

高エネルギー重イオン グループからの報告

郡司 卓

東京大学原子核科学研究センター
他 高エネルギー重イオン衝突の物理WG

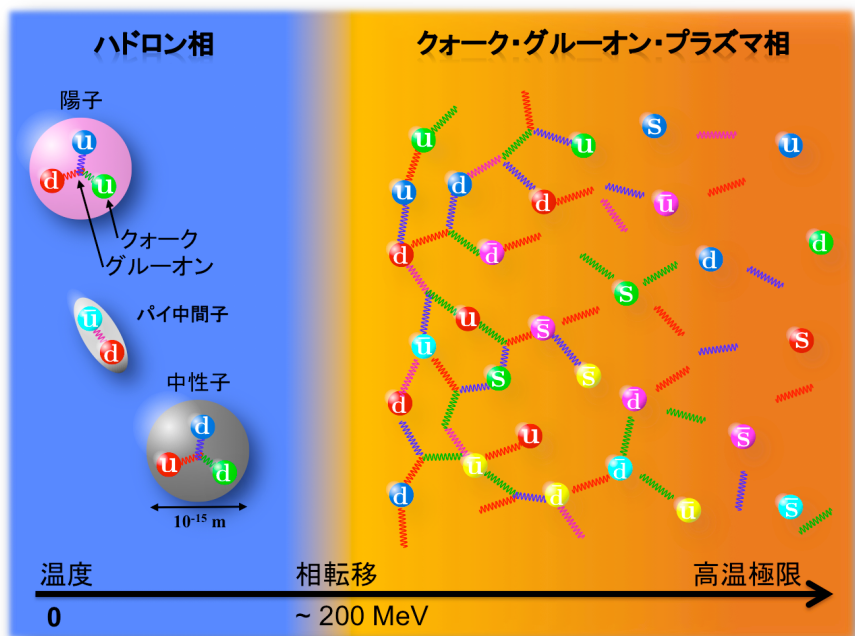
Outline

- ・ 高エネルギー重イオン衝突の物理
- ・ 重イオン衝突で見つかった集団運動
- ・ 最近のホットな結果
- ・ ILCでの研究テーマ
- ・ まとめ

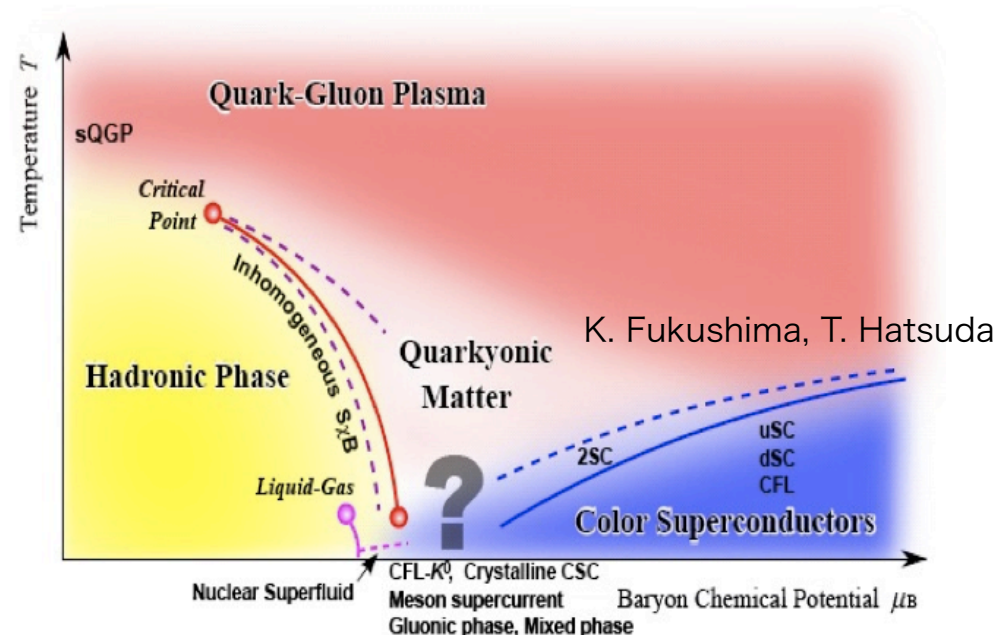
高エネルギー重イオンの物理

高温クォーク・グルーオン
プラズマの物性

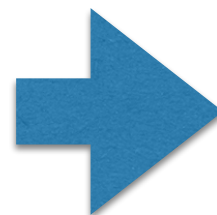
高密度QCD物質の相構造



http://tkynt2.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~maezawa/intro_my_study/research_lattice.html

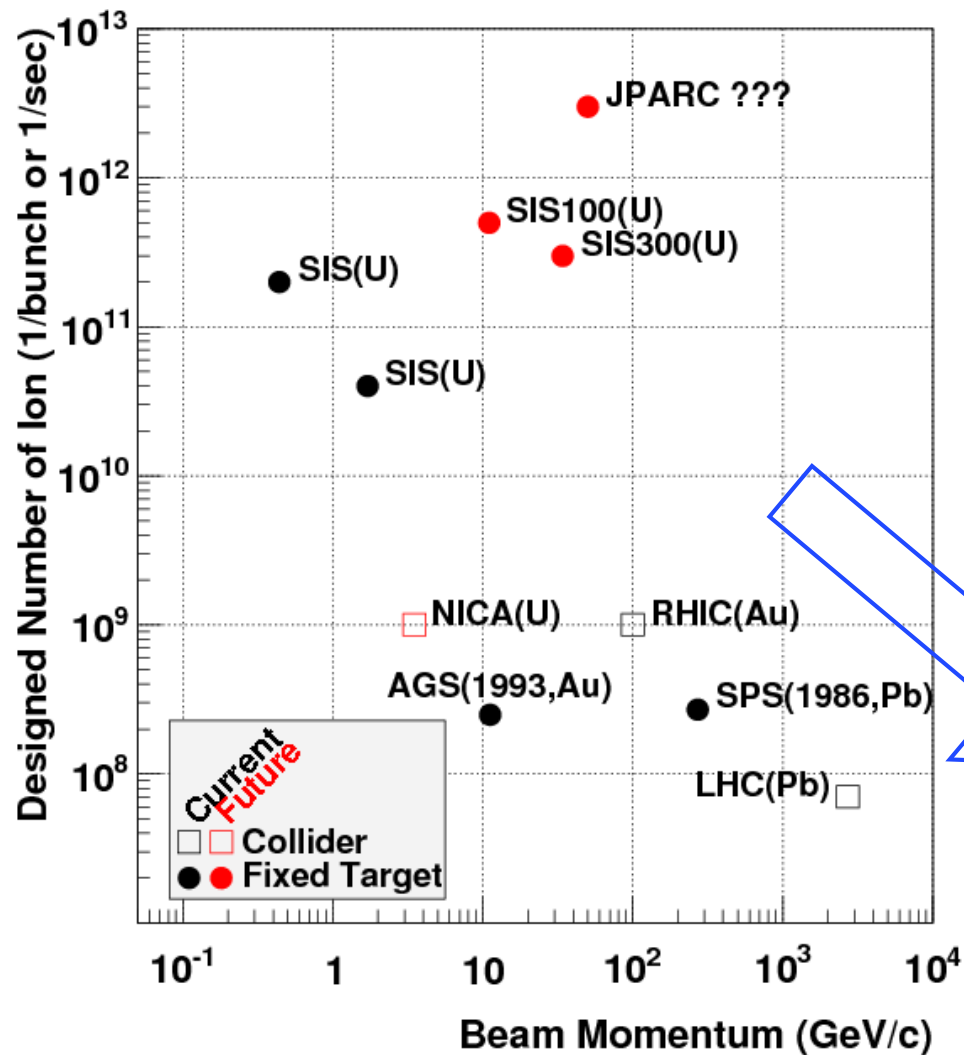


初期宇宙の物質創生
QCD相転移
真空の性質



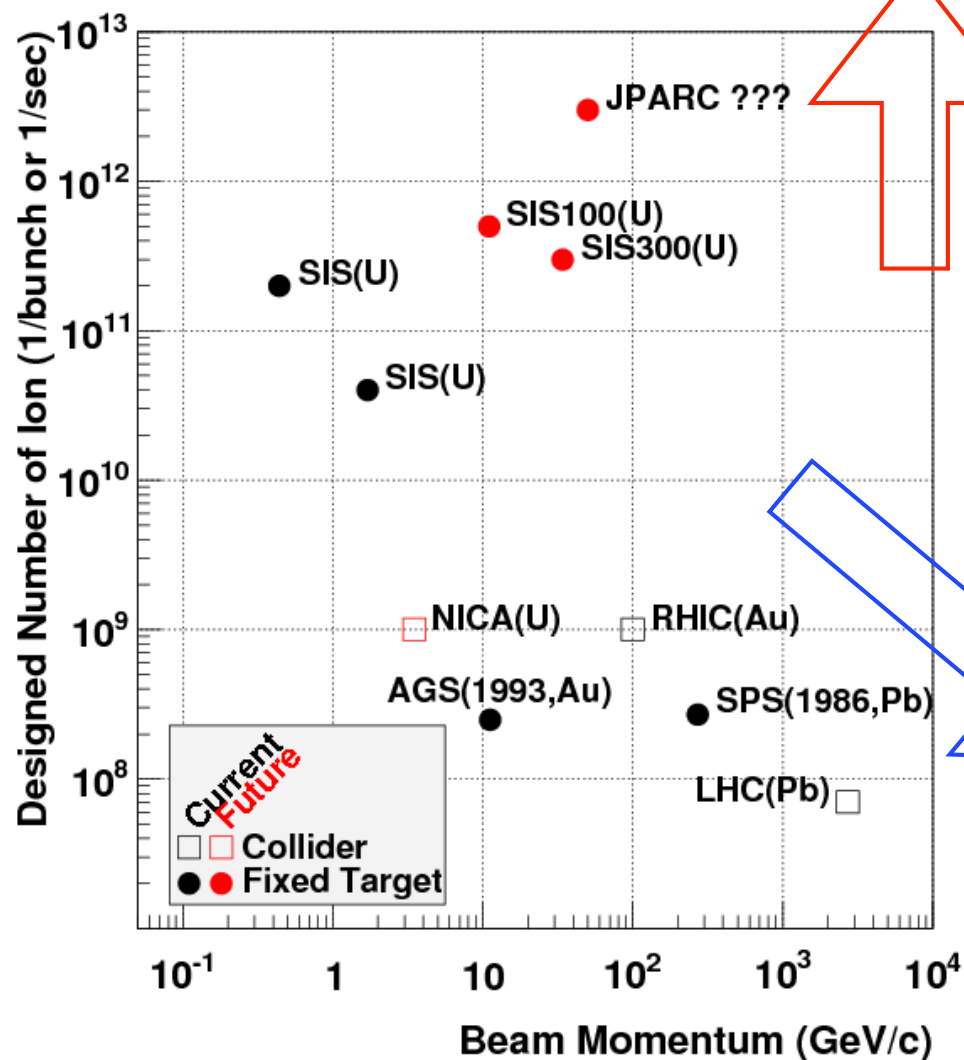
高密度天体の内部構造
真空の性質

重イオン物理の現在



RHIC+LHC =
 エネルギーフロンティア
 高温クォークグルーオン
 プラズマの性質研究
 (2000-2030/2040)

重イオン物理の将来

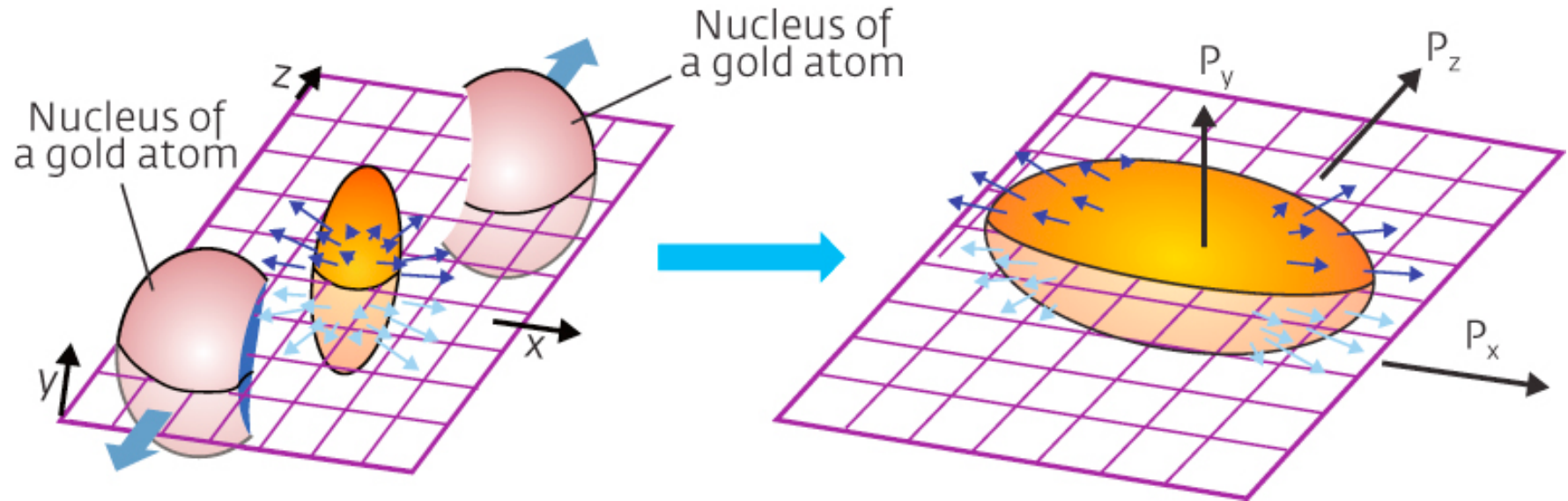


Future!!

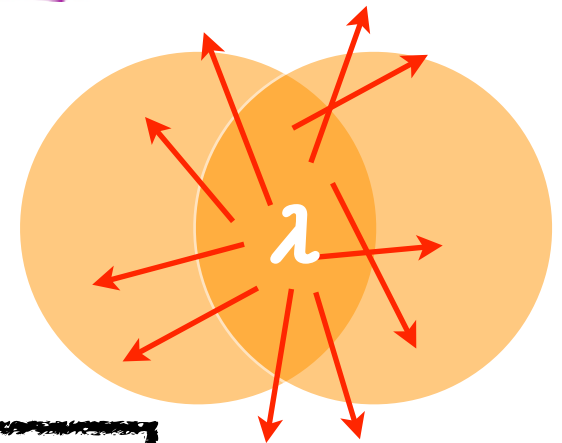
FAIR+(J-PARC-HI?) =
 インテンシティー
 フロンティア
 高密度QCD物質の
 相構造研究
 (2030-)

RHIC+LHC =
 エネルギーフロンティア
 高温クォークグルーオン
 プラズマの性質研究
 (2000-2030/2040)

集団運動の測定



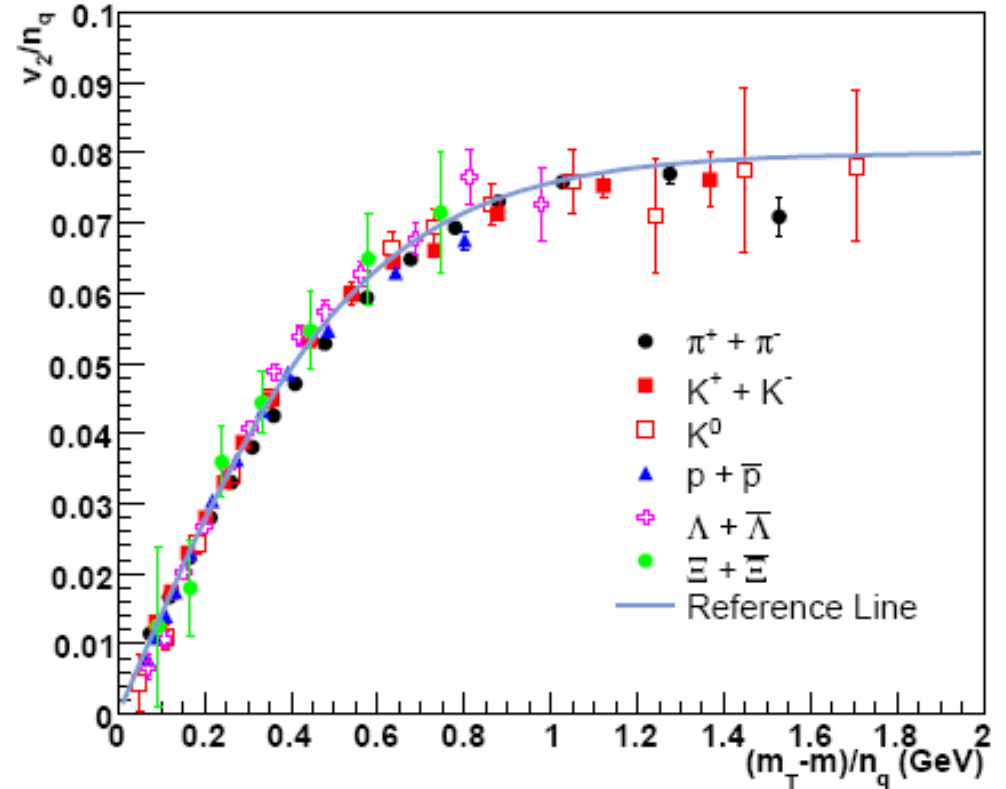
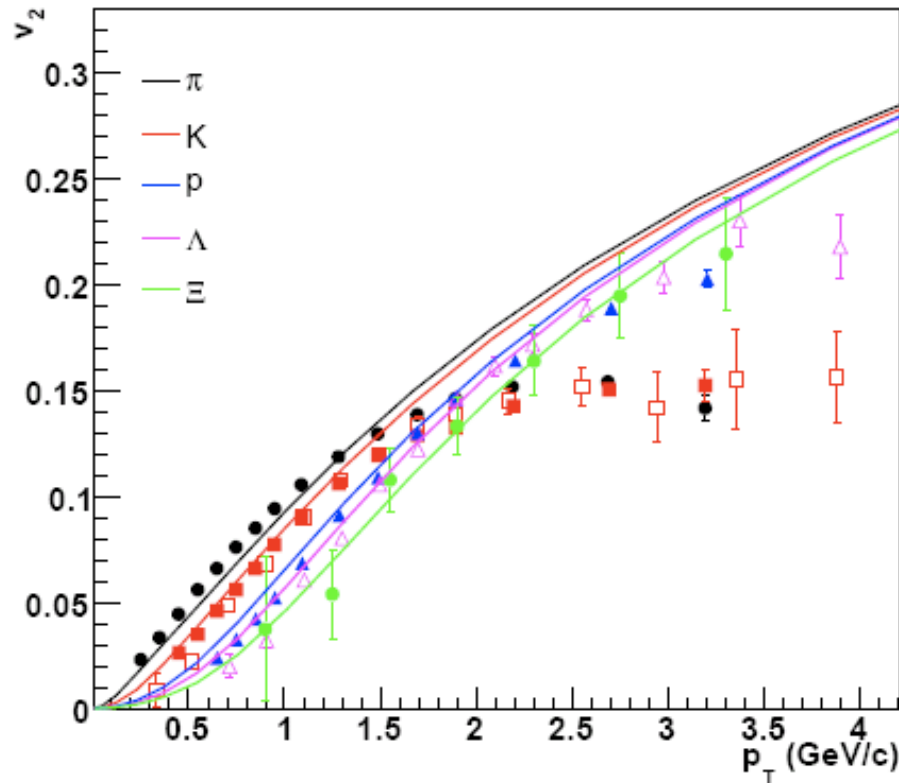
- ・ 衝突直後はアーモンド型のQGP
- ・ QGPが気体($\lambda \rightarrow \infty$)だと、放出粒子は等方的に出る。
- ・ QGPが液体($\lambda \ll R$)だと、短軸方向に大きな運動量を持つ粒子が多く放出される。運動量空間の非等方性。
- ・ 空間の非等方性 → パarton間相互作用(断面積、平均自由行程、粘性) → 運動量非等方性



$$\frac{dN}{d\varphi} \propto f(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n[\varphi - \Phi_n]) \right]$$

集団運動の発見

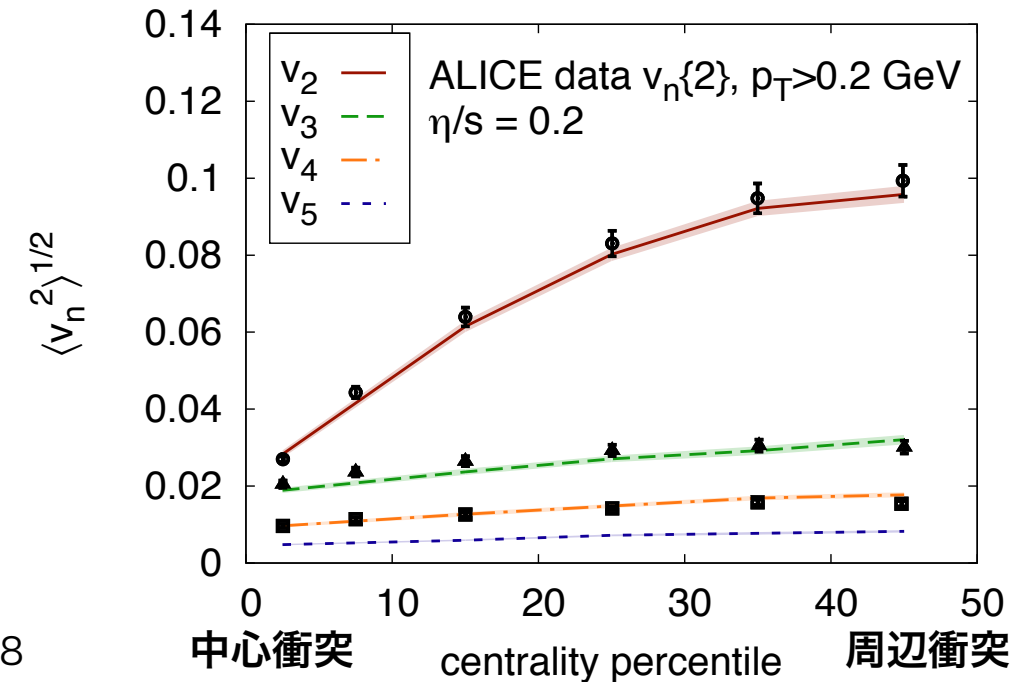
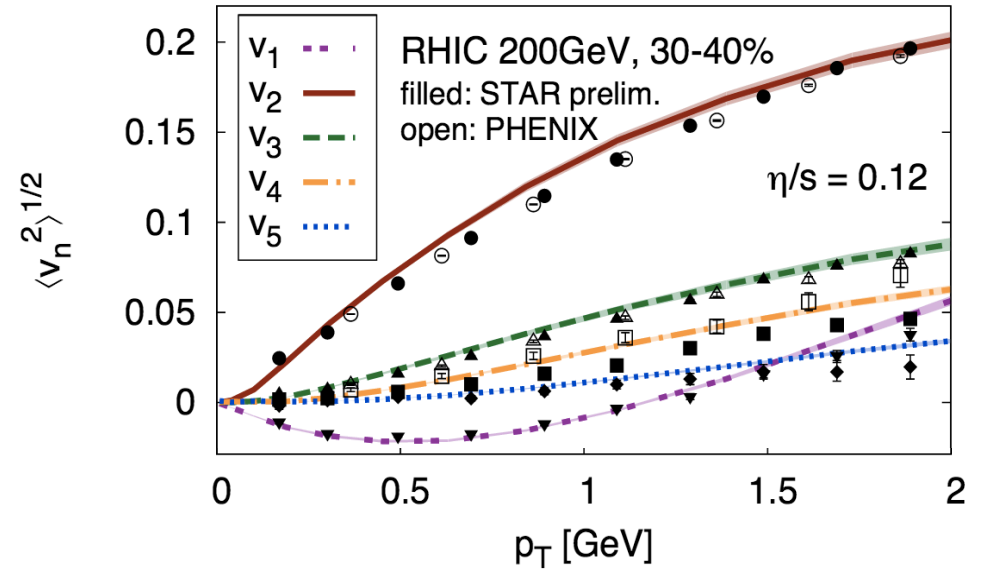
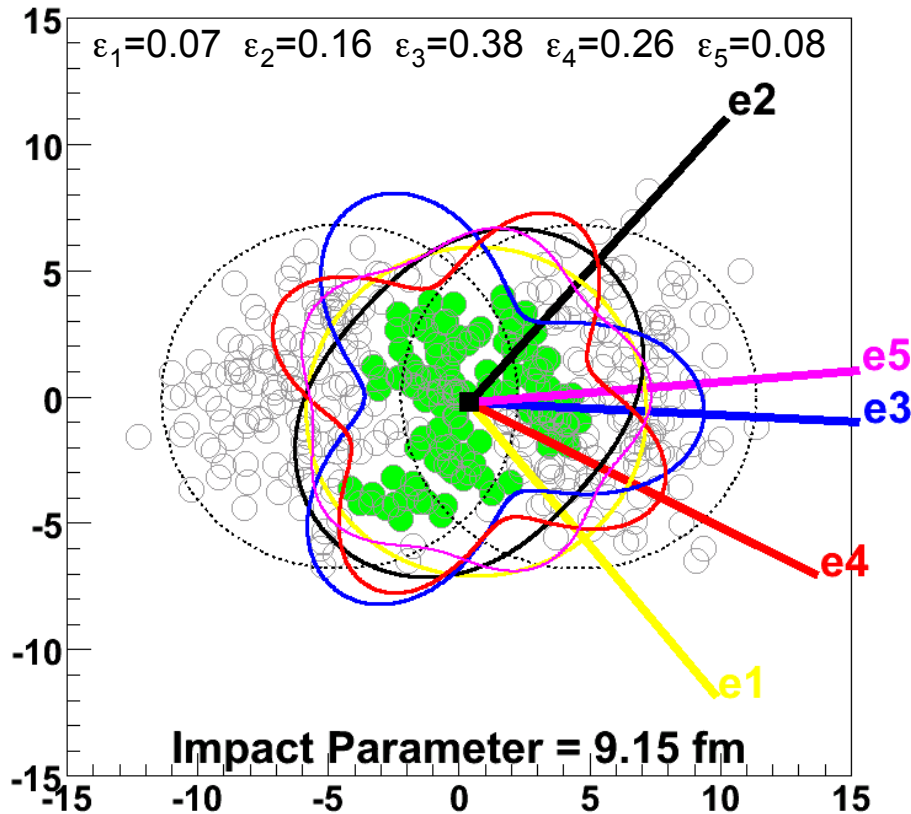
PHENIX decadal plan 2011-2020, https://www.bnl.gov/npp/docs/phenix_decadal10_full_refs.pdf



- ・ v_2 は非常に小さい粘性を仮定した流体計算でよく再現される
 - ・ 気体ではなく液体の様相.
- ・ 構成パートン数でのスケーリング(クォーク数スケーリング)
 - ・ パートンレベルでの集団運動.

高次の集団運動の発見

Gale et al. PRL110,012302 (2013)



- ・ 事象ごとの衝突領域の揺らぎ
 - ・ $e_3, e_4, e_5 \neq 0$
- ・ 大きな v_n の発見. 小さい粘性 + 流体計算で全ての v_n が記述できる.

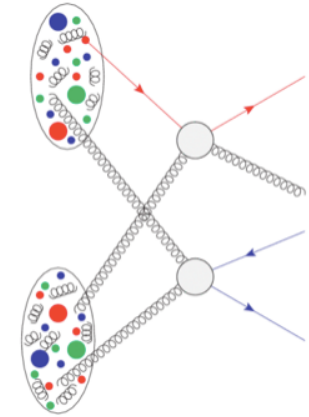
ppやpAでのQGP探索

大きな衝突エネルギー → 大きな粒子多重度

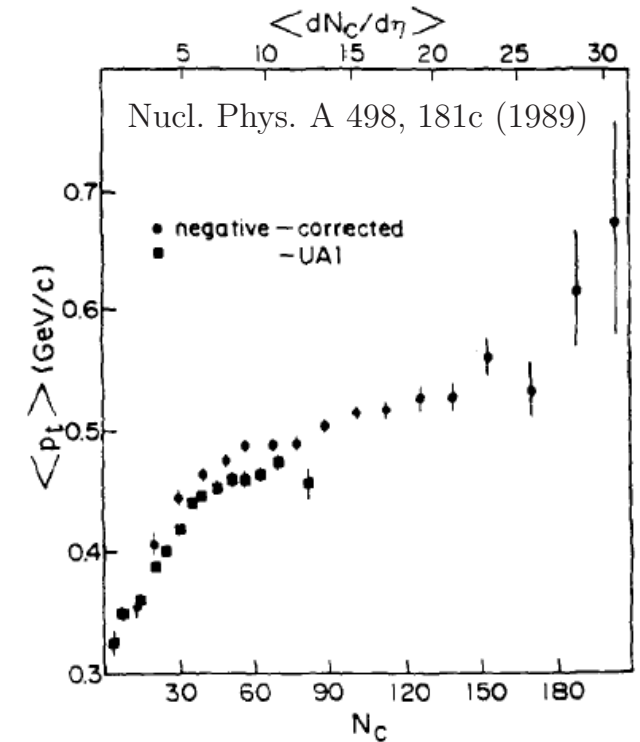
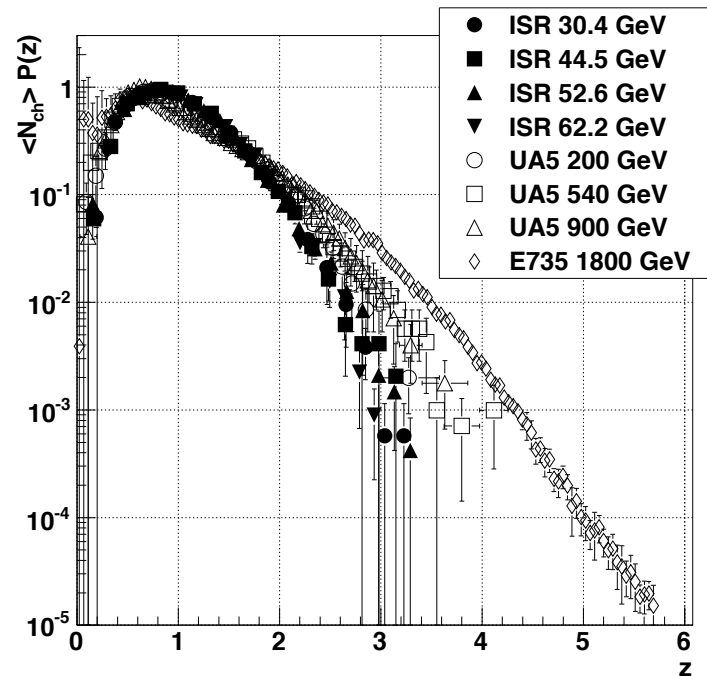
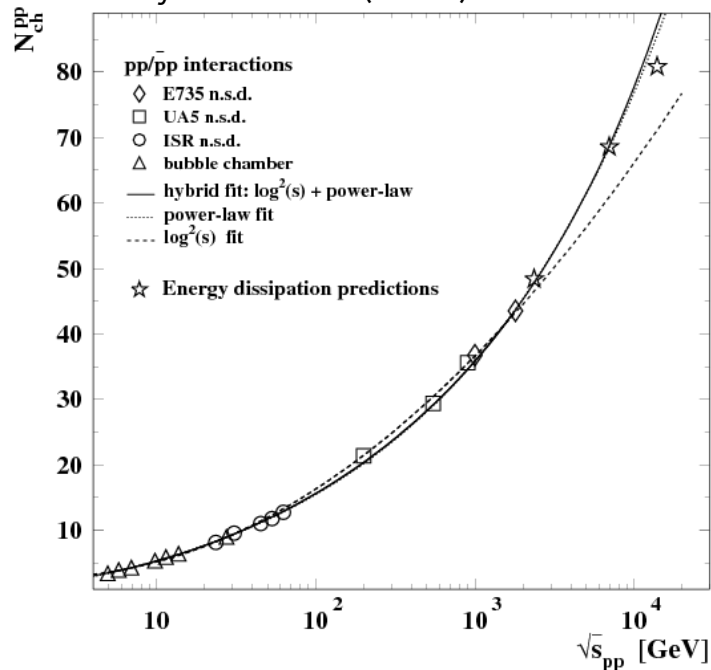
- ・ $\sqrt{s} > 200$ GeVくらいから急激な増加
- ・ KNO scalingからのズレ → Multi Parton Interaction

CDFでのppbar衝突($\sqrt{s}=1.8$ TeV)でのQGP探索(E735)

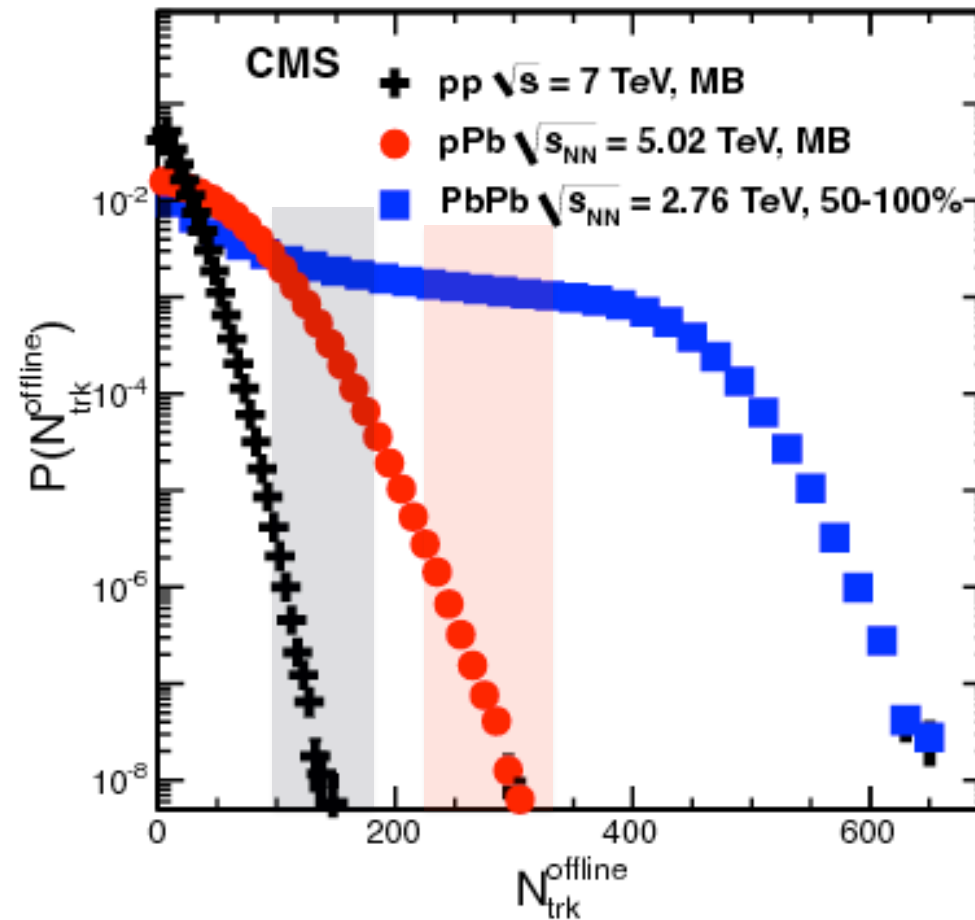
- ・ 粒子多重度と共に $\langle p_T \rangle$ の上昇



Phys.Rev. D93 (2016) 054046



ppやpAでのQGP探索



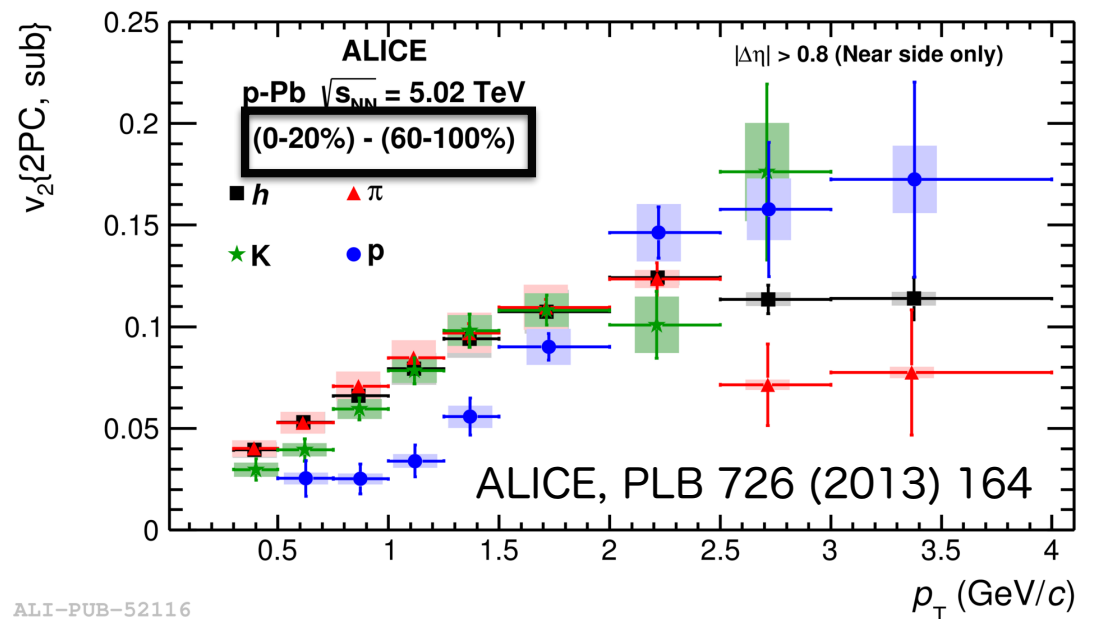
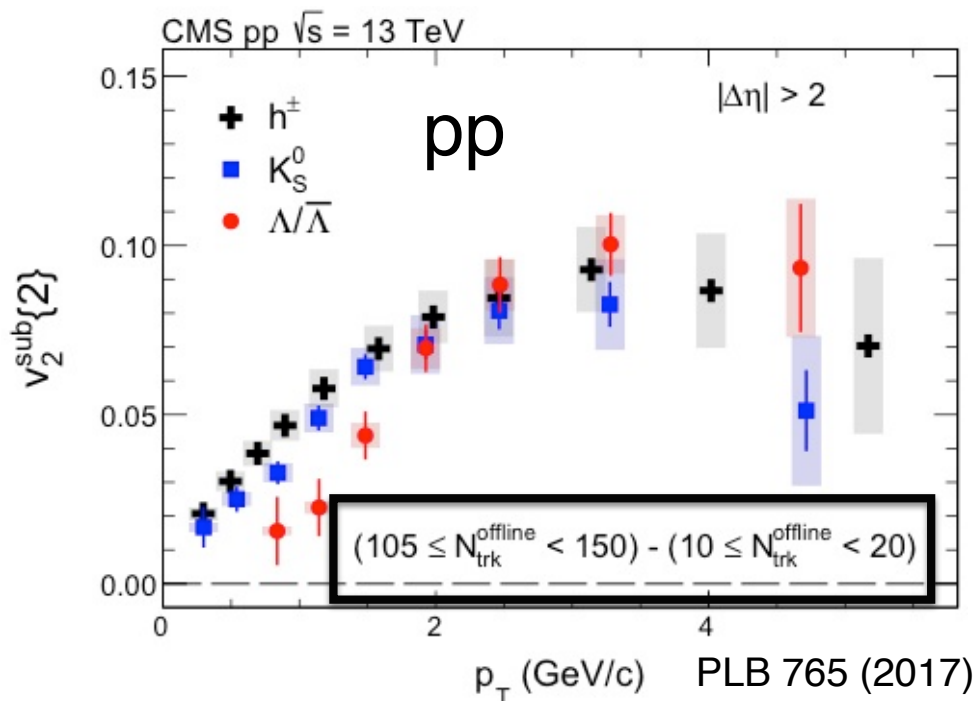
pp衝突やp-Pb衝突の高粒子多重度→Pb-Pb衝突の60-80%の中心衝突度に対応

RHICやLHCのppやp-A(d-A)衝突で高粒子多重度をトリガーして
QGPを探索する研究が進められている

最近のホットな結果-I

p+pやp+A衝突でも
A+A衝突と同じような現象が見えている

大きな v_2 の発見



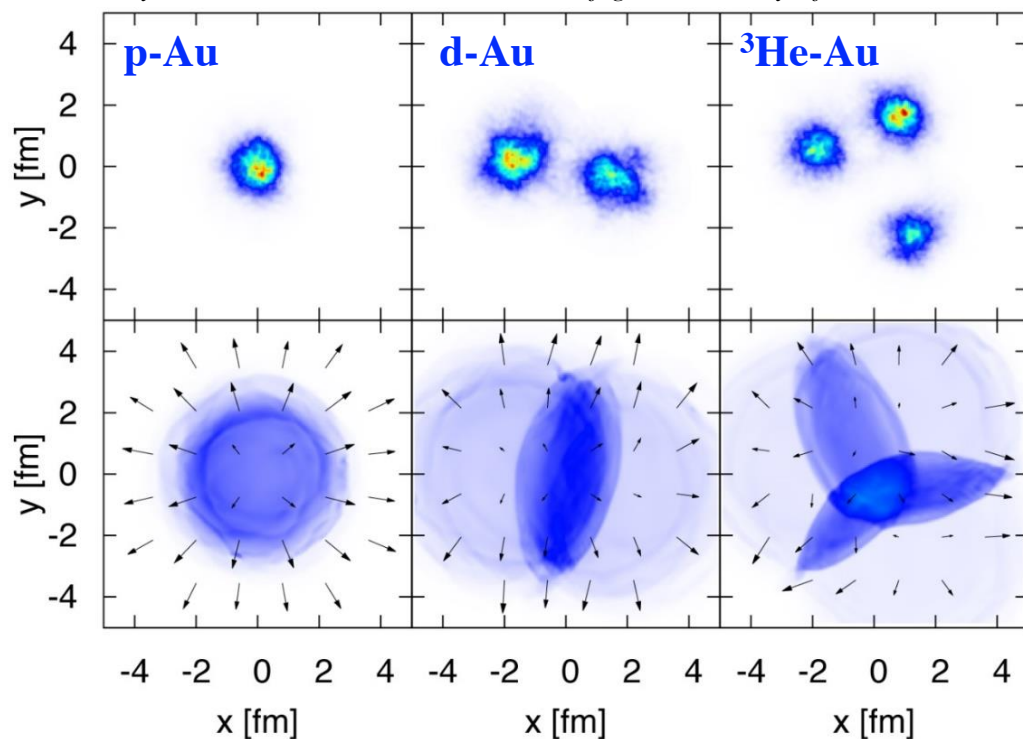
高粒子多重度事象で見られる
RHICのppでは(今のところ)見られない

初期形状との相関

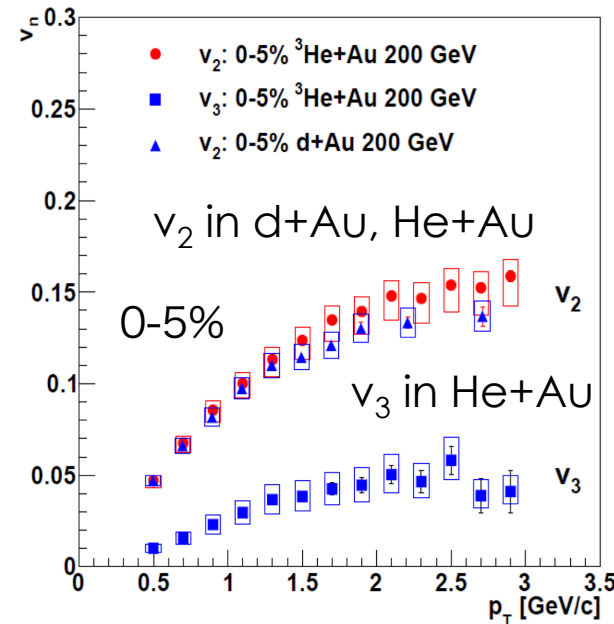
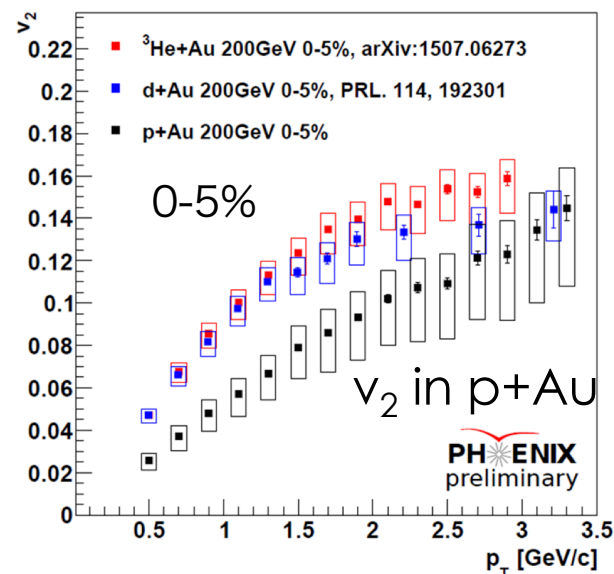
PHENIX, QM15

$$v_2^{3\text{HeAu}} \geq v_2^{d\text{Au}} > v_2^{p\text{Au}}$$

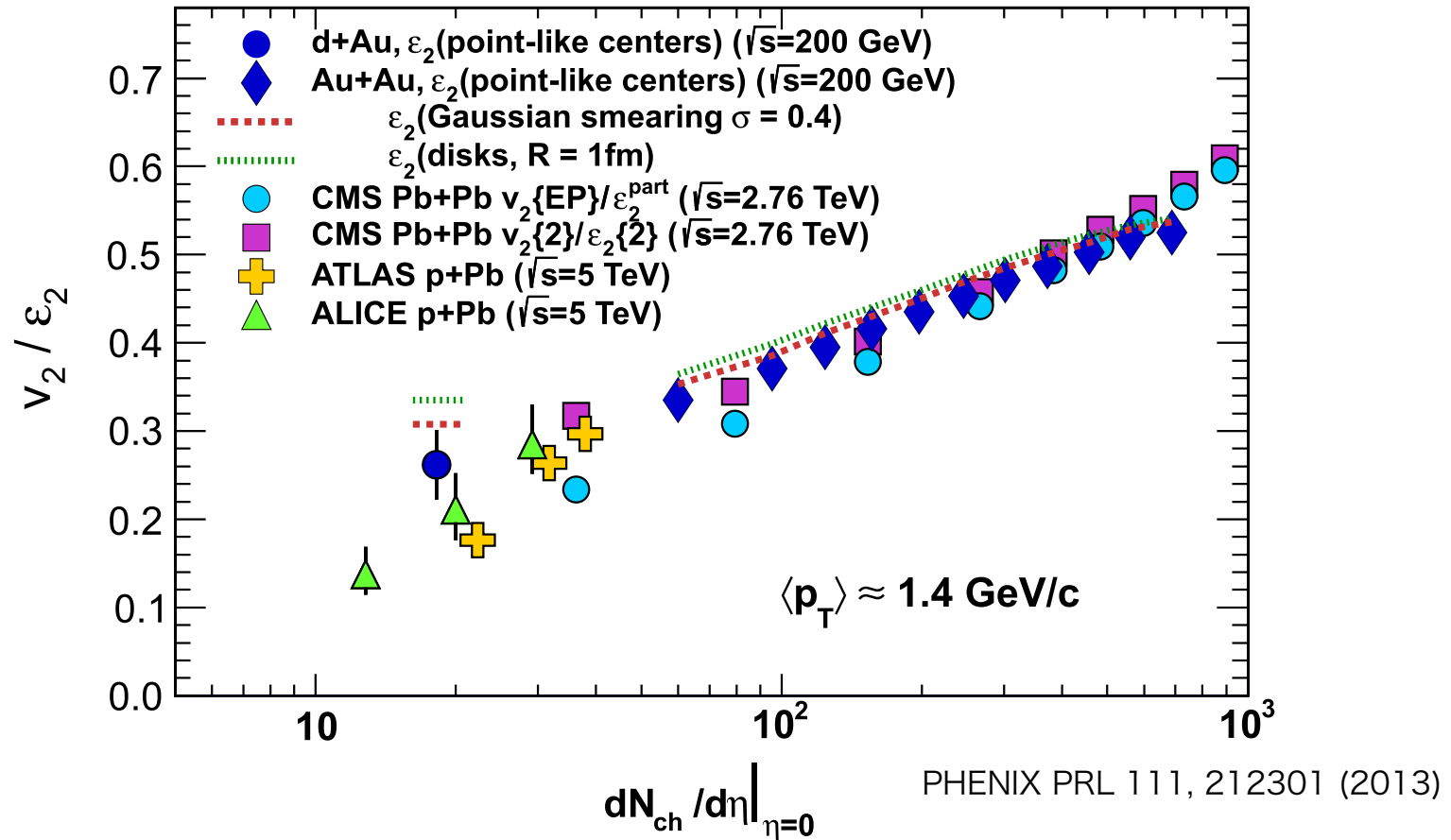
Phys. Rev. Lett. 113, 112301 (2014), figure courtesy of B. Schenke



- $0 < v_2(p\text{-A}) < v_2(d\text{-A}, \text{He-A})$
- $v_3(\text{He-A}) \neq 0$
- 衝突初期の形状と強い相関



粒子多重度との相関

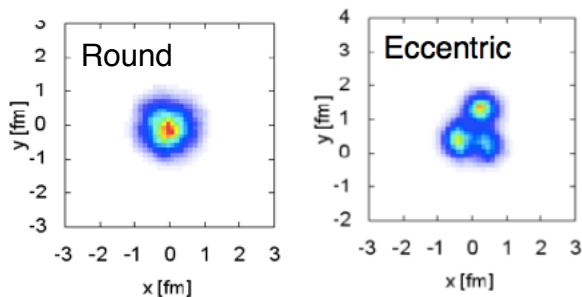
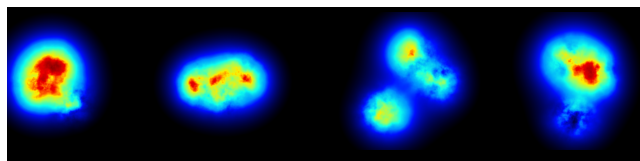
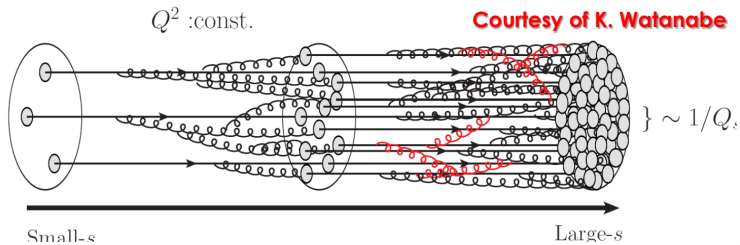


- ・ 形状を補正した v_2/e_2 は粒子多重度 (\propto エントロピー) と強い相関
- ・ **初期の形状と終状態相互作用** の両方が重要

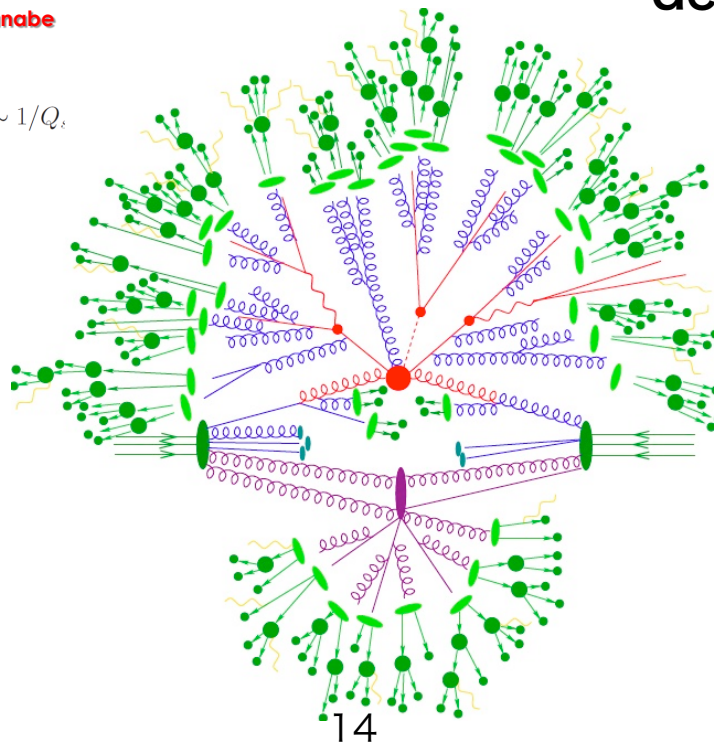
小さい系のダイナミクス

重要な3ピース

陽子の
内部構造
(グルーオン飽和)

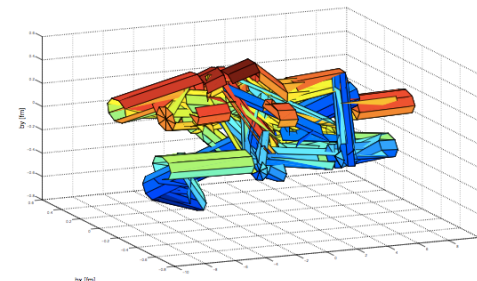
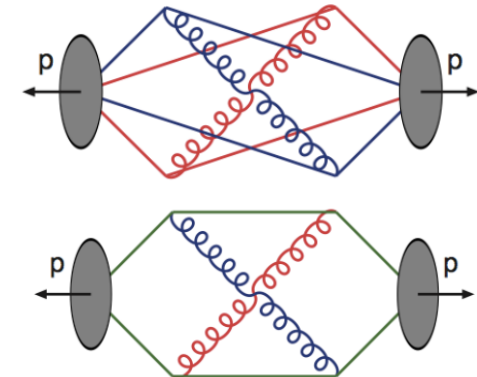


衝突の素過程
特にHMの起源
(MPI, FSR, ISR)



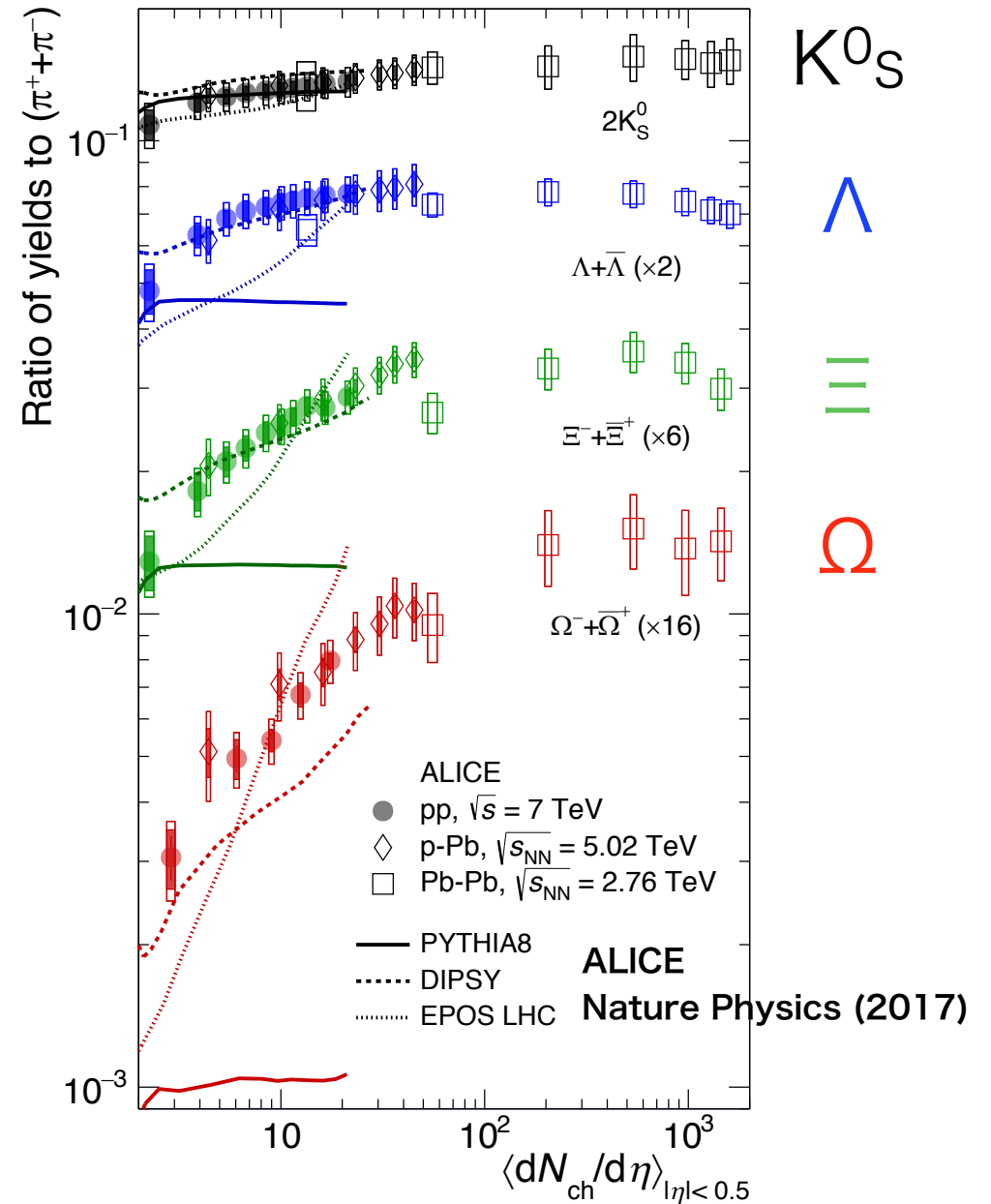
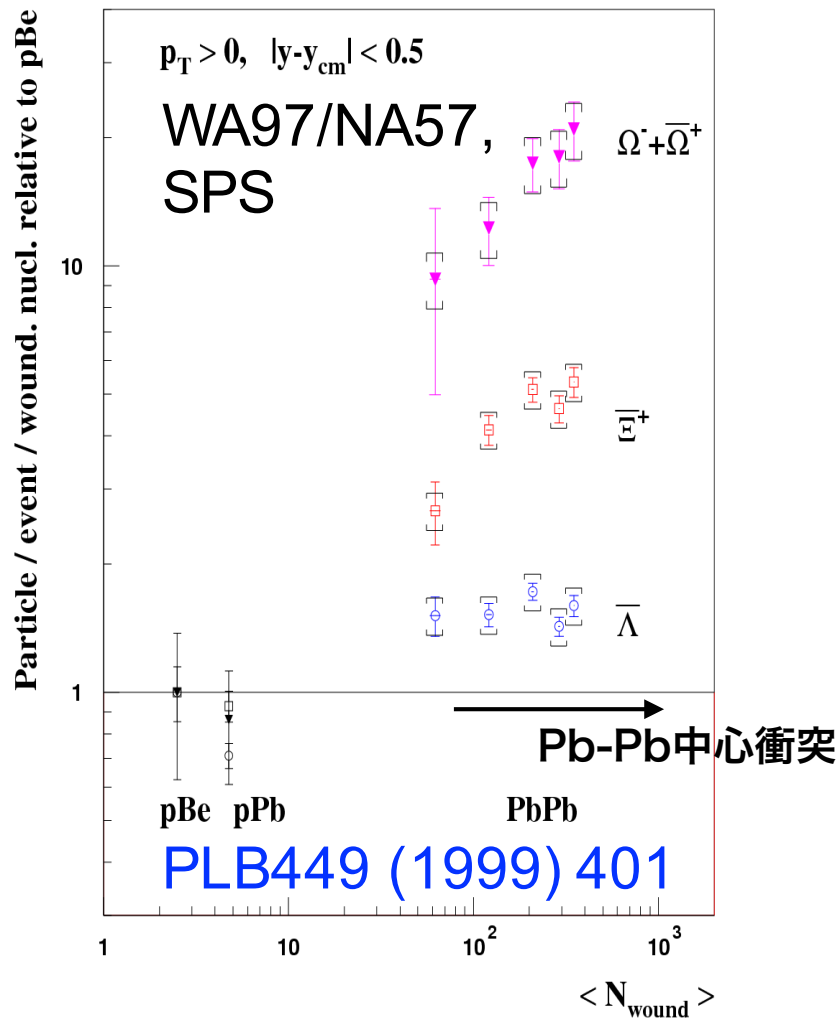
流体的振る舞い?

衝突後
のダイナミクス
(color reconnection,
color ropes, thermal string
decays, Hawking Unruh,...)



最近のホットな話題-II

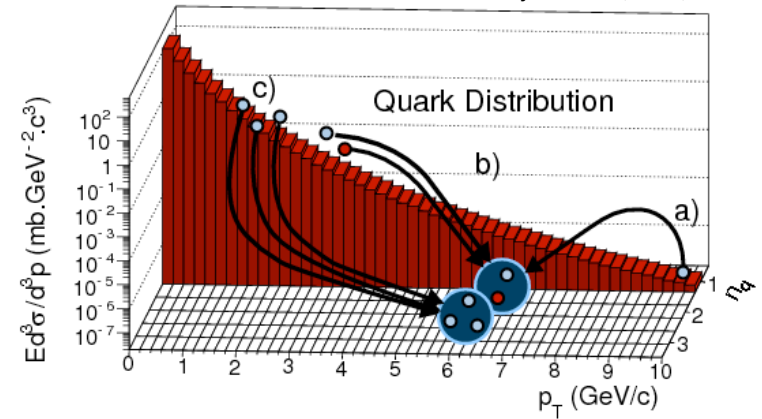
ストレンジネス増大の発見



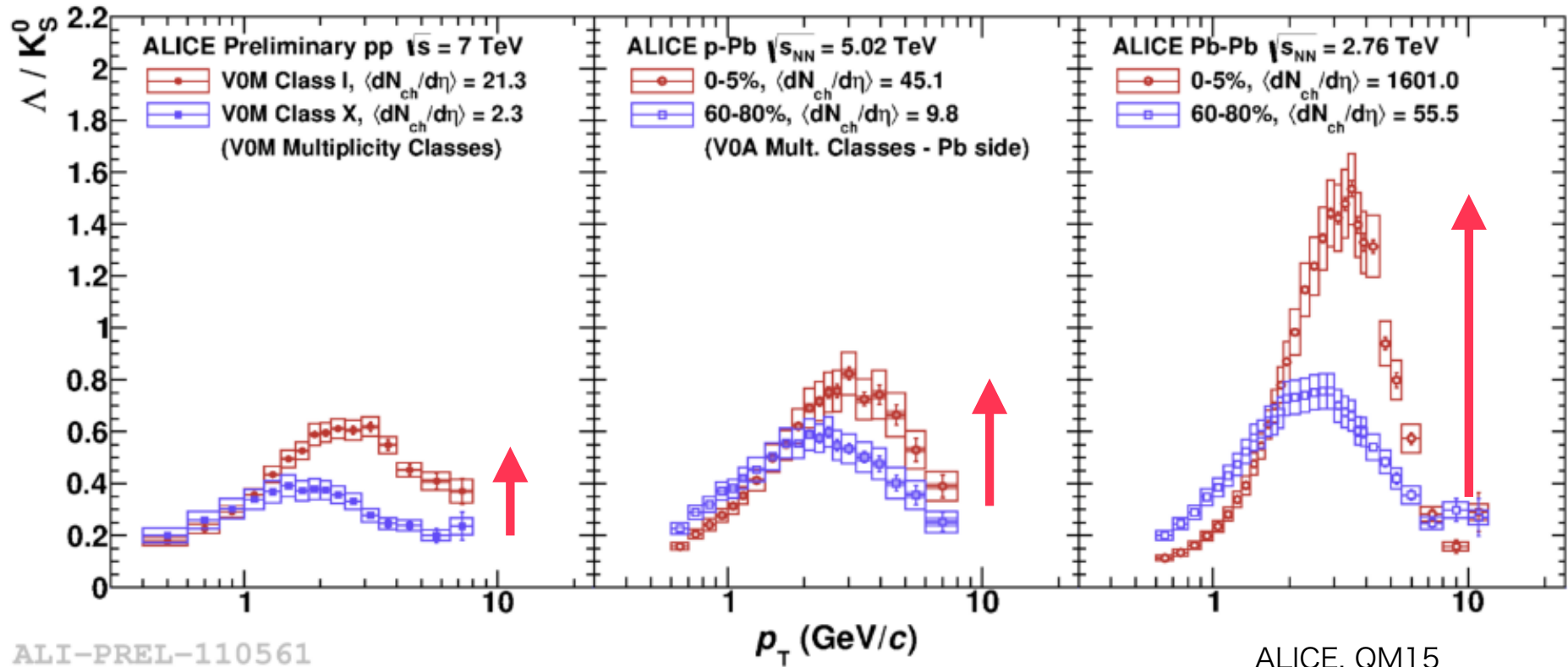
他にも...

Eur.Phys.J. C62 (2009) 237-242

バリオン収量の増大



Λ/K^0_S の粒子多重度依存性



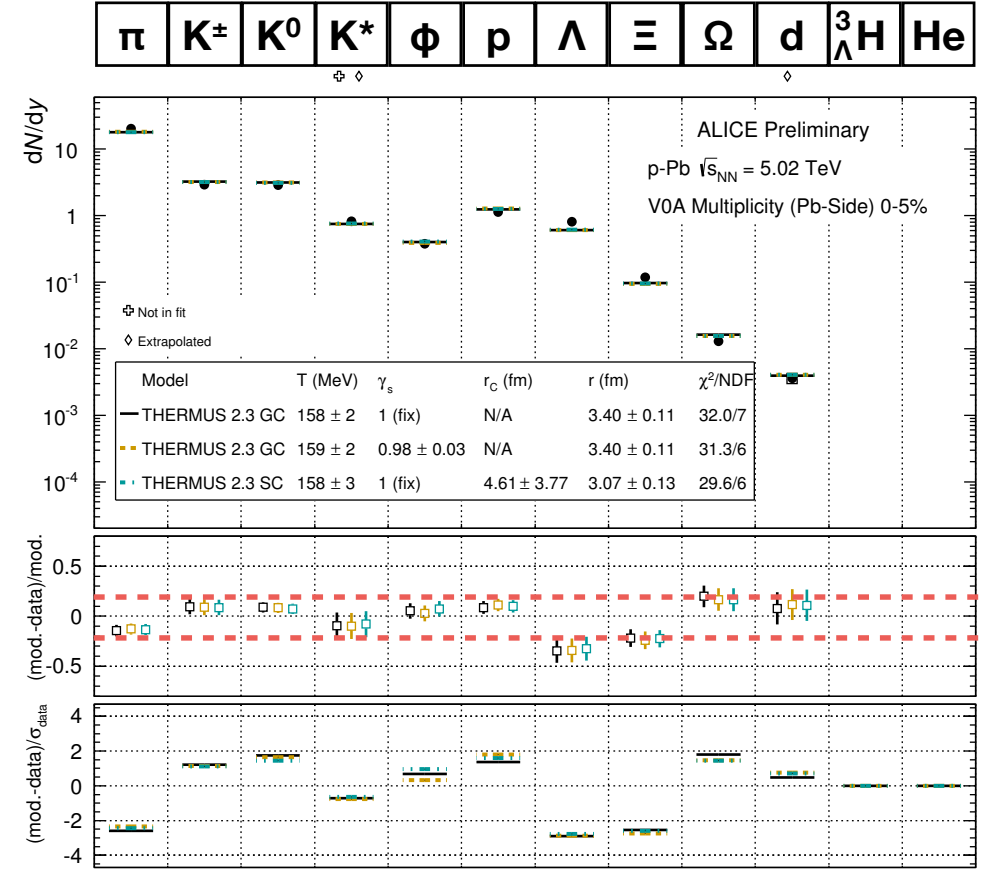
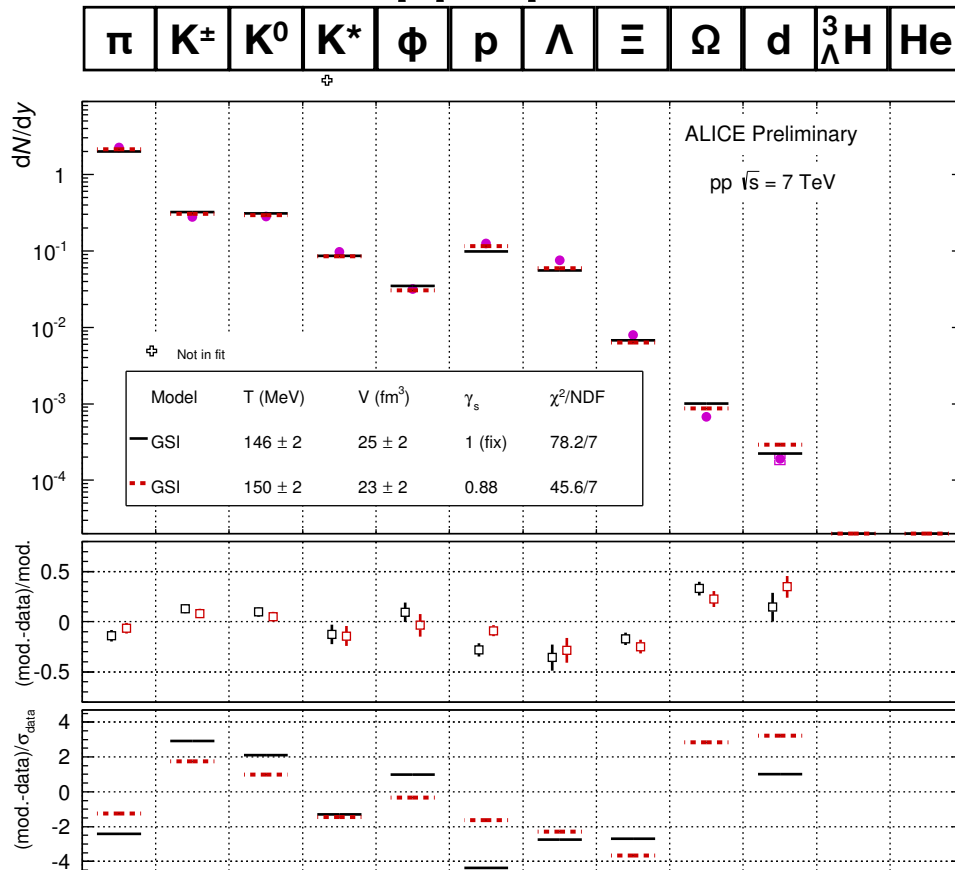
他にも...

熱的統計モデルによる ハドロン収量

$$n_i = N_i/V = -\frac{T}{V} \frac{\partial \ln Z_i}{\partial \mu} = \frac{g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{\exp[(E_i - \mu_i)/T] \pm 1}$$

ALICE, QM14

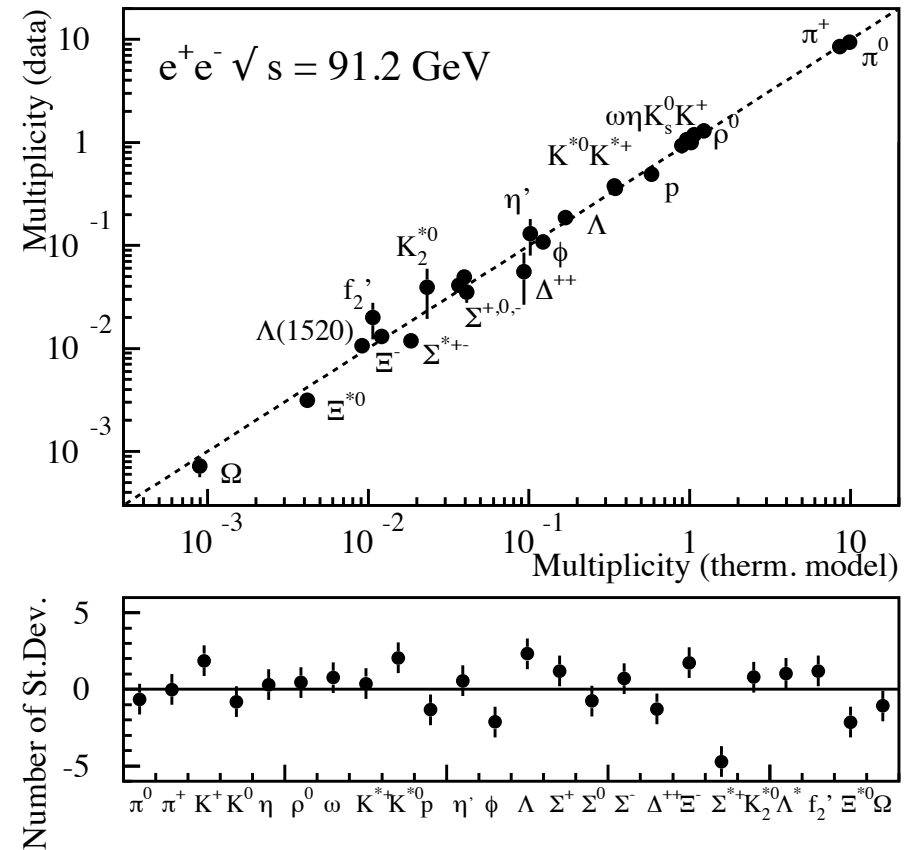
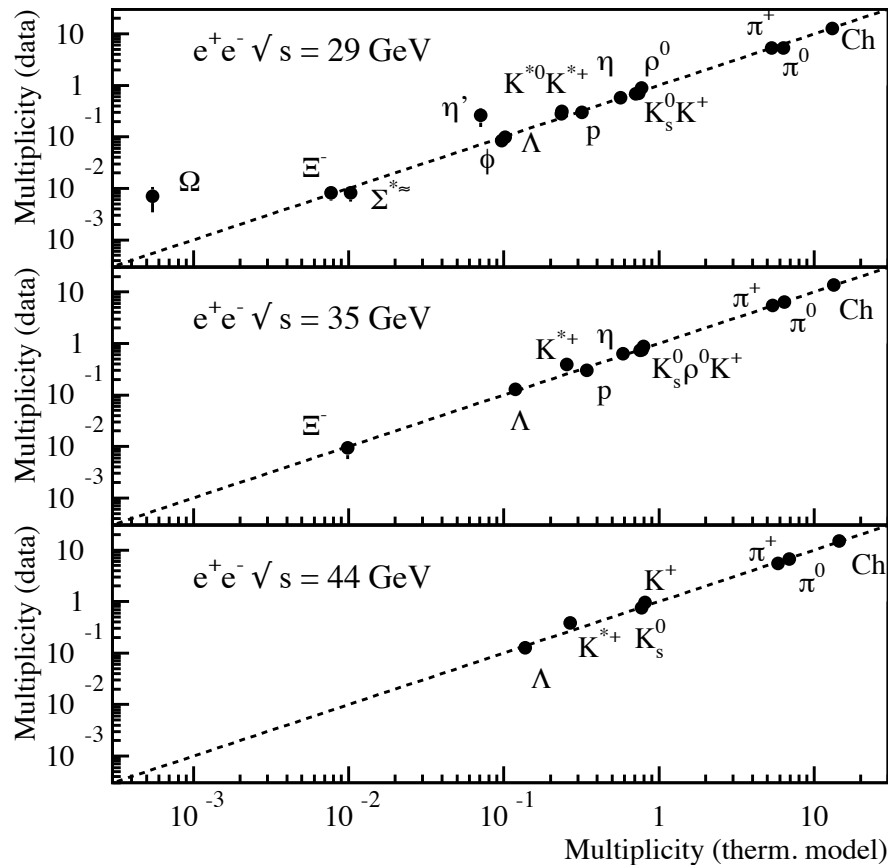
ppやp-Pbでの粒子収量と熱的統計モデルとの比較



LEPのee衝突でも…

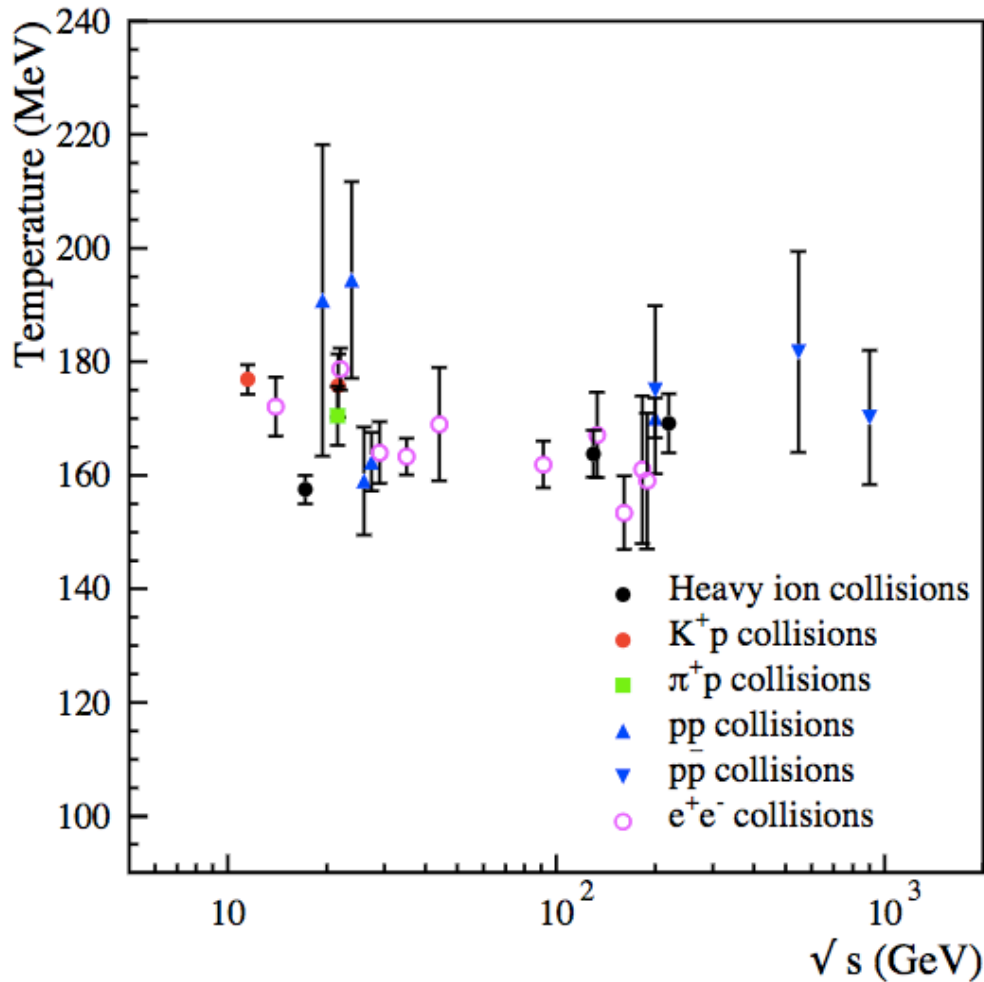
ee衝突では、そもそもの素過程が大きく異なるが
統計モデル(カノニカル分布)で粒子の収量がよく記述できる

F. Becattini, arXiv:9701275, J. Phys. G 23 (1997) 1933

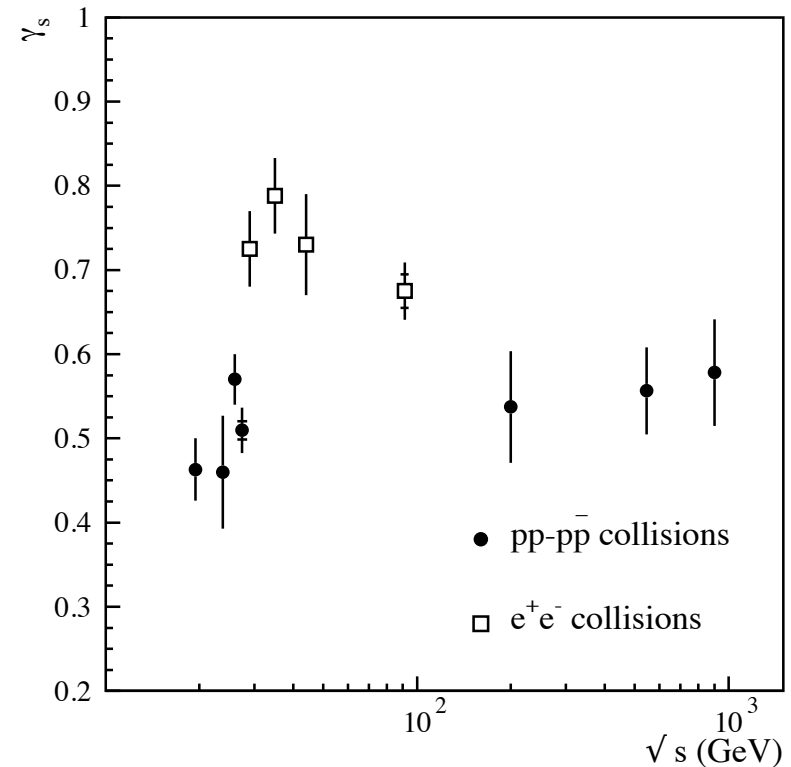


LEPのee衝突でも…

統計モデルで決まる温度は衝突系によらず約170 MeV



F. Becattini, arXiv:9701275, J. Phys. G 23 (1997) 1933

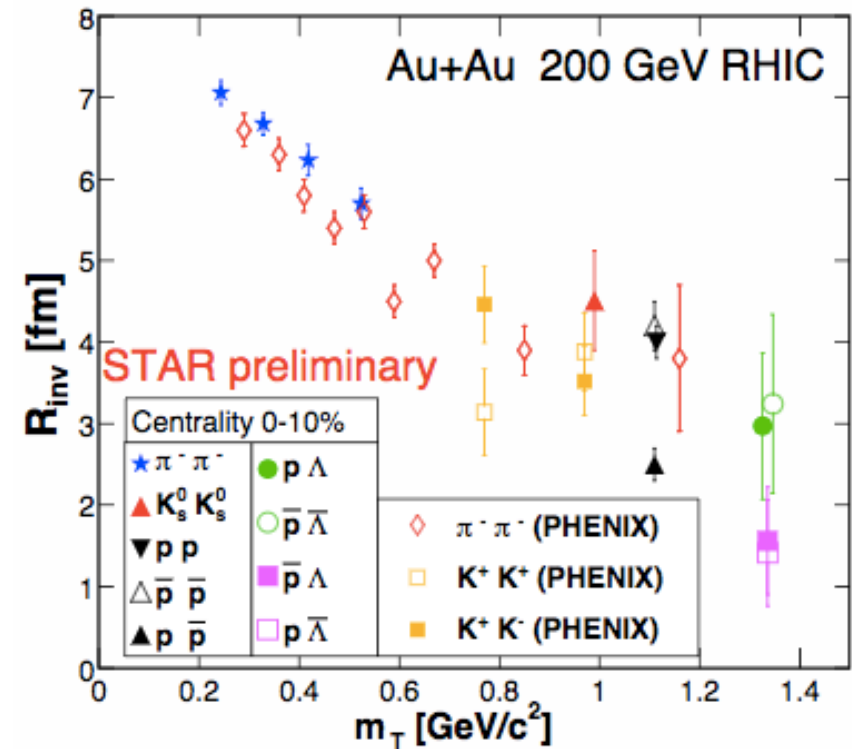
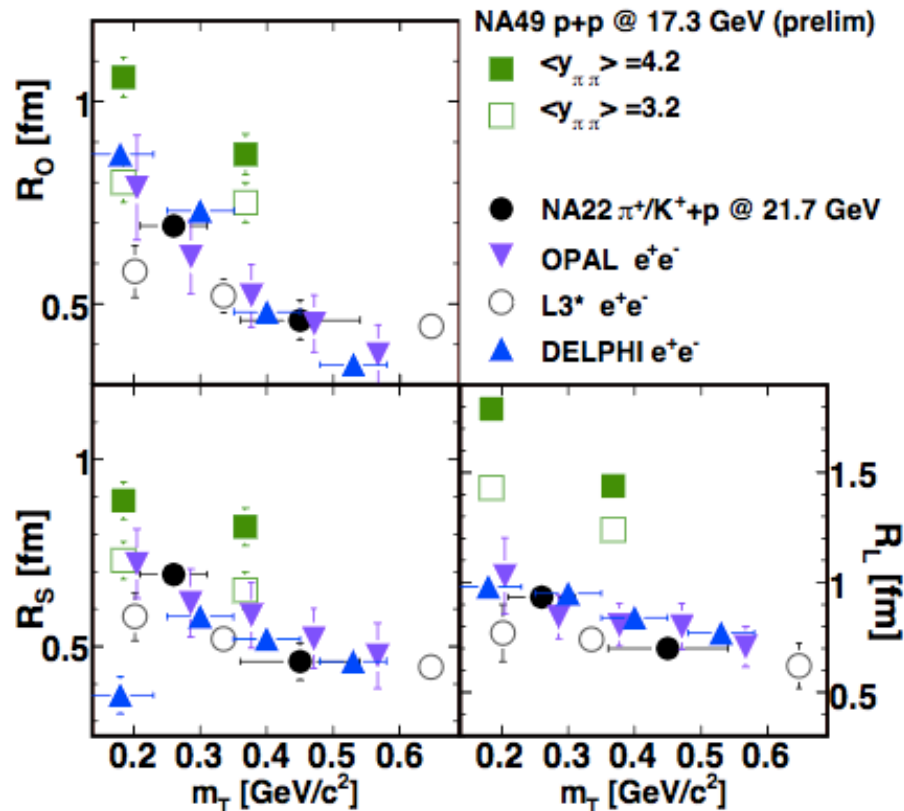


ストレンジネス抑制量=0.7-0.8
SPSの重イオン衝突と同程度

LEPのee衝突でも…

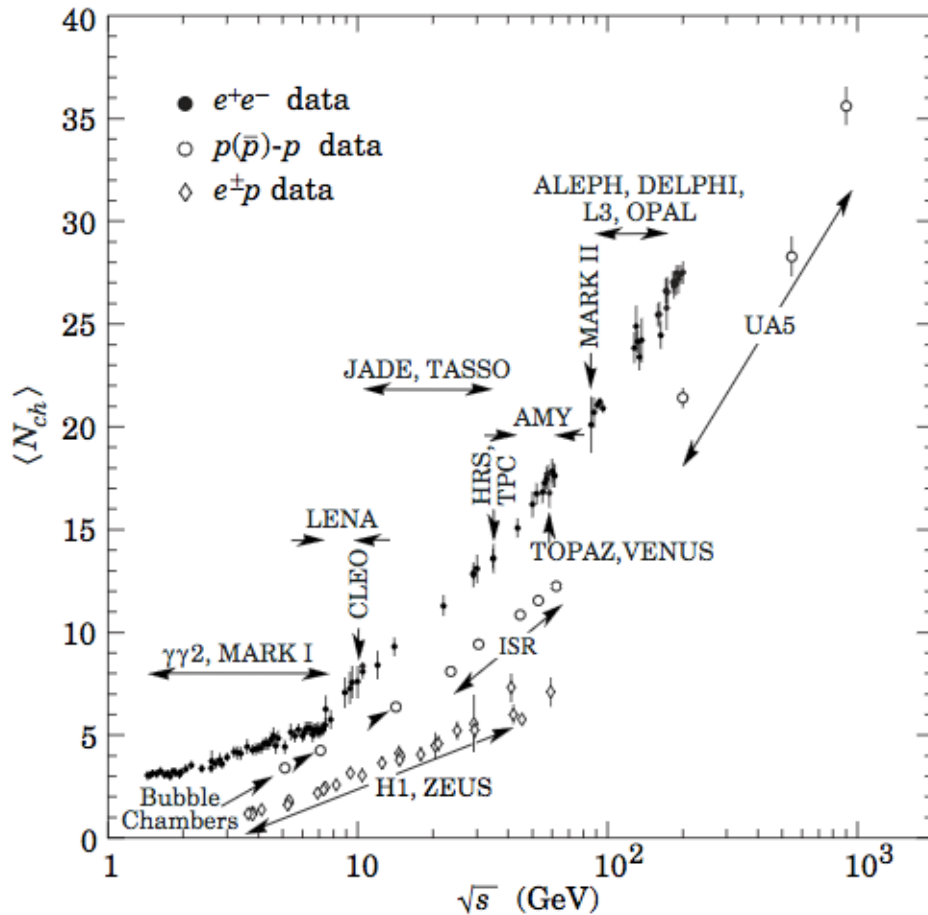
Hanbury Brown Twiss(HBT)干渉測定→粒子発生源のサイズ

Z. Chajecski Acta Phys.Polon.B40:1119-1136,2009

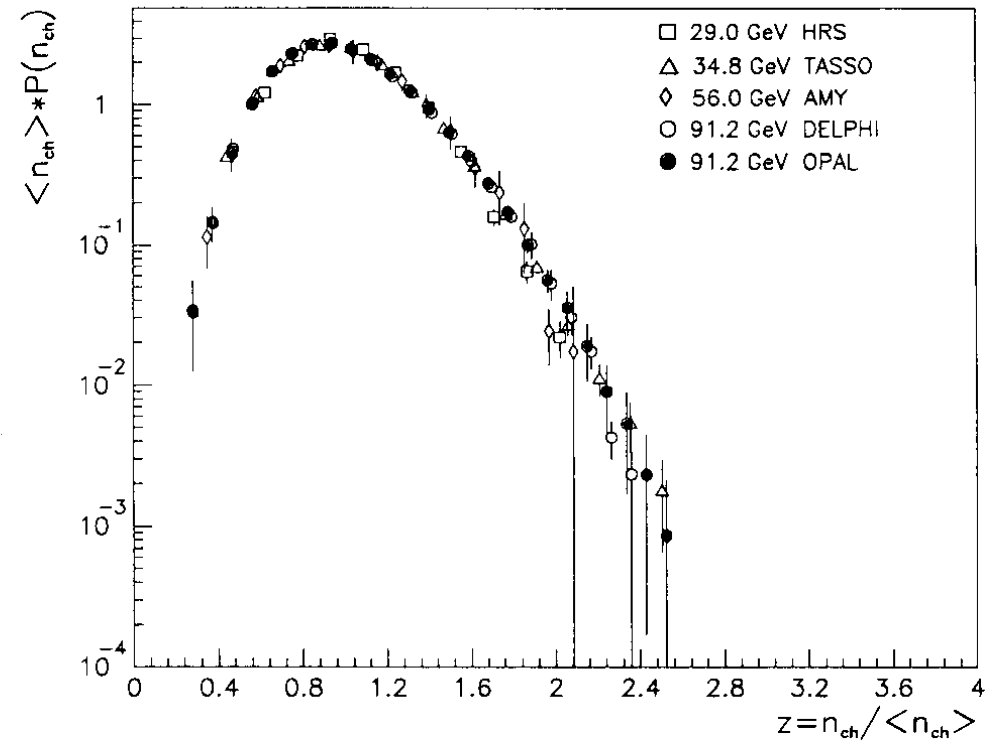


m_T が大きくなるとHBT半径が小さくなる
(A+Aと同様の傾向)

ee衝突の粒子多重度



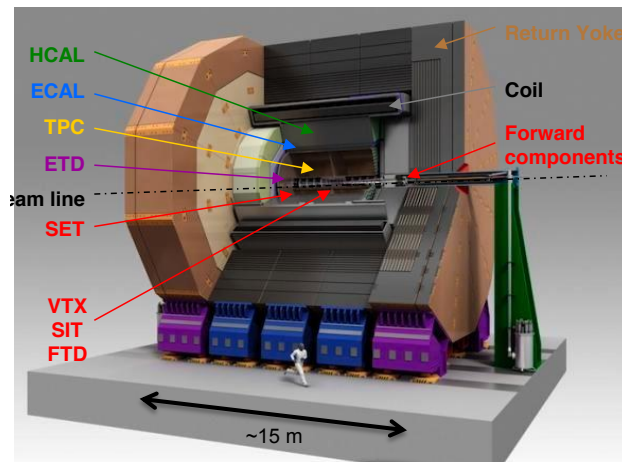
<http://pdg.lbl.gov/2008/download/rpp-2008-plB667.pdf>



$\sqrt{s}=250$ GeVのee衝突の粒子多重度 \sim $\sqrt{s}=600$ GeVのpp衝突
(衝突の素過程は大きく異なるが、粒子多重度自身はppとコンパラ)

ILCでの研究課題-I

- **eeの高粒子多重度事象をトリガーして**
 - ppやpAで見えている現象との相違性
 - 集団運動の探索
 - 熱物質の探索(熱光子、レプトン対)
 - ソフト領域の粒子生成
 - 粒子多重度、 p_T 分布、ストレンジネス収量、HBT干涉
 - 熱的モデルで何で記述できるか？
 - 運動量分布が何で熱的な分布をするのか？
 - 背景となる物理は？



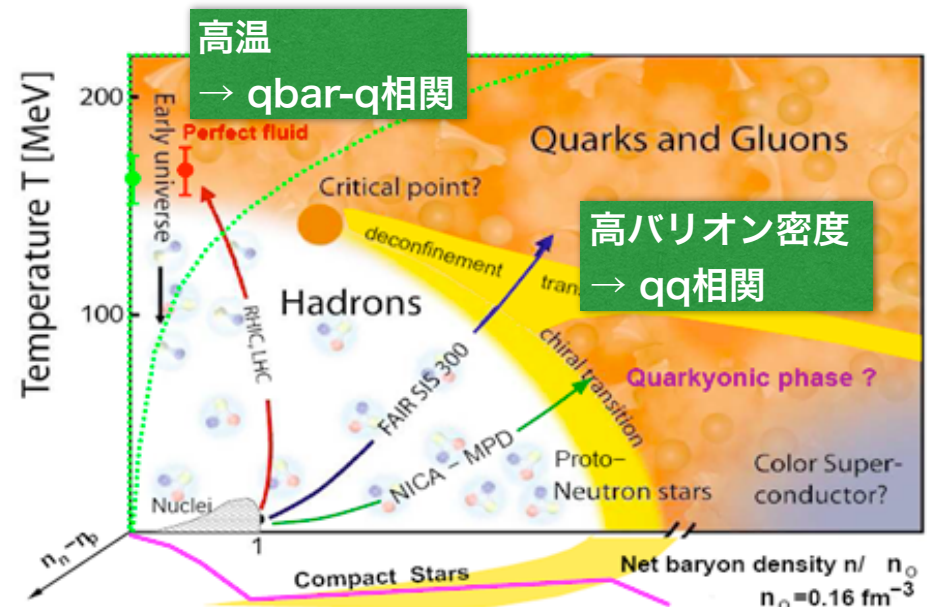
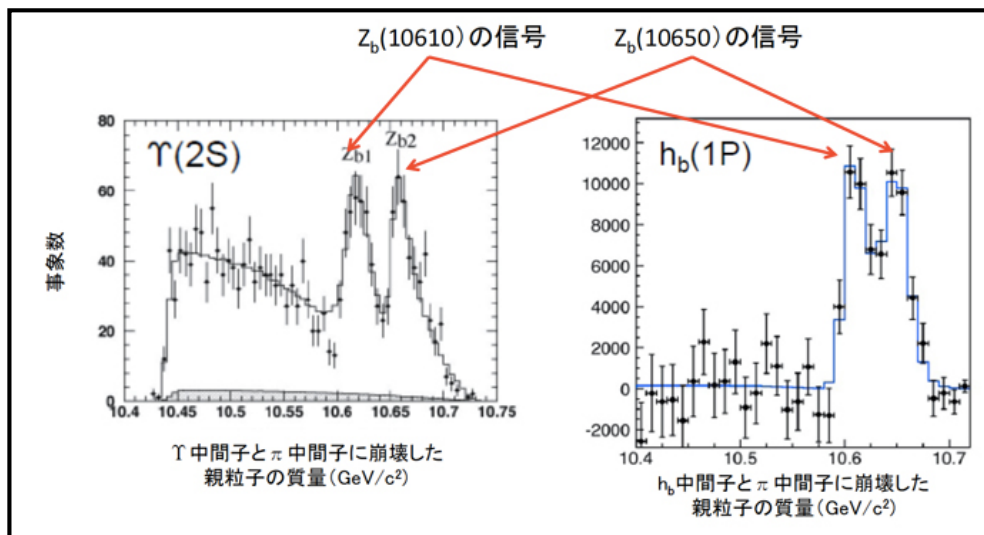
大きなラピディティを覆い、細かい読み出し持つ測定器群が重要

高粒子多重度トリガー(もしくは、大きな $\Sigma Et(Pt)$ トリガー)があれば検証できる

ILCでの研究課題-II

ILCでの研究課題-II

- ・ チャームバリオンやボトムバリオン測定によるダイクォーク相関
 - ・ 大きなバリオン密度領域で重要
 - ・ QGP中でのダイクォーク相関研究へのリファレンス
- ・ エキゾチックハドロンの探索
 - ・ 重イオン衝突とも相補的な研究



<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20120110140000/>

まとめ

- ・ 高エネルギー重イオン衝突の物理の着実な進展
 - ・ 多くの測定量 → QGPの物性
- ・ 最近の大きなハイライト = “小さい系におけるQGP?”
 - ・ 高次の集団運動、ストレンジネス増大、ハドロン収量、運動量分布
 - ・ 陽子の内部構造、pp/p-A衝突の素過程(MPI)、衝突後のダイナミクスの理解(カラー再結合、流体化)が必要
- ・ ILCでの研究課題
 - ・ HM事象で集団運動を探す、熱的物質を探す、ソフトな領域の粒子生成(熱的統計モデル、熱的運動量分布の起源)を理解する
 - ・ 実験的には、HMのトリガーがあればいい
 - ・ チャームバリオンやボトムバリオン測定によるダイクォーク相関
 - ・ 高密度QGPでのダイクォーク相関研究へのリファレンス