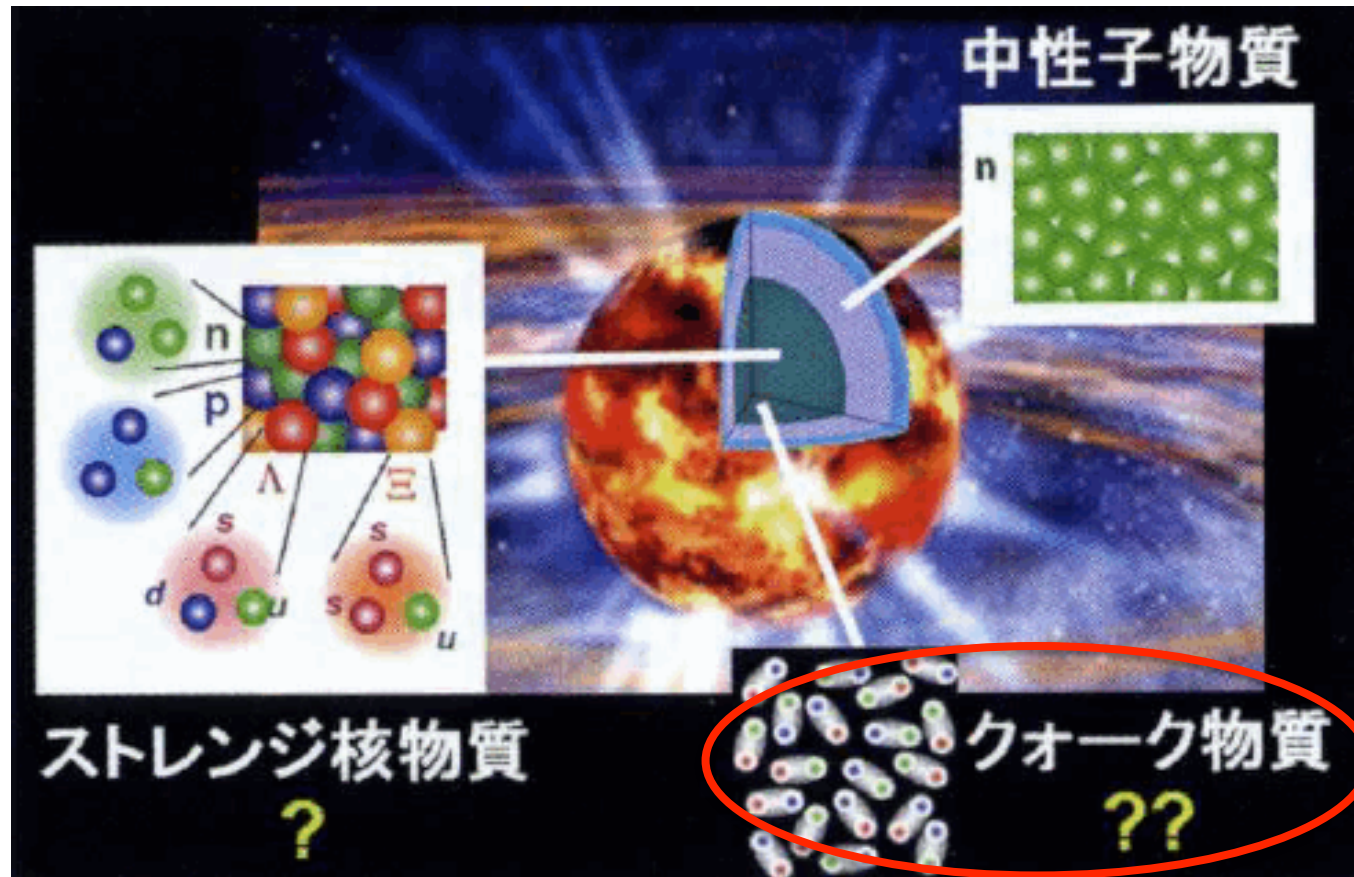


高エネルギー原子核衝突実験とクォーク物質

筑波大学、物理、江角晋一

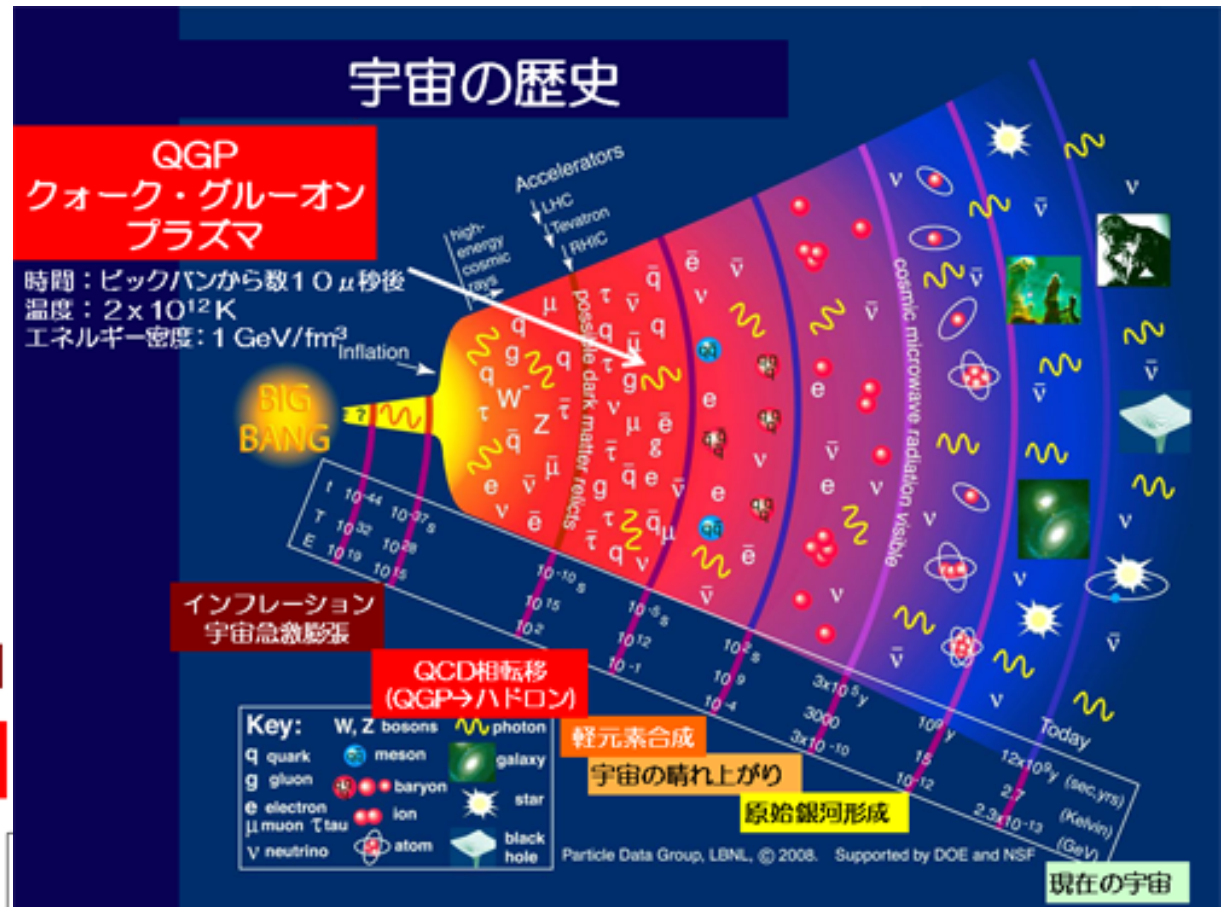
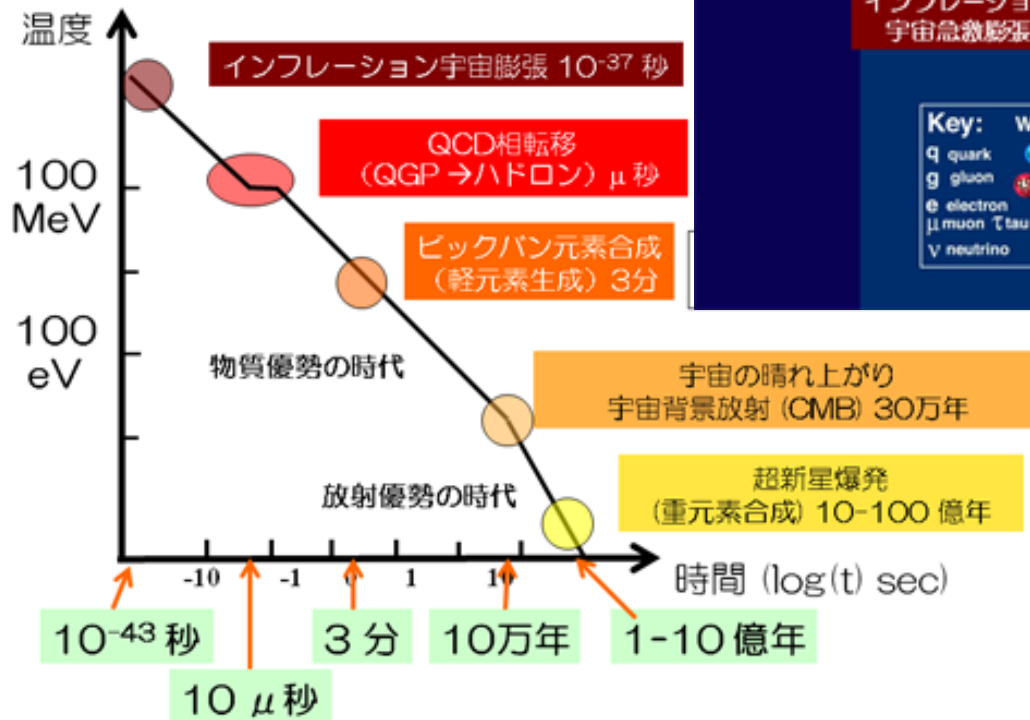


田村さん、大阪市立科学館発行 月刊「うちゅう」
2013年7月号より(画像の一部はNASAより。)

クォーク・グルーオン・プラズマ??

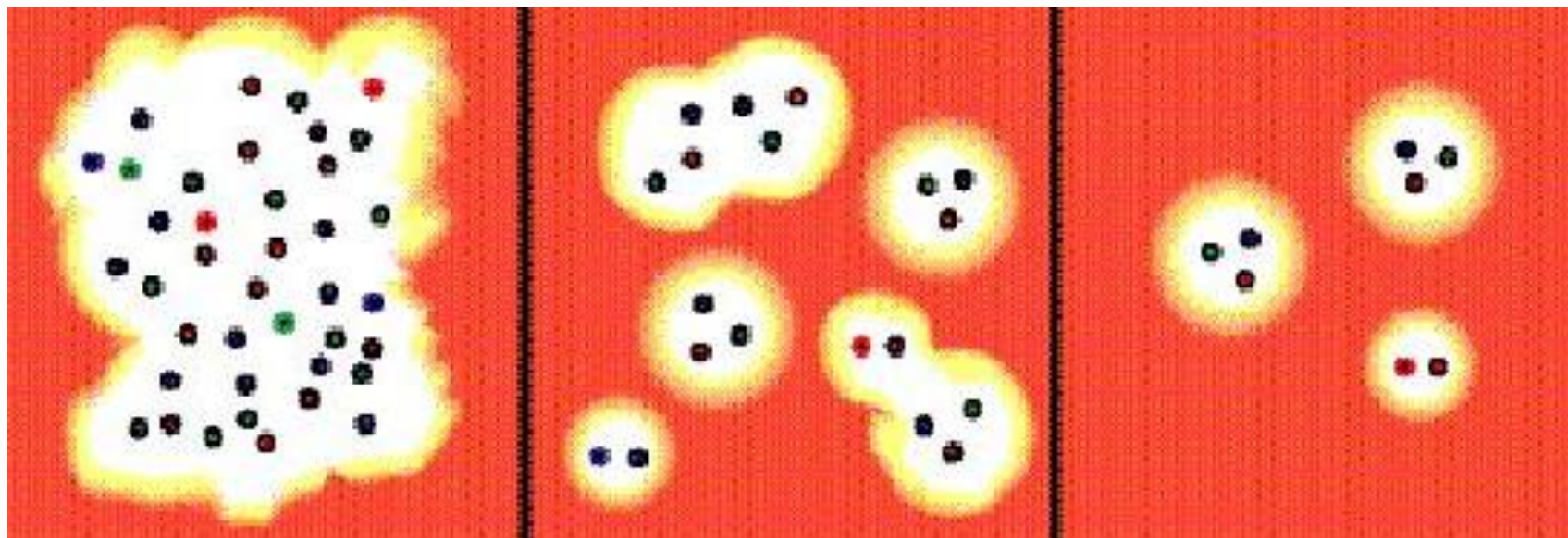
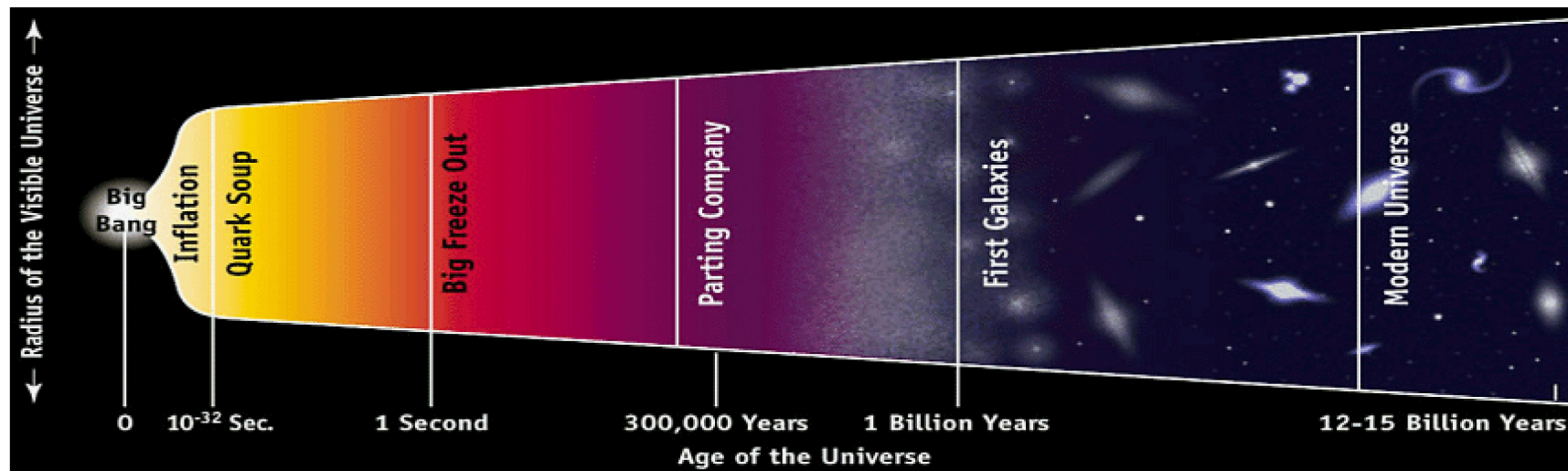
宇宙の歴史

- ビッグバン
- インフレーション
- QGP相転移
- ビッグバン 軽元素合成
- 宇宙の晴れ上がり
- 超新星爆発 重元素合成



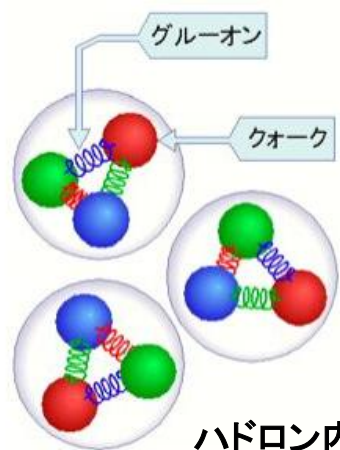
<http://alice-j.org/qgp.html>

クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)とは？

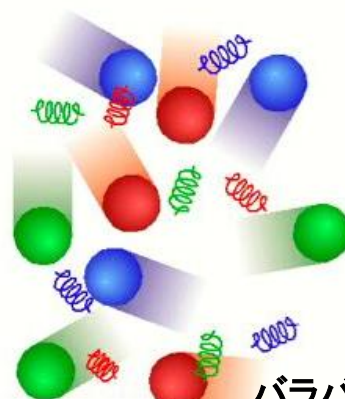


クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

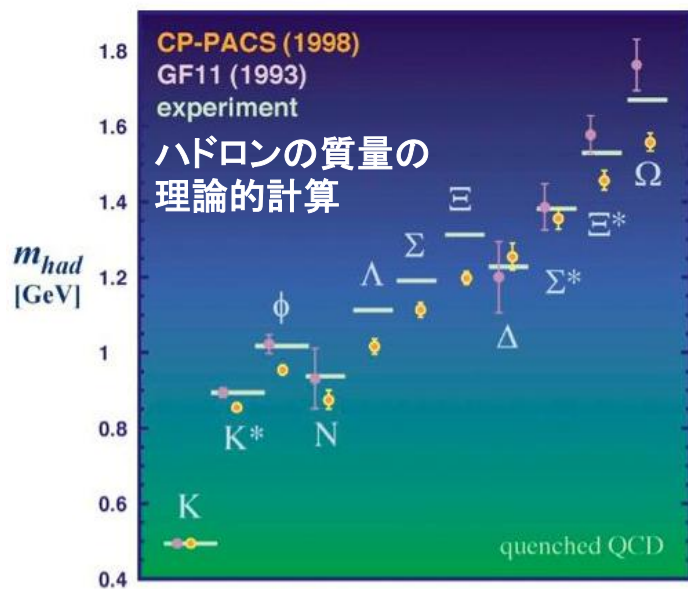
陽子、中性子、中間子等のハドロン



ハドロン内に閉じ込められたクォーク

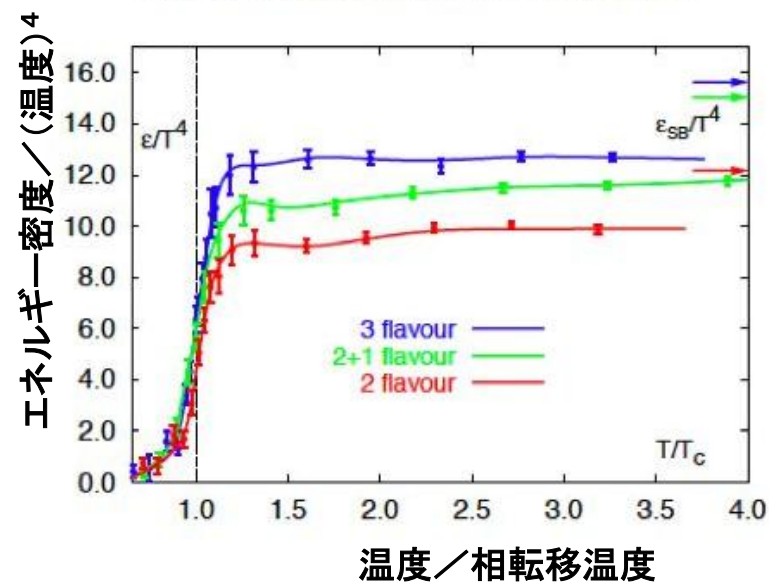


バラバラに飛び回るクォーク



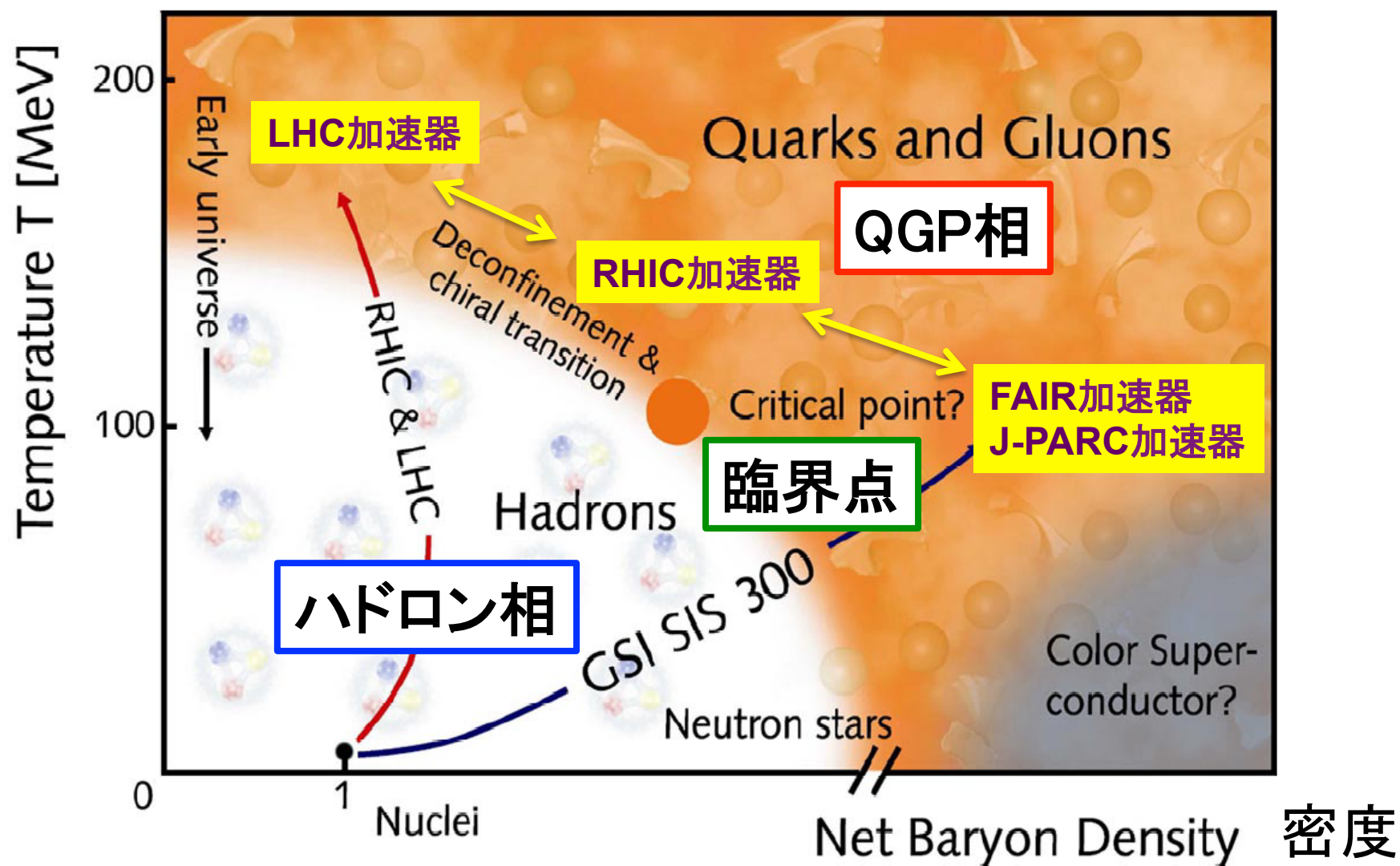
ハドロン質量の計算

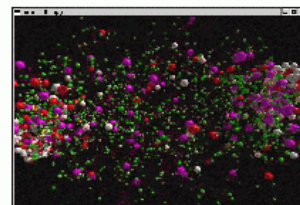
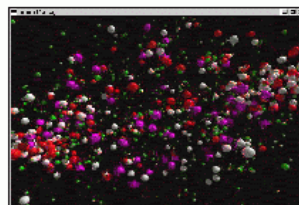
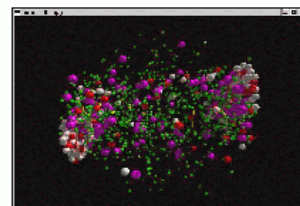
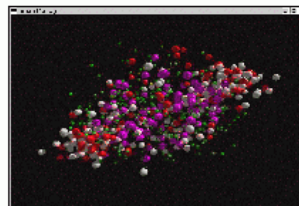
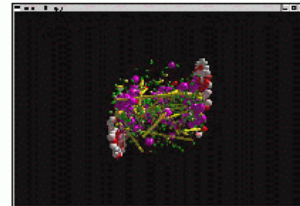
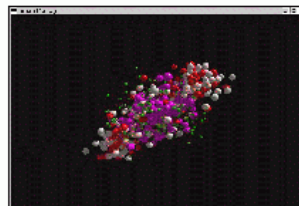
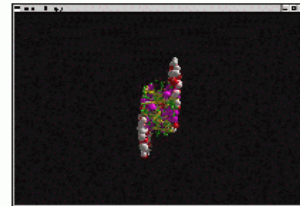
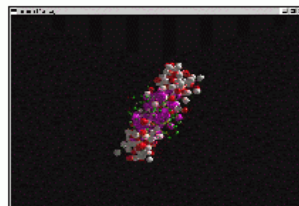
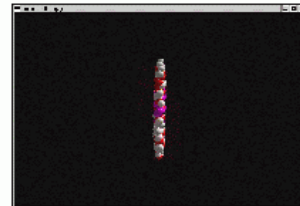
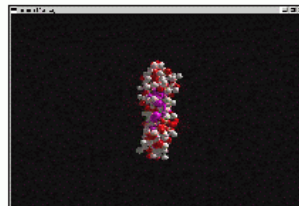
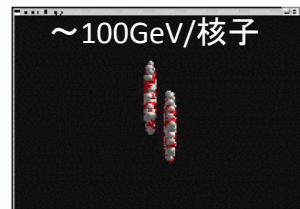
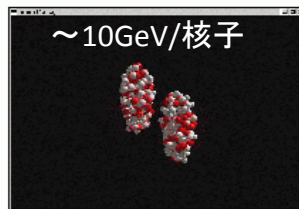
F. Karsch, Lect. Notes Phys. 583 (2002) 209.



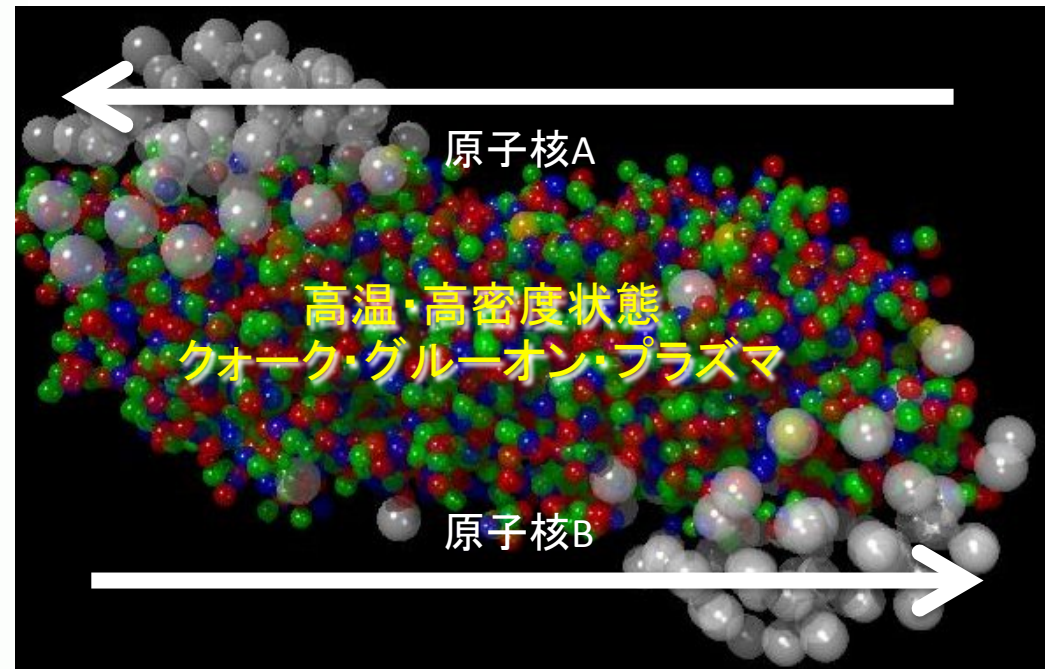
ハドロン相 と クォーク・グルーオン・プラズマ相

温度

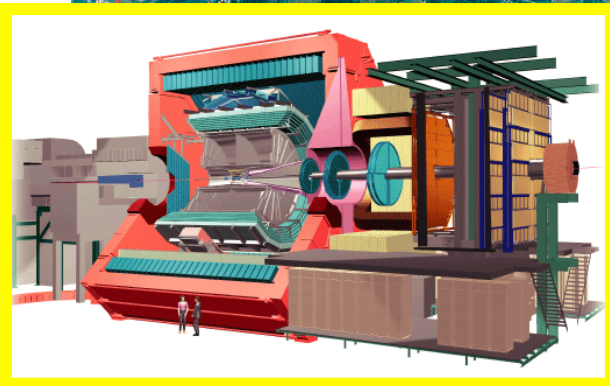




原子核衝突シミュレーション 核子衝突、ハドロン、カスケード計算

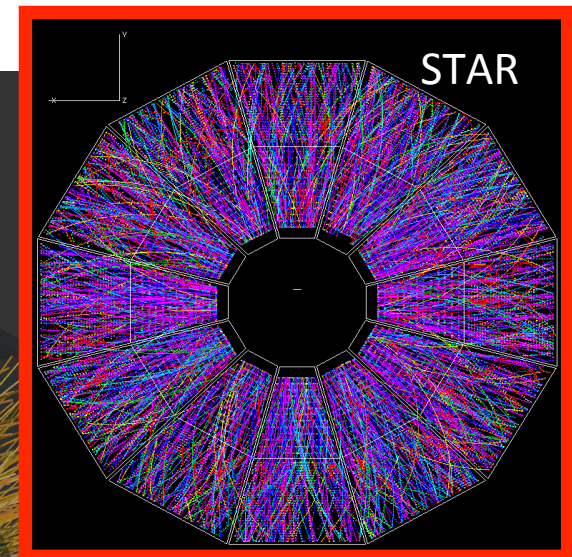
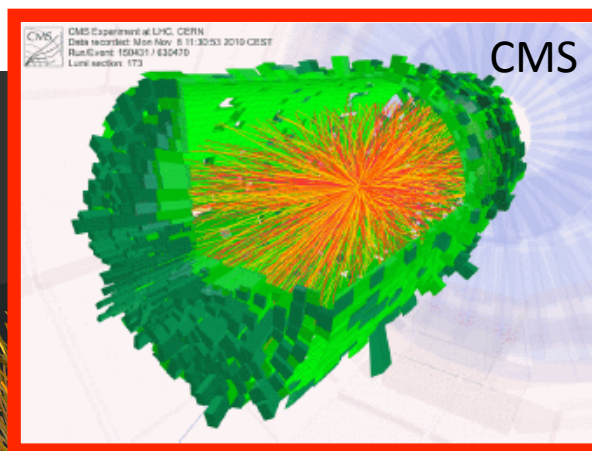
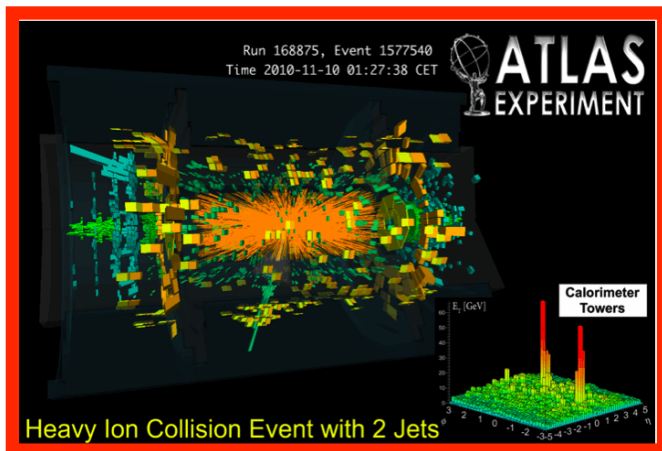


スイス・フランス国境のジュネーブ郊外、
欧州共同原子核研究機構(CERN)、
大型ハドロン衝突型加速器(LHC)
を使ったアリス(ALICE)実験

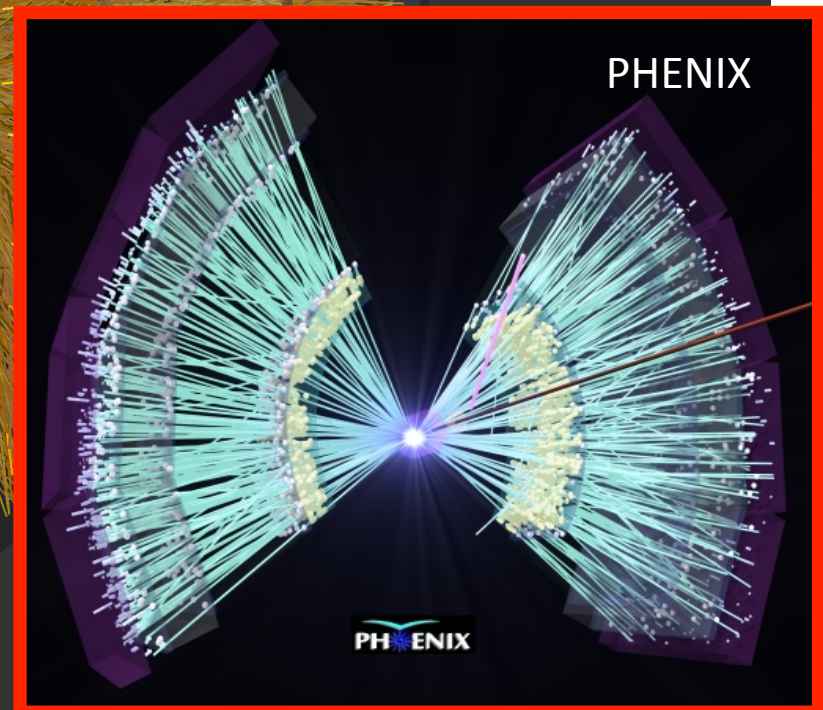
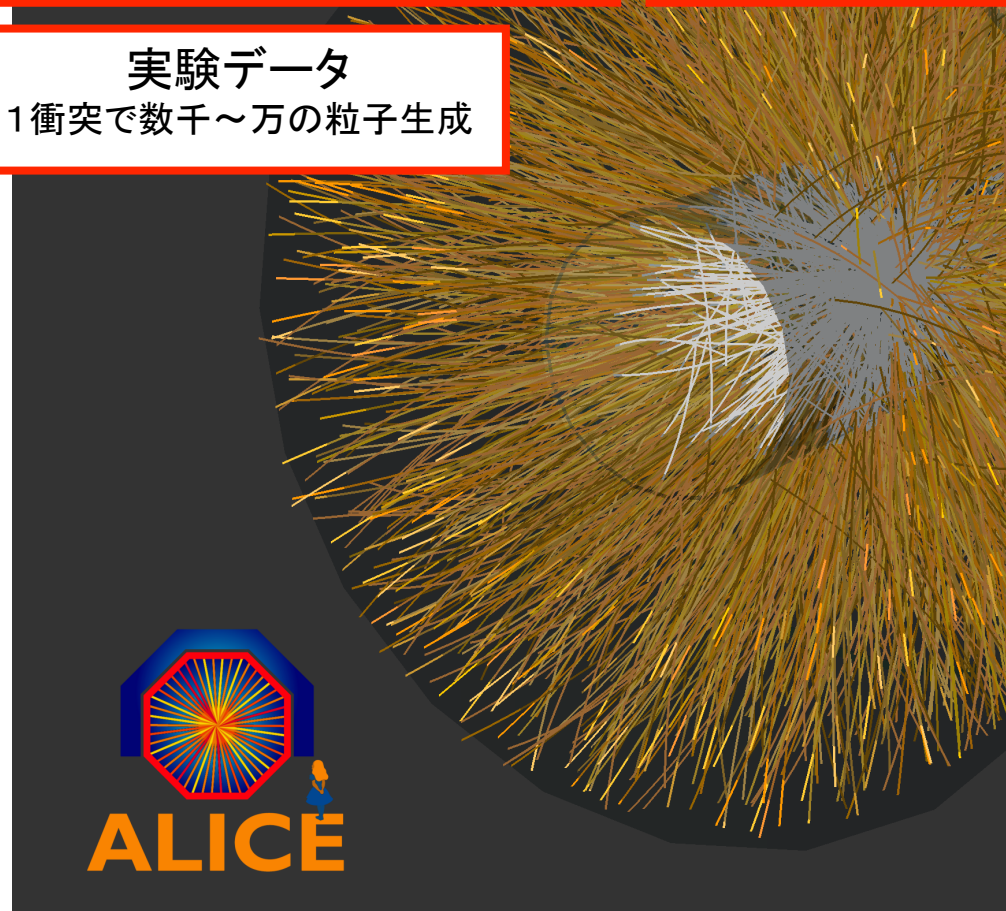


アメリカ合衆国、ニューヨーク郊外、
ブルックヘブン国立研究所(BNL)、
超相対論的重イオン加速器(RHIC)
を使ったフェニックス(PHENIX)実験

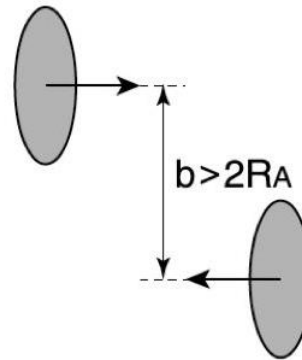




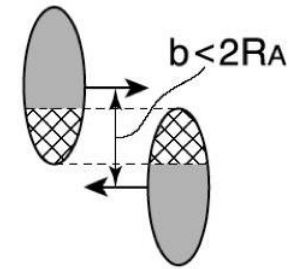
実験データ
1衝突で数千～万の粒子生成



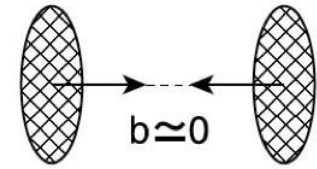
コントロール・パラメーター 1 中心衝突度 Centrality



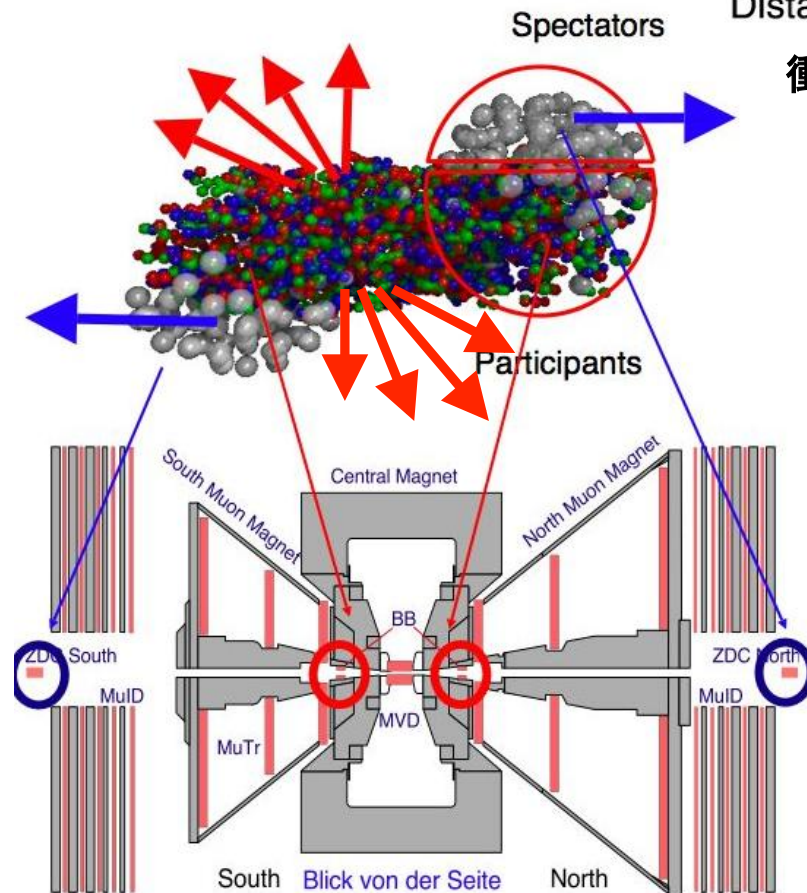
Distant Collision
衝突無し



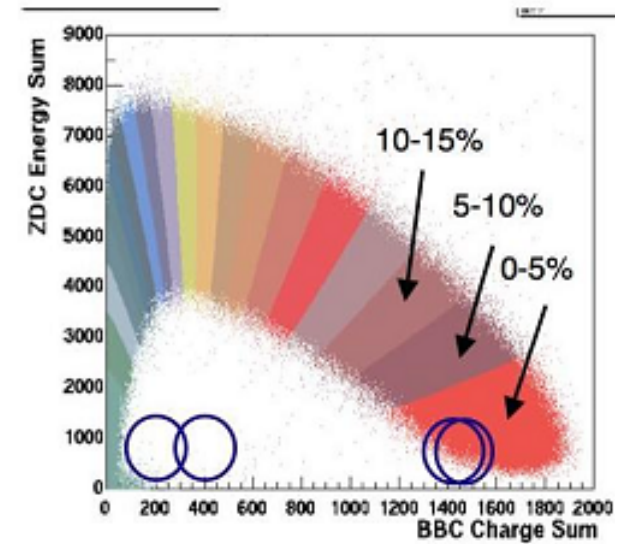
Peripheral Collision
周辺衝突



Central Collision
中心衝突



前後方に出る
青色の矢印の量

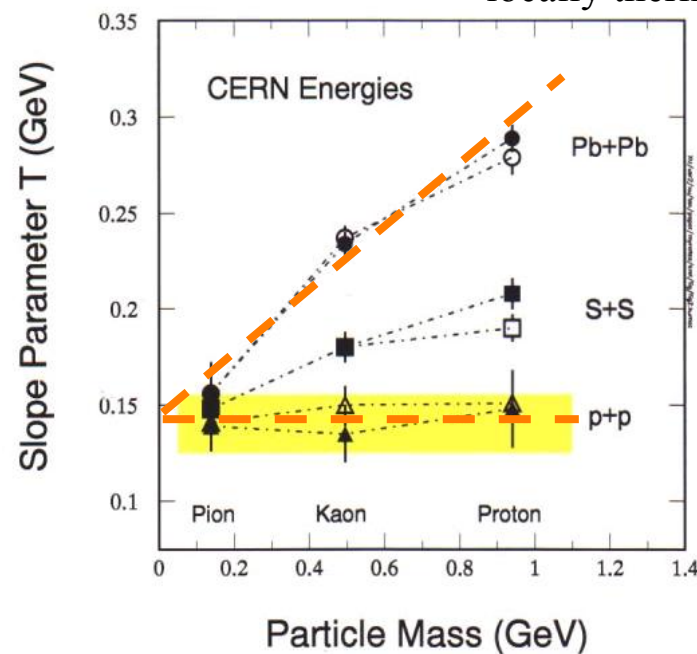
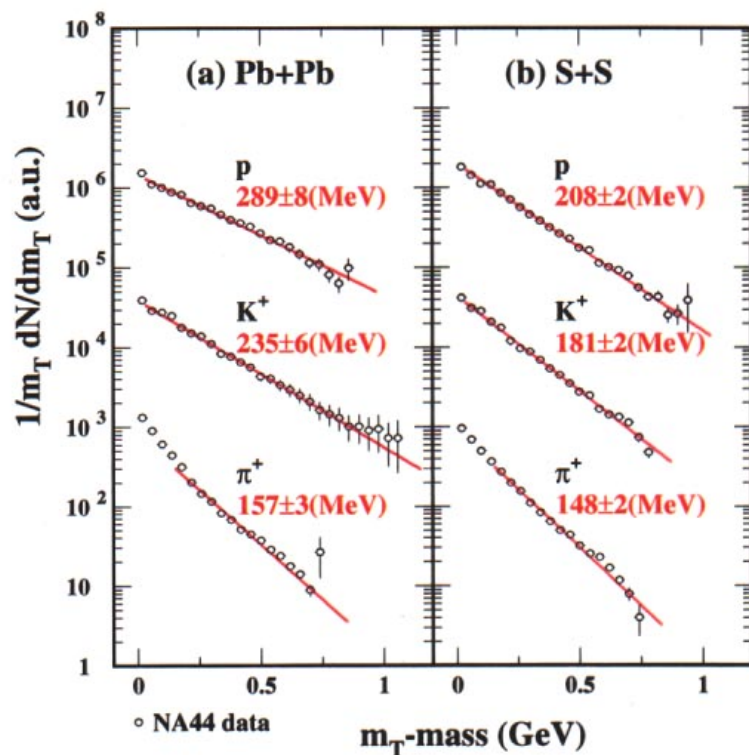
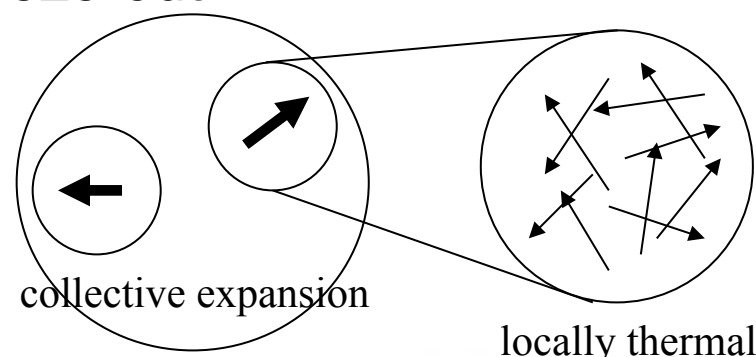


中心付近から出る
赤色の矢印の量

熱力学的凍結 kinetic thermal freeze-out

横方向運動量分布のハドロン質量依存性より

ハドロン間の弾性衝突の終わり
the end of elastic interactions



$$E = E_{\text{thermal}} + E_{\text{collective}}$$

$$T_{\text{eff}} = T_{\text{fo}} + 0.5 m \langle v_{\perp} \rangle^2$$

~140 MeV

化学的凍結

chemical freeze-out

粒子種、数、比の測定より



$$\rho_i = \gamma_s^{s_i} \frac{g_i}{2\pi^2} T_{ch}^3 \left(\frac{m_i}{T_{ch}} \right)^2 K_2(m_i/T_{ch}) \lambda_q^{Q_i} \lambda_s^{s_i}$$

M. Kaneta and N. Xu,
J. Phys. G27 (2001) 589

$$\lambda_q = \exp(\mu_q/T_{ch}), \quad \lambda_s = \exp(\mu_s/T_{ch})$$

ハドロン間での非弾性衝突の終わり

クォーク結合によるハドロン生成

核子結合による原子核生成

原子結合による分子生成 ——— 化学反応 ———

T_{ch} : Chemical freeze-out temperature

μ_q : light-quark chemical potential

μ_s : strangeness chemical potential

γ_s : strangeness saturation factor

Q_i : 1 for u and d, -1 for u and d

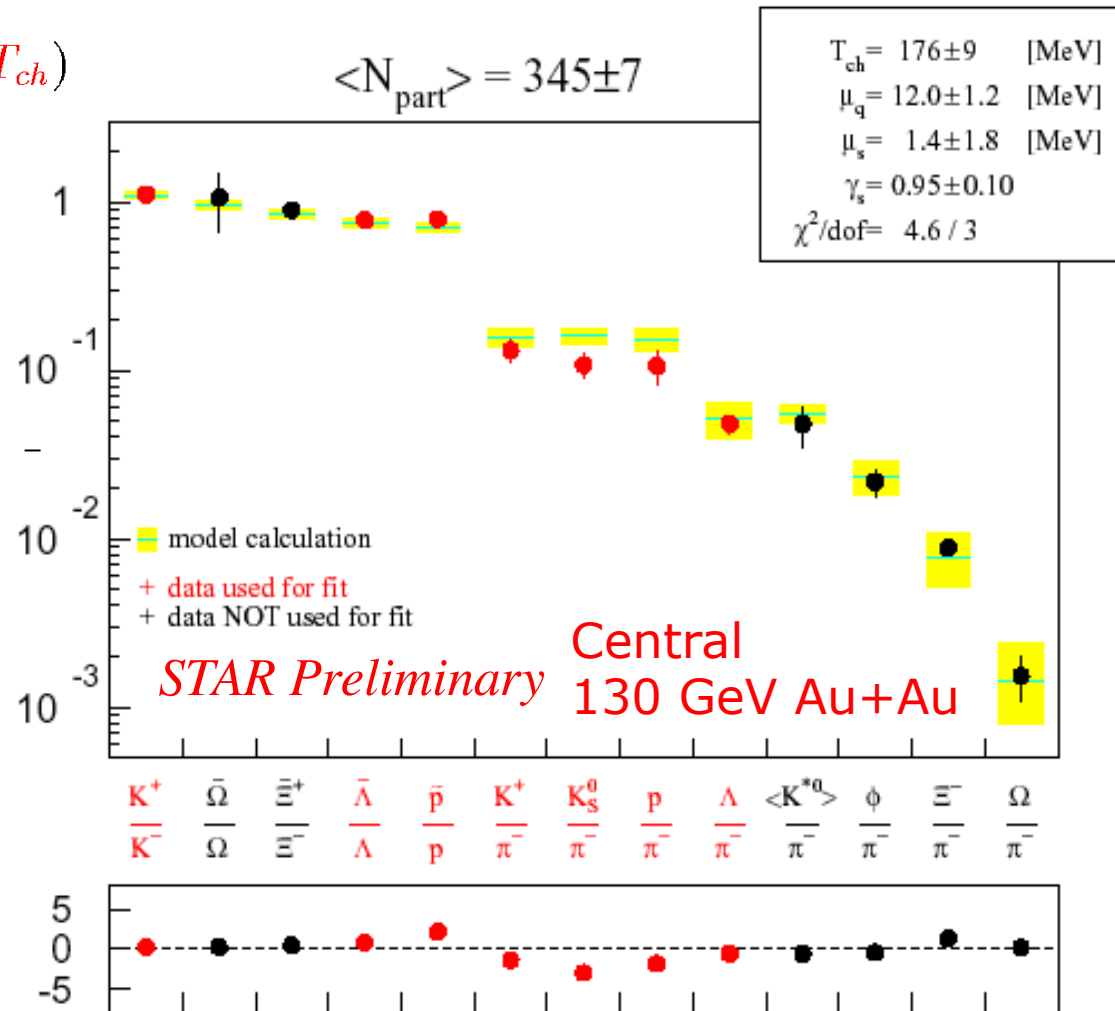
s_i : 1 for s, -1 for s

g_i : spin-isospin freedom

m_i : particle mass

K_2 : the second-order modified
Bessel function

Simple chemical freeze-out model
remarkably well agrees with data.



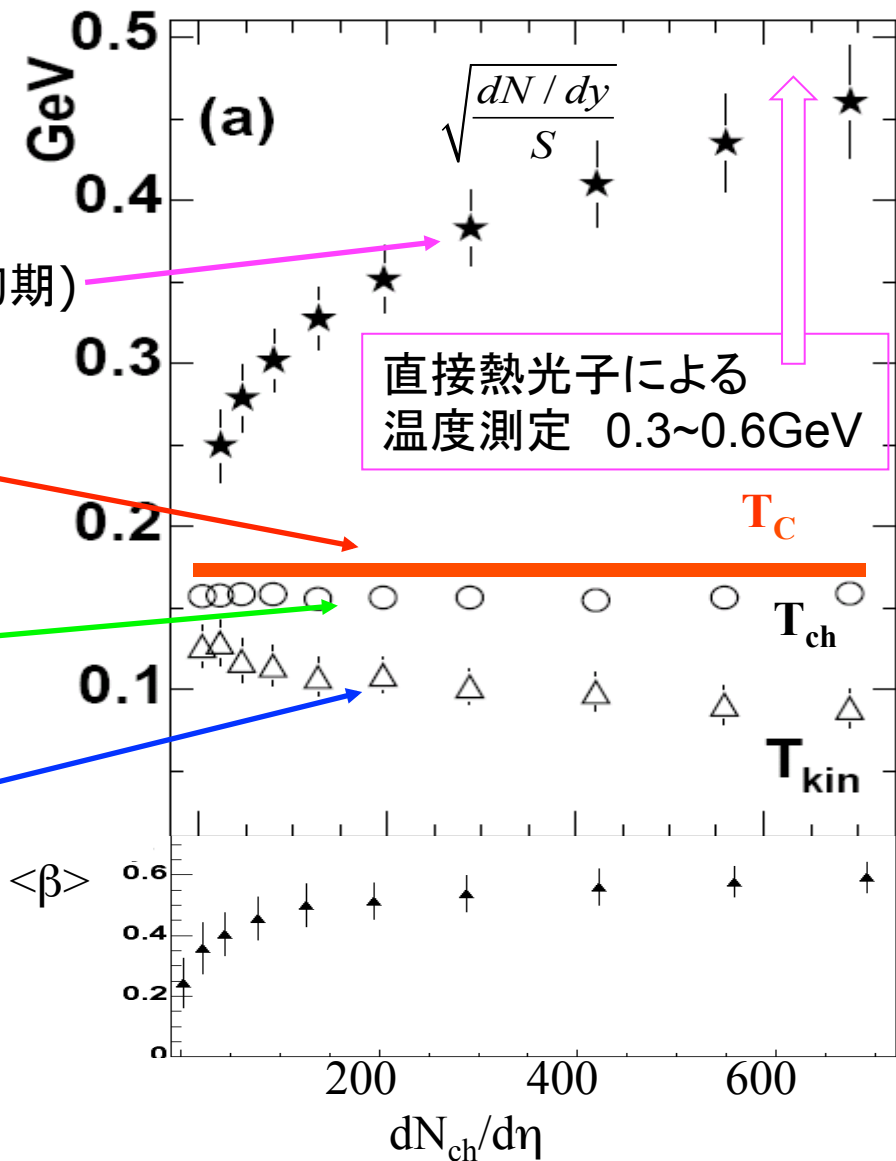
history of temperature
(温度の推移)

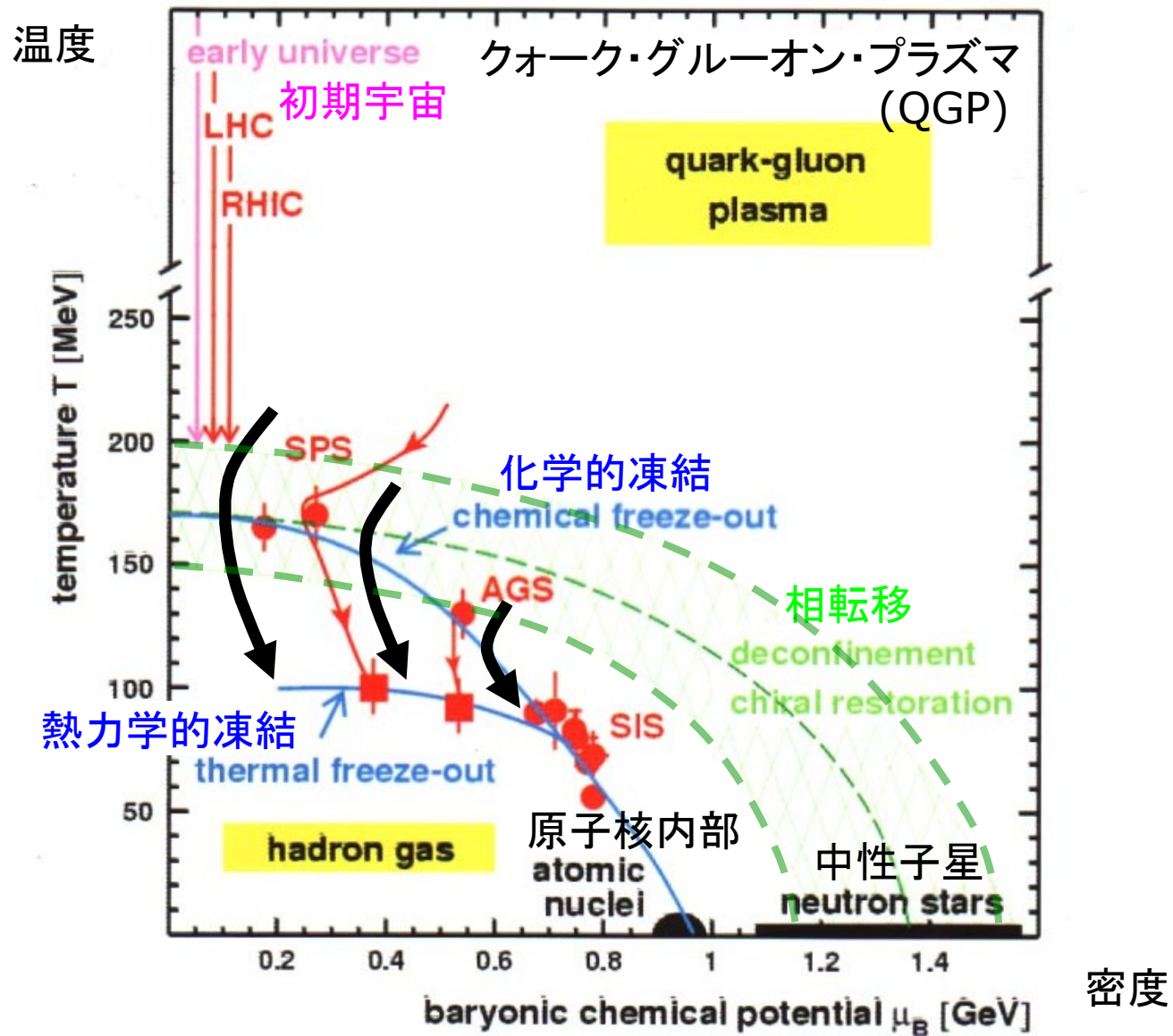
initial temperature
from the energy density (衝突初期)

Phase transition at
critical temperature (相転移)

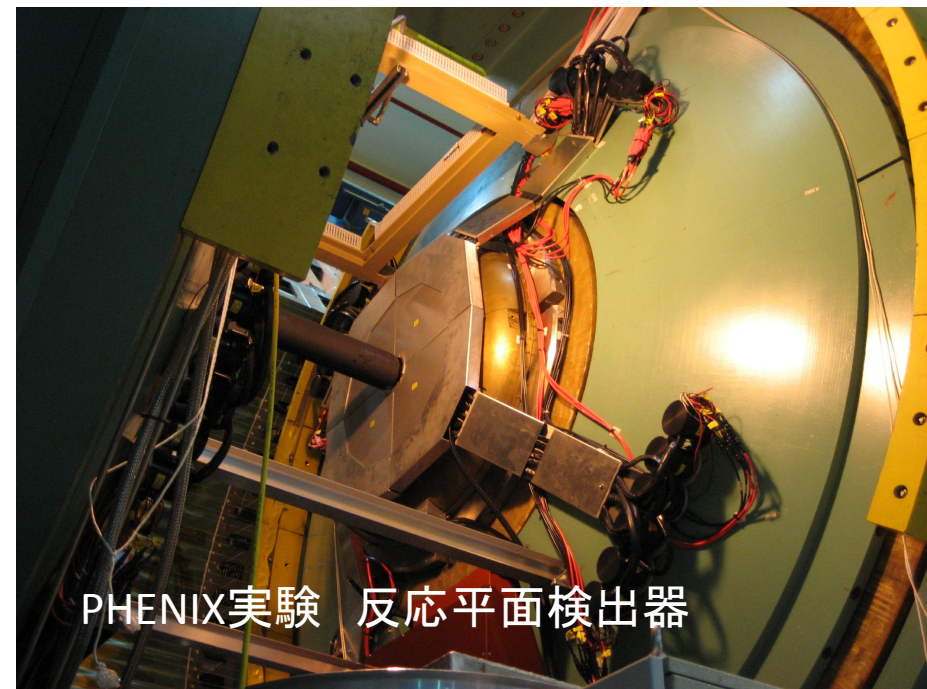
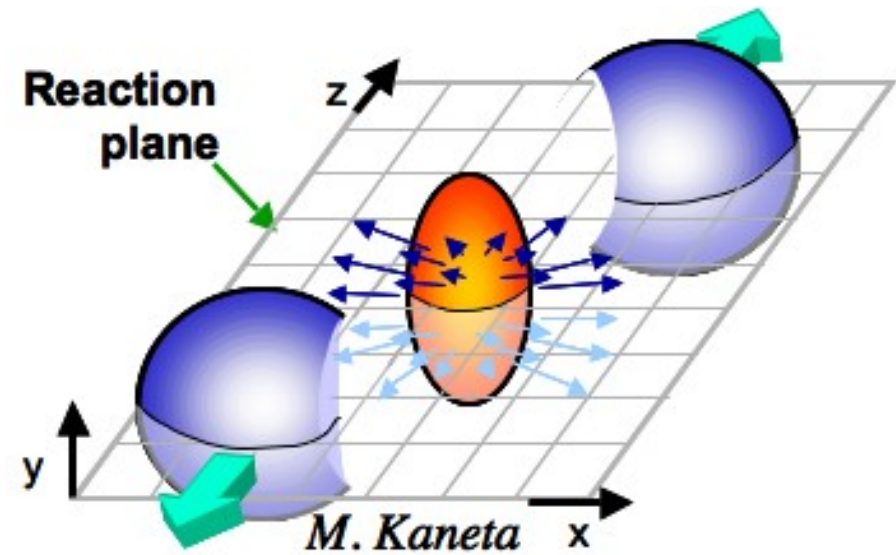
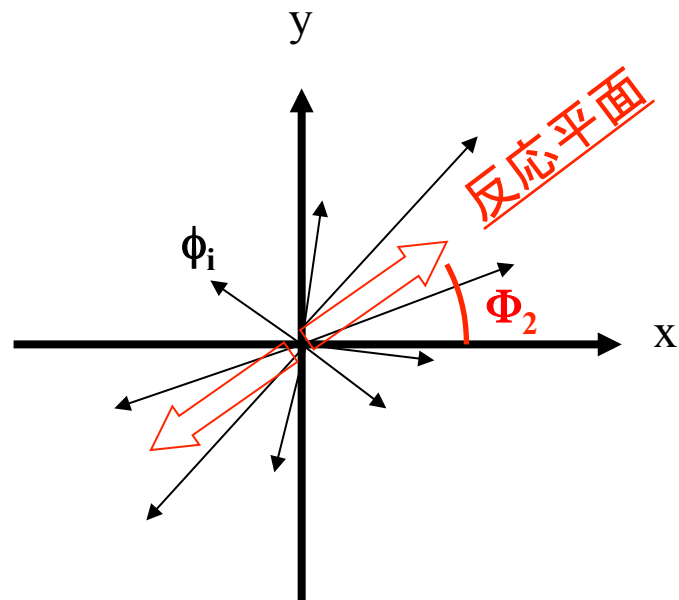
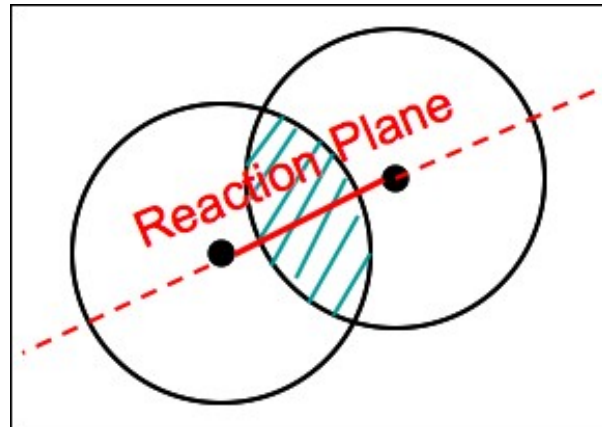
Chemical freeze-out
temperature (化学的凍結)

Thermal freeze-out
temperature (熱力学的凍結)

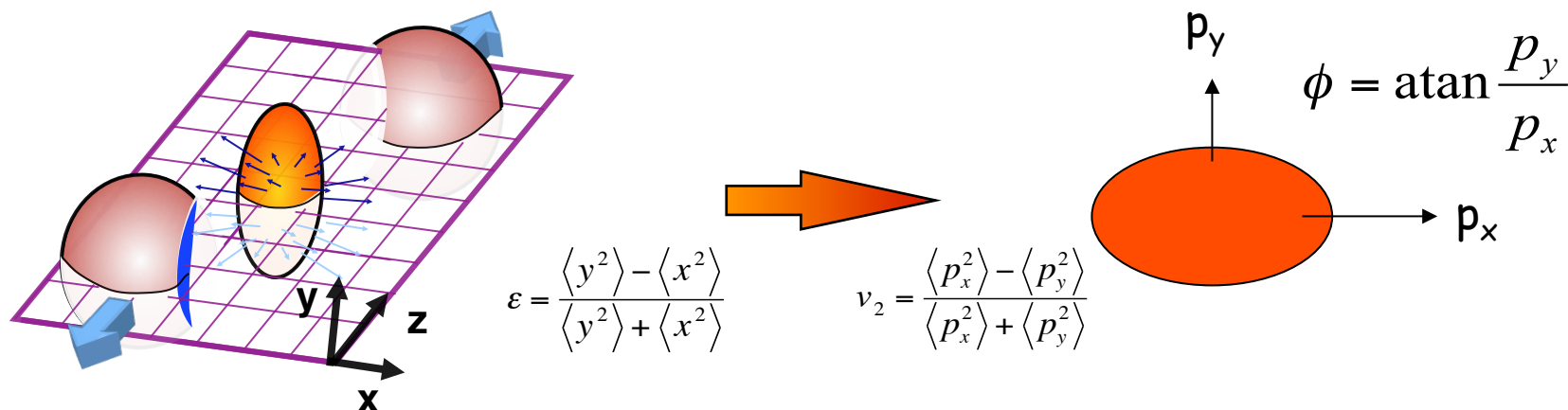




コントロール・パラメーター 2 反応平面 Reaction Plane

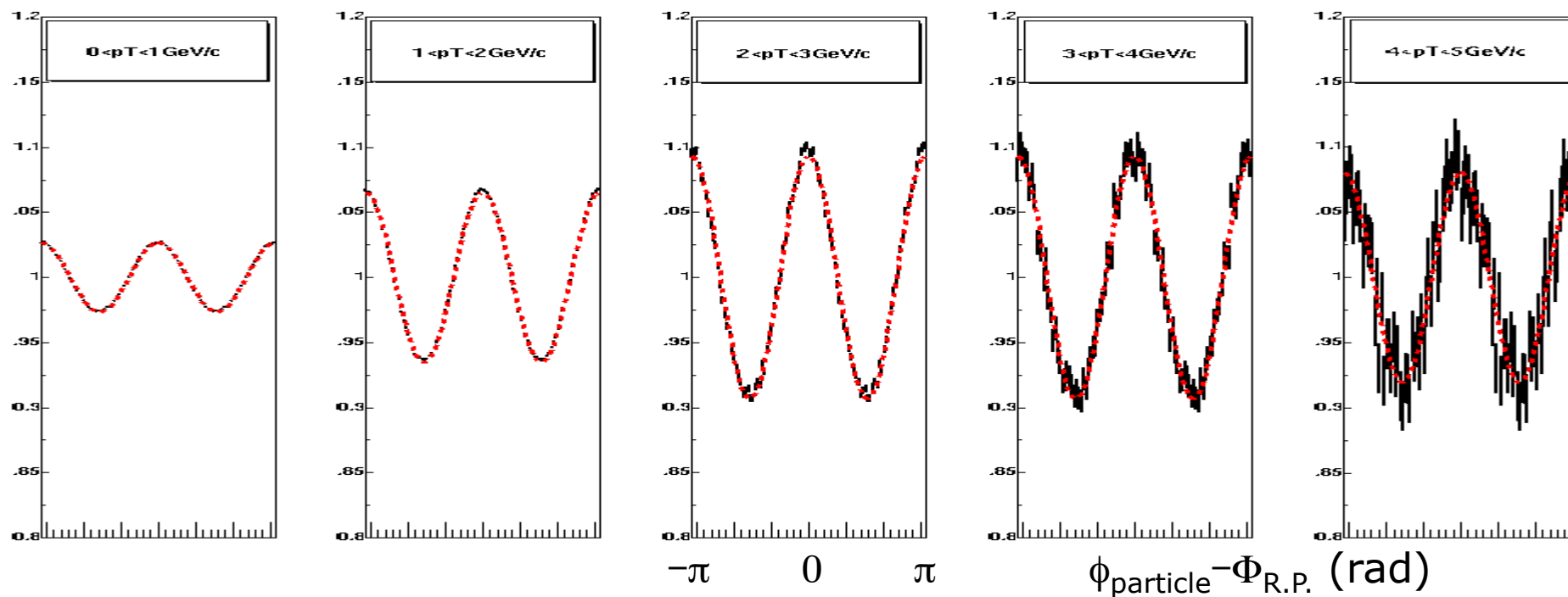


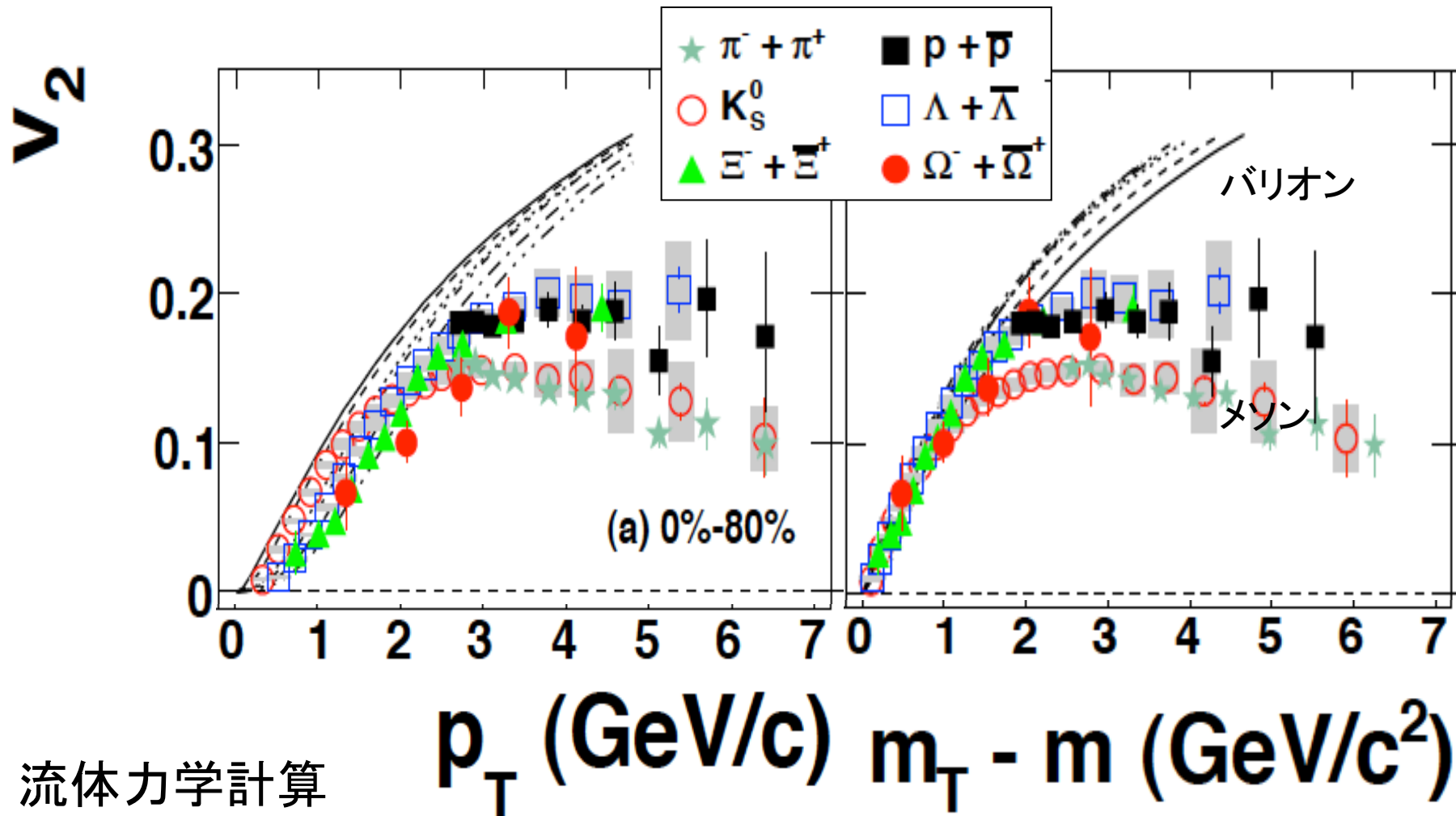
方位角異方性（楕円的な流れ、粒子放出）



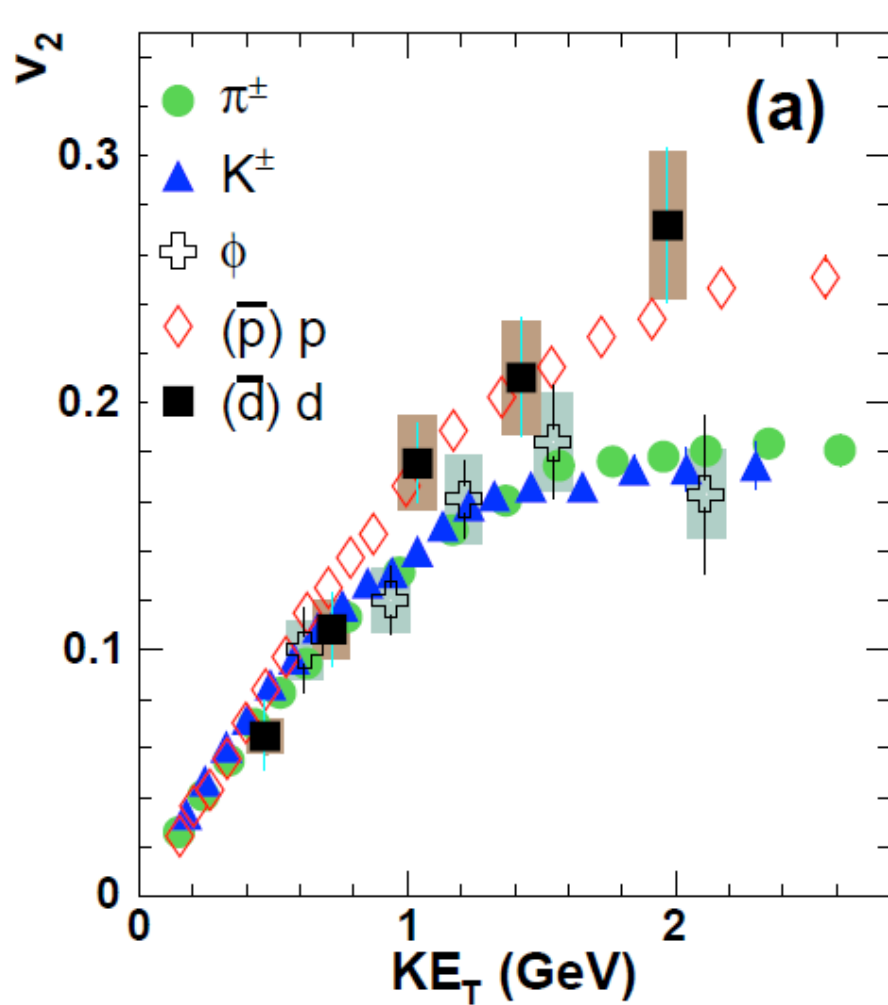
空間的な異方性を起源とする。

粒子の放出方向を測定する。

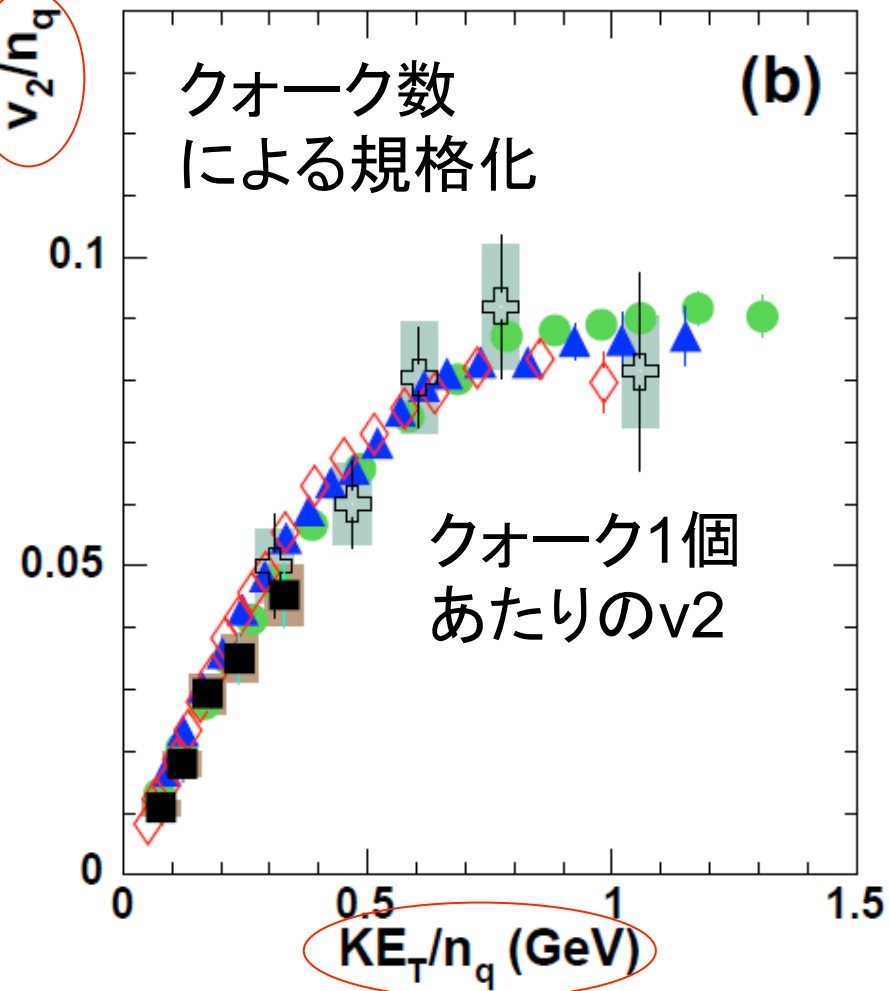




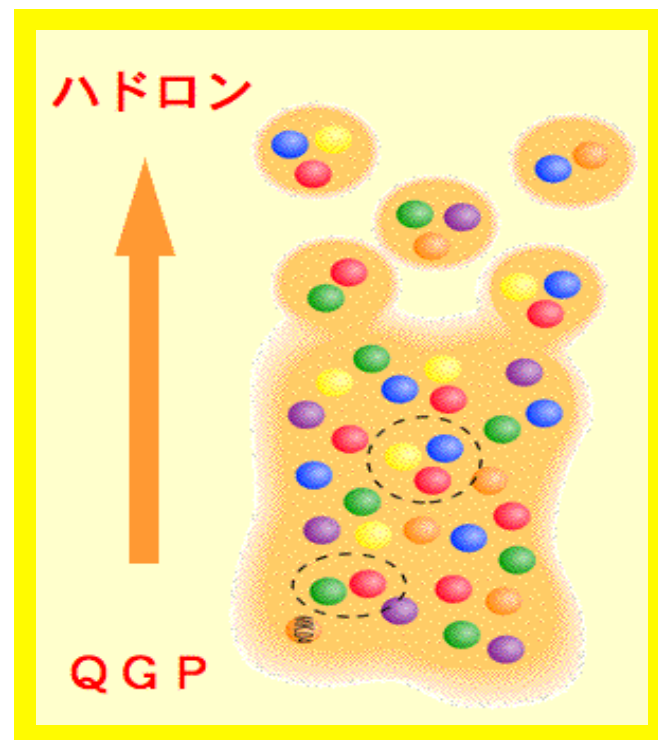
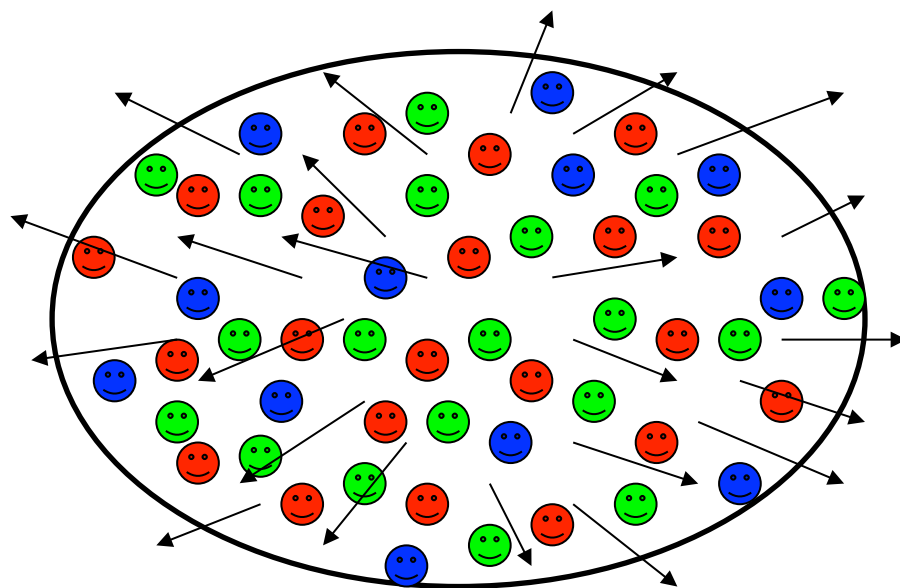
流体力学計算
粒子質量依存性



v_2/n_q

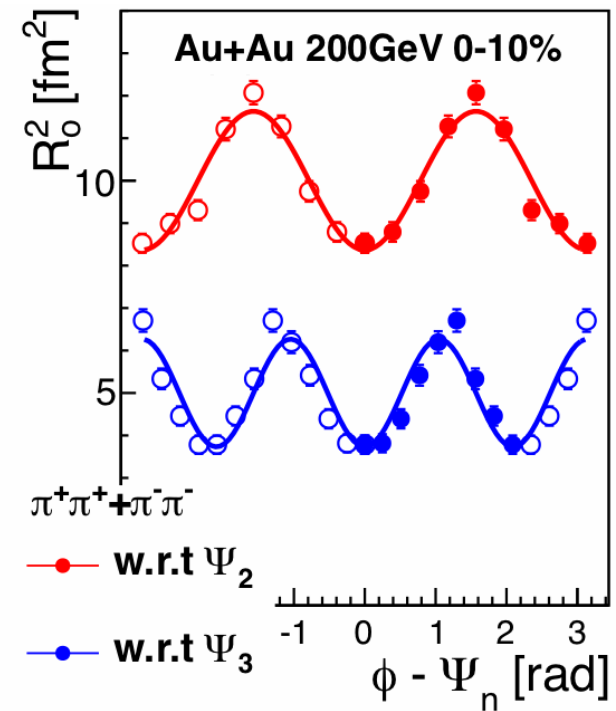
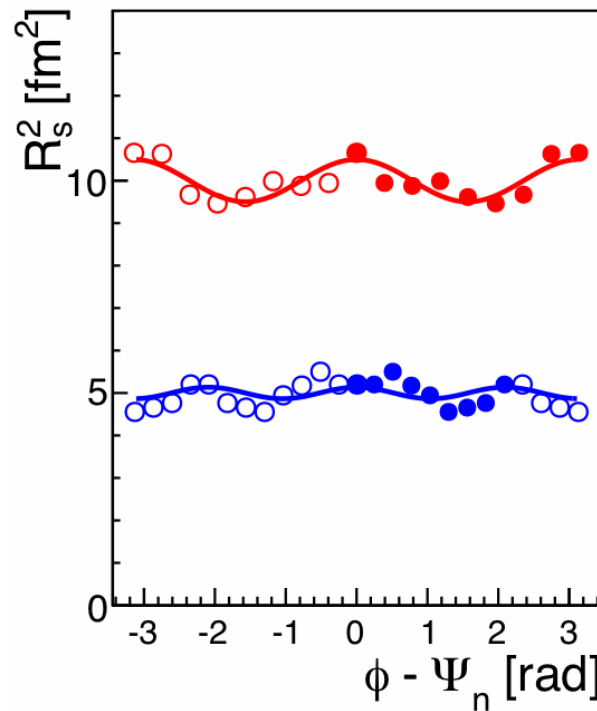
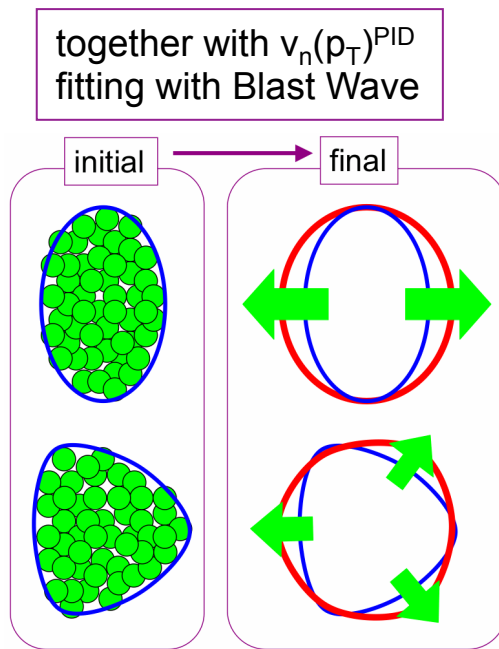
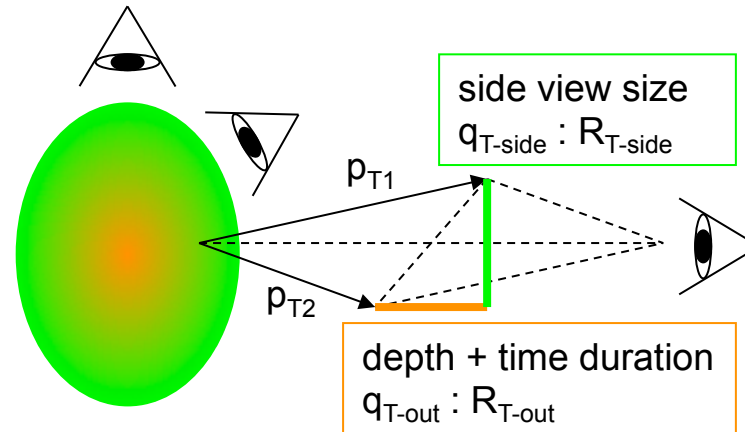


クォーク相での楕円的膨張 とクォーク融合模型によるハドロン生成



量子力学的2粒子干渉効果を使ったQGP凍結時の大きさや形状を測定する。

$R_{T\text{-side}}, R_{T\text{-out}}$ vs $(\phi - \Psi_2), (\phi - \Psi_3)$
 $R_{T\text{-side}}^{\text{oscill.}} < R_{T\text{-out}}^{\text{oscill.}}$ for $n=2,3$ (central)



PHENIX Preliminary, QM12

コントロール・パラメーター 3

高いpT事象、ジェット生成
は、衝突回数によりスケールする。

R_{AA}, R_{CP}

重イオン衝突内で起こり得る核子・核子散乱回数倍した陽子・陽子衝突データに対する重イオン衝突データの比

$$R_{AA} = \frac{\text{yield}(A+A)}{\langle N_{\text{coll}} \rangle \text{yield}(p+p)}$$

$$R_{CP} = \frac{\text{yield}_{\text{Central}} / \langle N_{\text{coll}} \rangle_{\text{Central}}}{\text{yield}_{\text{Peripheral}} / \langle N_{\text{coll}} \rangle_{\text{Peripheral}}}$$

衝突に関与した核子数（低いpT）

核子・核子衝突回数

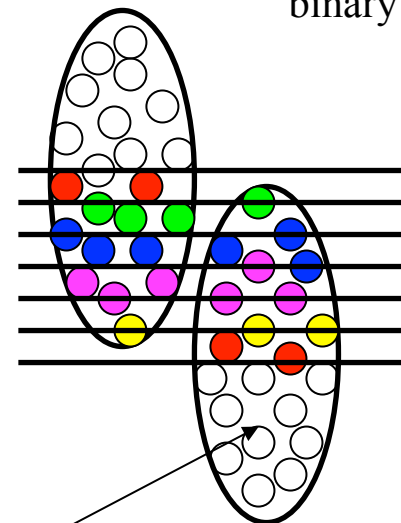
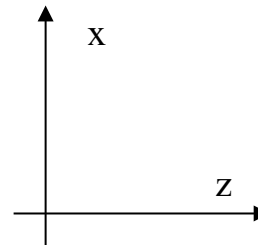
N_{part} : number of participant
participant scaling

N_{coll} : number of binary collision
binary scaling

impact
parameter : b

12 + 11

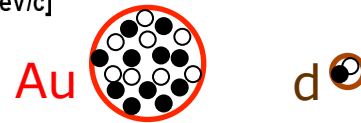
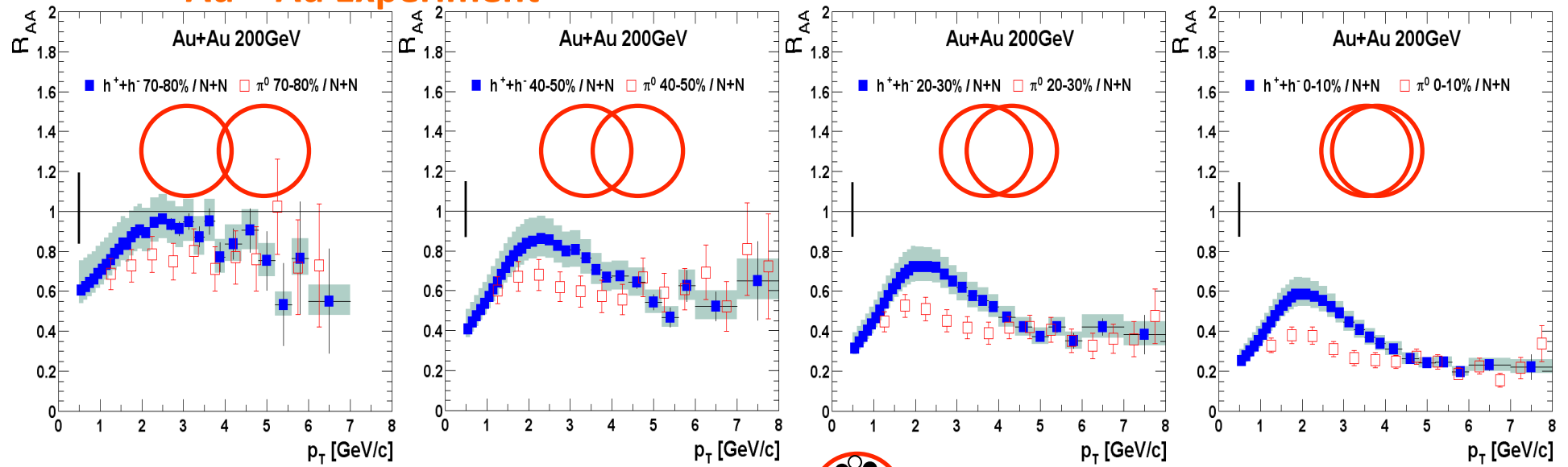
total 23 participant nucleons



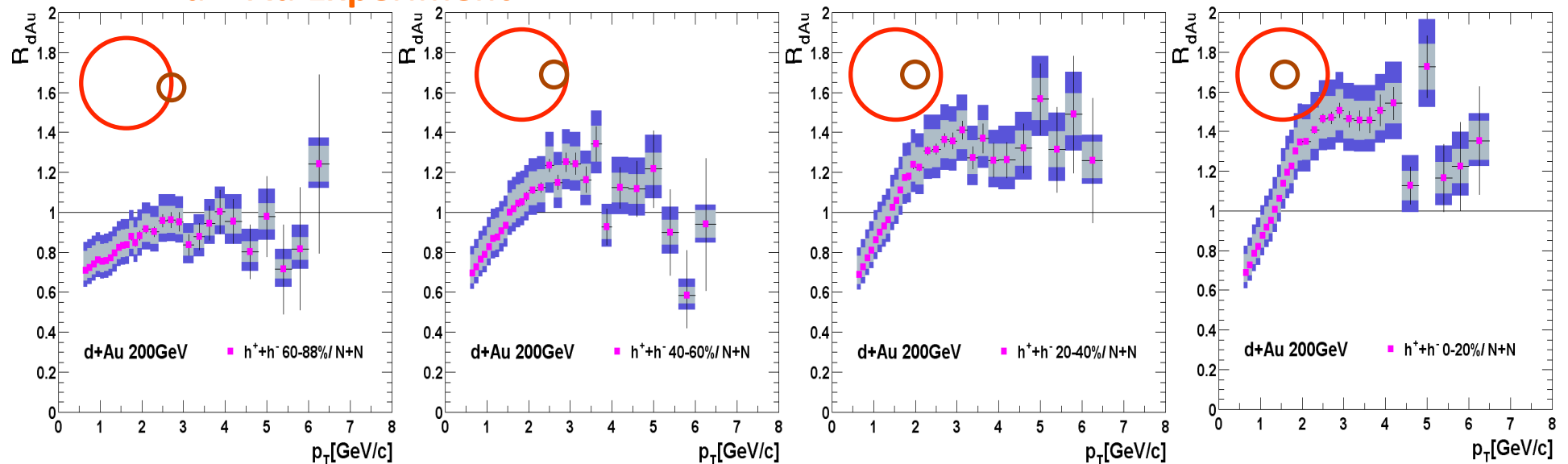
total 30 collisions

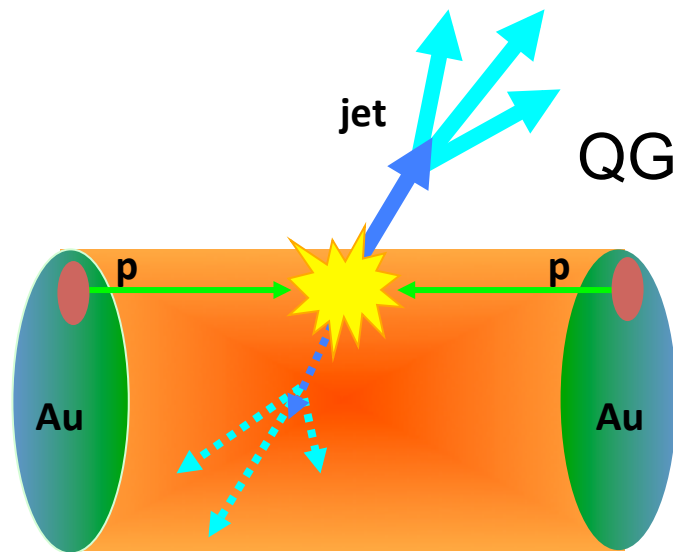
spectators
衝突傍観部

Au + Au Experiment

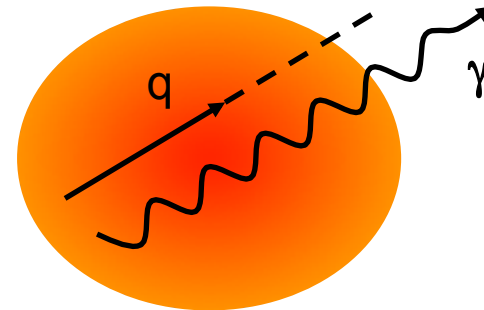


d + Au Experiment

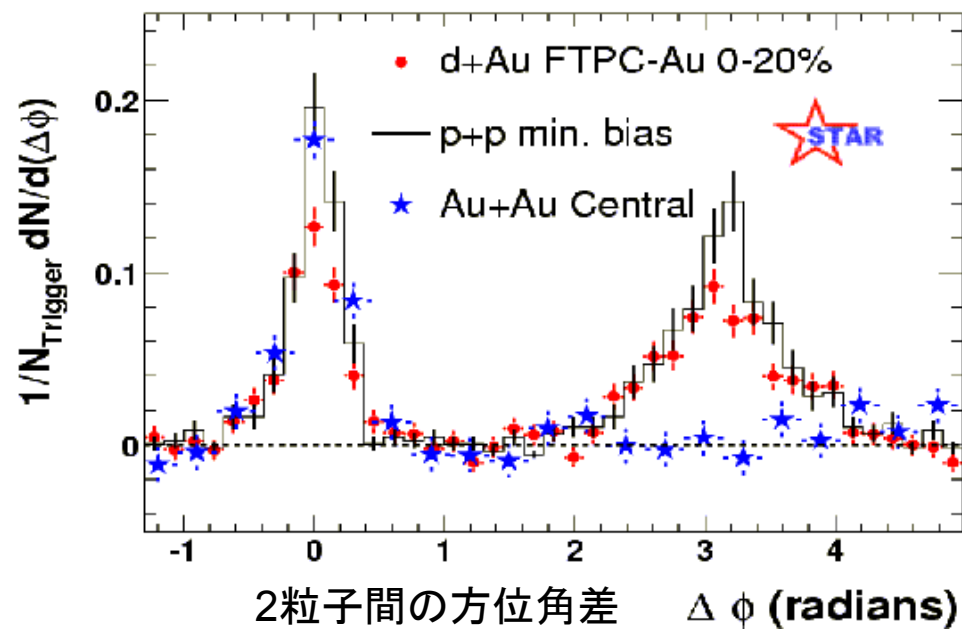




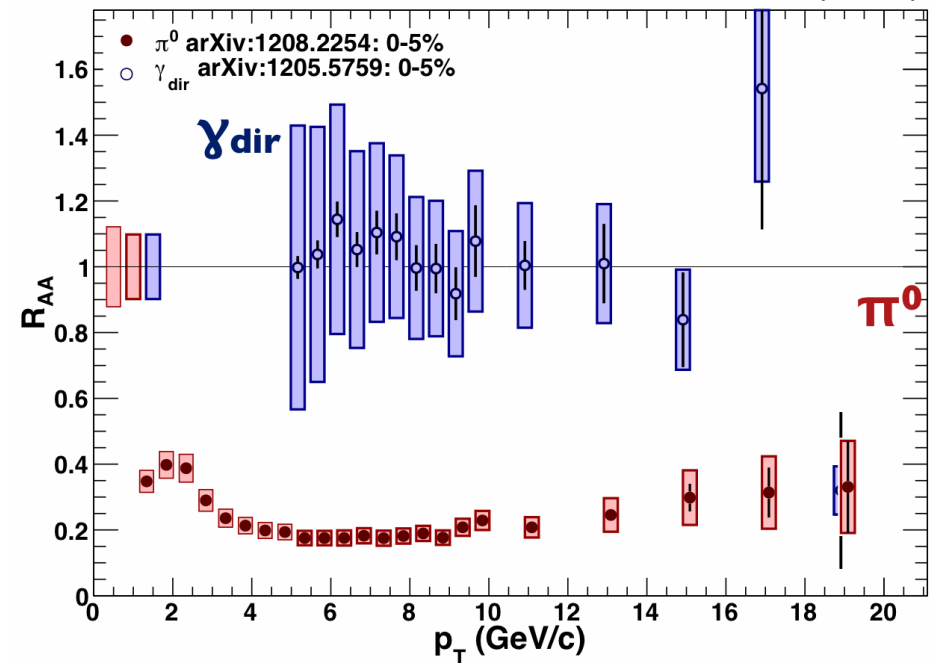
QGP中でのエネルギー損失

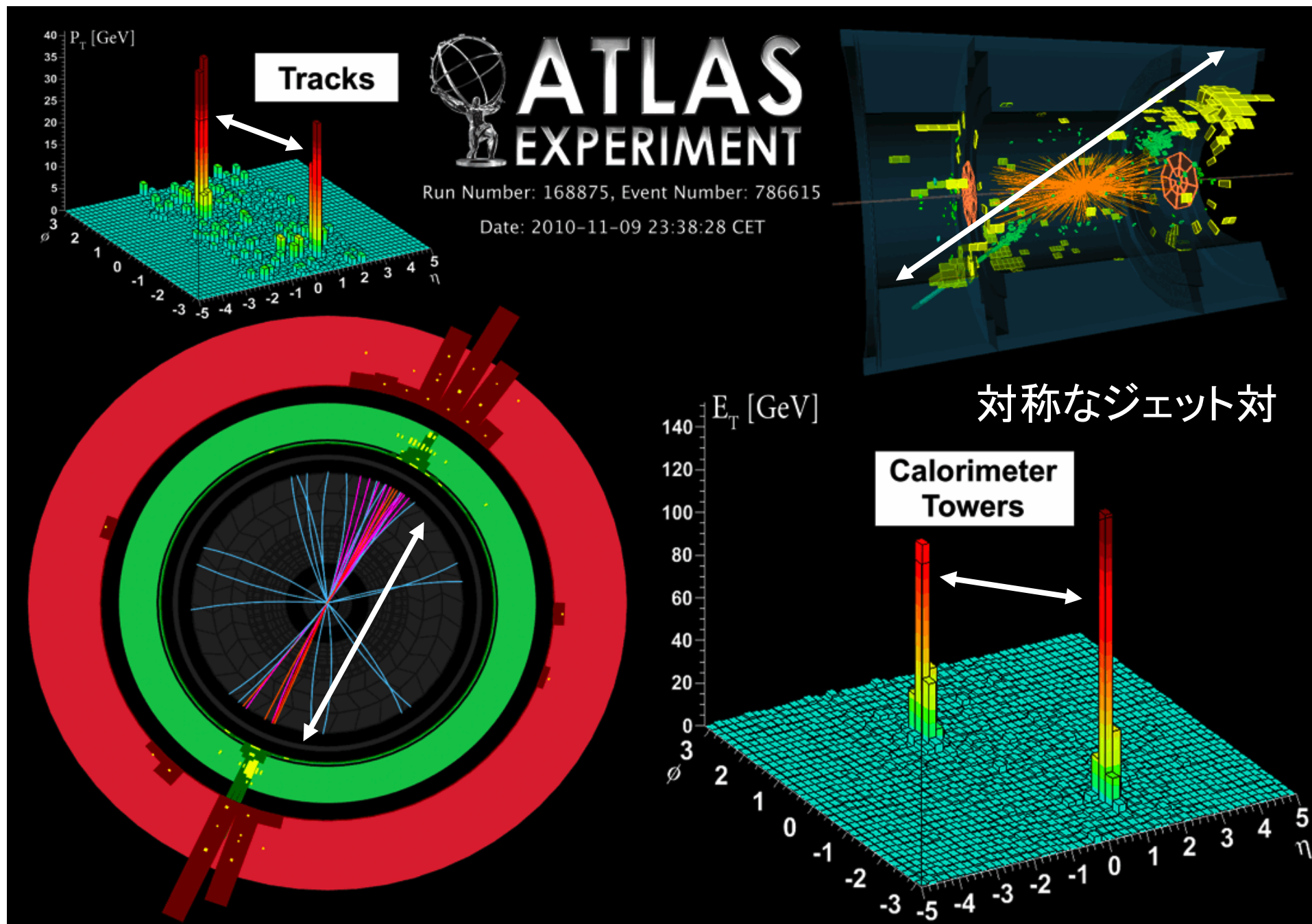


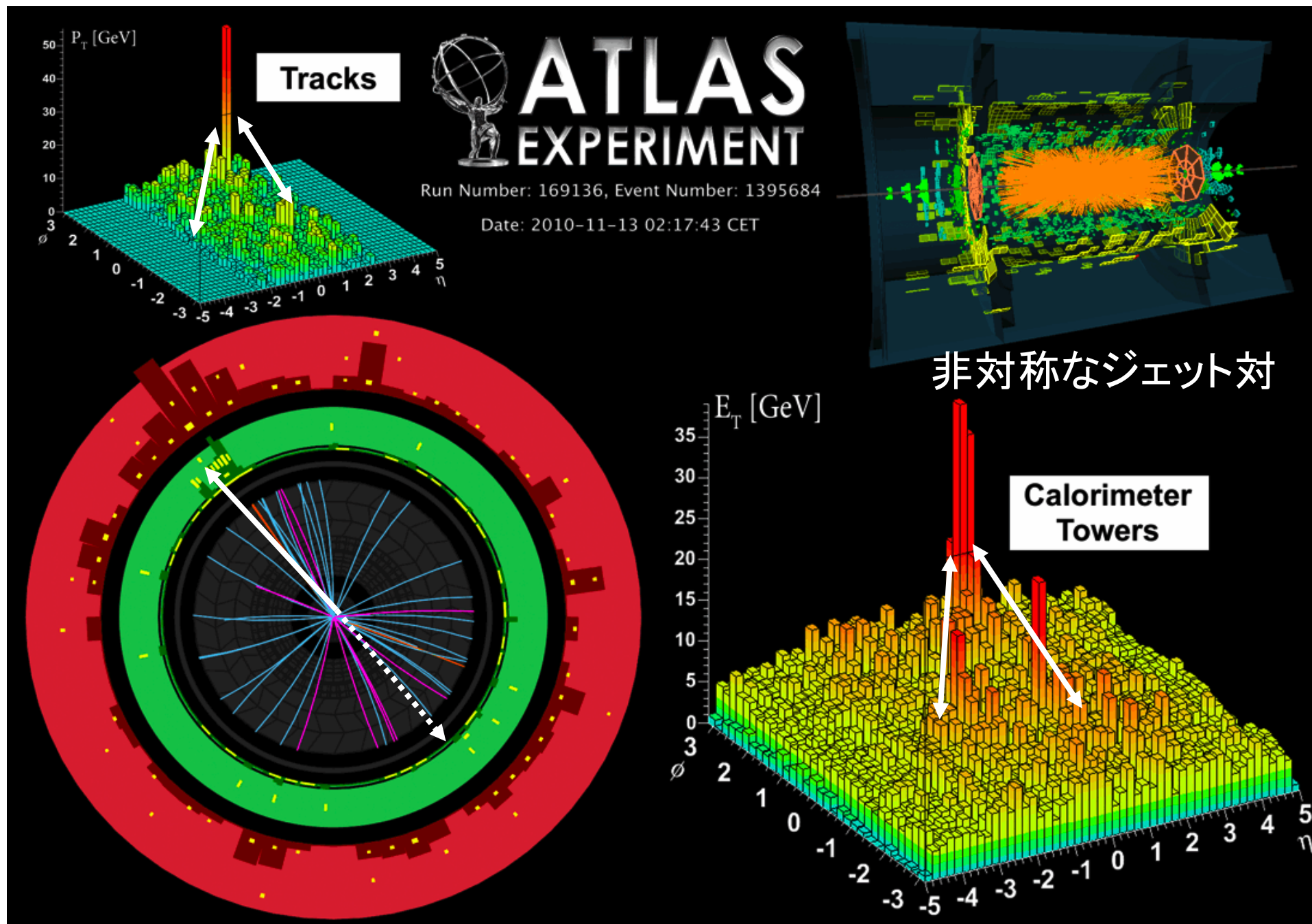
Phys. Rev. Lett. 91, 072304 (2003)



central Au+Au
arXiv: 1208.2254
PRL 109, 152302 (2012)

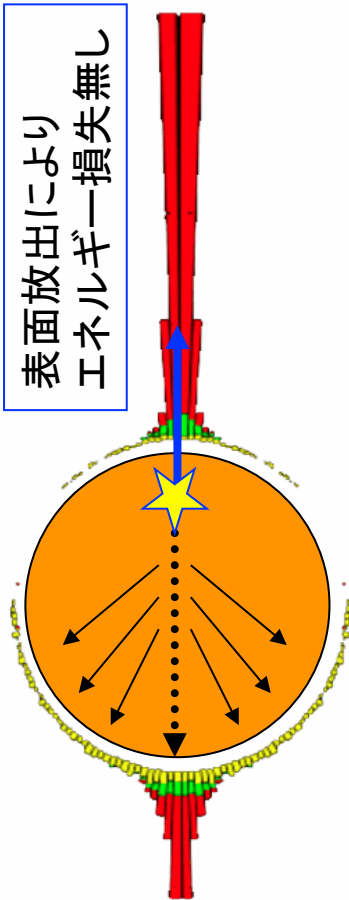






失われたジェットのエネルギーはどこへ？

CMS

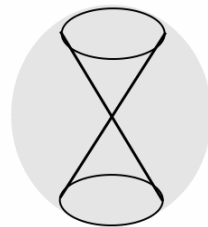
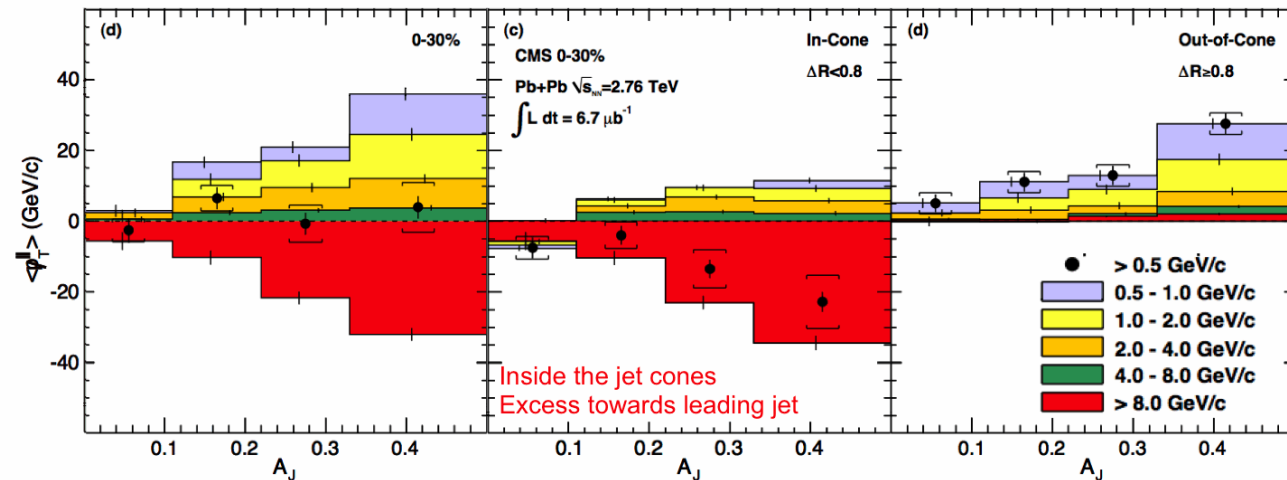


表面放出により
エネルギー損失無し

QGP通過により、
大きなエネルギー損失と、
分布形状の広がり

Missing $p_T^{\parallel}$:
$$\cancel{p}_T^{\parallel} = \sum_{\text{Tracks}} -p_T^{\text{Track}} \cos(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}})$$

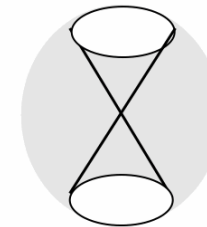
0-30% Central PbPb



All tracks



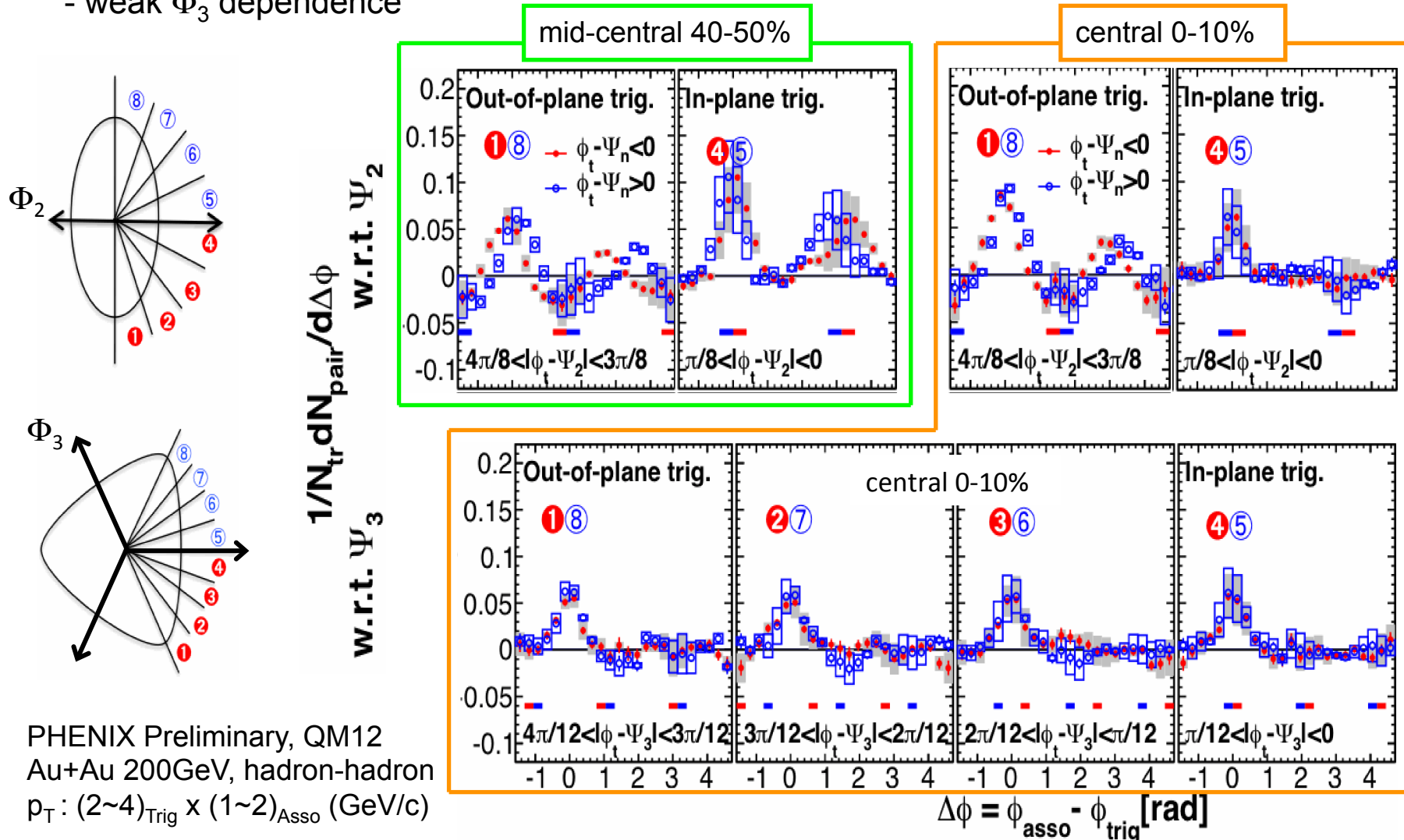
Tracks in
the jet cone
 $\Delta R < 0.8$



Tracks out of
the jet cone
 $\Delta R > 0.8$

2粒子ジェット相関とQGP形状の関係をみる。

- strong Φ_2 dependence and left/right asymmetry (coupled with energy loss and flow)
- broad out-of-plane correlation enhanced more in central (redistribution and expansion)
- weak Φ_3 dependence

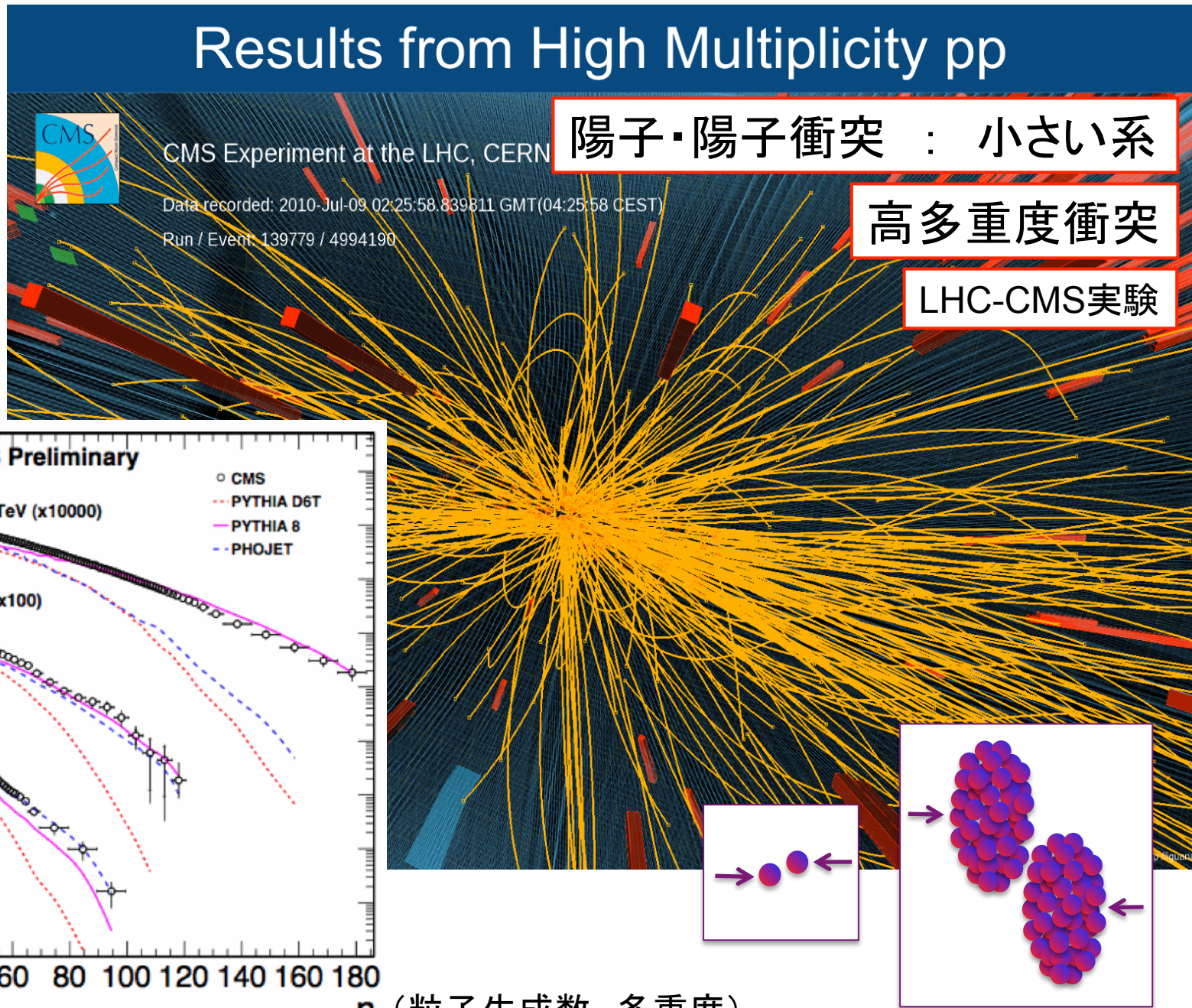


PHENIX Preliminary, QM12
 Au+Au 200GeV, hadron-hadron
 $p_T : (2\sim 4)_{Trig} \times (1\sim 2)_{Asso}$ (GeV/c)

Results from High Multiplicity pp

LHC p-p, p-Pb
RHIC d-Au

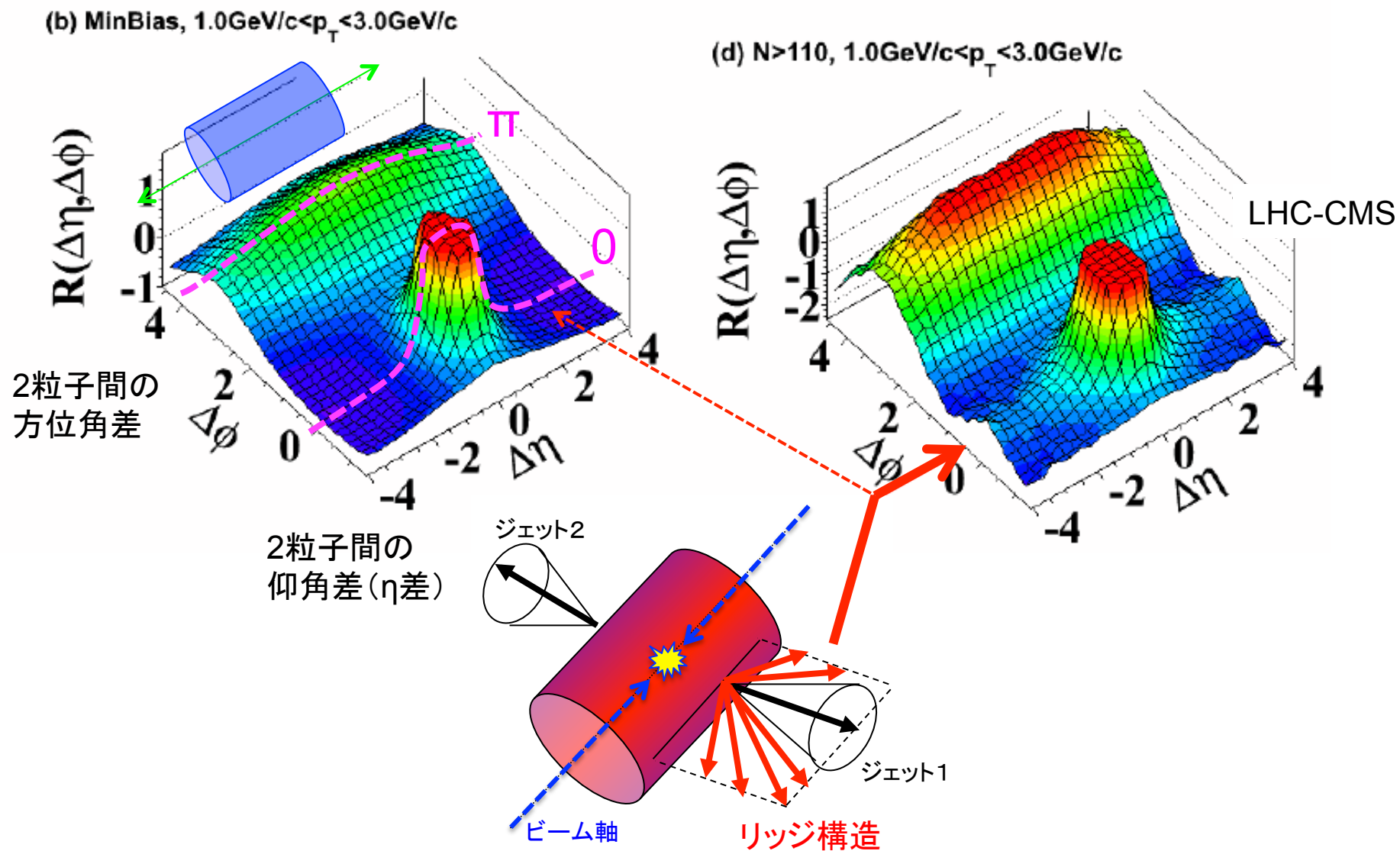
(粒子数 n が生成される)衝突が起きる確率分布



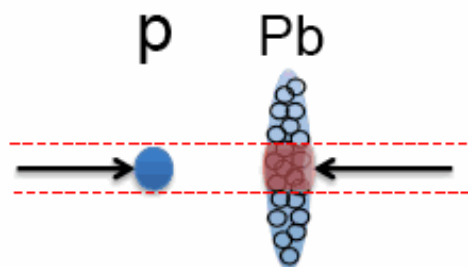
普通の衝突

陽子・陽子衝突

発生粒子数の多い衝突

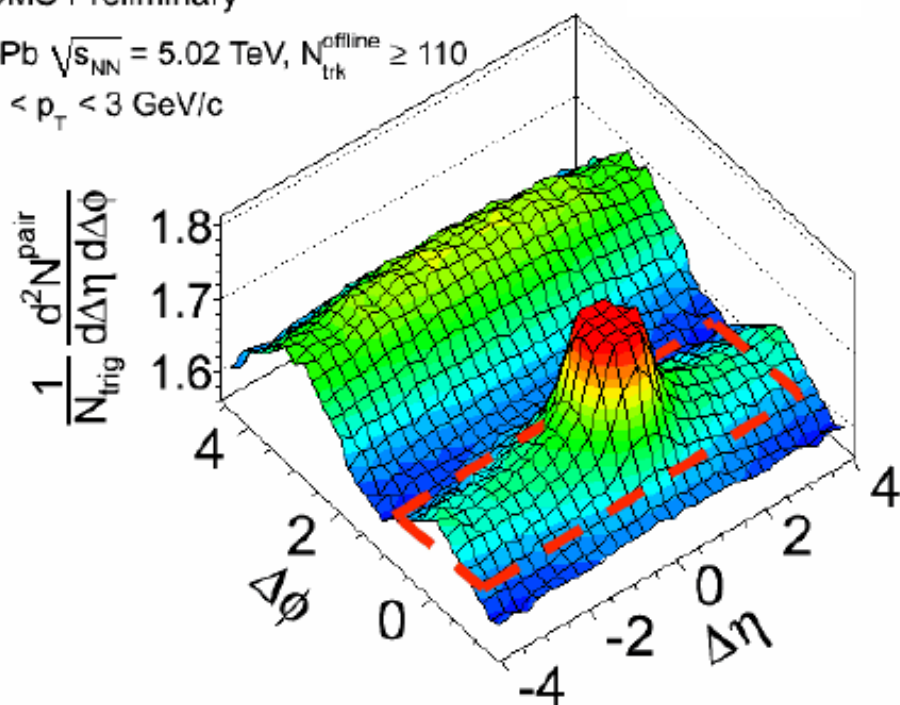


陽子・原子核(鉛)衝突



CMS Preliminary

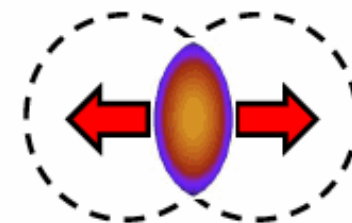
pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, $N_{trk}^{offline} \geq 110$
 $1 < p_T < 3$ GeV/c



LHC-CMS

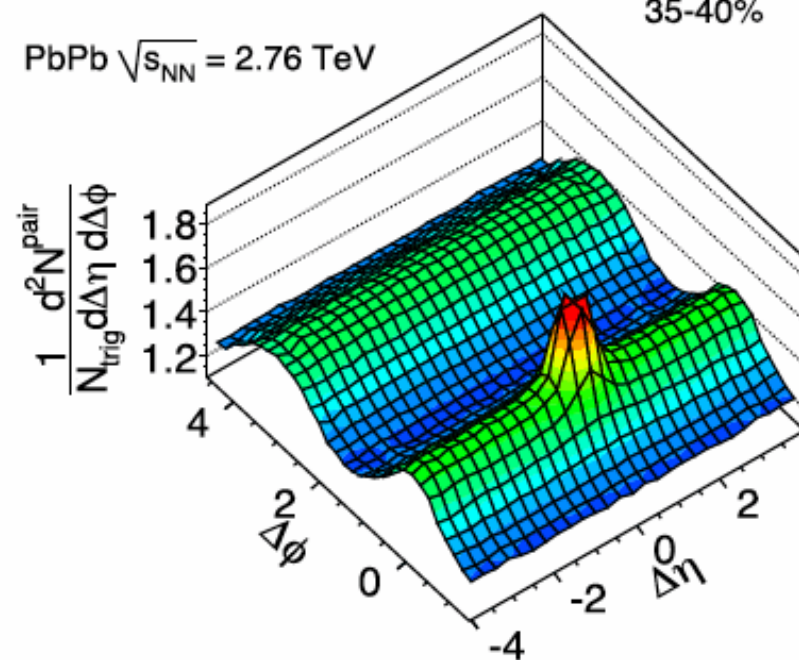
原子核(鉛)・原子核(鉛)衝突

Initial-state geometry
 +
 collective expansion



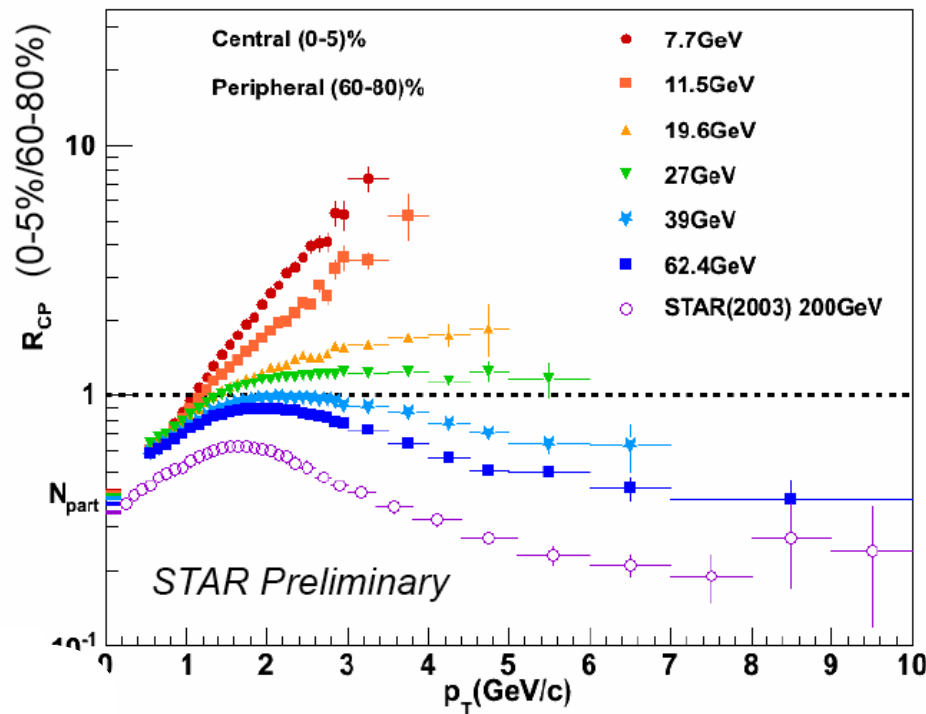
35-40%

PbPb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

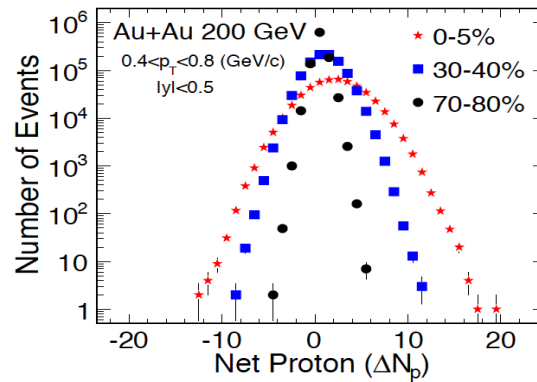


原子核吸収係数 R_{CP} と保存量分布形状 の衝突エネルギー 依存性

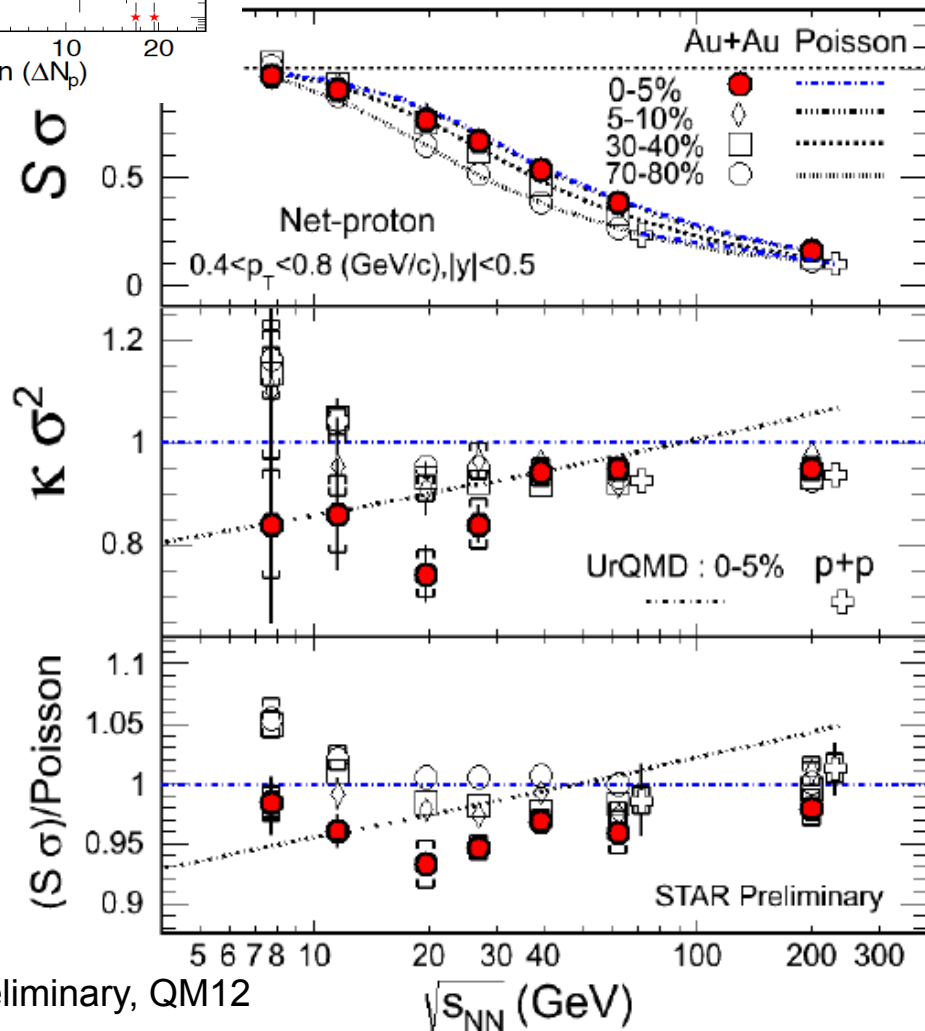
衝突エネルギーを下げると、
AGS→SPS→RHIC、増大から減少へ。



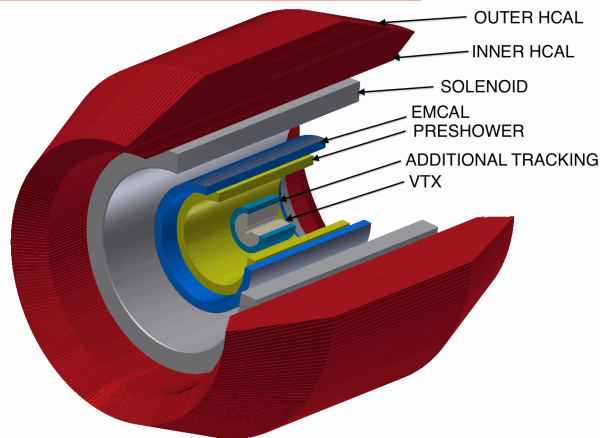
STAR Preliminary, QM12



バリオン数(陽子-反陽子数)
分布の揺らぎが臨界点付近
で発散する予想

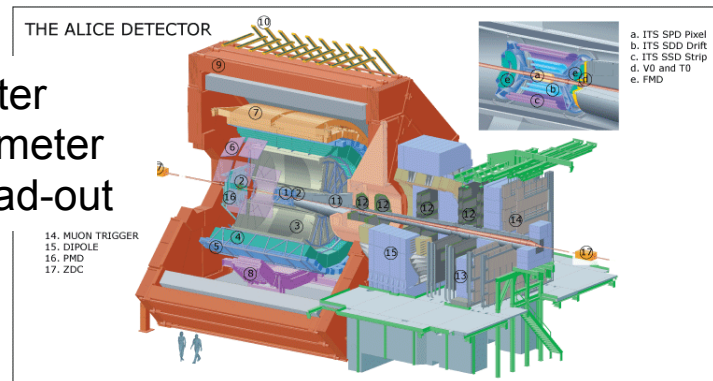


sPHENIX at RHIC-BNL (New York, USA)

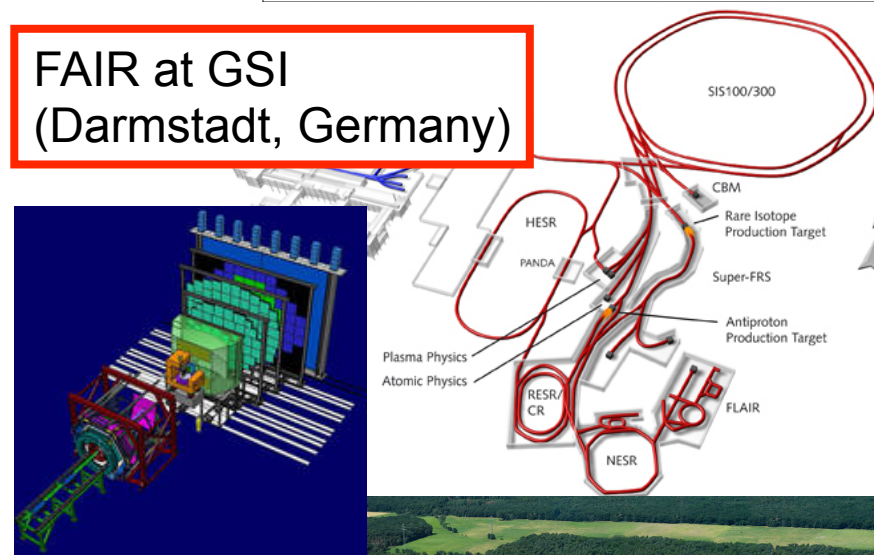


ALICE at LHC-CERN for Luminosity upgrade (Geneva, Switzerland)

Di-jet calorimeter
Forward calorimeter
High-speed read-out



FAIR at GSI (Darmstadt, Germany)



RCS

周長300m
3Gevシンクロトロン 25Hz



MR

周長1600m
30Gevシンクロトロン



LINAC

全長300m
181MeV 25Hz



J-PARC at JAEA/KEK
for heavy-ion collisions
(Tokai, Japan)

ハドロン実験施設

物質・生命科学実験施設

まとめ

相転移とその後の温度変化
集団運動、クォーク相楕円流

QGPによるジェット阻止能
エネルギー損失と再分配

高多重度の小さな系
衝突エネルギー走査