

QM11 summary

# Initial conditions & pre-equilibrium states

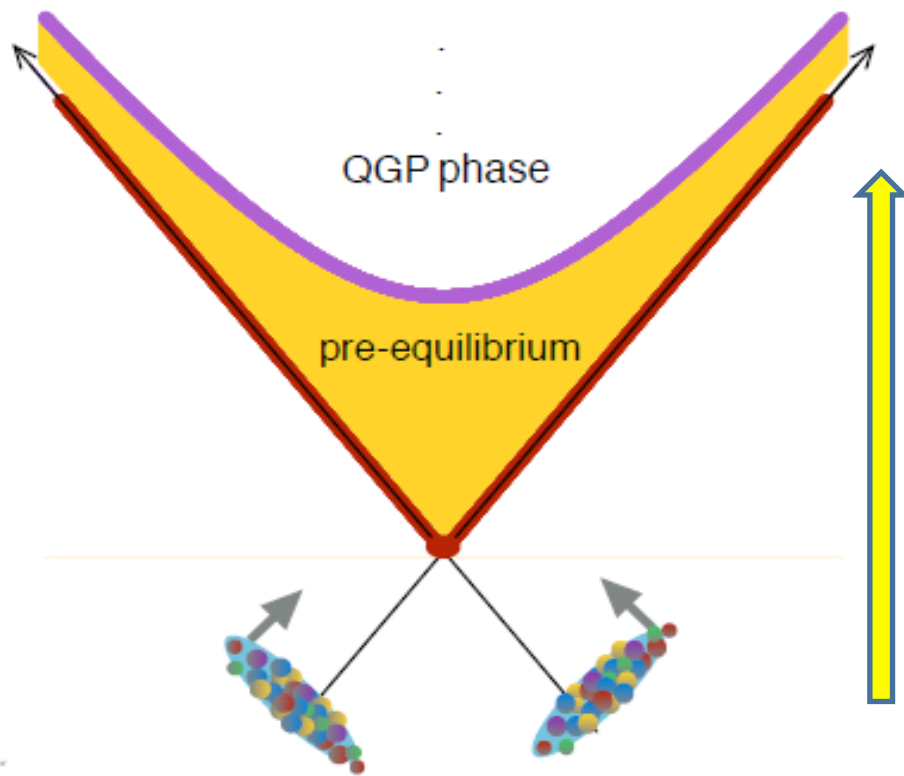
K.Itakura (KEK)

HIC&HIP joint meeting

June 8<sup>th</sup> 2011

# HICの初期条件とは?

- Goal of initial-state studies: To characterize the system formed after the collision of two heavy ions and provide a description (and proof!) of the equilibration of the system



## 3. Equilibration dynamics

$$0^+ < \tau < \tau_{\text{eq}}$$

## 2. Initial production mechanism

$$\tau = 0^+$$

## 1. Nuclear wave function

$$\tau < 0$$

# 初期条件の絡む物理

1. 初期条件(高エネルギー原子核の波動関数)自体の解明
2. 初期状態からQGPへの時間発展・熱平衡化の解明
3. 観測量に初期条件がどのように影響を与えるかを解明

今回、視点3. の重要性が認識された。  
今後も重要な視点として有り続け、同時に  
視点1、2への興味もより拡大していくはず

(注)「熱平衡状態の出現」は「初期条件の情報の消失」を必ずしも意味しない。  
QGPは、局所熱平衡状態なので、温度分布、圧力分布などの情報を持つ。

# QM2011の重要な結論

- 今回ほど初期条件の重要性が決定的に認識された会議は無かった。

Away-side jetのdouble hump structureや Ridge の正体は、初期条件の揺らぎの物理であることが、higher harmonicsの解析で明らかになった。 $v_3$  !!

Mach cone は、ジェットと媒質の相互作用による効果であるから、それは「ダイナミカル」な効果として出現するもの。なので、その描像は死んだ。一方、Ridge とは、ジェット周りの粒子の尾根構造をいい、特定の物理機構を示唆していない。なので、ridgeが死んだというのではなく、ridgeの原因が、初期条件の揺らぎだった、ということ

→ 詳しくは江角さんの解説参照

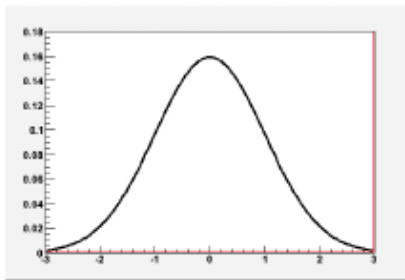
さらに、 $v_3$ の詳細な解析は初期条件に対するconstraintを与える

# 初期条件の違いが影響する物理量

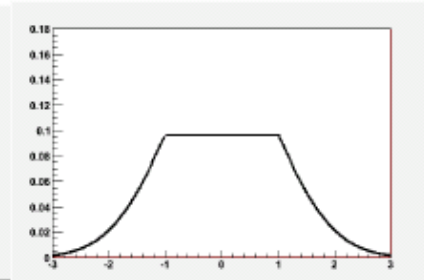
## Initial State determines flow strength

25

Glauber

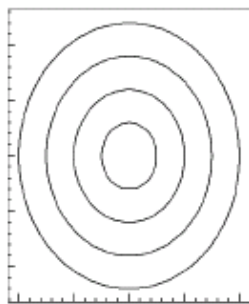


CGC

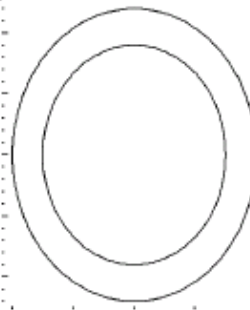


Radial gluon distribution

CGCは最も極端な場合(KLN)



Smaller eccentricity



larger eccentricity

2-D density profile

Initial state determines  $v_2$  strength  
(largest uncertainty)

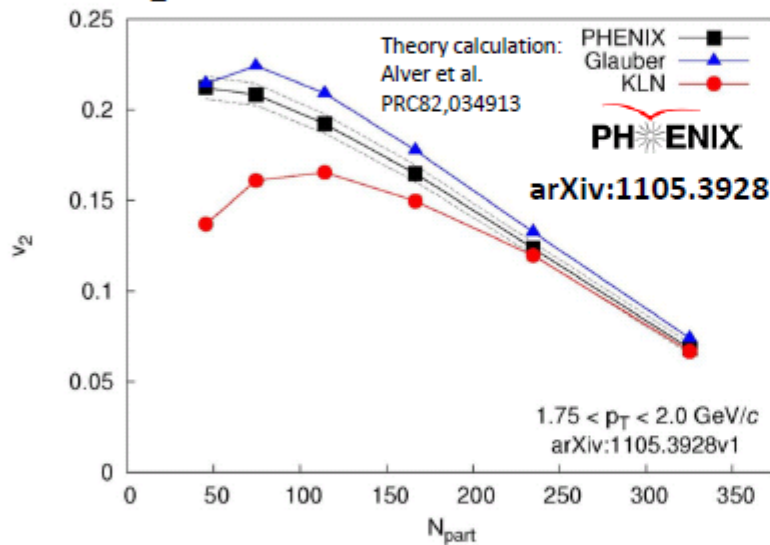
Disentangle initial conditions  
from flow strength

# 初期条件 + 粘性

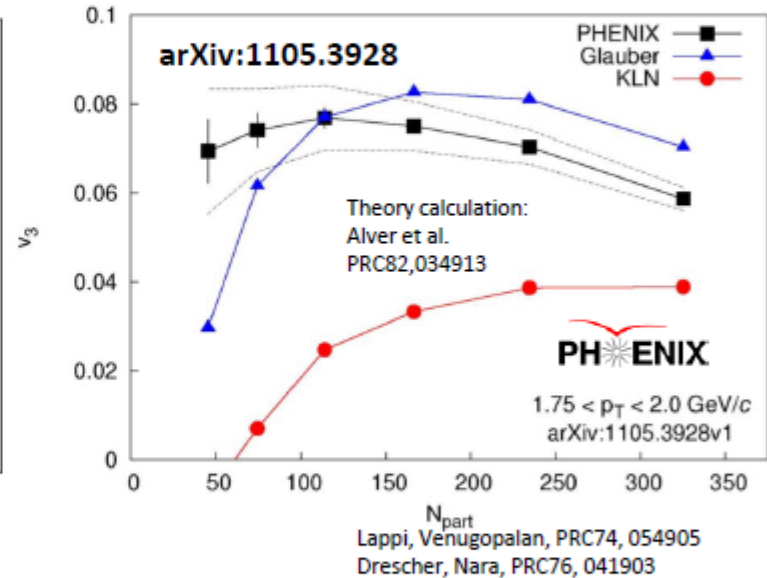
## $v_3$ disentangles initial state and $\eta/s$

28

$v_2$  described by Glauber and CGC



$v_3$  described only by Glauber



- Glauber
- Glauber initial state
- $\eta/s = 1/4\pi$

← Two models →

- MC-KLN
- CGC initial state
- $\eta/s = 2/4\pi$

Stefan Bathe for PHENIX, QM2011

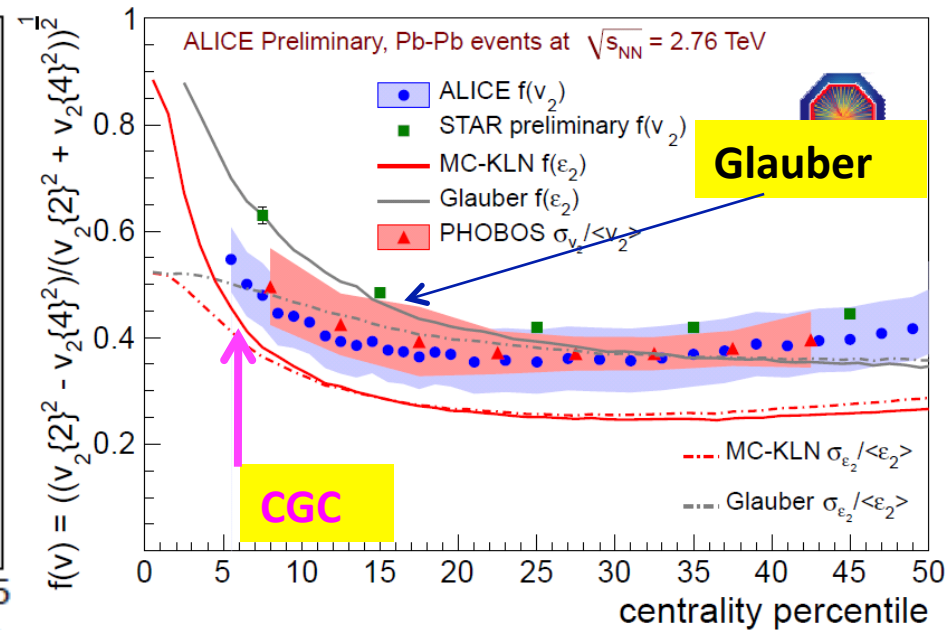
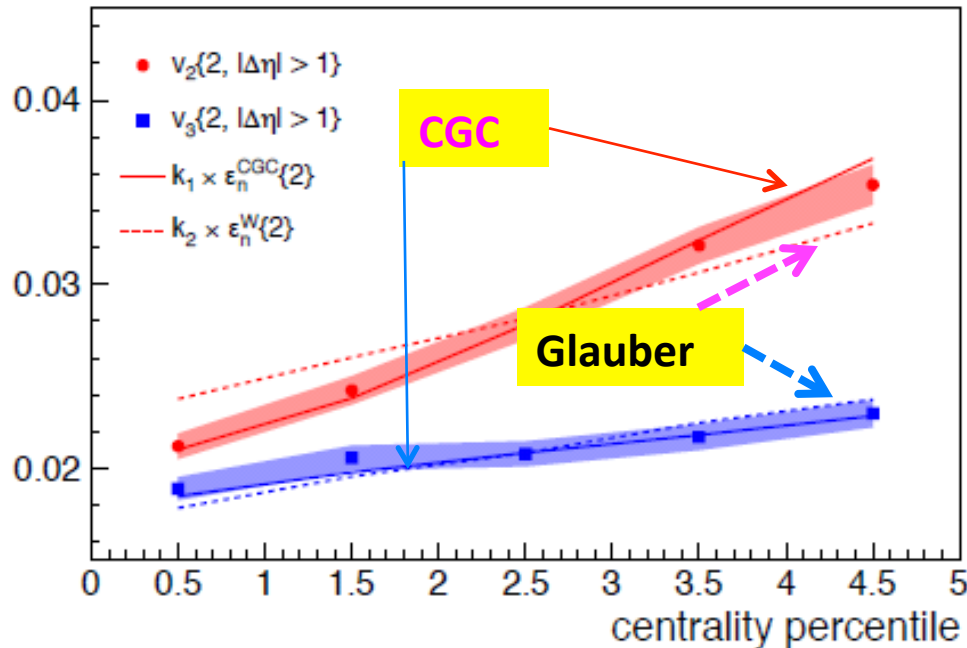
Glauber + KSS bound の方が実験と合う？

この種の議論のさきがけ Hirano-Nara

# How about LHC?

$v_2$  &  $v_3$  ultra-central (0% → 5%)

$v_2$  Fluctuations



CGCは悪くないが、詳細不明  
 Eta/sは何を用いたのか？  
 CGCはMC-KLNなのか？それが $v_3$ (LHC)を良く記述しているのか？  
 それとも、LHCエネルギーだから良く記述するのか？

追記 これは、単にeccentricityを定数倍しただけで、流体計算をしていない  
 また、左の図では中心度の%は殆ど中心衝突の部分しか見せていない

# 教訓

- Higher harmonicsの解析は、初期条件と粘性に対する種々のモデルを区別可能にする有益な手段となりえる
- しかし、現時点でどの初期条件が良いかどうかを判断するのは時期尚早

## Why??

- 初期条件とhydroの間のダイナミクス(熱平衡化過程)を無視した解析に基づいているから
- CGCとして扱われているものの多くはKLNという最も単純で、最もsaturationの効果が大きいモデルに基づいている

→ では、初期条件の理解はどこまで進んでいるか?

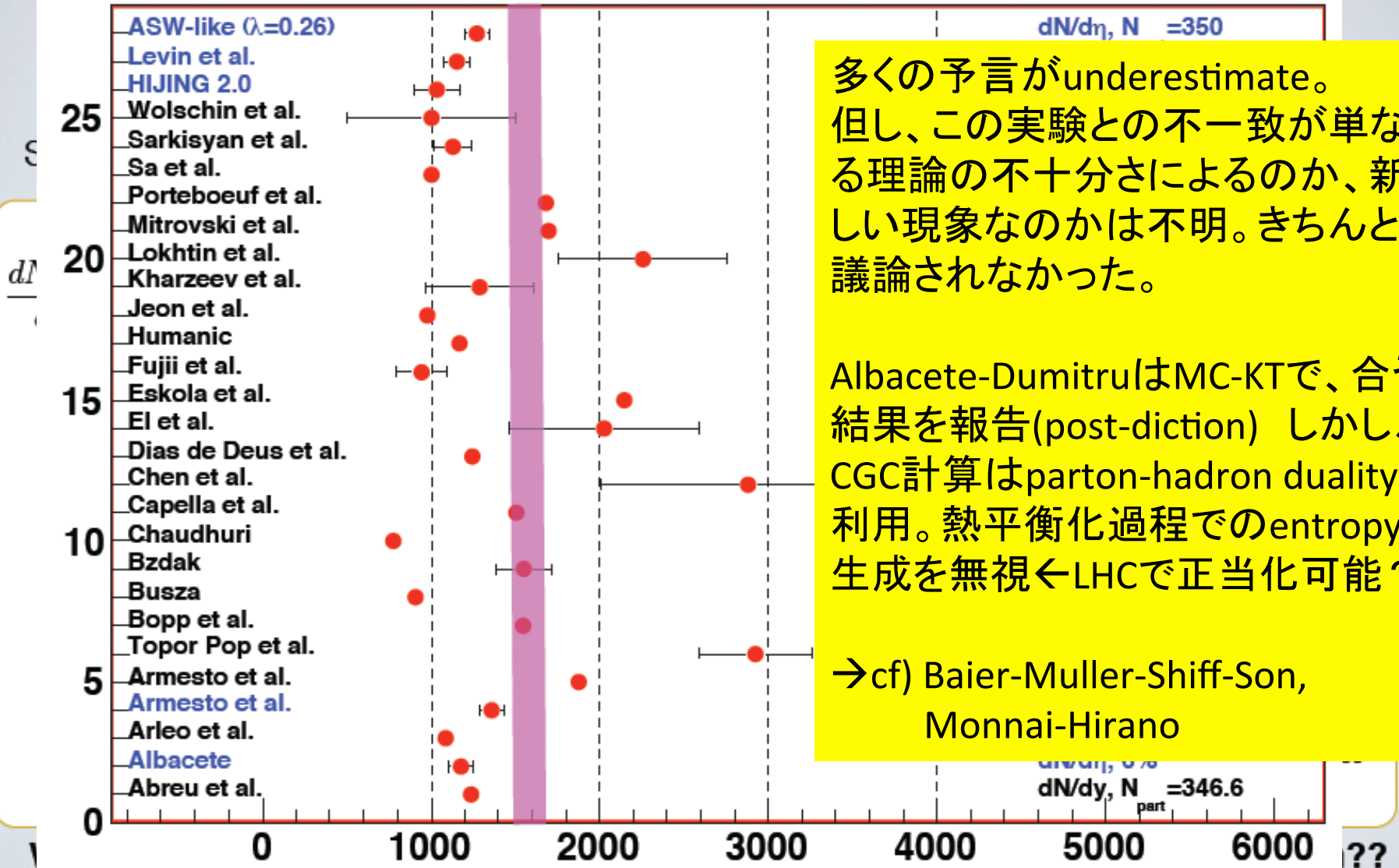
CGCに基づいた描像は、pA, AAでの実験データと共に確実に理解が進んでいる



# 初期条件とglobal properties

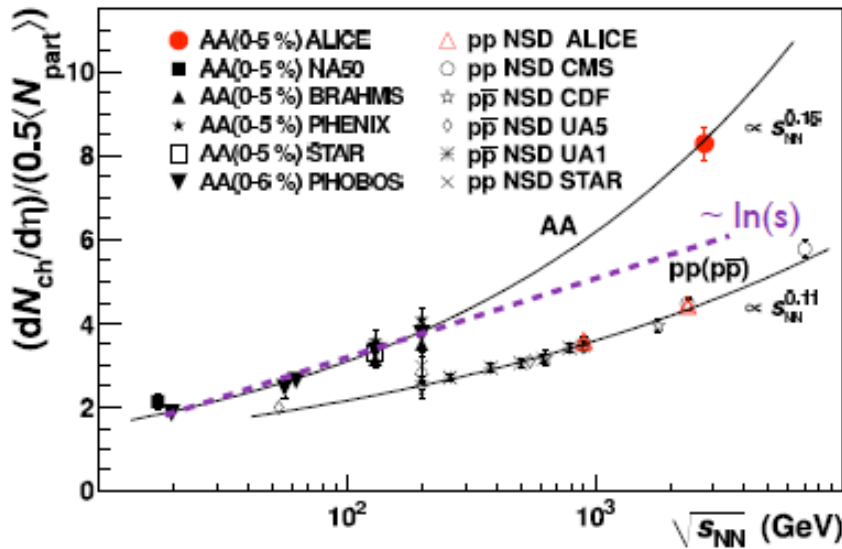
- バルクな量には初期条件の依存性が現れる  
初期条件の違いはソフトな部分の取り扱いの相違  
(prediction raceの最初の関門)  
  
→ 生成粒子多自由度  $dN/d\eta|_{\eta=0}$   
その値、  
衝突エネルギー依存性、  
中心度依存性

# LHC:ALICE Pb-Pb (2.76 TeV)

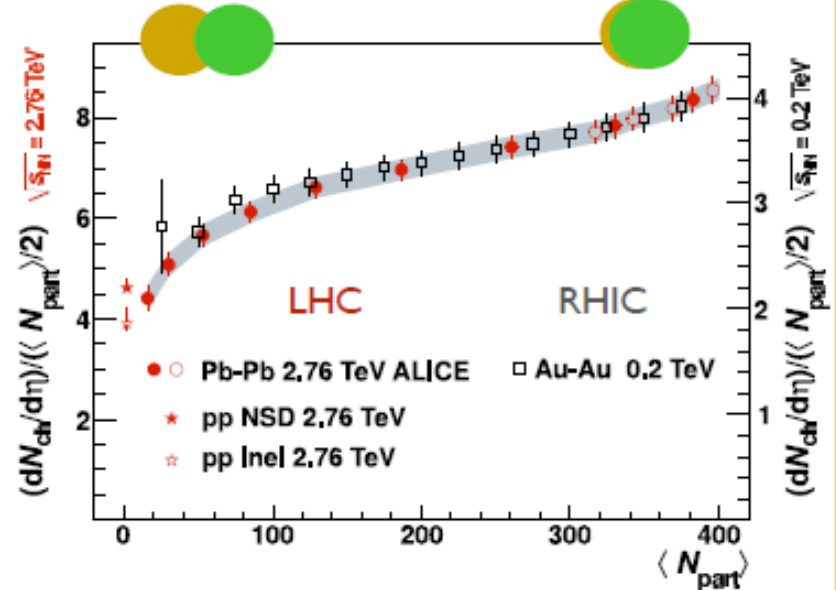


# Lessons from data

## Energy dependence



## Centrality dependence



- Stronger energy dependence in A+A than in p+p?
- Factorization of energy and centrality dependence?

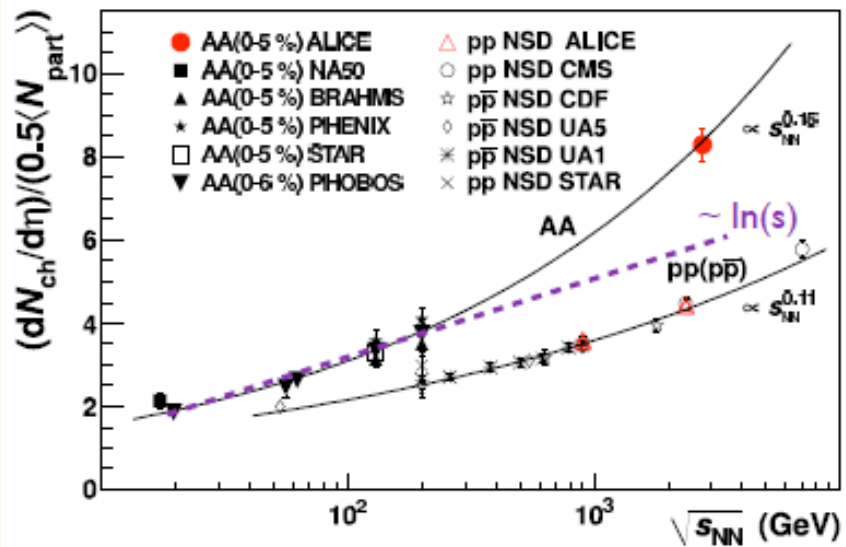
$$\left. \frac{dN^{ch}}{d\eta} \right|_{\eta=0} \approx \sqrt{s}^{0.3} \times f(N_{part})$$

エネルギー依存性が急になった。  
ppも幂的だが、幂の値はAAの方が大。  
どちらも理由は議論されなかった。

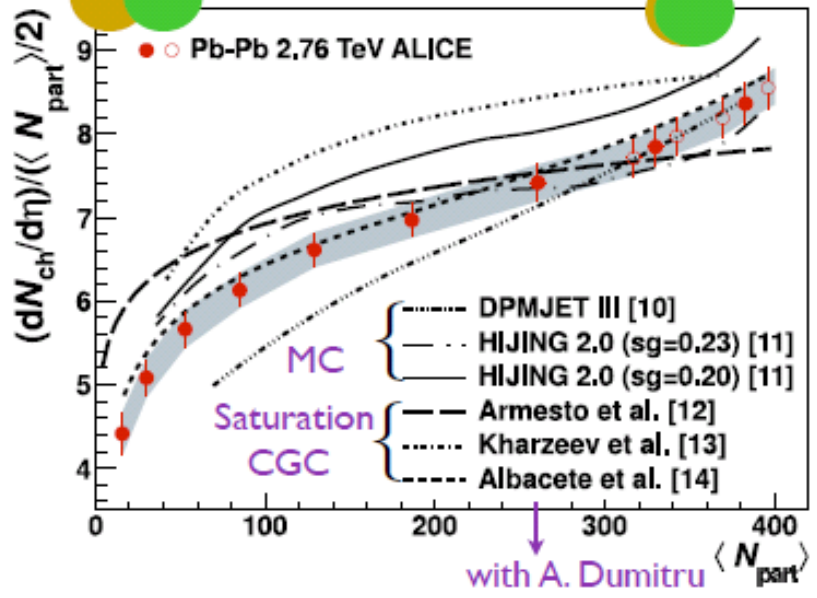
LHC とRHICで中心度依存性が殆ど同じ。  
大きさは異なる。背後に何らかの物理的  
的理由は？

# Lessons from data

## Energy dependence



## Centrality dependence



Different models reproduce data “well” (?)

$$\frac{dN^{ch}}{d\eta} \approx \sqrt{s}^{0.3} \times f(N_{part})$$

CGCの最新の枠組(rcBK MC)で計算すると、中心度依存性を再現するという主張(本当かどうかはまだ分からない。「最新の枠組」がまだ不十分であることは分かっている → Kovchegov parallel)

# 高エネルギーハドロン散乱の理解の進展

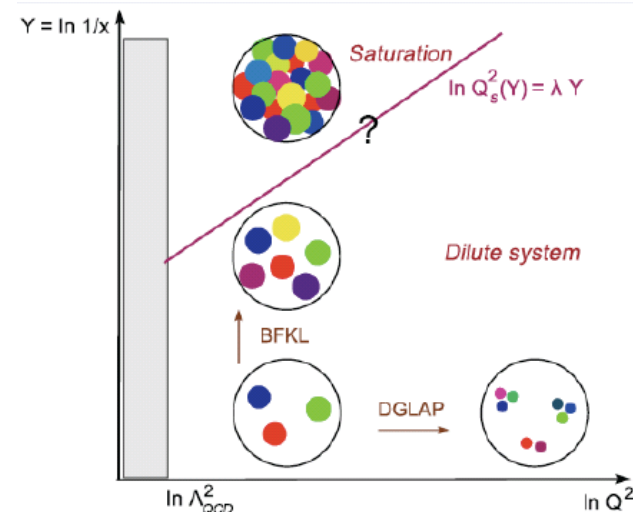
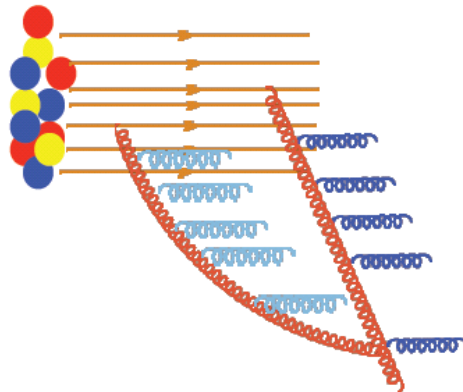
- 重イオン衝突を特別視せず、ep, pp, pA, AAを統一的に記述する事(統一した記述方法で扱う事)を目指す。(統一した記述方法の存在自体自明ではないが)
  - CGCに根差した理解(統一的な記述方法)は着実に進んでいる
- AAにおける「QGP的」諸現象をimitateする可能性 (ex,  $R_{AA}$ )

# Particle productions at collider energies

H.Fujii @ HIC June 4<sup>th</sup>

- dominated by **small- $x$  dof** in hadrons
- BK evolution eqn for CGC sums  $(\alpha_s \ln(1/x))^n$  and incorporates nonlinear effects  
 $\Rightarrow$  saturation scale,  $Q_s^2(x)$
- Successful phenomenology based on CGC picture in last decade
  - DIS at HERA (GBW, IIM, ...)
  - HIC at RHIC (KLN, ...)
- Recent highlight: running coupling (rc) BK eqn**  
 consistent with  $Q_s^2(x) \sim 1/x^\lambda \sim 1/x^{0.3}$  Albacete
- Applications of rcBK:
  - Global analysis of DIS AAMQS
  - Hadronic collisions, pp, pA and AA Albacete, Albacete-Marquet, Albacete-Dumitru

Fast proton or nucleus



# Framework I: rcBK eqn : Global fit of HERA data at small x

ep

rcBK eqn in Balitsky's prescription:

$$\frac{\partial \mathcal{N}(r, y)}{\partial y} = \int d^2 r_1 K^{\text{run}}(r, r_1, r_2) [\mathcal{N}(r_1, y) + \mathcal{N}(r_2, y) - \mathcal{N}(r, y) - \mathcal{N}(r_1, y)\mathcal{N}(r_2, y)]$$

- has the same structure as LO eqn with modified kernel:

$$K^{\text{run}}(r, r_1, r_2) = \frac{N_c \alpha_s(r)}{2\pi^2} \left[ \frac{r^2}{r_1^2 r_2^2} + \frac{1}{r_1^2} \left( \frac{\alpha_s(r_1)}{\alpha_s(r_2)} - 1 \right) + \frac{1}{r_2^2} \left( \frac{\alpha_s(r_2)}{\alpha_s(r_1)} - 1 \right) \right],$$

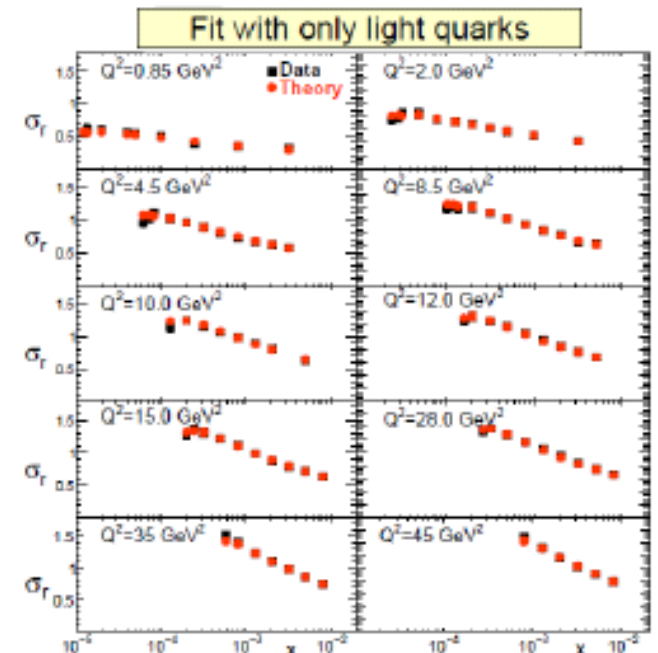
where one-loop  $\alpha_s(r) = 4\pi/[b_0 \ln(4C^2/r^2)]$  is cut off at  $\alpha_{\text{cut}} = 1.0$

- The initial condition at  $x = x_0$  is assumed

$$\mathcal{N}(r, y_0) = 1 - \exp \left[ -\frac{(r^2 Q_{s0}^2)^\gamma}{4} \ln \left( \frac{1}{\Lambda r} + e \right) \right]$$

$\gamma$ は異常次元  $\gamma=1$  (DGLAP)、 $\gamma=0.63$  (BFKL)

包括的解析から、「初期条件」のパラメータを固定

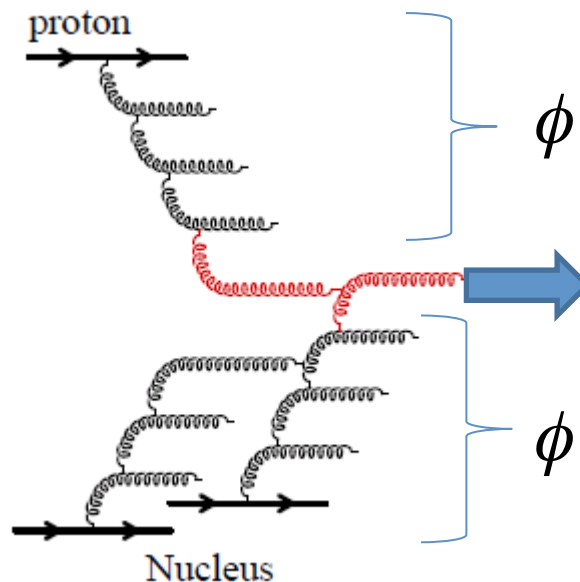


AAMQS

## $k_t$ factorization form

$$\frac{d\sigma^{A+B \rightarrow g}}{dy d^2 p_T d^2 X} \sim K \frac{\alpha_s}{p_T^2} \phi(k_1, x_1, b) \otimes \phi(k_2, x_2, X - b)$$

- is proved for pp, pA at LO, but is a working assumption for AA BGV
- $\phi(k, x) \propto k^2$  F.T.  $\mathcal{N}_G(r, x)$  is the unintegrated gluon dist in the hadron.
- $\mathcal{N}_G = 2\mathcal{N} - \mathcal{N}^2$ , with  $\mathcal{N}$  constrained by DIS
- $\mathcal{N}$  in a nucleus requires a modeling for a nucleus



グルーオンをハドロンに転換する  
(quark-hadron duality)  
Overall factor  $K$  に押し込める



MC modeling for a nucleus:

- The simplest will be a homogeneous disk  
no impact parameter dependence  
an additional parameter  $Q_{s0A}^2$  needed

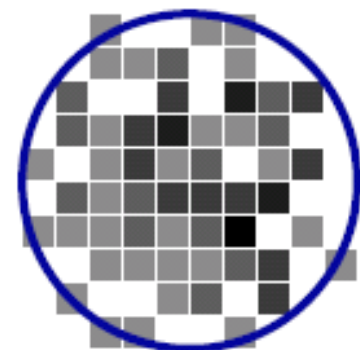
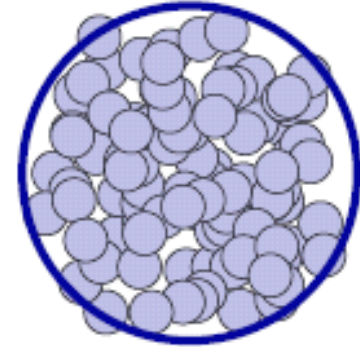
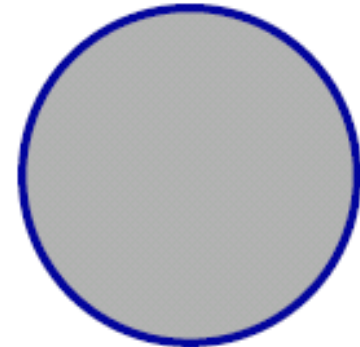
- Random nucleons w/ Woods-Saxon dist.  
fluctuating density  $\Rightarrow b$ -dependence

$$Q_{s0A}^2 = Q_{s0p}^2 \times N \text{ w/o additional parameter}$$

Drescher-Nara

“MC-KLN” (Drescher-Nara)はKLN的なCGC描像をMC化したもの

b-依存性は、高エネルギーにいくと重要。  
断面積の増加を記述する

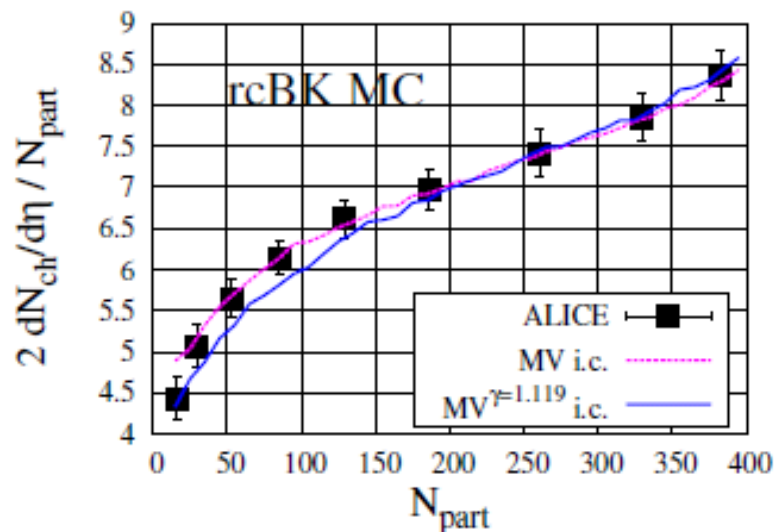


# MC-KT model

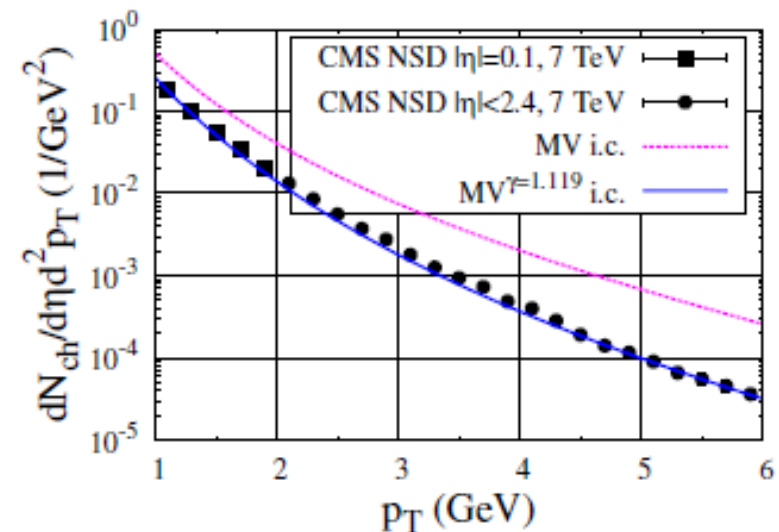
Albacete-Dumitru

- MC-KT/rcBK =  $k_T$  factorization formalism with  $\phi$  obtained from rcBK evolution locally on transverse plane of a Monte-Carlo-generated nucleus
- applied at LHC

AA



pp



既に見せたものより多少改善させた計算

# Framework III: forward particle production

For pA or “Large- $x$  – small- $x$ ” reactions: Dumitru-Hayashigaki-Jalilian-Marian (DHJ)

## DHJ factorization form

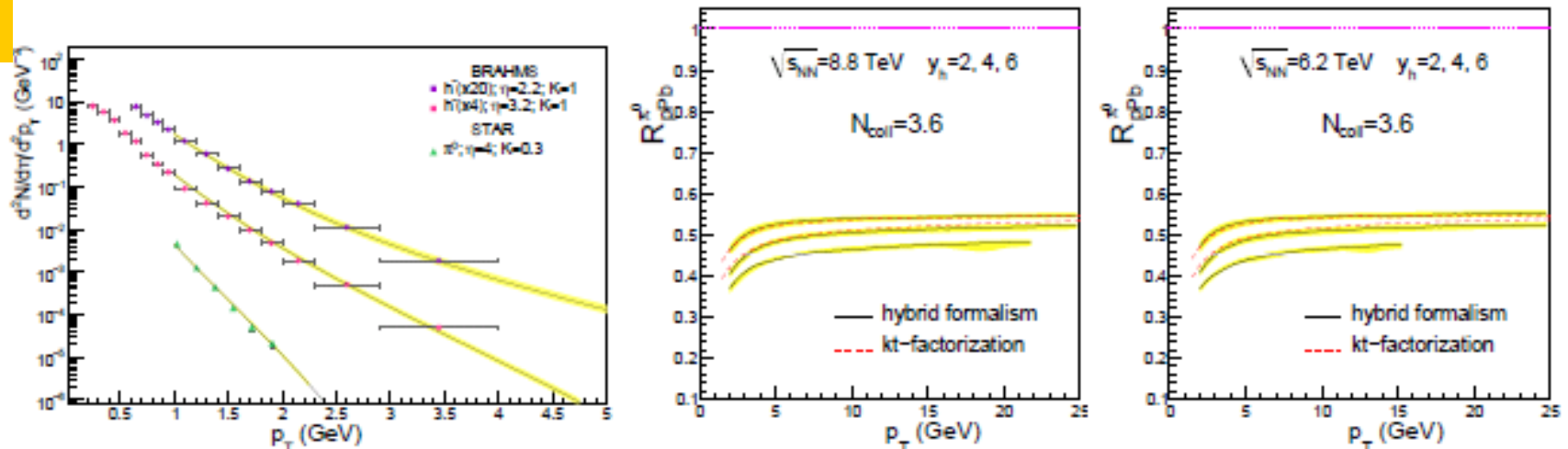
$$\frac{dN}{dy_h d^2p_T} = \frac{K}{(2\pi)^2} \sum_i \int_{x_F}^1 \frac{dz}{z^2} x_1 f_{i/p}(x_1, p_T^2) \tilde{\mathcal{N}}\left(\frac{p_T}{z}, x_2\right) D_{h/i}(z, p_T^2)$$

where the PDF  $f_{i/p}$  describes the large- $x$ ,  $\tilde{\mathcal{N}}$  the small- $x$ , and the FF  $D_{h/i}$  describes high- $p_T$  fragmentation.

pA でこれだけ大きな抑制があるなら、AAでのsaturationによる抑制は非常に大きいのでは? XNWの質問

applied successfully to pA collisions, with rcBK solution for a homogeneous nucleus characterised by an effective scale  $Q_{sA}^2$  Albacete-Marquet

pA



# Framework III': forward particle production

H.Fujii @ HIC June 4<sup>th</sup>

## State-of-the-art models w/ rcBK

- **AAMQS**: ep @ HERA ... rcBK works and strongly **constrains** "MV" I.C.
- **AM** : pAu @ RHIC ... DHJ/rcBK nicely works
- **AD** : AA @ LHC ..... MC-KT/rcBK nicely works

3つのstate-of-the-art modelsを融合し、かつ超える(予定) **HF-Itakura-Kitadono-Nara**

## MC-DHJ/rcBK model

- Initial configuration of the nucleus is prepared w/ Monte-Carlo
- rcBK performed **locally** on transverse plane w/  $Q_{sA}^2(x_0) = Q_{sp}^2(x_0) \times N$   
- no additional parameter
- Study on forward physics in DHJ formalism is underway...

- 新しい初期条件 rcMV を開発中(rcBKとの整合性を考慮)
- $R_{pA}$  も計算予定 (AAでの $R_{AA}$ はsaturation + jet quenching)

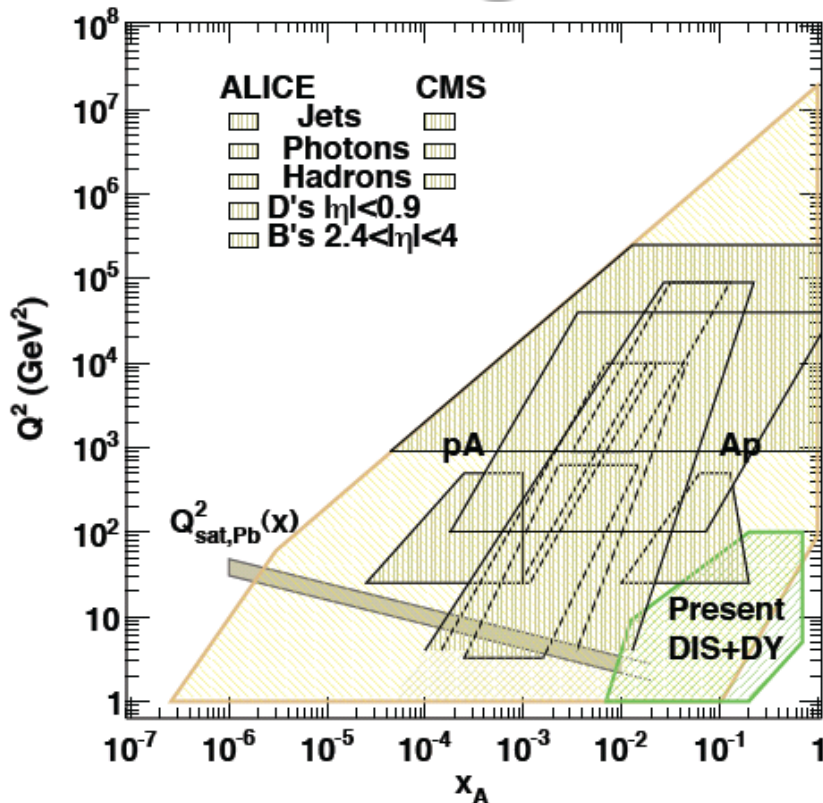
# 初期条件のさらなる精密化

- 初期条件をより精密に知るにはどうするか？

## Future directions

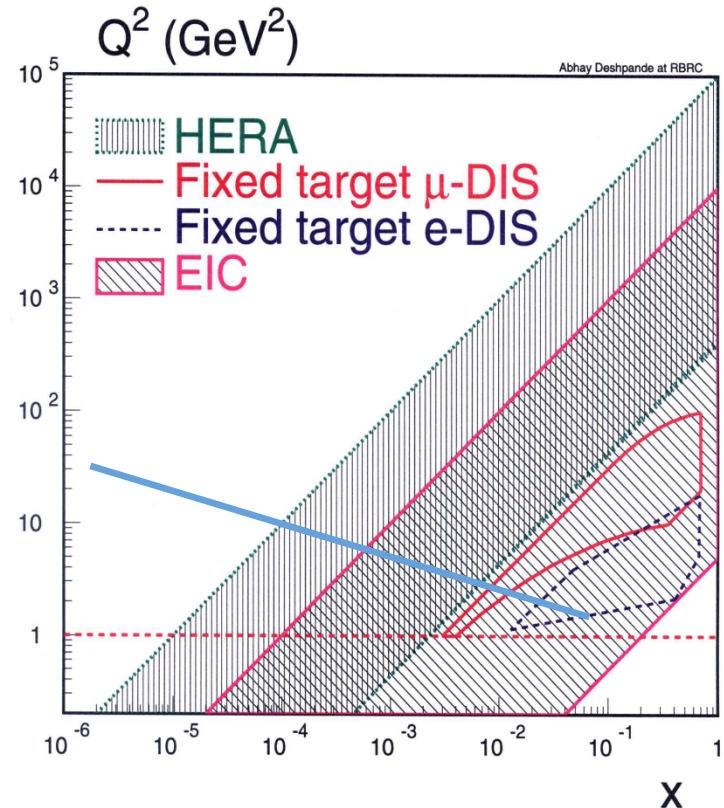
pA collision at LHC

C.A.Salgado



eA collision at eRHIC/EIC

A.M.Stasto



# まとめ

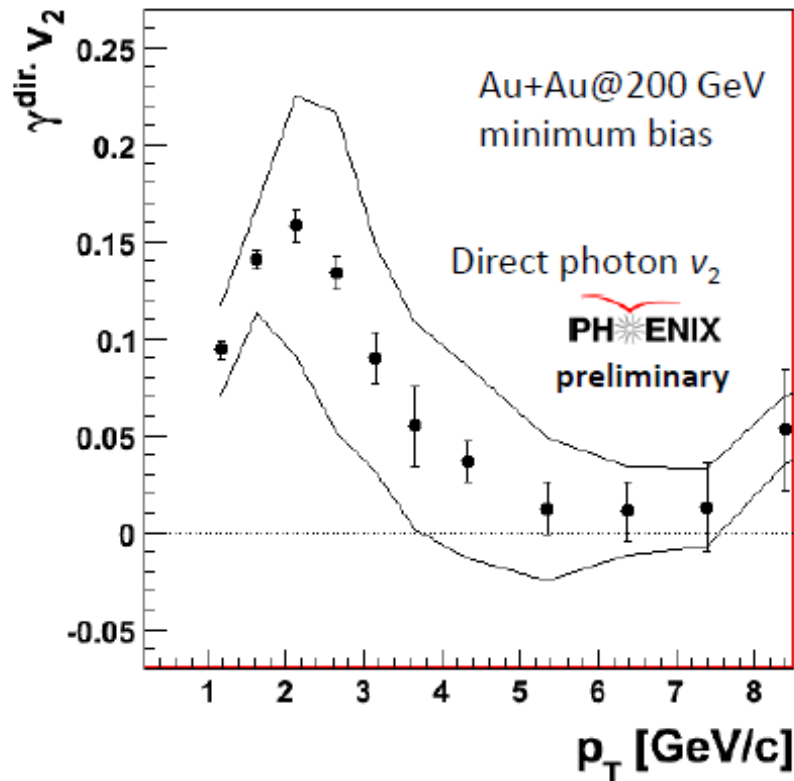
- 初期条件の重要性に対する認識が深まった  
flow, 2 particle correlation に対する初期条件の揺らぎの効果
- CGC現象論は、ep, pp, pAの理解と共に、AAに対しても着実に進んでいる

しかし、初期条件とQGPをつなぐmissing linkに何かありそう  
(何かの同定は、ep/pp/pAとの比較で初めて可能に)  
そこに潜む何かを意識しつつ、理解を深めたい。

# その他、初期条件と前平衡状態に関する かもしれない話題

## Direct Photon $v_2$ (PHENIX)

12



Prompt photon ( $t \rightarrow 0$ ) の寄与は無いはず、しかし、hydroの予言は小さい。  
→ 前平衡過程で生成?

- direct photon  $v_2$  large ( $\sim 15\%$ ) at  $p_T = 2.5$  GeV
- $v_2 \rightarrow 0$  where prompt photons dominate

Dilepton  $v_2$  も測ってほしい

→ いま測定中だ！ Nu Xu