

地上で作る小さなビッグバン — クォーク・グルーオン・プラズマの探索 —

大西 明
大学院理学研究科・宇宙理学専攻

Abstract

この世界を構成している「最小」の粒子はクォークであり、クォークが3つ集まって陽子・中性子、そしてさらにこれらが集まって原子核を作っている。

これまではクォークは核子の中に閉じ込められ、単独でみることができなかったが、近年の実験において、クォークがばらばらになった状態、「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)」が生成された。

初期宇宙では、この QGP 状態を経て現在の宇宙の「真空」が作られており、人類は実験室で「小さなビッグバン」を作ったことになる。

本公演では、現在急速に実験研究が進行している QGP 生成研究と、そこで必要とされているシミュレーション計算の現状について紹介する。

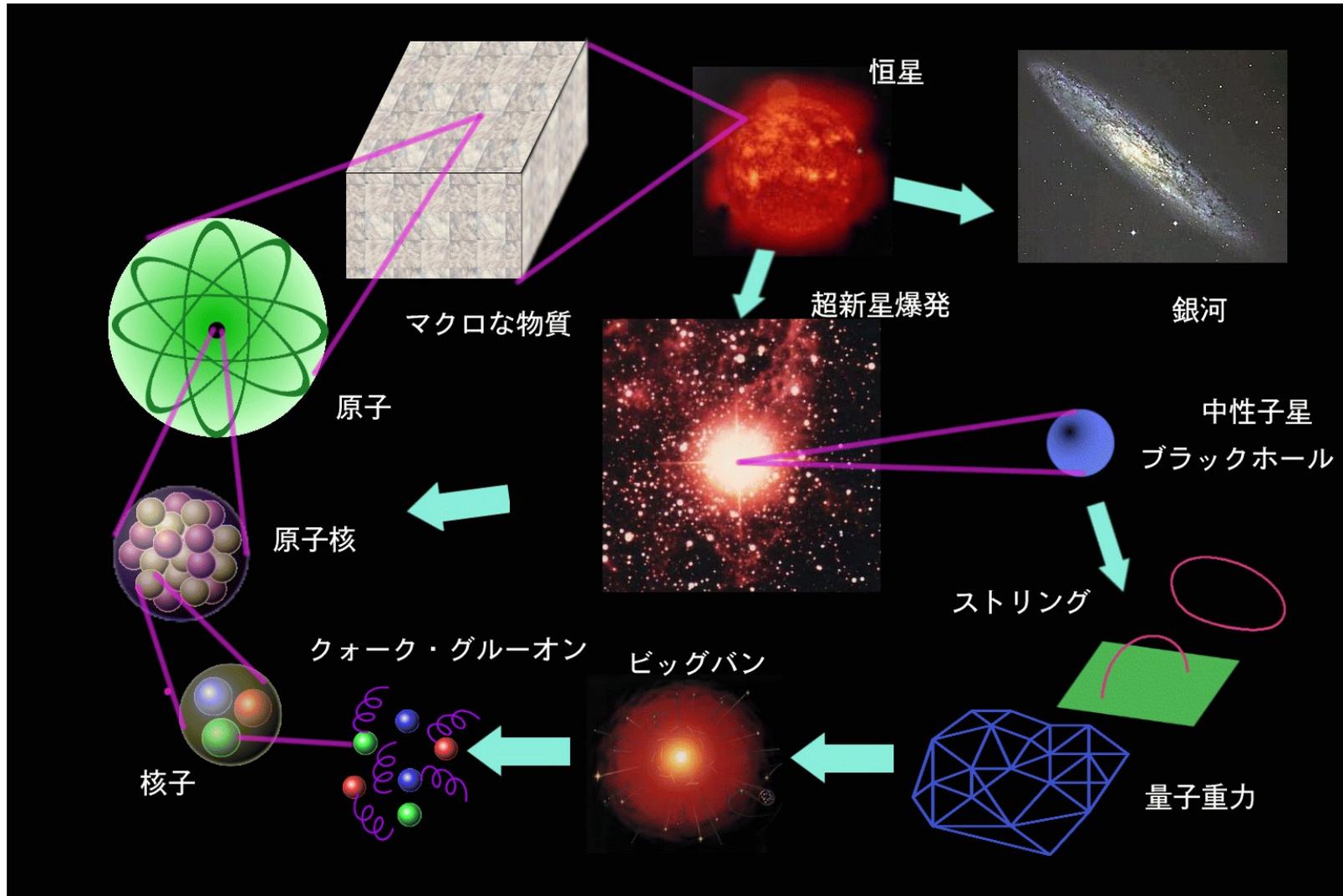
Contents

- Introduction
 - クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とは何か？
- QGP は見つかったか？
 - ジェット抑制と楕円型フロー
- QGP 物性の探求へ向けて：シミュレーション計算の現状
 - 格子 QCD 計算
 - 流体力学計算
 - ジェット生成計算
 - 流体と速いパートンの相互作用
- まとめ

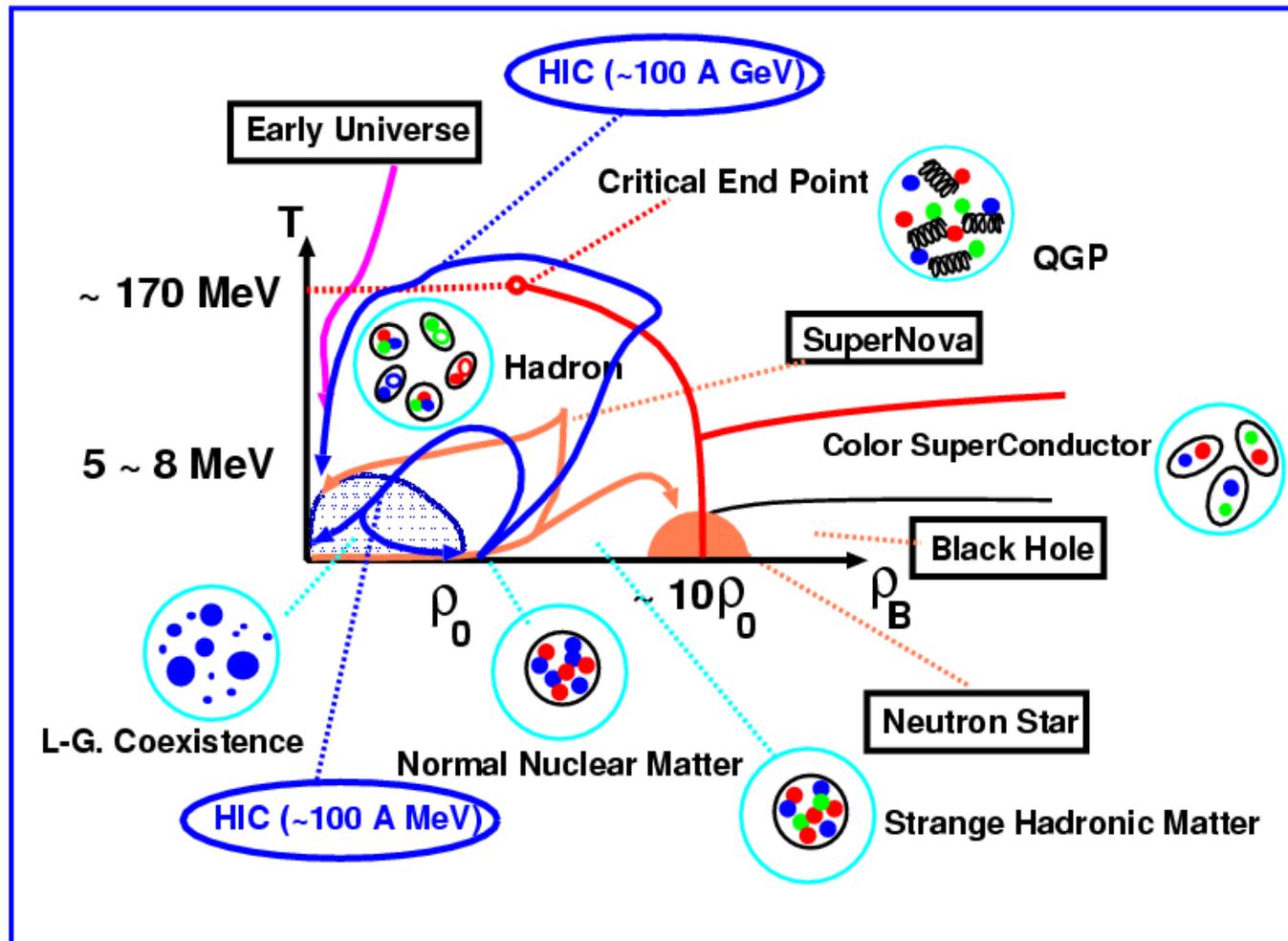
Introduction

物質は何からできているか？

- 原子 → 原子核 → 核子
→ クォーク (= 現時点で「最小」と考えられている粒子)



宇宙と地上でのクォーク物質相転移

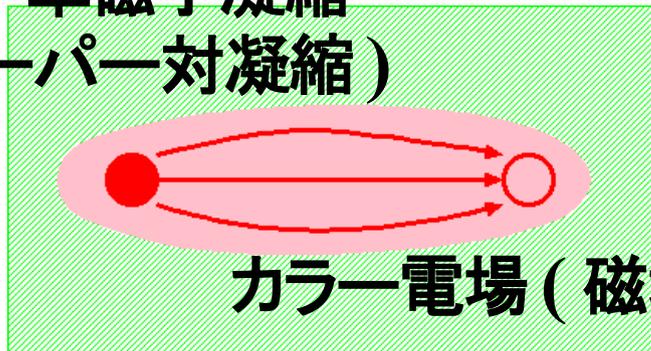


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移)
= この宇宙最後の「真空相転移」である！

量子色力学 (QCD) の「真空」

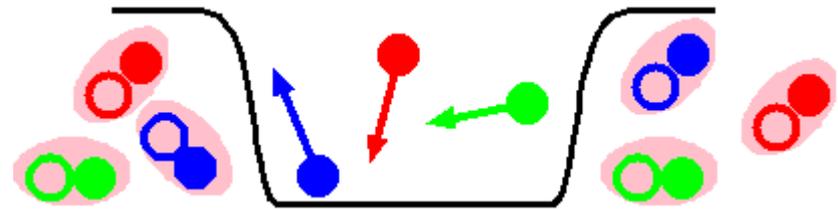
- 色の閉じ込め：クォーク間には「ひも」のような力が働く
 - クォーク間の電場はひも状に絞られている (⇔ 超伝導体での磁場)
 - 引き離そうとするとクォーク対が生成されて色は閉じ込められたまま。
- 質量の獲得：核子は「モーゼの道」の中の3クォーク状態
 - QCD 真空ではクォーク・反クォーク対が凝縮
 - 凝縮体を「押しよける」のにエネルギーが必要
 - 5 MeV の質量のクォークが3つで 1000 MeV の大きな質量

カラー単磁子凝縮
(クーパー対凝縮)



カラー電場 (磁場)

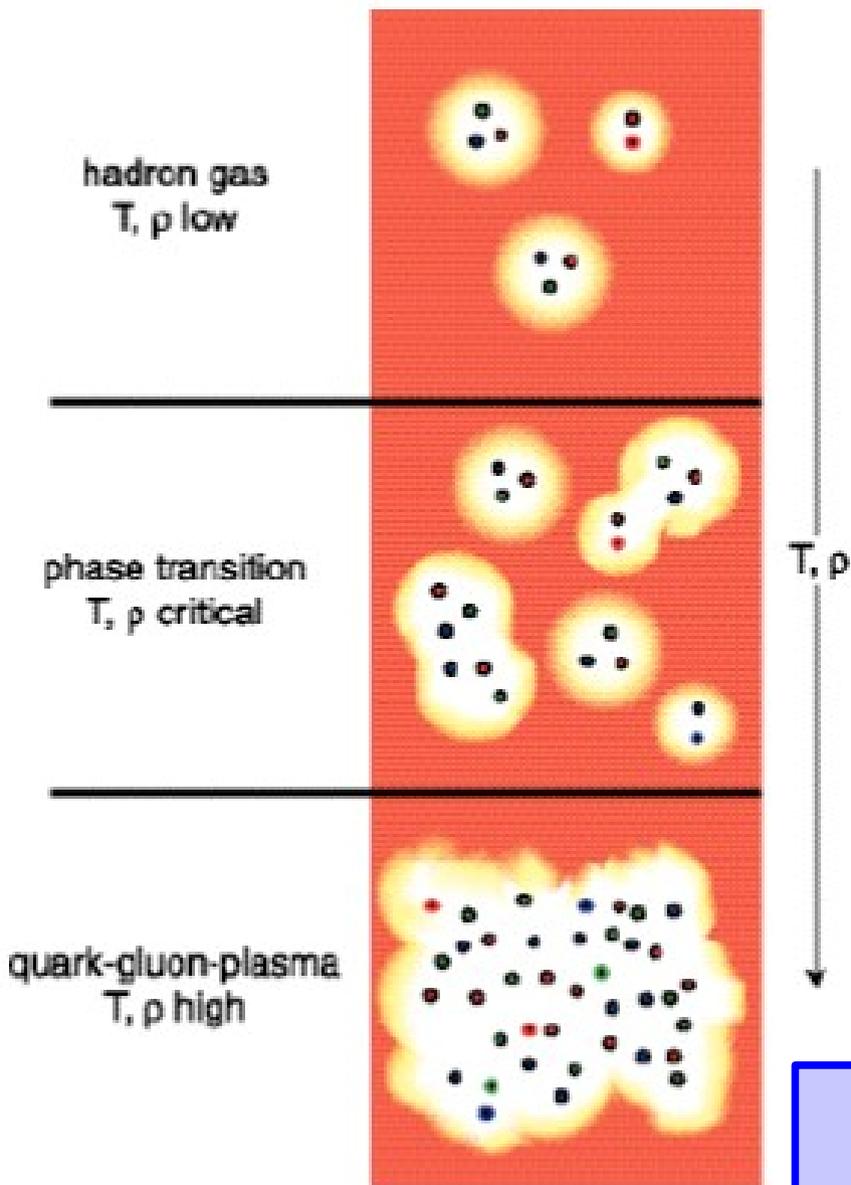
価クォーク



クォーク・反クォーク対凝縮

QCD 真空には「カラー単磁子」と「クォーク・反クォーク対」の凝縮体

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(1)



- ハドロン物質を熱する / 圧縮するとどうなるか？
 - ハドロン (核子や中間子) は、1 fm 程度の大きさを持ち、クォークと力を媒介するグルーオンからできている。(クォーク3つか、クォーク・反クォーク対)
 - 温度の増加により、多くの中間子が作られる
→ クォーク・反クォークの数が増えて、ハドロンが「重なる」
 - 核子内部の密度まで圧縮する
→ 核子同士が「重なる」

温度・密度を十分上げれば、
大きな体積でクォークが自由に動き回るはず

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？ (2)

- 質量0の粒子の大自由エネルギー = - (圧力)
→ ステファン・ボルツマン則 (T^4 に比例)

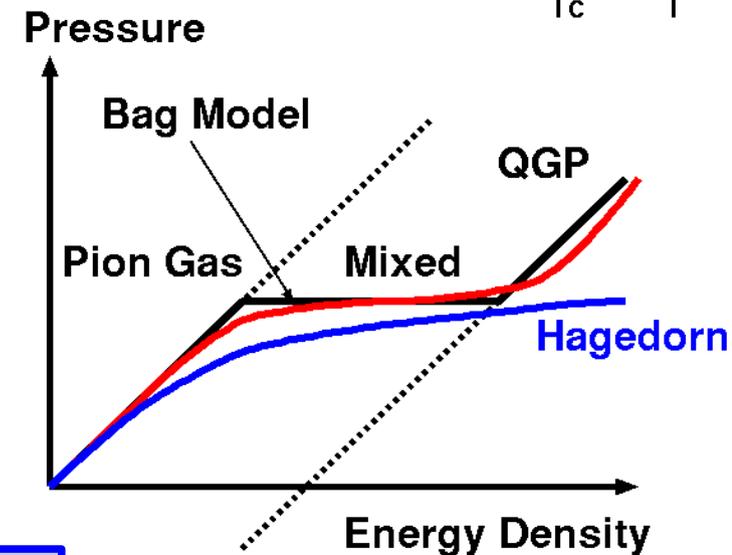
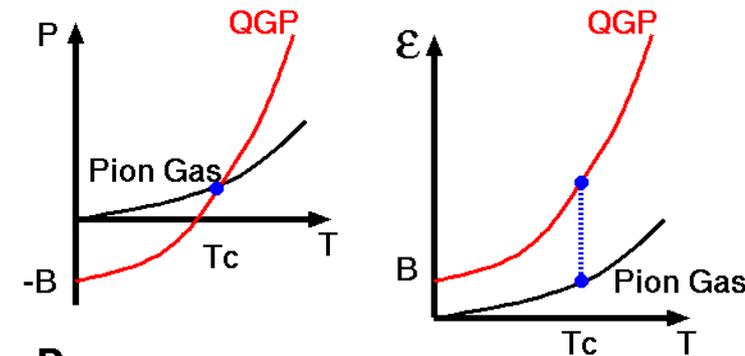
$$\Omega = -\frac{\pi^2 V}{90} \left(\sum_B g_B + \frac{7}{8} \sum_F g_F \right) T^4,$$

- ハドロン相 ~ 3種類の質量0の π 粒子

$$P_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4, \quad \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4$$

- QGP ~ 質量0のクォーク・グルーオンと「真空」の負圧力

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \quad \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$



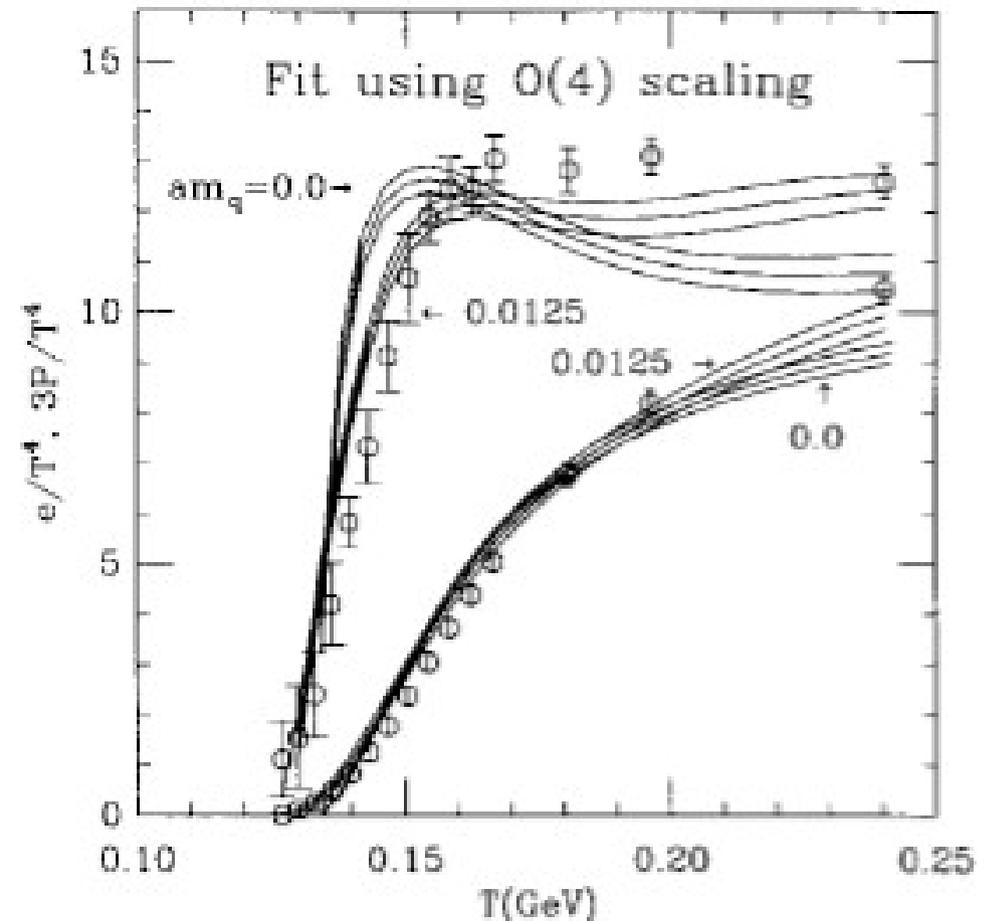
QGPへの相転移 = 自由度増加 + 真空の変化

$$DOF = 2(\text{spin}) \times 2(q, \bar{q}) \times 3(\text{color}) \times 2(\text{flavor}) \times 7/8(\text{Fermion}) + 2(\text{spin}) \times 8(\text{color}) = 37$$

なぜ高温で QGP への相転移がおこるか？ (3)

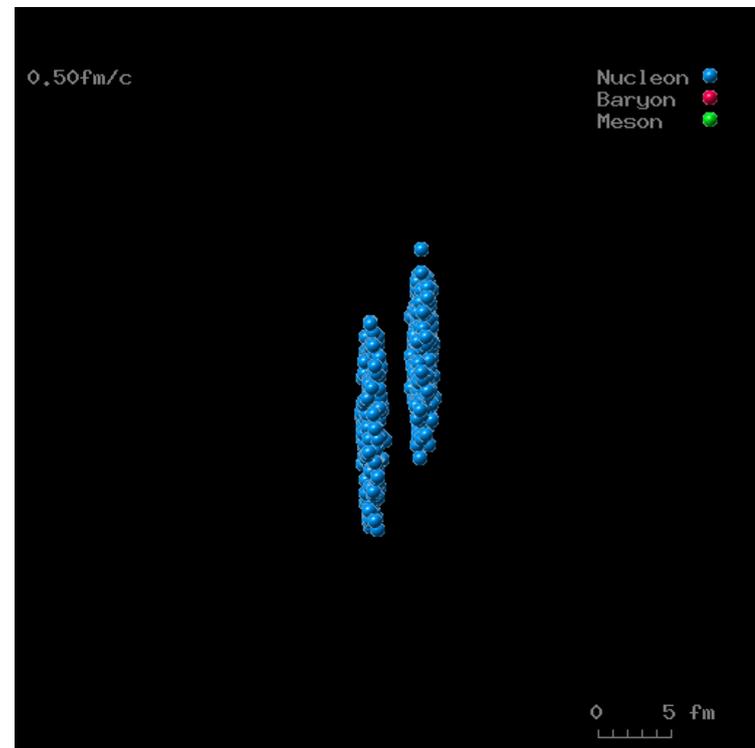
■ 量子色力学 (QCD) に基づく第一原理計算 = 格子 QCD シミュレーション

- 図: T^4 で規格化したエネルギー密度と圧力
- $T = 150\text{-}200$ MeV 程度で急激なエネルギー密度の変化
- 圧力はやや滑らかに増加していく
→ QGP への相転移



クォーク・グルーオン・プラズマを作るには？

- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)
 - 大きな体積中をクォークとグルーオンが閉じ込めから解放され、凝縮のない単純な真空を動き回っている状態
 - 初期宇宙等の「超高温状態」($\sim 10^{12}$ K) や、中性子星中心部などの「超高密度状態」($\sim 10^{15}$ g/cc) で実現
 - 実験室での QGP 生成
→ 高エネルギーの重イオン反応

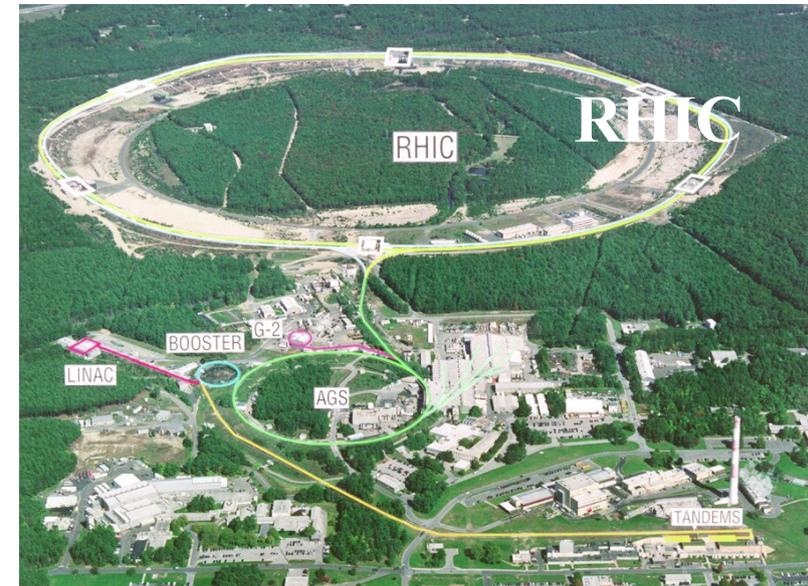


高エネルギー原子核反応での
QGP 生成
= 地上の “Big Bang” 再現実験

High Energy Heavy-Ion Collision Experiments

- ランダウの昔から核物理屋は重イオン反応でQGPを作りたいかった！

- LBL-Bevalac: 800 A MeV
- GSI-SIS: 1-2 A GeV
- BNL-AGS (1987-): 10 A GeV
- CERN-SPS (1987-): 160 A GeV
- **BNL-RHIC (2000-): 100+100 A GeV**
- **CERN-LHC (2008(?)-): 3 + 3 A TeV**

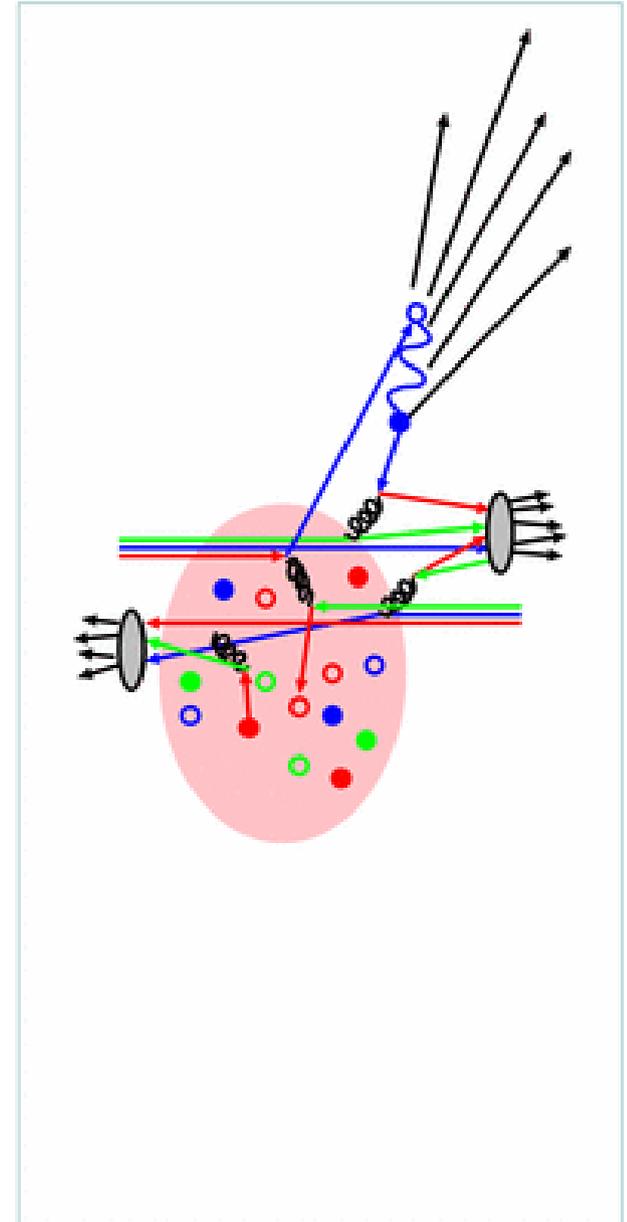


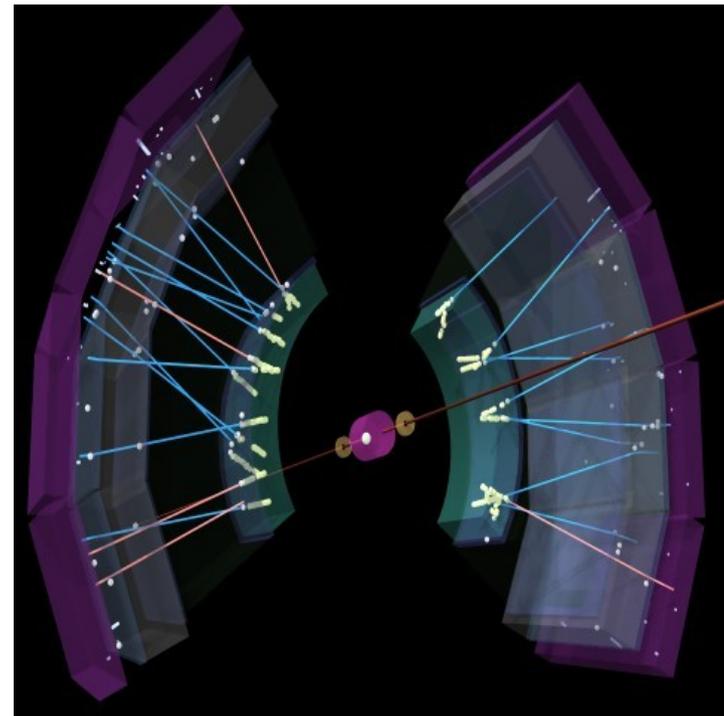
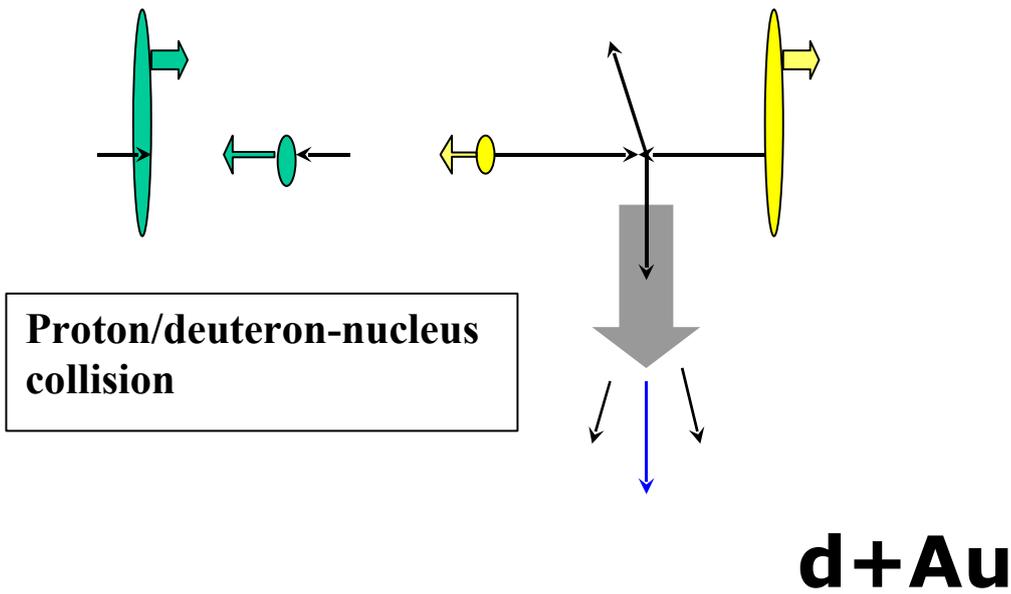
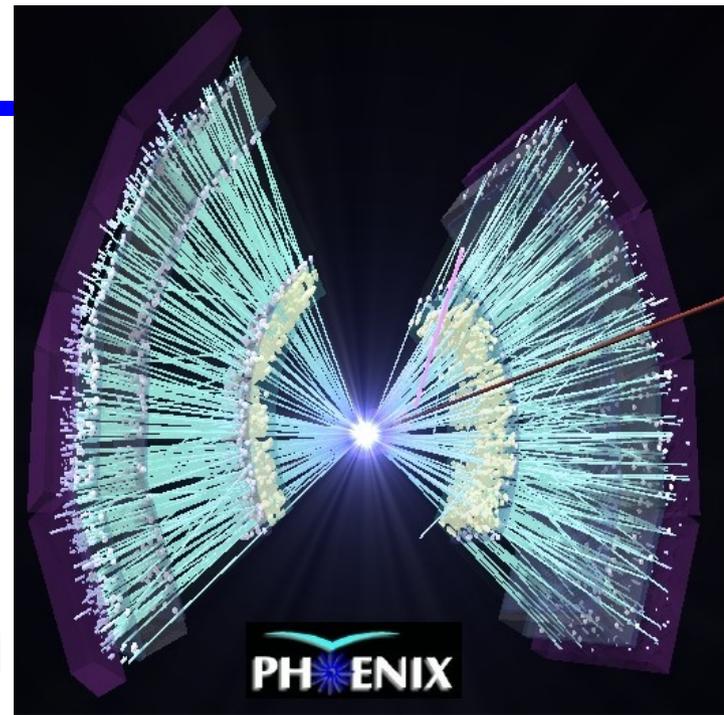
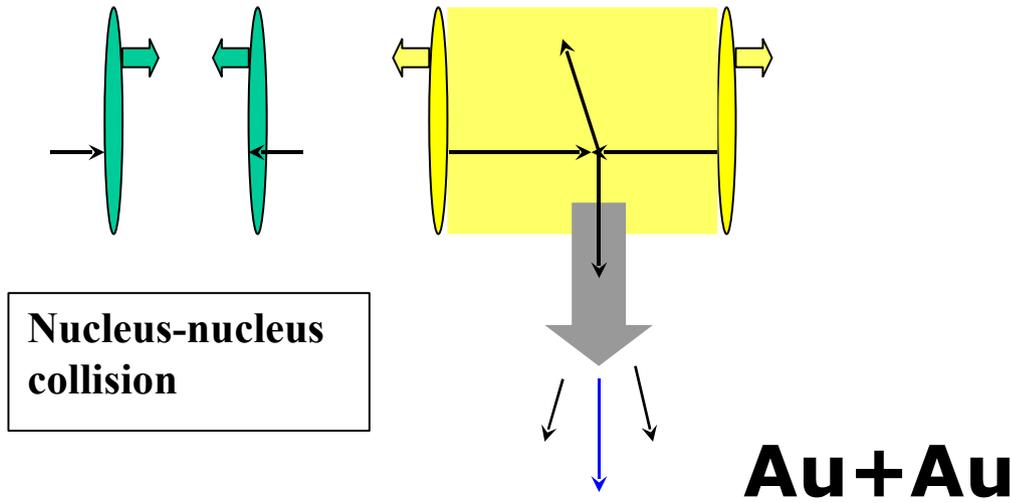
— QGP は見つかったか？
— ジェット抑制と楕円型フロー —

QGP 生成のシグナル

QGP が作られると何が起こるか？

- 初期の核子内のパートン (クォーク、グルーオン) の激しい散乱
 - QGP が生成されると、カラー電荷を持った粒子 (クォーク、グルーオン) が熱的に分布
 - **クォークやグルーオンがエネルギーを損失** (ジェット抑制、Jet Quenching)
c.f. 荷電粒子は電子と散乱してエネルギーを損失)
- 早い段階で熱平衡化
 - (熱平衡が仮定される) 流体力学的振る舞い





QGP 生成の実験的証拠 : ジェット抑制 (1)

■ 原子核抑制因子 R_{AB}
= 核子衝突と比べた粒子生成率

$R_{AB} \geq 1$ (抑制なし)

$R_{AB} < 1$ (抑制あり)

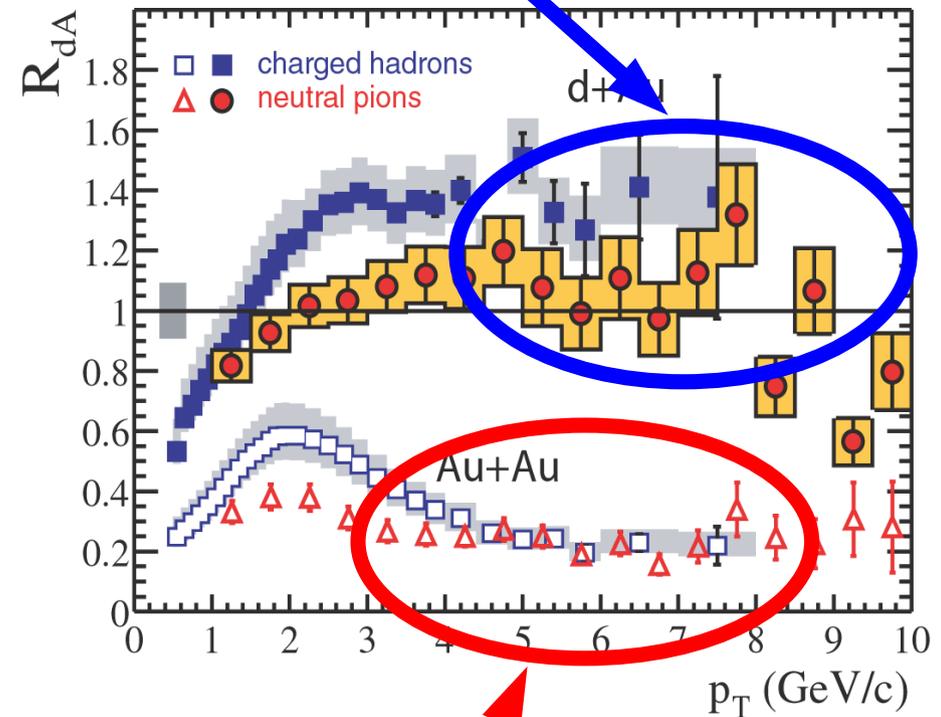
$$R_{AB}(p_T) = \frac{d^2 N / dp_T d\eta}{T_{AB} d^2 \sigma^{pp} / dp_T d\eta}$$

■ 本当にジェット抑制は見えるか？

- d+Au 衝突では No !
- 大きな原子核衝突では Yes !

■ エネルギー密度が大きくなったとき
だけ、ジェット抑制が起こる
→ QGP の形成

d + Au: Initial State Effects

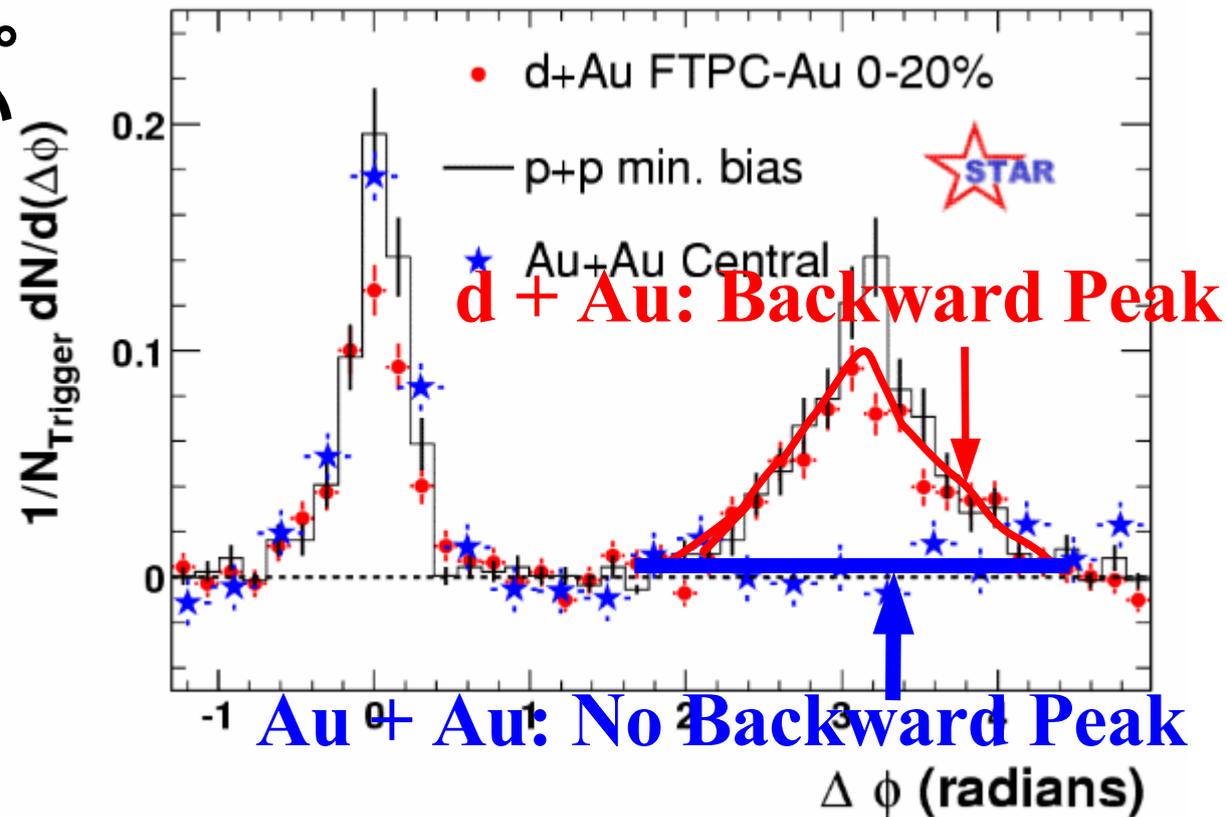
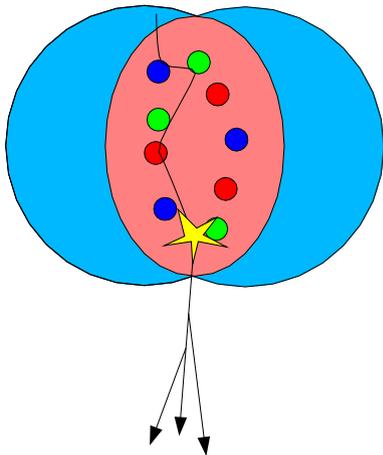


Au + Au: Initial State
+ Final State Effects

QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制 (2)

STAR

- ジェットが消えているなら、裏側の相関が消えるはず。
 - d+Au では消えていない
 - Au+Au では消える



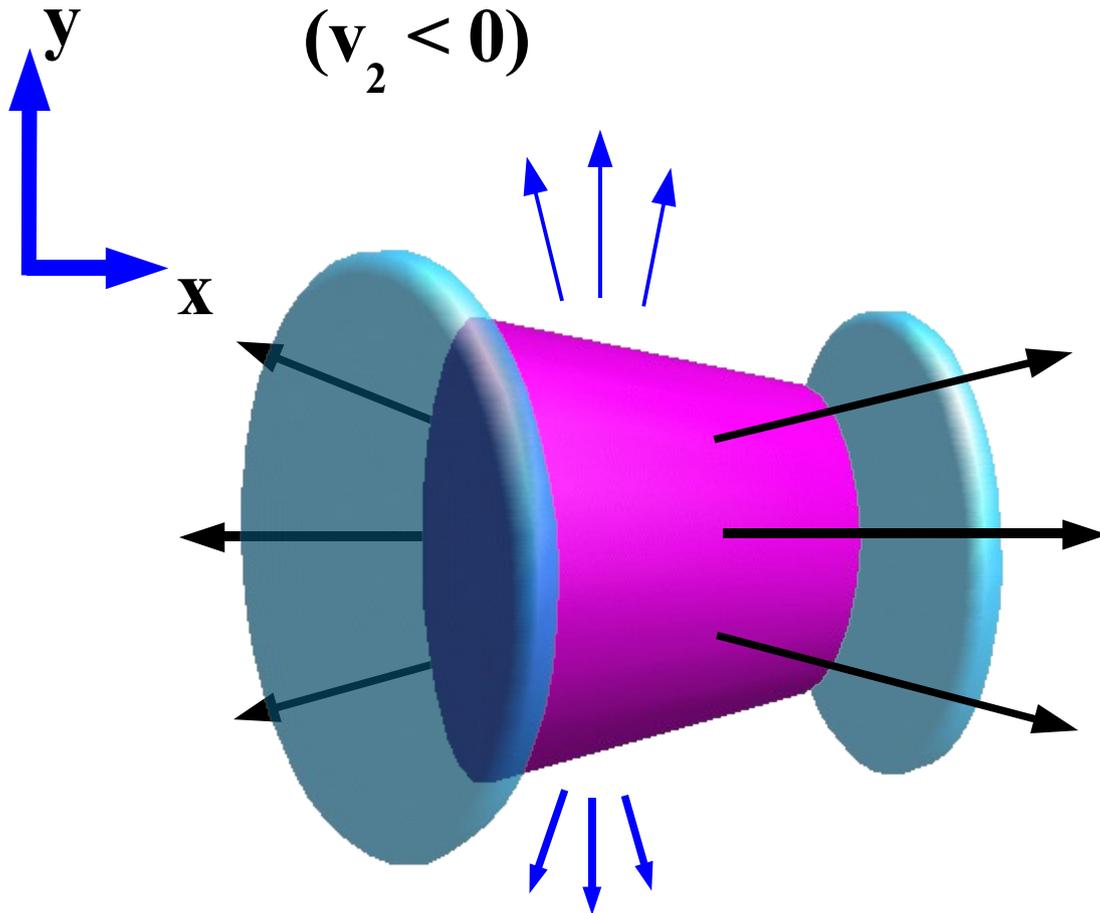
ジェットが抑制されると、裏側の相関が見えなくなる
→ ジェットが一本しか見えない
→ QGP 生成のシグナル

QGP 生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー (1)

- 楕円型フロー = 運動量の方位角異方性
 - 反応初期の「空間異方性」が起源
→ 圧力勾配が作られる熱平衡化の速さに依存

Out-of-Plane Flow

($v_2 < 0$)



$$v_2 \equiv \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right\rangle = \langle \cos 2\phi \rangle$$

In-Plane Flow

($v_2 > 0$)

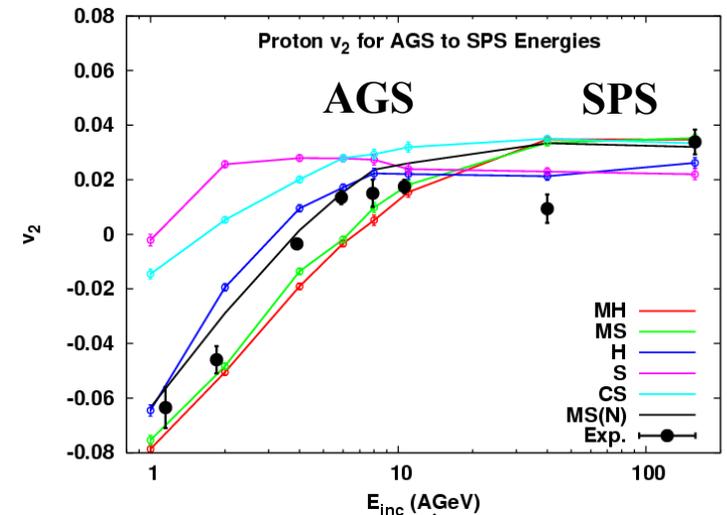
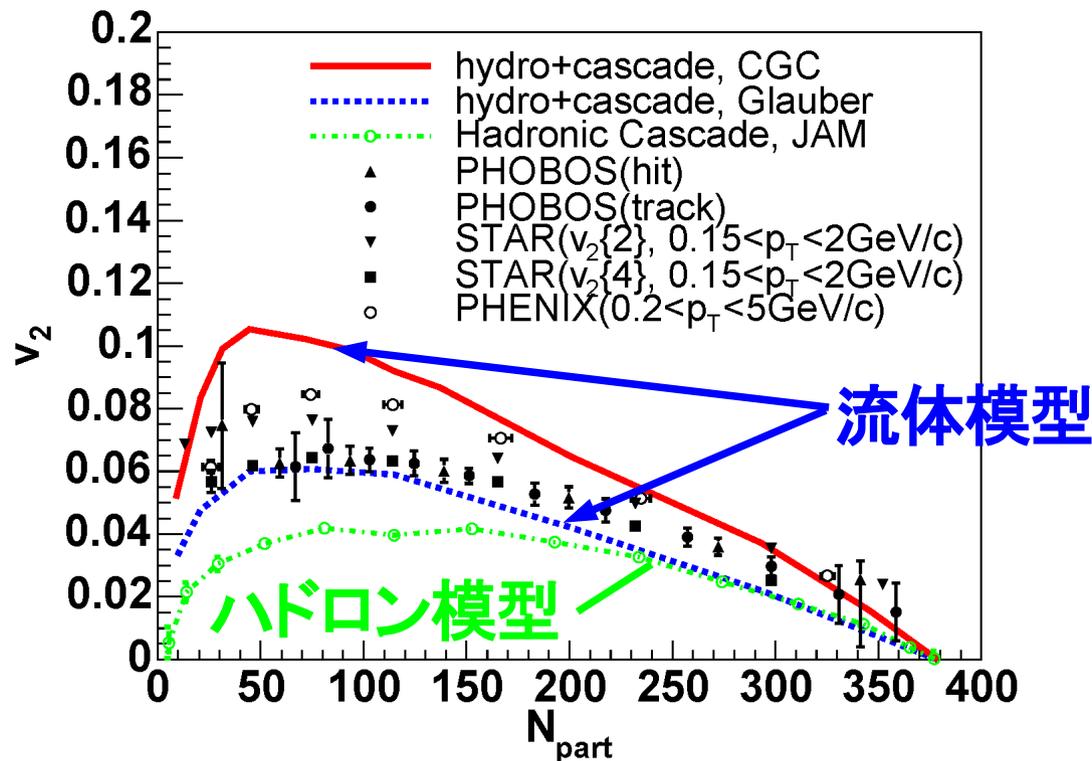
QGP 生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー (2)

■ RHIC エネルギーでは強い楕円型フローが見られる

- Au+Au: $v_2(\text{Casc.}) < v_2(\text{hydro}) \sim v_2(\text{data})$

➢ QGP 生成を仮定した流体力学模型と無矛盾

- 低いエネルギーを説明するハドロン模型とは矛盾



低いエネルギーでの結果
→ハドロン模型の範囲内

Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara,
PRC 72 ('05), 064908

QGP 物性の探求へ向けて

QGP を記述するシミュレーション手法

- **格子 QCD 計算 = 量子色力学 (QCD) に基づく第一原理計算**
 - 時間・空間を 50^4 程度の格子で表現した「場の理論」
 - 現時点では「静的」で「化学ポテンシャル ≈ 0 」の物性のみ
 - 世界的に大きな計算機でのパワー競争 (KEK, BNL, Bielefeld, ...)
→ 地球シミュレータも利用されている
- **流体力学 = QGP 生成反応で最も成功しているダイナミクス**
 - 3+1 (空間、時間) 次元での現実的計算が既に行われている
 - ワークステーションでも計算可能
 - 局所平衡は仮定、粘性は無視(あるいは摂動的取り扱い)
 - 初期条件は他の模型の結果を利用
- **ジェット生成 = 摂動論的 QCD に基づくパートンのダイナミクス**
 - シミュレーションに利用可能なイベント・ジェネレータが整備されている

簡単な仮定のもとで “大雑把な性質” の解明はすすんだが....

多くのパズルが残されている...

- 例 1: 相対論的な「粘性流体方程式」
→ 共変な定式化さえ、きちんとできていない
- 例 2: 高い運動量領域での楕円型フローのデータ
→ 幾何学的な「極限」を越えている！
- 「極限越え」の例：ジェットと流体パートンの融合によるストリング生成

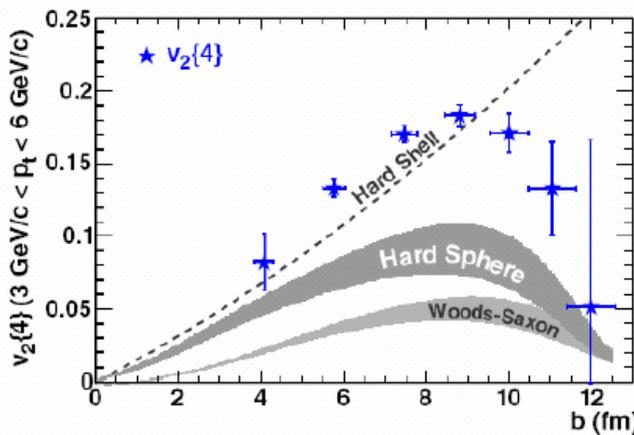
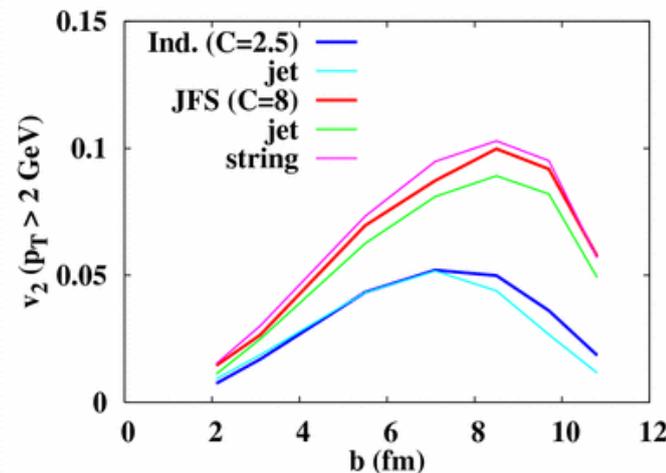
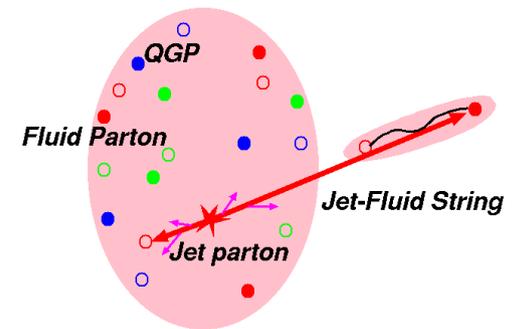


FIG. 4 (color online). v_2 at $3 \leq p_T \leq 6$ GeV/c versus impact parameter, b , compared to models of particle emission by a static source (see text).



Hirano, Isse, Nara, AO, Yoshino, in prep.



STAR, PRL93, 252301('04)

粘性 (非完全流体)、非平衡過程

→ より高いエネルギーの原子核衝突 (LHC, 2008 稼働) では重要

Summary

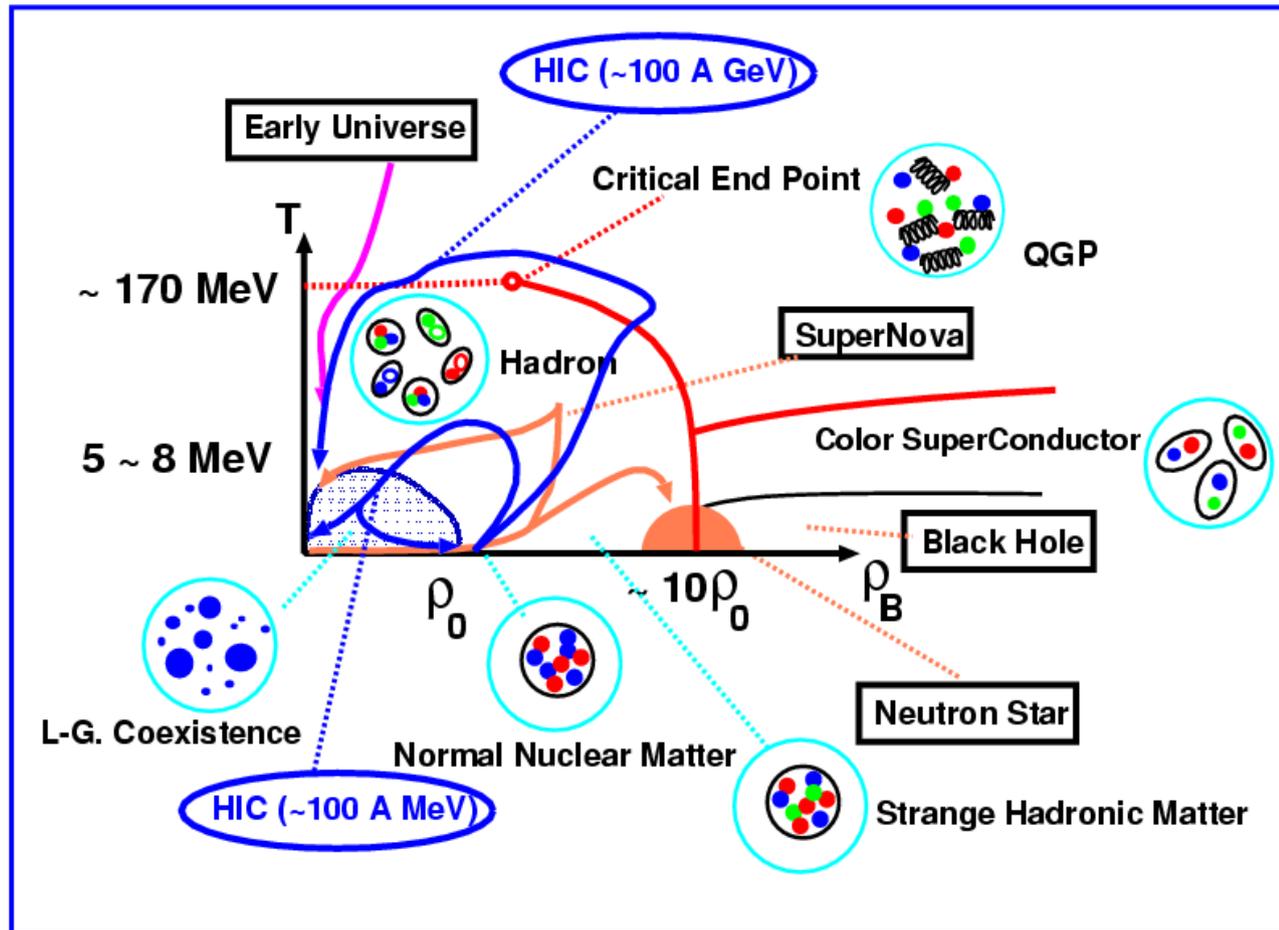
- **高エネルギー原子核衝突におけるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成**
 - ≈ **地上における小さなビッグバン (Little Bang)**
 - ≈ **宇宙最後の真空相転移のシミュレーション**
 - 2000年6月稼働のRHICで人類は(おそらく)初めて生成(21世紀に間に合いました!)
 - **QGP 生成のシグナル**
 - 「ジェット抑制」と「強い楕円型フロー」はハドロン模型で説明不可
 - 他にも楕円型フローのクォーク数スケーリング等のシグナルあり
 - **原子核物理学におけるシミュレーション計算**
 - **第一原理的: 格子 QCD、少数系構造計算、....**
 - **模型的: 流体力学、ジェット流体相互作用、粒子シミュレーション、模型波動関数を用いた核構造計算、....**
- 強い相互作用(クォークや核子間の力)の多くの側面は未解明
「方程式」自体の開発と模型的計算はまだまだ必要

Backup

まとめ

- 原子核物理学における最近の話題のうち、2つについて解説
 - 「クォーク・グルーオン・プラズマの生成」
 - 「超重元素の生成」
- クォーク・グルーオン・プラズマ
 - QGP への相転移 = 自由度変化
 - QGP は作られているようだ。その物性はまだまだ？だらけ。
- 超重元素
 - 欧米以外で初めての超重元素生成に成功
 - 宇宙での重い元素の生成機構解明に光
 - 現在建設中の加速器により、超重元素を含む 1000 個程度の新しい原子核が作られる予定
(これまで見つかっている原子核 = 約 2000 種類)
- 実験・理論ともに研究対象を広げている。

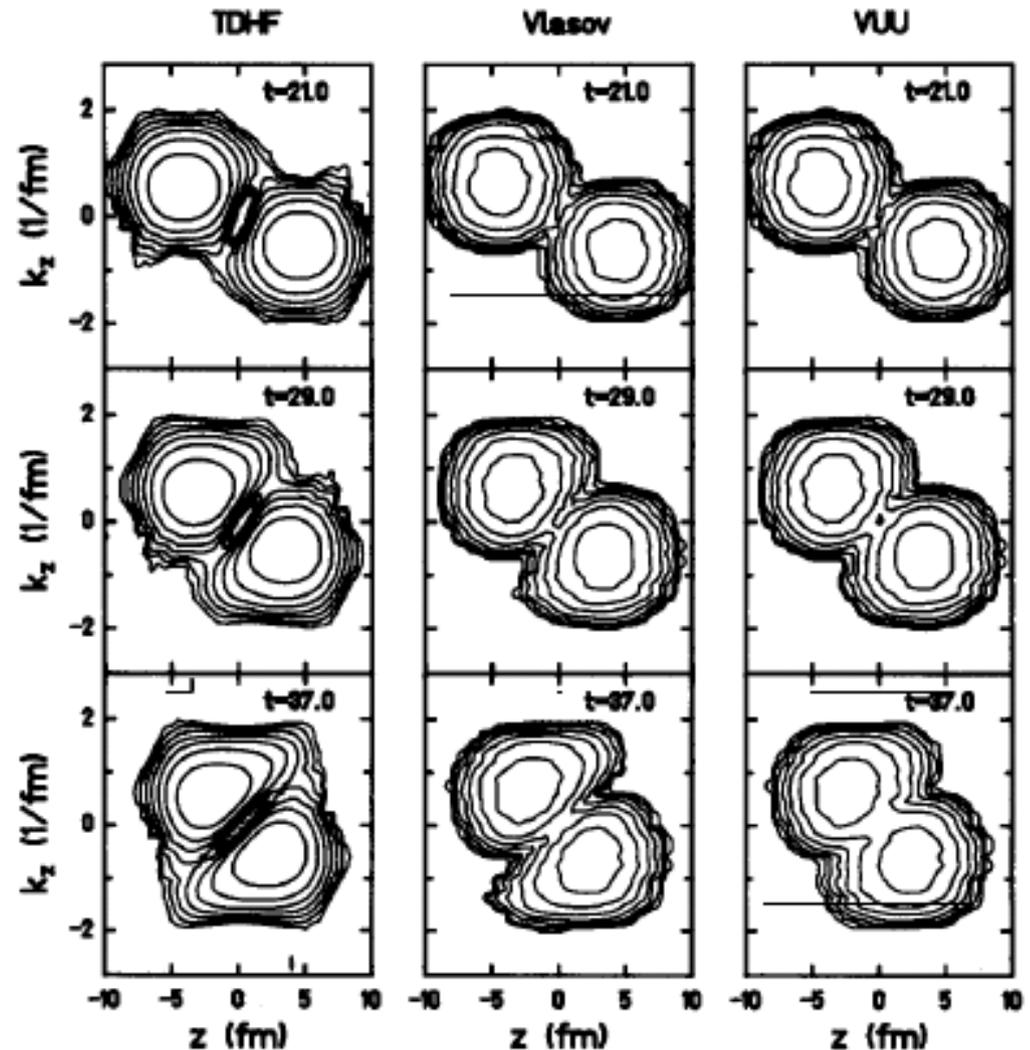
Hadronic Matter Phase Diagram



HIC (\sim A few 100 A MeV) = Little Supernova
HIC (100+100 A GeV) = Little Big Bang

Comparison of TDHF, Vlasov and BUU(VUU)

- Ca+Ca, 40 A MeV
(Cassing-Metag-Mosel-Niita, Phys. Rep. 188 (1990) 363).



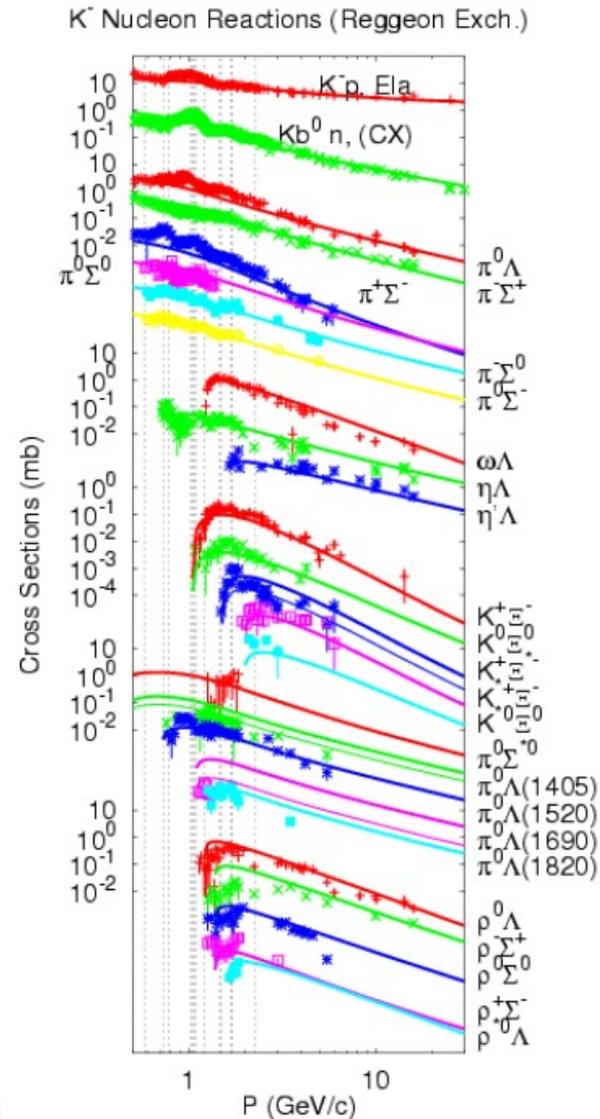
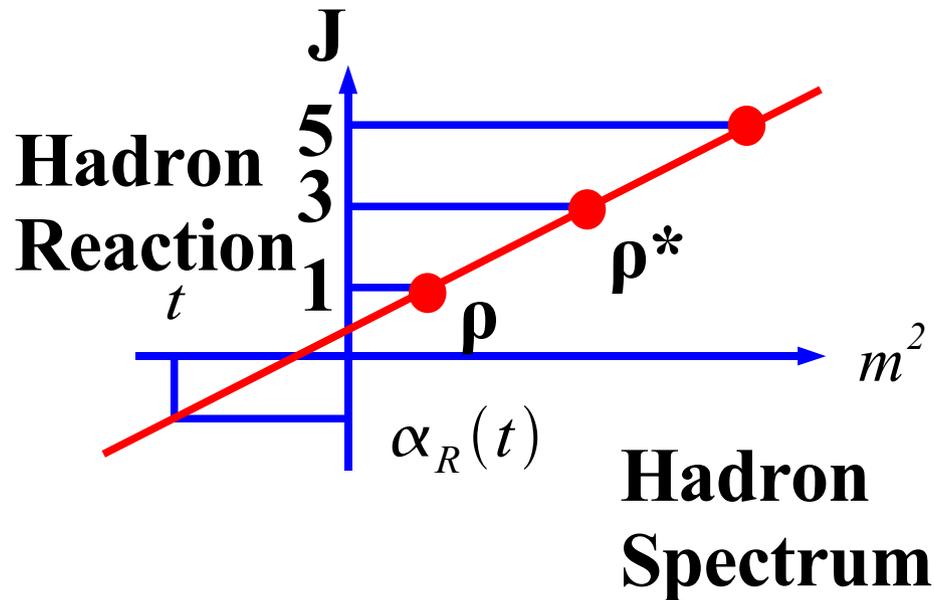
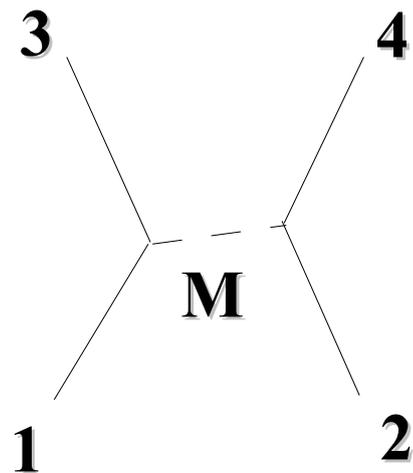
Reggeon Exchange

(Barger and Cline (Benjamin, 1969), H. Sorge, PRC (1995), RQMD2.1)

- Regge Trajectory $J = \alpha_R(t) \sim \alpha_R(0) + \alpha'_R(0)t$
- 2 to 2 Cross Section

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{p_f}{64\pi s p_i} |M(s, t)|^2$$

$$M(s, t) \sim \sum_R \frac{(p_i p_f)^J}{t - M_R} \sim F(t) \exp[\alpha_R(t) \log(s/s_0)]$$



String formation and decay

- What does the regge trajectory suggest ?
→ Existence of (color- or hadron-)String !

$$M = 2 \int_0^R \frac{\kappa dr}{\sqrt{1-(r/R)^2}} = \pi \kappa R, \quad J = 2 \int_0^R r \times \frac{\kappa dr}{\sqrt{1-(r/R)^2}} \frac{r}{R} = \frac{\pi \kappa R^2}{2} \pi$$

$$\rightarrow J = \frac{M^2}{2\pi\kappa}$$

- String Tension

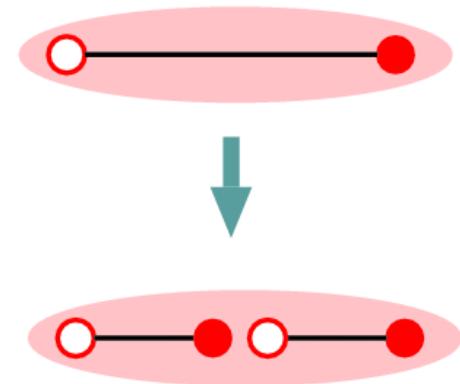
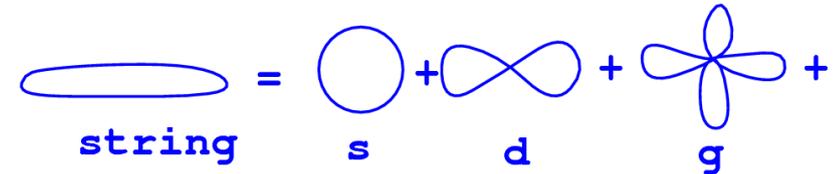
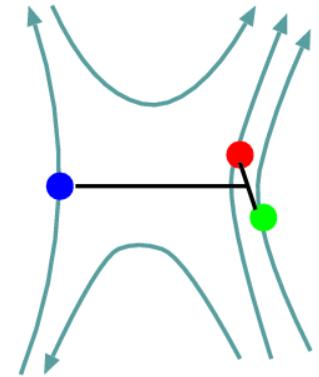
$$\frac{1}{2\pi\kappa} = \alpha'_R(0) \approx 0.9 \text{ GeV}^{-2} \rightarrow \kappa \approx 1 \text{ GeV/fm}$$

- String decay

Extended String

→ Large E stored

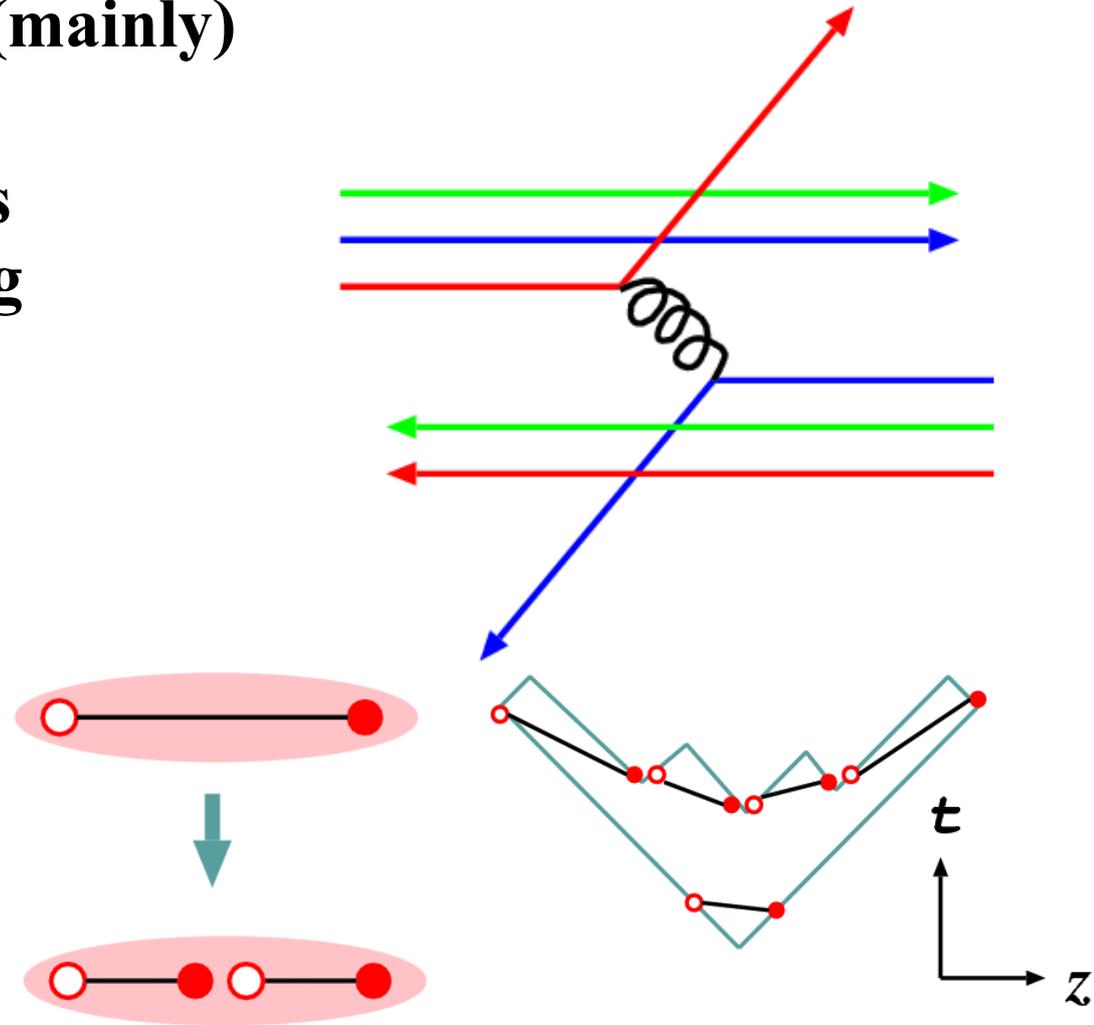
→ q qbar pair creation (Schwinger mech.)



String = Coherent superposition of hadron resonances with various J

Jet Production

- Elastic Scattering of Partons (mainly) with One Gluon Exch.
- Color Exch. between Hadrons
 - Complex color flux starting from leading partons
 - many hadron production
 - Jet production
- **PYTHIA**
 - Event Generator of High Energy Reactions
 - Jet production +String decay for QCD processes



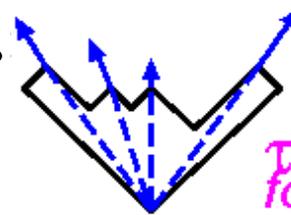
(T. Sjostrand et al., *Comput. Phys. Commun.* 135 (2001), 238.)

JAM (Jet AA Microscopic transport model)

Nara, Otuka, AO, Niita, Chiba, Phys. Rev. C61 (2000), 024901.

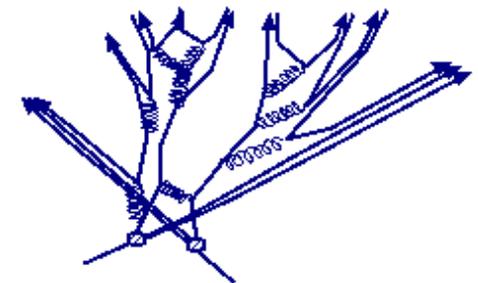
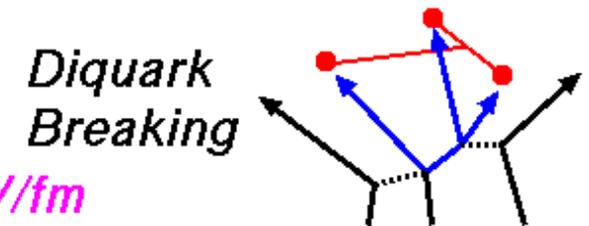
■ Hadron-String Cascade with Jet production

- hh collision with Res. up to $m < 2 \text{ GeV}$ (3.5 GeV) for M (B)
- String excitation and decay
- String-Hadron collisions are simulated by hh collisions in the formation time.
- jet production is incl. using PYTHIA
- Secondary partonic int. NOT incl.
- Color transparency: NOT taken care of



$\tau \sim 1 \text{ fm}/c$
for $\kappa \sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}$

Resonance
+ String
+ Jet



Relativistic Hydrodynamics

Relativistic Hydrodynamics

■ EOM: Conservation Laws

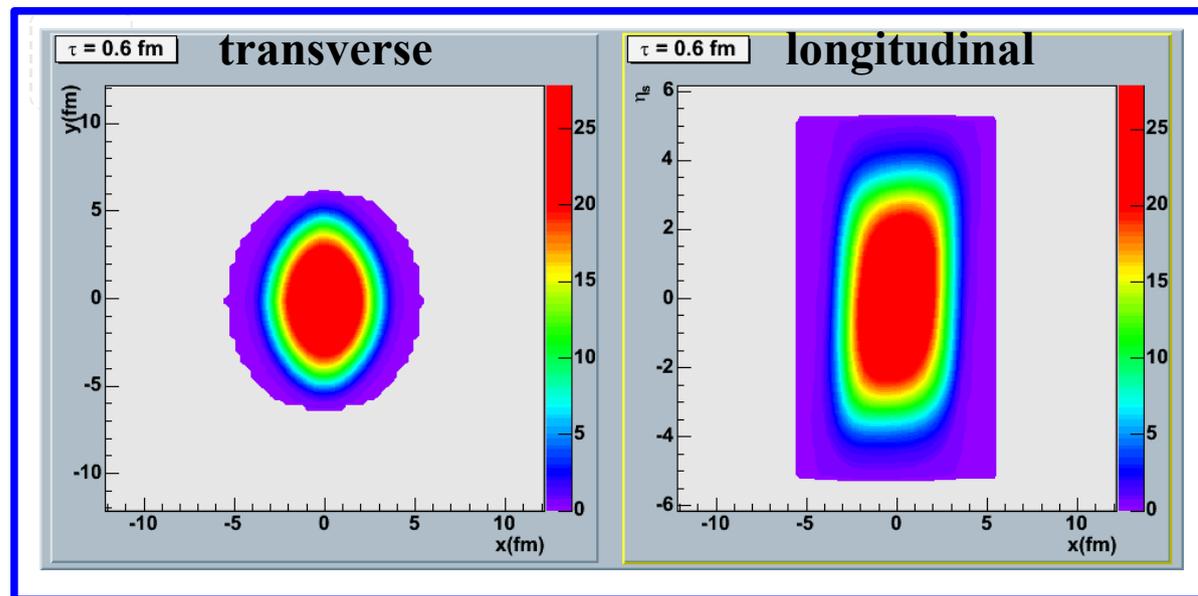
$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$ Energy Momentum Conservation

$\partial_\mu n_i u^\mu = 0$ Conservation of Charge (Baryon, Strangeness, ...)

$$T^{\mu\nu} = (e + P)u^\mu u^\nu - Pg^{\mu\nu}$$

e : energy density, P : pressure,

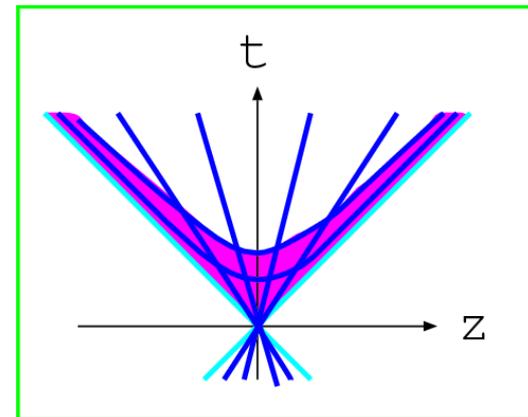
u^μ : four velocity $\gamma(1, \mathbf{v})$, n_i : number density



T. Hirano, Y. Nara,
Nucl. Phys. A743, 305 (2004)
T. Hirano, K. Tsuda,
Phys. Rev. C 66, 054905(2002)

Relativistic Hydrodynamics (II)

- One more condition is necessary
 - *Equation of State* $P = P(e, n_i)$ is needed
 - Independent Variables: $e, P, v, n_i \rightarrow 6$
 - Independent Equations: $4+1 = 5$
- Solve Hydro. in Bjorken Variables $(\tau, \eta_s, x, y) \rightarrow$ Save CPU a lot !
 - Most of the Dynamics is governed by τ during $\tau < 10 \text{ fm}/c$
 - η_s approximately corresponds to η , and fixed by inc. E.
- Parameters
 - τ_0 (Thermalization time), T^{ch} (chemical F.O.) \rightarrow Au+Au $dN/d\eta$ fit
 - **T^{th} : Free Parameter**
- Initial Condition: Glauber type or Color Glass Condensate

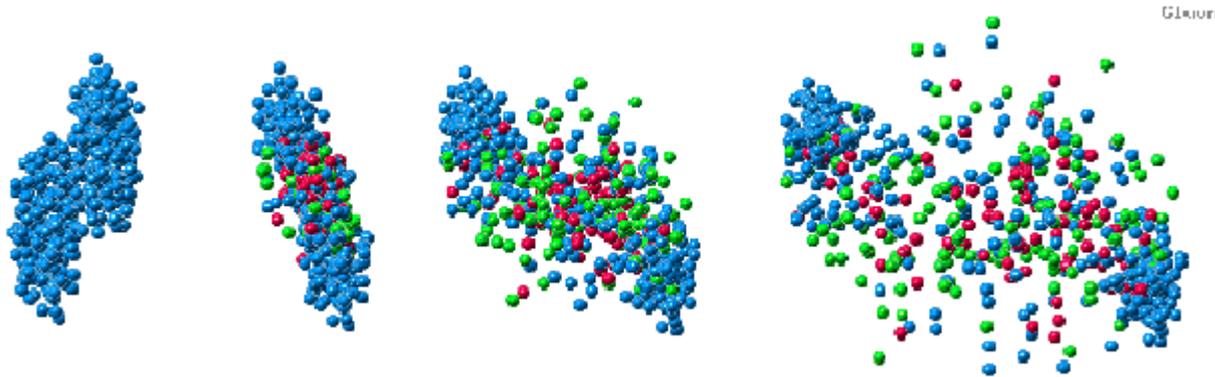


*Collective Flows
at AGS and SPS Energies*

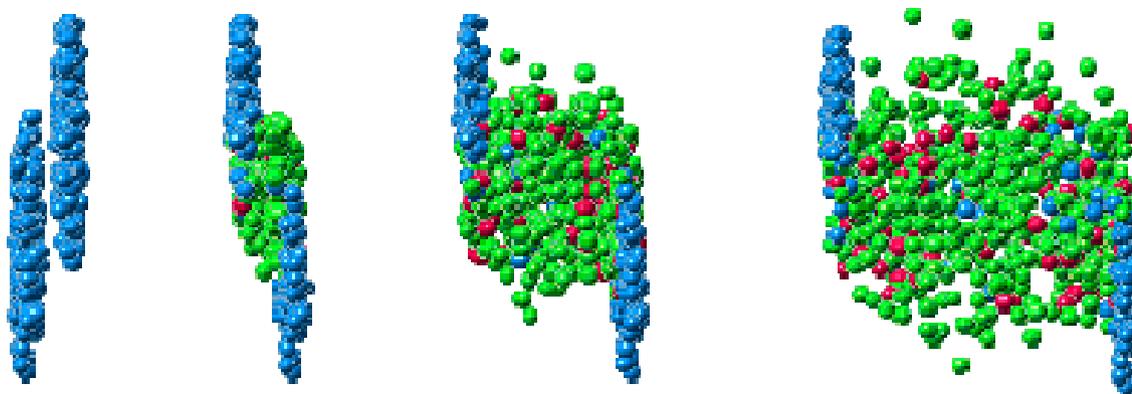
HIC at AGS and SPS Energies

JAMming on the Web, linked from <http://www.jcprg.org/>

AGS

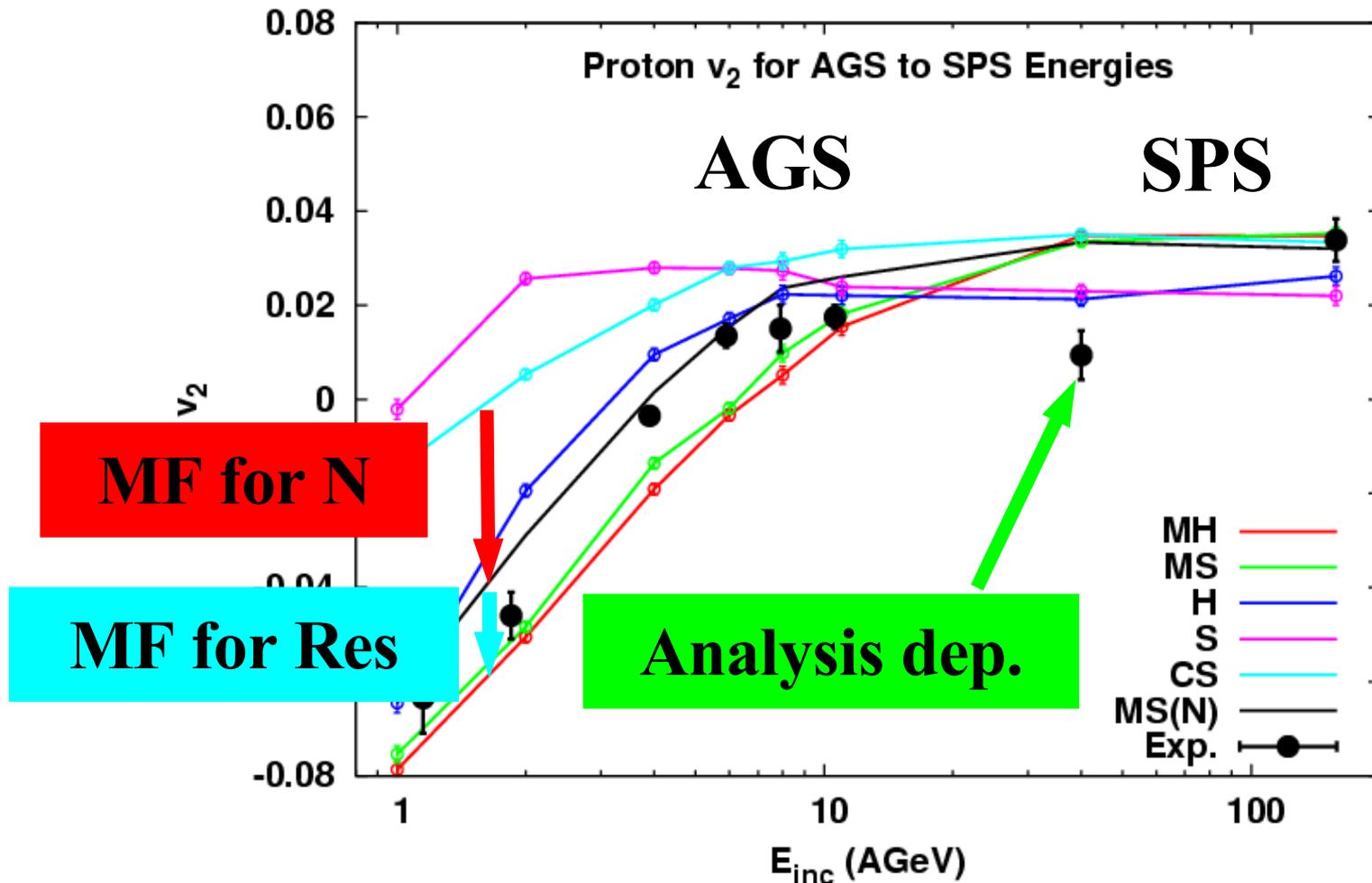


SPS



Elliptic Flow from AGS to SPS

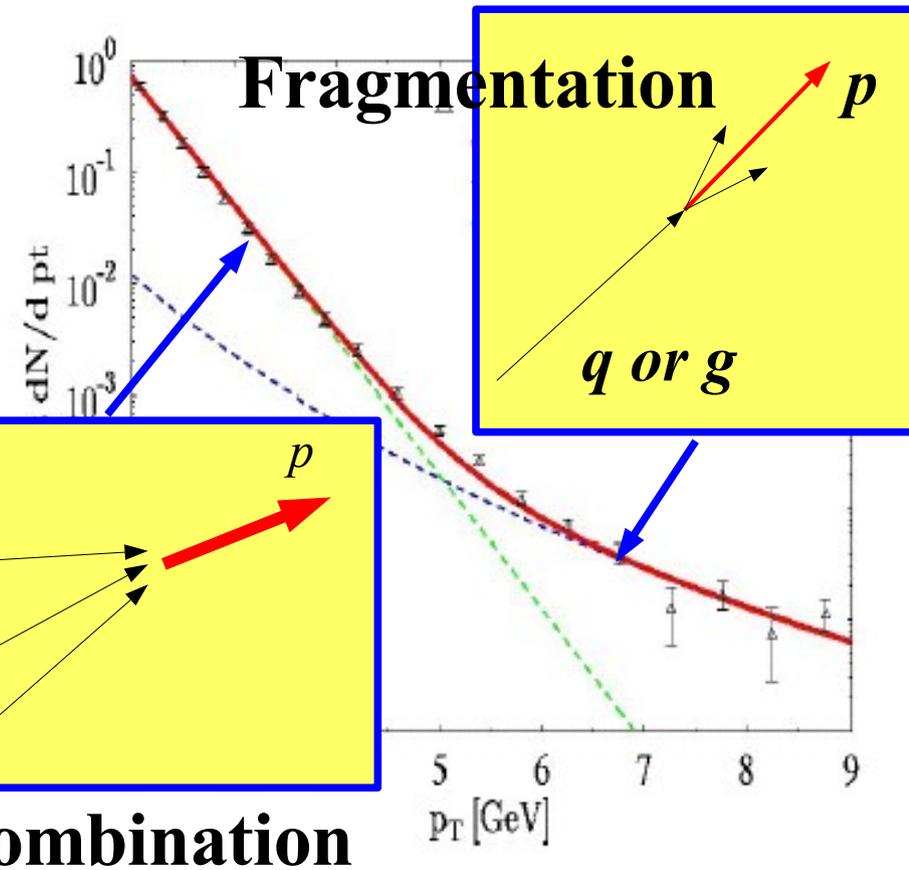
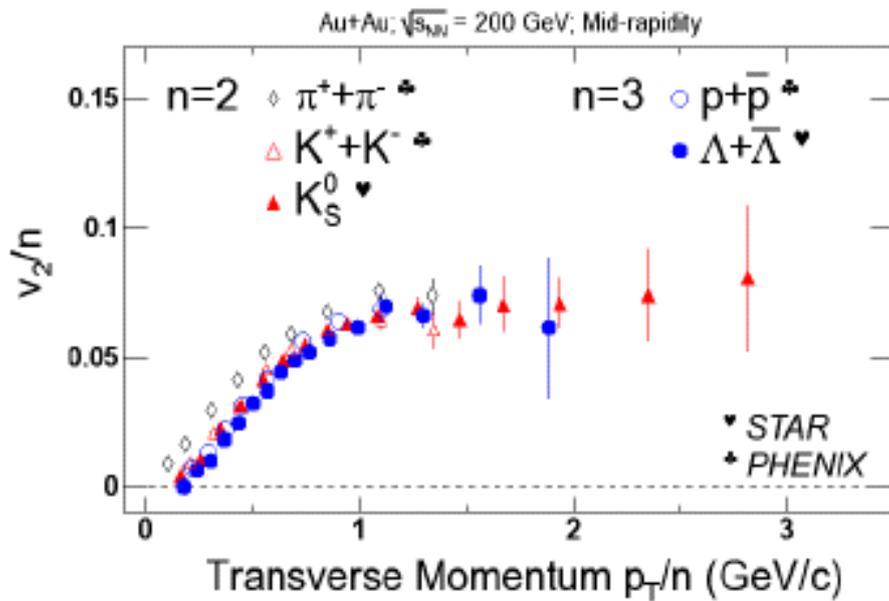
- JAM-MF with p dep. MF explains proton v_2 at 1-158 A GeV
 - v_2 is not very sensitive to K (incompressibility)
 - Data lies between MS(B) and MS(N)



QGP Signals (III): Quark Number Scaling

- When n quarks recombines to a hadron, v_2 is enhanced by n times.

$$v_2^{Hadron}(P_T) = n v_2^{Parton}(P_T/n)$$



Fries et al. PRL 90 (2003), 202303
 Nonaka et al., nucl-th/0308051

*Recombination Picture seems to work well
 ... Parton Elliptic Flow*

When and where is QGP formed ?

■ Incident Energy

- AGS: Strangeness Enh. (High baryon ρ effect ?)
- SPS:
 - J/ ψ suppression (QGP?), Low mass dilepton enh. (chiral sym.)
 - Hydro overestimate v_2 data
- RHIC:
 - Jet quenching, Strong v_2 , Quark number scaling of v_2 , ...
 - Hadronic Cascade underestimate v_2 data
 - Bulk QGP formation seems to start between SPS and RHIC

■ Proj./Targ. Mass dependence

- Au+Au: $v_2(\text{Casc.}) < v_2(\text{hydro}) \sim v_2(\text{data})$
- Cu+Cu: Recently Measured

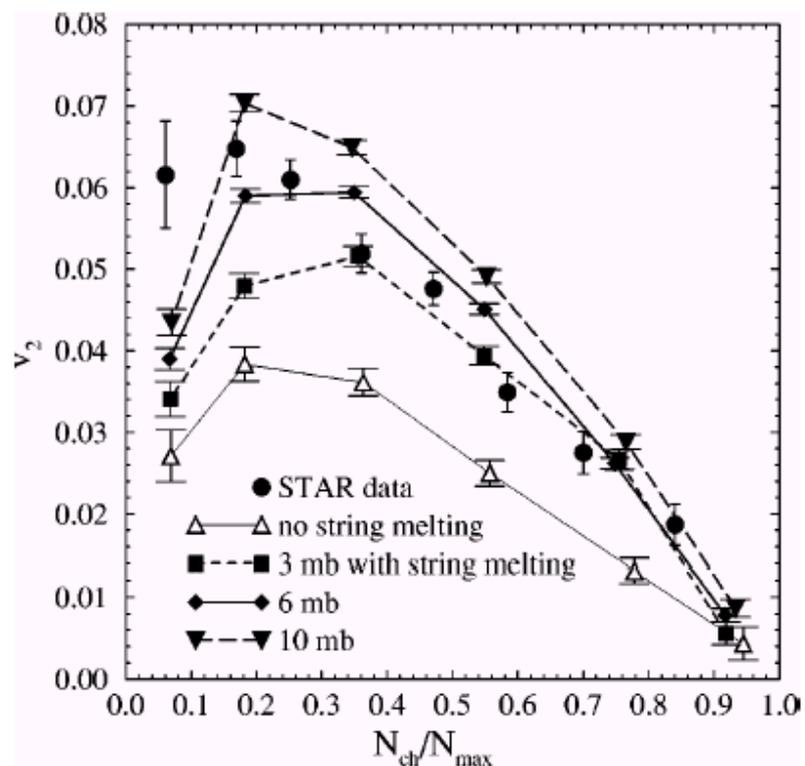


FIG. 3. Impact parameter dependence of elliptic flow at 130 A GeV. The data from the STAR collaboration [7] are shown by filled circles, while the theoretical results for different partonic dynamics are given by curves.

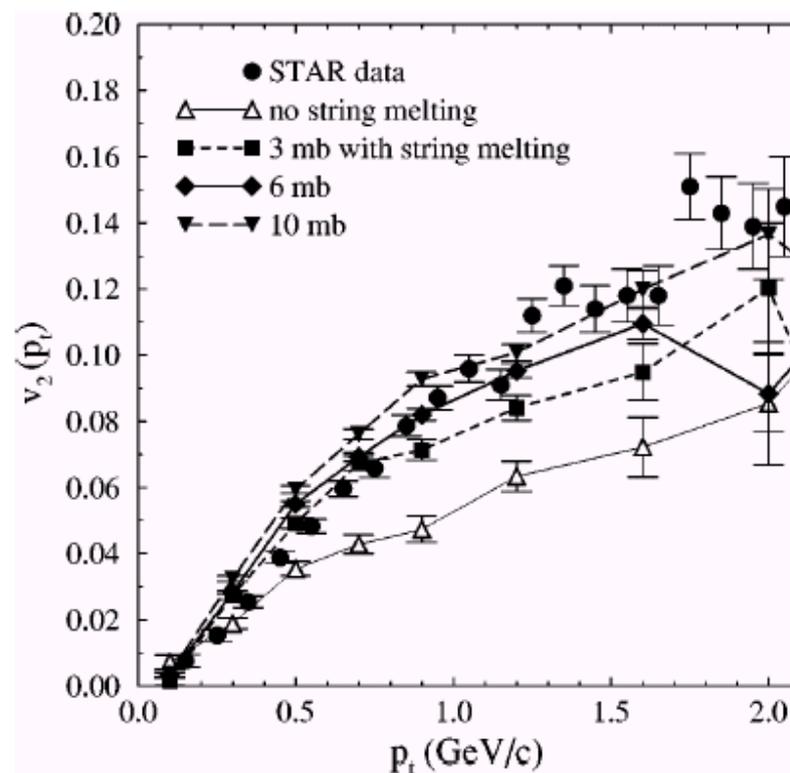


FIG. 4. Transverse momentum dependence of elliptic flow at 130 A GeV. Circles are the STAR data for minimum-bias Au+Au collisions [7], and curves represent the minimum-bias results for charged particles within $\eta \in (-1.3, 1.3)$ from the AMPT model.

Unexpectedly high parton cross sections of $\sigma=5-6$ mb have to be assumed in parton cascades in order to reproduce the elliptic flow.

Predictions of Cu+Cu Collisions @ RHIC (I)

■ Single particle spectra

- Cascade (JAM) and Hydro predict almost the same single particle spectra

$$dN/d\eta, d^2N/p_T dp_T d\eta$$

■ Surprising ?

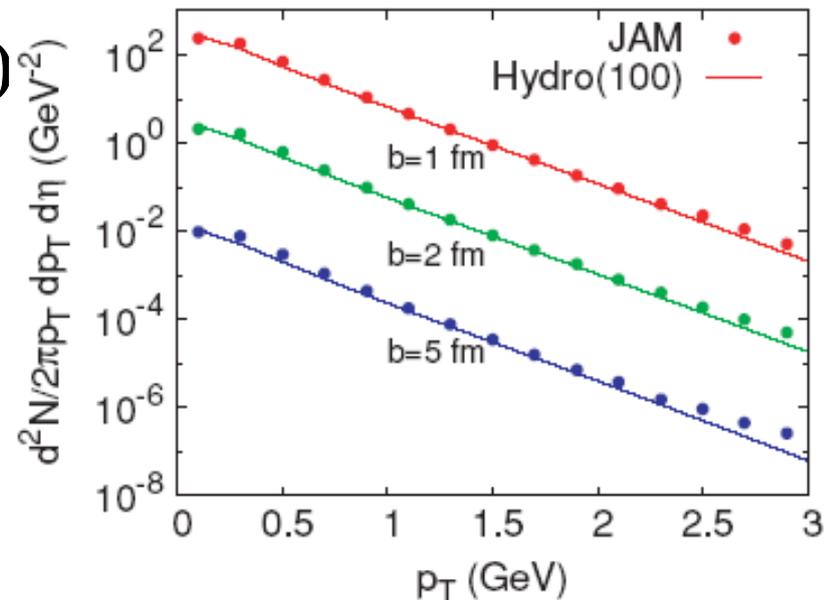
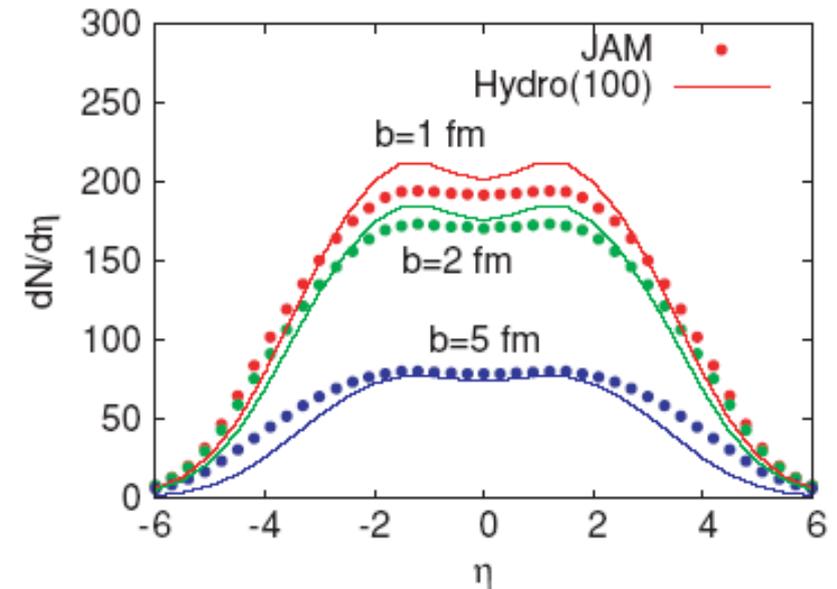
- Initial Cond. of Hydro is tuned to fit $dN/d\eta$ (\sim Energy per rapidity)

- Cascade use fitted σ_{NN}

- Thermalization is expected at Low p_T (long time before particle production)

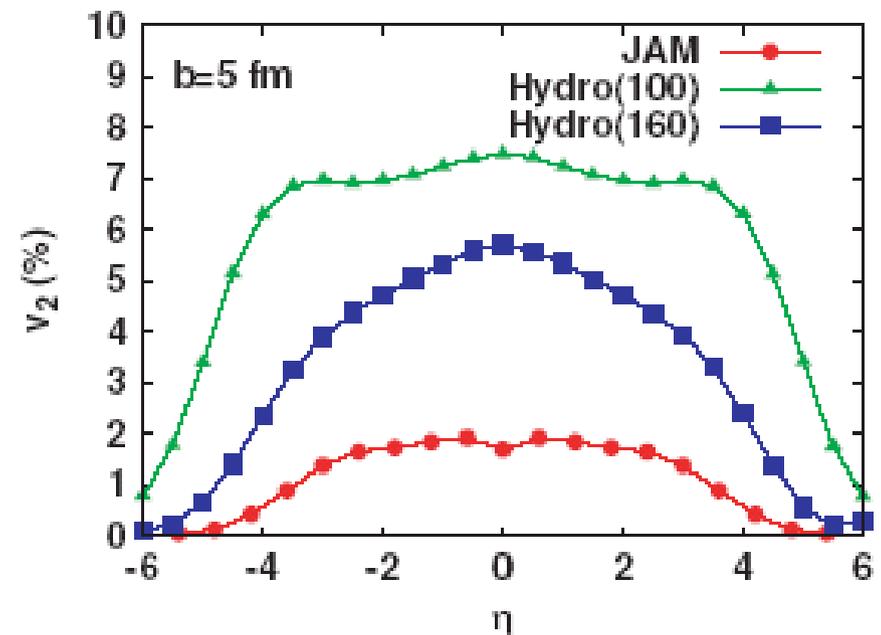
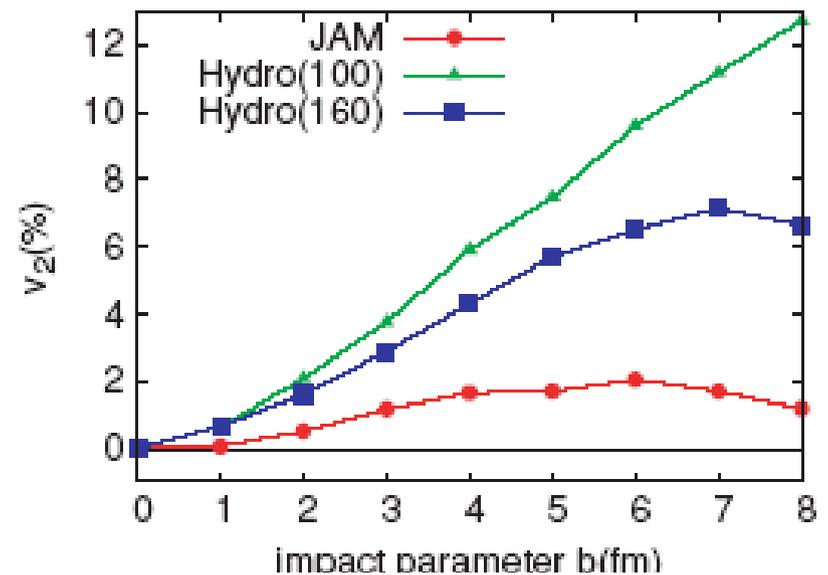
→ Coincidence may not be

surprising *Hirano, Isse, Nara, AO, Yoshino, Phys. Rev. C 72(2005), 041901*

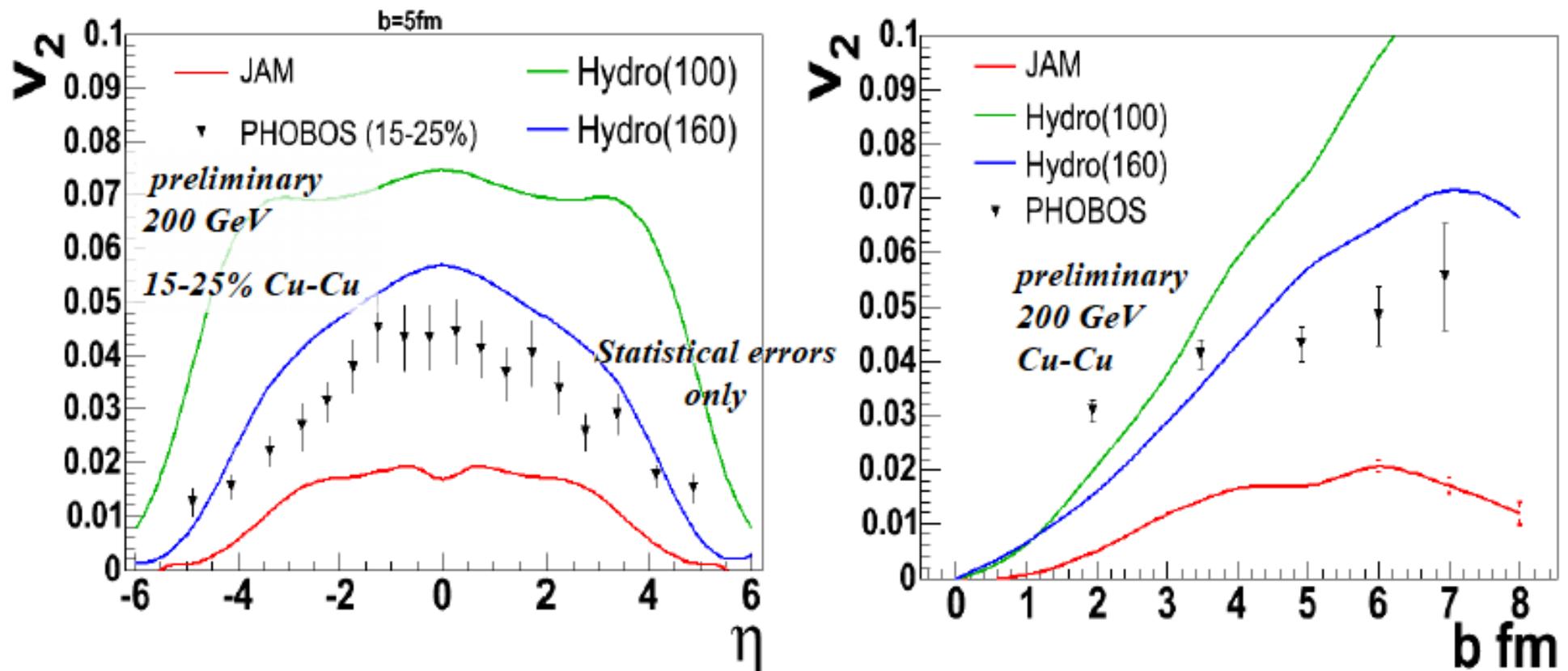


Predictions of Cu+Cu Collisions @ RHIC (II)

- Calculations were done **BEFORE** the data are opened to public.
- Cascade and Hydro predict very different Elliptic Flow !
 - Cascade: small v_2
→ Small int. in the early stage
 - Hydro: large v_2
→ Strong int. after $\tau = \tau_0 \sim 0.6$ fm/c
- T^{th} dependence
 - $T^{\text{th}} = 160$ MeV $\sim T_c = 170$ MeV
→ short time of expansion in the hadron phase
 - $T^{\text{th}} = 100$ MeV $< T_c = 170$ MeV
→ long time of expansion



Compared to JAM Model

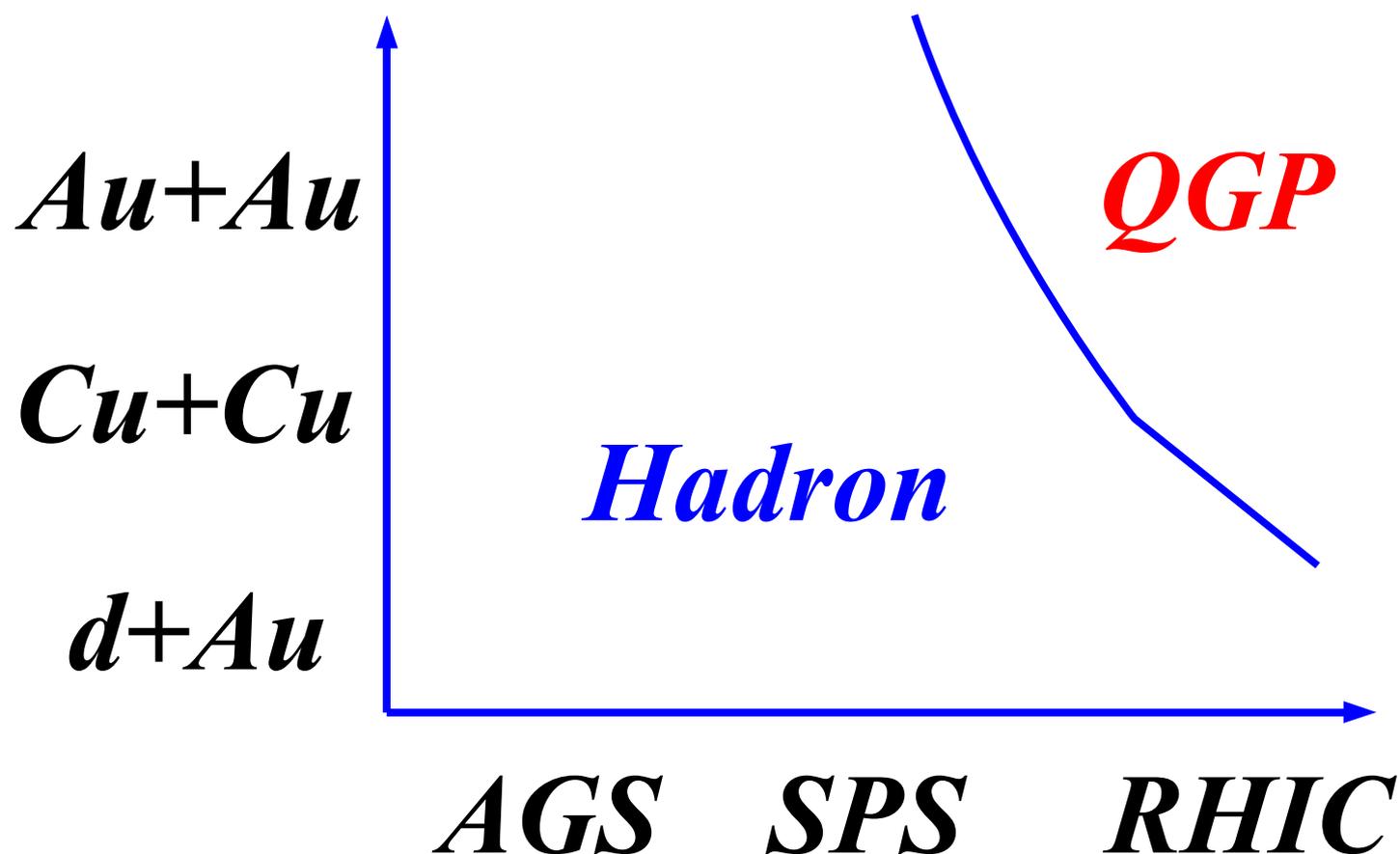


Cu-Cu more like Hydro than JAM hadron string cascade model

Here JAM uses a 1 fm/c formation time. Hydro (160) has kinetic freezeout temperature at 160 MeV

After Data are opened,

- Hydro wins Cascade at RHIC even for Cu+Cu collisions in the initial stage evolution.....
- “Reaction Phase Diagram” seems to be



*Jet-Fluid String Formation
and Decay at RHIC*

Hirano, Isse, Nara, AO, Yoshino, in preparation

Hadronization Mechanism at RHIC

- *High p_T : Indep. Frag. of Jet Partons (E.g. Hirano-Nara)*
 - Explains p_T spectrum when E-loss is included.
 - ✗ Elliptic Flow v_2 is small at high p_T ← *This Talk*
- *Medium p_T : Recombination (E.g. Duke-Osaka-Nagoya)*
 - Explains Baryon Puzzle and Quark Number Scaling of v_2
 - ✗ Entropy decreases in “ $n \rightarrow 1$ ” process
- *Low p_T : Equil. Fluid Hadronization (E.g. Hirano-Gyulassy)*
 - Explains p_T spec. and v_2 at low p_T
 - ✗ Results depends on the Freeze-Out Conditions

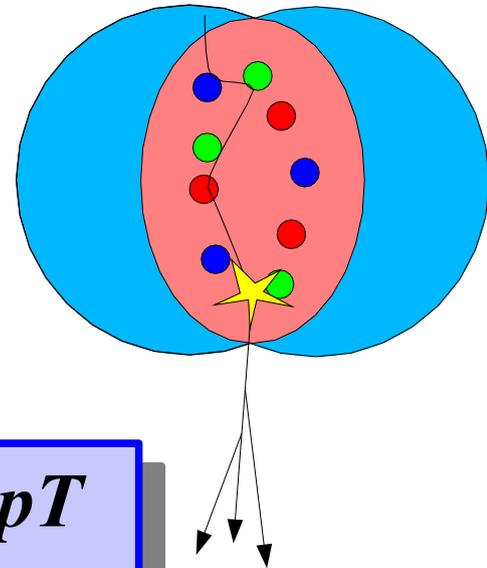
*QGP Signals are understood separately,
and they are not necessarily consistent.
→ Further Ideas are required !*

How can we get large v_2 at high p_T ?

- Quark Recombination → Combined Objects have larger v_2

$$f(p, \varphi) = (1 + 2 v_2(p/2) \cos \varphi) \times (1 + 2 v_2(p/2) \cos \varphi) \\ \approx 1 + 2 \times 2 v_2(p/2) \cos \varphi$$

- Energy Loss in QGP generates v_2
 - Large/Small suppression in y/x directions



Plausible Hadronization giving large v_2 at high p_T

- *Combination of several partons*
- *Large Energy Loss*
 - *Jet parton picks up Fluid parton and forms a string (Jet-Fluid String)*

Jet-Fluid String Formation and Decay

Jet production: pQCD(LO) \times K-factor (PYTHIA6.3, K=1.8, *pp* fit)

$$\sigma_{jet} = K \sigma_{jet}^{pQCD(LO)}$$

Jet propagation in QGP

3D Hydro + Simplified GLV 1st order formula $\times C$

(Hirano-Nara, NPA743('04)305, Hirano-Tsuda, PRC 66('02)054905. Web version!

Gylassy-Levai-Vitev, PRL85('00)5535)

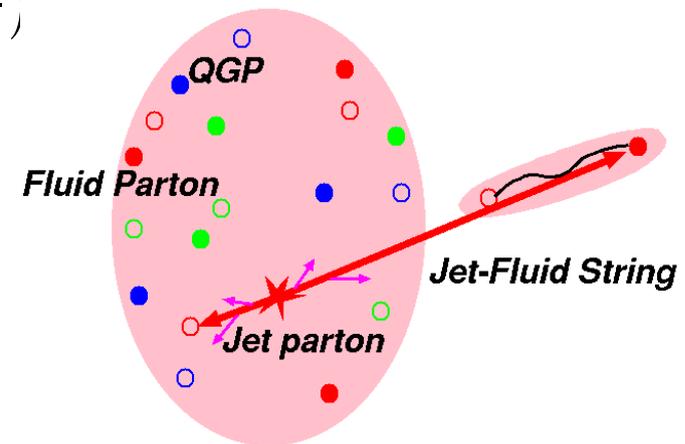
$$\Delta E = C \times 9 \pi \frac{\alpha_s^3}{4} C_R \int d\tau (\tau - \tau_0) \rho_{\text{eff}} \log\left(\frac{2 E_0}{\mu^2 L}\right)$$

Jet-Fluid String formation

Fluid parton breaks color flux,
according to string spectral func.

$$P(\sqrt{s}) \propto \Theta(\sqrt{s} - \sqrt{s_0}) \quad (\sqrt{s_0} = 2 \text{ GeV})$$

Only g and light q (qbar) are considered.



<http://nt1.c.u-tokyo.ac.jp/~hirano/parevo/parevo.html>

Package for QGP fluid evolution

**Space-Time Evolution of Parton Density
in Au+Au Collisions at RHIC
from a Full 3D Hydrodynamic Simulations**

A realistic space-time evolution of fluid parton density is indispensable for quantitative estimation of parton energy loss in relativistic heavy ion collisions. In this website, we make our hydro results open to public. We used these hydro results for studies of jet quenching and back-to-back correlations in the following papers:

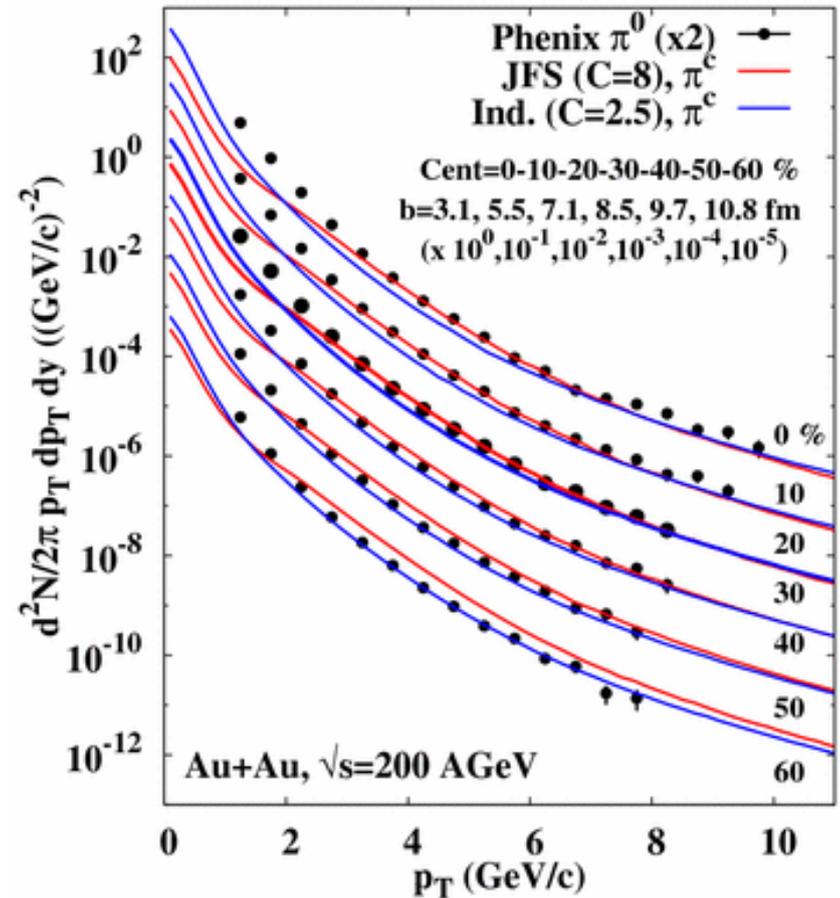
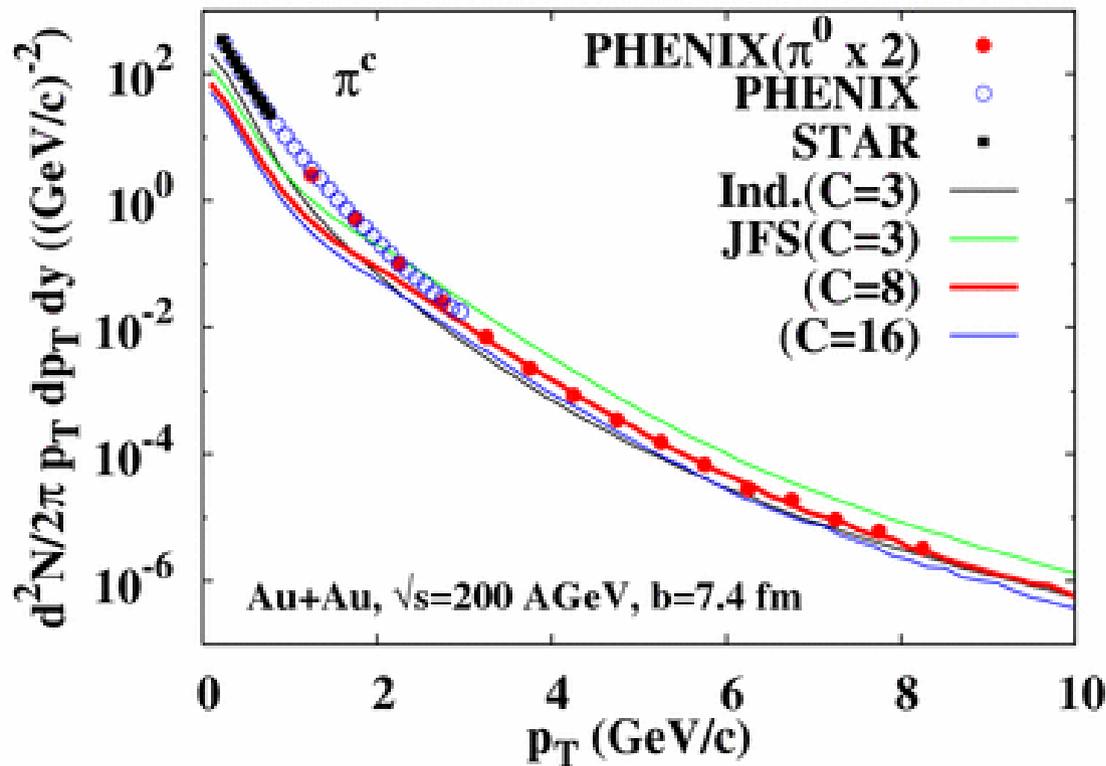
[T.Hirano and Y.Nara, Phys.Rev.Lett.91,082301\(2003\),](#)
[T.Hirano and Y.Nara, Phys.Rev.C69,034908\(2004\).](#)

Initial parameters in hydro are so chosen as to reproduce the pseudorapidity distribution observed by an experimental group. The resultant initial parameters are $E_{\text{max}} = 45 \text{ GeV}/\text{fm}^3$, $\eta_{\text{flat}} = 4.0$, $\eta_{\text{Gauss}} = 0.8$. For further details on initialization in our model, see

<http://nt1.c.u-tokyo.ac.jp/~hirano/parevo/parevo.html> Site Status Not Verified

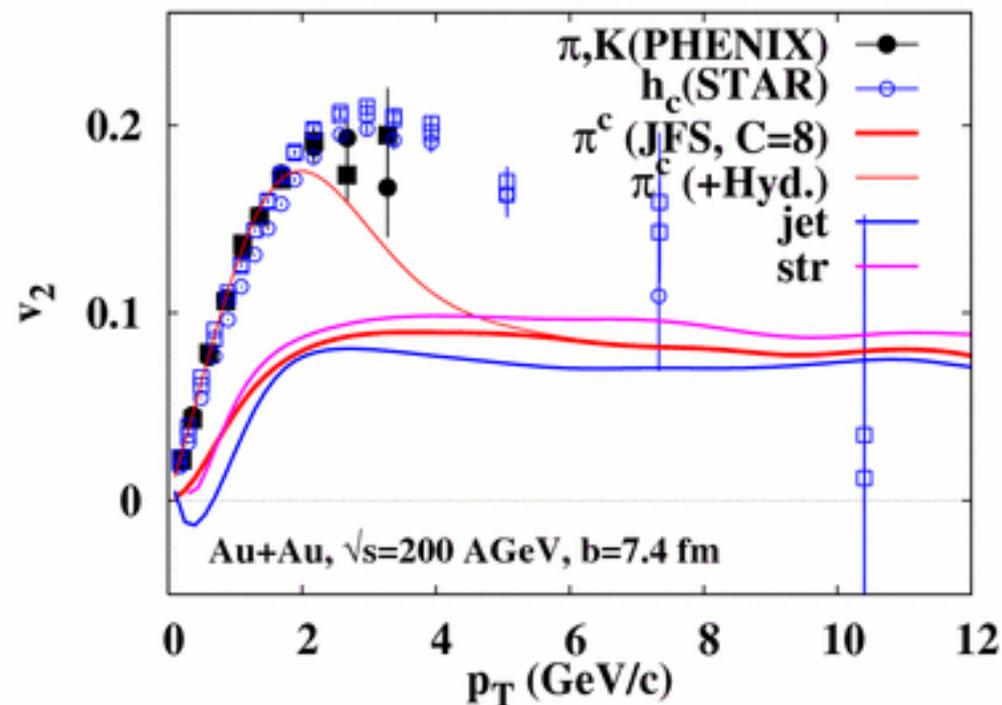
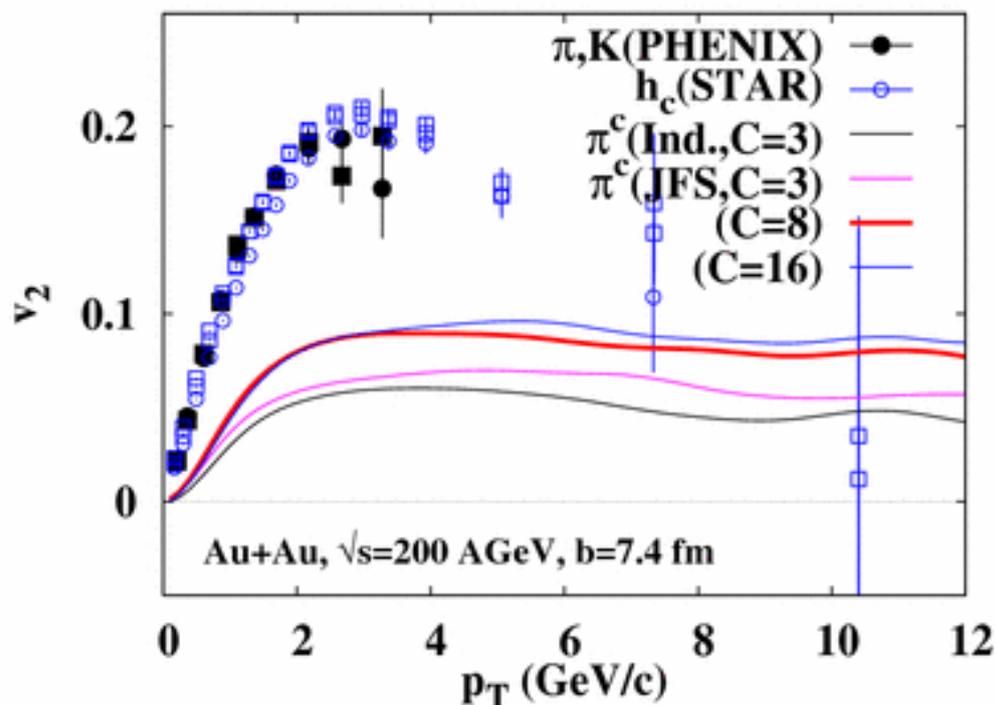
Energy Loss Factor C : p_T Spectrum Fit

- For the same $C \rightarrow dN_{JFS}(\text{high } p_T) > dN_{Ind}(\text{high } p_T)$
- p_T spec. fit \rightarrow Ind. Frag.: $C \approx (2.5-3)$, JFS: $C \approx 8$
 \rightarrow *Large Energy Loss is necessary / allowed in JFS*



Elliptic Flow: p_T Deps.

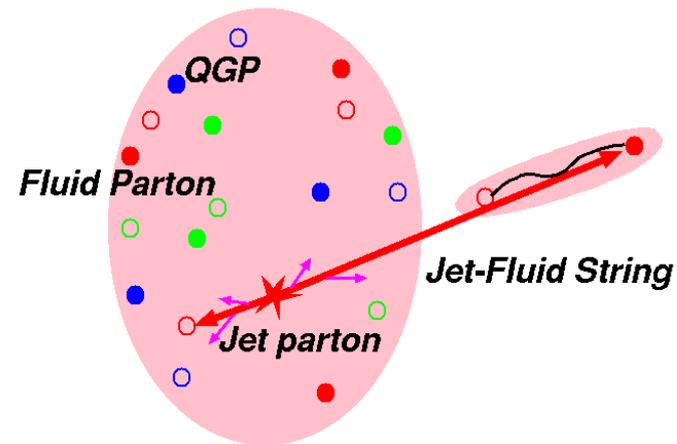
- High p_T v_2 : $\sim 5\%$ in Ind. ($C=3$) \leftrightarrow $\sim 8\%$ in JFS ($C=8$)



Origin of Large $v_2 =$ *Large E-loss factor C* + *Fluid parton v_2*

JFS Summary

- **Jet-Fluid String (JFS) formation and decay** is proposed as a mechanism to produce high p_T hadrons.
 - Effective to produce high p_T hadrons
 - Event-by-Event Energy-Mom. conservation \leftrightarrow Ind. Frag.
 - Entropy does not decrease, but increases. \leftrightarrow Reco.
- When we FIT p_T spectrum, **large v_2 emerges at high p_T**
 - Large E-loss+fluid parton v_2
- Problems and Homeworks
 - Mechanism of large E-loss
 - d+Au fit \rightarrow Cronin Effects
 - s-quarks, string spectral func.



Summary

- **Heavy-ion collisions up to SPS** energies seems to be reasonably described by using **hadron-string cascade** such as JAM model, while **HIC at RHIC** requires **earlier thermalization** (larger anisotropic pressure) even in lighter nuclear collisions such as Cu+Cu collisions.
- There are many things to do in high-energy heavy-ion collision physics.
 - AGS-FAIR-SPS energies
Nuclear matter EOS, Baryon rich QGP, Strangeness enh.,
...
 - RHIC-LHC energies
Detailed studies of QGP properties have just started
→ Consistent understandings are not yet achieved,
and

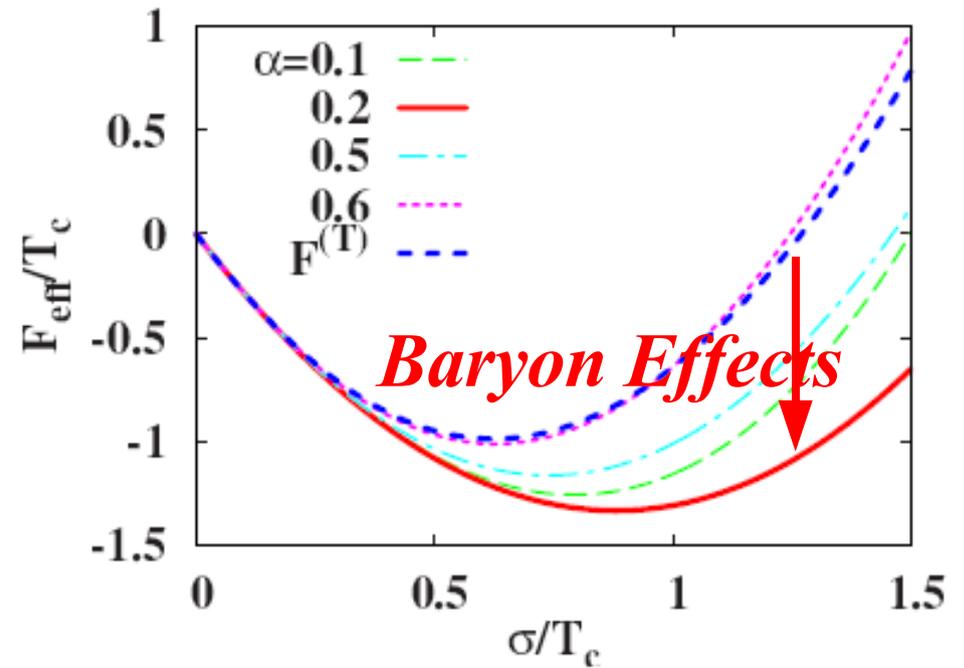
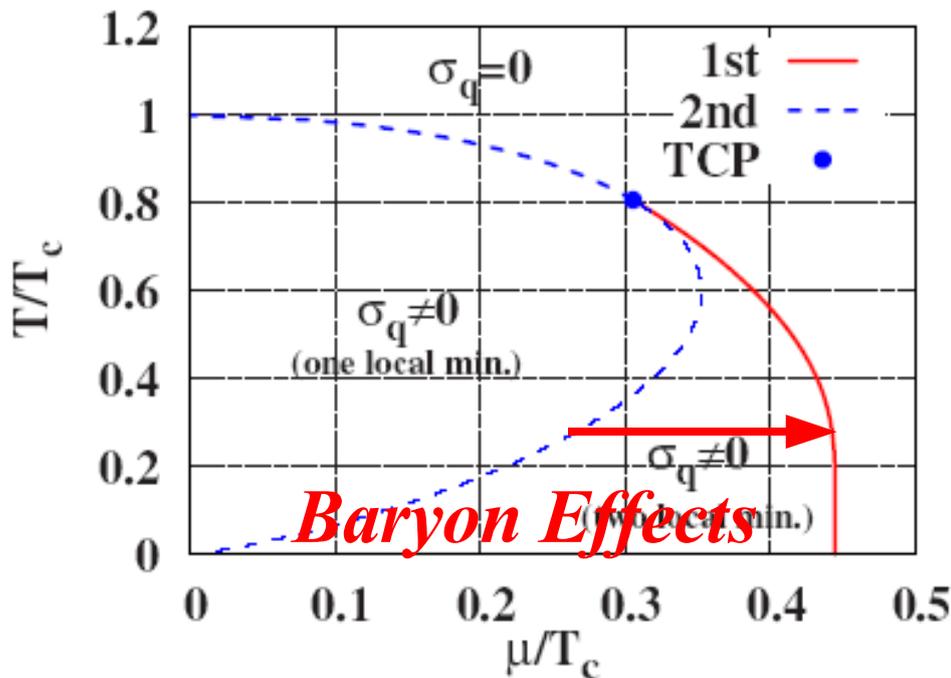
Sag ol for listening !

Backups

Effective Free Energy with Baryonic Effects

Effective Free Energy

$$\mathcal{F}_{\text{eff}}(\sigma_q) = \frac{\sigma_q^2}{2\alpha^2} + F_{\text{eff}}^{(b)}(g_\sigma \sigma_q) + F_{\text{eff}}^{(q)}(\sigma_q; T, \mu)$$



Baryons Gain Free Energy
 → *Extention of Hadron Phase to Larger μ !*

RMF with σ Self Energy from SCL-LQCD

■ σ Self Energy from simple Strong Coupling Limit LQCD

$$S \rightarrow -\frac{1}{2}(M, V_M M) \quad (1/d \text{ expansion})$$

$$\rightarrow b\sigma^2 + (\bar{\chi} \sigma \chi) \quad (\text{auxiliary field})$$

$$\rightarrow b\sigma^2 - a \log \sigma^2 \quad (\text{Fermion Integral})$$

■ RMF Lagrangian

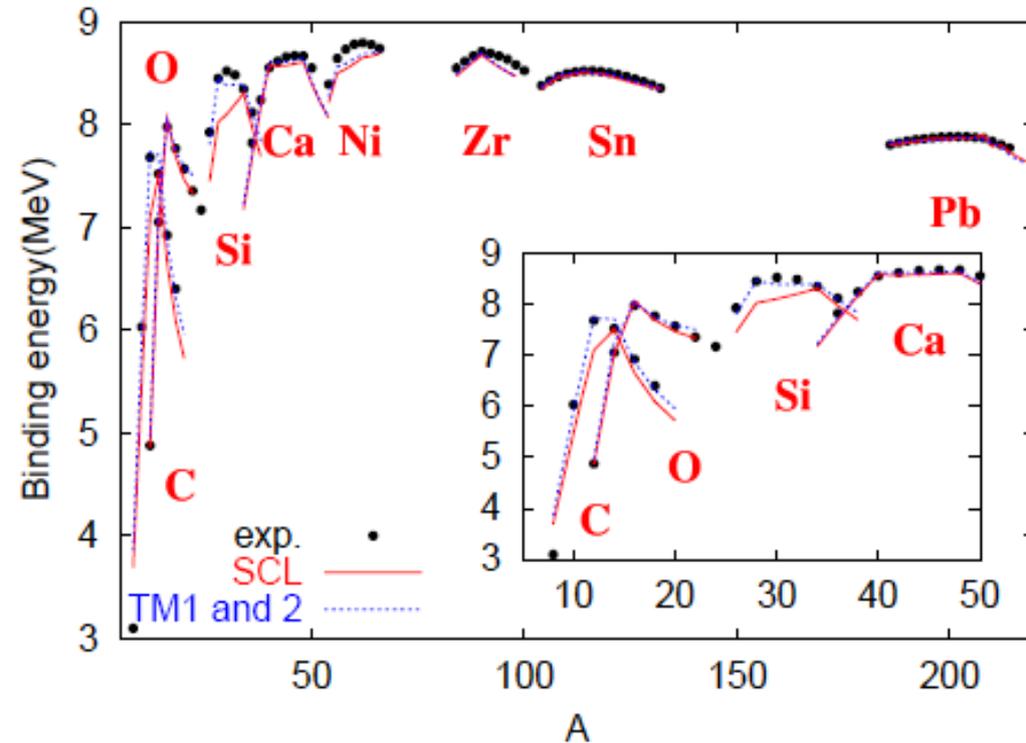
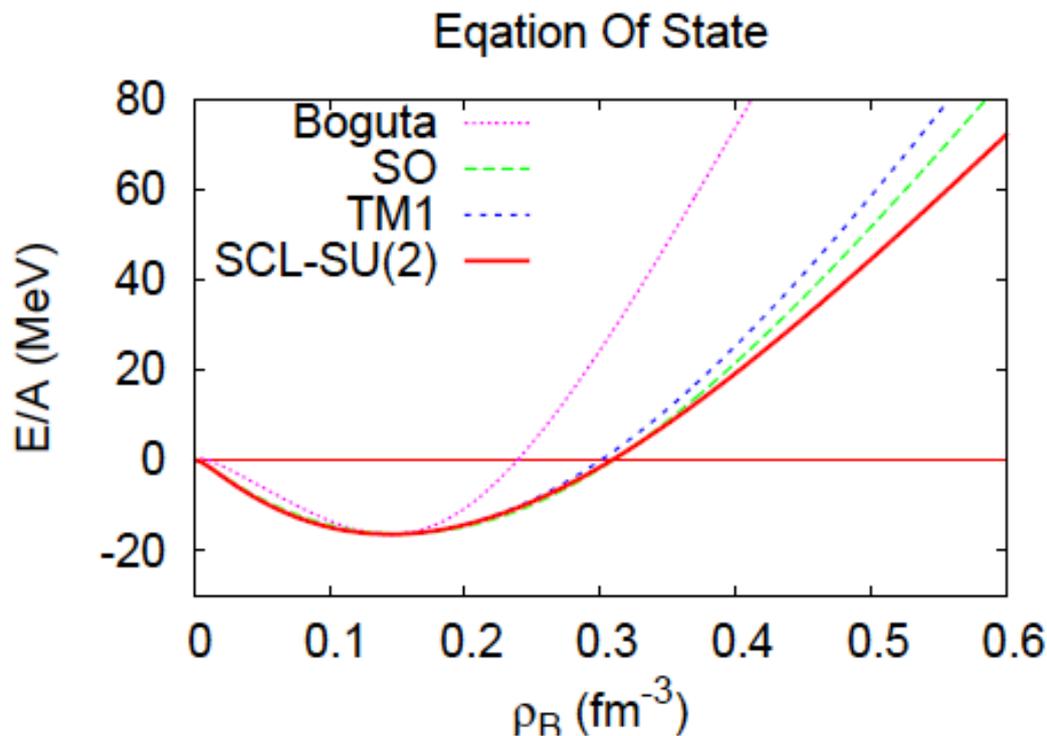
- σ is shifted by f_π , and small explicit χ breaking term is added.

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - \gamma^\mu V_\mu - M + g_\sigma \sigma) \psi + \mathcal{L}_\sigma^{(0)} + \mathcal{L}_\omega^{(0)} + \mathcal{L}_\rho^{(0)} \\ - U_\sigma + \frac{\lambda}{4} (\omega_\mu \omega^\mu)^2$$

$$U_\sigma(\sigma) = 2a f(\sigma/f_\pi), \quad f(x) = \frac{1}{2} \left[-\log(1+x) + x - \frac{x^2}{2} \right], \quad a = \frac{f_\pi^2}{2} (m_\sigma^2 - m_\pi^2)$$

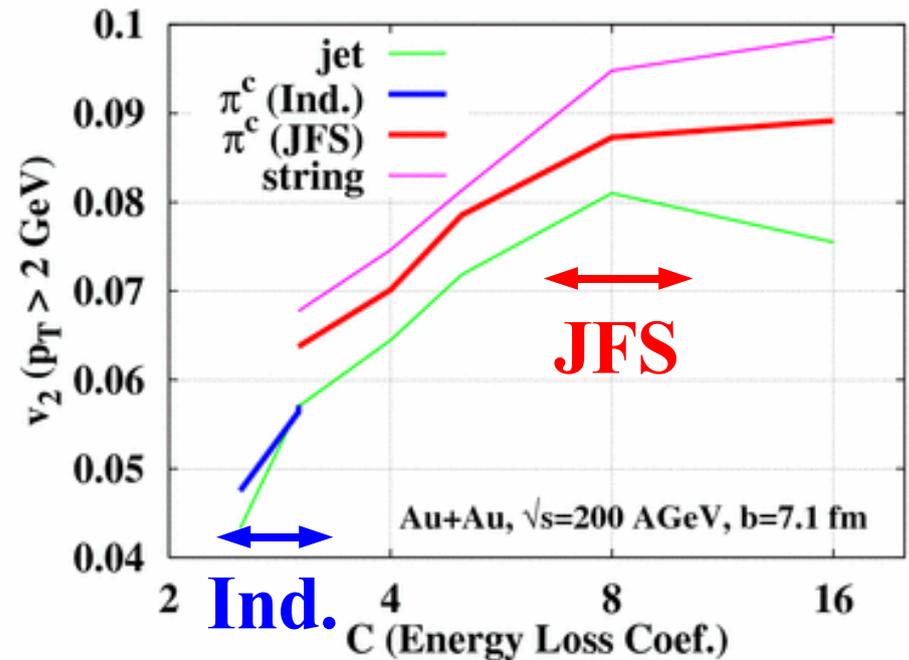
Nuclear Matter and Finite Nuclei

- Nuclear Matter: By tuning λ , $g_{\omega N}$, m_{σ} , *EOS can be Soft!*
- Finite Nuclei: By tuning $g_{\rho N}$, Global behavior of B.E. is reproduced, *except for j-j closed nuclei (C, Si, Ni).*



Elliptic Flow: Parameter Deps.

- $v_2(\text{jet})$: saturating behavior
(large E-loss limit) $\sim 8\%$
- $v_2(\text{string})$: grows up to $\sim 10\%$
larger than $v_2(\text{jet, limit})$
- $v_2(\text{h})$: string decay reduces v_2
 $\rightarrow v_2(\text{jet}) < v_2(\text{h}) < v_2(\text{string})$



For $p_T > 2\text{GeV}$ ($p_T \approx 10\text{ GeV}$)

Ind. Frag. with $C = 2.5 \rightarrow v_2 \approx 5\%$ (4%)

Large E-loss factor $C \rightarrow +3\%$

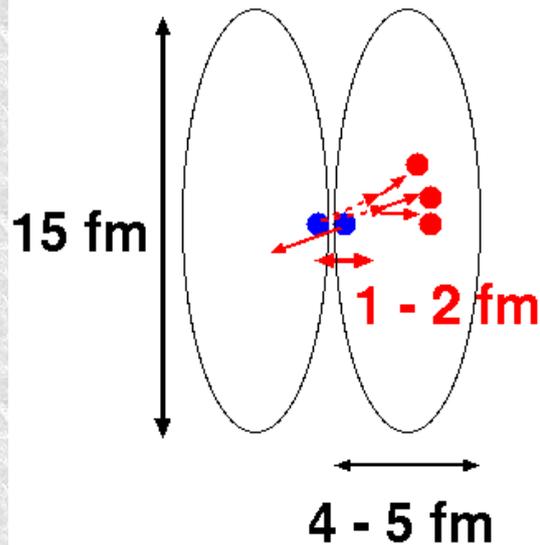
Fluid parton $v_2 \rightarrow +1\%$

JFS with $C = 8 \rightarrow v_2 \approx 9\%$ (8%)

Hadron Formation Time

JHF Energies

$$\gamma_{\text{cm}} \simeq 3.5, \quad \tau \simeq 0.5 - 1 \text{ fm/c}$$

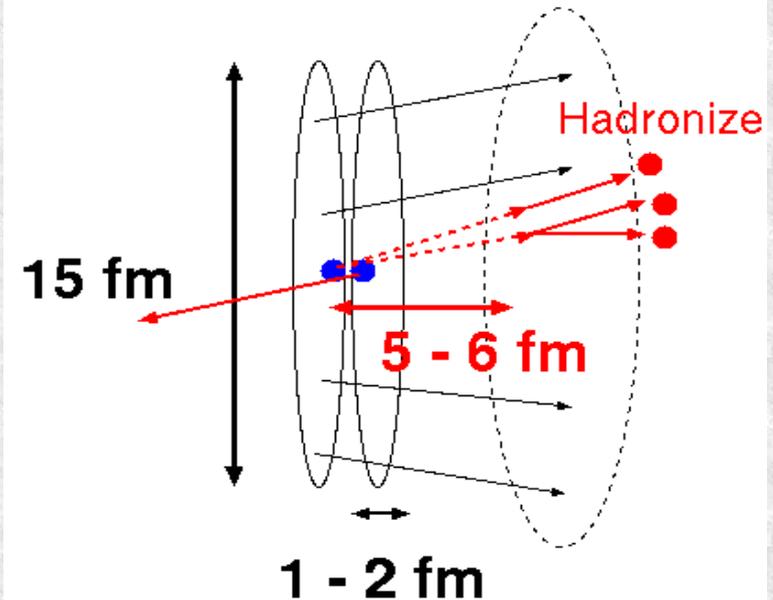


Multiple Hadron-Hadron Collisions

(Approx.) Thermalized Hadron Gas

SPS Energies

$$\gamma_{\text{cm}} \simeq 10, \quad \tau \simeq 0.5 - 1 \text{ fm/c}$$



String-String, String-Hadron Int.
+ Int. within Co-Movers

It takes $\tau \simeq 1 \text{ fm}$ for hadrons to be formed (and thus to interact)

→ Pre-Hadronic Interactions are necessary at SPS & RHIC

→ Hot & Dense Hadronic Matter would be formed at AGS & JHF

Comparison with Previous Works

- J. Casalderrey-Solana, E.V. Shuryak, hep-ph/0305160
 - Quarks, diquarks and gluons in QGP cut color flux (\sim JFS).
 - Large E-loss is generated by “phaleron”
 - *Large E-loss leads “surface emission” \rightarrow large v_2*
- Recombination (Duke-Osaka-(Minnesota)-Nagoya)
 - Predicts large v_2 ($\sim 10\%$) at high-pT
 - Sharply edged density dist. \rightarrow E-loss $\propto L \rightarrow v_2 \approx 10\%$
 - Woods-Saxon density dist. $\rightarrow v_2 \approx 5\%$
 - Entropy problem: $S(\text{QGP}) \approx S(\text{H})$ requires Res. and Strings
 - *Spectral Func.: δ func. \leftrightarrow θ func. in JFS*

K-factor

- **K-factor** → absolute value of σ_{jet}
- **Experimental Data:** $pp \rightarrow \pi^0$ @ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200 \text{ GeV}$ (PHENIX)

$$\frac{1}{\sigma^{\text{exp}}} \frac{d^2 \sigma^{\text{exp}}}{2\pi p_T d p_T dy} = K \frac{\sigma^{\text{pQCD}(1st)}}{\sigma^{\text{exp}}} \frac{d^2 N^{\text{pQCD}(1st)}}{2\pi p_T d p_T dy} \quad A = K \frac{\sigma^{\text{pQCD}(1st)}}{\sigma^{\text{exp}}}$$

$\sigma^{\text{Exp.}} = 21.8 \text{ mb}$ (trigger)

$\sigma^{\text{pQCD}(1st)} = 9.9 \text{ mb}$

- **pythia6.3 fit:**

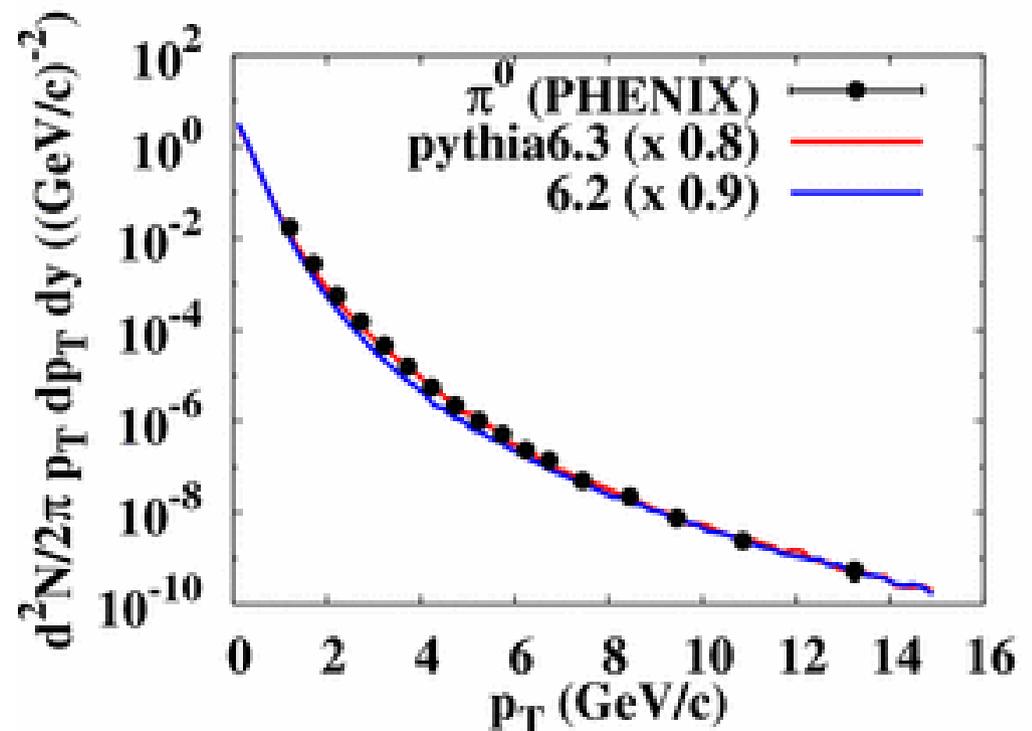
$A \approx 0.8 \rightarrow K = 1.8$

$(\sigma_{\text{jet}} (p_T^{\text{hard}} > 2 \text{ GeV}/c) \approx 17.5 \text{ mb})$

- **pythia6.2 fit:**

$A \approx 0.9 \rightarrow K = 2.0$

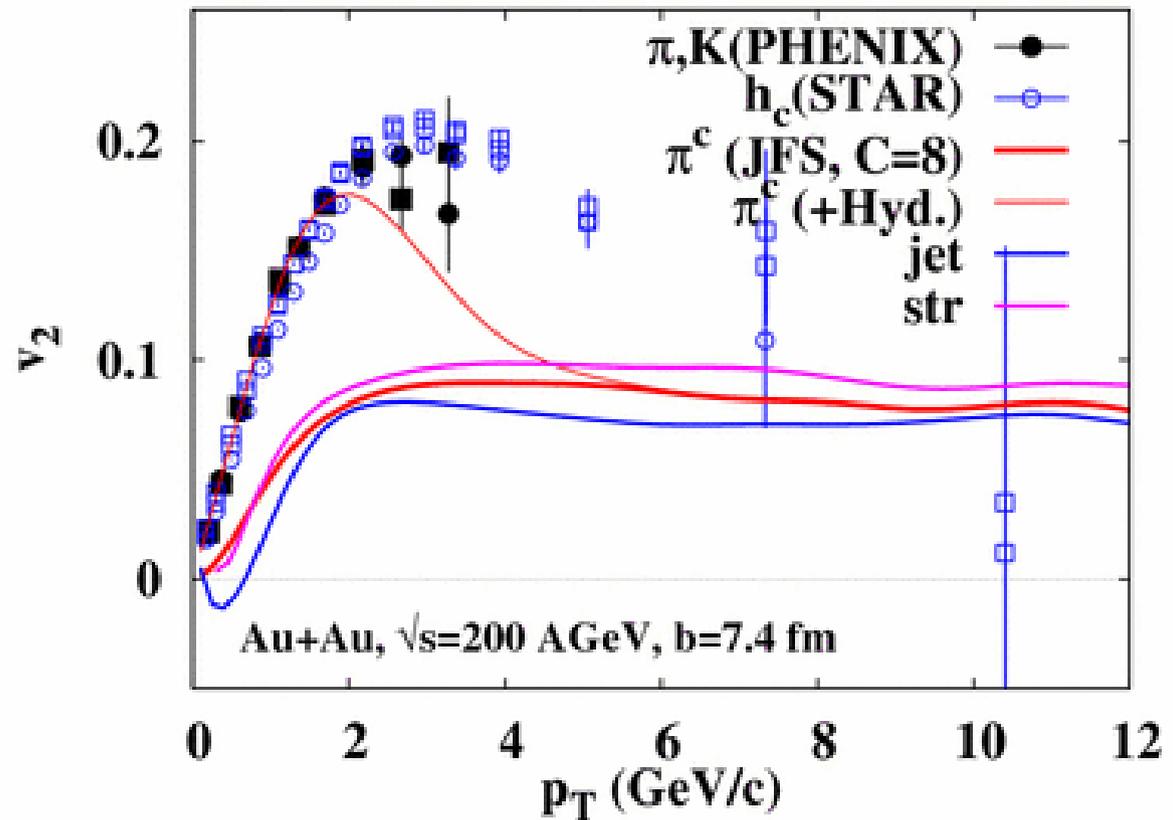
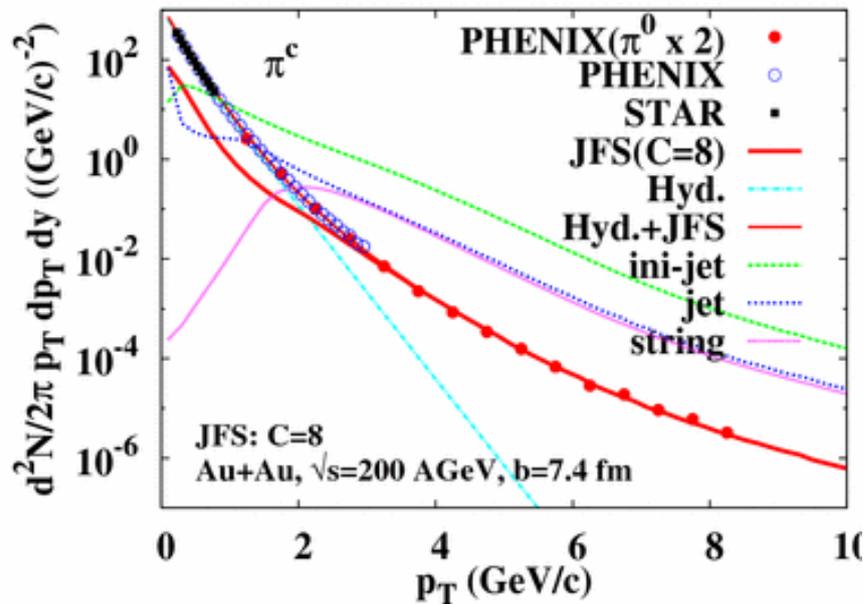
$(\sigma_{\text{jet}} \approx 19.6 \text{ mb})$



Combined with Low p_T spectrum

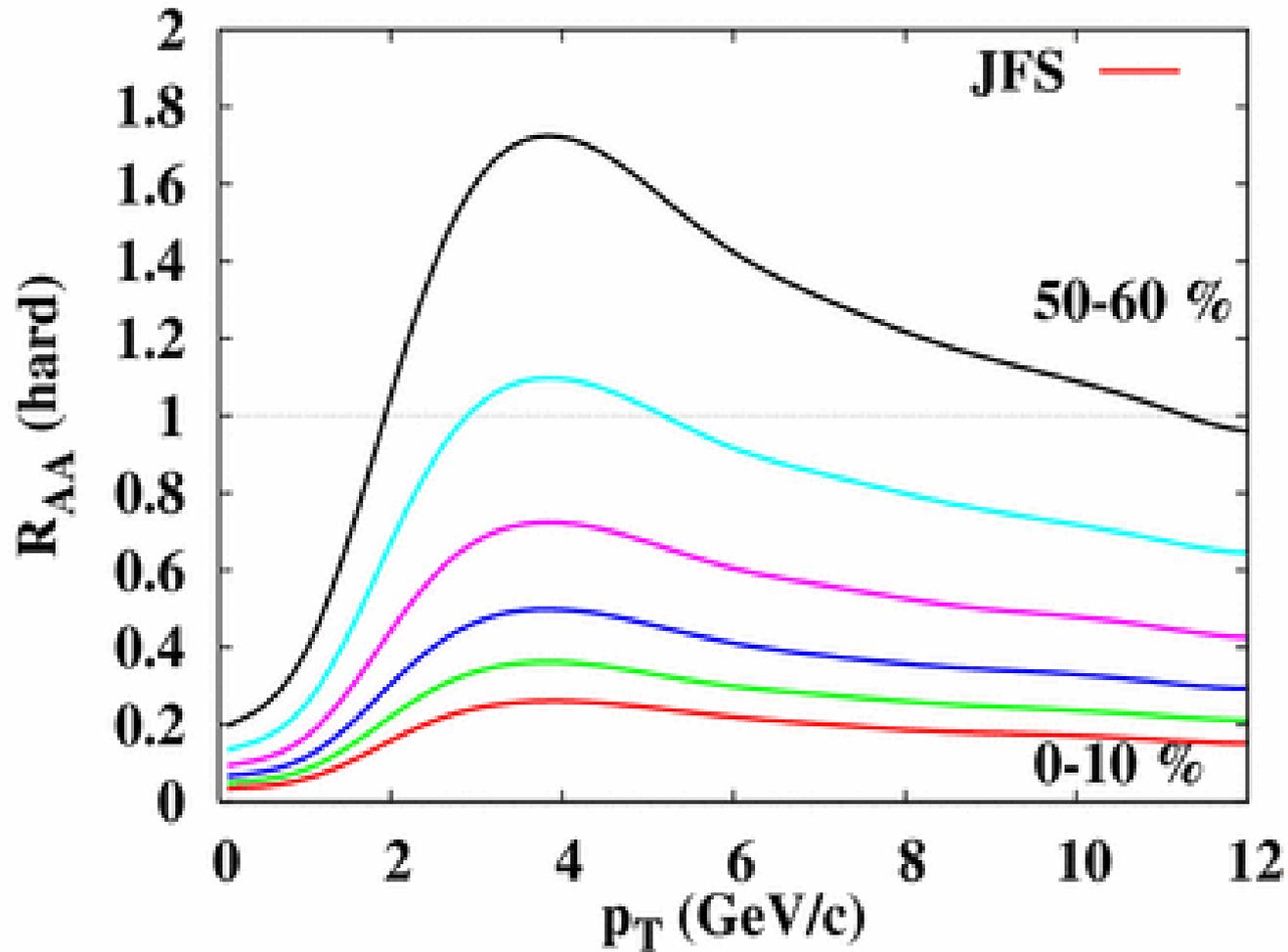
- Low p_T spectrum is assumed and combined.

$$E \frac{d^3 N_{Hyd}}{dp^3}(p_T) = A \exp(-p_T/T) (1 + B / (1 + (p_T/p_0)^8)) \quad v_2^{Hyd}(p_T) = 0.14 p_T$$



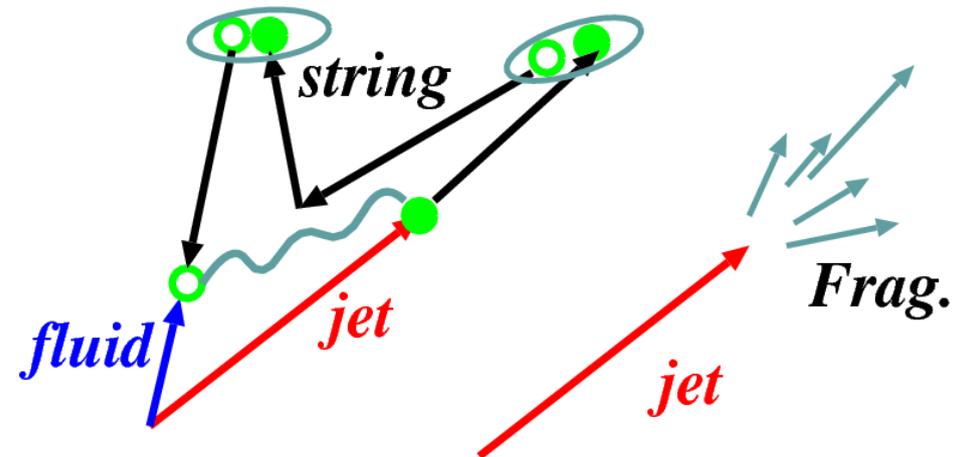
Nuclear Modification Factor

■ p_T Deps.



Discussion

- Mechanism to produce high p_T hadrons in JFS
 - String Decay from Lorenz boosted fluid
 - Relative momentum is relatively small
 - Smaller number of hadrons with high p_T are formed
- ↔ Independent Frag. (Large no. of Low p_T hadrons)



Energy Loss Factor

- Additional Factor for Energy Loss → High p_T hadron yield
- Exp. Data: p_T spectra of π in Au+Au (PHENIX,STAR)

$$\frac{d^2 N^{Exp.}}{2\pi p_T d p_T dy} = N_{jet} \frac{1}{N_{jet}} \frac{d^2 N^{JFS}(C)}{2\pi p_T d p_T dy}$$

→ Determining N_{jet} is important !

$N_{coll} = 373$ @ $b=7.4$ fm (PHENIX estimate)

$\sigma_{jet}^{NN} = 17.5$ mb (pp fit pythia 6.3), $\sigma_{tot}^{NN} = 47.4$ mb (JAM)

$$N_{jet} = \sigma_{jet}^{NN} \int d^2r T_A(r_T + b/2) T_B(r_T - b/2) = \frac{\sigma_{jet}^{NN}}{\sigma_{tot}^{NN}} N_{coll}$$

$$T_A(r_T) = \int dz \rho(r_T, z)$$

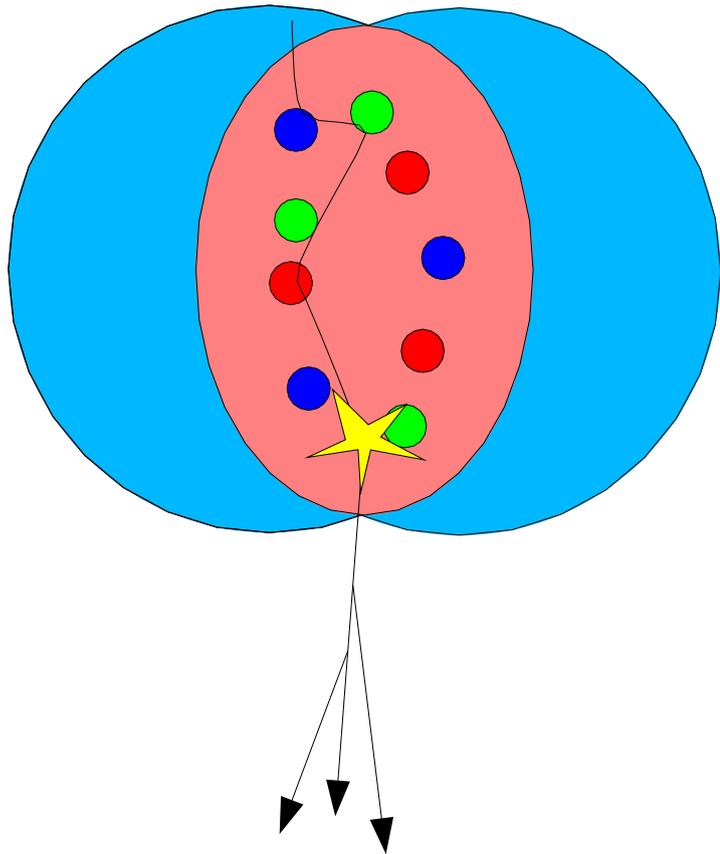
Further Problems

- Very large energy loss is required to explain p_T spectrum.
 - $C \approx 8$ in JFS $\leftrightarrow C \approx 2.7$ in Hydro+Jet model (Hirano-Nara)

Is it possible to justify this large energy loss ?

- Elliptic flow at medium p_T is underestimated.
 - Fluid-Fluid String would be necessary to consider.
- Large baryon yield at medium p_T may not be explained.
 - Three parton string ? (Jet-Fluid-Fluid, Fluid-Fluid-Fluid)
- String formation probability should be evaluated in pQCD matrix element + string level density.
- Strange hadrons

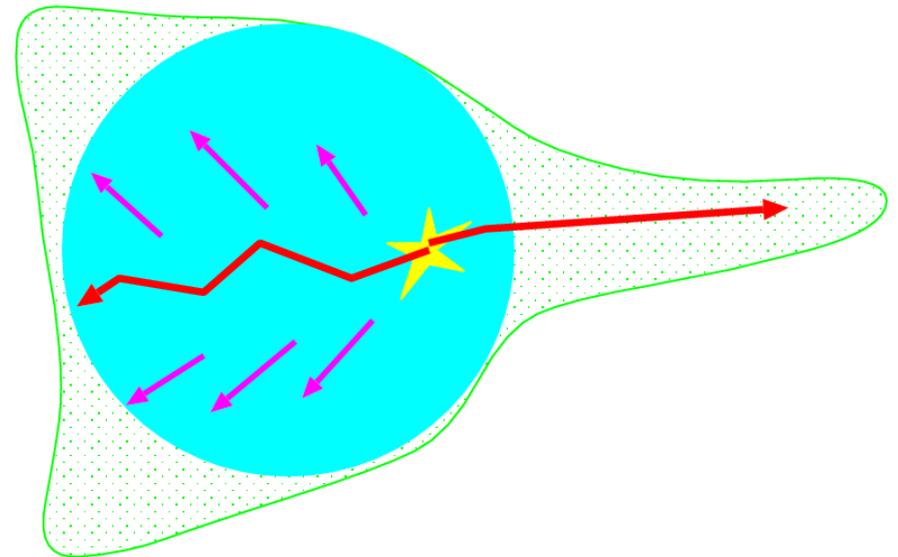
QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制 (I)



- 物質中での粒子のエネルギー損失
 - 荷電粒子は電子を弾き飛ばしてエネルギーを損失(フェルミの理論)
 - 光は荷電粒子が分布していると散乱されやすい
(宇宙の晴れ上がり = 原子の形成)
- クォーク、グルーオン
 - ハドロン相では色電荷が分布していないため、エネルギー損失小
 - 色電荷分布があれば、大きなエネルギー損失

失われたエネルギーはどこへいった？

- Backward Peak の消失
 - 媒質に 10 GeV オーダーのエネルギーを供給
 - 熱平衡化？ 集団運動？
- 最近の実験データ (2005 ~)
 - 180 度より小さい角度にエネルギーがより多く放出されている
 - **ジェットによる衝撃波生成**
 - QGP の「音速」($v^2 = d\varepsilon/dp$) 測定の可能性



クォークの不思議

- 6種類の香り (フレーバー) をもつ
 - up, down, strange, charm, top, bottom
- フェルミオンなのに、同じ状態に3つ入れる。
 - Δ 粒子 = 同じ種類・同じ向きのクォークが3つ同じ空間軌道にある
→ フレーバー、スピン以外に、「色」(r, g, b) 自由度をもつ。
- **クォークの「色」は閉じこめられている**
 - クォーク単独では観測され(てい)ない
 - 3つのクォークの集合 (核子など)、クォークと反クォークの対 (π 粒子など) の形 (ハドロン) でのみ観測される
- **小さい質量のクォークが集まると重くなる。**
 - u, d クォークの質量は 5 MeV 程度 → 3つ集まると 1000 MeV

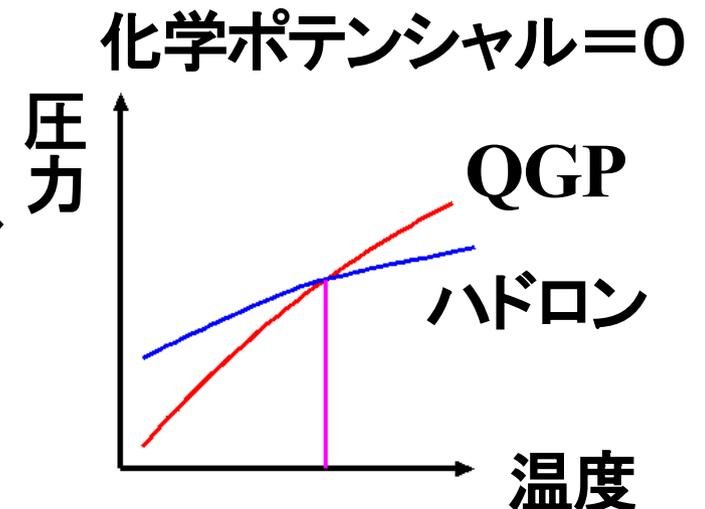
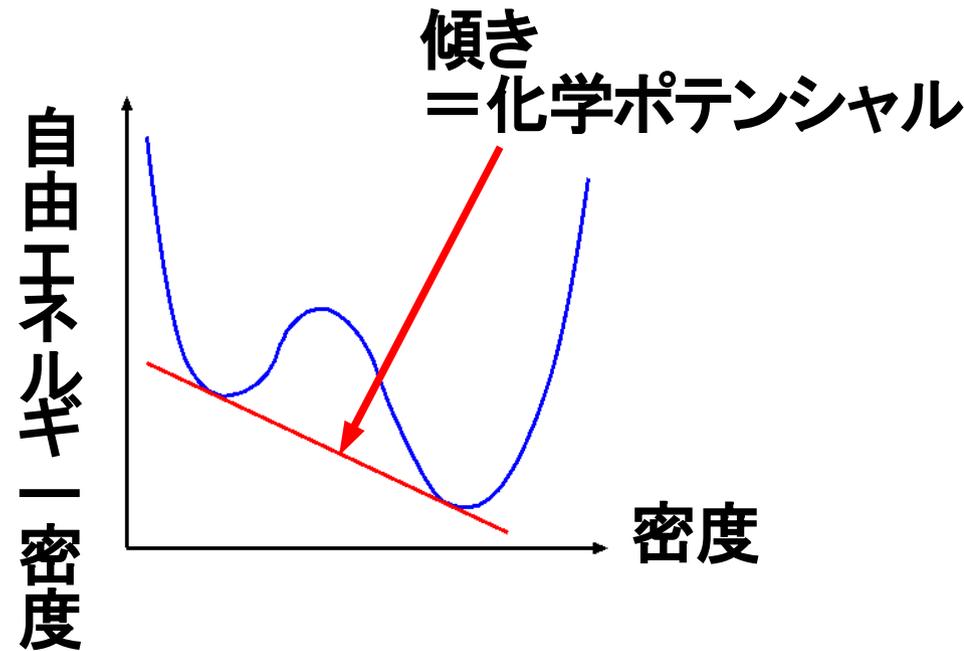
なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(2)

■ 直感的理解

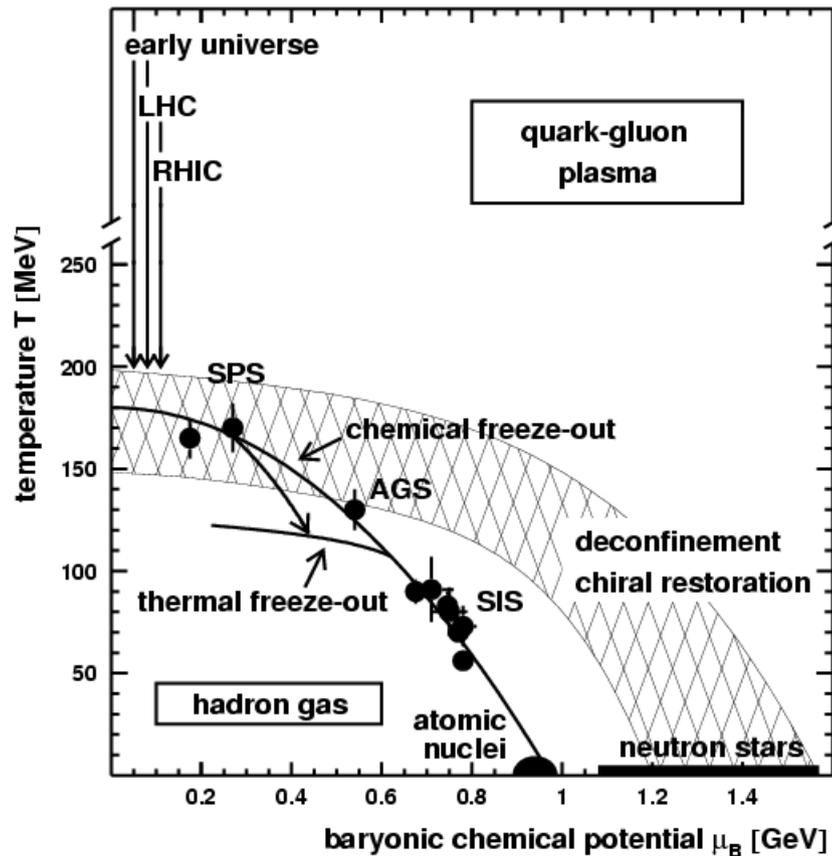
- 温度・密度の増加により、クォーク・反クォークの数が増え、ハドロンが「重なる」

■ 相転移とは何か？

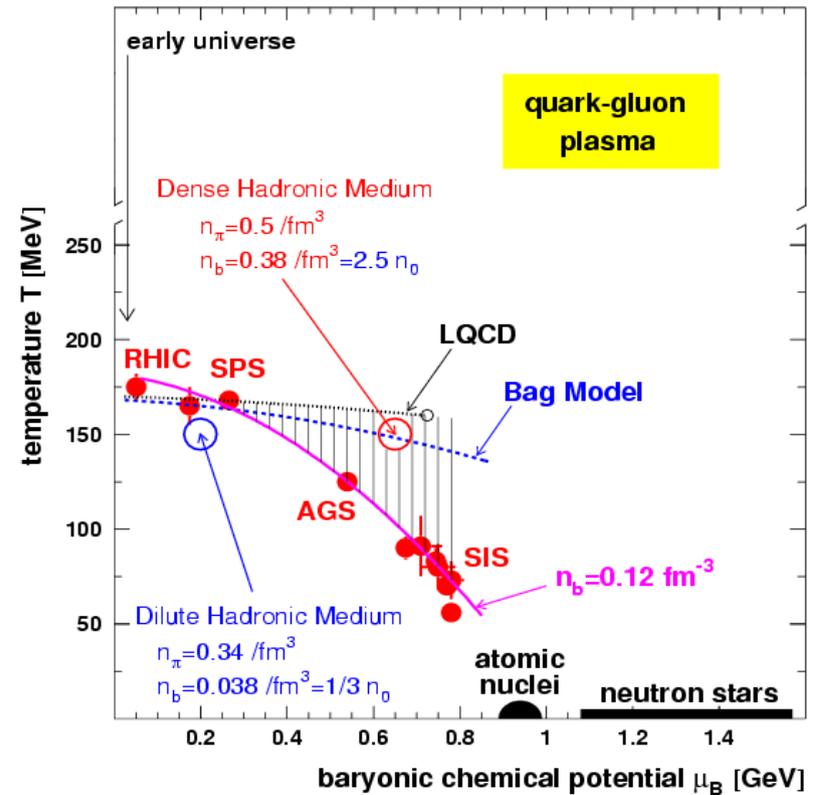
- 2つの異なる状態の間で、温度、圧力、化学ポテンシャル（一粒子の作られやすさ）が等しい時、2つの状態は「相平衡」（自由エネルギーの2重接線）
- クォークの数と反クォークの数が等しい時、クォークの化学ポテンシャルは 0。
→ 圧力の大きな相が全体を占める！



実験ではどの温度まで見えているか？



1998 (J. Stachel et al.)



2002 (Braun-Munzinger et al. J. Phys. G28 (2002) 1971.)

格子 QCD が予言する相転移温度と非常に近い温度でハドロンが作られている！