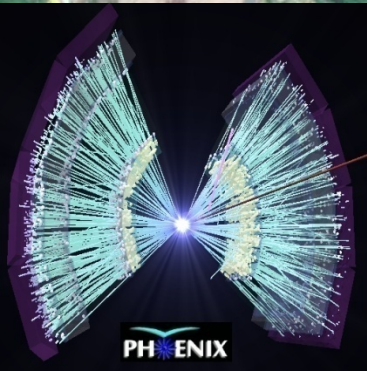


# RHIC PHENIX実験と

RHIC

# その将来計画



LINAC

BOOSTER

G-2

AGS

CiRFSE ワークショップ(宇宙史国際拠点)

2015年3月12日

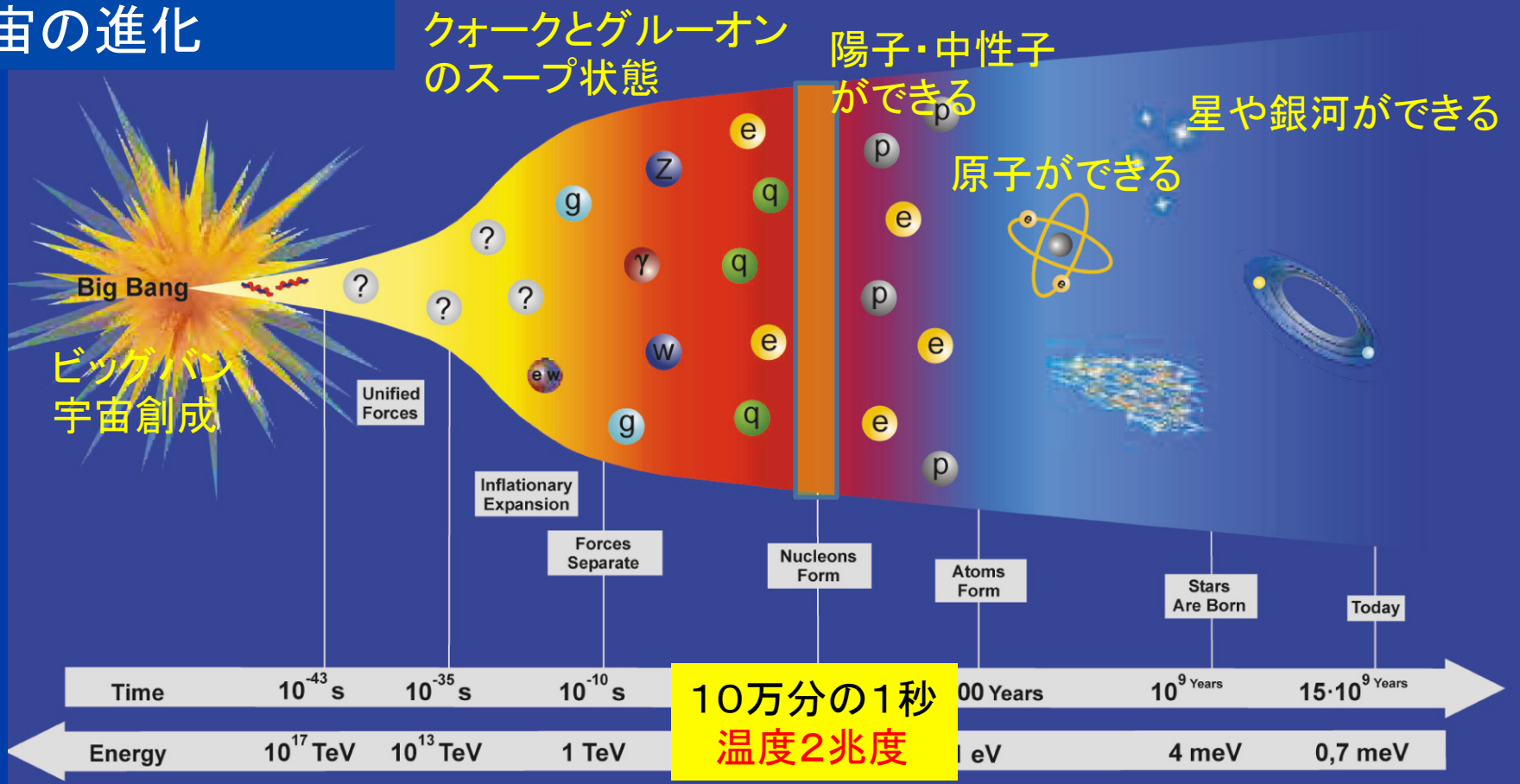
理化学研究所仁科加速器研究センター

秋葉康之

TANDEM

# 宇宙初期の状態を再現する

## 宇宙の進化



今から138億年前に宇宙はつくられた

宇宙初期は超高温で、クォークとグルーオンからなるスープ状態だった

宇宙創成10万分の1秒後に、このスープが冷えて凍って、陽子や中性子ができる

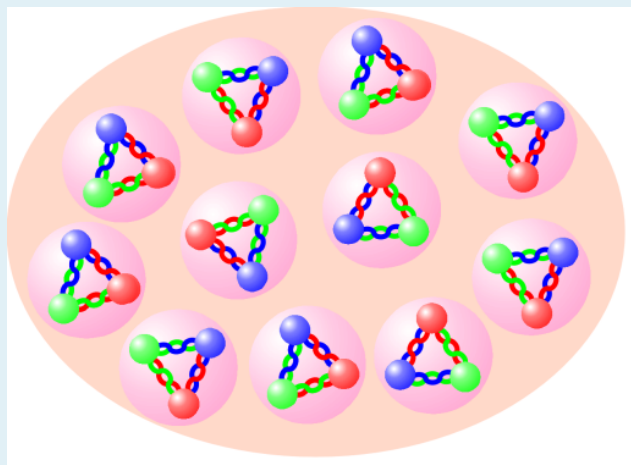
RHICではこの宇宙初期のクォーク・グルーオンスープ (QGP) を再現している

# 宇宙初期の超高温状態を再現する

ビッグバン直後10万分の1秒くらいまでの初期宇宙はクォークとグルーオンからなる超高温のスープ、クォーク・グルーオン・プラズマだった。

重い原子核同士を超高エネルギーで衝突させることで、宇宙初期と同じ温度2兆度以上の超高温状態をつくり、クォーク・グルーオンスープを再現できる

通常物質



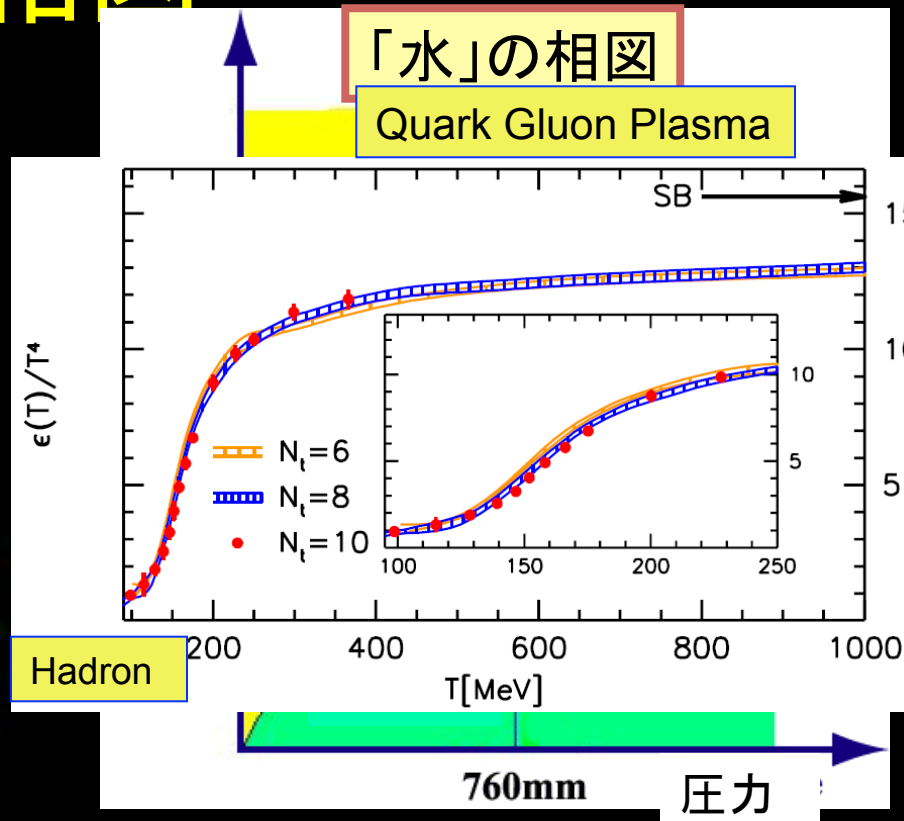
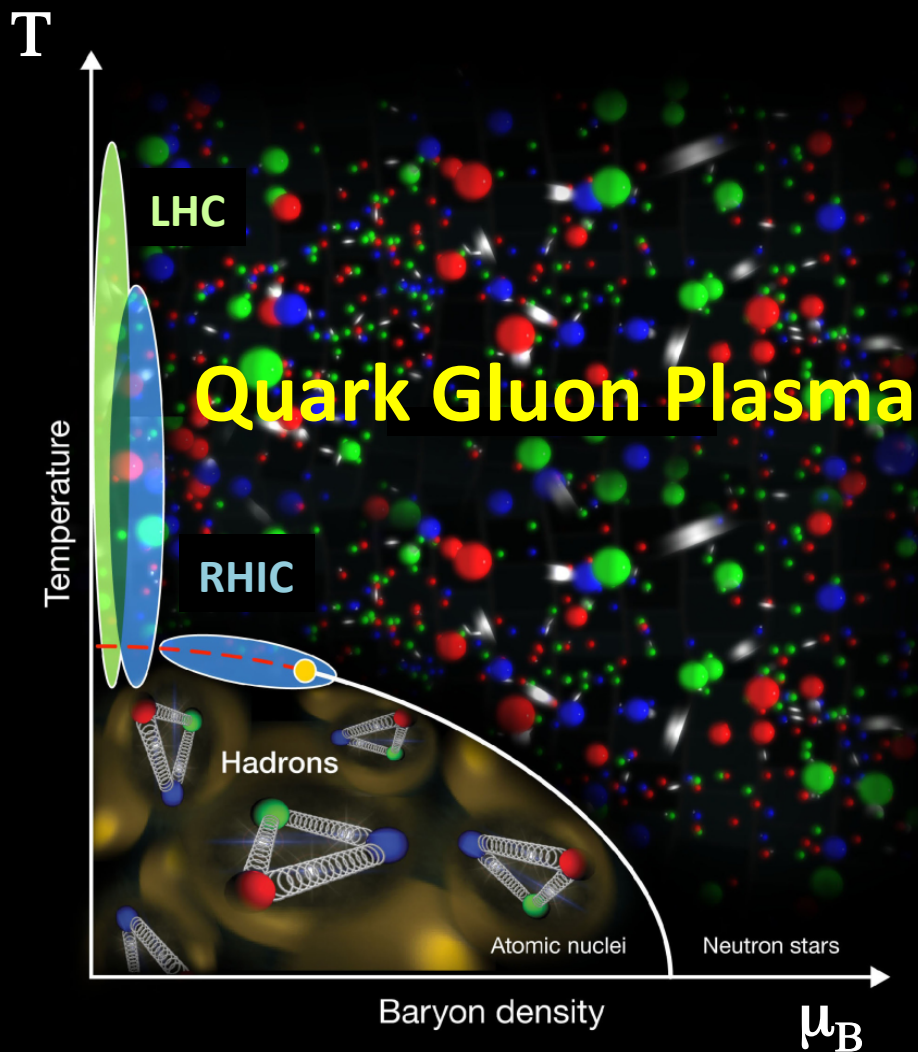
通常物質状態では、クォークやグルーオンは、陽子や中性子という、「氷粒」の中に閉じ込められている。

2兆度以上の高温状態では、陽子や中性子という「氷粒」が溶けて、クォークとグルーオンからなるスープになる

氷粒が溶けて水になるように、陽子・中性子が溶けてクォークスープになる

**クォークグルーオンプラズマ(QGP)**

# QCD 相図



格子QCD計算によると、  
 $T_c \sim 160 \text{ MeV}$ ;  $\epsilon \sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$

QGP相転移は初期宇宙の相転移のなかで、唯一実験的に再現可能。

# RHIC加速器

PHENIX実験

RHIC

BOOSTER

G-2

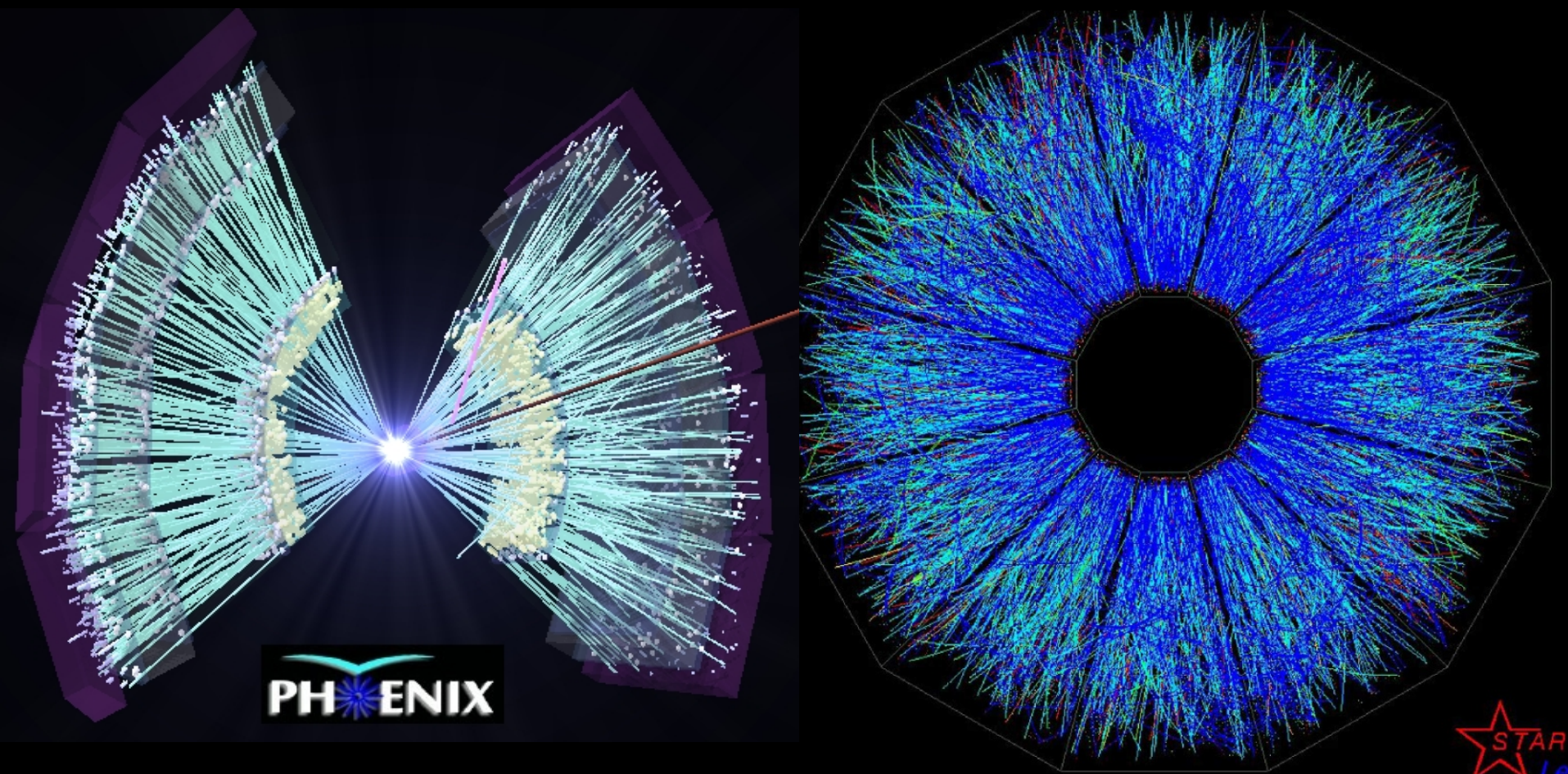
LINAC

AGS

TANDEM



# RHICでの金原子核衝突



RHICの金原子核衝突では、1衝突事象で数1000の粒子が生まれる  
これらの粒子を大測定器で測定し、それから反応初期に何が起きているか进行分析する



PHENIX

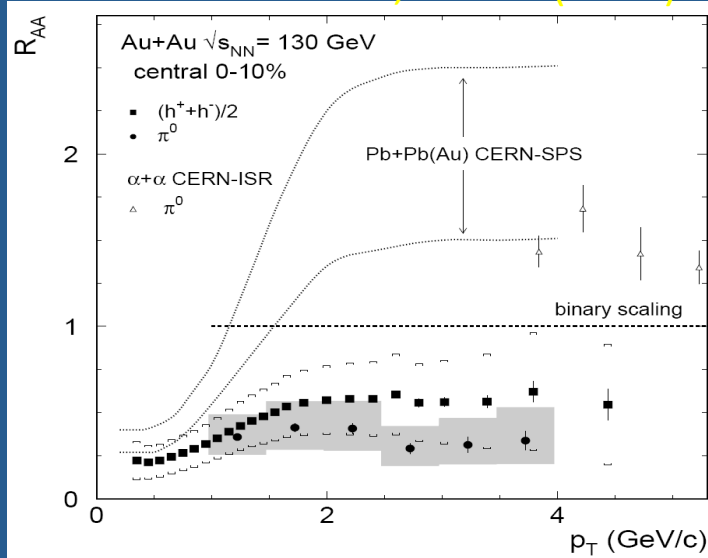
# PHENIX実験





# RHICでの2大発見

PHENIX PRL88,022301(2002)



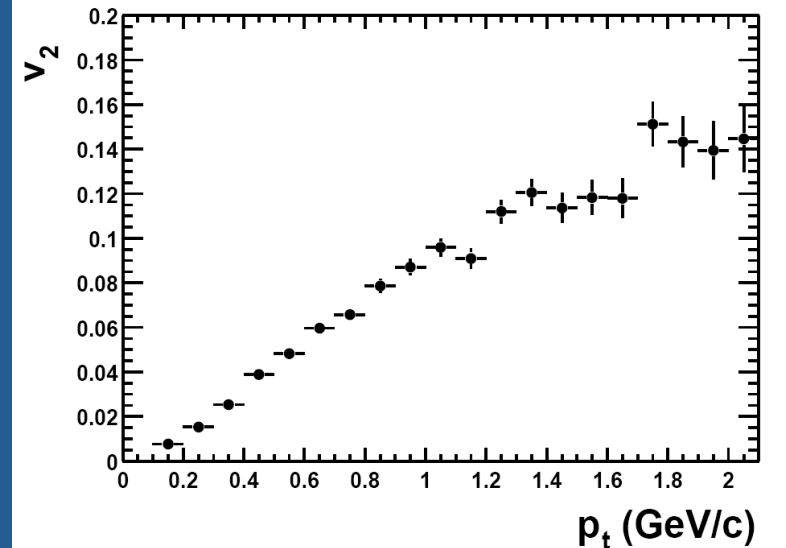
## 高横運動粒子の抑制

### Jet Quenching

生成された物質中で、クォーク  
やグルーオンが大きなエネルギー損  
失を蒙っている

→ RHICで生成された物質は高密度

STAR PRL86,402 (2001)

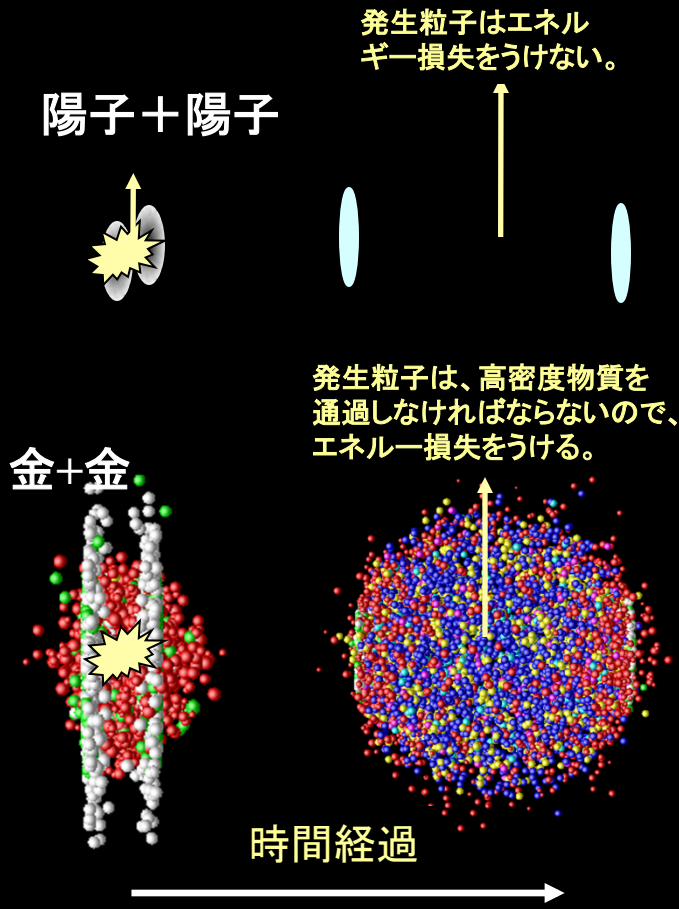


## 「楕円型集団フロー」

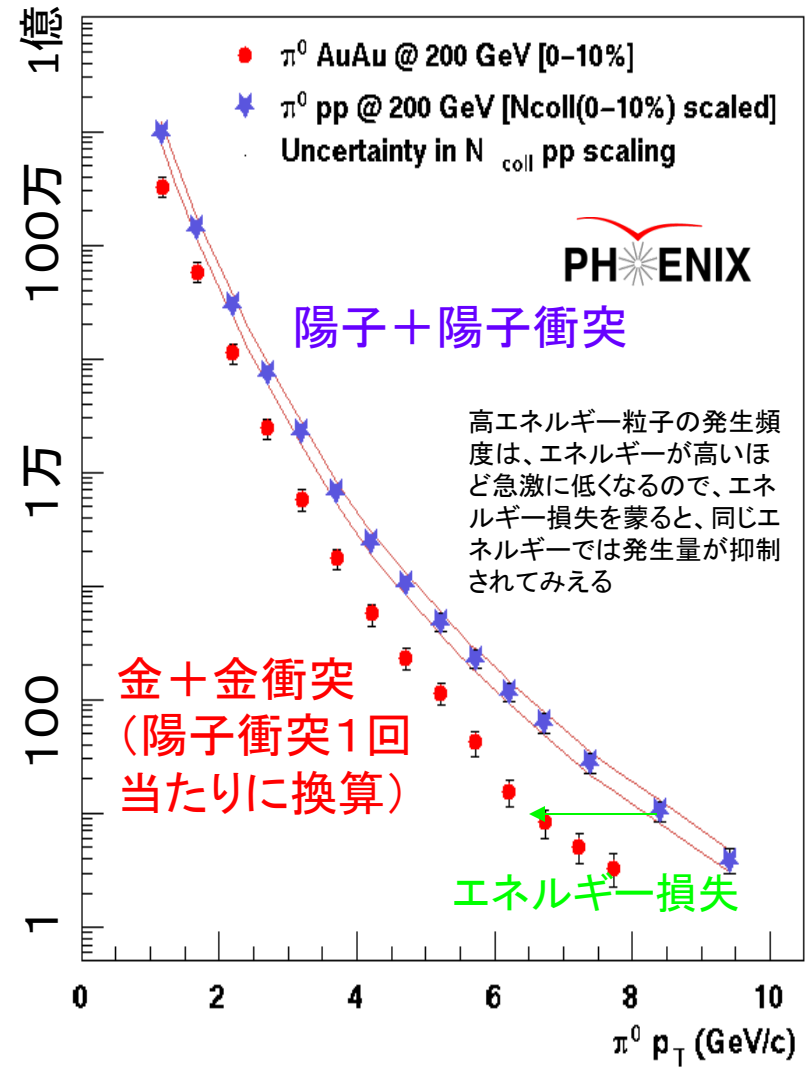
発生粒子が横方向へ集団運動をしてい  
る。

→ 粘性/エントロピー比 ( $\eta/s$ ) が小さな流  
体がつくられている

# 発見(1): 高横運動量ハドロン抑制



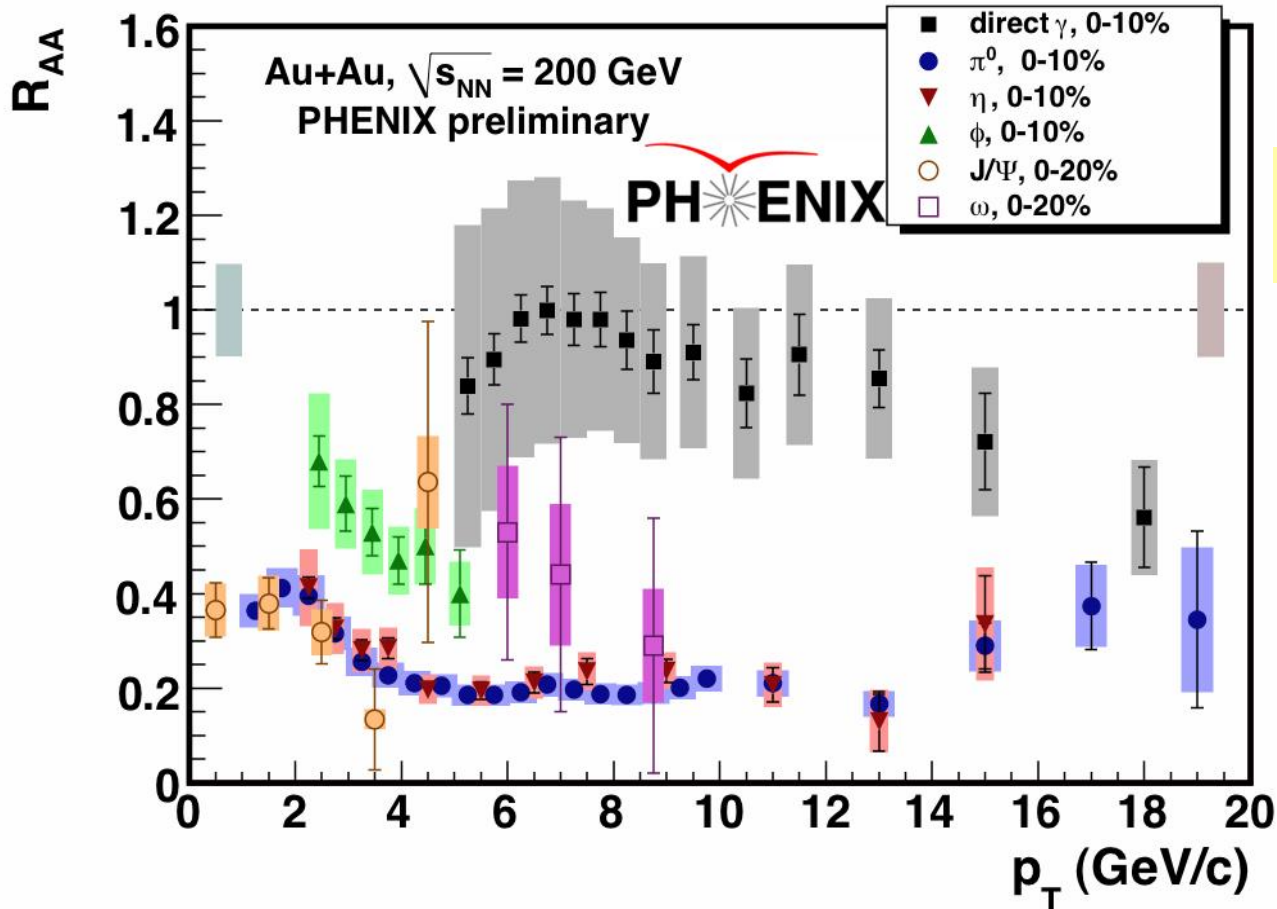
粒子の発生頻度(相対値、対数目盛)



低 発生粒子のエネルギー → 高

金-金衝突では高エネルギー粒子の発生量が陽子+陽子衝突に比べて著しく抑制されている。これは、金+金衝突で出来た高密度物質の中を粒子が通過する間にエネルギーを損失するためと考えられる。

# 色々な粒子の $R_{AA}$ (QGPによる生成抑制)



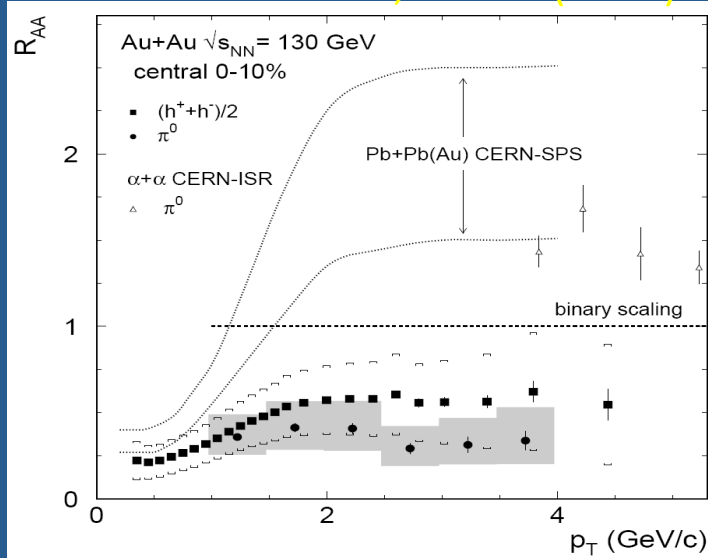
$$R_{AA} = \frac{\text{Yield}_{\text{AuAu}} / \langle N_{\text{binary}} \rangle_{\text{AuAu}}}{\text{Yield}_{pp}}$$

陽子+陽子の場合に比べての抑制度

- $\pi^0$  は $\sim 20$  GeV/cまで $R_{AA} \sim 1/5$ と強く抑制されている。
- $\pi^0$  と $\eta$  の  $R_{AA}$  は同じ $\diamond$  パートのレベルで抑制が起こっている。
- direct  $\gamma$  は抑制されていない。→ 抑制の原因はQGP 媒体効果

# RHICでの2大発見

PHENIX PRL88,022301(2002)



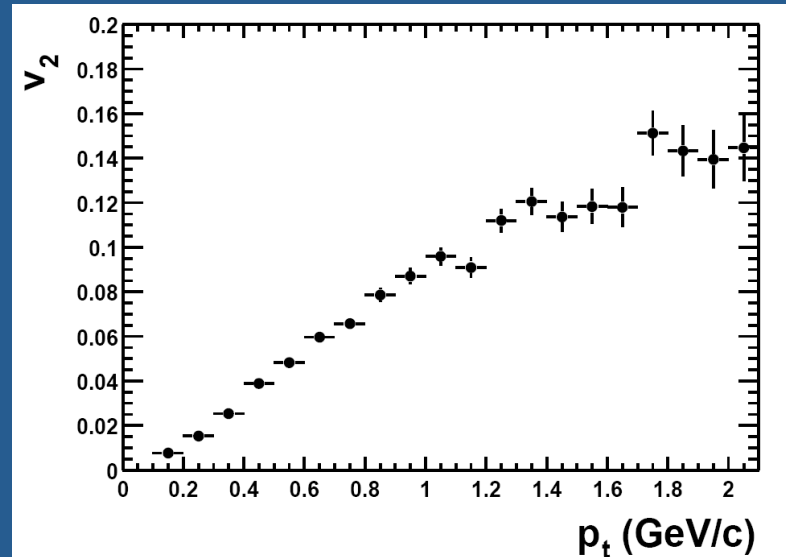
## 高横運動粒子の抑制

### Jet Quenching

生成された物質中で、クォーク  
やグルーオンが大きなエネルギー損  
失を蒙っている

→ RHICで生成された物質は高密度

STAR PRL86,402 (2001)

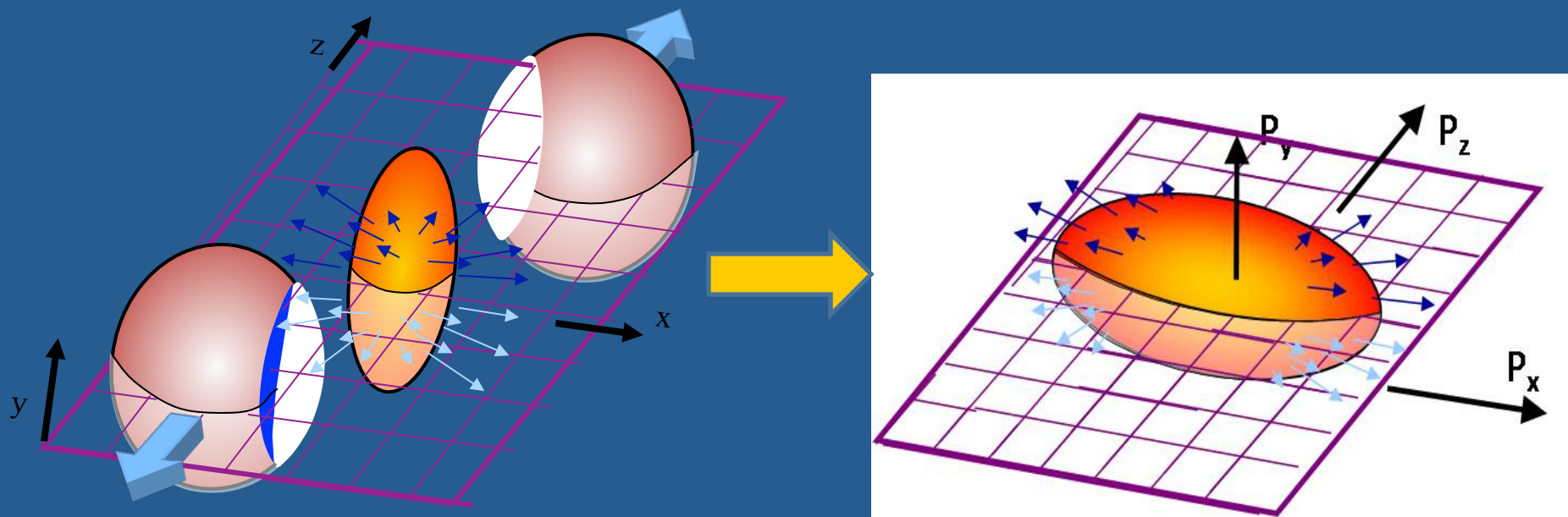


## 「楕円型集団フロー」

発生粒子が横方向へ集団運動をしてい  
る。

→ 粘性/エントロピー比 ( $\eta/s$ ) が小さな流  
体がつくられている

## 発見(2): 楕円フロー(横方向の集団流)



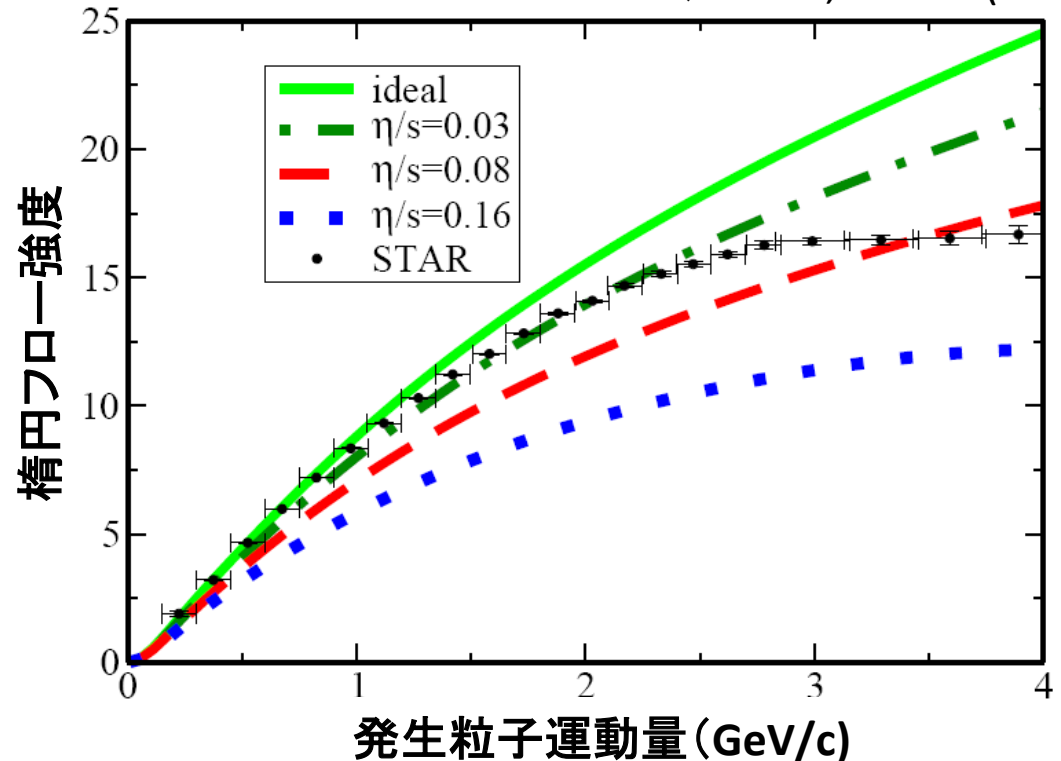
衝突のさい、楕円形をした高密度のQGPができる。

これが内部圧力で拡大するとき、圧力勾配の大きな横方向に集団的なフローがおこる。これはQGPの粘性がほとんどないため。

# 相対論的流体力学計算と比較

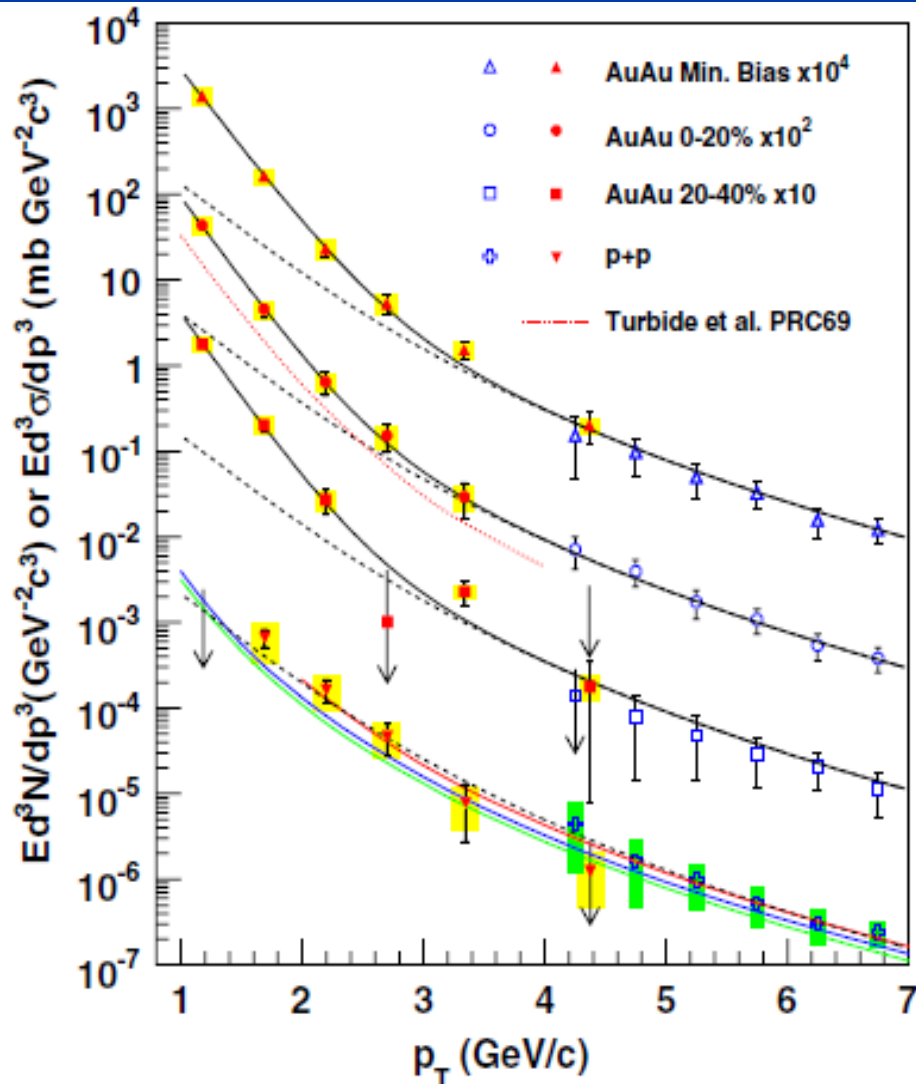
- 流体の振る舞いは粘性 $\eta$ とエントロピー密度 $s$ の比 ( $\eta/s$ ) できまる
  - 粘性を含む相対論的流体力学と実験の比較から  $\eta/s$  を定量的に評価
  - $\eta/s$ の値は0.1程度と非常に小さい。
  - 粘性がほとんどないので、フローが生まれる
- RHICでつくられたQGPはほぼ「完全流体」

P. Romatschke and U. Romatschke, PRL99,172301(2007)

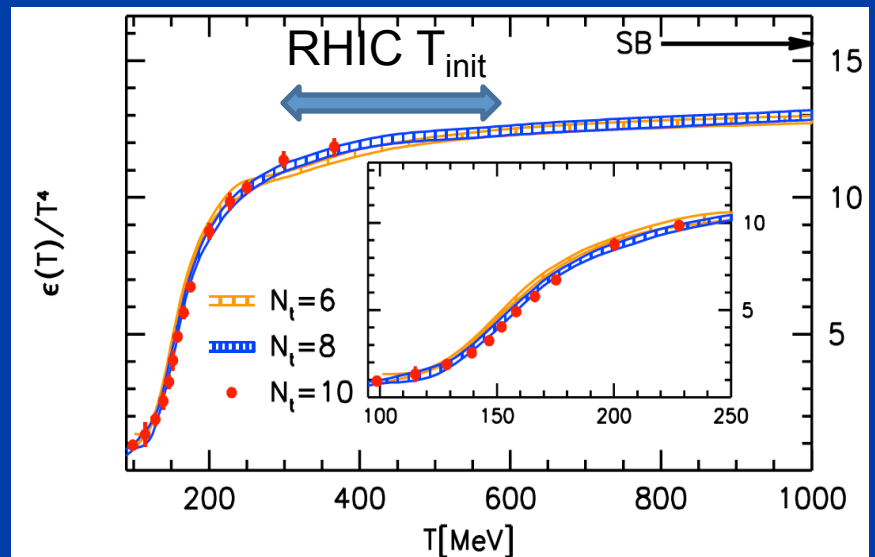


# 直接光子による初期温度測定

PHENIX PRL104, 132391 (2010)

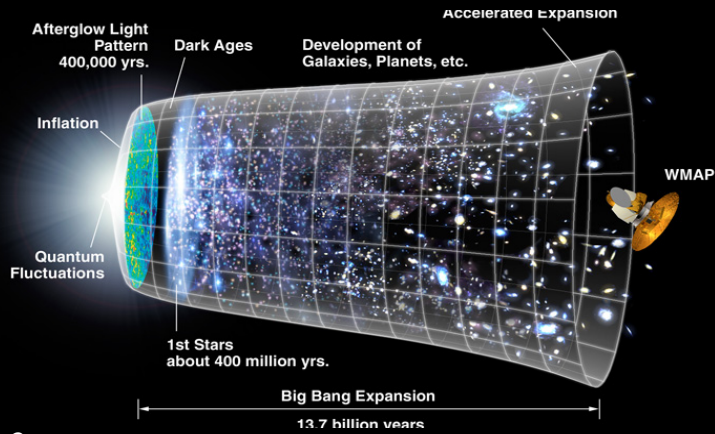


- Low  $p_T$ での直接光子生成の増加は、高温のQGPからの熱放射によると考えられる。
- 増加した光子の運動量分布と強度は、初期温度300-600MeVからの熱放射と一致している。

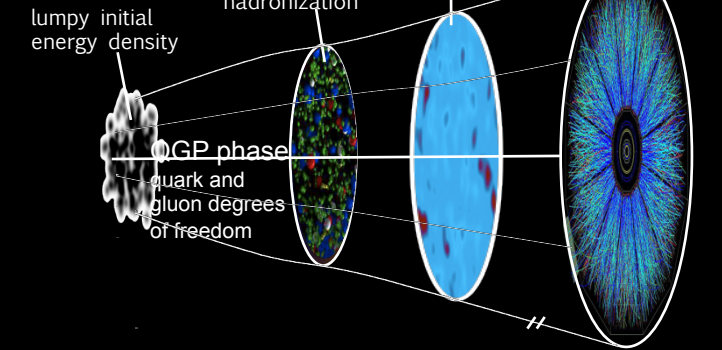


# ビッグバン(宇宙)とリトルバン(重イオン衝突)

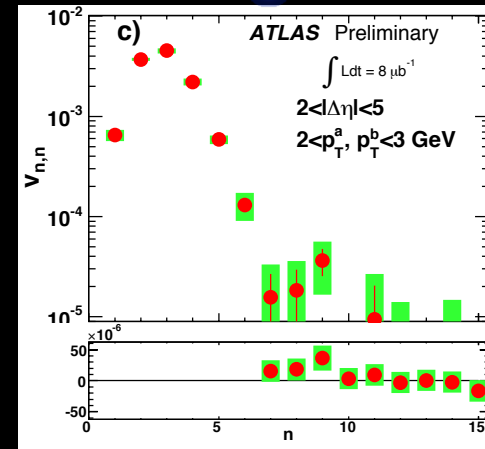
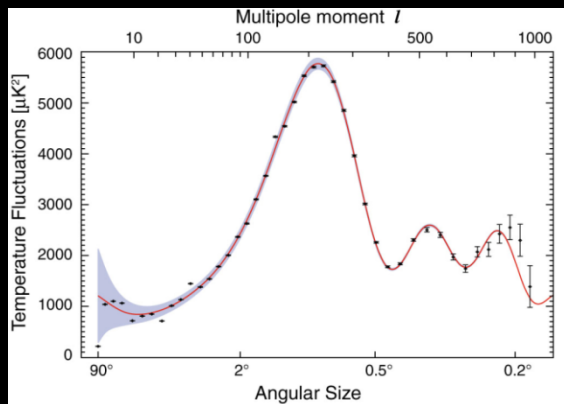
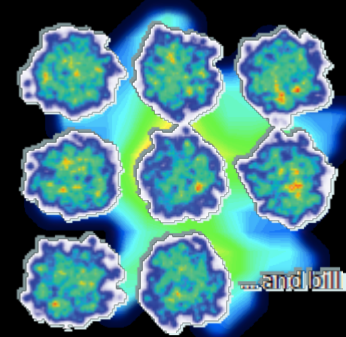
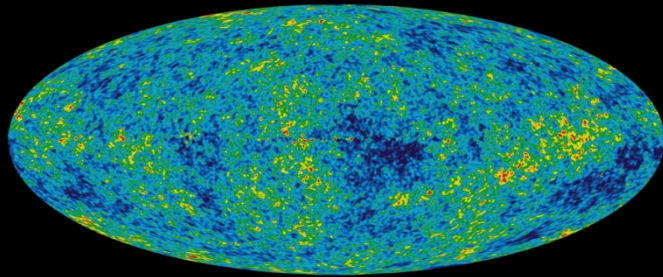
## The Universe



## HIC

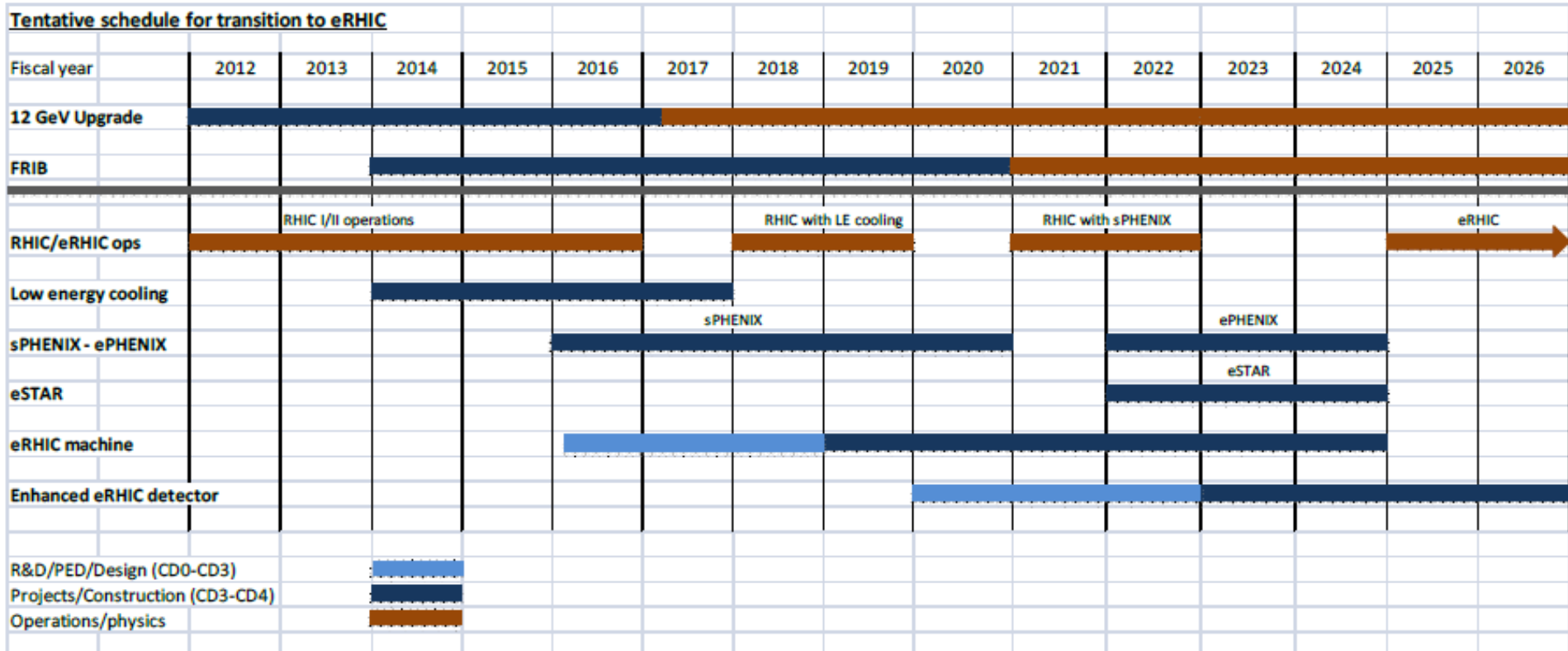


C<sub>n</sub>





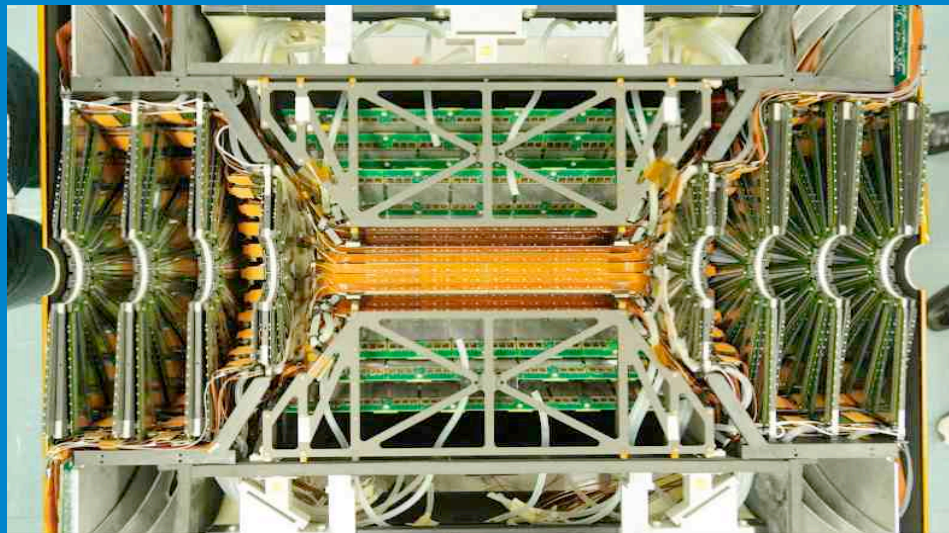
# RHICの今後と eRHIC計画



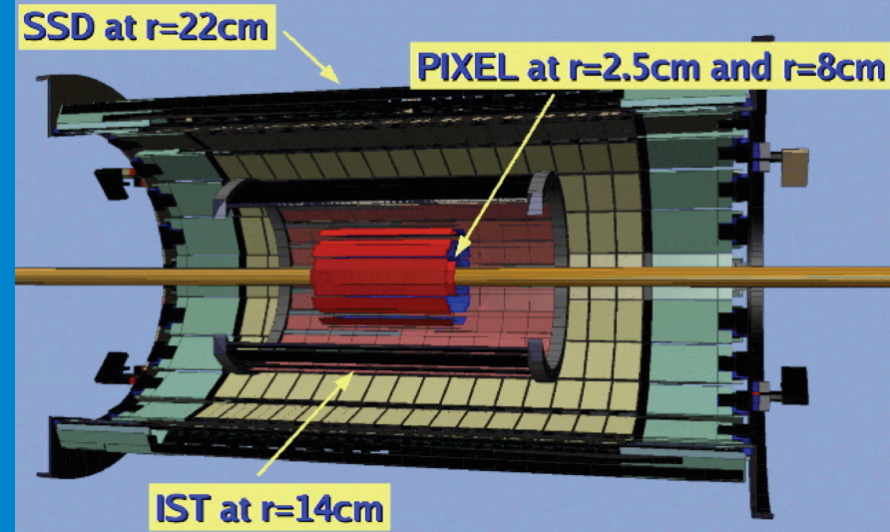
- 2014-16  
2017  
**現在のPHENIX/STARによるHeavy Flavor測定**  
臨界点探索のための電子ビーム冷却の設置
- 2018-19  
2020  
**Beam Energy Scan II: QCD物質の臨界点**  
sPHENIX インストールのためのシャットダウン
- 2020-21  
2022-23  
**sPHENIX: RHICでのジェット測定**  
eRHIC建設のためのシャットダウン
- 2025  
**eRHIC 運転開始**

# 2014-16: 重クォーク(b, c) 測定

PHENIX VTX + FVTX

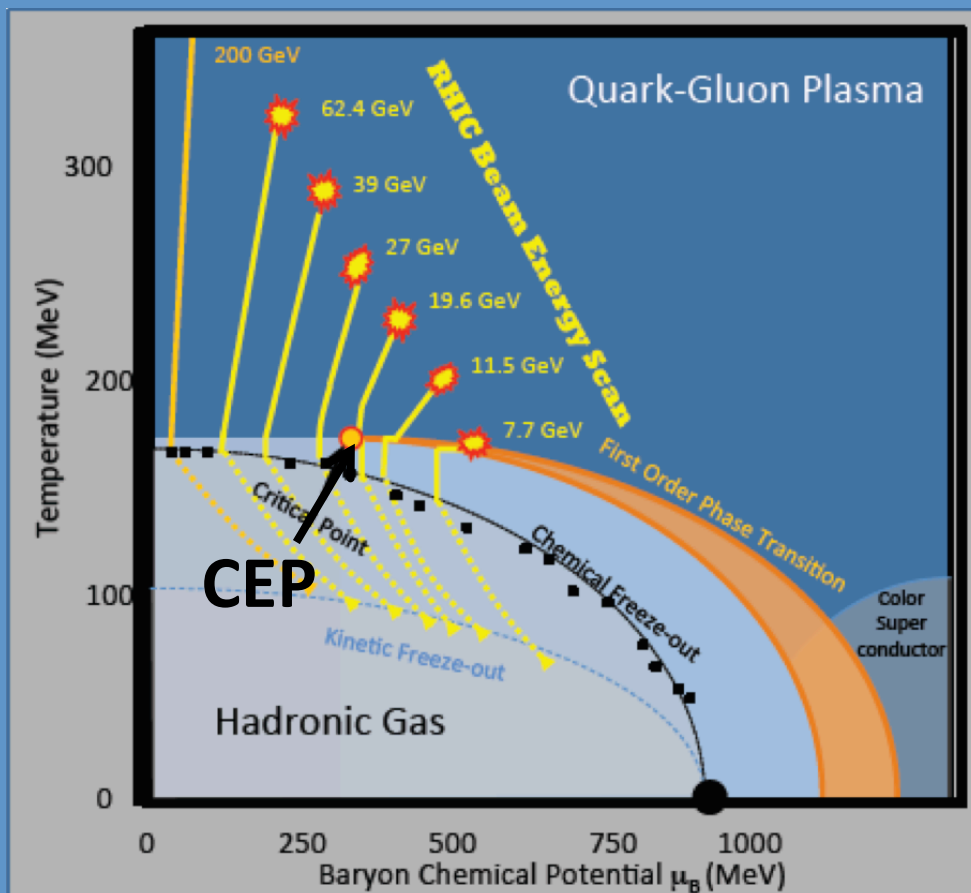


STAR HFT



- 2014-16は新しいシリコン衝突点検出器を使っ  
ての「重クォーク測定」実験
- 2014: Au+Au PHENIXは200億衝突事象を記録。
- 2015: p+p, p+A (進行中)
- 2016: Au+Auデータ倍増

# 2017-18 Beam Energy Scan-II(臨界点探索)



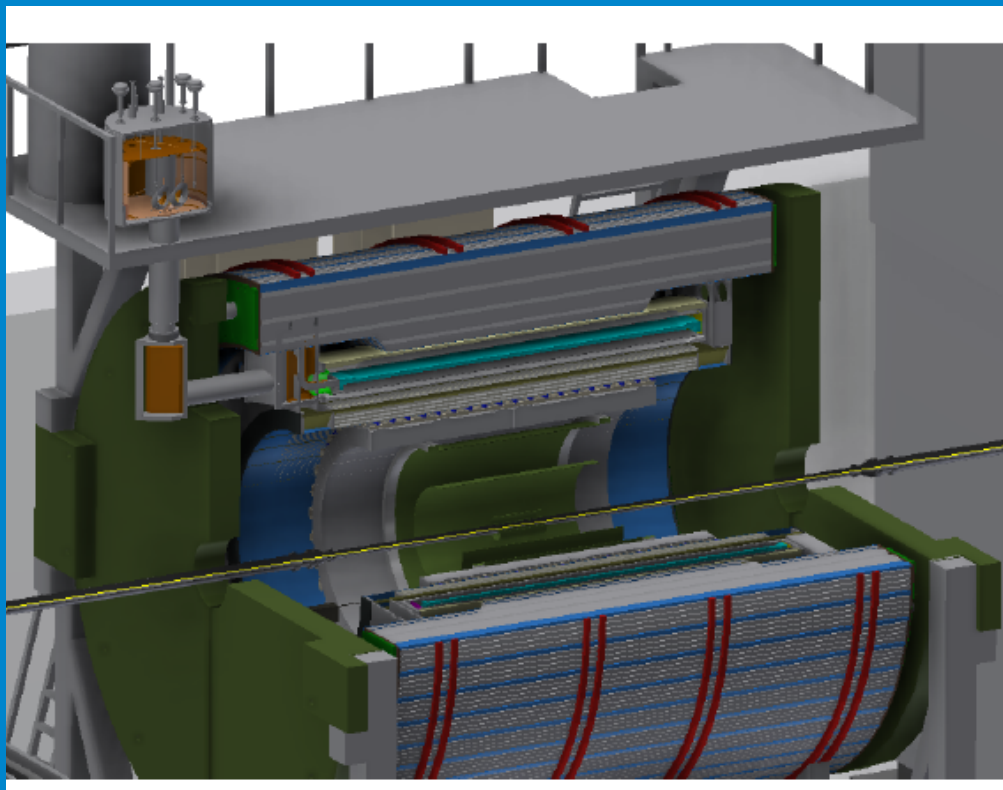
- QCD相図上にあると予想されている、臨界点 (Critical End Point) を探索する。
- 衝突エネルギーを下げることで、初期温度を下げ、バリオン数密度を上げる
- 低エネルギーでの高いビーム衝突輝度が必要。これを電子ビーム冷却により実現。

## BES-I (2010-2014)

Year	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	$\mu_B$ (MeV)	events in STAR (M)	events in PHENIX (M)
2010	62.4	70	140	700
2010	39	110	130	250
2011	27	150	70	36
2011	19.6	200	36	13
2014	15	250		
2010	11.5	320	12	NONE
2010	7.7	420	5	1.6
	200	25		

BES-IIでは衝突エネルギー20GeV以下のデータ量を10倍にする

# 2020-21 sPHENIX: jet物理

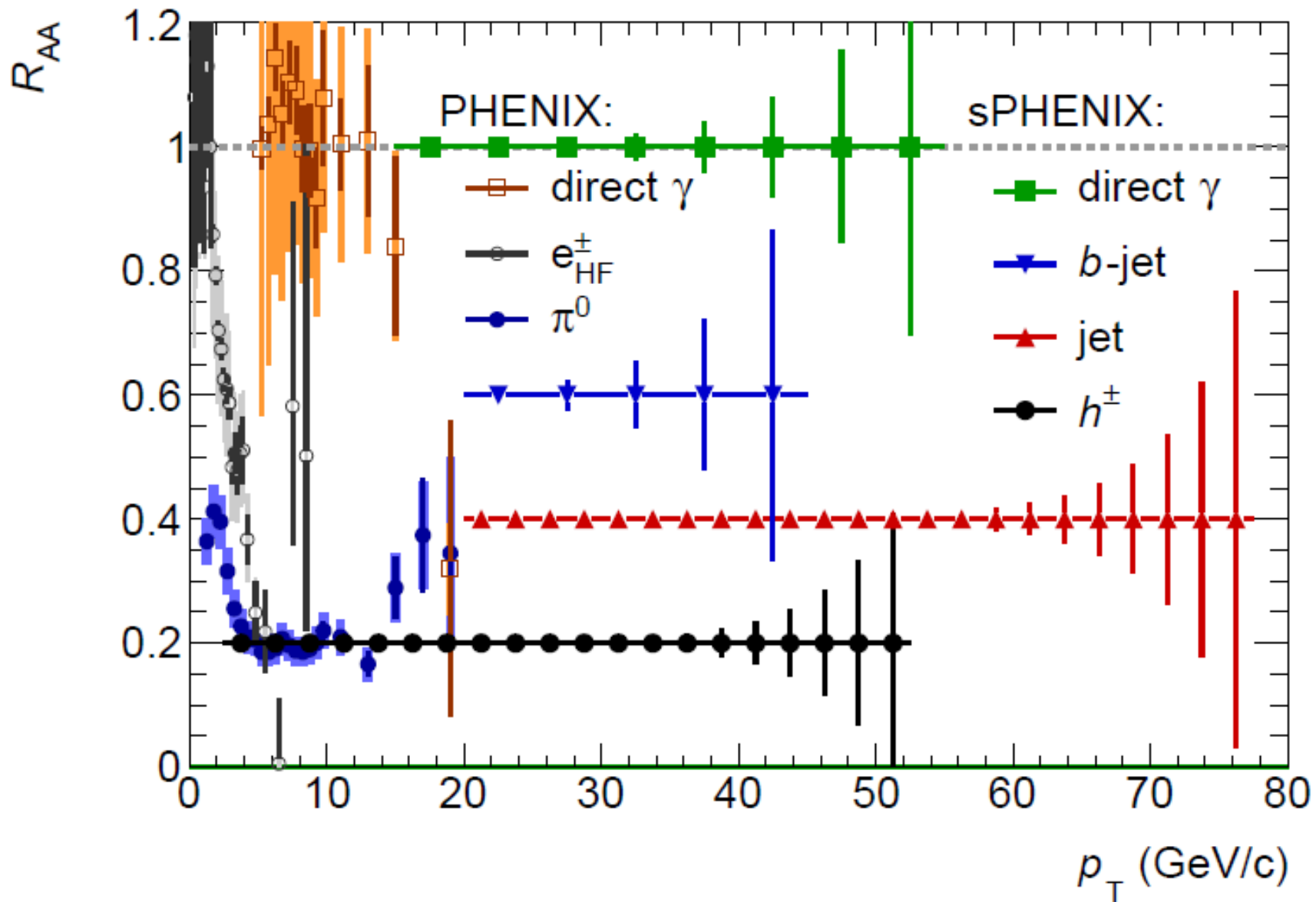


sPHENIX (BaBar) solenoid at BNL



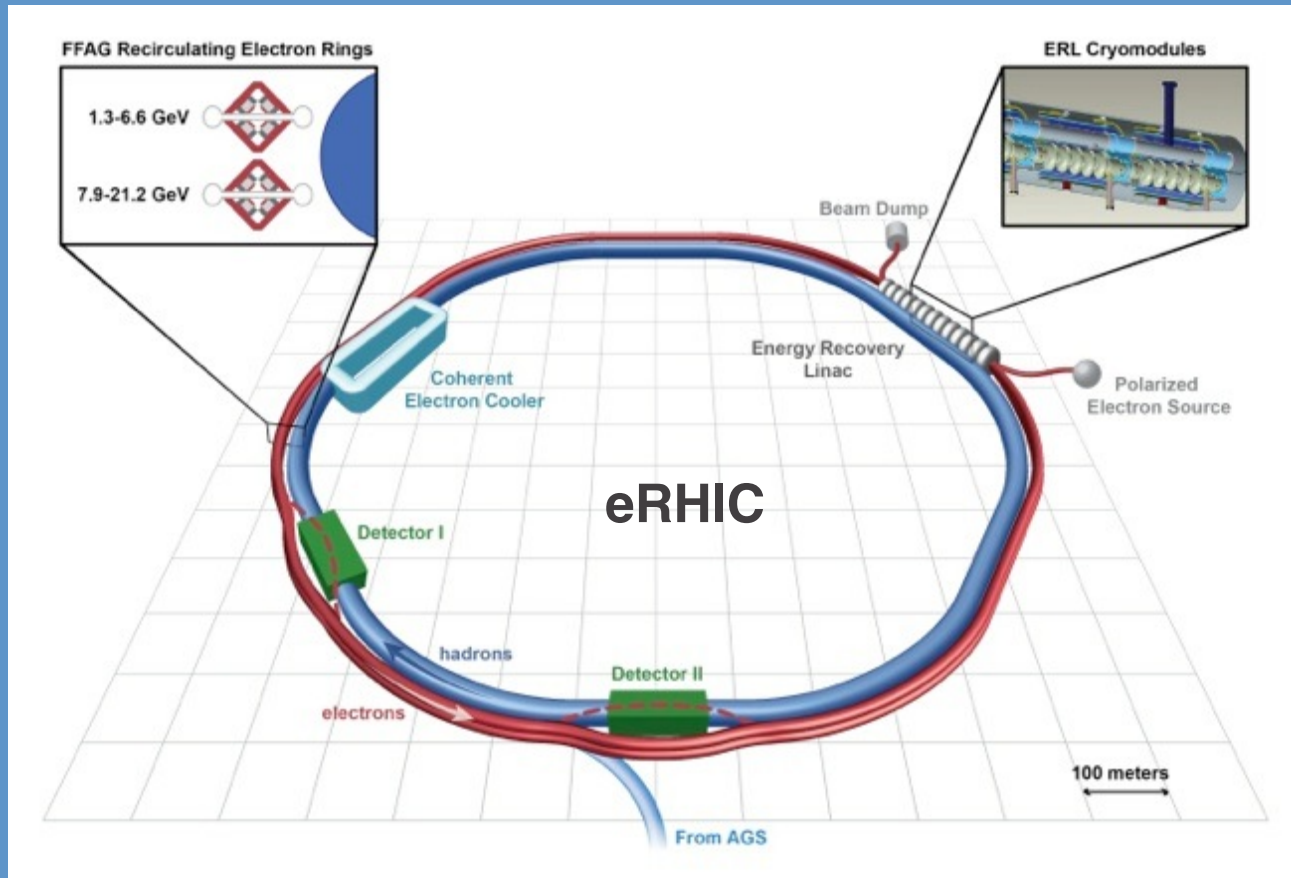
## • sPHENIXはPHENIX測定器の大改造計画

- QGP物性をjet, 直接光子, 重クォーク, ウプシロン粒子をプローブとして研究
- 最近、BaBar実験に使われた超伝導ソレノイド( $R=1.4\text{m}$ ,  $B=1.5\text{T}$ )を取得。sPHENIX測定器で使用する。
- eRHIC開始時には、最初のeRHIC用測定器の中央部分となる。



sPHENIX + RHICの高ビーム輝度  $\rightarrow$  0.6兆Au+Au衝突データ

# 2025~ eRHIC: 電子重イオン衝突加速器



- RHICトンネル内のeA , ep 衝突型加速器
- Energy Recover Linac (1.32 GeV) と2段の電子用のFFAG リングを追加
- 電子: 最高エネルギー21.2 GeV
- e+p : 21.2GeV x 255GeV (p) ルミノシティ  $L = 10^{33}/\text{cm}^2\text{s}$  (Heraの100倍)
- e+A : 21.2GeV x 100 AGeV Au

# eRHIC の物理

## QCD研究の次のフロンティア

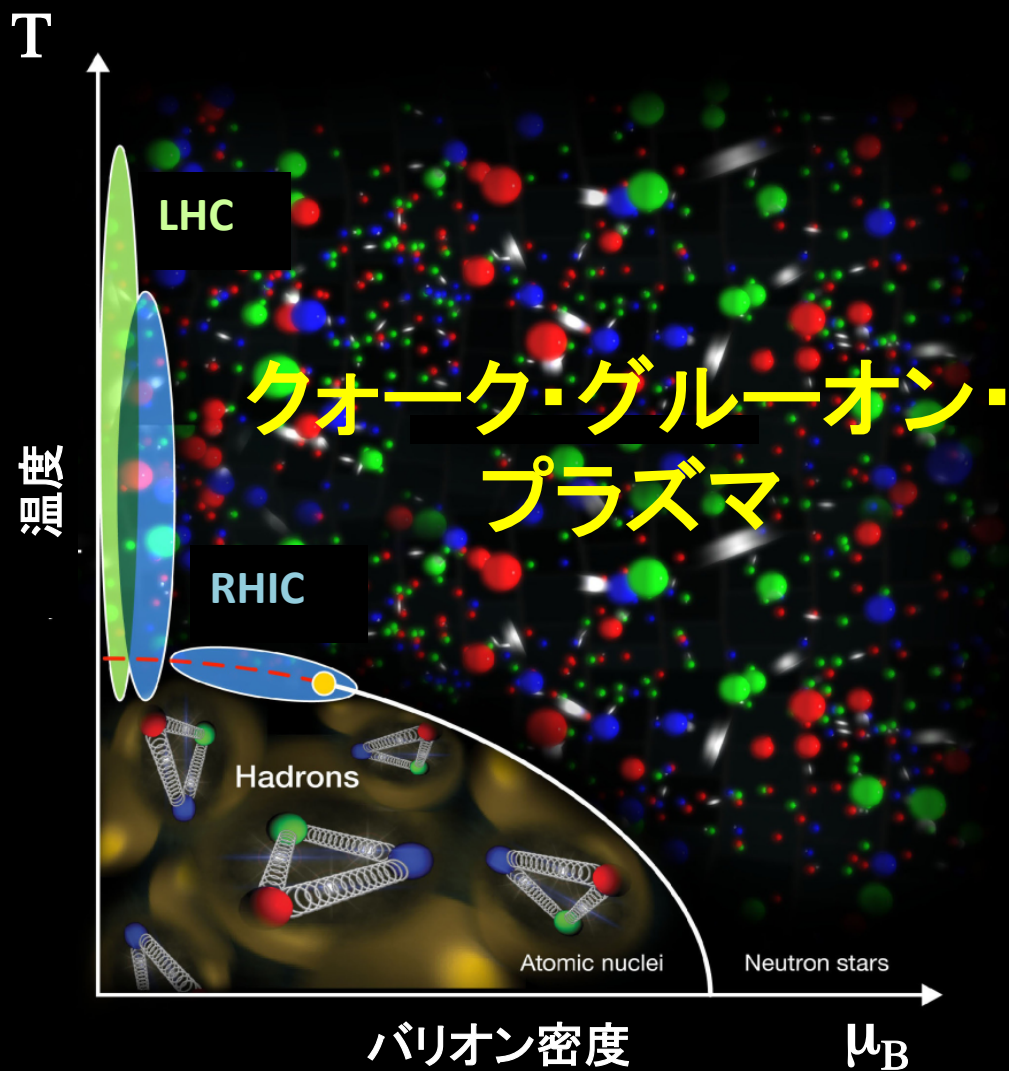
**eA: 原子核ビームによる新QCD 現象**

- **グルオン飽和 → 半古典的グルオン場の実現**
- **核物質中でのクォーク伝搬**

**ep: break new ground in nucleon structure**

- **核子構造の高分解能3Dイメージング**
  - **クォーク、グルーオンの空間的な運動量分布関数  $f(x, b \downarrow T)$  の測定**
- **核子のスピン構造の測定**

# まとめ



- RHICの原子核衝突で、宇宙初期に存在した高温のクォーク・グルーオンプラズマが再現された
- 今後はその物性を定量的に研究する
- 2022までにRHICでのQGP物理を完遂する
  - 2014-16 重クォーク測定
  - 2018-19 臨界点探索
  - 2020-21 sPHENIX: jet物理
- 2025～ eRHIC