
2兆度・1000兆 g/cc の世界 --- クォーク物質への相転移 ---

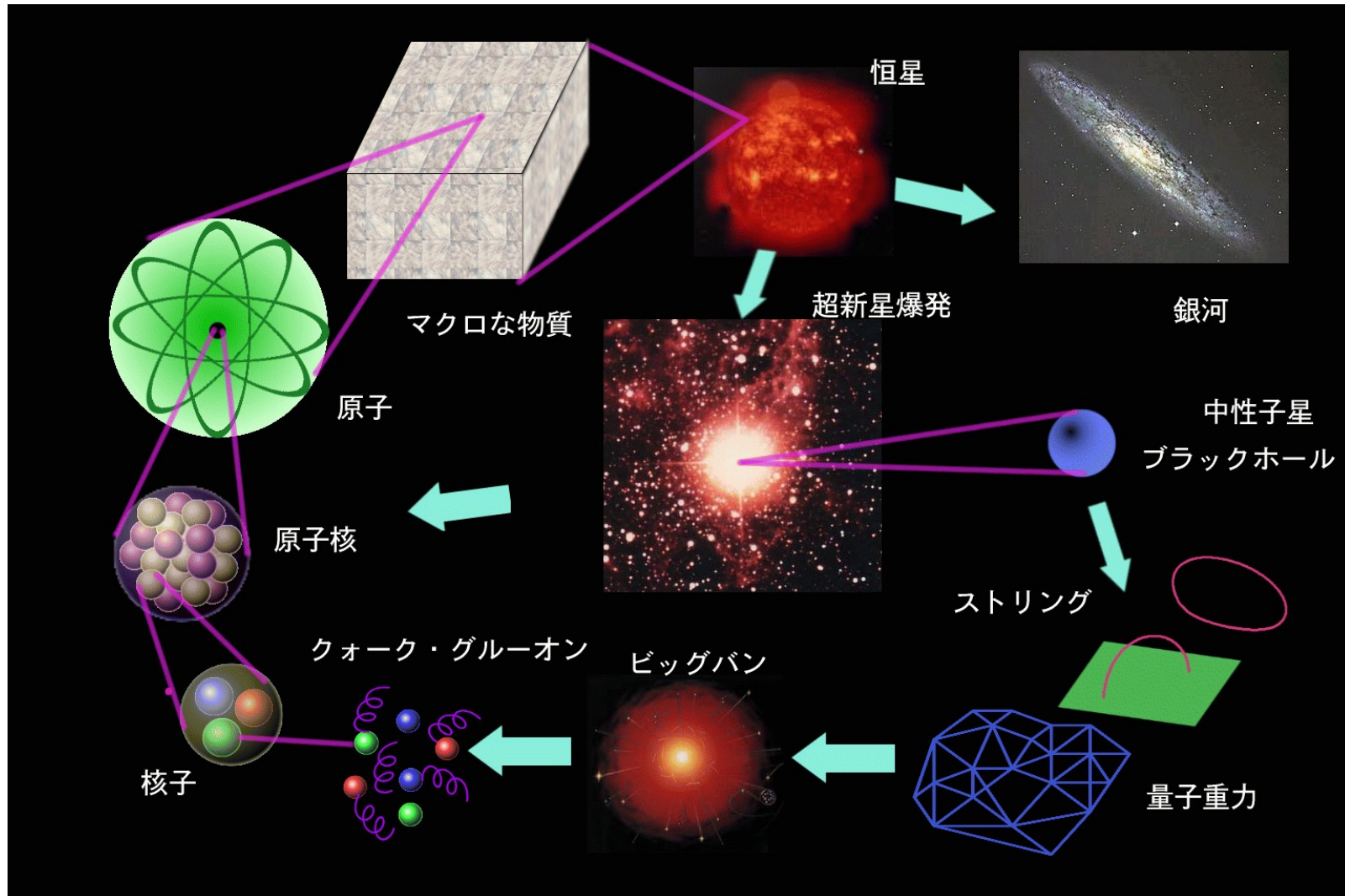
大西 明 (基礎物理学研究所)

- Introduction
- 高エネルギー重イオン反応とクォーク物質の性質
- 高密度物質の状態方程式と
中性子星・超新星爆発・ブラックホール形成過程
- まとめ



クォーク(1) —物質は何からできているか？

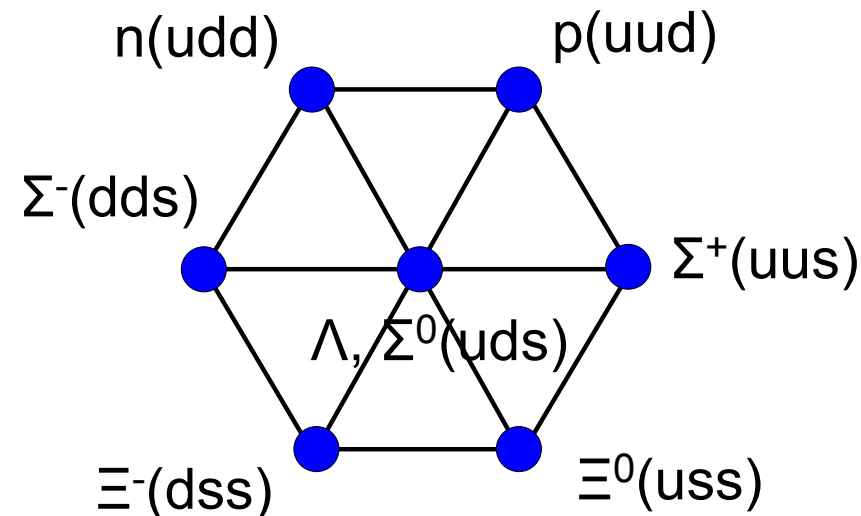
- 原子 → 原子核 → 核子 → クォーク
クォーク = 現時点で確認されている「最小」の物質の主要構成粒子



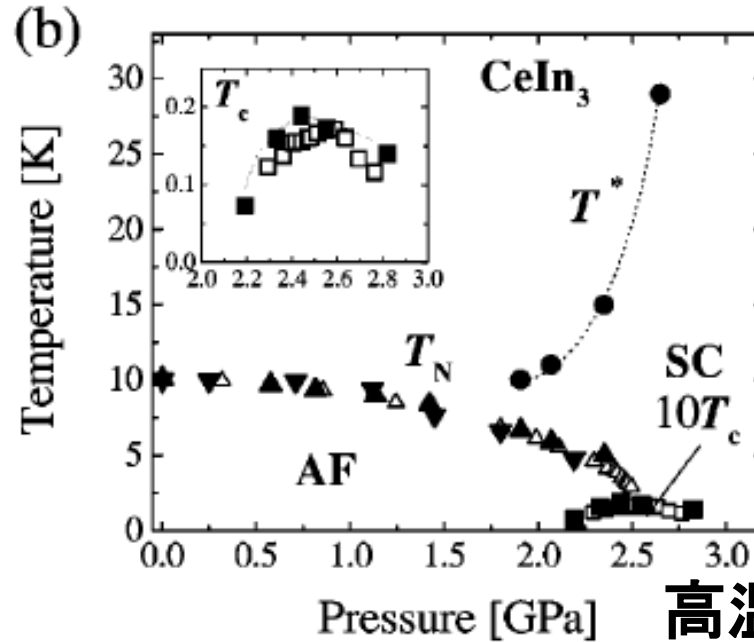
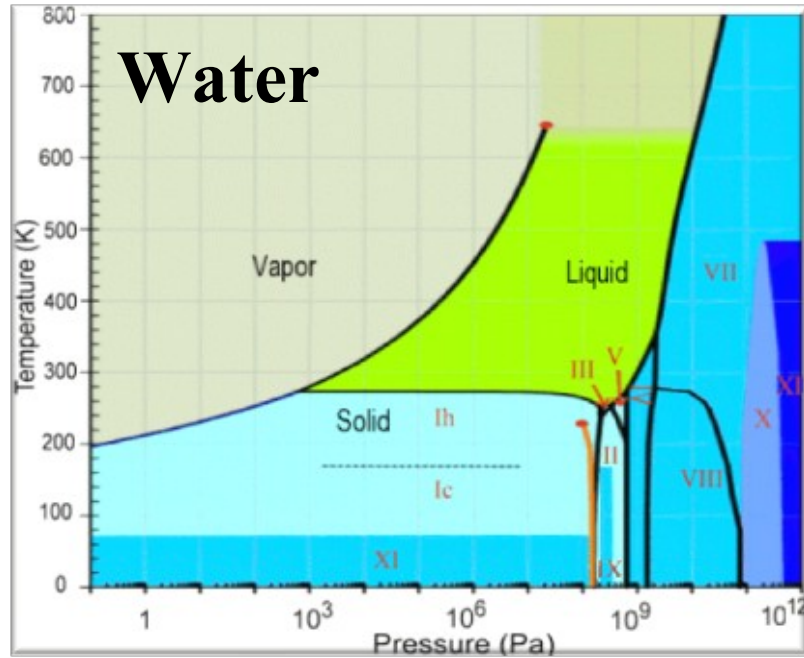
クォーク(2) 一クォークとは何者か？

- 核子は u, d クォーク3つからできている
 - 電荷は素電荷 e の分数倍 (-1/3, 2/3)
 - u, d クォークの質量は 5 MeV 程度
- 同じスピン・空間状態に3つはいれる
→ スピン以外に「色」(r,g,b) の自由度を持つ
- 単独では観測されていない。
 - 3クォーク (陽子等のバリオン)、クォーク・反クォーク対 (中間子) の「白色」の組み合わせ (ハドロン) で観測される。
 - 激しい電子衝突での散乱体としては見える

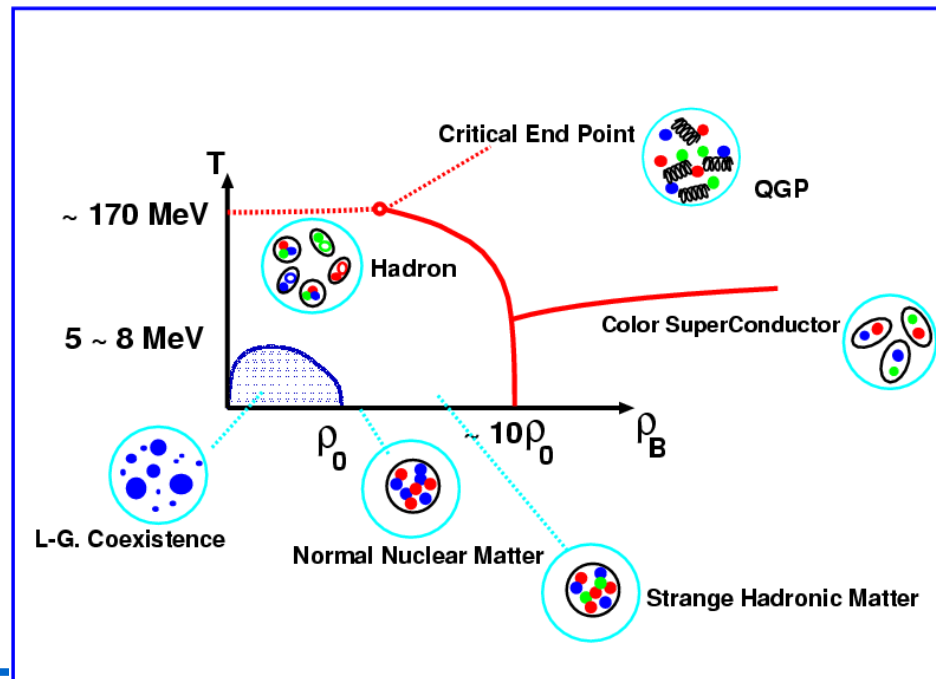
粒子	質量 (MeV)	電荷
n (中性子)	939	0
p (陽子)	938	1
d (down)	~ 5	- 1/3
u (up)	~ 5	2/3
s (strange)	~ 150	- 1/3
c (charm)	~ 1500	2/3
b (bottom)	~ 5000	- 1/3
t (top)	~ 180000	2/3



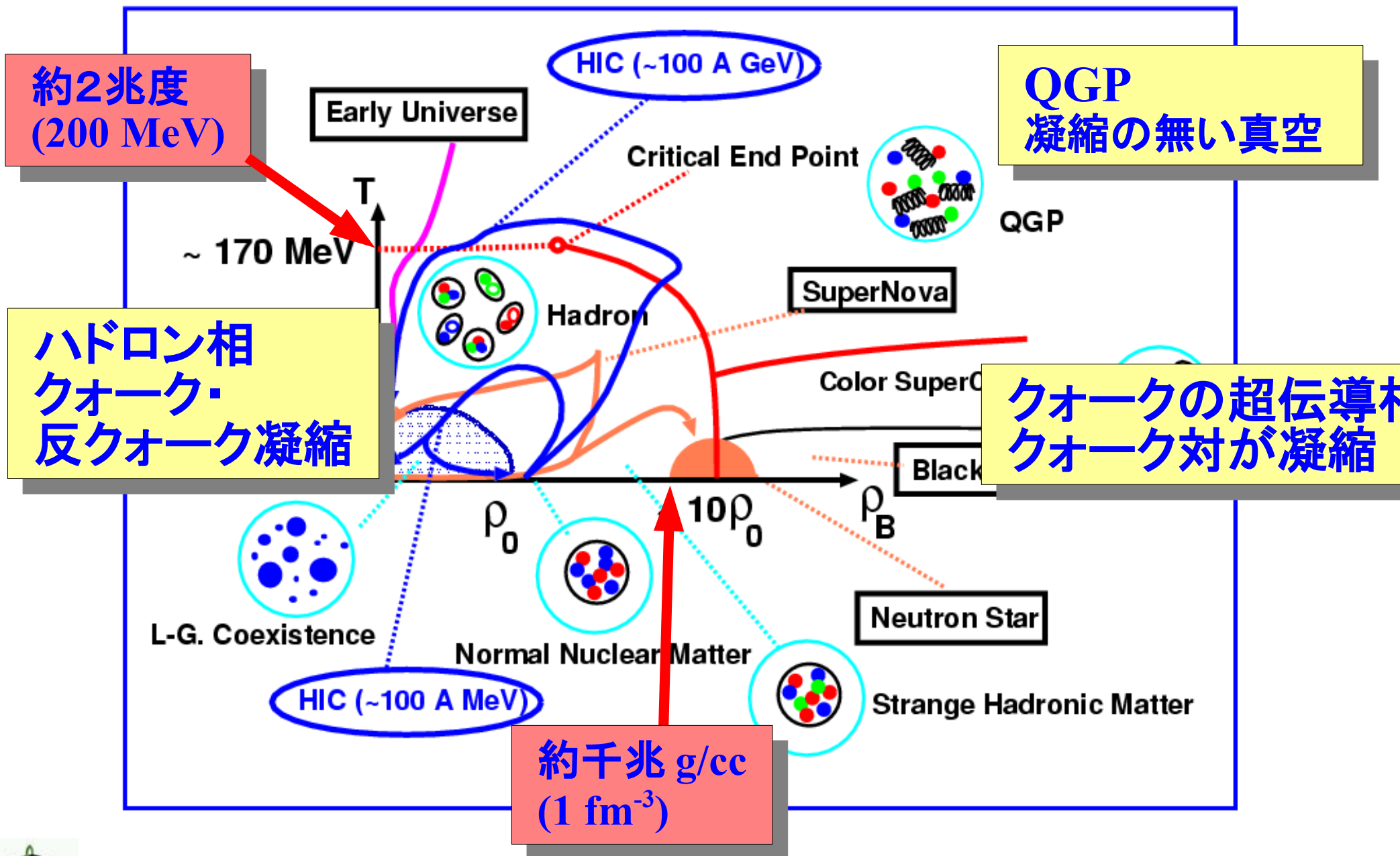
物質の相図



高温超伝導体
Kawasaki et al, 2001



クォーク物質の相図



2兆度の世界での QCD 相転移
--- 高エネルギー重イオン衝突 ---



物質を熱していくと何が起こるか？

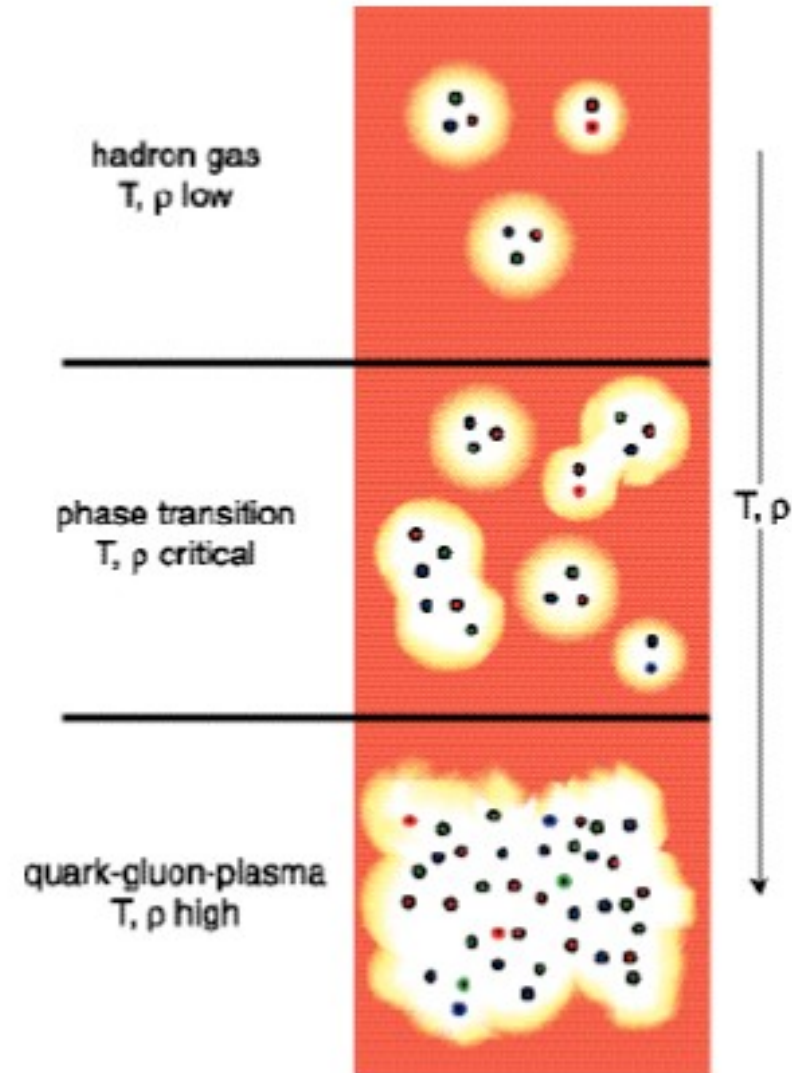
■ 理想気体の状態方程式

$$pV = nRT = N(R/N_A) T = NkT$$

$k=1$ とすると、 $10^{10} \text{ K} = 1 \text{ MeV}$

■ 物質を熱していくと N は増える！

- $T = 1 \text{ eV}$ ($\sim 10^4 \text{ K}$)
→ 原子核と電子の「プラズマ」
→ $N =$ 「原子核の数」 + 「電子の数」
- $T = 10 \text{ MeV} \sim 60 \text{ MeV}$
→ $N =$ 「核子の数」 (原子核が壊れる)
- $T = 60 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$
→ π 粒子が生成されて粒子数が増加
→ $N =$ 「核子数」 + 「 π 粒子の数」
- $T > 200 \text{ MeV}$
→ ハドロンが壊れてクォーク・グルーオン・プラズマができる
→ $N =$ 「クォーク数」 + 「反クォーク数」 + 「グルーオン数」 $\propto T^3$



なぜ「核物質、クォーク物質」?

- 自由粒子(質量0)のエネルギーと圧力

$$P = \frac{\pi^2}{90} N_B T^4, \quad \epsilon = \frac{\pi^2}{30} N_B T^4$$

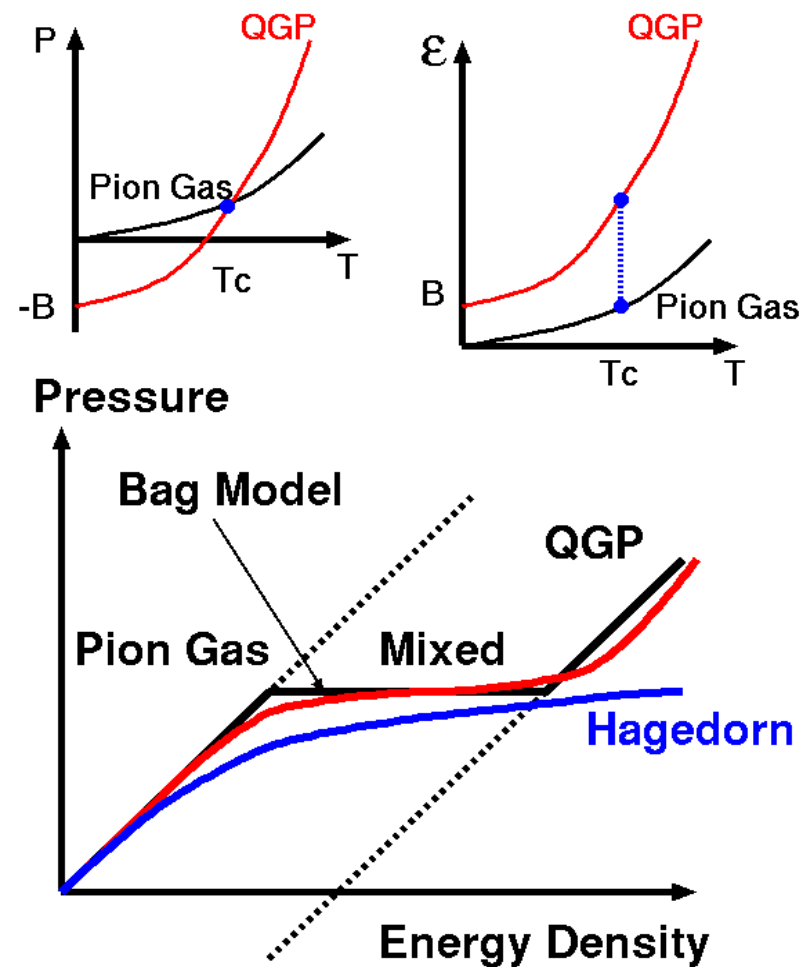
N_B = Bosonic DOF (7/8 for Fermions)

- Hadron Gas ~ 3 pions ($N_B=3$)

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

- QGP $N_B=16(\text{gluon})+24 \times 7/8$ (quarks)
and Bag Pressure

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

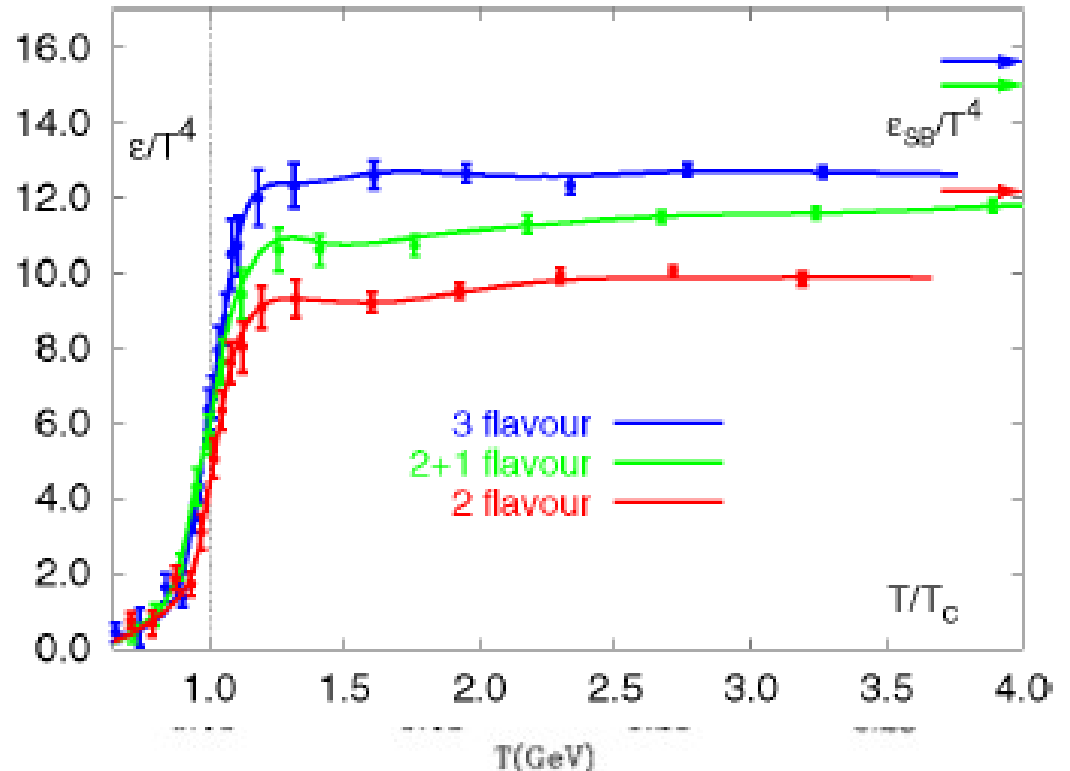


物質を熱していくと何が起こるか？

- 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
- $T = 150\text{-}200\text{ MeV}$ 程度で急激なエネルギー密度の変化
→ QGP への相転移

単純なモデルでも、
厳密な計算 (格子 QCD) でも
相転移は起こるはず。
→ 実験での確認は？
→ RHIC 実験



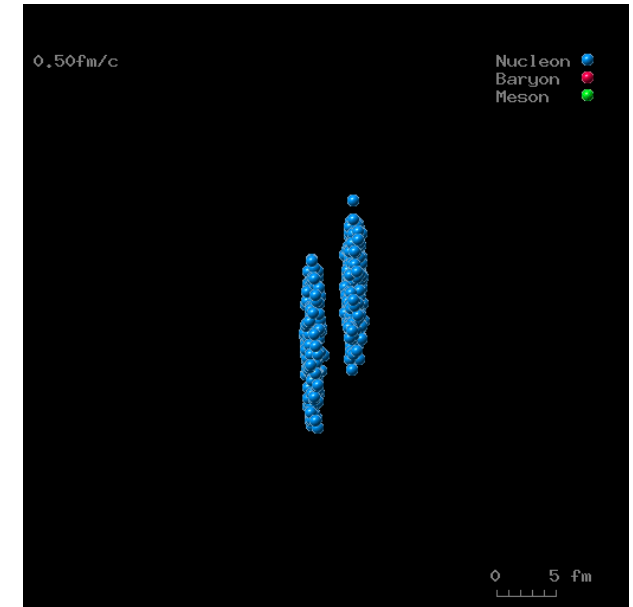
Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) 実験

■ 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、熱平衡に達した状態
- 初期宇宙等の「超高温状態」($\sim 2 \times 10^{12}$ K = 2 兆度) や、中性子星中心部などの「超高密度状態」($\sim 10^{15}$ g/cc = 千兆 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

■ RHIC @ ブルックヘブン国立研究所

- 世界初の衝突型重イオン加速器 (2000 年 ~)
- 100 A GeV + 100 A GeV (核子あたり 100 GeV)
- 実験グループ: STAR, PHENIX + 2 グループ



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 (Little Bang)

高エネルギー重イオン反応の *kinematics*

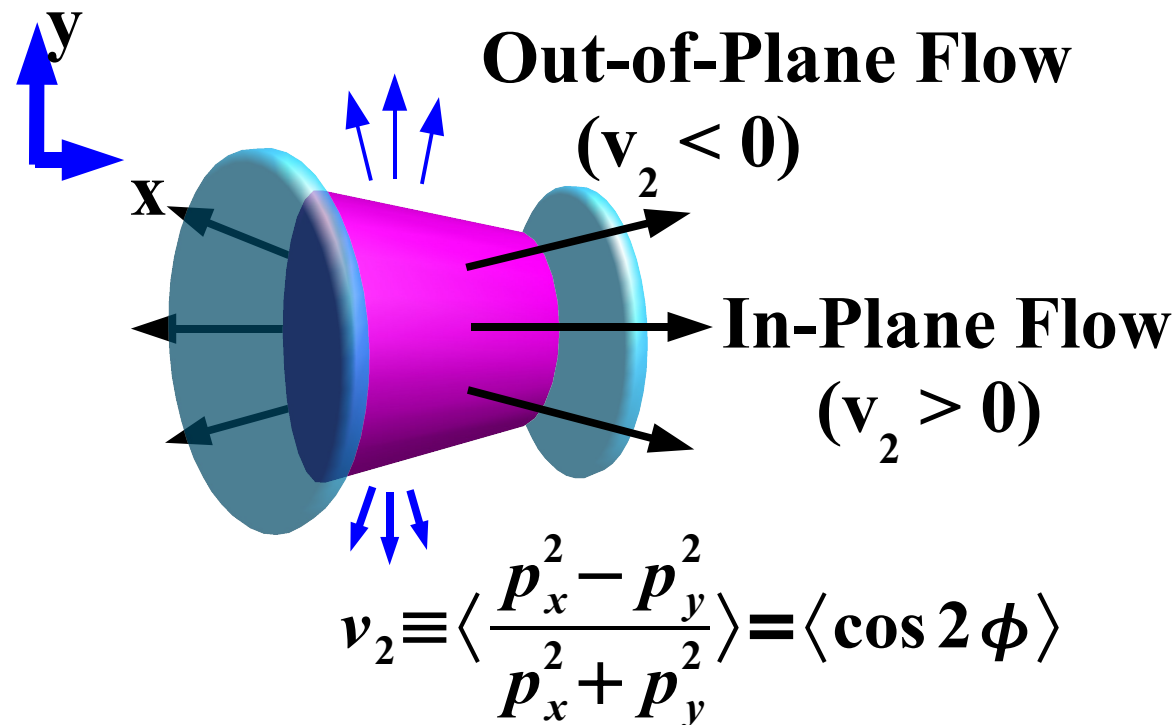
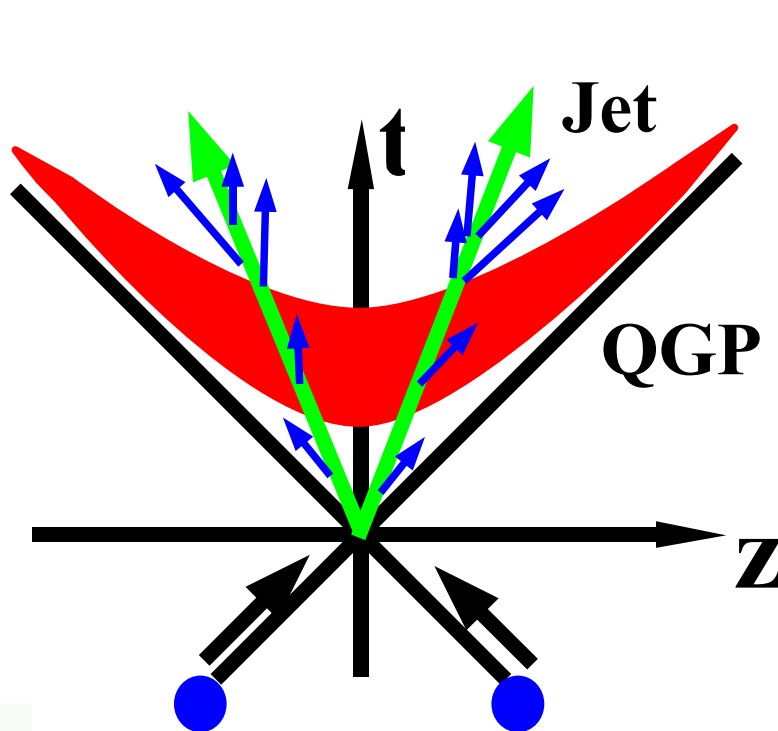
■ Bjorken 膨張

- 衝突して通り抜けた原子核の間にほぼ boost invariant な熱い物質ができる
物質の状態はほぼ固有時間 τ のみの関数、一定のラピディティ y で進む

$$\tau = \sqrt{t^2 - z^2}, \quad y = \frac{1}{2} \log \frac{E + p_z}{E - p_z} \quad (\text{相対論的に加法的な速度})$$

■ 楕円フロー $v_2 =$ 方位角を ϕ のフーリエ成分。

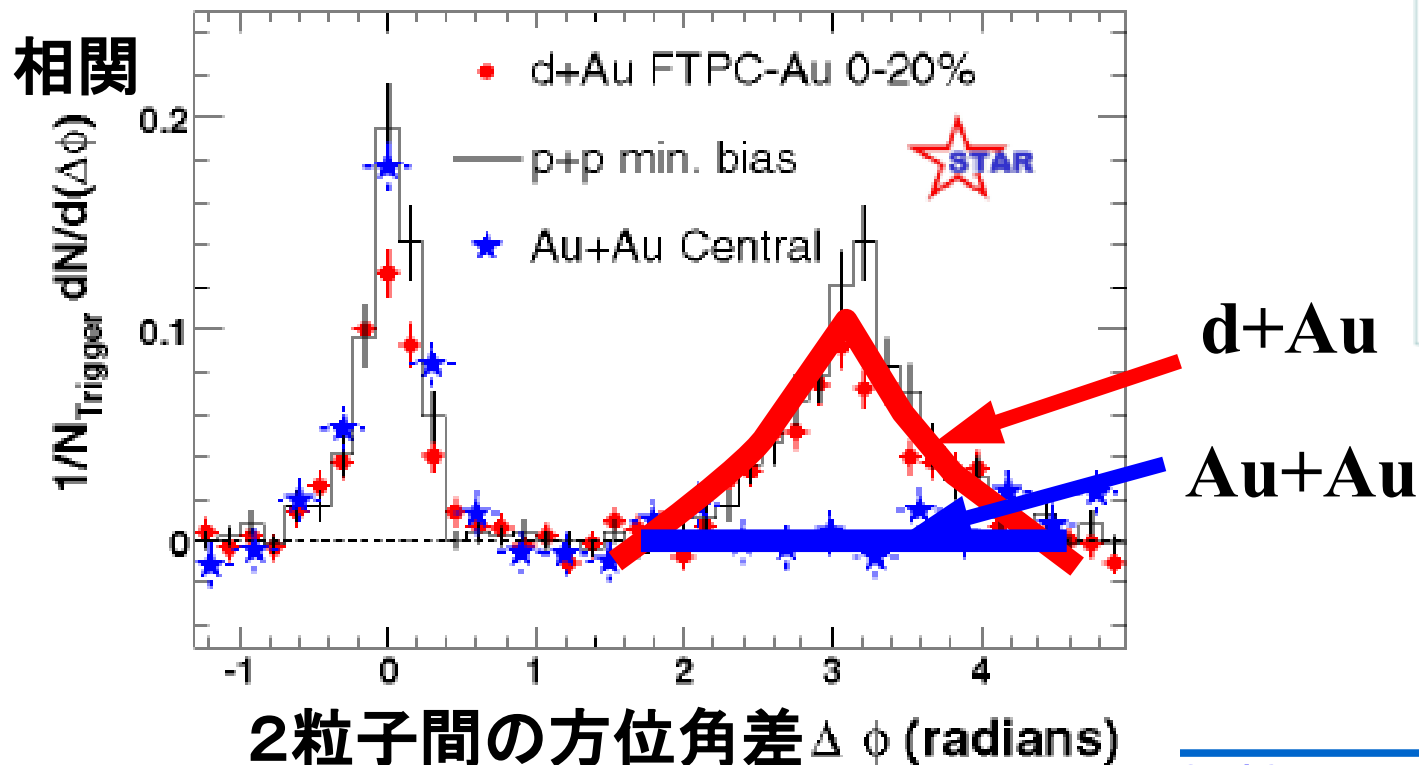
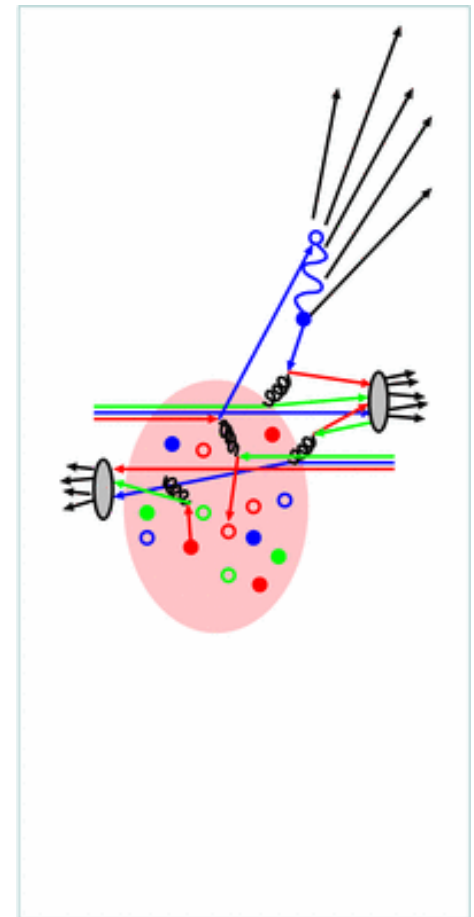
→ 圧力勾配から作られるので、「熱平衡化の度合い」に敏感。



クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (1)

■ QGP 中でのジェットのエネルギー損失

- 真空中ではパートン(クォーク、グルーオン)が激しく散乱+ハドロン化 → 強い方位角 180 度相関
- QGP が作られると色電荷の分布によりパートンがエネルギーを失う → 後方での方位角相関の消失
- RHIC での実験で d+Au ではそのまま、Au+Au 衝突では後方相関が消失



STAR, white paper

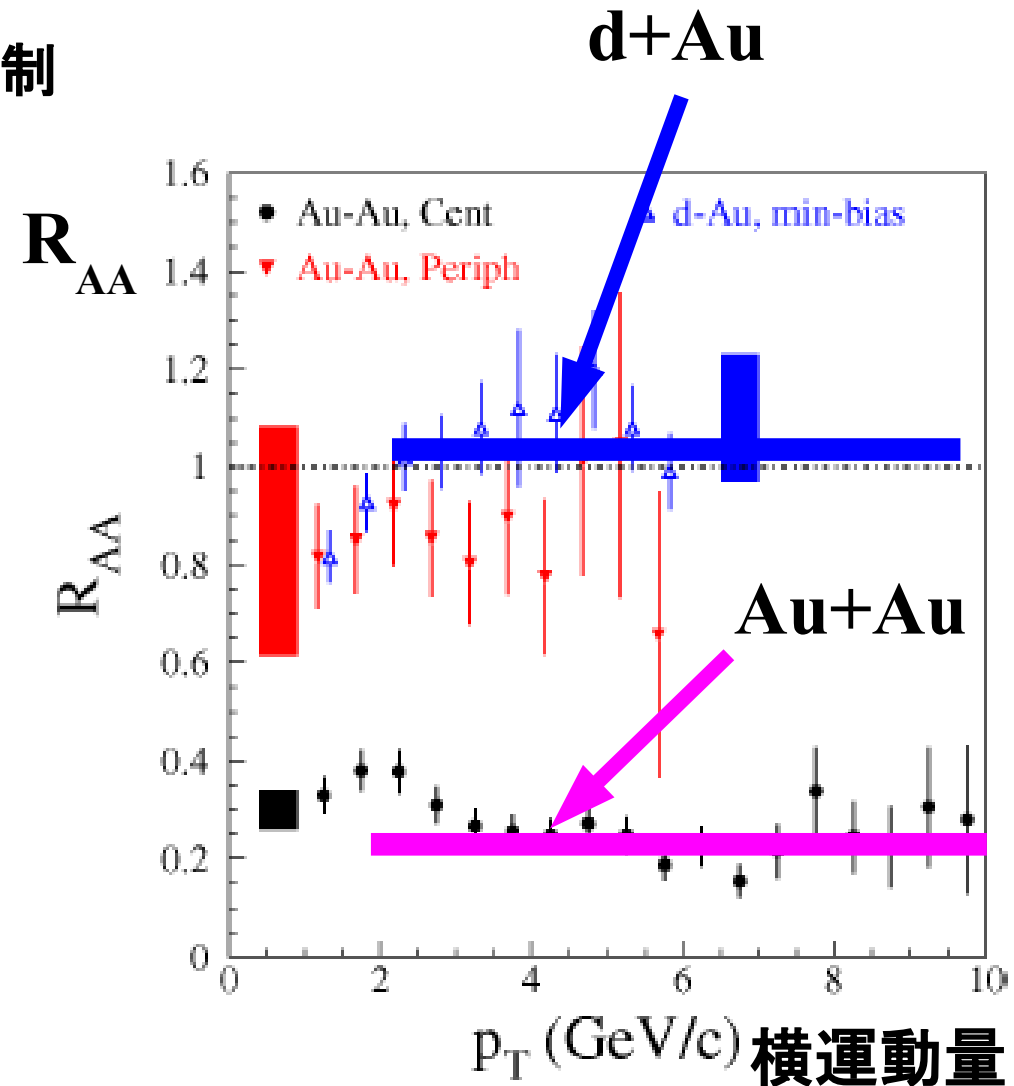
クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (2)

■ 高運動量ハドロンの抑制

- 高いエネルギーのパートンの抑制
→ 高いエネルギーのハドロンの抑制
- 本当に抑制されているか？

$$R_{AA} = \frac{\text{「実際の生成量」}}{\text{「素過程の重ね合わせ」}}$$

- RHIC での観測
小さな原子核の衝突 (d+Au)
→ $R_{AA} \sim 1$
大きな原子核の衝突 (Au+Au)
→ $R_{AA} < 1$



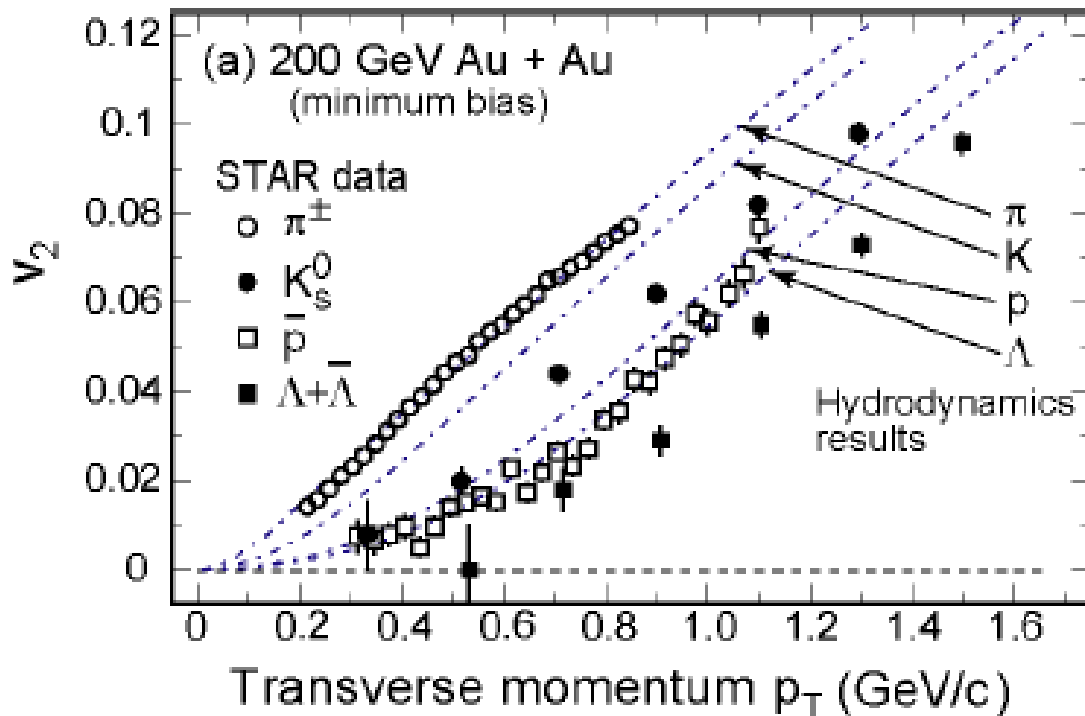
PHENIX White Paper

クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (3)

■ 流体模型 (完全流体) の成功

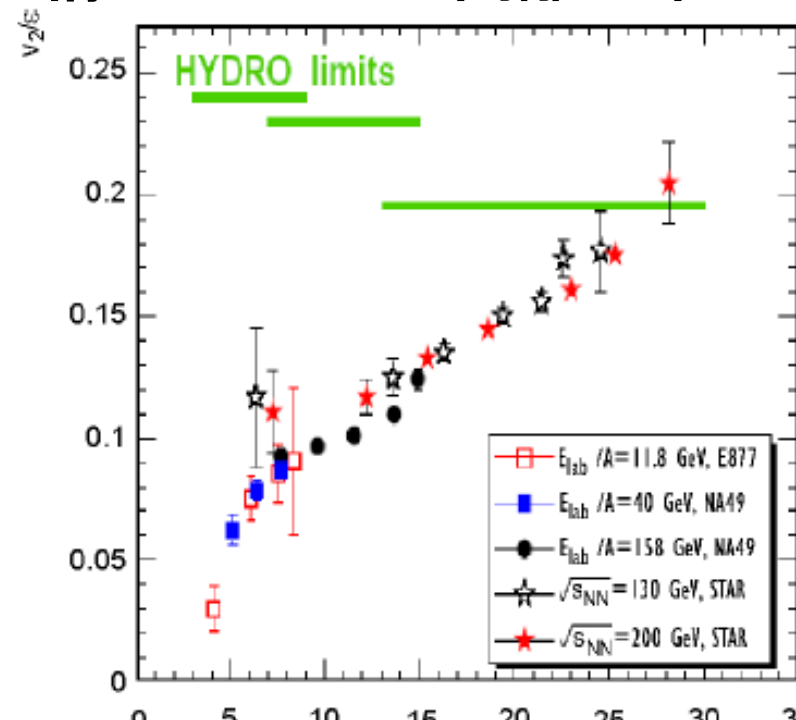
- 入射エネルギーの増加 + クォーク・グルーオンの解放
 → 粒子密度の増加 → 平均自由行程の減少
 → 流体模型の適用可能性大
- RHIC での楕円フローデータは完全流体模型で見事に説明可能

楕円フロー



横運動量

楕円フロー / 空間離心率



面積・ラピディティ当りの粒子生成量

U.W. Heinz, nucl-th/0412094

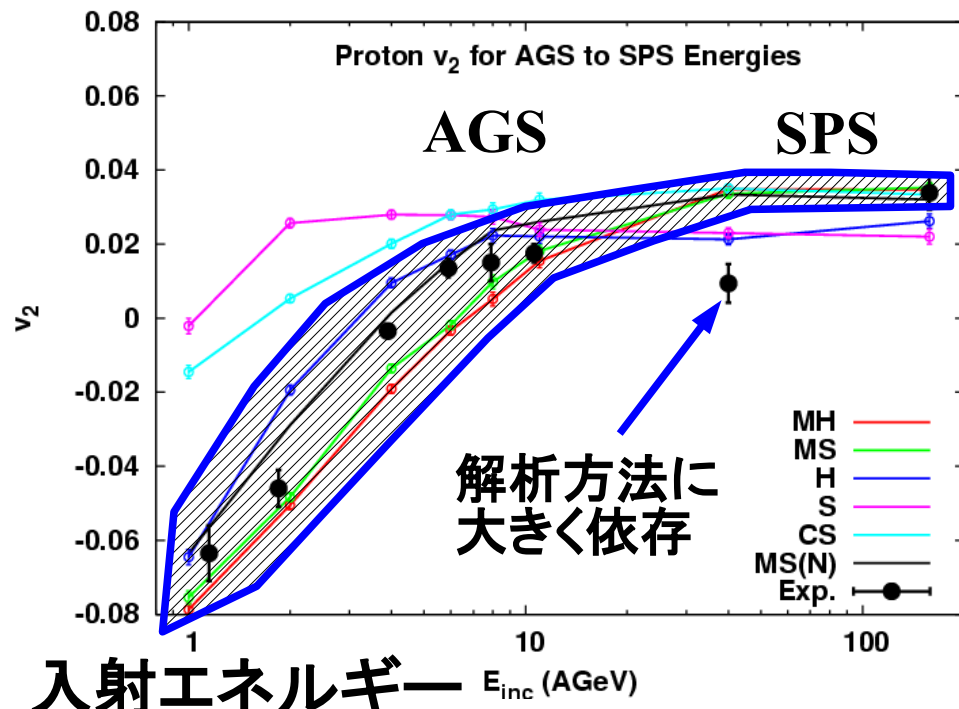
本当にクォーク・グルーオン自由度は必要か？

■ ハドロン輸送模型での記述

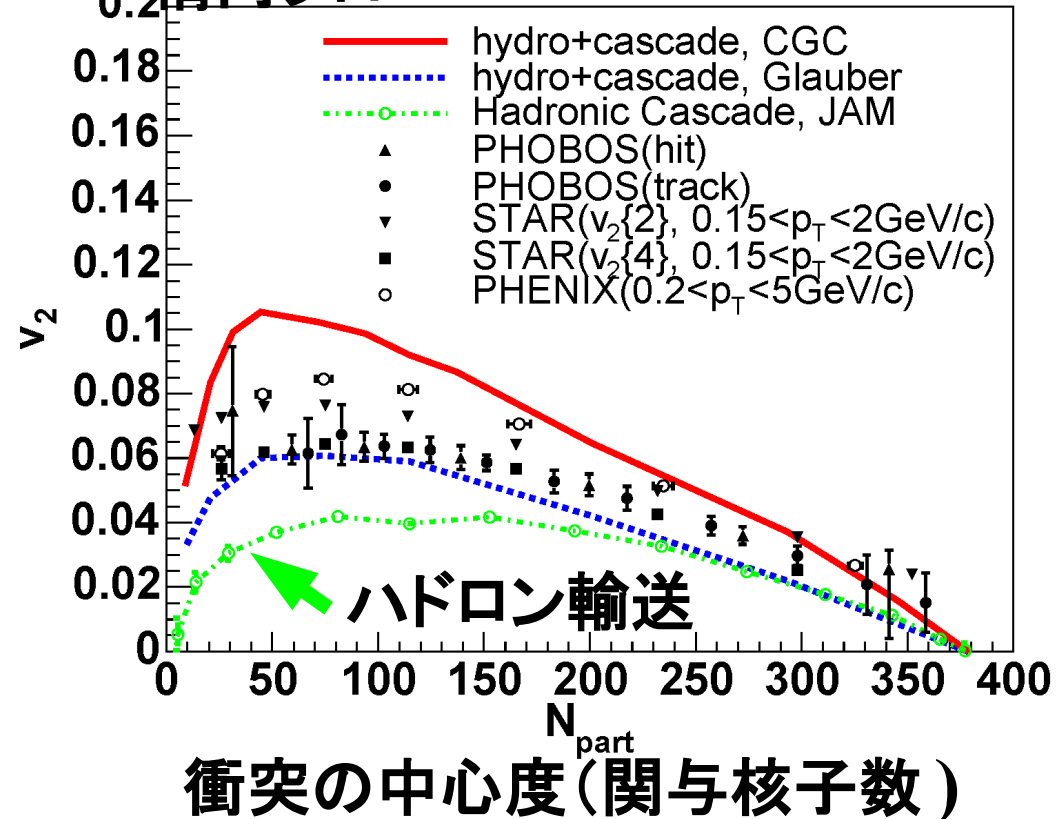
- RHIC よりも低いエネルギーの重イオン反応では楕円フローを説明
- RHIC では楕円フローを過小評価

QGP 生成は $\sqrt{s}=20$ GeV (SPS) と $\sqrt{s}=130-200$ GeV (RHIC) の間で始まる

楕円フロー



楕円フロー



入射エネルギー E_{inc} (AGeV)

Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, 2005

GCOE シンポジウム, 2009/02/16-18

RHIC で分かったこと、まだ分からないこと

- 分かったこと:
 - パートン(クォーク、グルーオン)が強く相互作用する熱平衡に近い物質が生成された。
 - エネルギー損失、流体模型の成功、粒子生成比、クォーク数スケーリング、
 - 大きな楕円流はハドロンのみでは記述できない。
- 新たな問題
 - QGP のシグナルは一貫して理解されているか？
 - 速い熱平衡化の機構、熱平衡に達する前の動力学は？ (Fukushima)
 - カイラル対称性は回復したのか？
 - QGP の「音」は聞こえたか？ (Kunihiro)
 - 完全流体模型の成功から期待される小さな η/s は AdS/CFT 対応の現われか？ (Hata, Suganuma)
 - Ridge 構造は熱平衡以前の状態の鍵か？

「QGP の発見」から「QGP 物性 & QGP 以前のダイナミクス」へ

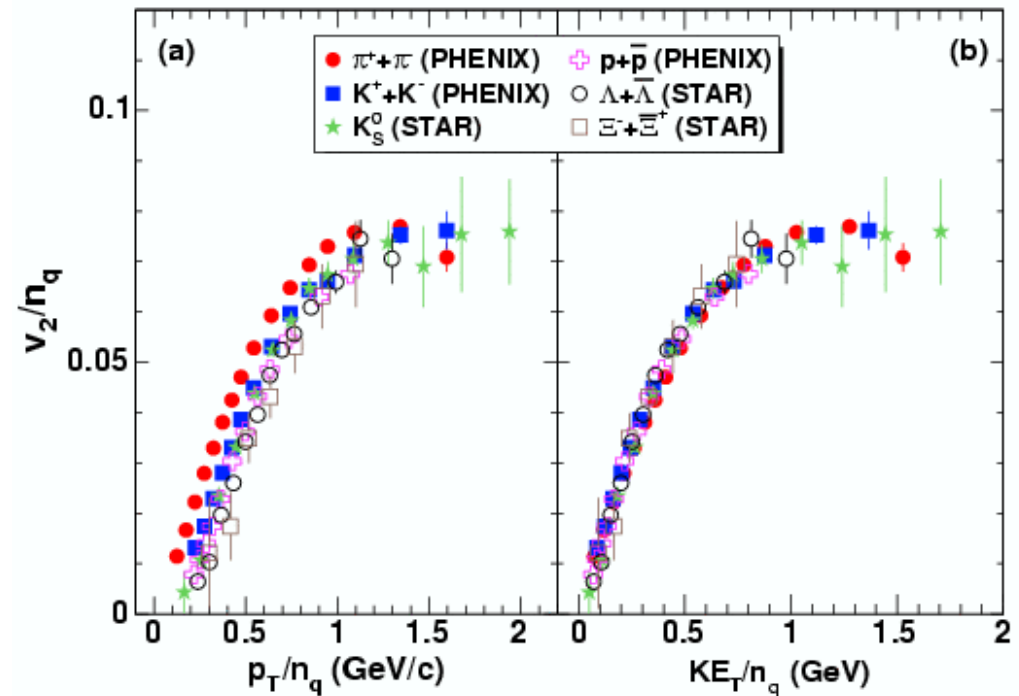
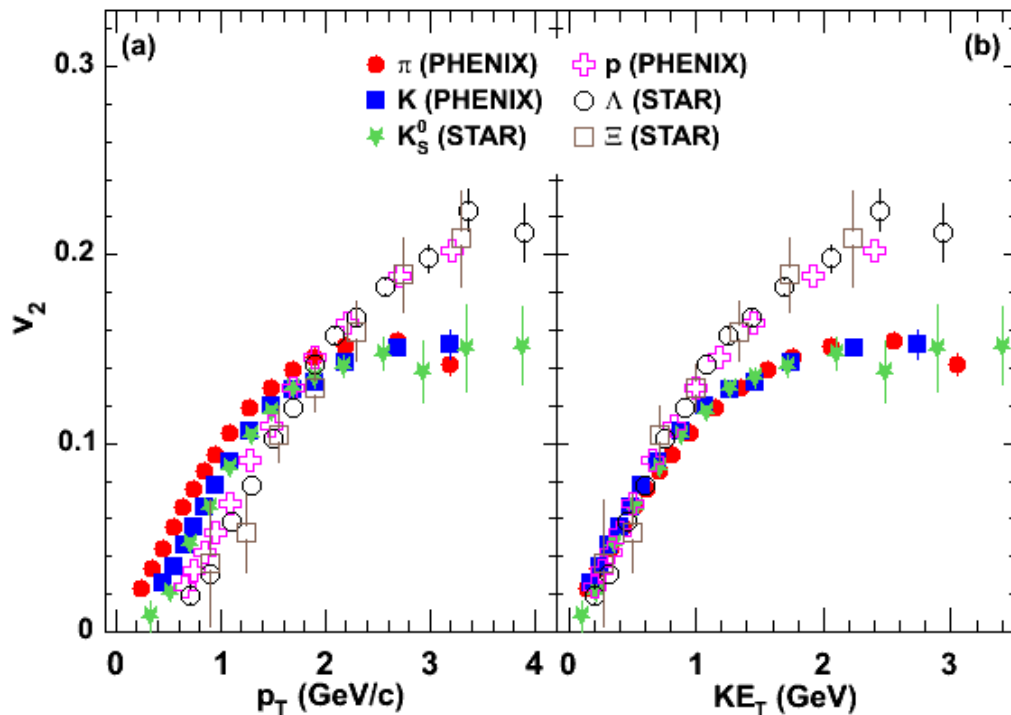


Scaling of v_2 of hadrons by Akiba

$q \bar{q}$ → 中間子の場合、分布関数は積
→ 小さなフーリエ係数は和

PRL98_162301

PHENIX



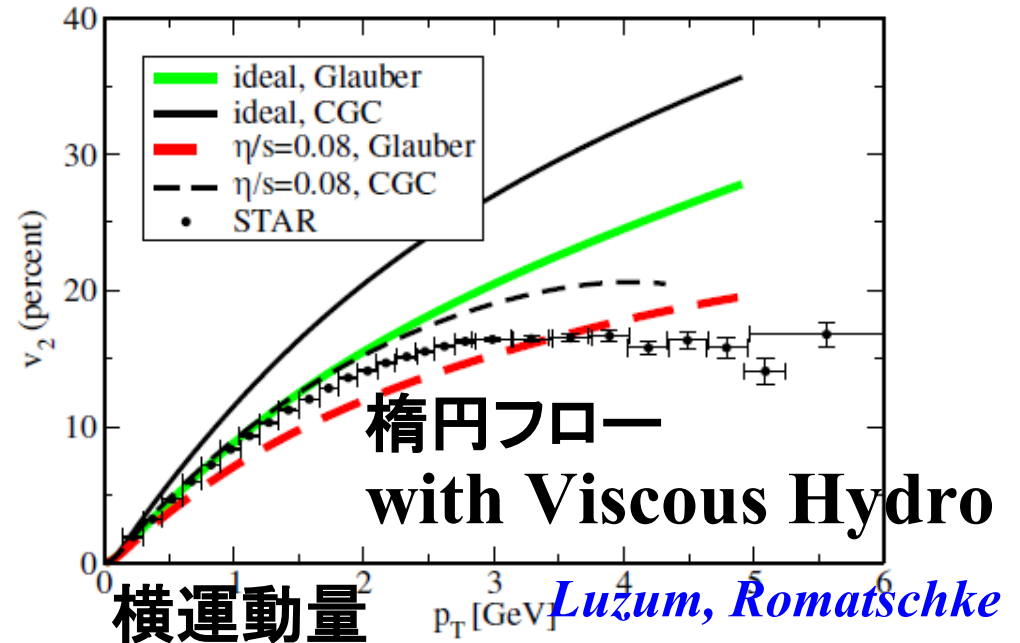
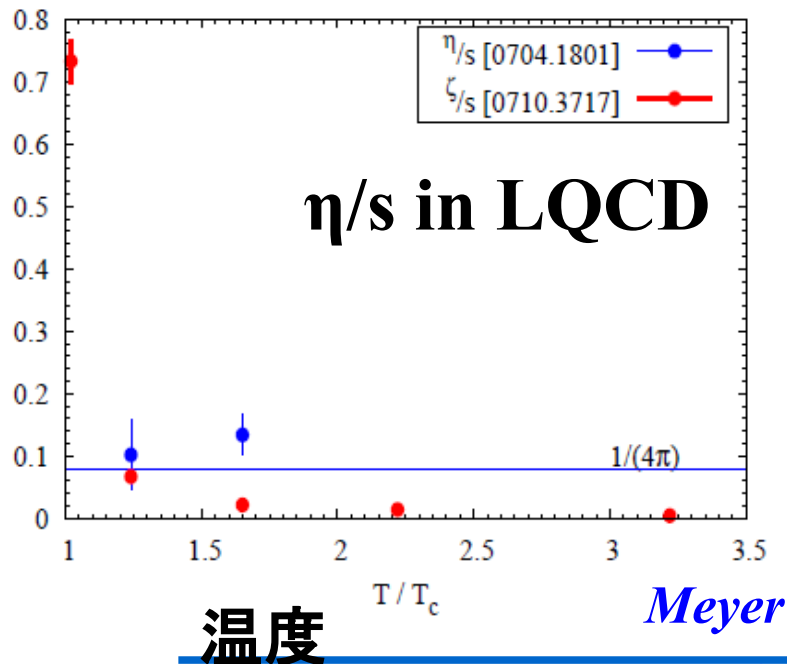
- More data on $v_2(p_T)$ of hadrons are accumulated
- When v_2/n_q vs KE_T/n_q (KE_T =transverse kinetic energy), all data points are on a universal curve, suggesting that v_2 developed in partonic stage

PHENIX

RIKEN
NISHINA
CENTER

Perfect or Viscous Hydro ?

- 完全流体模型の成功 (*Hirano et al.; Huovinen et al.; Nonaka et al.*)
 - 少し小さな離心率をだす Glauber 模型から評価した初期条件
 - ハドロン相は輸送模型 (Boltzmann) が better
- Lattice QCD → η/s は AdS/CFT 対応からの予測と consistent (*Meyer*)
- Viscous Hydro → Color Glass Condensate (大きな離心率を出す初期条件) と $\eta/s=0.08$ が consistent (*Romatschke et al.*)
- Viscous Hydro の方程式の形は？ (*E.g. Tsumura, Kunihiro, K. Ohnishi*)

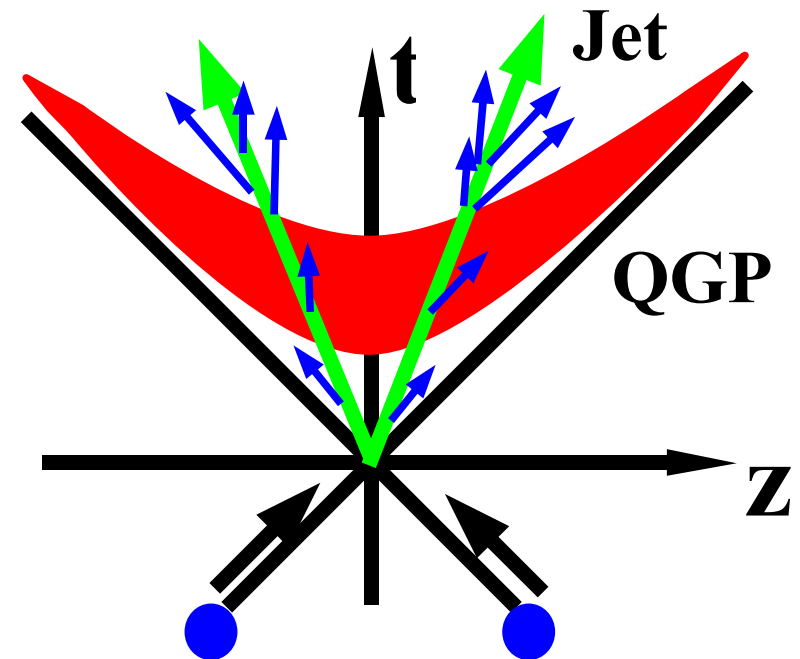
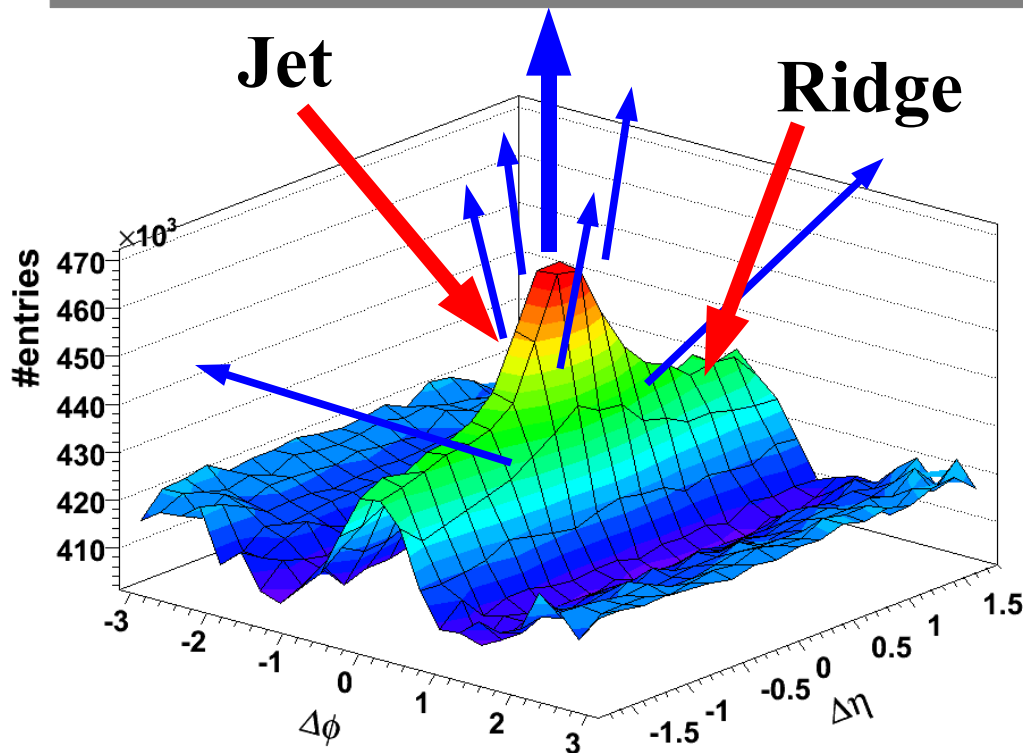


ジェットは扇形？

■ Ridge 構造

- 核子核子衝突では、ある角度内に生成粒子が集中 (ジェット)
- RHIC では、ある「平面内」にジェットが広がっているように見える (リッジ)
- Bjorken 描像 → 大きなラピディティ差 = 大きな終状態での空間の距離

Ridge 構造は Little Bang 直後の情報伝達を示唆！ → 1次元 CMB？



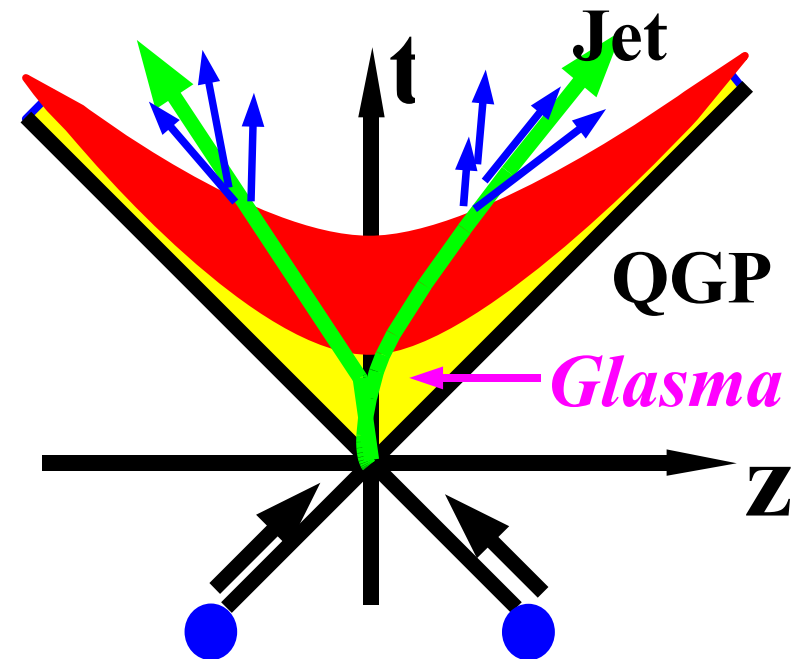
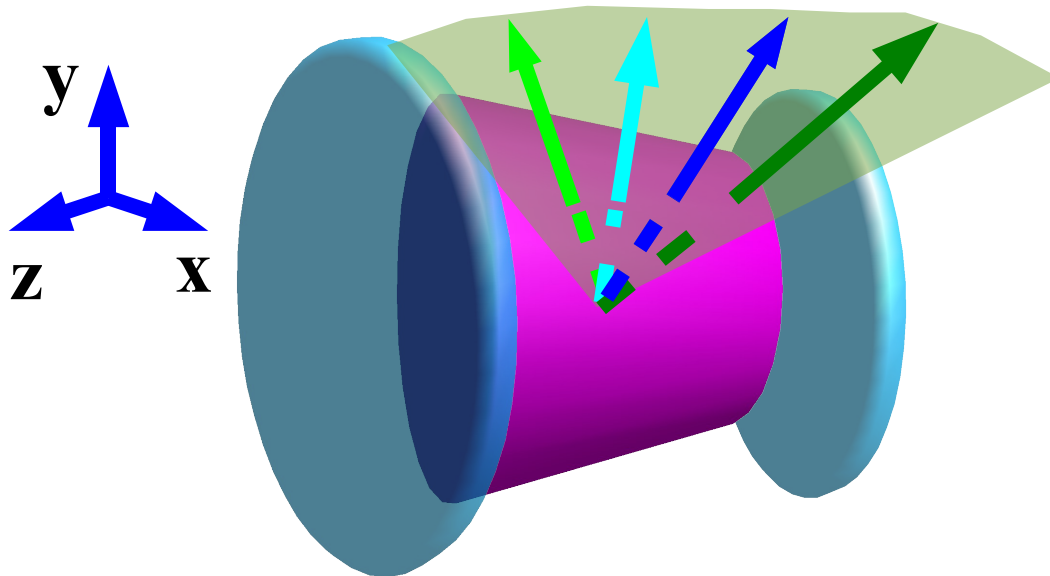
ジェットは扇形？

- 大きなラピディティ差 ~ 大きな z 方向の速度差
→ Bjorken 描像 (z 方向には一様膨張) では「大きな赤方偏移」

$$y = \frac{1}{2} \log \frac{E + p_z}{E - p_z} \rightarrow v_z = \tanh y \rightarrow \gamma_z = \cosh y \rightarrow z \simeq 2 \gamma_z = 2 \cosh y$$

ラピディティ差 ~ 2 → $z \sim 7.5$

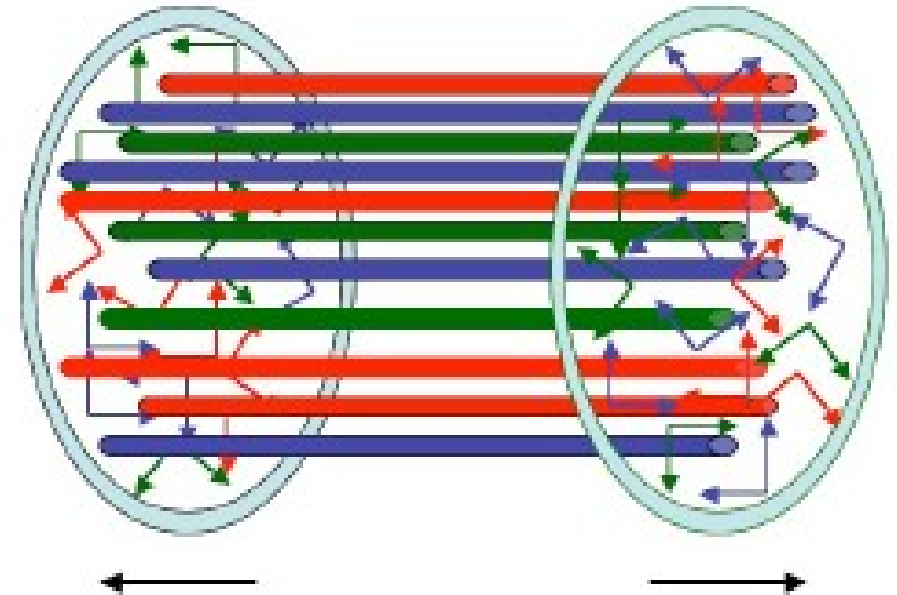
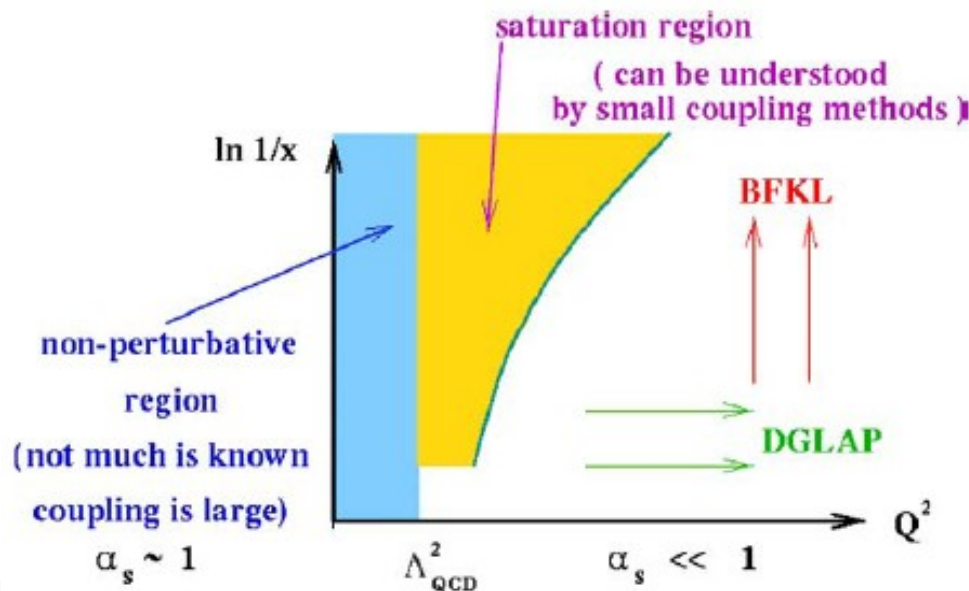
- 「遠くの粒子」との相関は、反応初期の相互作用が必要
→ 熱平衡化前 (QGP が作られる前) の状態 ~ Glasma



ジェットは扇形？

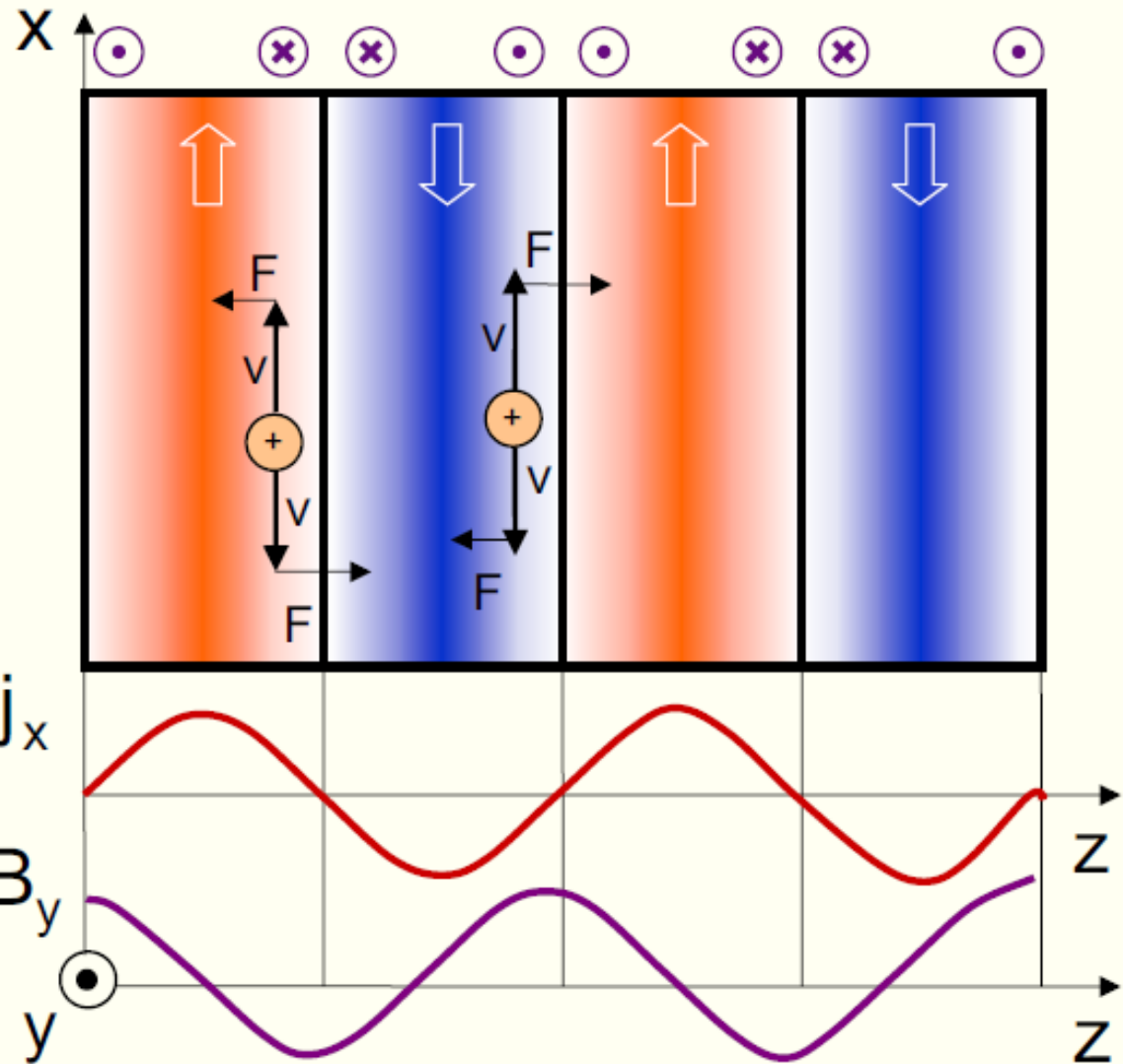
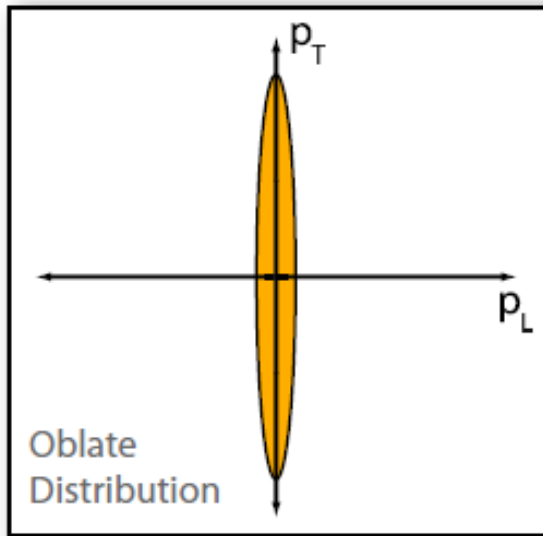
■ 平衡化前のダイナミクス

- 衝突前 ~ 高エネルギーでは原子核は「相互作用により飽和したグルーオンの塊」(Color Glass Condensate)
- 衝突直後 ~ 「古典的 Yang-Mills 場」の時間発展 (Glasma)
→ Color Tube (入射軸 (z) 方向の強い電場・磁場) *E.g. Fukushima*
- Jet 粒子は非等方
→ Weibel 不安定性 (粒子が曲がることにより電磁場を増幅) により強いカラー電磁場
Dumitru, Nara, Schenke, Strickland; Lappi, McLerran; Fujii, Itakura



by Strickland

Current Filamentation in Abelian (QED) Plasmas



Induced Current

Magnetic Fluctuation

E. Weibel, PRL 2, 83 (1959)

ジェットは扇形？

■ 低い横運動量での Ridge の説明例

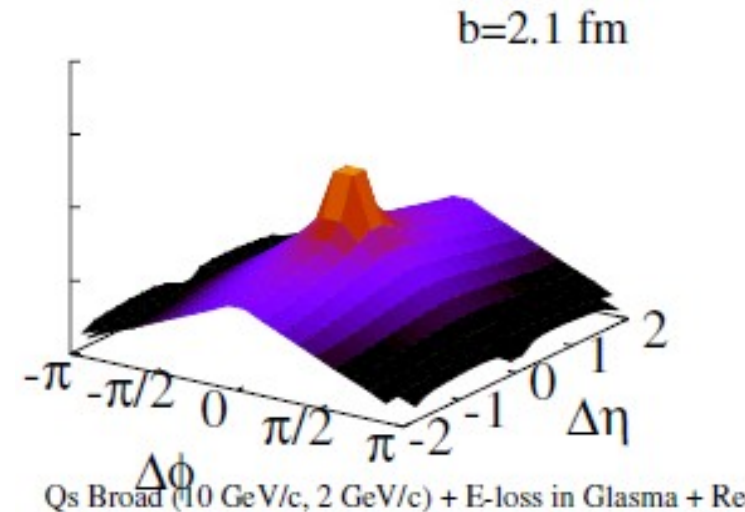
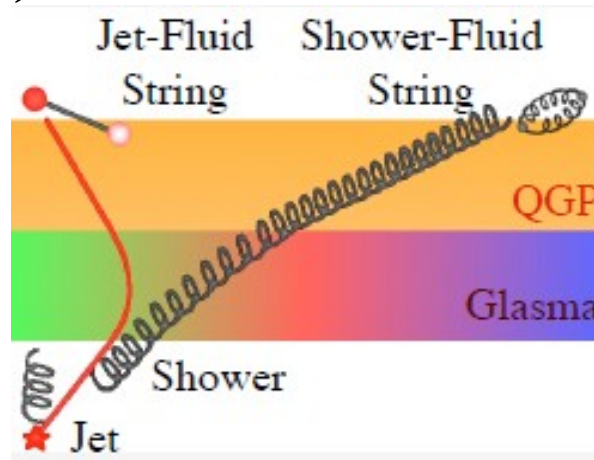
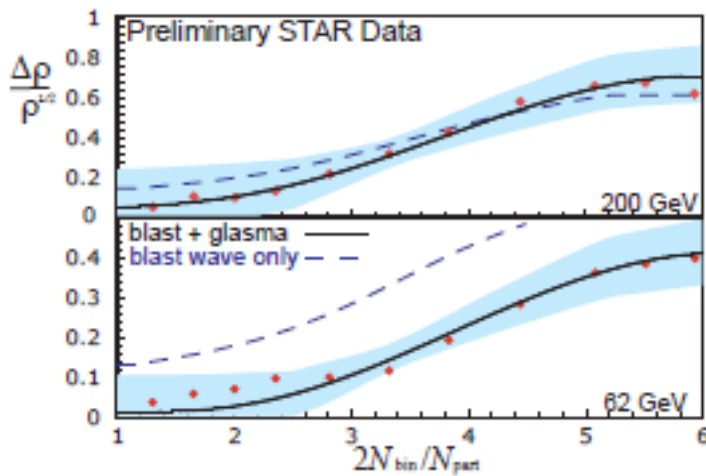
Dumitru, Gelis, McLerran, Venugopalan; Gavin, McLerran, Moschelli

- Color Tube の中で作られた粒子は広い η 相関をもつ。(Bottom up) 流体力学的なフローで押し出されると狭い ϕ 相関を持ちうる。(高い横運動量の粒子は作れない)

■ 高い横運動量での Ridge の説明例

Majumder, Mueller, Bass; Mizukawa, Hirano, Isse, Nara, AO

- ジェット粒子が放出したシャワー粒子が強い電磁場により曲げられて大きなラピディティ差をもって粒子を生成 (Top Down) (形・生成量は不十分)



Gavin, McLerran, Moschelli, 2008

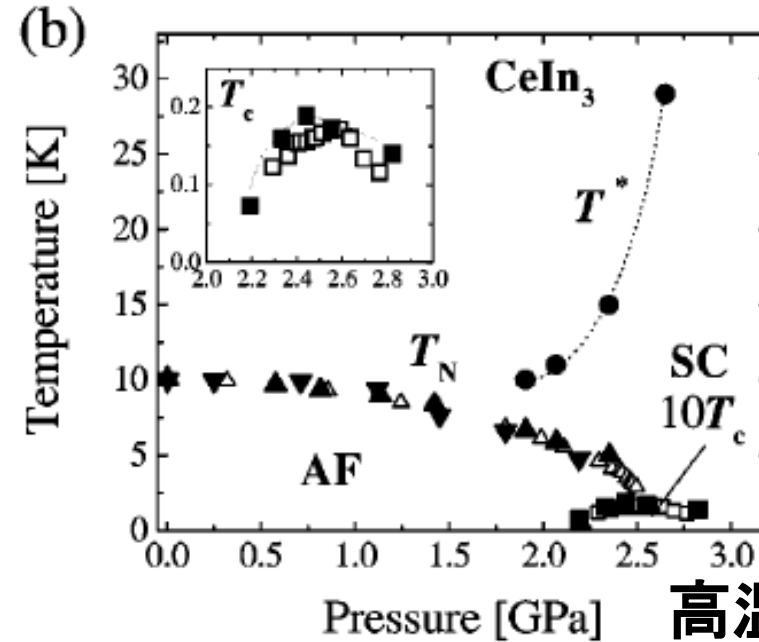
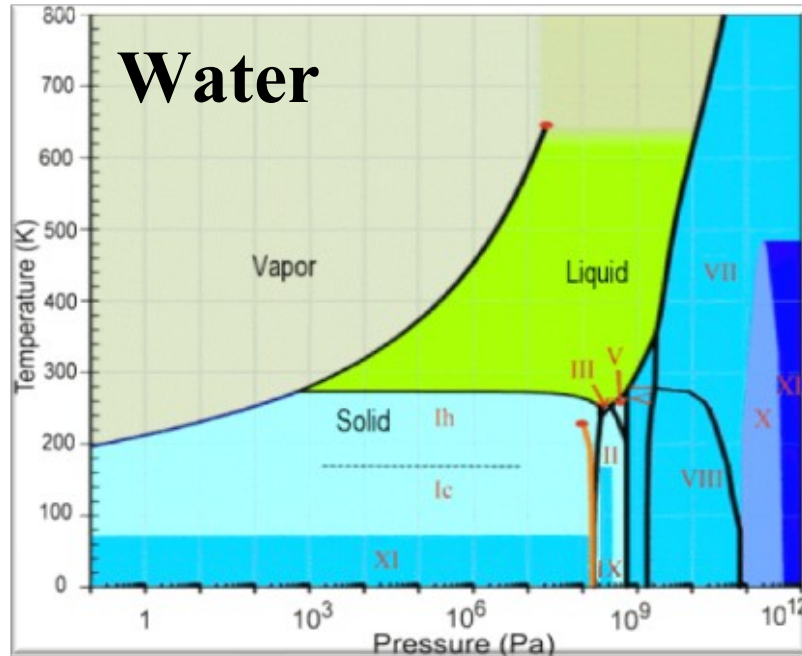
Mizukawa, Hirano, Isse, Nara, AO, 2008

1000 兆 g/cc での QCD 相転移は
見られるか？

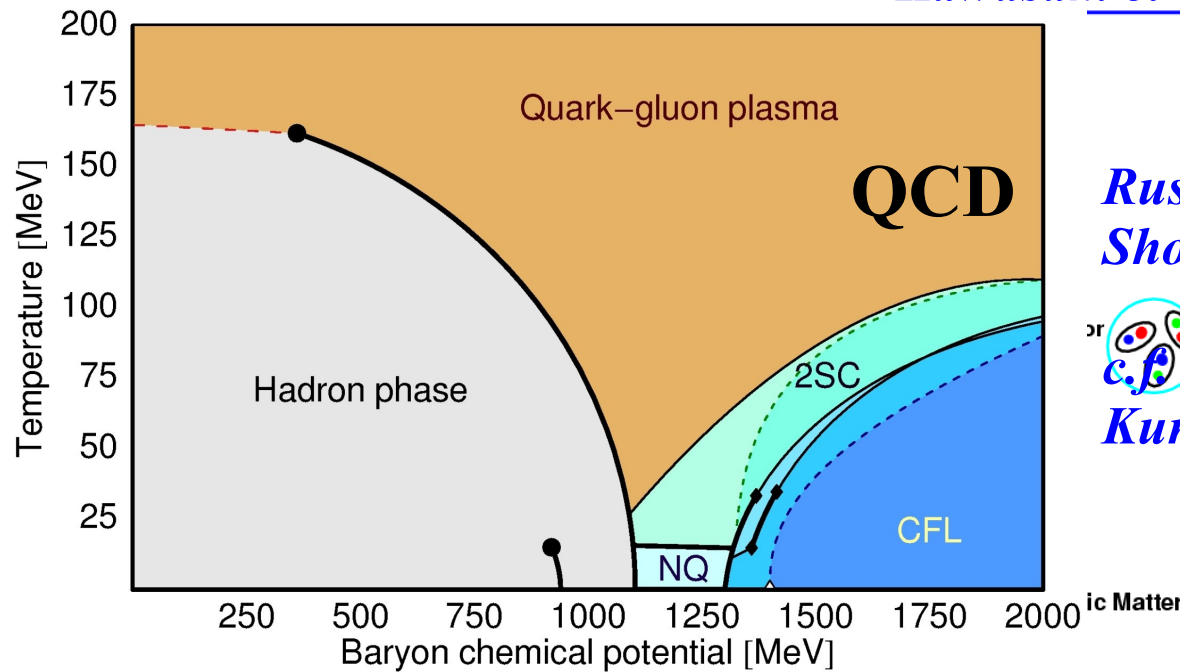
--- コンパクト天体現象と高密度核物質 ---



物質の相図



高温超伝導体
Kawasaki et al, 2001

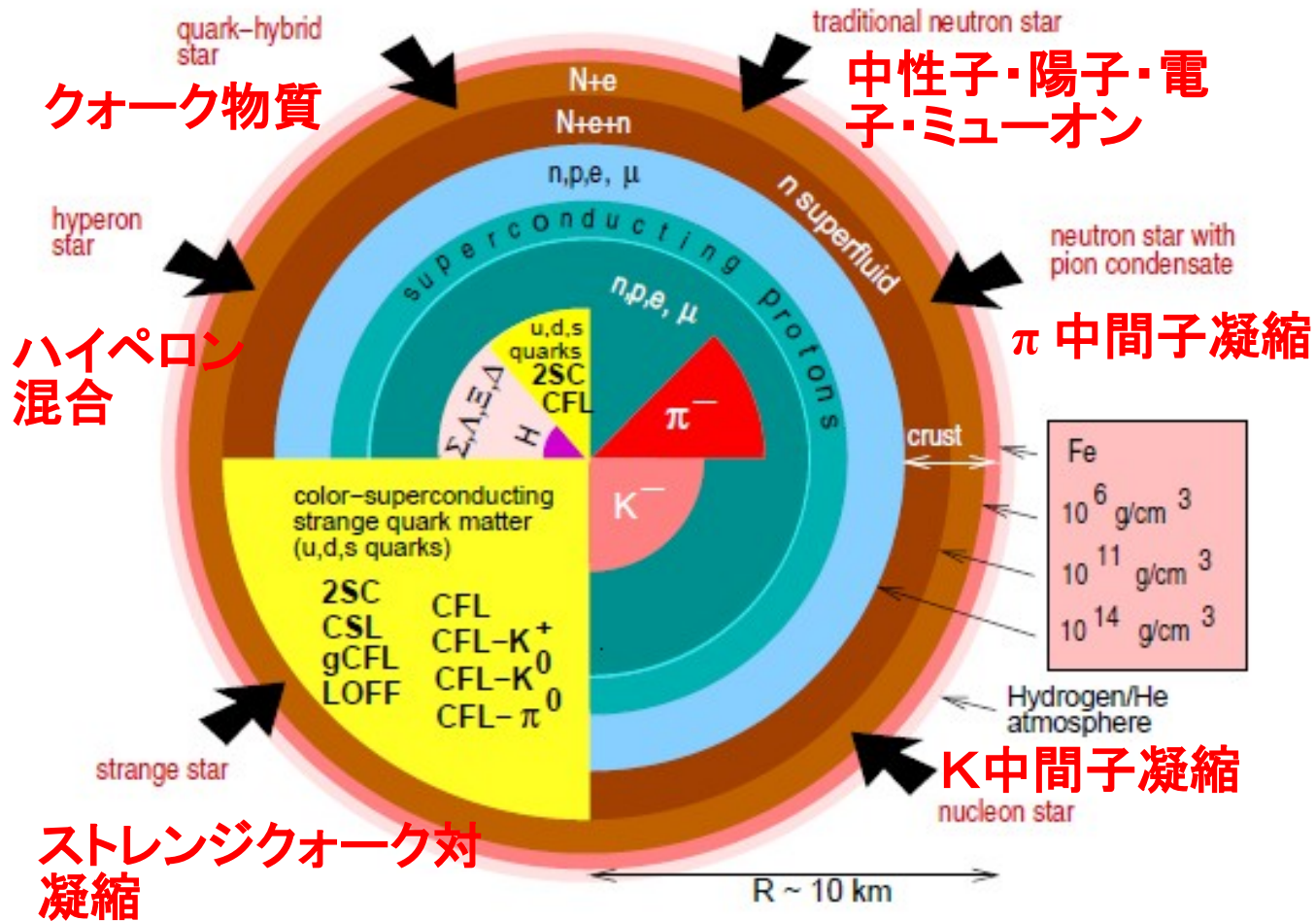


Ruster, Verth, Buballa, Shovkovey, Rischke, 2005

Dr. *c.f. Zhang, Fukushima, Kunihiro, 2008*

高密度になると何がおこるか？

- 「中性子」星の中での粒子組成は？
→ 中性子、陽子、電子、ミュオン、ハイペロン、中間子、クォーク、クォーク対、....



F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193

高密度になると何がおこるか？

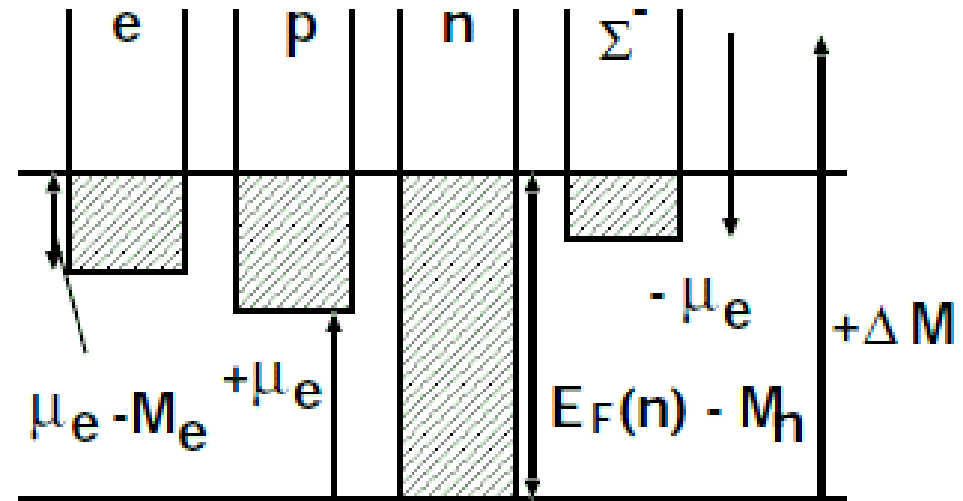
■ 密度の上昇

→ フェルミエネルギーの上昇

→ 核子以外の「超核子」(ストレンジクォークを含むハイペロン)等が現れる！

■ 例：中性子星の中での化学平衡

→ 中性子化学ポテンシャル、
電子の化学ポテンシャルで決まる



$$E_F(n) + U(n) = \mu_n$$

$$E_F(p) + U(p) = \mu_n - \mu_e$$

$$E_F(\Lambda) + U(\Lambda) = \mu_n - (M_\Lambda - M_N)$$

$$E_F(\Sigma^-) + U(\Sigma^-) = \mu_n - (M_\Sigma - M_N) + \mu_e$$

ハイペロン(ストレンジネスを含むバリオン)は非核子の最有力候補

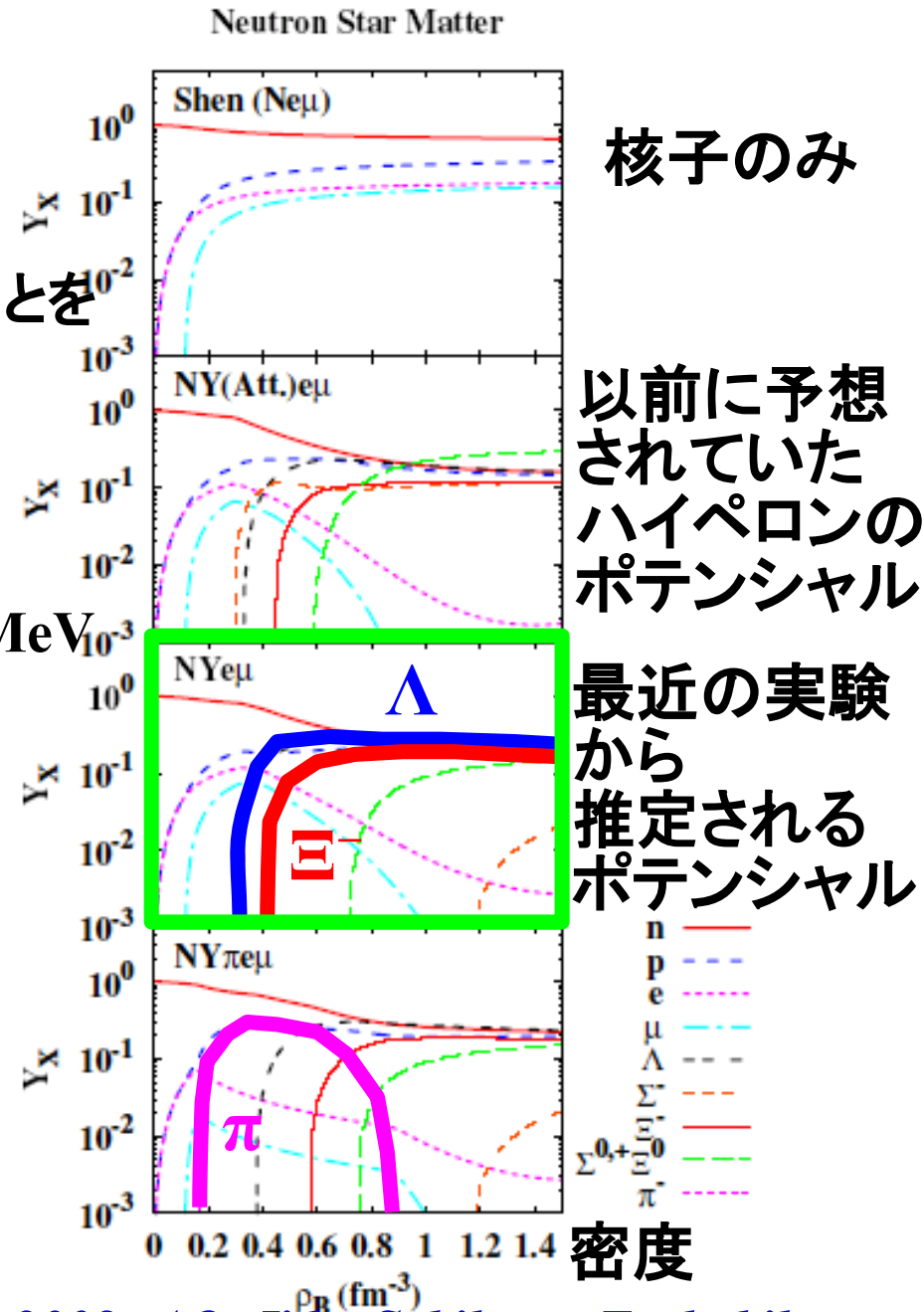
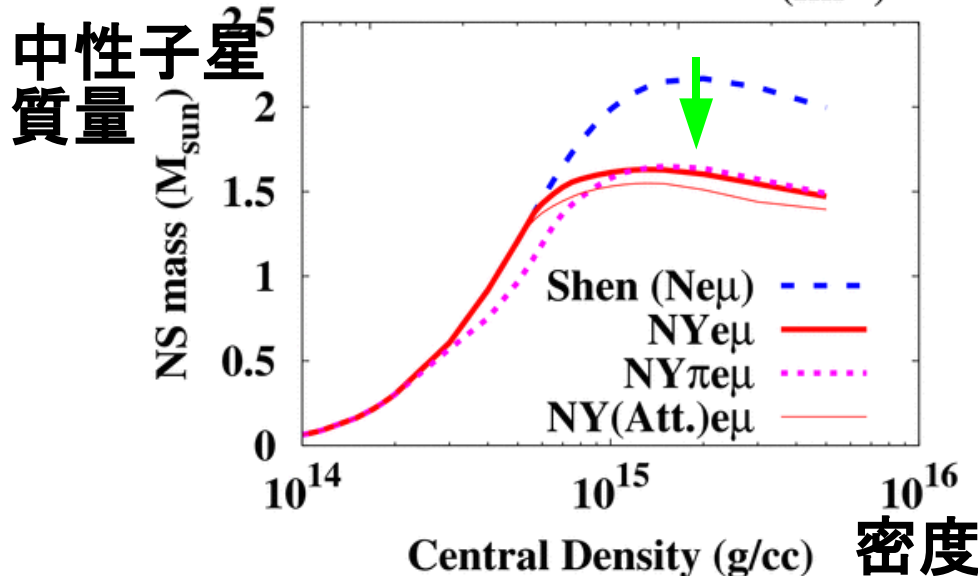
$$\mu_B = E_F(n) + U(n) \geq M(Y) + U(Y) + Q_Y \mu_e$$

中性子星の中身は？

■ 中性子星の中でのハイペロンの組成は、ハイペロンの感じるポテンシャルに強く依存する。

- どのようにしてハイペロンが現れていることを観測から「確認」できるのか？
→ ブラックホール形成過程
- どのようにして決めるのか？
→ J-PARC 実験 (永江)

$$U_{\Lambda} \sim -30 \text{ MeV}, U_{\Sigma} \sim +30 \text{ MeV}, U_{\Xi} \sim -15 \text{ MeV}$$

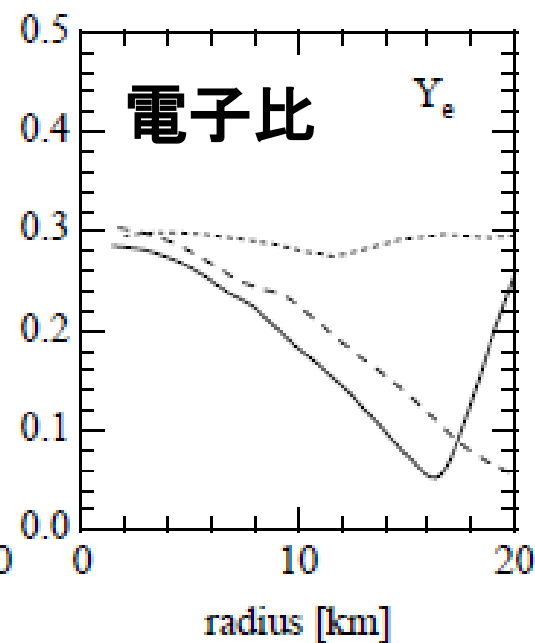
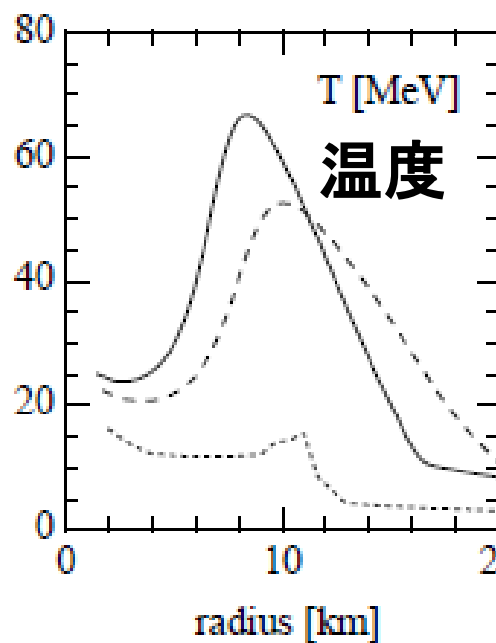
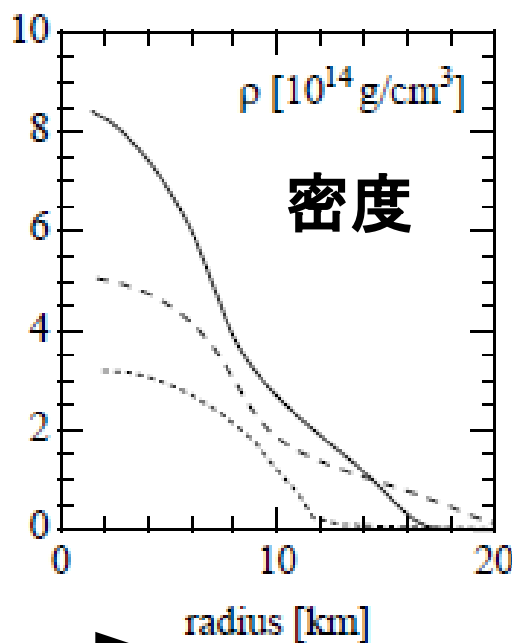
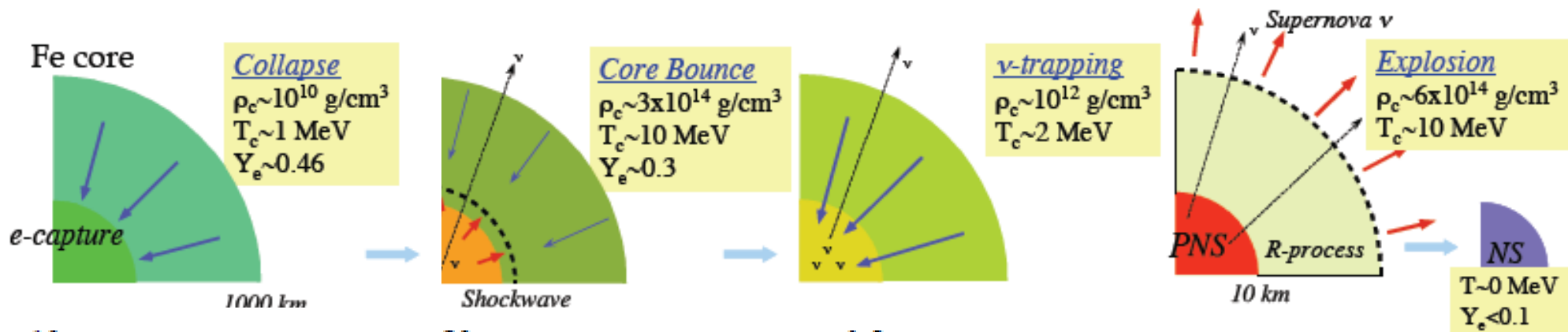


Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, 2008; AO, Jido, Sekihara, Tsubakihara

GCOE シンポジウム, 2009/02/16-18

ブラックホール形成過程

- ブラックホールが形成過程は、「高密度」というよりは、むしろ「高温」(QCD 相転移温度 (2 兆度) の約 1/3 程度まで上がる。)



バウンス直後
500 ms
680 ms
(BH 生成直前)

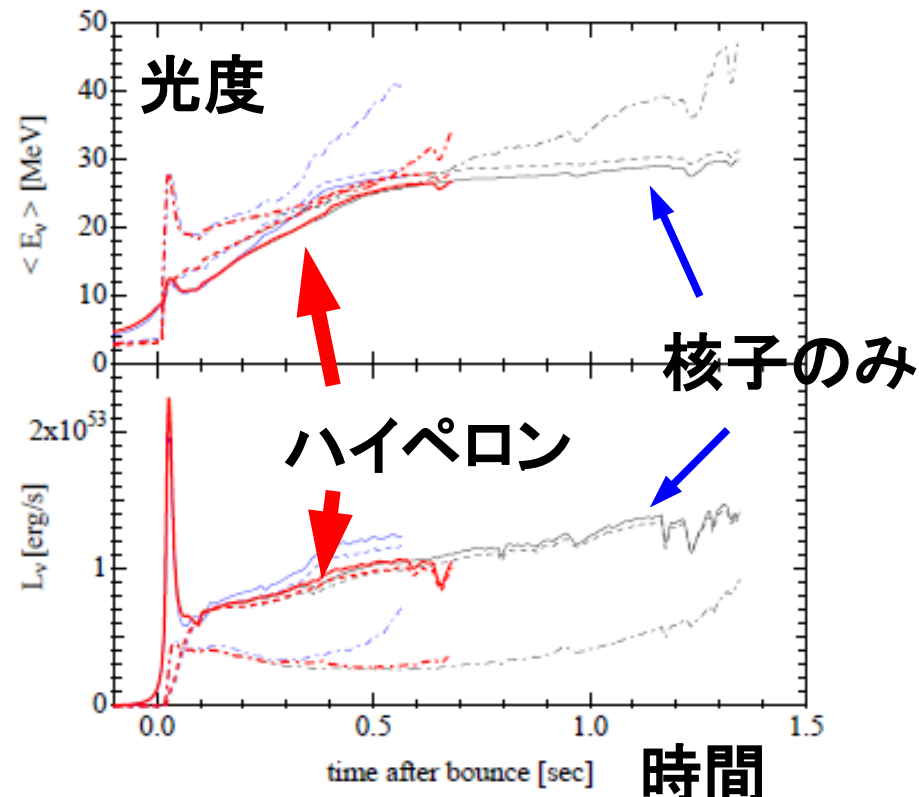
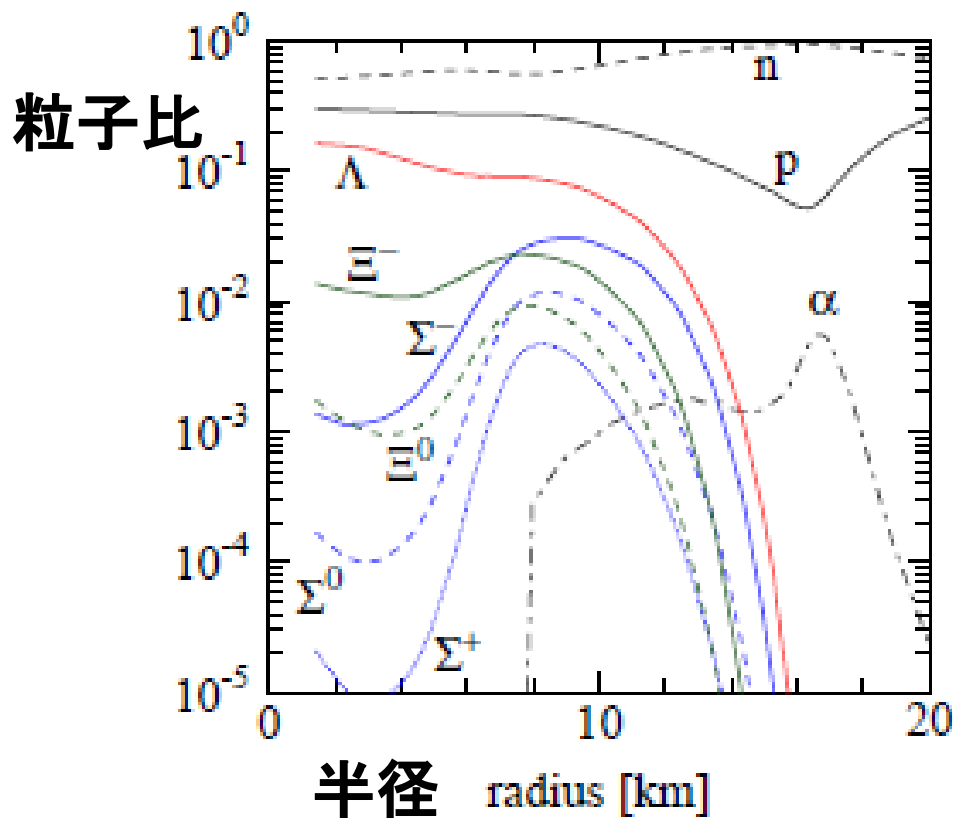
→ 半径

Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki, 2009

ブラックホール形成過程

- ブラックホール形成過程は高温状態
 - 多くのハイペロンが現れうる → 状態方程式がやわらかくなる
 - 早くつぶれてブラックホールができてしまう
 - 「ニュートリノ放出時間が短い ~ 高密度でハイペロンが現れている」

重力波だけでなく、ブラックホール形成時からのニュートリノ観測に期待！



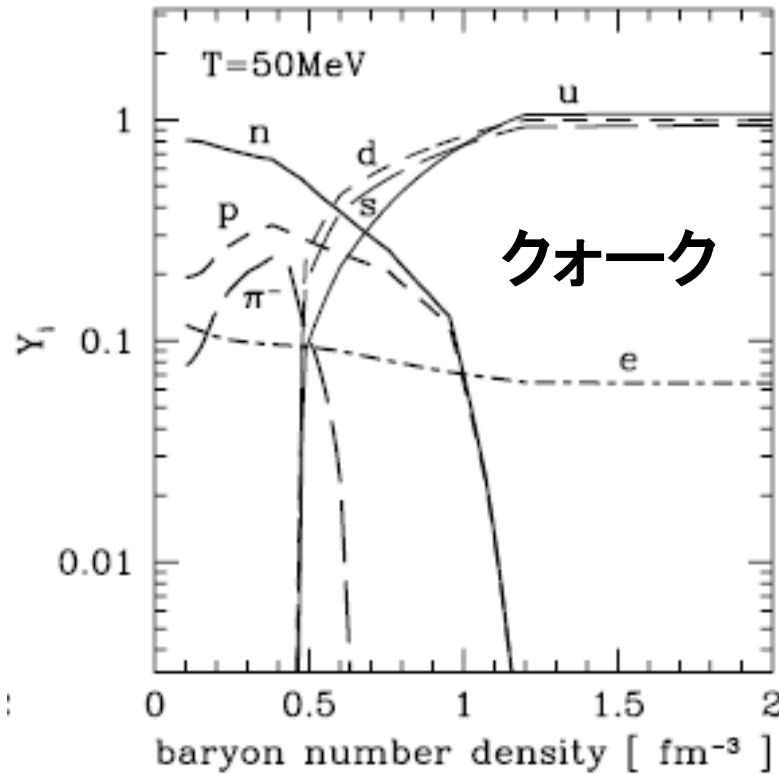
Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki, 2009

GCOE シンポジウム, 2009/02/16-18

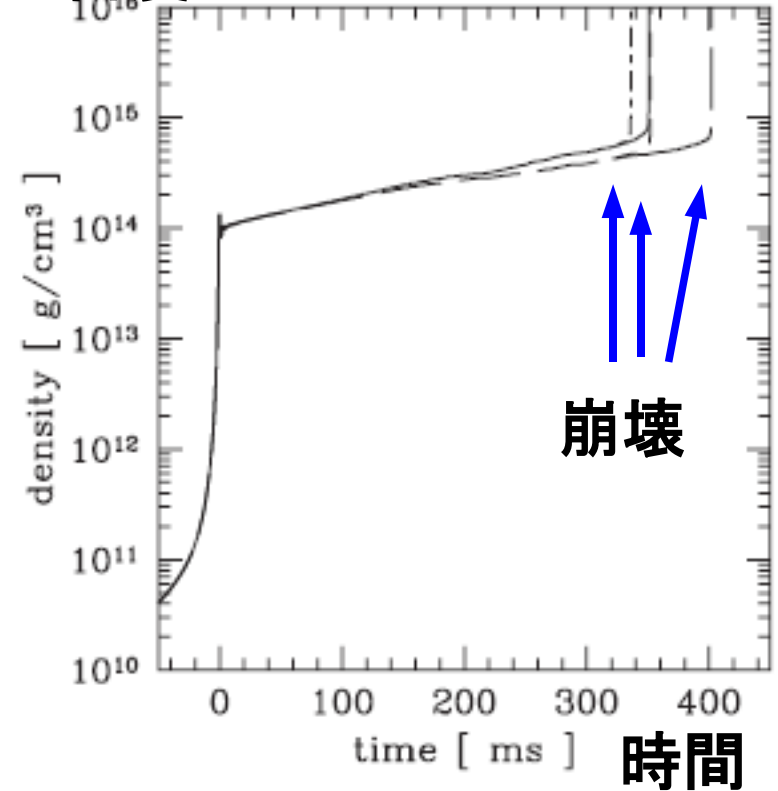
高密度 *Quark* 相は見えるか？

- クォーク相とハドロン相の共存を取り入れた超新星物質の状態方程式
E.g. Nakazato et al.
- クォーク相 = バグ模型 (摂動論的真空を自由なクォークが運動)
- ハドロン相 = 核子自由度 (+ π 粒子) を取り入れた相対論的平均場

粒子比



密度



密度

Nakazato, Sumiyoshi, Yamada

まとめ

- 高温・高密度のクォーク物質の研究が大きく進んでいる。
- 高温での QCD 相転移
 - RHIC での実験で(ほぼ確定的に) 閉じ込めから開放された、ほぼ熱平衡に達した物質 (QGP) が出来ている。
 - これまでの手法 (完全流体 + 古典粒子) の記述を超える理論の進展が求められている (相対論的粘性流体、場の時間発展、...)
 - 創発性 or 普遍性
素粒子論 (AdS/CFT)、宇宙論 (熱平衡化の機構、CMB)、物性論 (相転移点近傍) 等との共通性があらわに!
- 高密度物質の状態方程式
 - 中性子星、超新星爆発 (まだ爆発しないが)、**ブラックホール形成過程**
→ 非常に高密度の状態が実現
 - 新たな自由度 (創発、というより発現) : ハイペロン、中間子、クォーク
→ 理論の詳細に大きく依存
→ 実験: J-PARC に期待、理論: 精密な理論の開発
- 実験施設 (RHIC, LHC, J-PARC, FAIR) での進展

大強度陽子加速器施設 (J-PARC)



2009年稼動

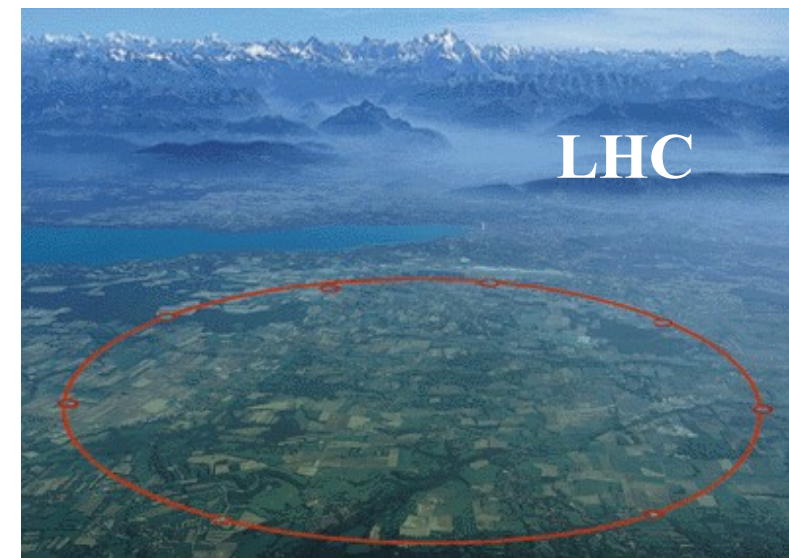
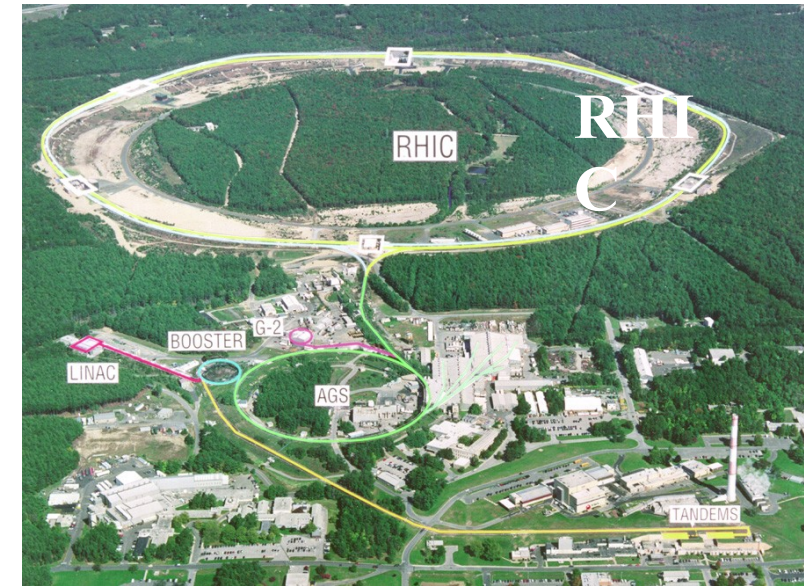
<http://j-parc.jp/>

GCOE シンポジウム, 2009/02/16-18

高エネルギー重イオン衝突実験

■ 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
RHIC II
- CERN-LHC (2008-): 3 + 3 A TeV



Thank You for Your Attention !

