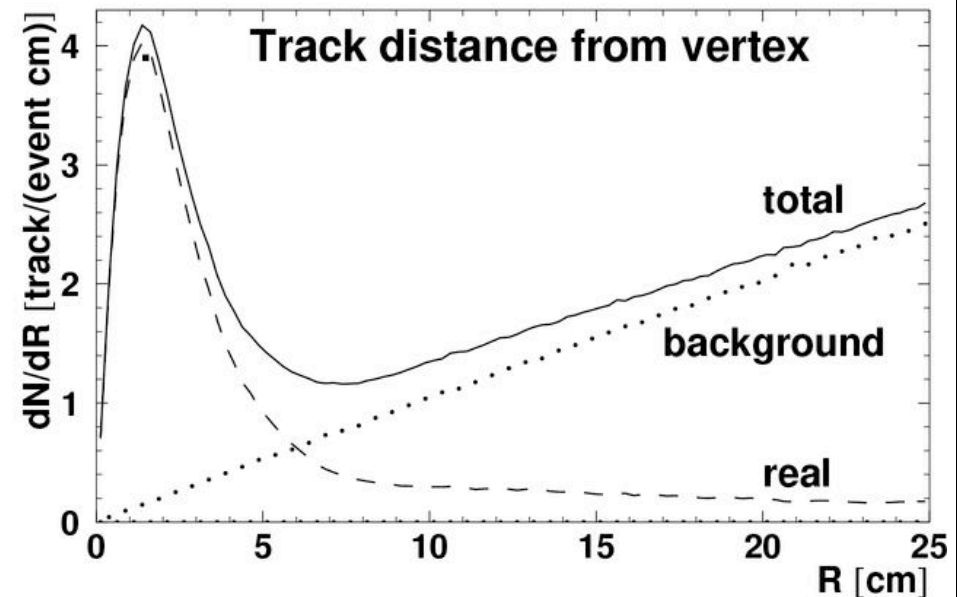
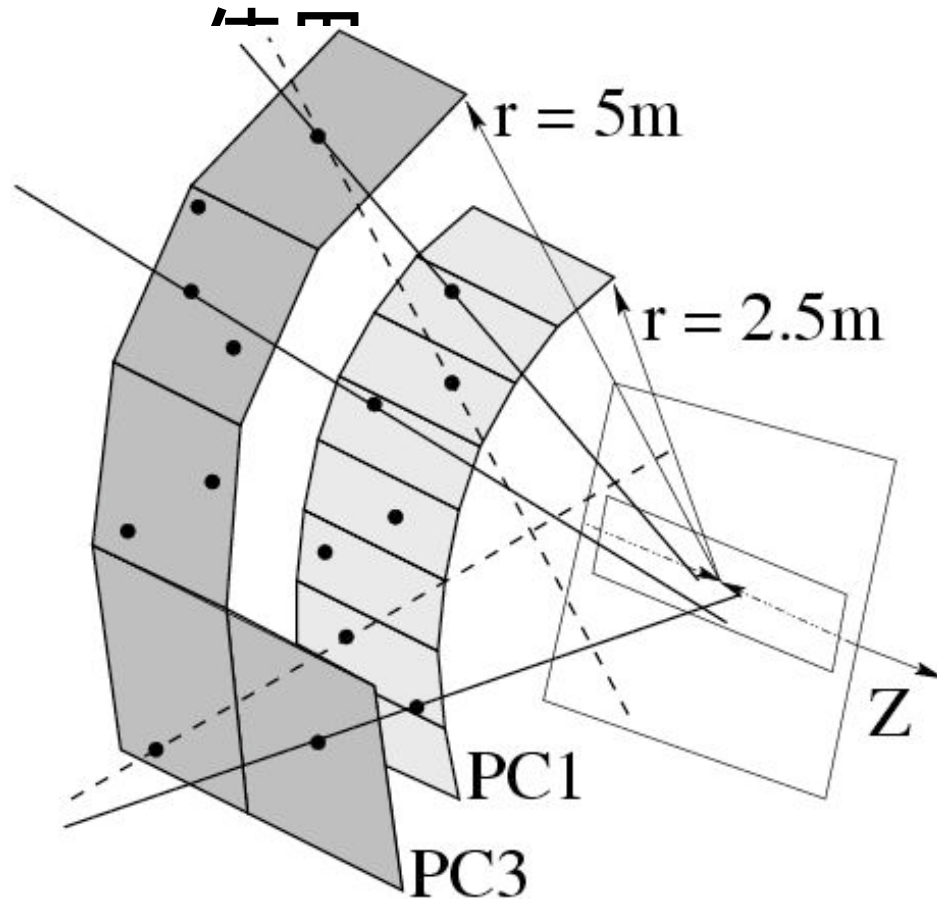
高いエネルギーでの衝突 = 高い初期エネルギー密度

- QGP実現の可能性
 - RHIC、LHCでは大きなマージン
- QGP状態の持続時間
- 取り扱いがシンプル
 - 粒子密度が大
 - 平均自由行程小
 - より理想的に近い流体
 - 熱力学的平衡
 - 化学平衡



粒子多重度の測定 (PHENIX)

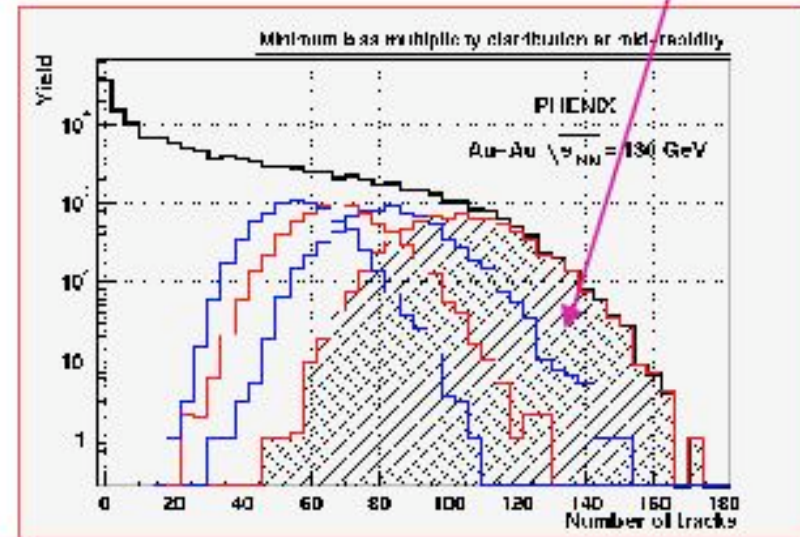
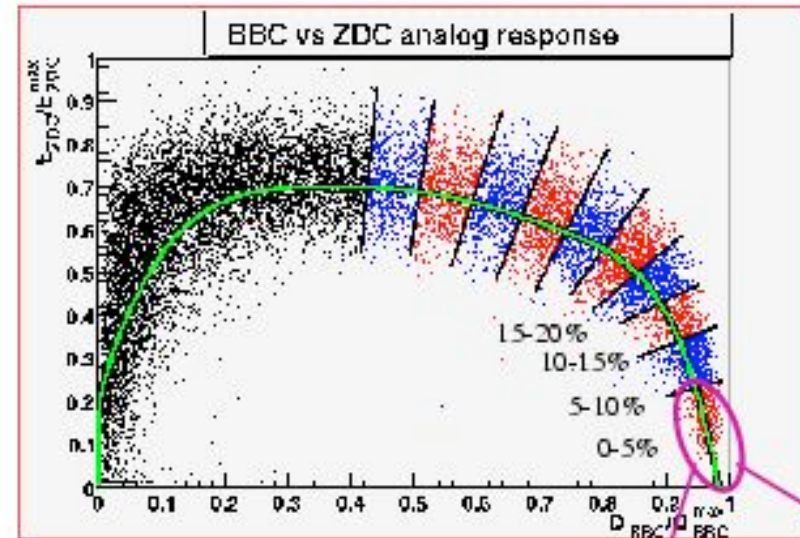
- 中央アームの二つのパッドチェンバーを



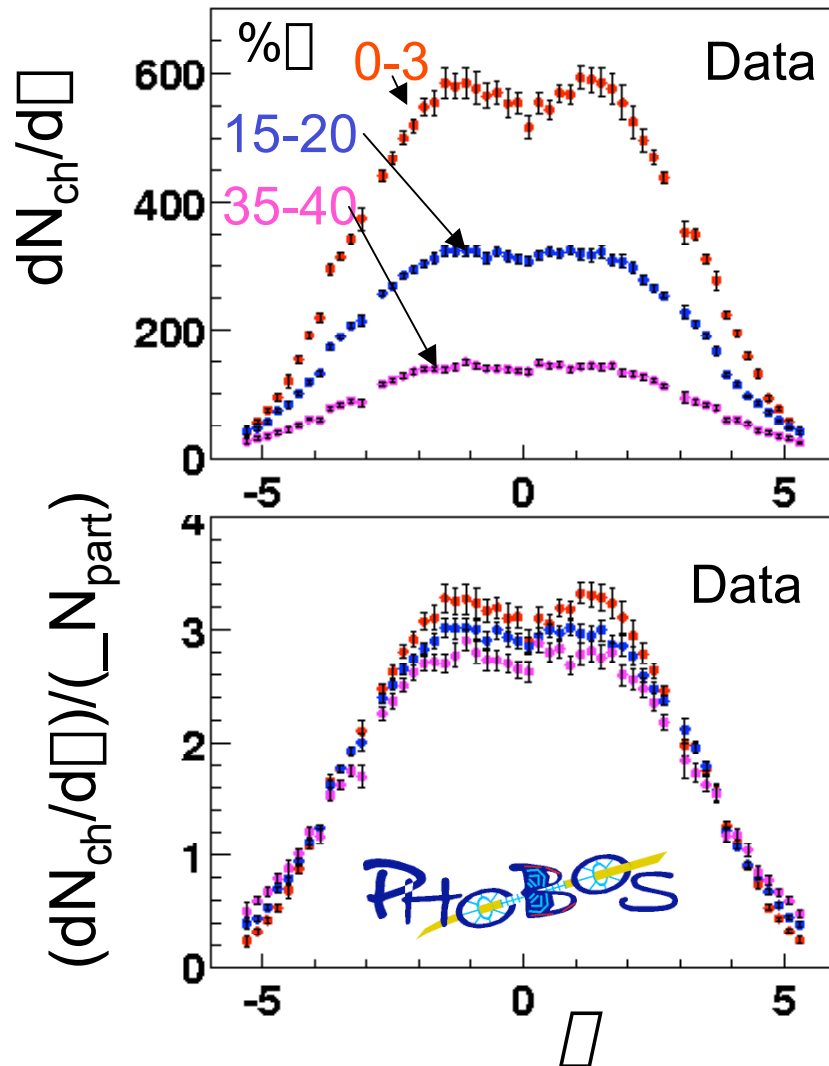
Background は、間違った
ヒットとの組み合わせの為
- combinatorial background

荷電粒子多重度

- $dN_{ch}/d\eta \sim 609 \pm 1 \pm 37$
 - 中心衝突 0-5%
 - Au+Au
 - $E_{NN} = 130$ GeV
- $dN_{ch}/d\eta \sim 410$
 - 中心衝突 0-5%
 - P b + P b
 - $E_{NN} = 17.2$ GeV



pseudo-rapidity distributions



- PHOBOS has really fantastic η coverage
- when wounded nucleon model is divided out, there is still an increase at mid-rapidity
- evidence for some relative decrease in $dN_{ch}/d\eta$ at high η

Systematic error $\pm(10\%-20\%)$

粒子多重度

Au+Au@RHIC

$dN_{ch}/d\eta \sim 609 \pm 1 \pm 37$

- 中心衝突 0-5%
- $E_{NN} = 130$ GeV

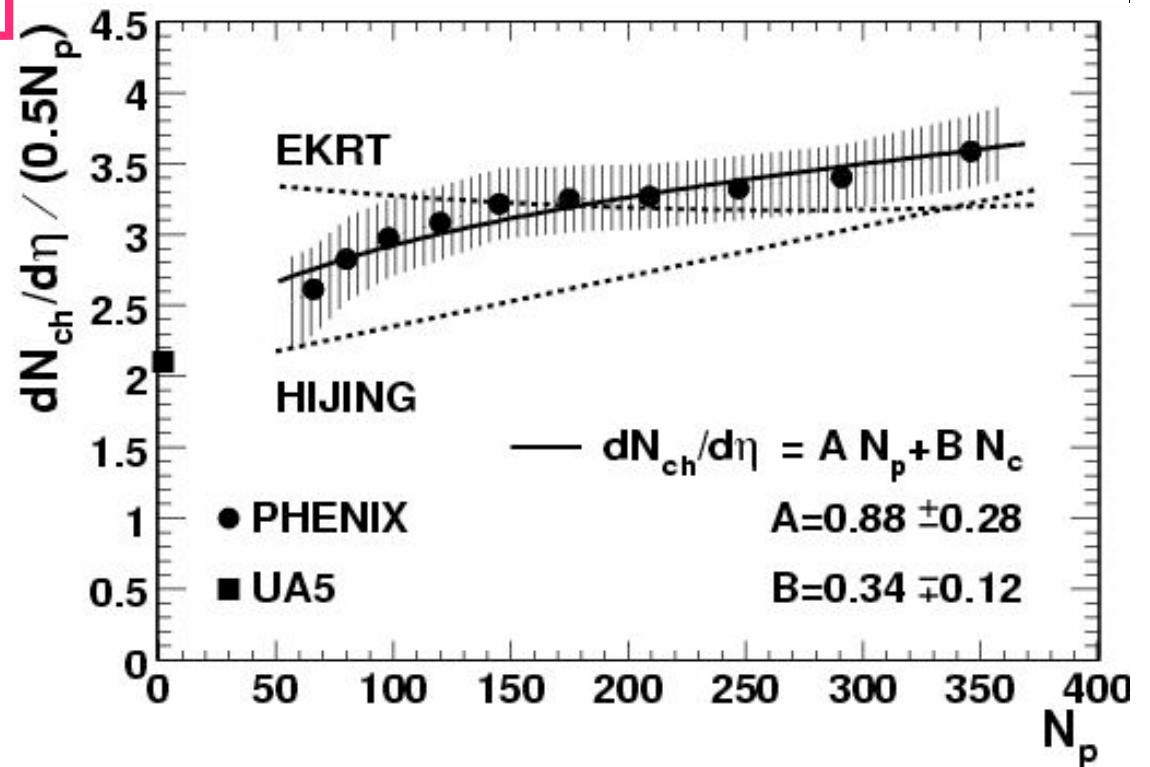
Pb+Pb@CERN-SPS

$dN_{ch}/d\eta \sim 410$

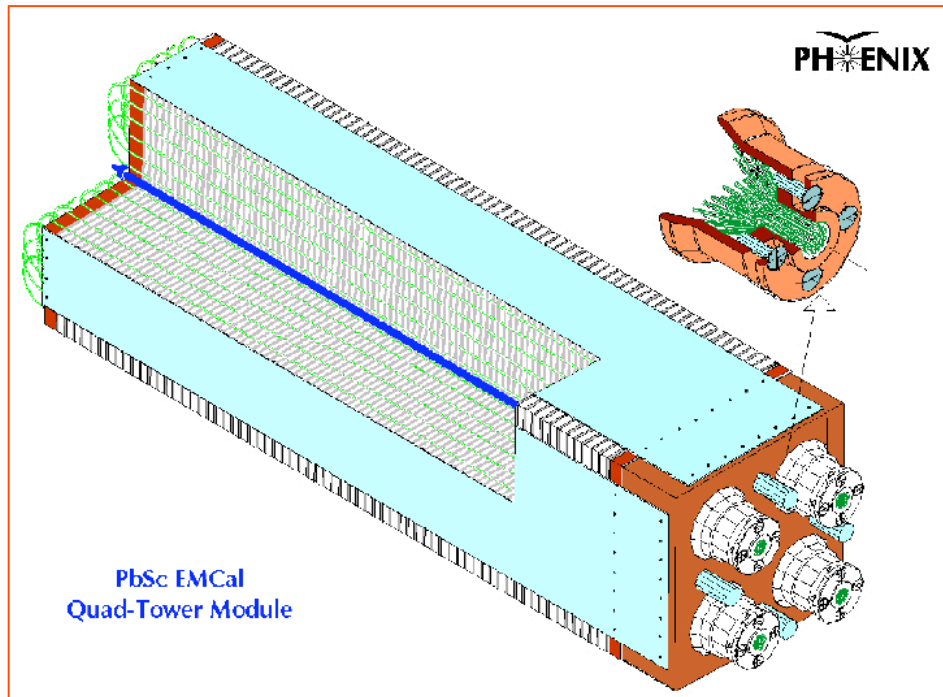
- 中心衝突 0-5%
- $E_{NN} = 17.2$ GeV

$$dN/d\eta = A N_{part} + B N_{coll}$$

Hard processes increase with centrality (30% mid-central to ~50% most central)



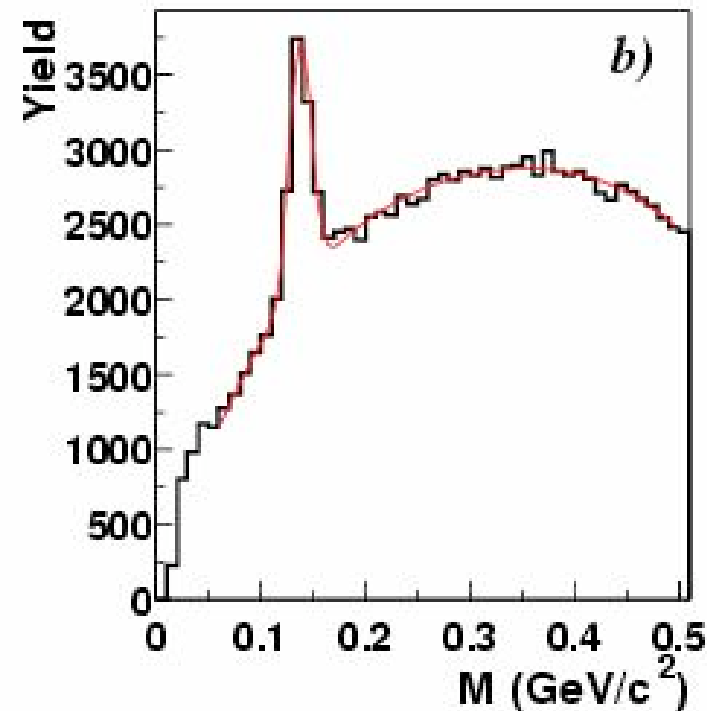
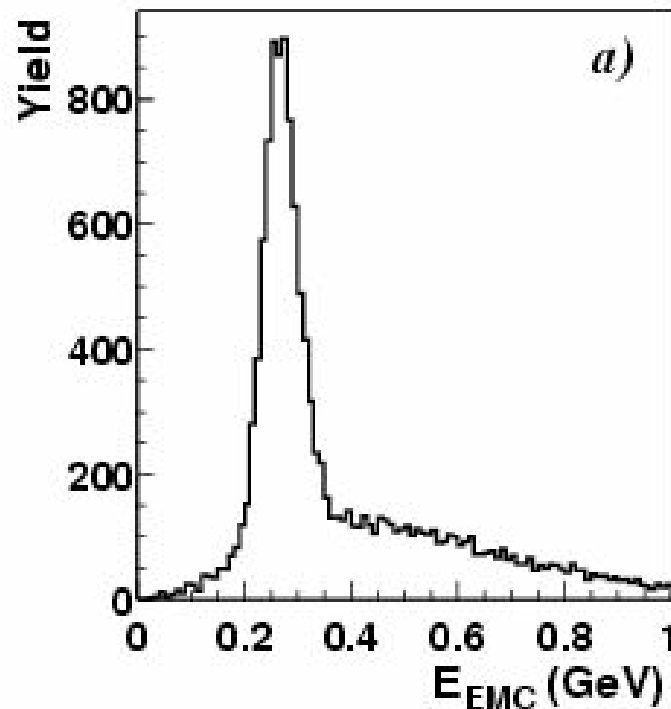
PbSc Calorimeter



	PbSc
Size(cm x cm)	5.52 x 5.52
Depth(cm)	37.5
Number of towers	15552
Sampling fraction	~ 20%
□ cov.	0.7
□ cov.	90+45deg
□ /mod	0.011
□ /mod	0.011
X_0	18
Molère Radius	~ 3cm

EMCal の性能

- 1 GeV/c のパイオンに対するレスポンス
 - MIP + 反応によるテール
- 二本の γ 線から π^0 の再構成

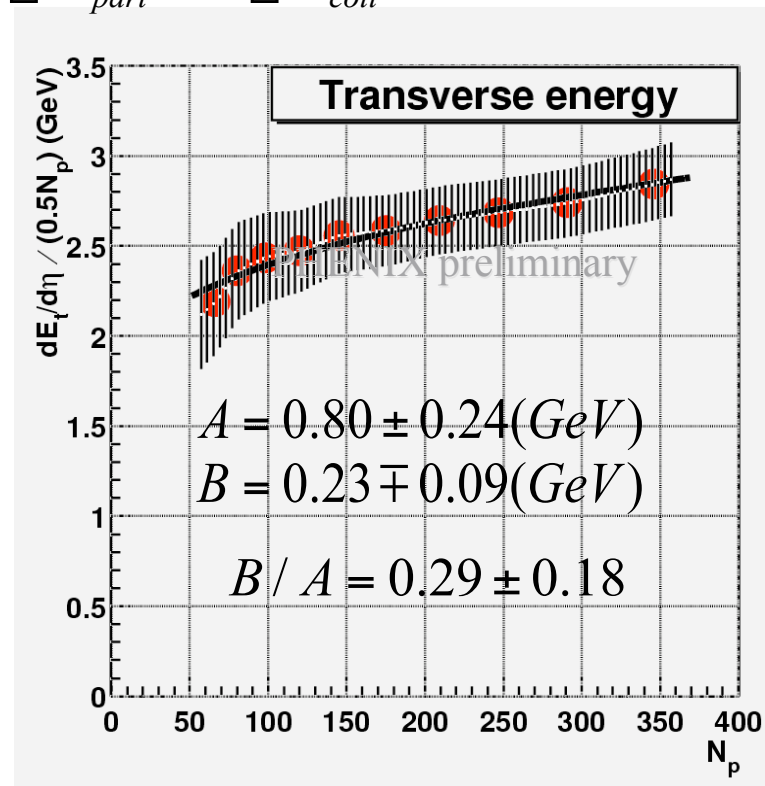
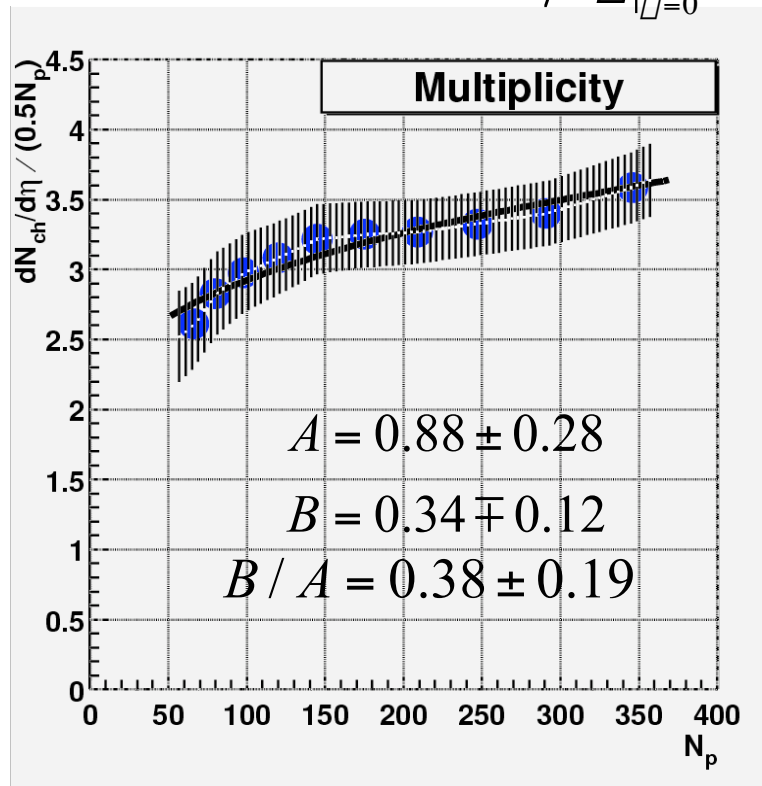


$dN_{CH}/d\Delta$ と $dE_T/d\Delta$

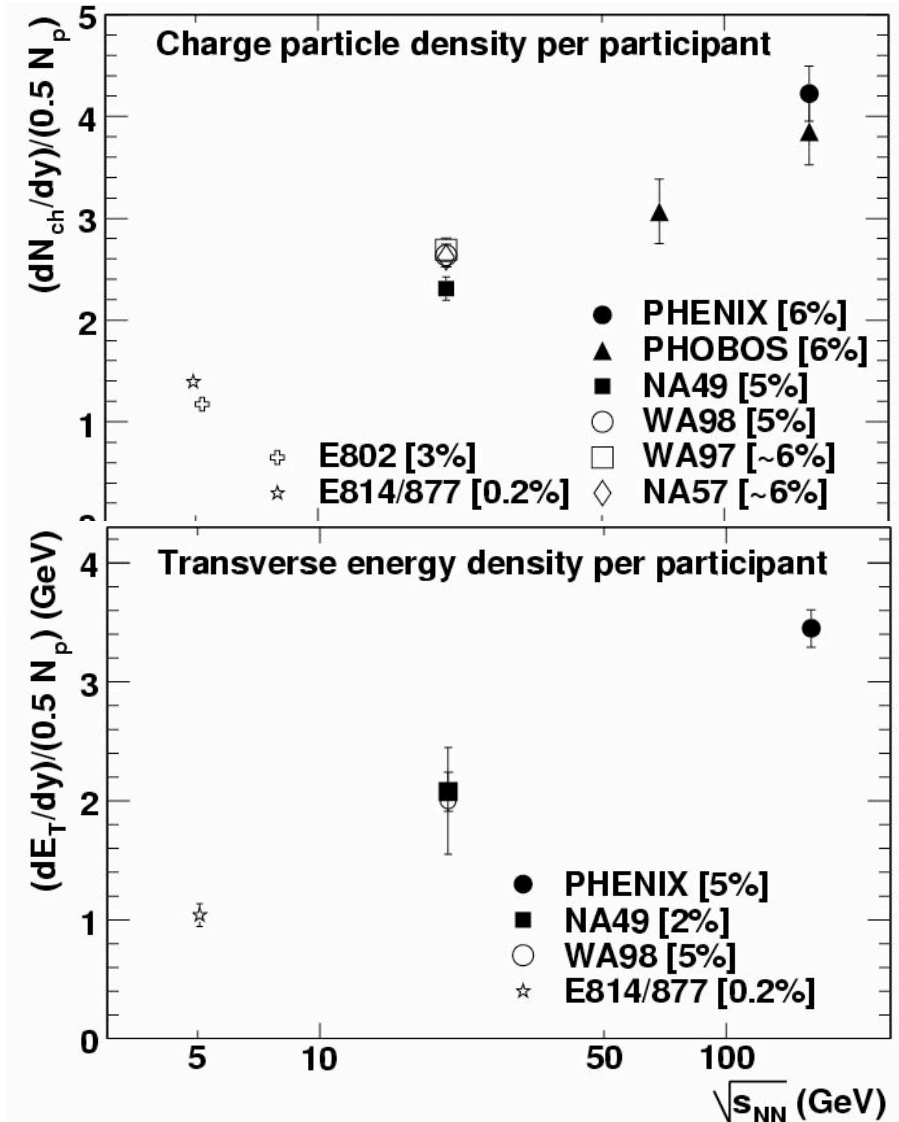


- 良く似た振る舞い
- 収量は N_p (number of participants) よりも急速に増加
→ N_{coll} (number of binary collisions) に比例した項
- ハードプロセスの割合は、centrality とともに増加
(30% in mid-central から ~50% in most central)

$$dX/d\Delta|_{\Delta=0} = A \Delta N_{part} + B \Delta N_{coll}$$

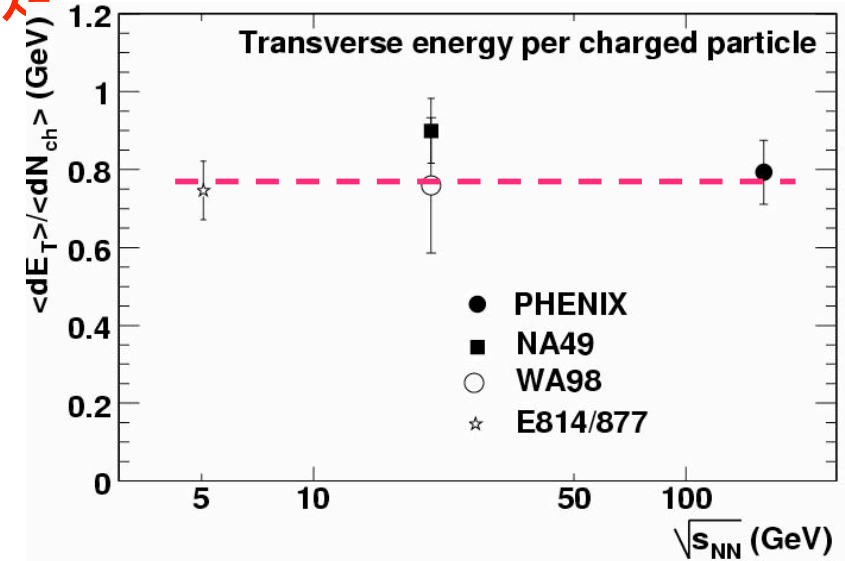


CMSエネルギー依存性



- $dN_{ch}/d\eta$ と $dE_T/d\eta$: 良く似たエネルギー依存性

- 粒子辺りのエネルギーは一定



初期エネルギー密度

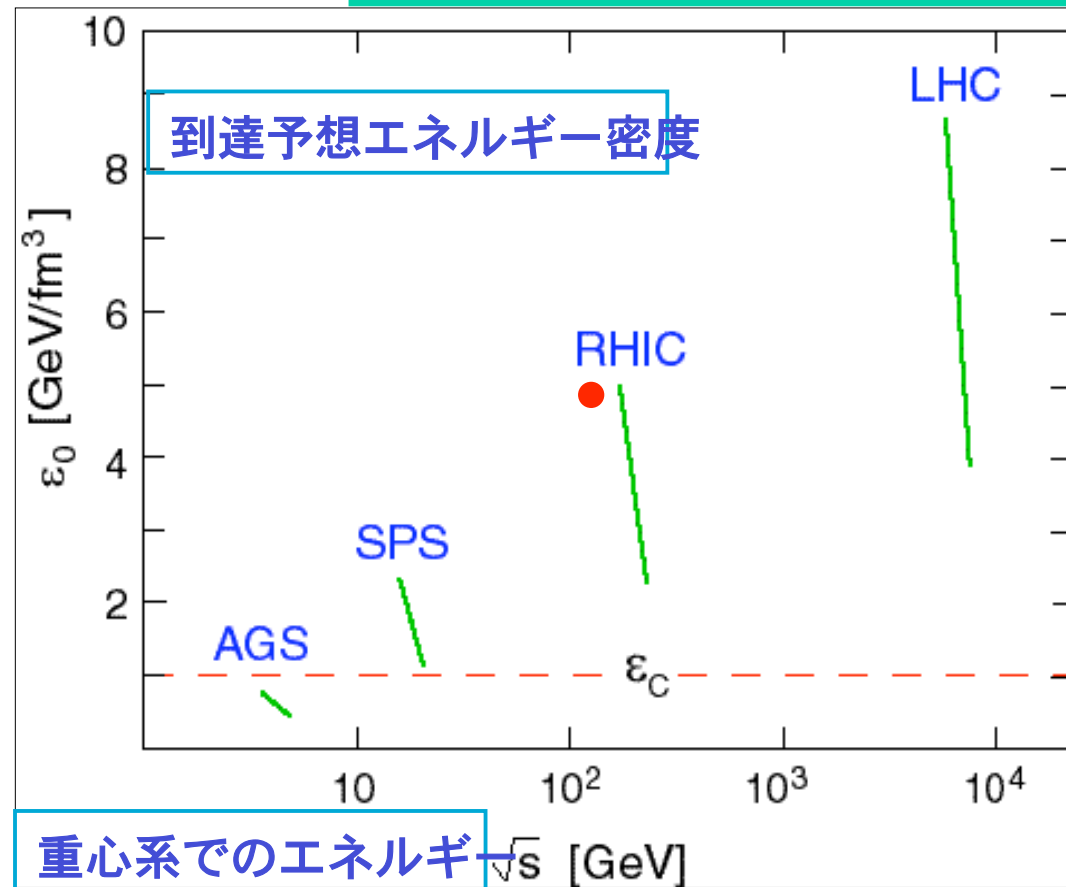
初期エネルギー密度の推定

$\epsilon_0 \sim 5 \text{ GeV/fm}^3$ ($\sqrt{s} = 130 \text{ AGeV}$)

$$\epsilon_0 = 0.11 A^{-2/3} \ln[\sqrt{s}/2m_p]$$

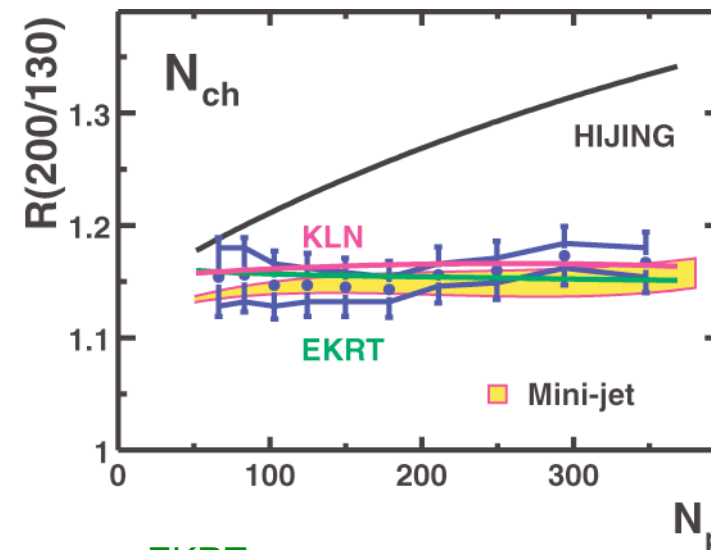
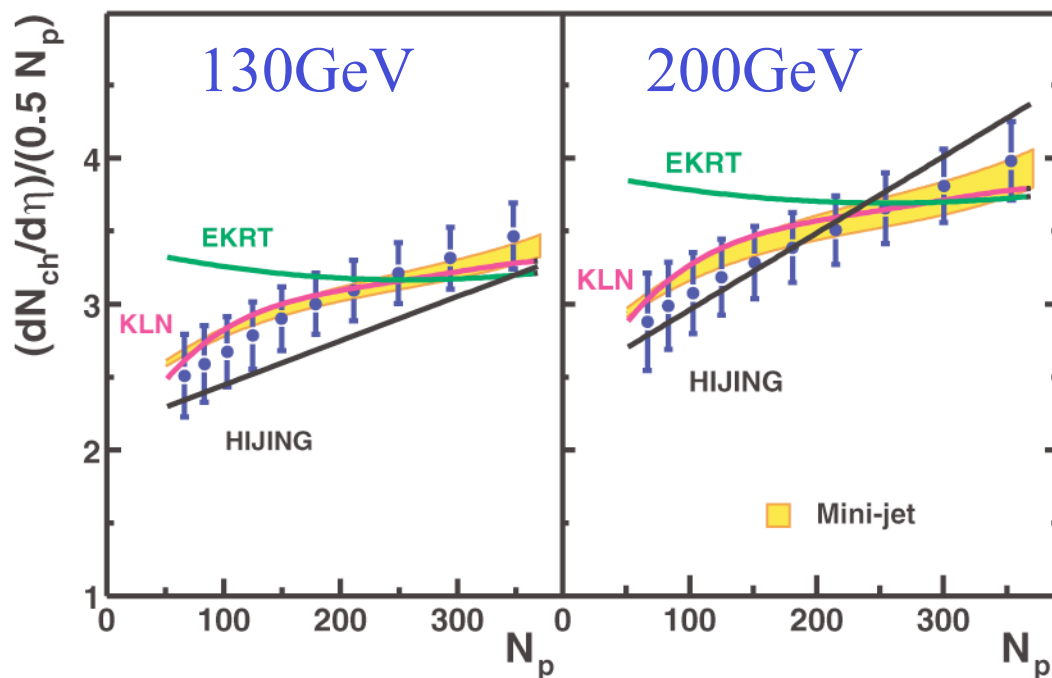
Bjorken's formula

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{m_T}{\pi R^2 \epsilon_0} \frac{dN}{dy} \\ &= \frac{1}{\pi R^2 \epsilon_0} \frac{dE_T}{dy} \end{aligned}$$



重心系でのエネルギー \sqrt{s} [GeV]

Model comparison



Naïve hard&semi-hard two component model (HIJING) is excluded.

High energy QCD gluon saturation model (KLN) and two-component mini-jet model with nuclear shadowing (Mini-jet) are favored.

EKRT

K.J.Eskola et al,
Nucl Phys. B570, 379 and
Phys.Lett. B 497, 39 (2001)

HIJING

X.N.Wang and M.Gyulassy,
PRL 86, 3498 (2001)

KLN

D.Kharzeev and M. Nardi,
Phys.Lett. B503, 121 (2001)
D.Kharzeev and E.Levin,
Phys.Lett. B523, 79 (2001)

Mini-jet

S.Li and X.N.Wang
Phys.Lett.B527:85-91 (2002)

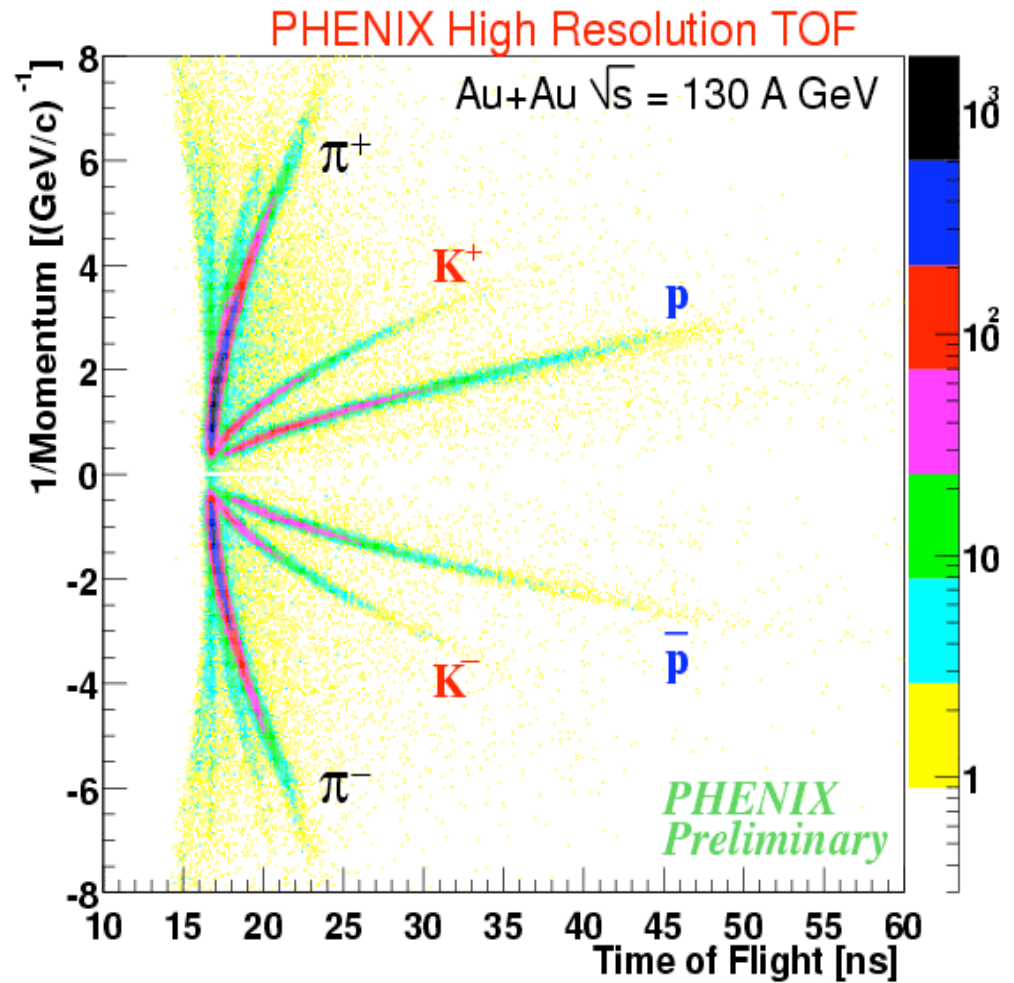
化学平衡と熱平衡

- 粒子収量（比） → 化学平衡
 - 化学的 freeze-out 時の情報
 - 時空発展についての、模型が必要
 - 模型に対する強い制限
- 粒子スペクトル → 熱平衡
 - Radial flow から、系の熱的 freeze-out 時の情報
 - 時空発展についての、模型が必要
 - 模型に対する強い制限
- Elliptic flow → 熱平衡
 - Hydro-dynamic flow model との比較

粒子スペクトル
と
Radial Flow

TOFによる粒子識別

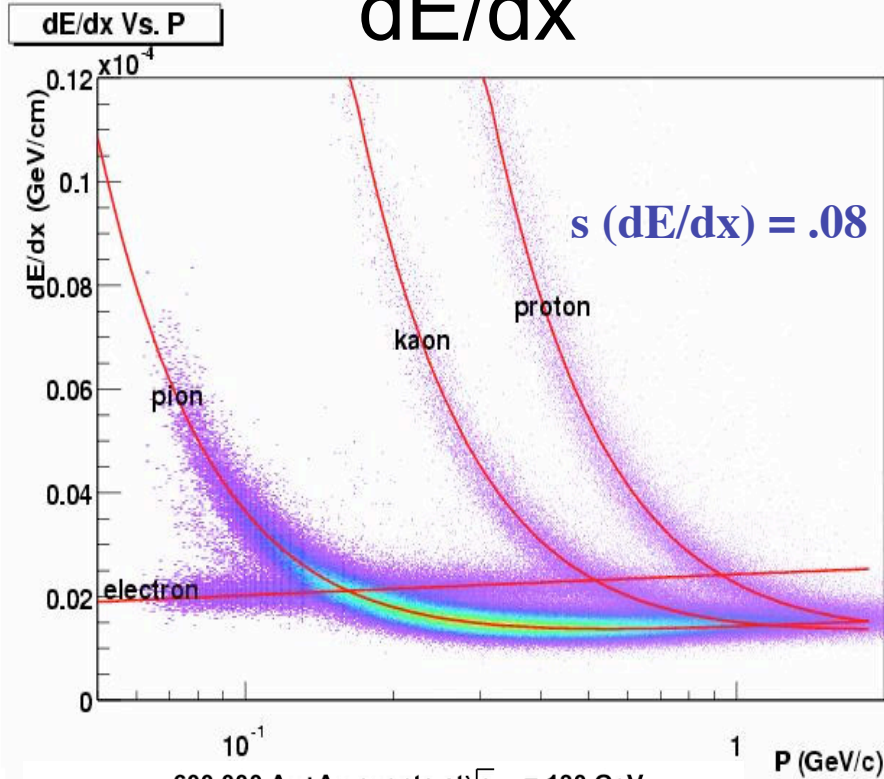
$$TOF = \frac{L}{v} = \frac{LE}{p} = \frac{L\sqrt{p^2 + m^2}}{p}$$
$$m = p \sqrt{\left(\frac{TOF}{L}\right)^2 - 1}$$



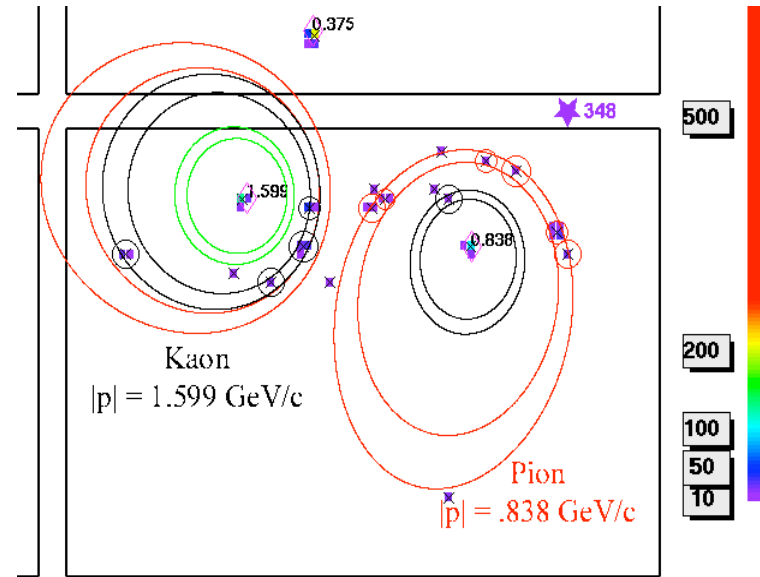


Particle ID Techniques

dE/dx



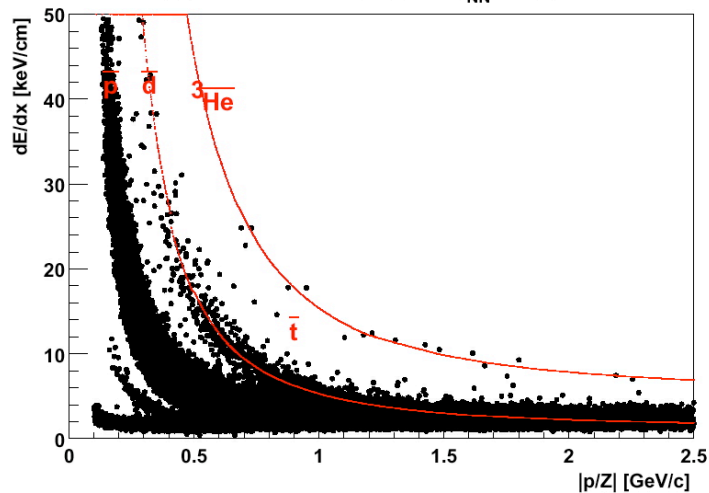
RICH



RICH PID range

1 - 3 GeV/c for K/ \square

1.5 - 5 GeV/c for K/p



dE/dx PID range:

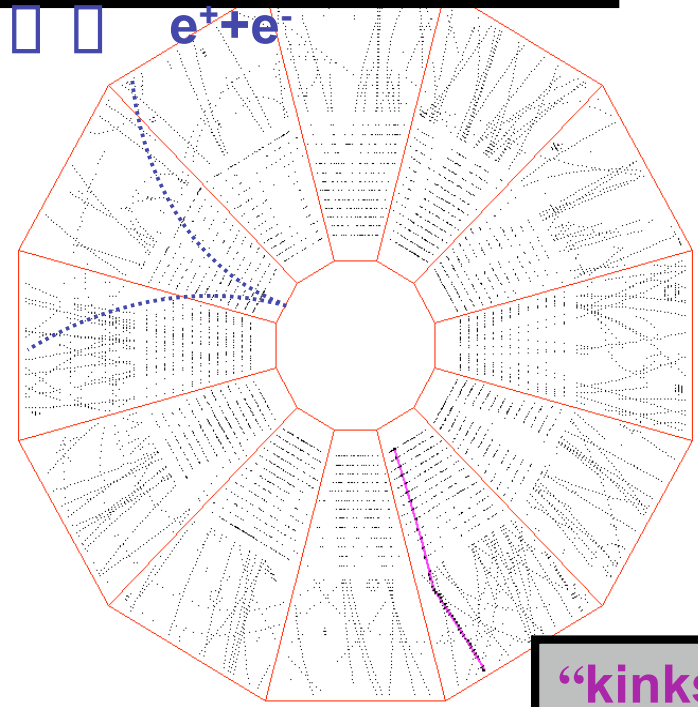
~ 0.7 GeV/c for K/ \square

~ 1.0 GeV/c for K/p

STAR Particle ID

Topology

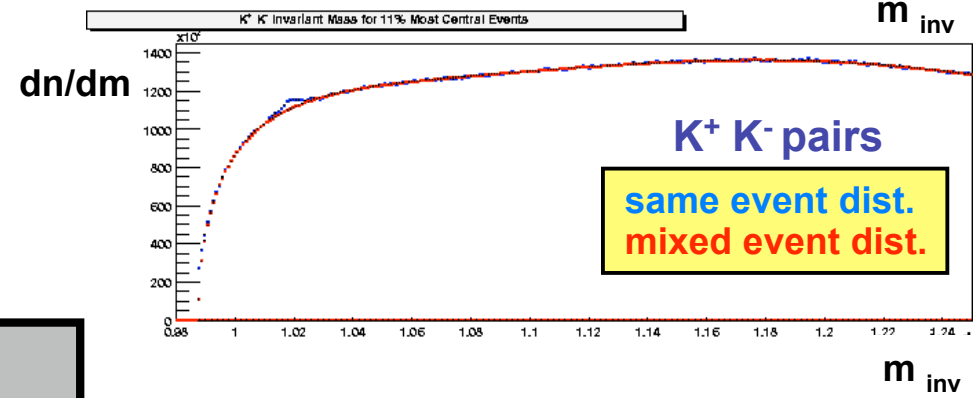
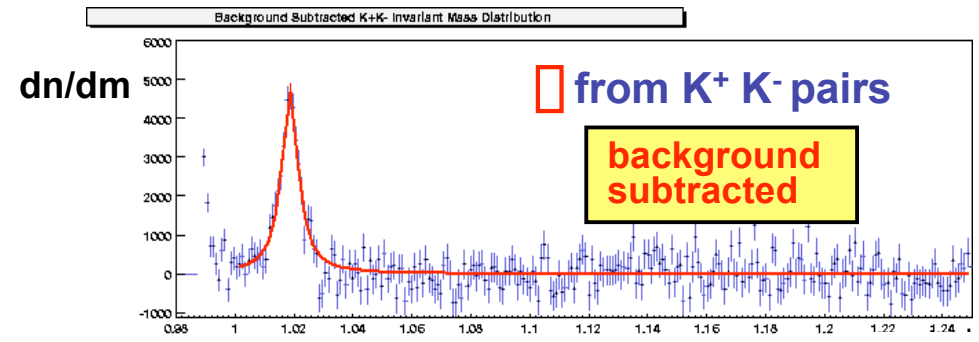
Secondary vertex:
 $K_s \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^0 p^+, \pi^0 \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0 \pi^+$
 K



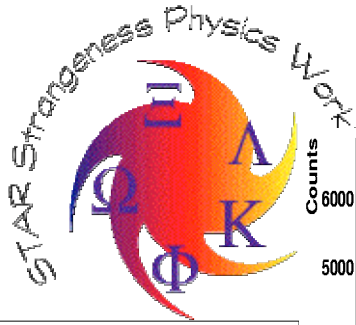
“kinks”
 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$

Combinatorics

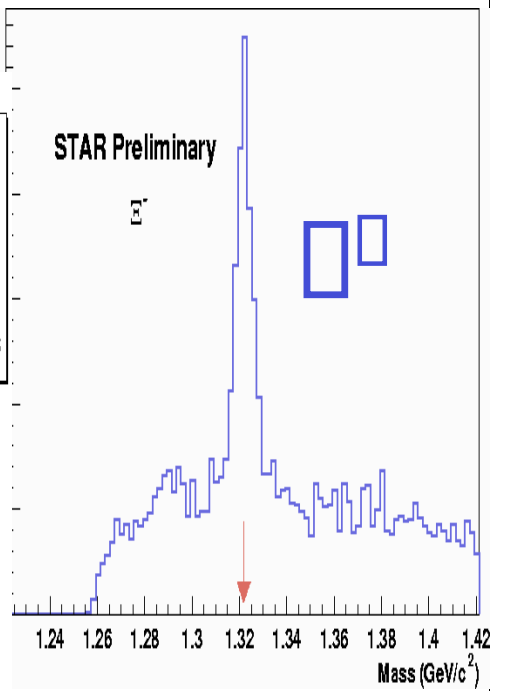
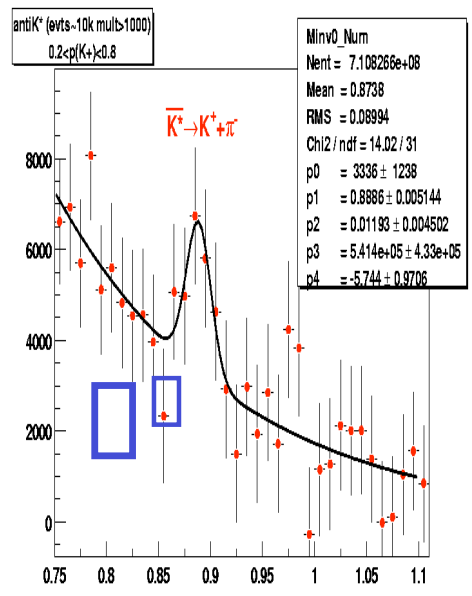
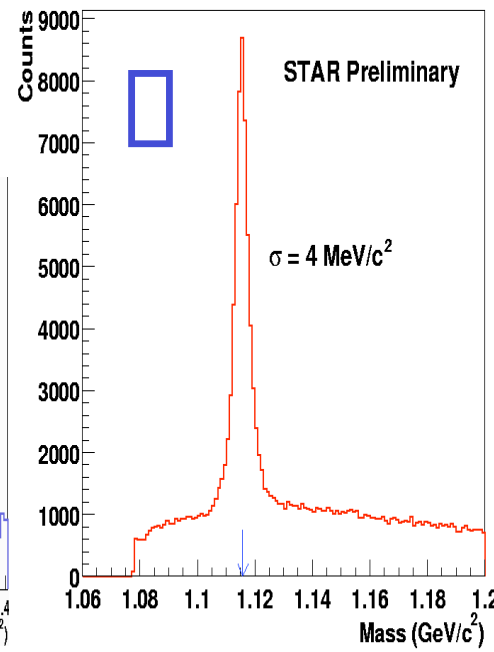
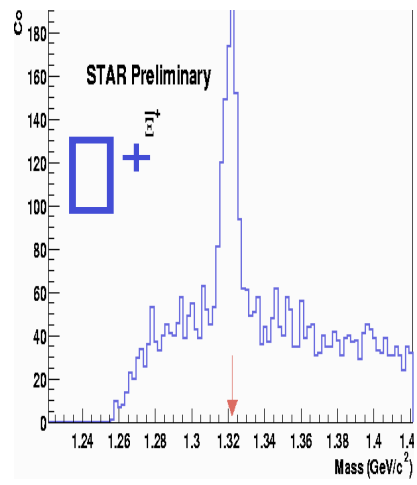
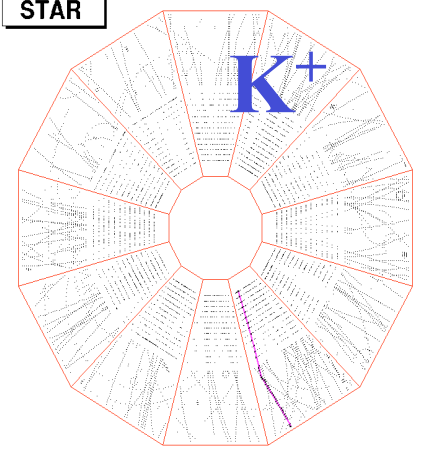
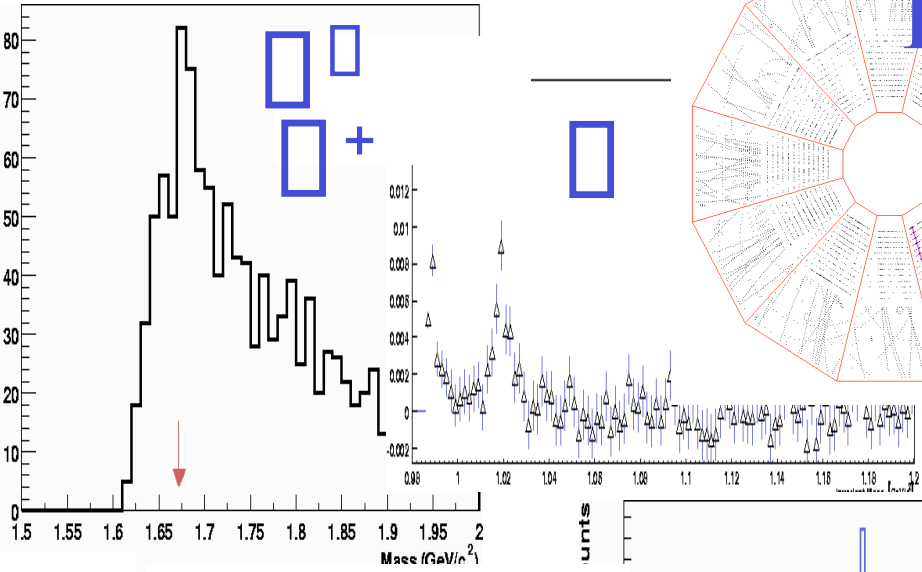
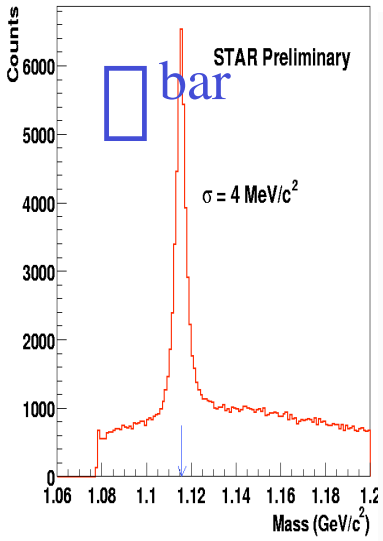
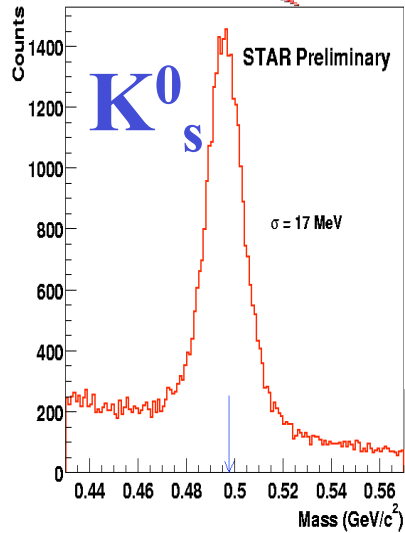
$K_s \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $\pi^0 \pi^0 \rightarrow K^+ + K^-$
 $\pi^0 \pi^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$ $\pi^0 \pi^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$



STRANGENESS! (Preliminary)



STAR



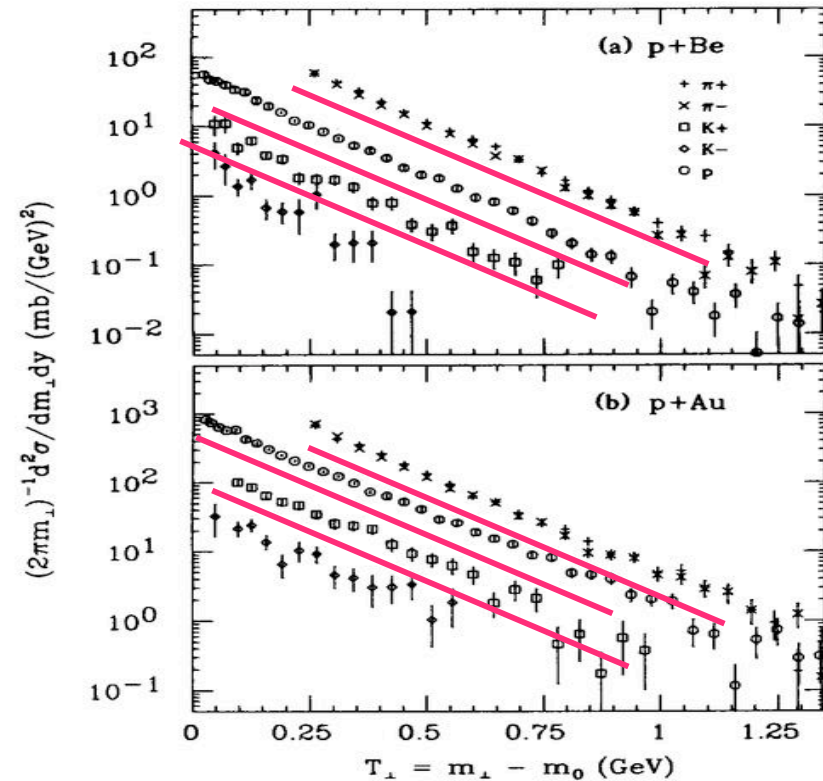
m_T scaling

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = \frac{d^3 N}{m_T dm_T dy d\eta} = A(y) \exp\left[-\frac{m_T - m}{T}\right]$$

p-p、p-A 衝突での低い運動量領域のスペクトル

- 粒子の種類に依らず、 m_T の指数関数で良く表現される
- 粒子の種類に依らず、同じ T

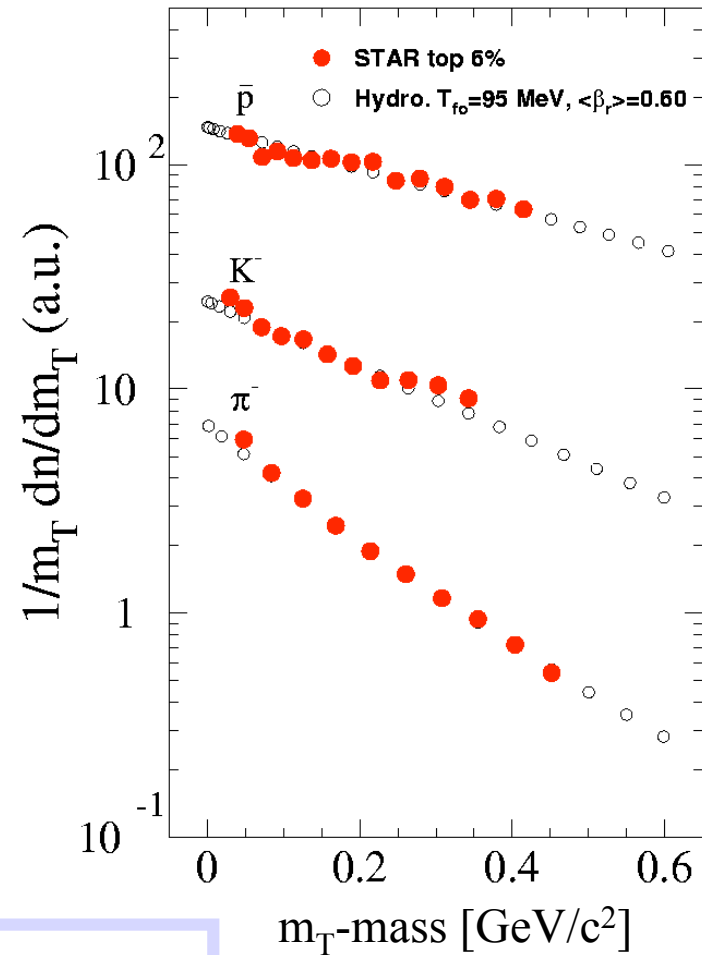
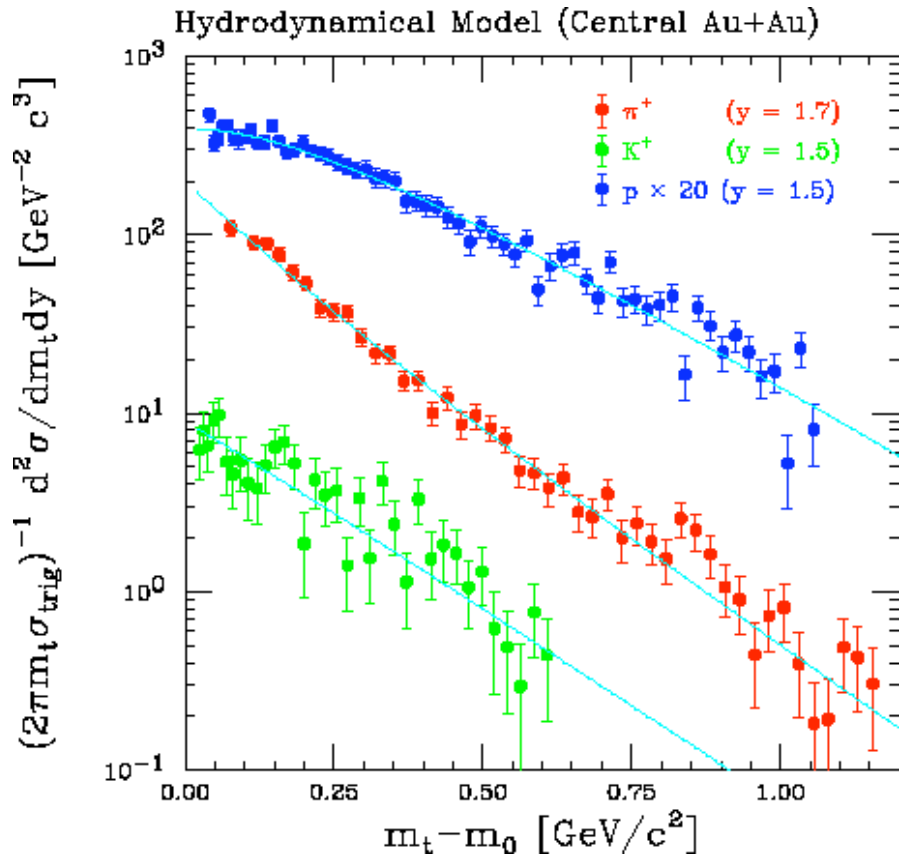
BNL-AGS E802実験



重イオン衝突における粒子スペクトル

Au+Au at BNL-AGS

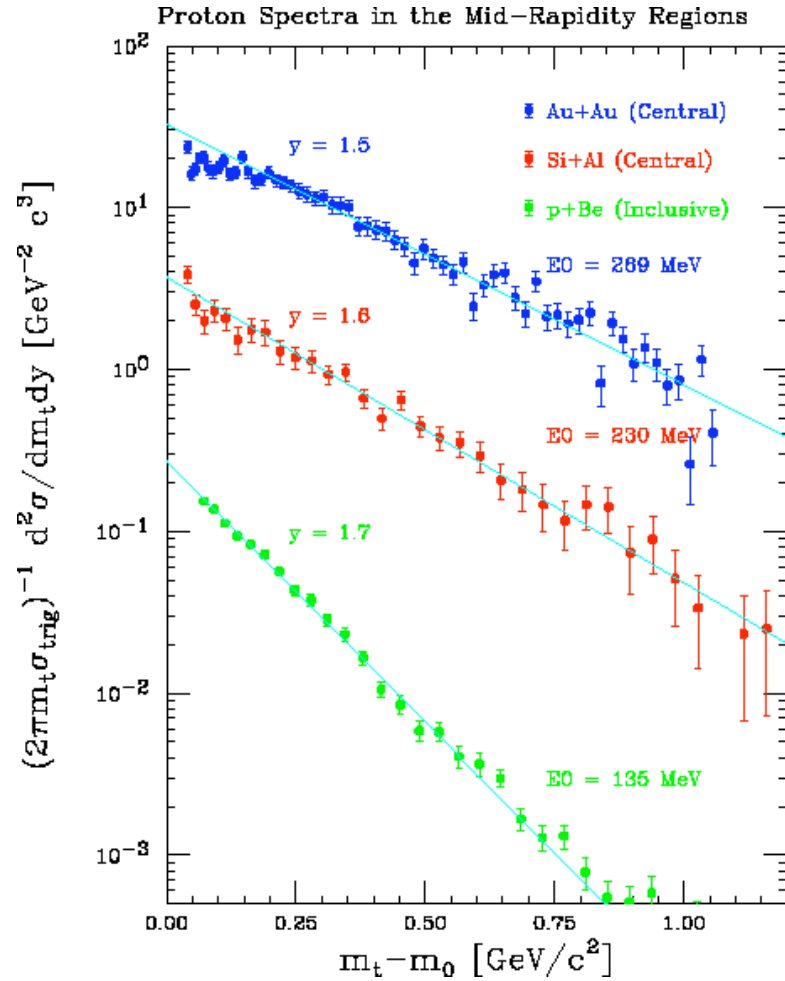
Au+Au at BNL-RHIC



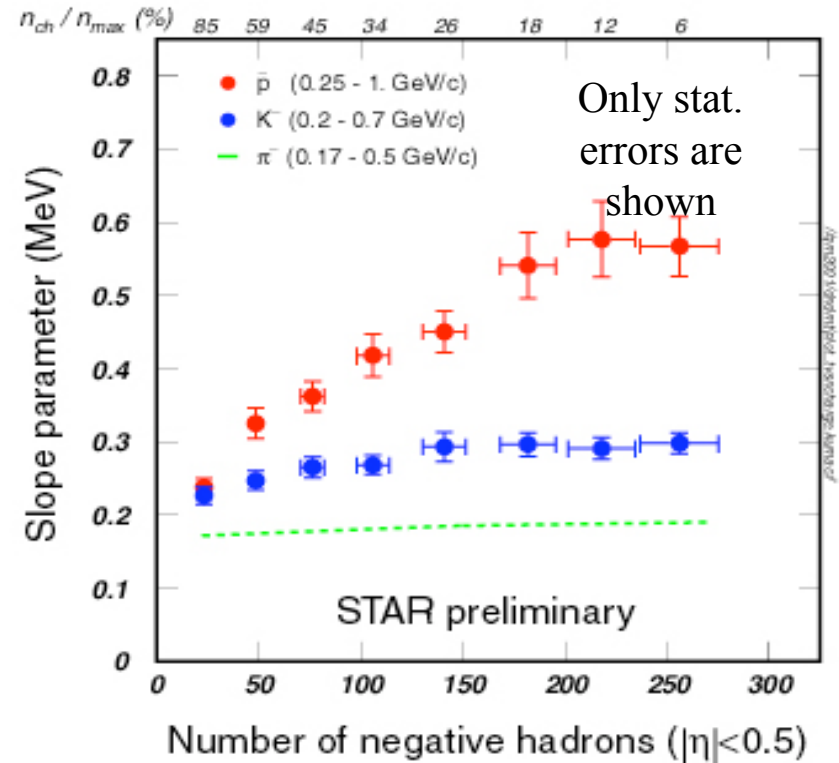
粒子により勾配が異なる

系によるスペクトルの変化

BNL-AGS



Au + Au at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 130$ (GeV)



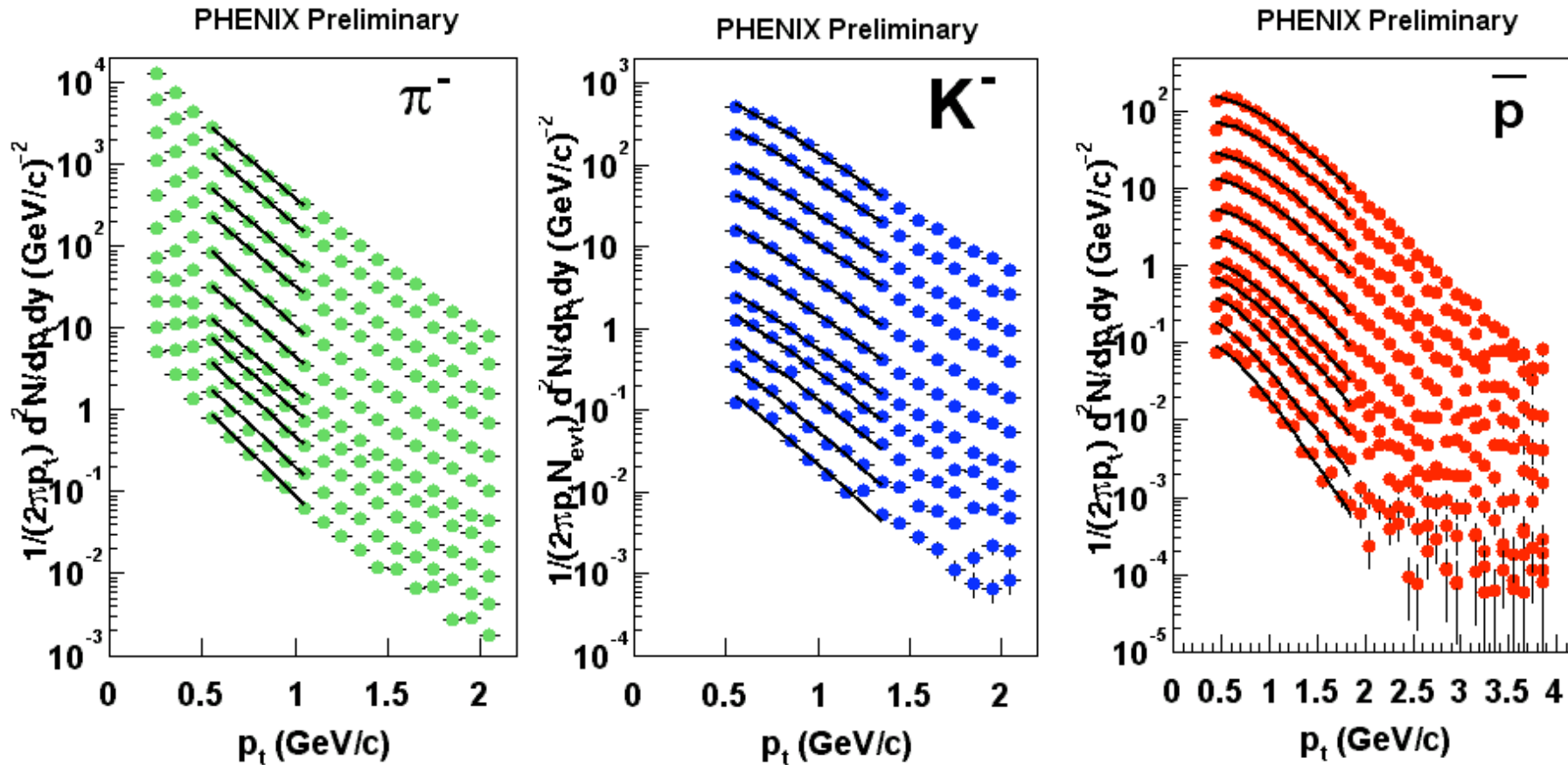
質量の大きい粒子ほど

- 周辺衝突→中心衝突
- 衝突系→大

に従って、勾配が大きく変化する

Collective Expansion

- Single particle p_T spectra -

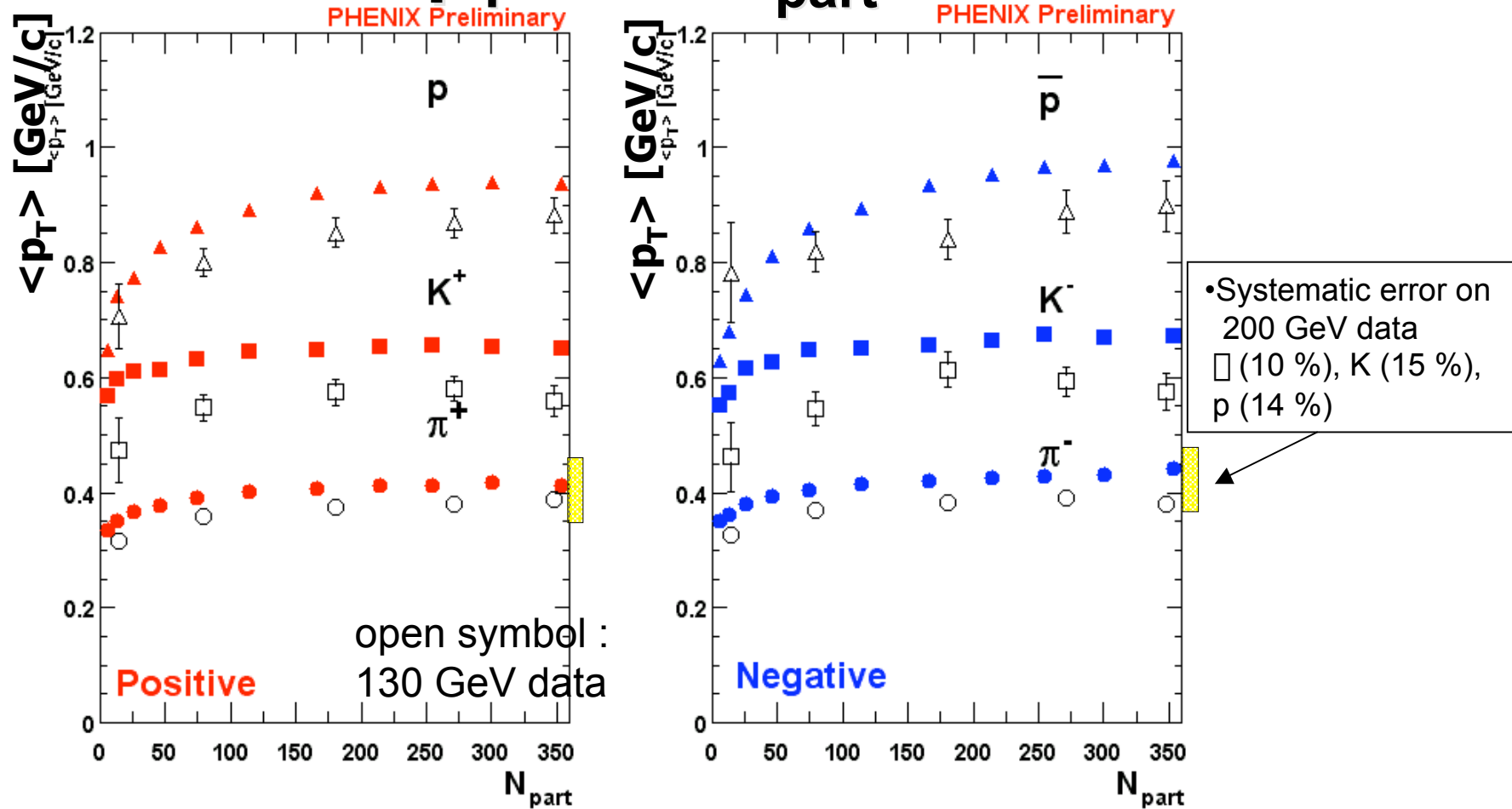


- Simultaneous fit in range $(m_t - m_0) < 1$ GeV is shown.
- The top 5 centralities are scaled for visual clarity.
- Similar fits for positive particles.

Collective Expansion



- $\langle p_T \rangle$ vs. N_{part} -



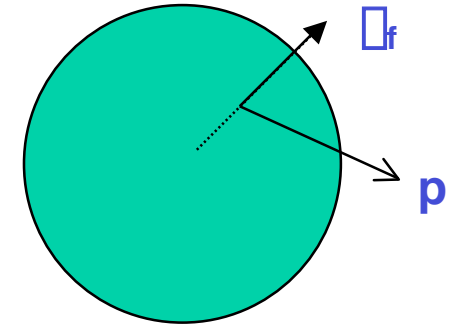
- $\langle p_T \rangle$ increases with N_{part} and particle mass \Rightarrow radial expansion.
- Consistent with hydrodynamic expansion picture.

Radial Flow のモデル

Isotropic thermal source with radius R

$$\frac{d^3 N}{dp^3} = A \exp\left[-\frac{E}{T}\right] \quad E \frac{d^3 N}{dp^3} = AE \exp\left[-\frac{E}{T}\right]$$

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} \int_0^R r^2 dr E \exp\left[-\frac{E}{T}\right] + \frac{T}{E} \frac{\sinh\left[\frac{R}{E}\right]}{\frac{R}{E}} = \frac{T}{E} \cosh\left[\frac{R}{E}\right]$$



Isotropic Flow Model

---- K.S. Lee and U. Heinz, Z. Phys. C 43 (1989) 425.

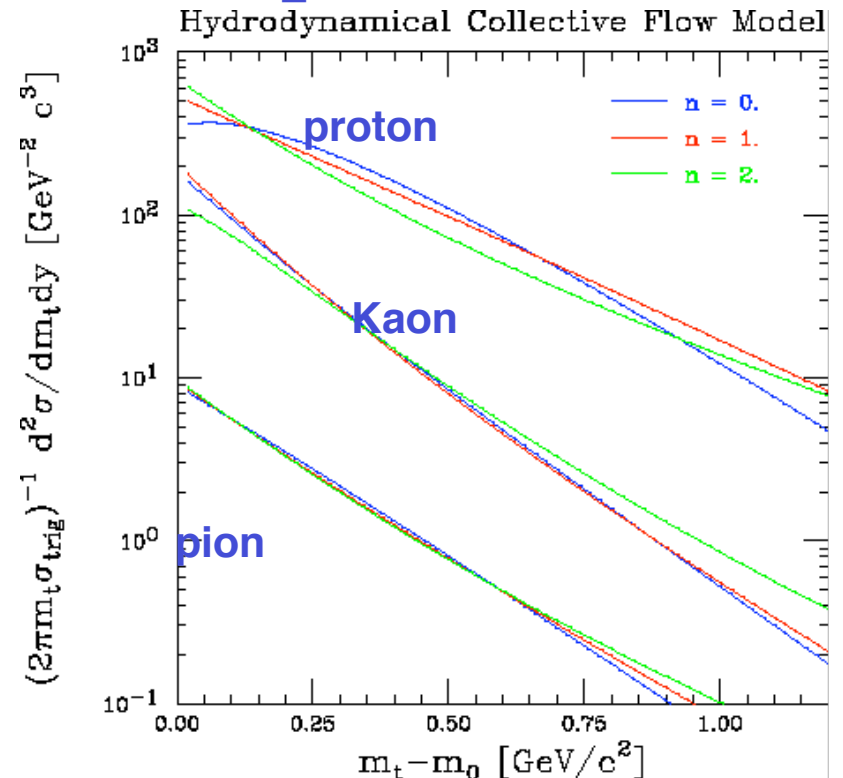
$$v_f = \frac{r}{R} v_s : \text{flow velocity at } r$$

$$v_s : \text{velocity at } R$$

$$n : \text{velocity profile}$$

$$dV = v_f v_f p / T$$

At each r: $E d^3 N / dp^3 dV = E d^3 N / dp^3 r^2 dr d\Omega$
 Back to rest frame: $E \rightarrow E (E + v_f p \cos \theta)$
 $dV \rightarrow dV / \gamma$



AGSデータとの比較

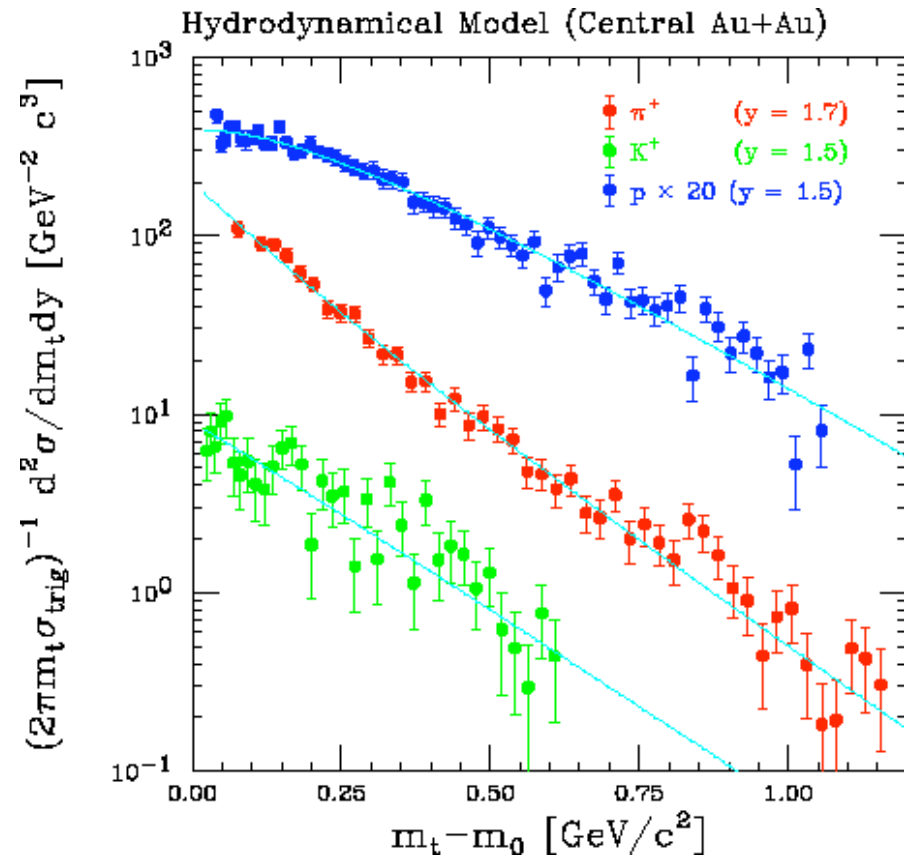
Data from E866 exp. at 11.6 AGeV Au+Au central collision

陽子スペクトルが non-exponential shape (世界初の結果)

$$\chi_s = 0.69 (0.03)$$

$$n = 0.5 (0.1)$$

$$T = 91.2 (2.6) \text{ MeV}$$



Radial Flow

- 質量の大きい粒子ほど、周辺衝突中心衝突で勾配が穏やか
 - 動径方向の系の流体力学的膨張と解釈できる
 - $T \sim T_0 + m \langle \beta^2 \rangle$

- 成立する条件の考察：多重散乱

$$\langle n \rangle L_m = 1 \quad ; \quad \langle \sigma \rangle \sim 20 - 30 \text{ mb}$$

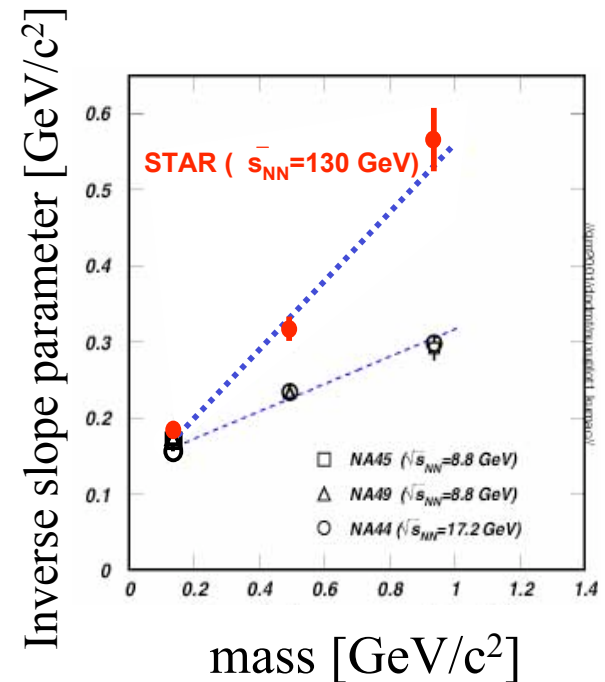
$$n = n_N \quad \rightarrow \quad L_m = 2.1 - 3.2 \text{ fm}$$

$$n = 4 n_N \quad \rightarrow \quad L_m = 0.5 - 0.8 \text{ fm}$$

$$L_m \ll R (\sim 7 \text{ fm}), \quad t (\sim R)$$

→ 近似的に熱（力学的）平衡

- 圧力 $P(T, \mu)$ 、核子の平均場（外向きの力）
- 初期に熱平衡 → より強いフロー

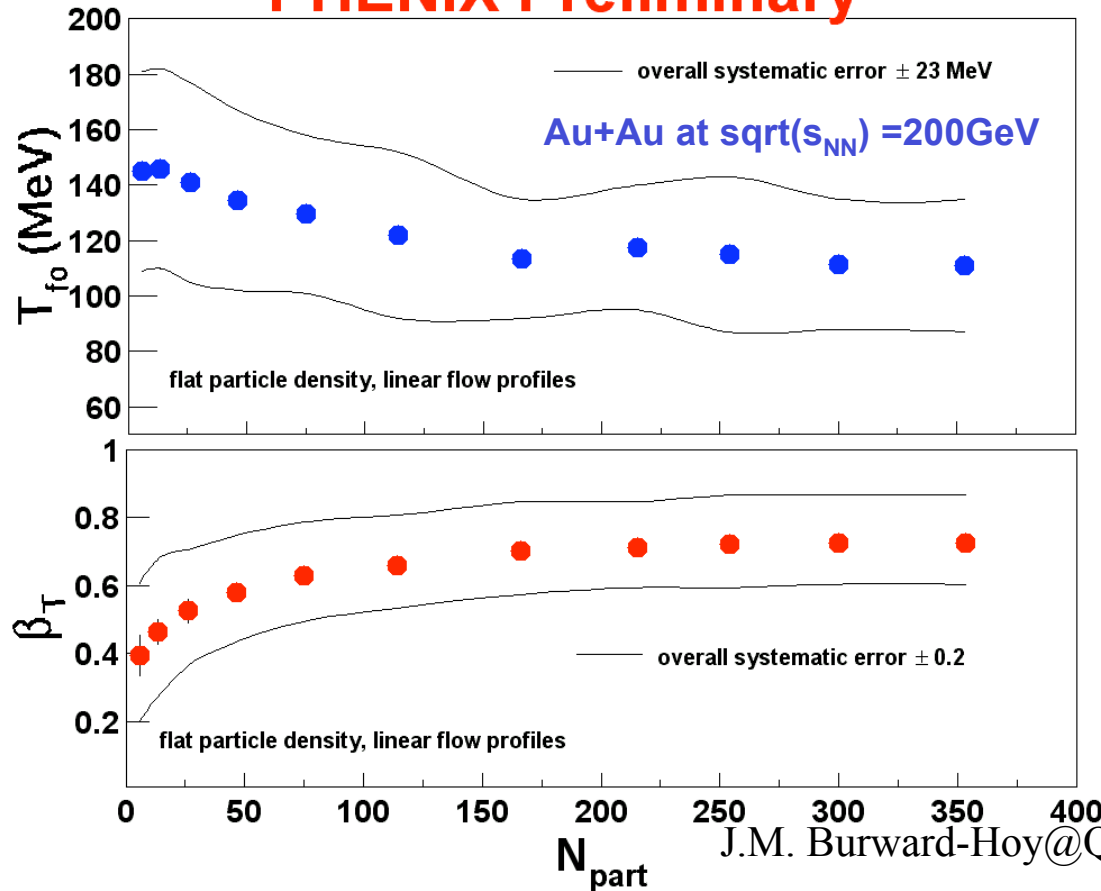


RHICではSPSより強いフロ

Result of hydrodynamic model fit



PHENIX Preliminary



Most central collisions
for 200 GeV data

Freeze-out Temperature^(*)
 $T_{fo} = 110 \pm 23\text{ MeV}$

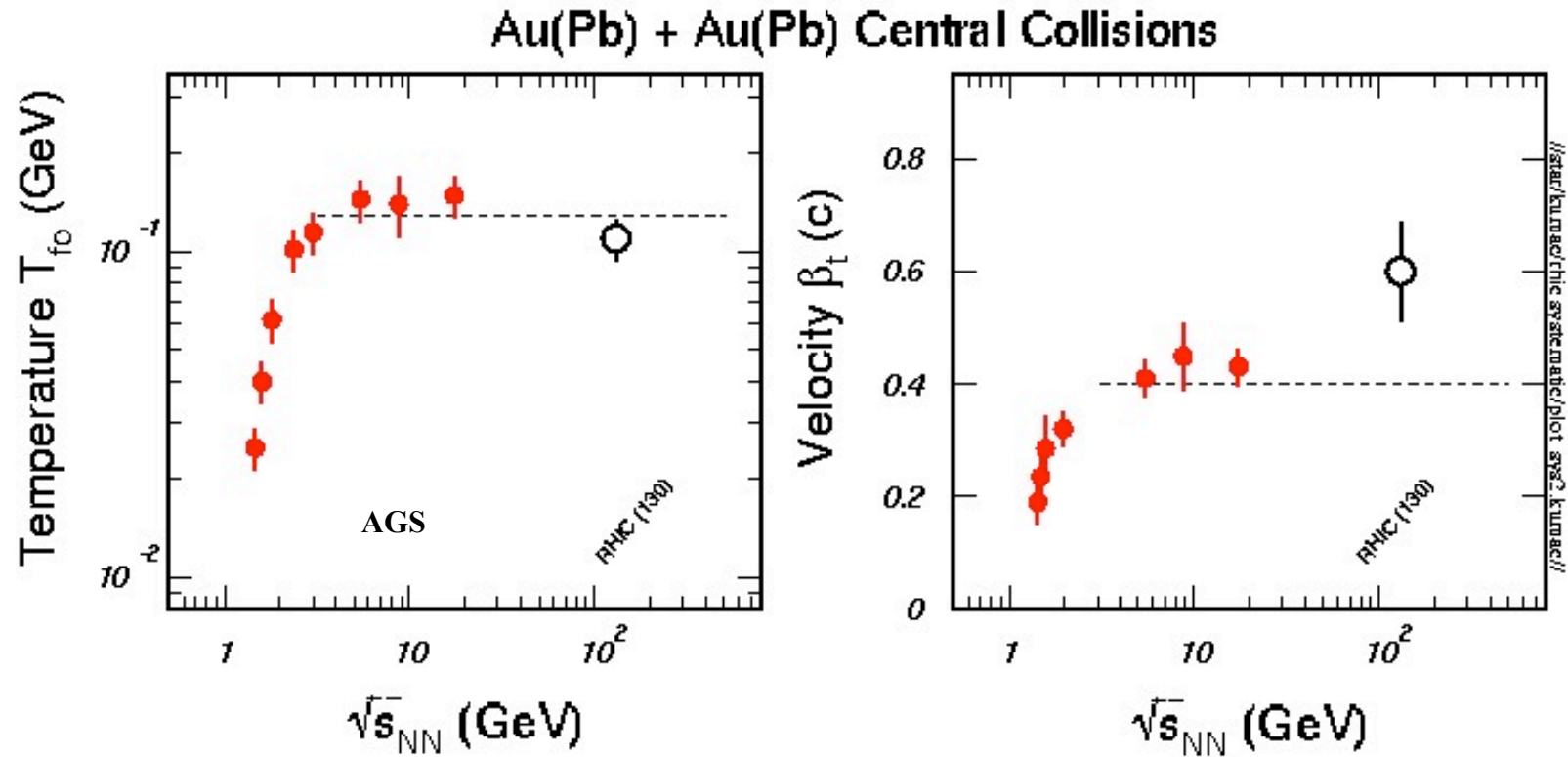
Transverse flow velocity^(*)
 $\beta_T = 0.7 \pm 0.2$

(*) Resonance feed down is
not corrected.

Ref: E. Schnedermann, J. Sollfrank,
and U. Heinz, Phys. Rev. C 48, 2462
(1993)

- β_T increases from peripheral to mid-central ($N_{part} < 150$) and tends to saturate for central collisions.

Flow Analysis の結果



- 大きな膨張速度 → 高い圧力
- 初期に熱力学的平衡を達成：高温、高圧の状態