

相対論的重イオン衝突実験による クォーク・グルーオンプラズマ研究 の現状と今後の課題

板倉数記（長崎総合科学大学）

Itakura_Kazunori@nias.ac.jp

2023年9月20日

プラズマ量子プロセスユニットセミナー

@核融合科学研究所

自己紹介

名前:板倉数記(いたくらかずのり)

RHICの実験開始
2000年に参加



経歴:東大駒場で学位 → 京大基研 → 阪大RCNP → 米国BNL (3年)
→ フランス・サクレ研究所(2年) → KEK → 長崎総合科学大学(イマコ)

(長崎総合科学大学は文科省へ提出したマスタープランで重イオン衝突実験の実施中心機関)

専門:高エネルギーハドロン物理(理論)

極限状態の物理

クォーク・グルーオンプラズマというよりも、
その「周辺」に関して特に興味を持っている。
最近は特に「**強い場の物理**」。総合報告
“Strong-field physics in QED and QCD”

arxiv: 2305.03865[hep-ph] 共著 272 pages
ブルーボックス「スピンとは何か」共著



本セミナーの目的

NIFSに、特にプラズマ量子プロセスユニットに、QGPに興味を持つ人がいる
→ では、QGPについてお話ししましょう

非専門家といっても、プラズマ物理のプロにも分かってもらえるように、
QGP研究の概観の提示を(少し離れた立場から)試みる

- 内容
- ・そもそもQGPとは何なのか？なぜ研究しているのか？
 - ・重イオン衝突で生成するQGPについて、理解の現状
 - ・電磁プラズマとの類似性は？相違は？
 - ・課題と今後の方向性

いま、重イオン衝突・QGP研究は転換期を迎えている

2023年春の物理学会でのシンポジウム(実験核物理領域、理論核物理領域)

次世代の高エネルギー原子核衝突： 何が理解され、何を理解すべきか？

1. 趣旨説明 板倉数記(長崎総合科学大学)
2. 高エネルギー原子核衝突を通じた最近のクォーク・グルーオン・プラズマの見え方 橘保貴(国際教養大)
3. 電磁・ソフトプローブを通じたQGP物理の結果と展望 関畑大貴(東大CNS)
4. ハードプローブを用いたQGP性質測定の現状と今後 蜂谷崇(奈良女子大)
5. 格子QCD計算でひも解く高エネルギー重イオン衝突の物理 大野浩史(筑波大計算セ)
6. ハドロンファクトリーとしての高エネルギー重イオン衝突 山口頼人(広島大)
7. 高密度QCD物質の理解に向けて 佐々木千尋(ヴロツワフ大・広島大SKCM²)
8. 超前方測定で切り拓くQGP生成機構とカラーガラス凝縮の謎 中條達也(筑波大)

全ての講演のスライドが入手可能 <https://indico.rcnp.osaka-u.ac.jp/event/2106/>

今まで自分たちがしてきたことを顧みて、今後進むべき道を見極める時期
(電磁プラズマからの視点も重要な方向性を与える可能性あり)

重イオン衝突実験のこれまでとこれから

2000

2010

2020

2030

固定標的実験

衝突型実験

RHIC (2000~)

PHENIX, STAR, PHOBOS, BRAHMS

sPHENIX

完全流体に近い強相関系としてのQGP

ソフト：強い楕円流れ

ハード：強いジェット阻止能

衝突直前のグルーオン飽和状態の影響

QGP起源の熱光子の測定

重いクォークoniumの段階的溶解

様々なエキゾチック状態の観測と

ハドロン間相互作用の抽出

QCD臨界点の存在の示唆

LHC (2010~)

ALICE, CMS, ATLAS

EIC(eA)

ALICE3/FoCal

未解決問題や
新たに生じた
疑問などを
解決する
次世代の実験

固定標的実験

FAIR/J-PARC-HI

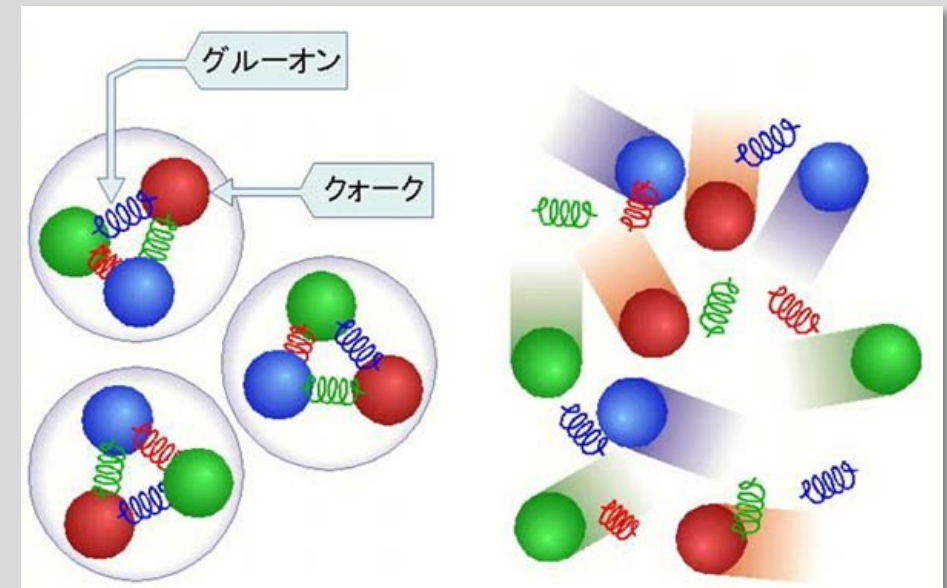
Plans

- **What is QGP?**
- **QCD minimum**
- **High-energy heavy-ion collisions**
- **How can we know the presence of QGP?**
- **Evidences for QGP**
- **Unsolved problems and hints from EM plasmas**
- **Future directions**

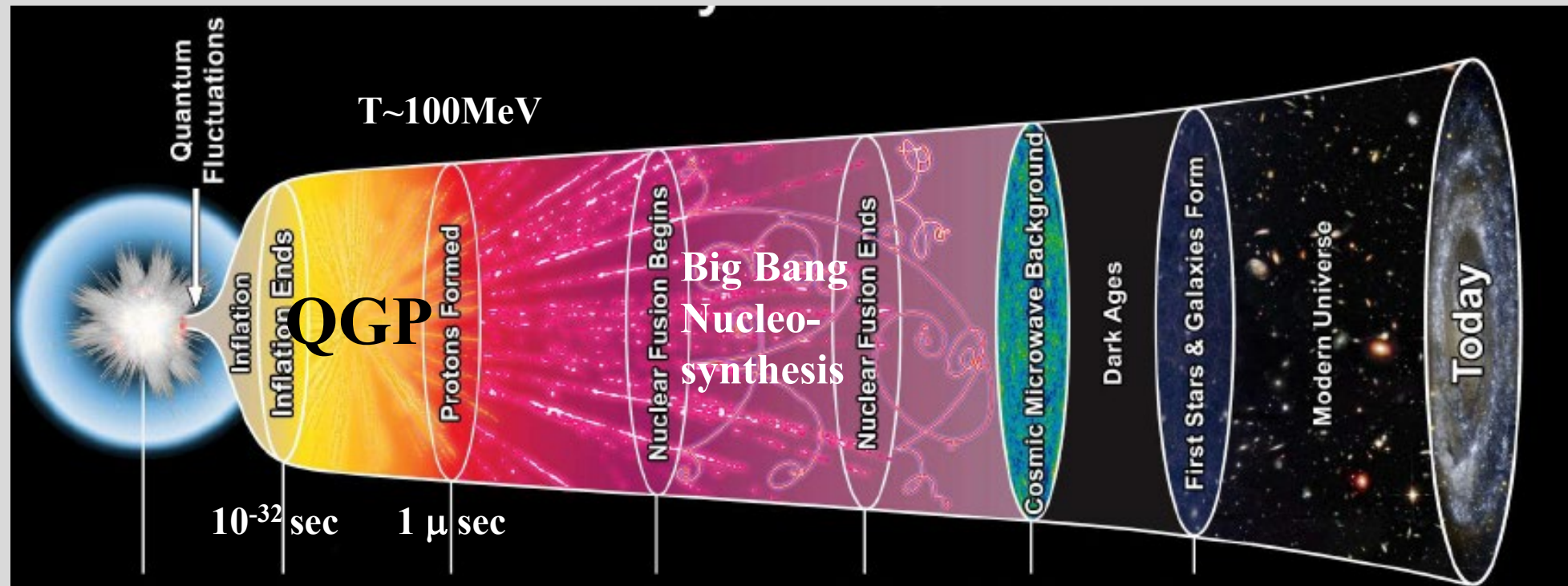
What is QGP?

Quark-Gluon Plasma (QGP)

- 通常は陽子・中性子の内部に「閉じ込め」られているクォークやグルーオンが解放された状態
- 4つの基本的な相互作用のうちの「強い力」に関する相転移
- 宇宙誕生直後の超高温期、物質が形成される前に存在

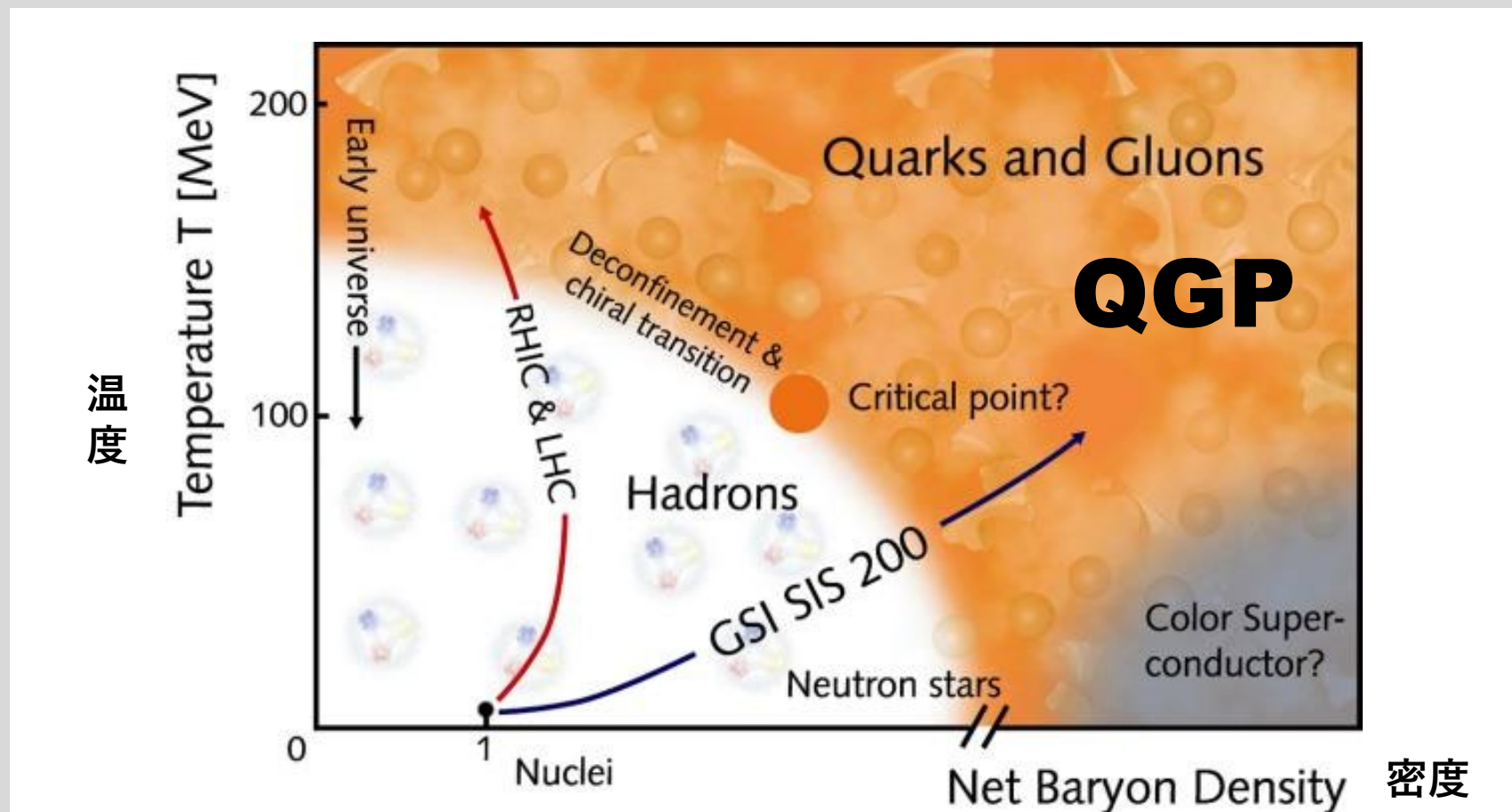


<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>



<https://phys.org/news/2020-12-recreating-big-earth.html>

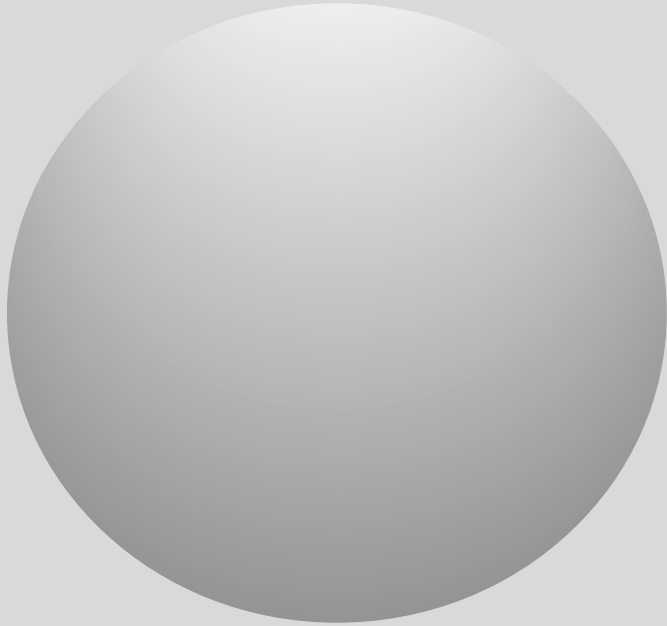
Phase diagram of QCD matter (詳細は後程)



QGPとは、現在の物質の構成要素が存在できるぎりぎりの極限状態(高温・高密度)

QCD minimum

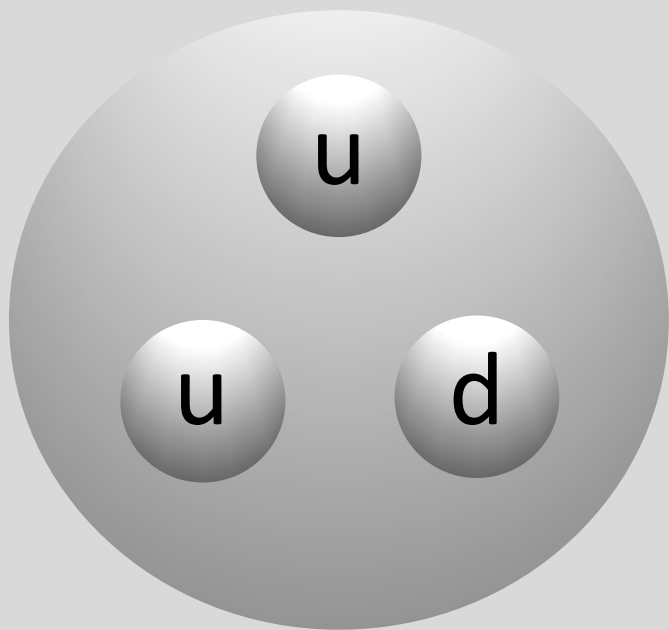
Proton



原子核を構成する電荷 $+e$ を持つフェルミオン

- 質量: およそ 1 GeV (938 MeV) 電子の約2千倍
- 荷電半径: およそ 1 fm
- 陽子同士、中性子とはパイ中間子の交換で相互作用(核力)

Proton



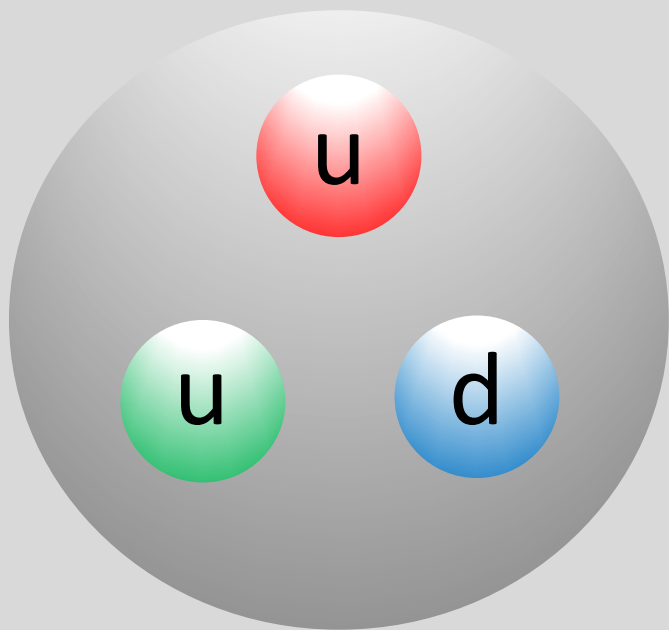
原子核を構成する電荷 $+e$ を持つフェルミオン

- 質量: およそ 1 GeV (938 MeV) 電子の約2千倍
- 荷電半径: およそ 1 fm
- 陽子同士、中性子とはパイ中間子の交換で相互作用(核力)

内部構造が存在し、3つのクォークからなる(クォーク模型)

- 2つのアップクォーク(u)、1つのダウンクォーク(d) (フレーバー)
- u,dクォークはスピン $1/2$ で $+2/3$, $-1/3$ の大きさの電荷

Proton



原子核を構成する電荷 $+e$ を持つフェルミオン

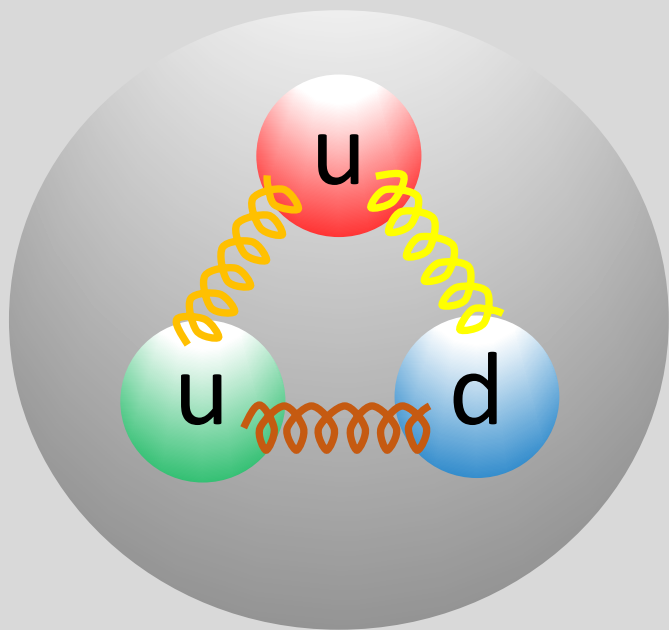
- 質量: およそ 1 GeV (938 MeV) 電子の約2千倍
- 荷電半径: およそ 1 fm
- 陽子同士、中性子とはパイ中間子の交換で相互作用(核力)

内部構造が存在し、3つのクォークからなる(クォーク模型)

- 2つのアップクォーク(u)、1つのダウンクォーク(d) (フレーバー)
- u,dクォークはスピン $1/2$ で $+2/3$, $-1/3$ の大きさの電荷

クォークは3つの「色」の自由度(赤、緑、青)を持ち、3色がそろった状態が、物理的状态として実現する

Proton



原子核を構成する電荷 $+e$ を持つフェルミオン

- 質量: およそ **1 GeV** (938MeV) 電子の約2千倍
- 荷電半径: およそ **1 fm**
- 陽子同士、中性子とはパイ中間子の交換で相互作用(核力)

内部構造が存在し、**3つのクォーク**からなる(クォーク模型)

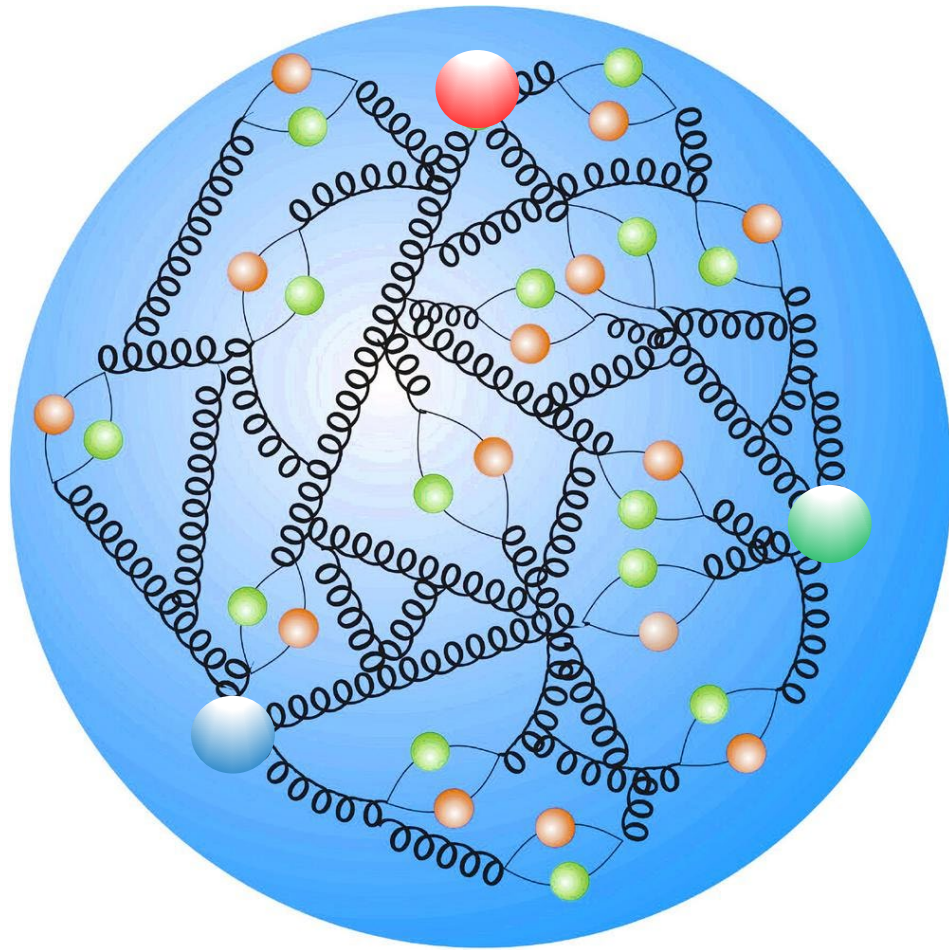
- 2つのアップクォーク(u)、1つのダウルクォーク(d) (フレーバー)
- u,dクォークはスピン $1/2$ で $+2/3$, $-1/3$ の大きさの電荷

クォークは**3つの「色」**の自由度(赤、緑、青)を持ち、3色がそろった状態が、物理的状态として実現する

クォークの色は固定されているものではなく、**グルーオン**の交換によって変わりうる(強い相互作用の本質)

- グルーオンは $3 \times 3 - 1 = 8$ 種類ある
- このクォークとグルーオンの力学が「**量子色力学**」
- SU(3)対称性を持つ非可換ゲージ理論 (Yang-Mills理論)

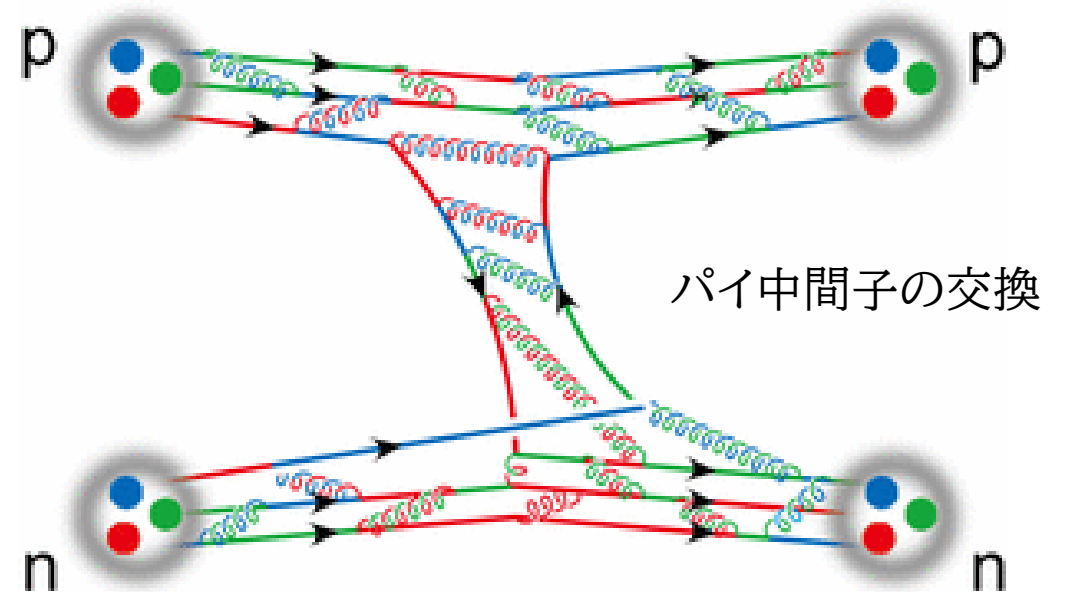
Proton (now)



実験で測定される陽子の内部構造はより複雑

- グルーオンやクォーク・反クォーク対が生成
- 見るスケール(エネルギー、運動量)によって変化

核力は、量子色力学からすると2次的な力



Quantum Chromodynamics (QCD)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i \not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}$$

$$D_{\mu} = \partial_{\mu} + igA_{\mu}^a t^a,$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_{\mu}A_{\nu}^a - \partial_{\nu}A_{\mu}^a - gf_{abc}A_{\mu}^b A_{\nu}^c$$

ψ_f^i : quarks “color” $i = 1, 2, 3$ (red, blue, green)
 “flavor” $f = 1, \dots, N_f$ (u, d, s, c, b, t)

g : 結合定数

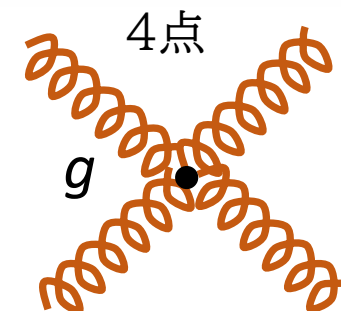
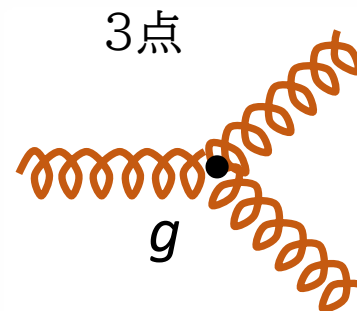
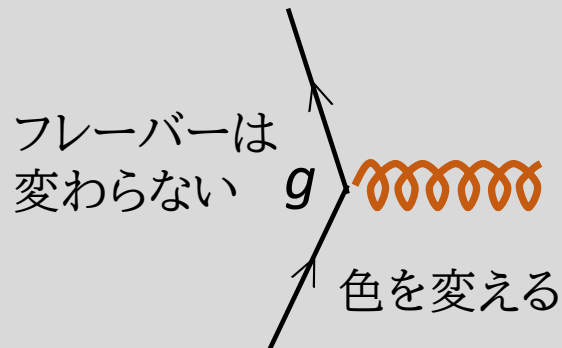
A_{μ}^a : gluons $a = 1, \dots, 8$

$$SU(3)_C \otimes SU(N_f)_L \otimes SU(N_f)_R$$

SU(3) ゲージ対称性 (非可換)

クォークがゼロ質量の時、フレーバーを混ぜるカイラル対称性

相互作用



Running coupling constant

場の理論では真空は常に揺らいでいて、媒質のように振舞う

→「電荷」が「遮蔽(QED)」や「反遮蔽(QCD)」される

→ 粒子間の相互作用の強さが距離によって変化する

$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi}$ が、考えている過程の典型的運動量に依る

Asymptotic freedom (漸近的自由性) $\alpha_s(Q)$

グルーオンの3点、4点相互作用の帰結、両義的

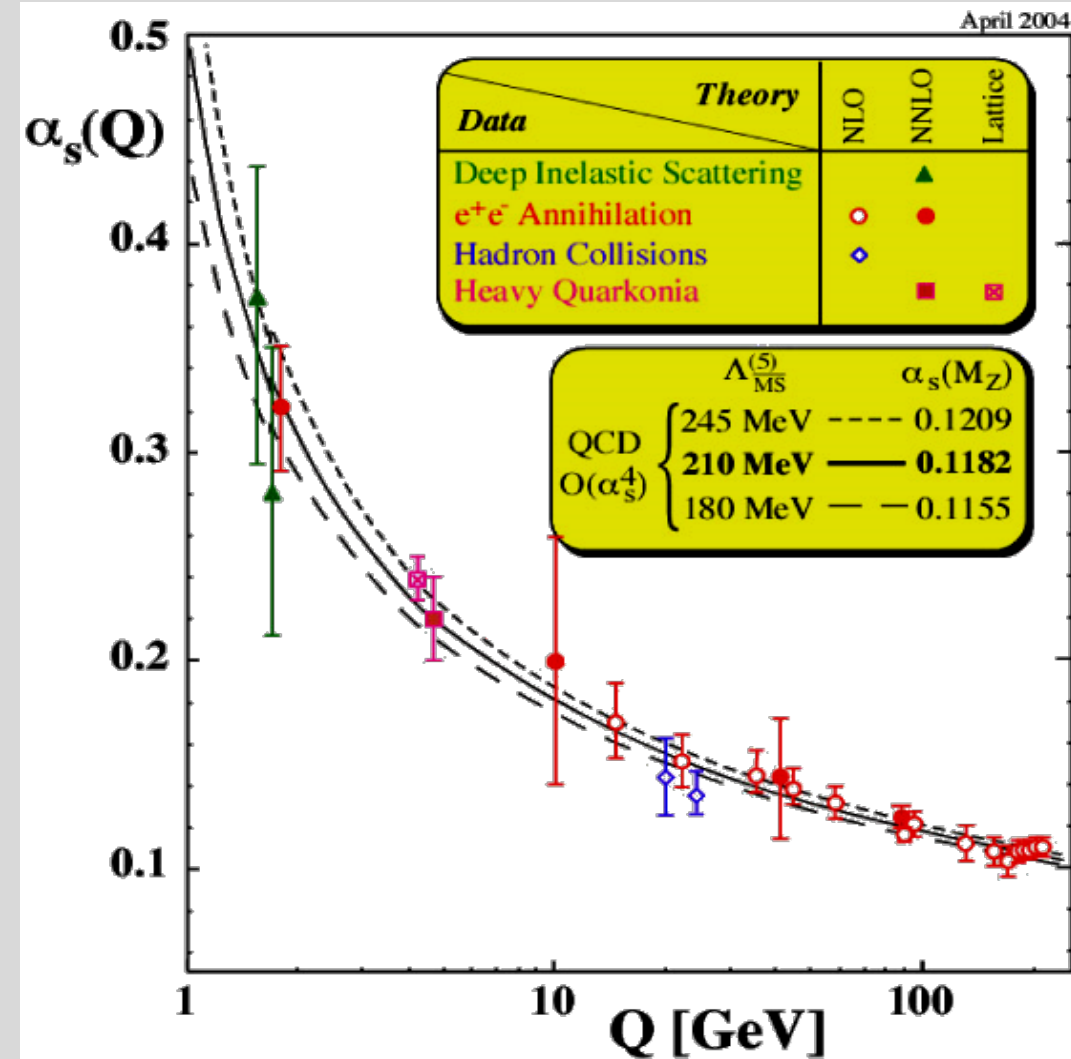
$Q \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ で $\alpha_s \ll 1$ **弱結合**

パートン描像の成功、摂動的QCD
高温、高密度、高エネルギー現象

$Q \ll \Lambda_{\text{QCD}}$ で $\alpha_s \gg 1$ **強結合**

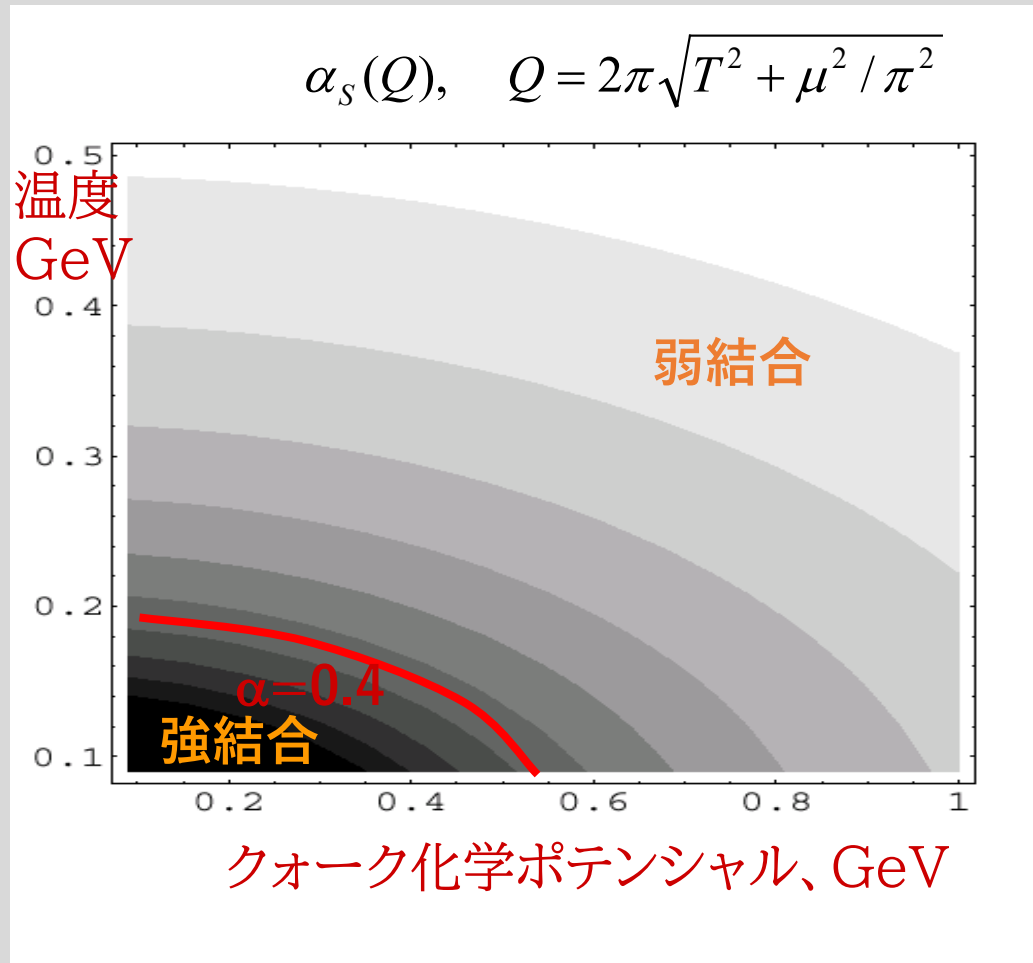
非摂動現象：閉じ込め、カイラル対称性の破れ
ハドロンの静的な性質 ← 格子QCDの必要性

非摂動スケール Λ_{QCD} は、およそ **200MeV** 程度(長さで換算すると、 1fm^{-1} に相当)



QCD phase diagram (low resolution)

温度(T)や化学ポテンシャル(μ)はクォーク間相互作用の典型的なスケールを与える
→ 結合定数の変化が影響する



Cabibbo-Parisi PLB 59 (1975) 67

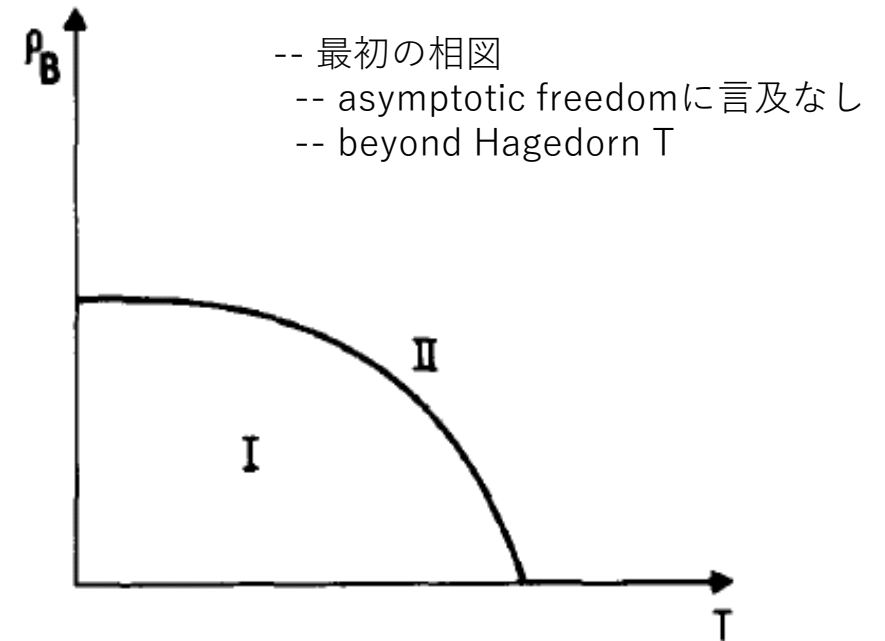
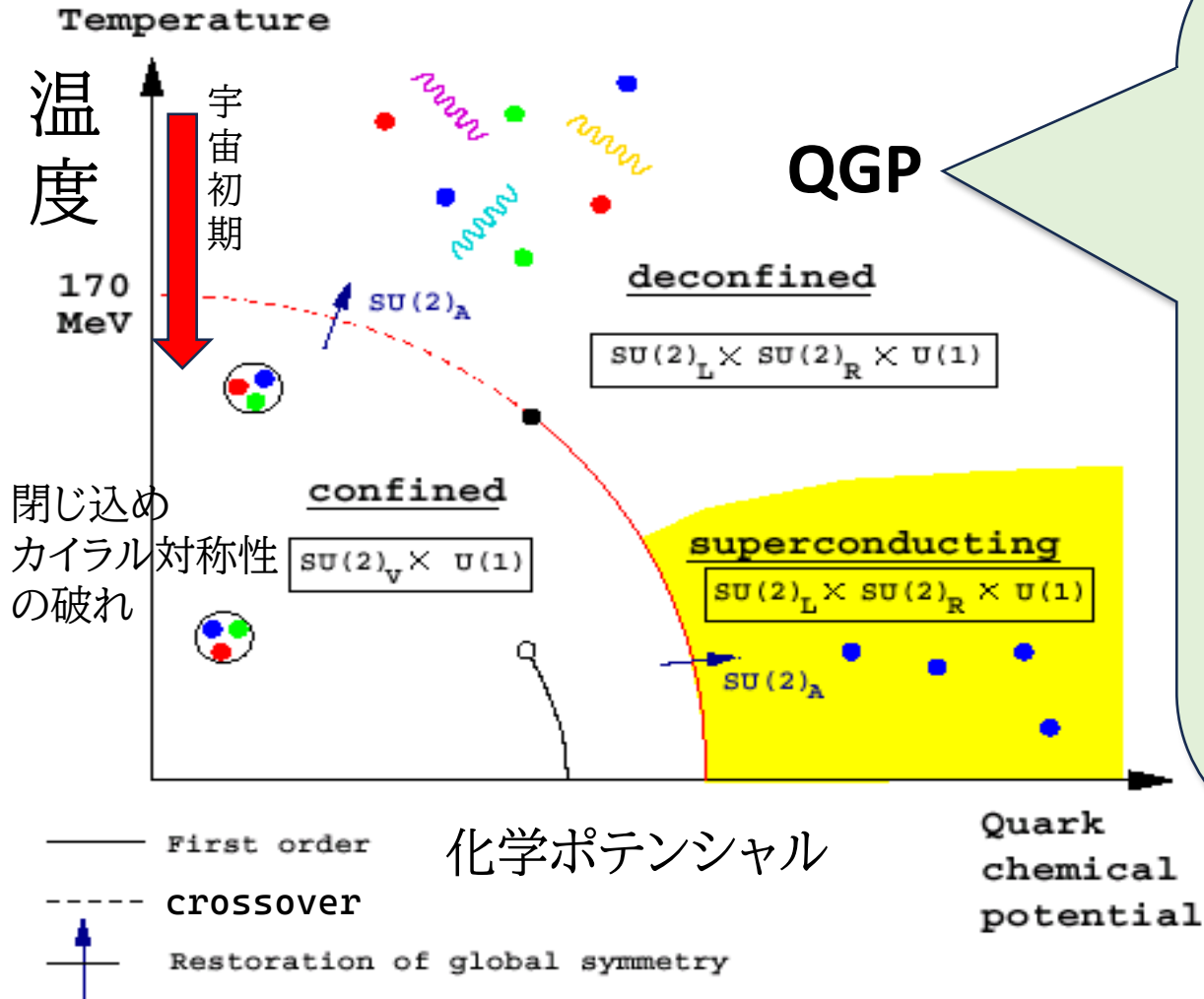


Fig. 1. Schematic phase diagram of hadronic matter. ρ_B is the density of baryonic number. Quarks are confined in phase I and unconfined in phase II.

QGP in (conjectured) QCD phase diagram

(2 massless flavor の場合)



弱結合化とスクリーニングの効果で非閉じ込めとカイラル対称性の回復が同時に起こる
 →クォークとグルーオンが弱く相互作用するガス

転移温度は160~170MeV程度(格子QCD計算から)

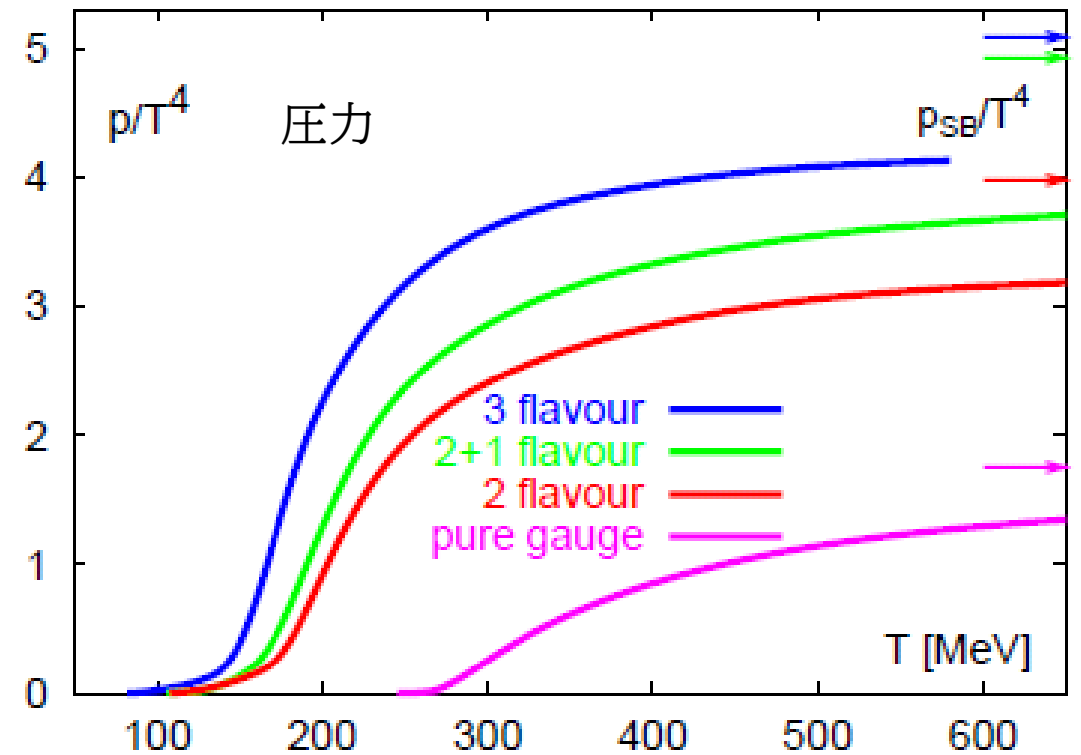
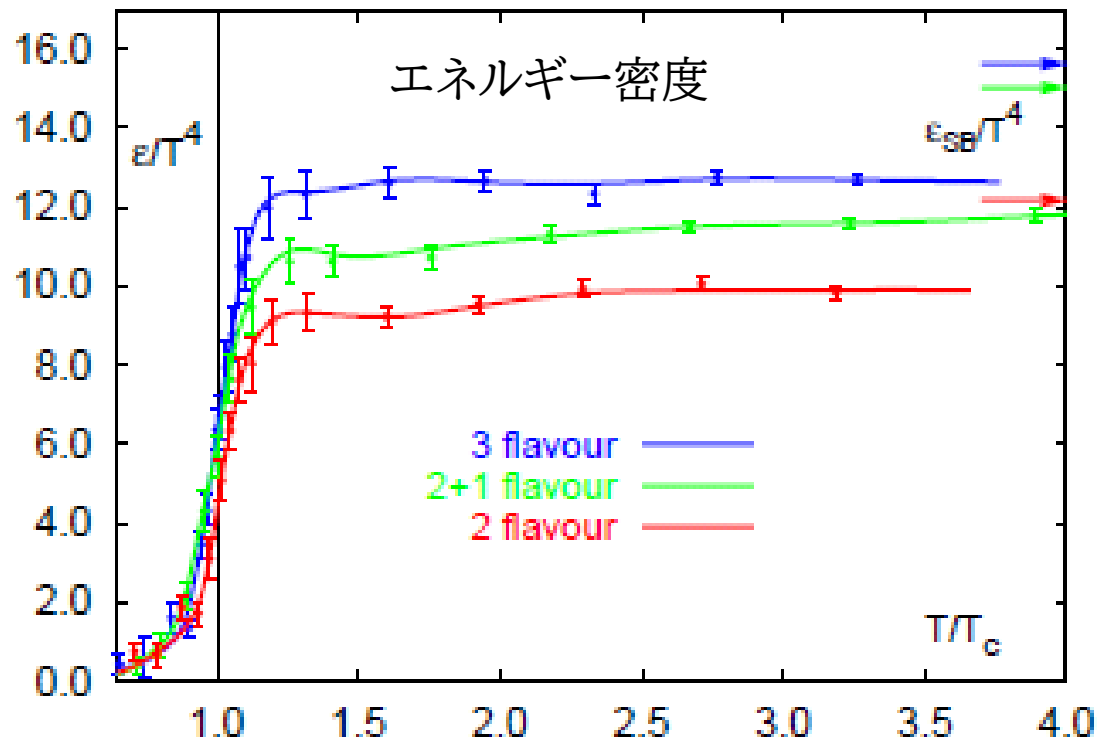
宇宙初期には低密度高温から低密度低温へ
 低密度では転移はクロスオーバーで、密度が上がると1次相転移に変わる(と予想)

実は まだ ほとんど分かっていない、...

Thermodynamics on the lattice ($\mu = 0$)

格子QCD計算によって、 $\mu=0$ における熱力学量は正確に計算されている

→ 確かに、 $T \sim 160-170$ MeV あたりで急激な「自由度の解放」が生じている

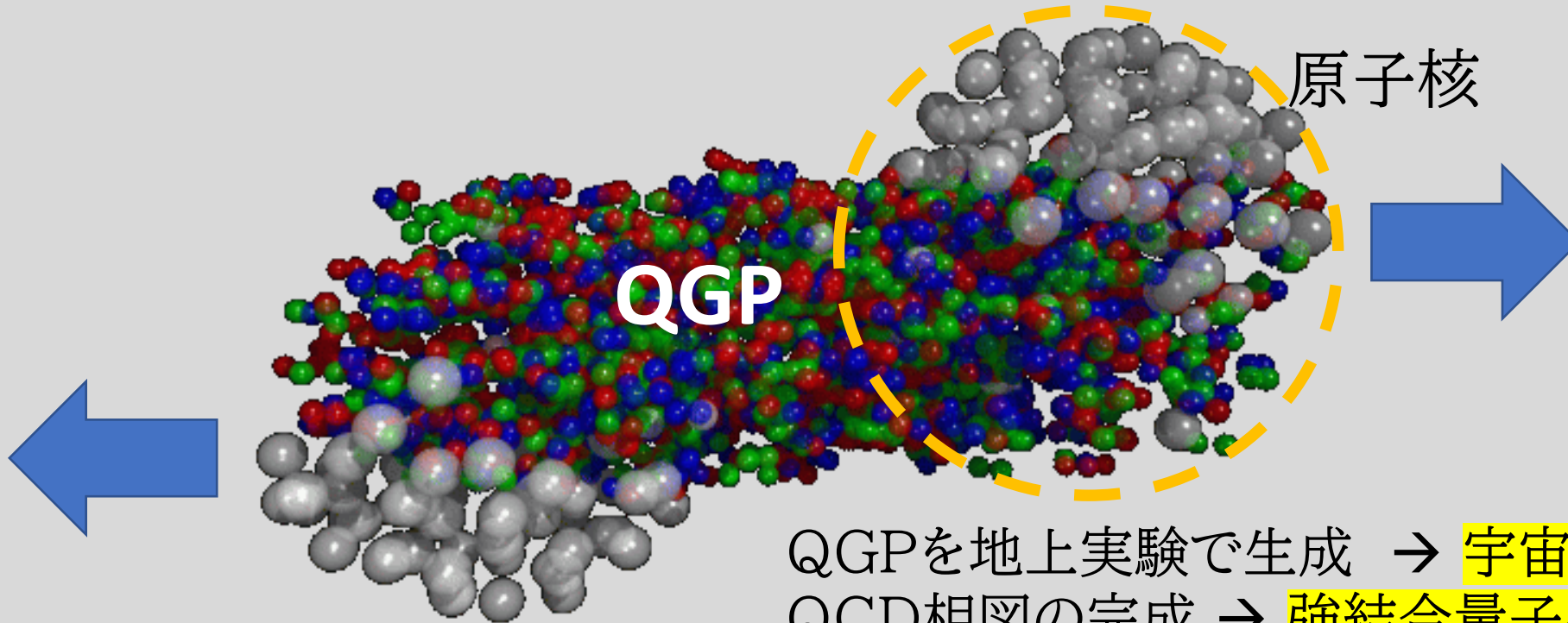


Stephen-Boltzmann lawでは、エネルギー密度/ T^4 が系の有効自由度に比例

High-energy heavy-ion collisions

High-energy heavy-ion collisions

広がりを持つ金や鉛などの重い原子核(重イオン)を光速近くまで加速して衝突させる実験



QGPを地上実験で生成 → 宇宙初期の相転移の理解

QCD相図の完成 → 強結合量子多体系の理解

QCD物性の解明 → 中性子星内部などの極限物質の理解

素粒子実験は「新粒子生成」を目指すのに対して、
重イオン衝突実験は「新しい状態」の生成を目指す

Two heavy-ion colliders

2000年～米国 **RHIC**@BNL

周長 3.8 km

金+金 ($A=197$)

核子衝突あたり **200 GeV**

測定器 STAR, PHENIX,
Brahms, PHOBOS



2010年～スイス **LHC**@CERN

周長 27 km

鉛+鉛 ($A=208$)

核子衝突あたり **2.76 TeV**

測定器 ATLAS, CMS,
ALICE, LHCf



Nuclear collisions and the QGP expansion

Little Bang

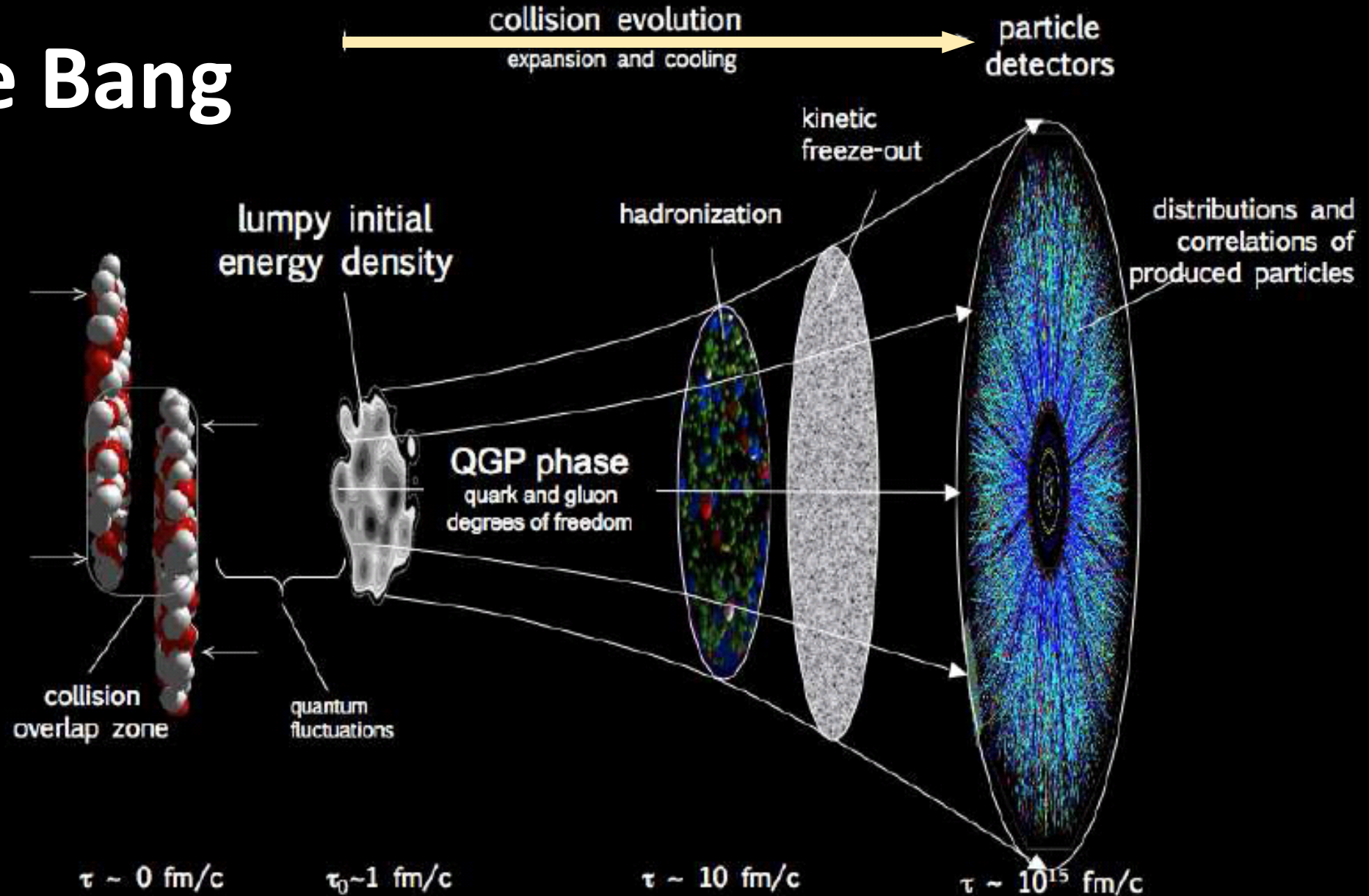
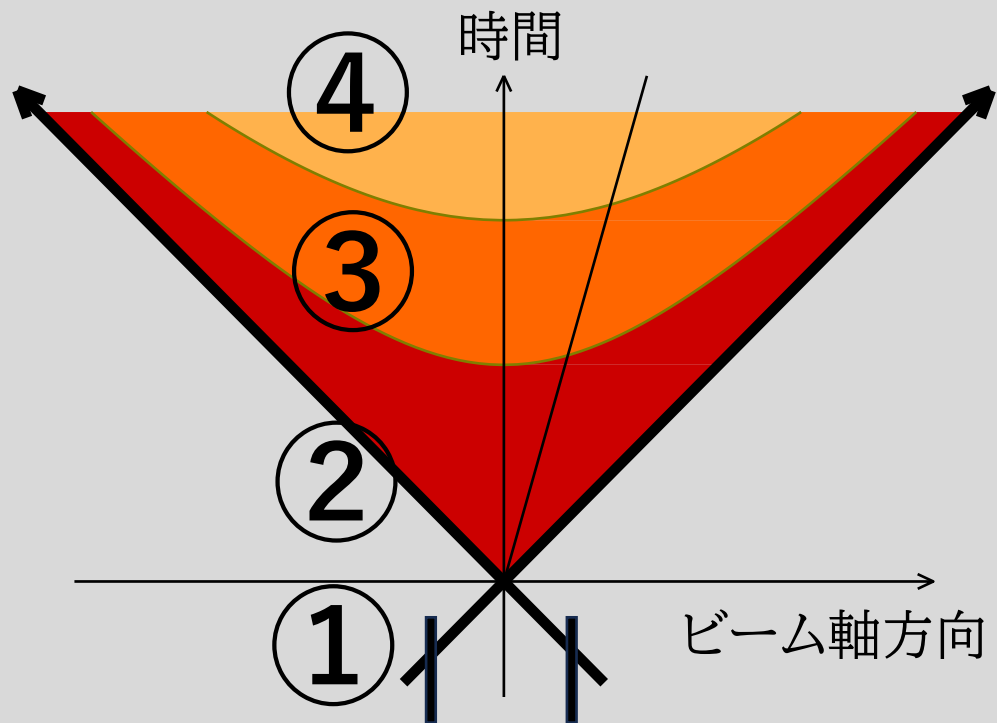


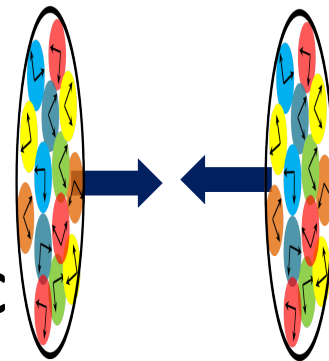
Figure by P.Sorensen arXiv:0905.0174

Event evolution



①

CGC



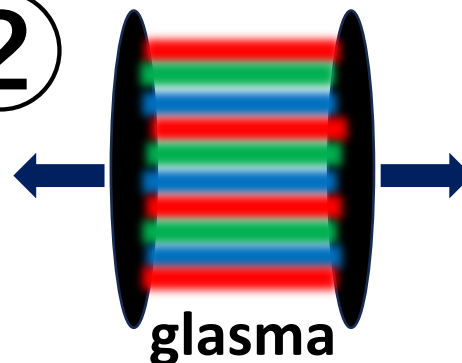
衝突前

ほぼ光速で走る原子核は
強くLorentz収縮

原子核には膨大な数の
グルーオンが出現
(カラーガラス凝縮, CGC)

②

glasma



衝突直後

2つの原子核は互いにすり
抜け、その間に高エネルギー
密度の強いカラー電磁場の
フラックスが発生(グラスマ)

③

QGP



QGP形成&発展

局所熱平衡状態として
QGPが形成され、
温度が定義される

膨張・急激な冷却は
相対論的流体力学で記述

④

hadron
gas



ハドロン化

$T < T_c$ でハドロン化し、
相互作用するハドロンガス
→種類が変化しなくなる
(化学凍結)
→相互作用もしなくなる
(運動学的凍結)

重イオン衝突を用いたQGP研究 の難しさ

1. 強烈な逆問題 数千ものハドロンからなる終状態から、QGPの情報を引き出す必要
2. 階層間を往来する事象 原子核 → QGP → ハドロン: 一つの枠組みで理解が困難
3. 弱結合から強結合への変化 膨張によって急激に温度が下降し結合定数が変化: 非摂動的扱いが必要
4. 強い時間依存性を持つ状態から、平衡状態の情報を引き出す QGPはできたとしても急激に冷却していく。定常状態ではない
5. 可変パラメータが限られている 衝突エネルギー(温度)、核種(大きさ)、衝突径数(形)、衝突パターンAA/pA/pp
6. QGPシグナルの問題 QGPの存在をどうやって知るのか? (1.とも関係)
7. QGP以外の様々な物理が関与 衝突前と衝突直後に新しい状態が出現、全ての自由度がQGPになるわけではない

QGPの存在をどうやって知るのか？

1. QGP以外の自由度を利用する

重イオン衝突ではすべての自由度がQGPになるわけではないことを逆手に取る

→ QGPにとっての**異物**がQGPと相互作用してどう変化するか？

- ジェットの変化 QGPのプロブ
- 重いメソンの変化 J/psi 抑制

→ QGPから放出されてQGPと相互作用しないものを見る

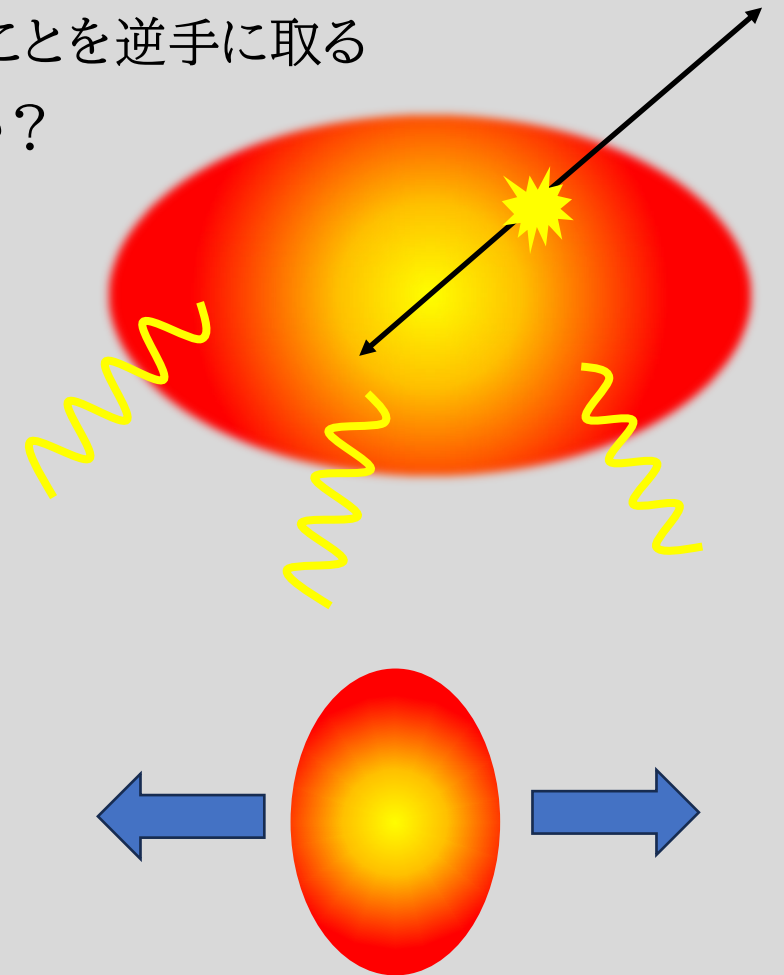
- 光子やレプトン対

2. QGPに特有な現象を見出す

一つの熱平衡状態として現れたときに示す**集団現象**を見出す

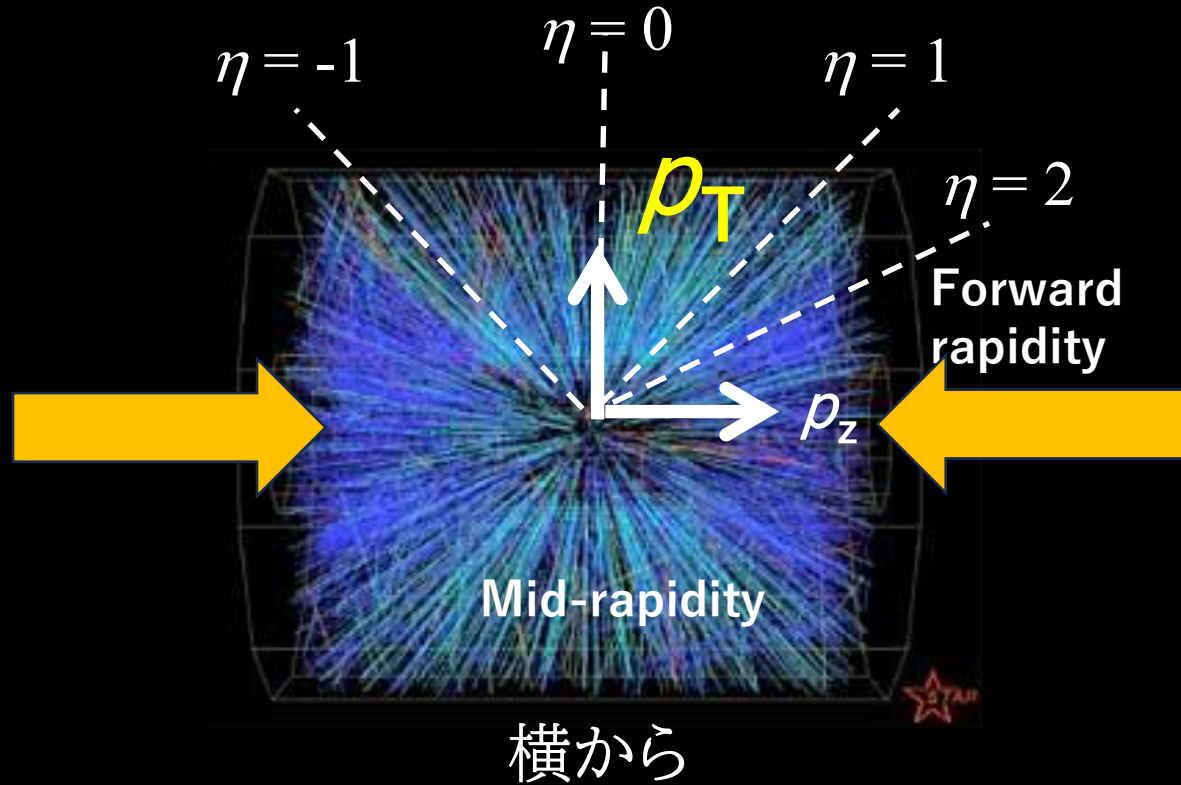
→ 生成粒子の「集団的流れ」の方位角依存性の強さ

→ 異なるハドロンの流れの背後にあるパターン



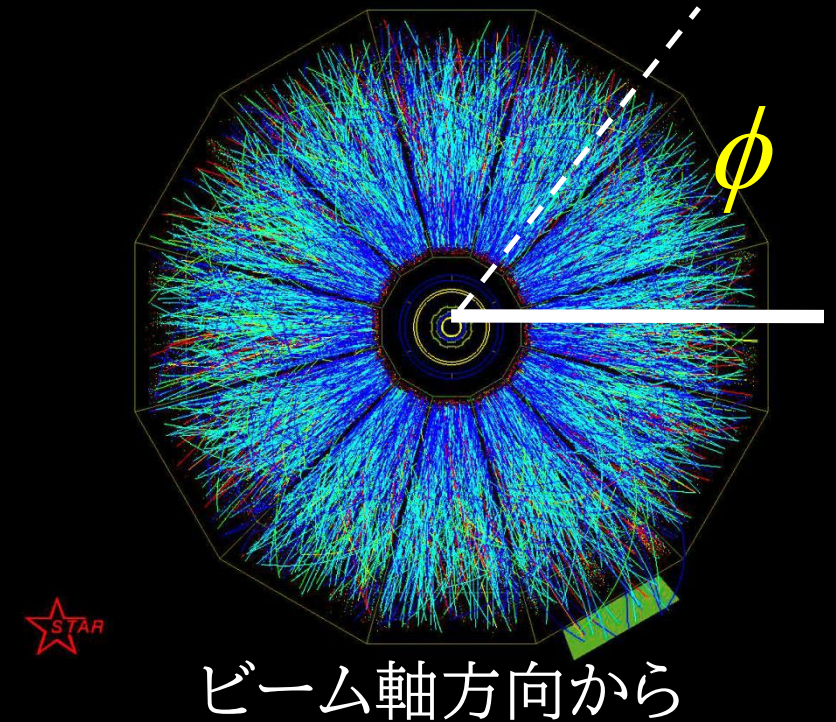
Evidences for QGP

Coordinates of the event



Pseudo-rapidity

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{|p| + p_z}{|p| - p_z} = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)$$



p_T transverse momentum
 ϕ azimuthal angle

見出し方の基本的戦略

重イオン衝突の第0近似は、核子・核子衝突の重ね合わせであり、それからのズレに重要な意味がある

Nuclear modification factor

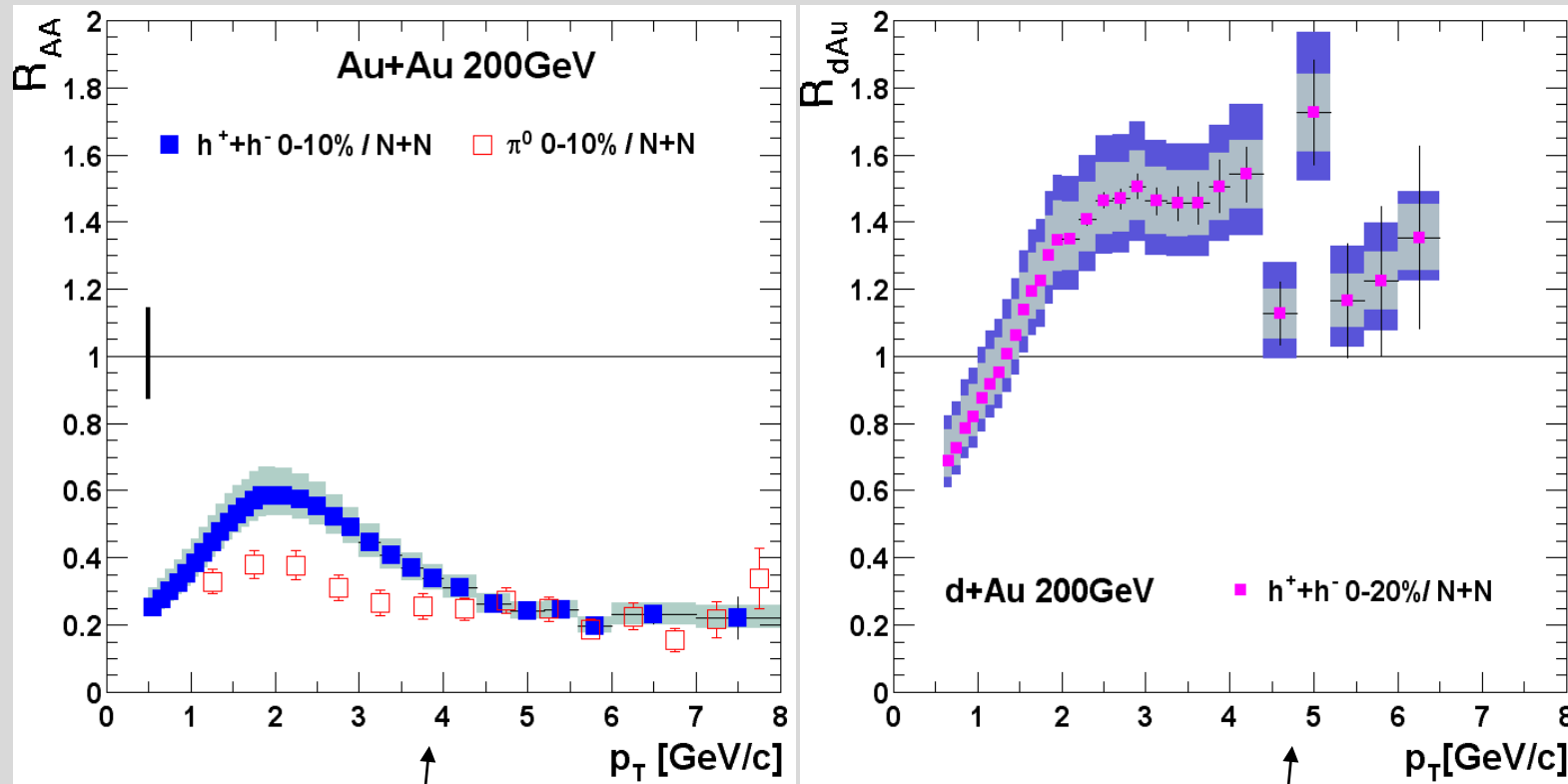
$$R_{AA} = \frac{AA \text{衝突での生成量}}{N_{coll} \times NN \text{衝突での生成量}}$$

N_{coll} → NN衝突の回数
(Glauber理論などで計算)

同じエネルギー

R_{AA} が1からずれたときに多核子が関与した効果(QGP含む)が見えている

Evidence 1 : jet quenching



周辺衝突(70-80%)では
Au+Au, d+Auともに1から
大きくはズレない

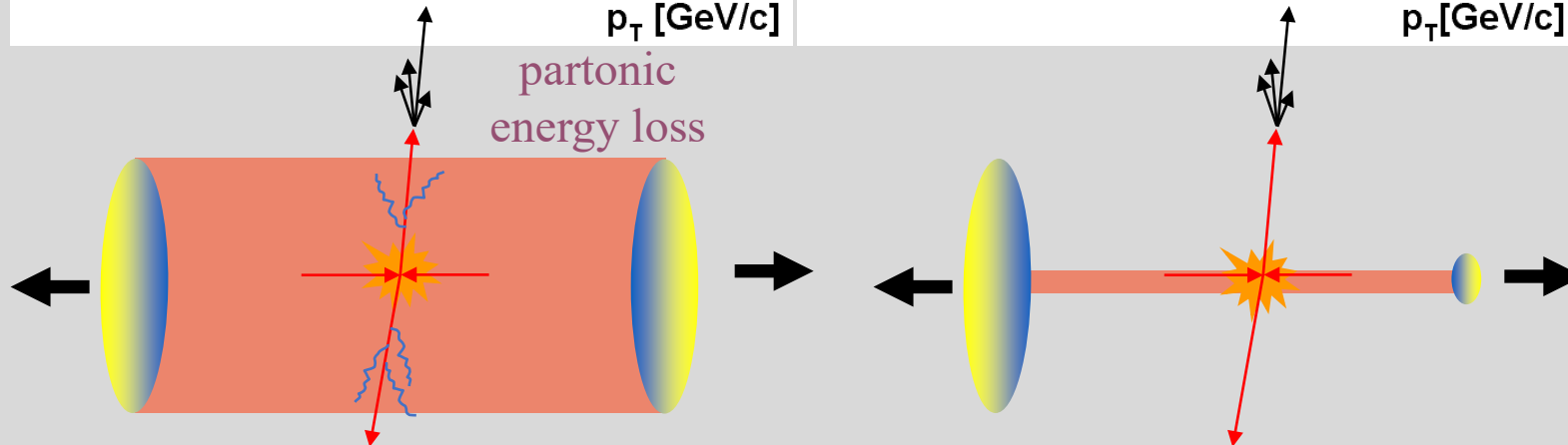
中心衝突(0-10%)では
Au+Auでは高運動量粒子が抑制
d+Auでは、逆に増大

高運動量パートン($p_T > 3\text{GeV}$)は

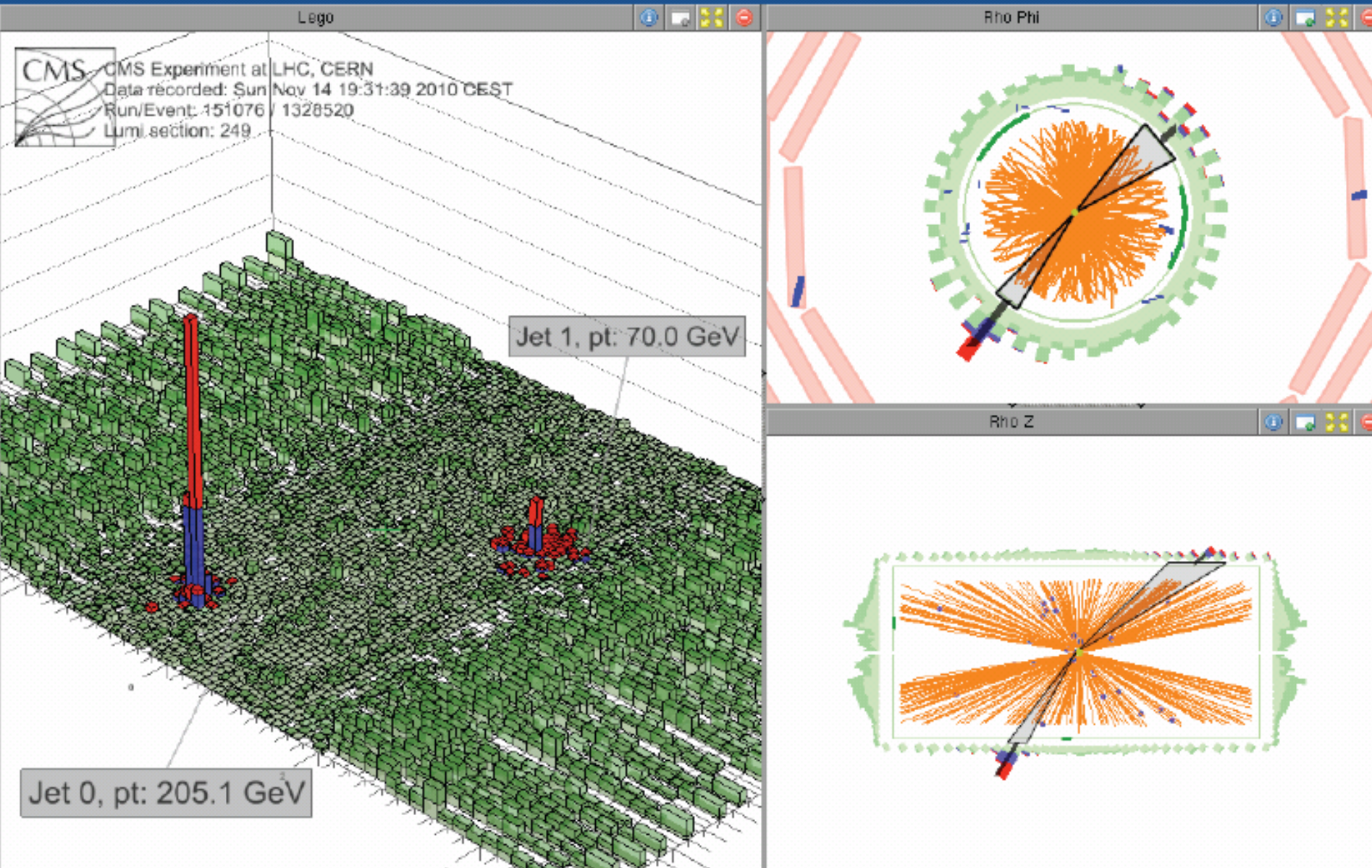
原子核衝突では
高温媒質と相互作用することで、
エネルギー・運動量を失う
非常に強い阻止能

重陽子・原子核衝突では
多重散乱の効果で数GeVの
運動量を持つ粒子が増える

ジェットの不均衡も測定される



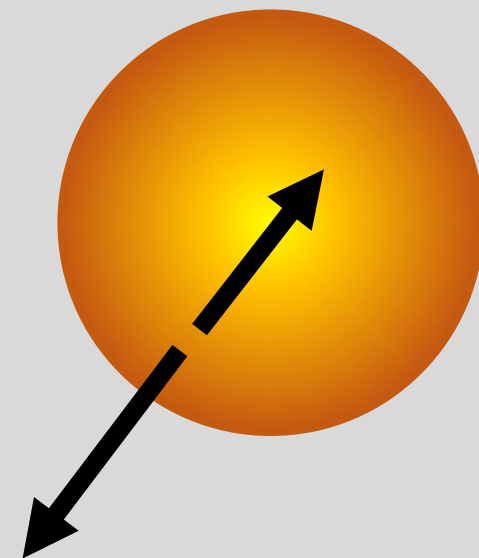
Jets in the CMS detector



生成時には同じ運動量であつたはずのジェット対

片方のジェットの運動量が130GeVも減少

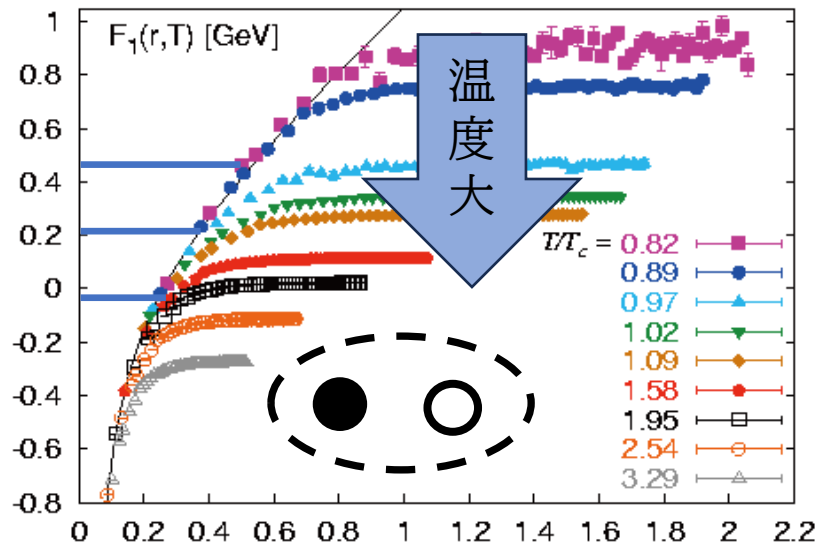
ジェットの走行距離依存性



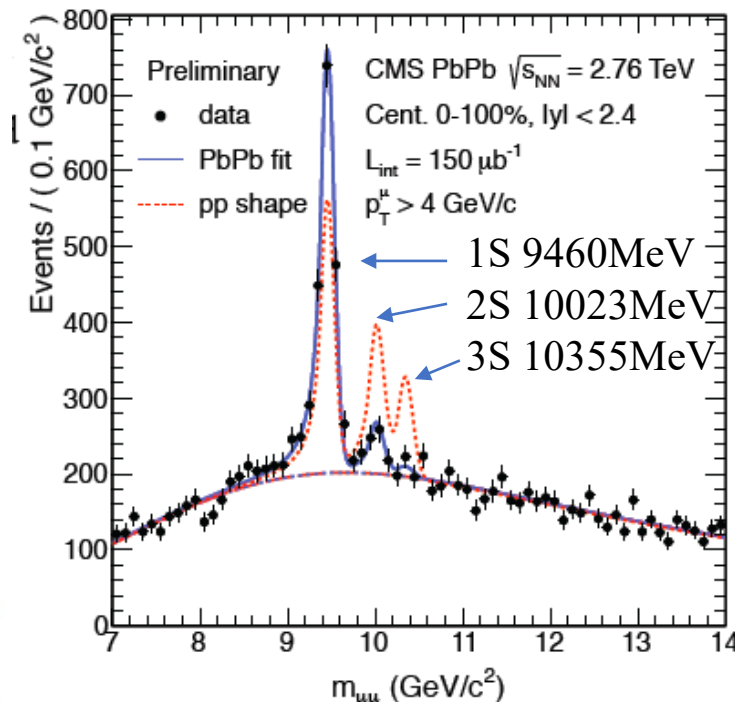
Evidence 2 : sequential melting of quarkonium

- 高エネルギー核子・核子衝突では、重いクォークからなるメゾン(J/psi, ウプシロン)が生成
- 媒質中ではクォーク間相互作用は、linear potential からYukawa型に変わり、束縛状態がなくなる
- 媒質中を重いメゾンが走ると、束縛が溶けて、収量が減少する。
(ただし、高温になるとクォーク・反クォーク対の生成が増えるため、増加する効果も)

クォーク・反クォークポテンシャルの温度変化

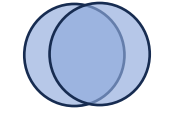
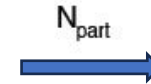
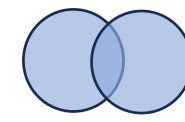
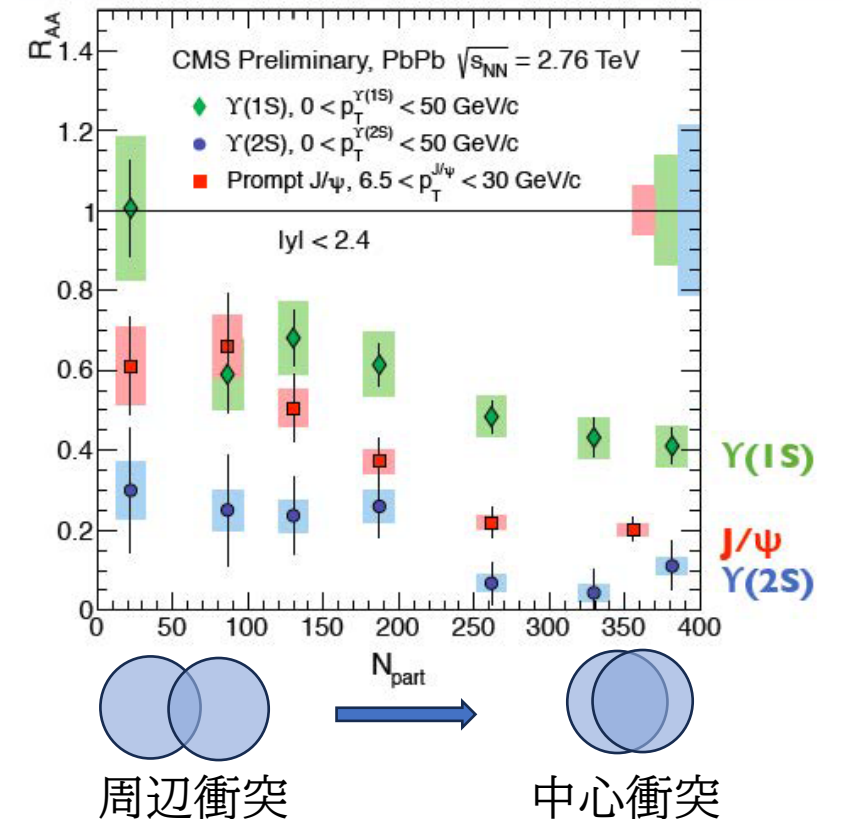


ウプシロン($b\bar{b}$)のスペクトル@LHC



$m_b \sim 4500 \text{ MeV}$

中心衝突で抑制がより強い



周辺衝突

中心衝突

$$V(r) = \sigma r - \frac{\alpha}{r} \longrightarrow -\alpha \left[\mu(T) - \frac{1}{r} e^{-\mu(T)r} \right]$$

Cornell Yukawa
 $\mu(T)$ はDebye mass

Evidence 3 : thermal photons

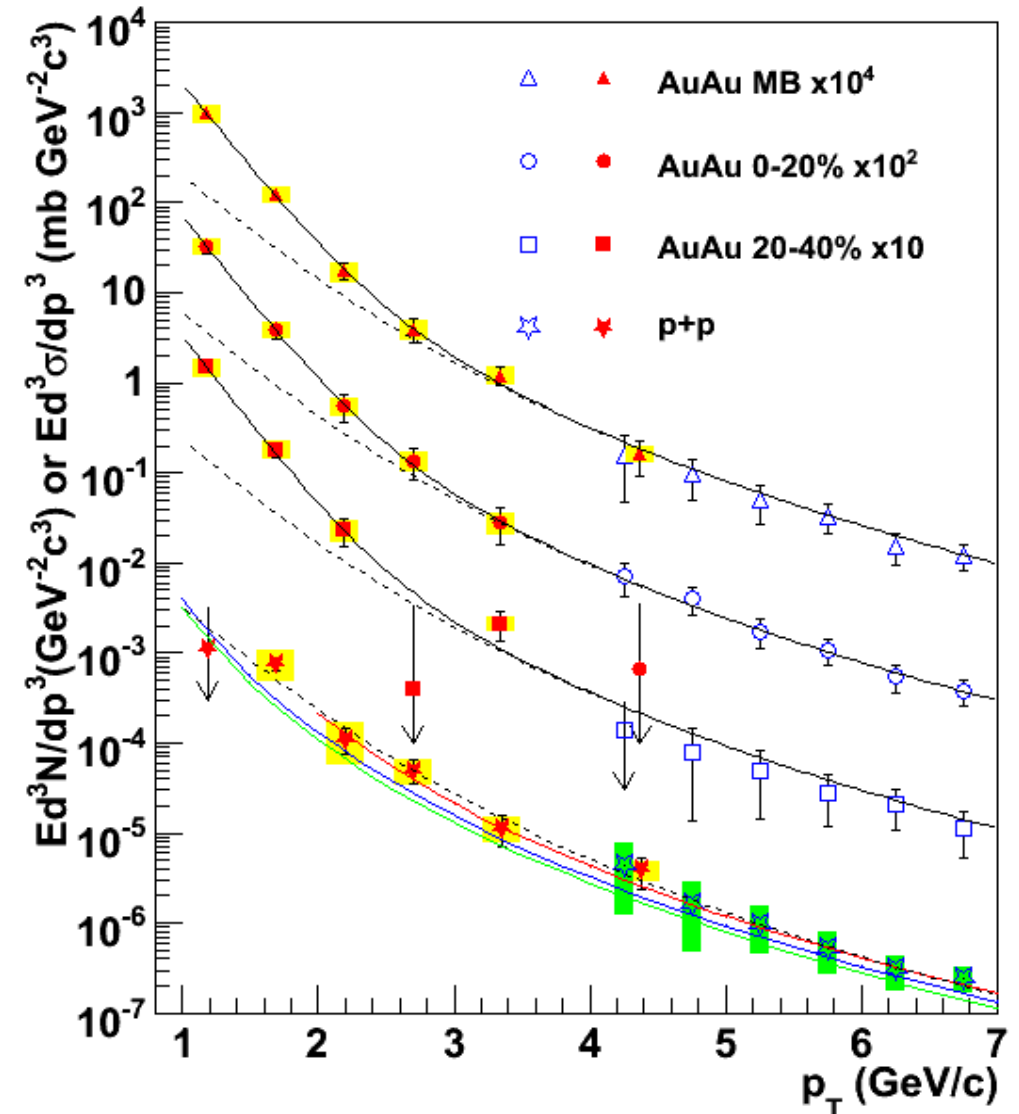
- 光子はQGPと相互作用しない「**透過的プローブ**」
- 金・金衝突での光子の収量が、pp衝突の重ね合わせよりも優位に増加
- 増加分は**指数関数的フィット**で表せる

$$\sim e^{-p_T/T}$$

→ slope $T \sim 240$ MeV (RHIC)

熱平衡に達したQGPからの放射と無矛盾で、
 T はQGPの温度と解釈

LHCでの光子は同様にして、温度 $T \sim 300$ MeV
と見積られる



Flow : 粒子の集団的運動を捉える

生成粒子の方位角(ϕ) 依存性

($v_0=1/2$)

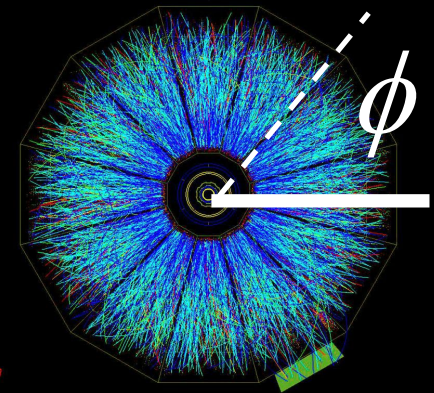
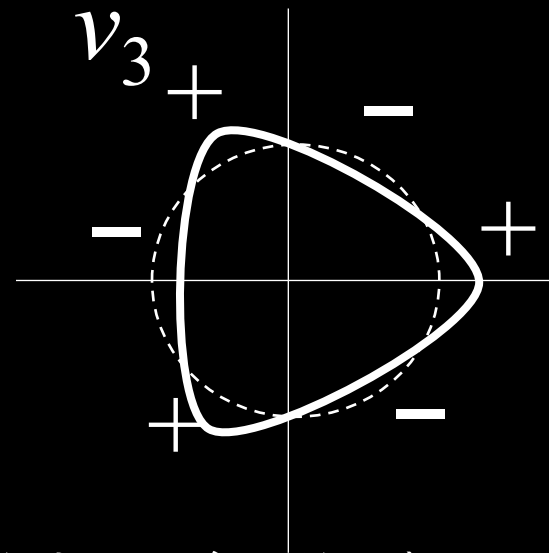
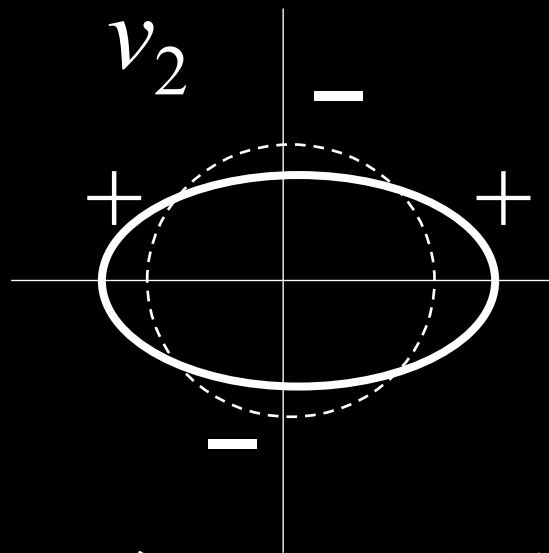
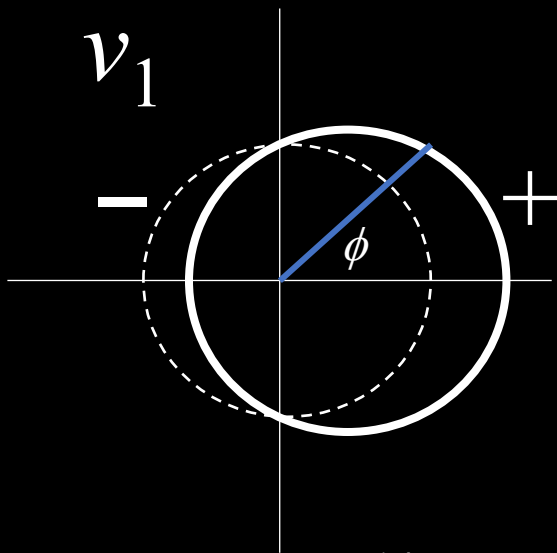
$$\frac{dN_h}{dy d^2 p_T d\phi} = \frac{dN_h}{dy d^2 p_T} \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0} 2 v_n(y, p_T) \cos n\phi$$

揺らぎの
フーリエ展開

n=1 directed flow

n=2 elliptic flow

n=3 triangular flow

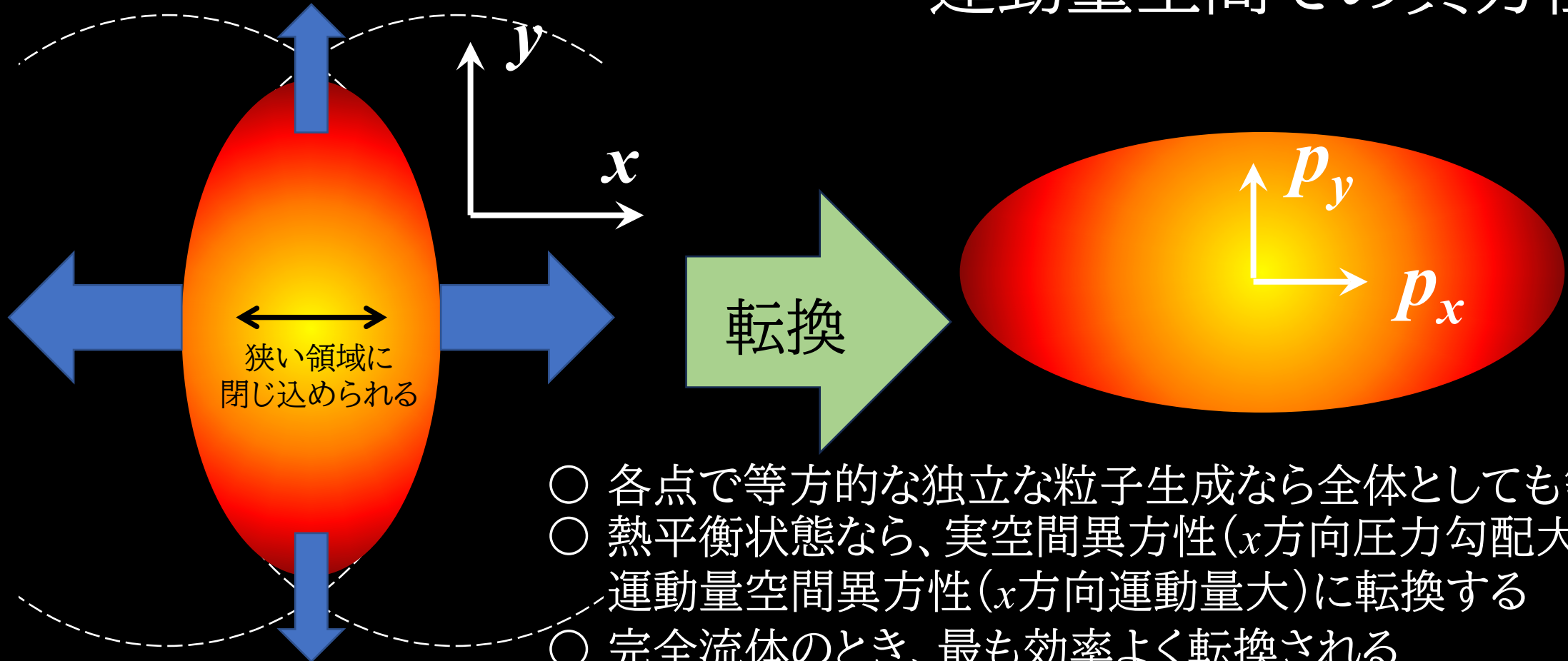


v_n : 揺らぎのフーリエ係数(各揺らぎの強さ)

QGPシグナルとしてのflow

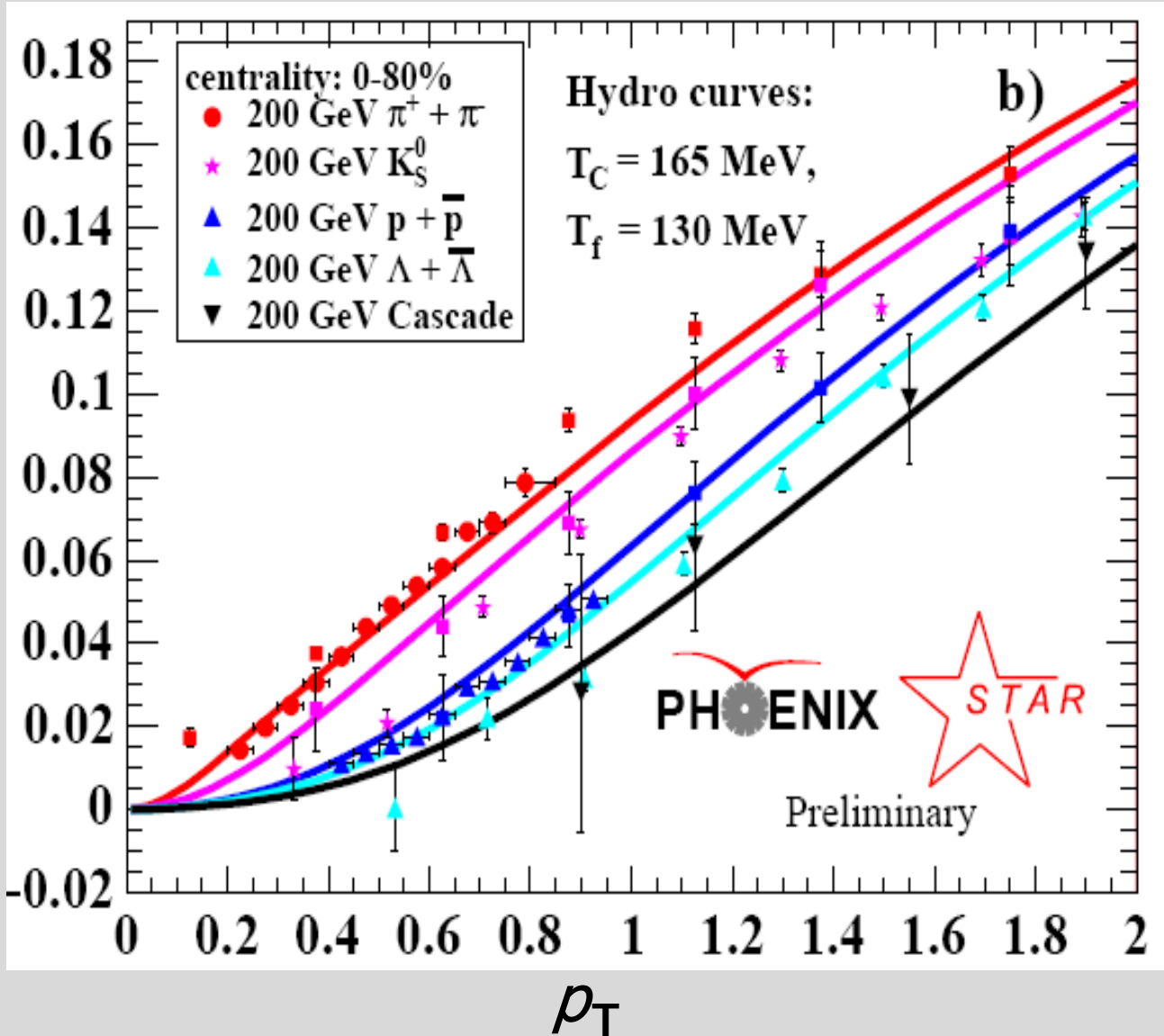
実空間での異方性
(eccentricity)

運動量空間での異方性



- 各点で等方的な独立な粒子生成なら全体としても等方的
- 熱平衡状態なら、実空間異方性 (x 方向圧力勾配大) が運動量空間異方性 (x 方向運動量大) に転換する
- 完全流体のとき、最も効率よく転換される

Evidence 4 : elliptic flow v_2



- RHICでは、非常に強い方位角依存性が測定され、初めて相対論的流体計算で説明された
- その流体計算は、粘性が「ゼロ」の完全流体だったので、生成したQGPは非常に小さな粘性を持つ、強く相互作用した液体であることを示唆
- QGPは「弱く相互作用するガス」という素朴な描像を覆した。

sQGP という描像の出現

その後、より現実的な計算として粘性(ずり粘性、体積粘性など)を取り入れた計算が進んで、今に至る。超弦理論との関係も。KSS bound $\eta/s < 1/4\pi$

Early Universe Went With the Flow

Posted April 18, 2005 5:57PM

BROOKHAVEN

New State of Matter Is 'Nearly Perfect' Liquid

Relativistic Heavy Ion Collision Joins Gold Atoms Together to Form a Trillion Early Universe as 'Liquid-Like'

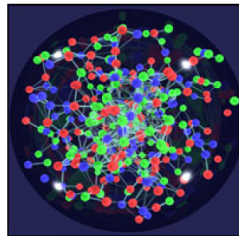
Physicists say they have created a new state of hot, dense matter by crashing together the nuclei of gold atoms.

The high-energy collisions prised open the nuclei to reveal their most basic known as quarks and

Physicists, at the US Brookhaven National Laboratory, say these particles behave as an almost perfect "liquid".

It is expected to help scientists explain the conditions that existed just milliseconds after the Big Bang.

Physicists working at Brookhaven National Laboratory announced today that they have created what appears to be a new state of matter out of the building blocks of atomic nuclei, quarks and gluons. The new state of matter, called the quark-gluon plasma, is thought to have existed in the moments after the Big Bang.



The impression is of matter that is more strongly interacting than predicted.

Physicists working at Brookhaven National Laboratory announced today that they have created what appears to be a new state of matter out of the building blocks of atomic nuclei, quarks and gluons. The new state of matter, called the quark-gluon plasma, is thought to have existed in the moments after the Big Bang.



Image: BNL

社会 asahi.comトップ > 社会 > その他・話題

宇宙の始まりはしづく? 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日 23時34分

science ORF.at

NEWS EVENTS LINKS

AUTOREN Autoren



Neues aus der Welt der Wissenschaft

ORF ON Science : News : Wissen und Bildung - Kosmos

Das Universum war am Anfang "flüssig"

Das Universum war direkt nach dem Urknall vermutlich einem Fluidum ähnlich. Das schließen dänische Forscher aus Experimenten am weltstärksten Kernbeschleuniger RHIC am Brookhaven National Laboratory.

Mit seiner enormen Kollisionsenergie bildet der RHIC rund 1.000 Milliarden Grad Celsius heiße Urmaterie vom Anbeginn der Zeit vor rund 13,7 Milliarden Jahren nach.

www.geografic.hu Tudomány

Magyar részvétellel fedezték fel az univerzum őanyagát

Az univerzum keletkezése utáni néhány milliomod másodperc állapotát sikerült modellezniük amerikai és magyar tudósoknak. Az Ősrobbanás utáni anyag forró, sűrű és folyékony lehetett.

Az amerikai Brookhaven Nemzeti Laboratórium (BNL) RHIC gyorsítója (Relativistic Heavy Ion Collider, Relativisztikus Nehézion-Ütköztető) mellett működő négy kísérleti csoport közös bejelentést tett: az ütköztetett nagyenergiás nehéz atommagokból sikerült előállítaniuk az anyagnak egy új, forró és sűrű állapotát. Az anyagnak ez az új formája az atommagok már ismert elemi építőköveiből, kvarkokból és gluonokból áll, viszont tulajdonságai jelentősen eltérnek az elméleti jóslatoktól, és igen figyelemreméltóak, mivel a



Liquid state

nehézion-ütközésekben keletkezett anyag nem szabad kvarkok és gluonok alkotta ideális gázként, hanem folyadékként viselkedik – olvasható a kfk.hu-n. A négy cikket, amelyeken a RHIC négy nagy nemzetközi kísérleti együttműködése közel egy éve dolgozik, a Nuclear Physics folyóirat egyszerre fogja közölni.

Early Universe

Quark-gluon blob surp

by Mark Peplow news@nature.com

The Universe consisted of results from an atom-smas

Scientists at the Relativistic Laboratory on Long Island quark-gluon plasma that is microseconds of its existence. But, strangely, it seems

search

Go

News

News

Search

Archiv

Photo

Strea

Fact S

Scien

Manag

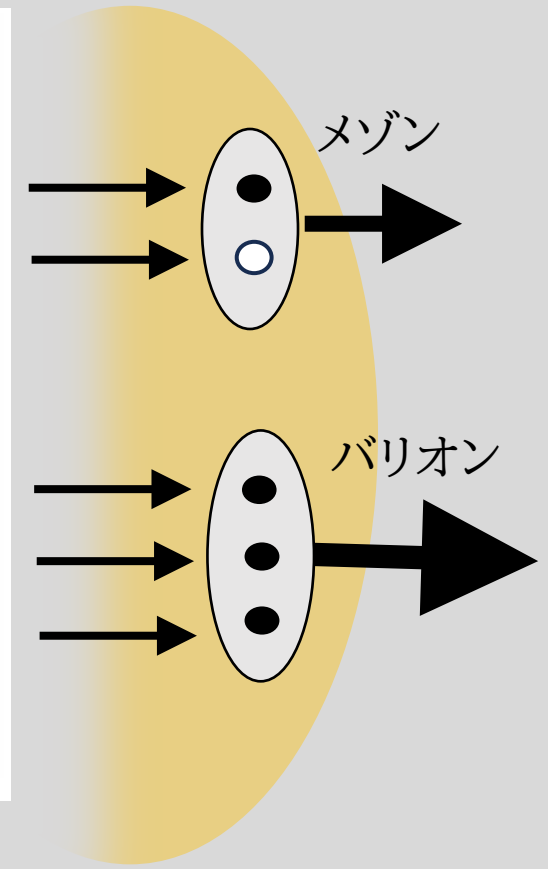
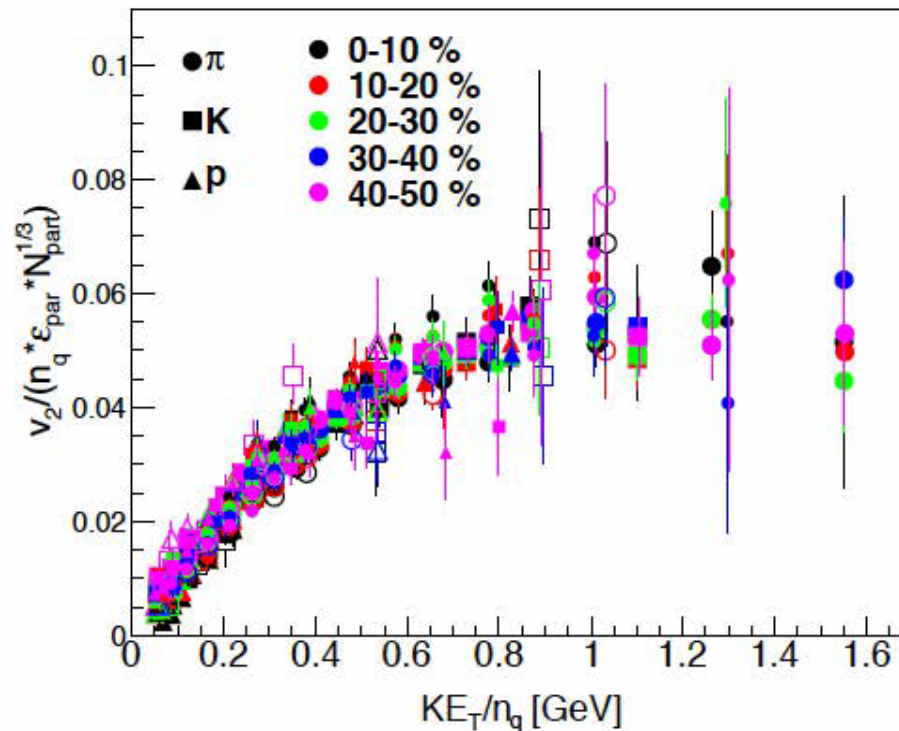
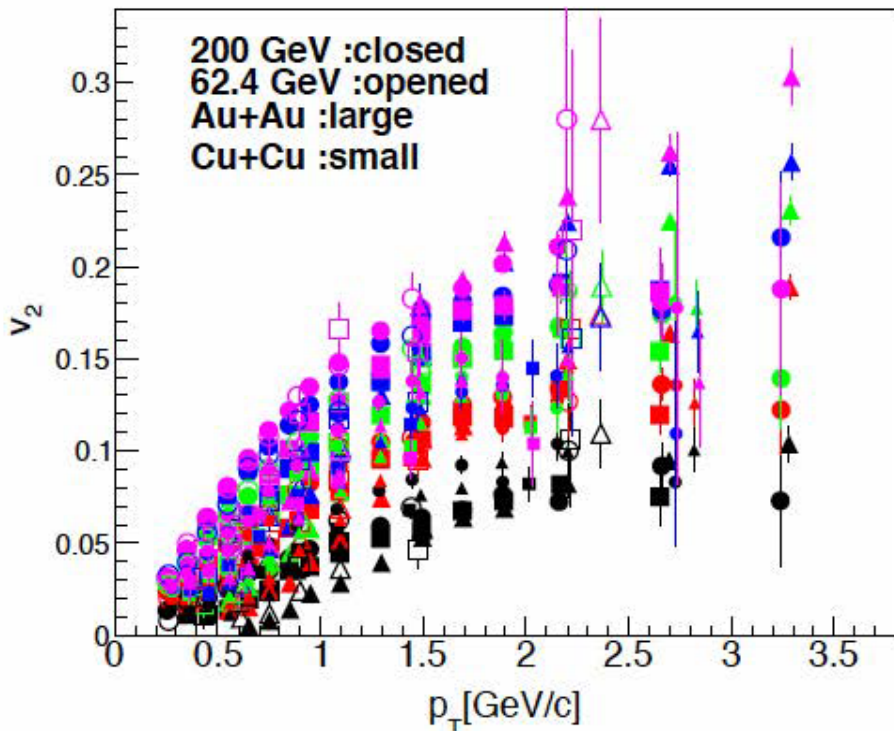
About

:: RH

Answer 'Dusty Shell' Aids Quest to See Matter as it Was

Evidence 5 : quark number scaling in v_2

π 、K、pなどの粒子ごとの v_2 を見ると、粒子によって異なる振る舞いを示す。しかし、粒子の構成クォーク数で割ると一つのカーブで表される。「クォーク数スケーリング」



- ハドロンのフローは、QGP相でのクォークのフローが起源
- QGP相の存在や、ハドロン化における「再結合描像」を強く示唆

Summary of evidences

- QGPを直接見るための外部からのプローブは存在しない
- 重イオン衝突で生成するQGP以外の自由度をプローブとして、間接的にその存在を確認
 - ジェット抑制 → 阻止能 dE/dx
 - 重いメソンの段階的溶解 → Debye質量
 - 熱光子 → 温度
- QGPが存在することで生成する集団的流れ
 - 強い楕円流れは強く相互作用する流体を示唆 → ずり粘性
 - 異なるハドロンの流れは、クォークの流れで統一的に解釈可能

Unsolved problems and hints from EM plasmas

Unsolved problems

- QGP熱化機構、早期熱化問題 (early thermalization problem)

- 局所熱平衡状態としてのQGPが生成するには有限の時間が必要だが、その機構が未解決（非可換ゲージ理論における非平衡過程の解明）
- 特に、流体計算から、熱平衡化は衝突から0.6fm/cという短期間で実現することが示唆される

- 直接光子パズル (direct photon puzzle)

- 「直接光子」の収量と強い楕円流れの両方を説明できる理論計算がない
- 収量の増大は初期過程に関係、楕円流れの増大は終状態に関係

他にもいろいろ*あるが今日はこの2つについて
* 小さい系におけるフロー、臨界終点の探索、など

QEDで起こることは全てQCDで起こる (個人の感想です)

1. クォークとグルーオンに起こることの一部は電子と光子との間に起こることと同等
(非可換群のうちに可換部分群があり、QCDのなかにQED的ダイナミクスがある)

2. クォークは電荷をもつため、クォークと光子との間のQEDを考えることに意味がある

→ ここでは、EM plasmaの知見が、QGPの未解決問題にヒントを提供している例

早期熱化問題：Weibel instability、より一般に plasma instability の応用

直接光子パズル：再結合過程の応用

Early thermalization problem

- 衝突後、有限の時間発展ののち、QGPは局所熱平衡状態として形成
- QGP形成後は、熱力学的量(温度、圧力など)に対する流体力学で記述
- 相対論的流体力学の解析(粘性や様々な輸送係数を含む)の結果、

衝突後 0.6 fm/c という超短時間での平衡化

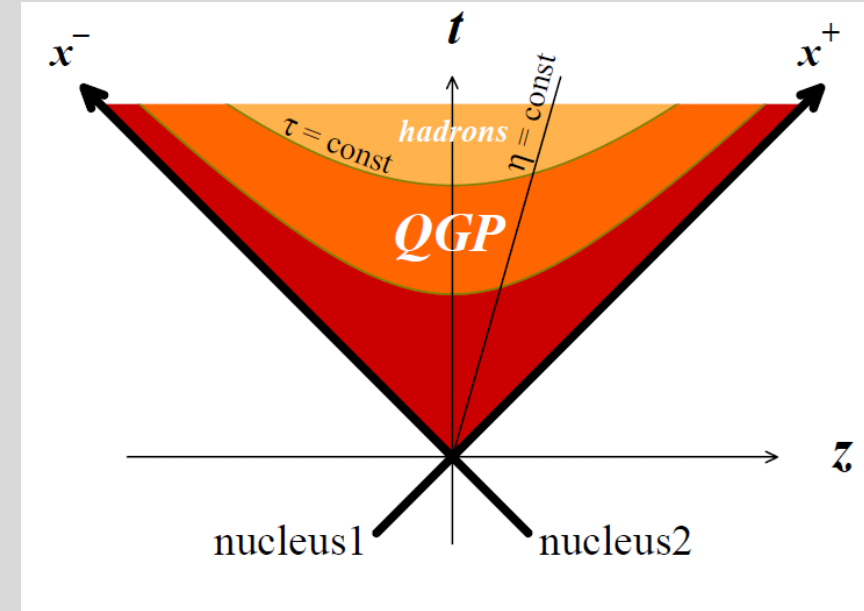
が示唆される。原子核同士がすり抜ける時間が0.2 fm/c程度。

(熱平衡化時間はシミュレーションのパラメータのうちの1つ)

熱平衡化

- エネルギー運動量テンソルの等方化
- 粒子分布が平衡分布に

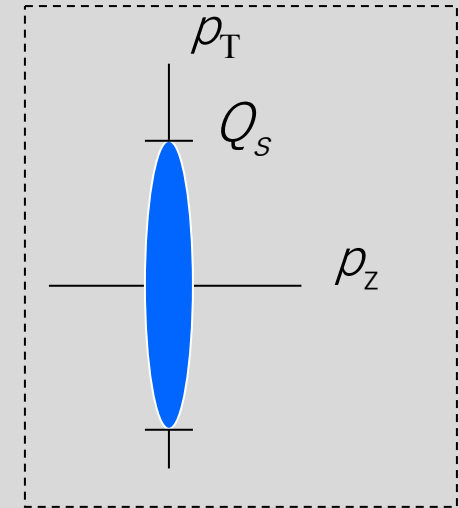
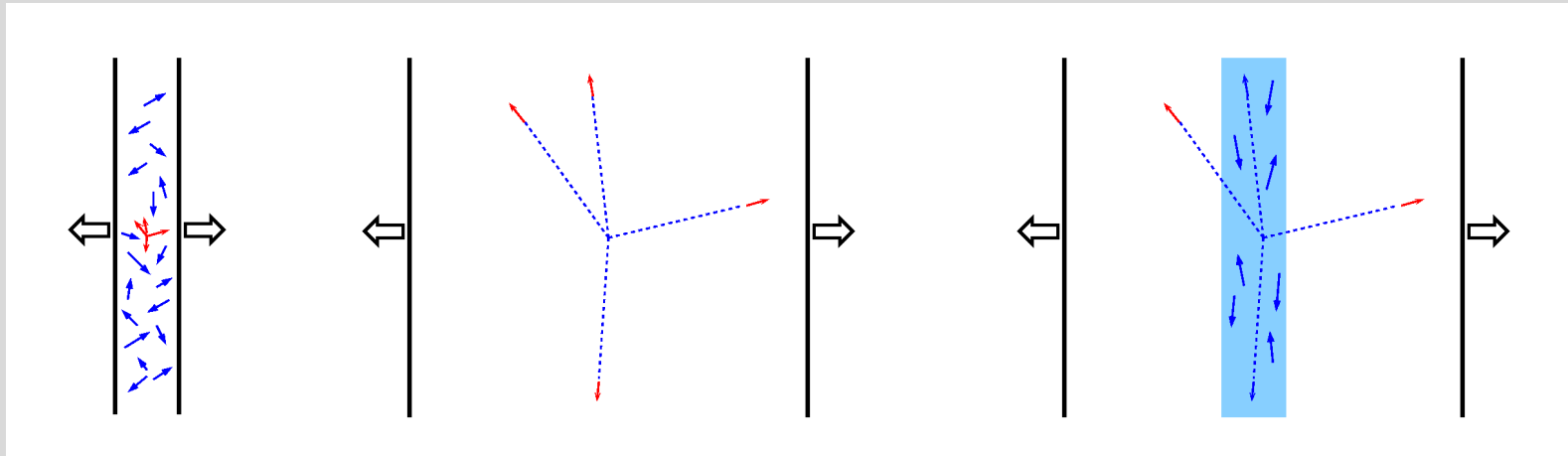
衝突後の強い異方性が短時間で等方的になる機構 → 不安定性が鍵では？



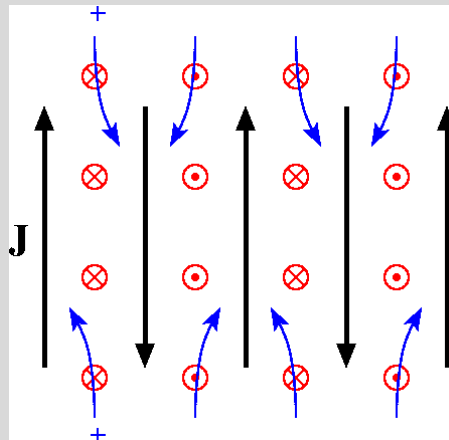
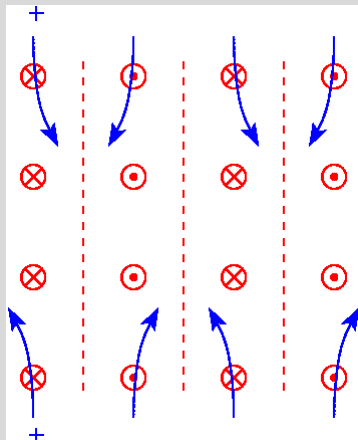
Plasma instability in QGP formation

(等方化の機構としてプラズマ不安定性を利用するというアイデアであり、まだプラズマはできていない)

衝突後のビーム軸方向の膨張が生成粒子の非等方性を与える



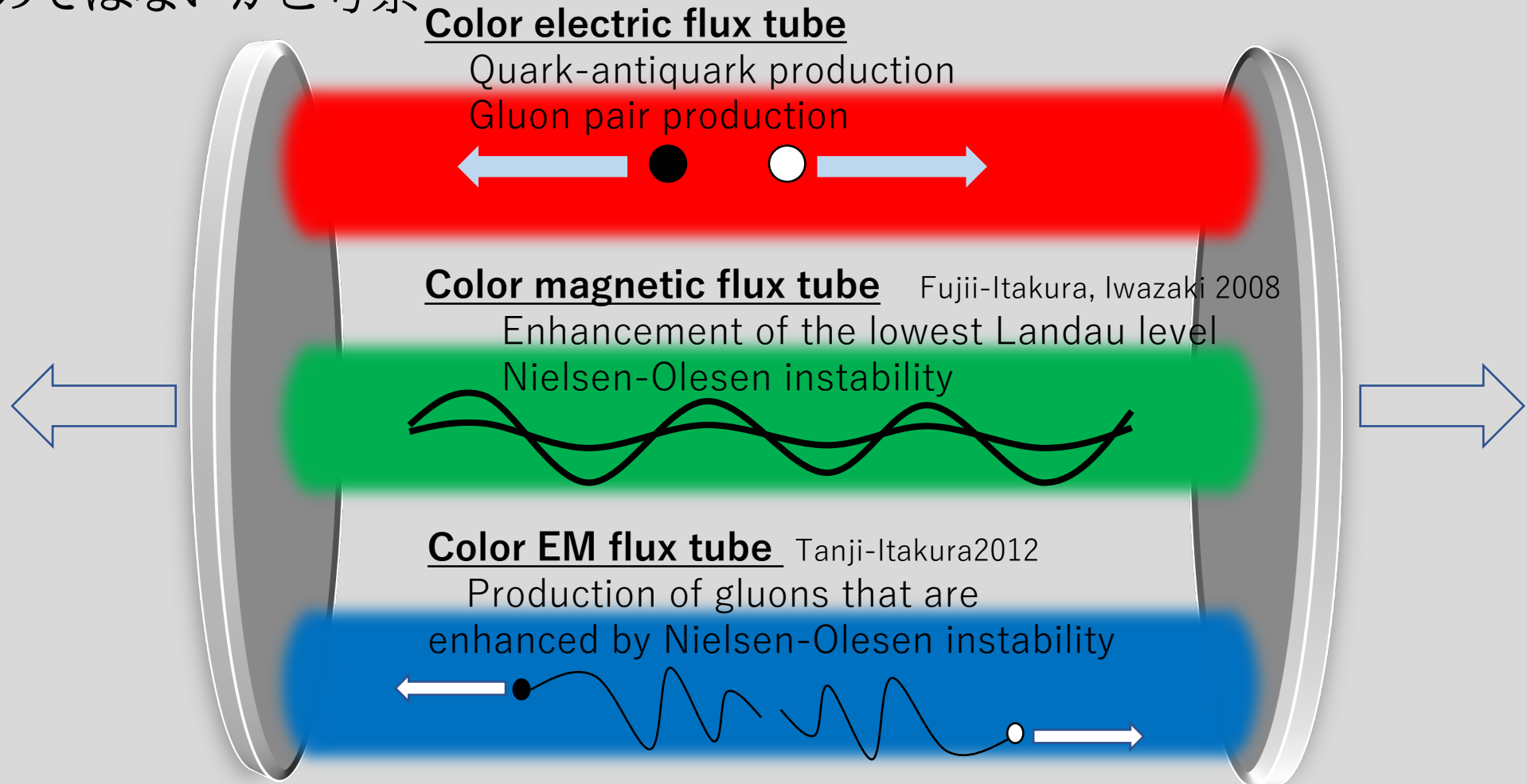
ビーム軸方向に緩やかな揺らぎを持つカラー磁場がWeibel 不安定性により増大



- 場のビーム軸方向のエネルギーが増大し、等方化に寄与する (Vlasov equationを解析)
- その後、乱流的な粒子分布に漸近

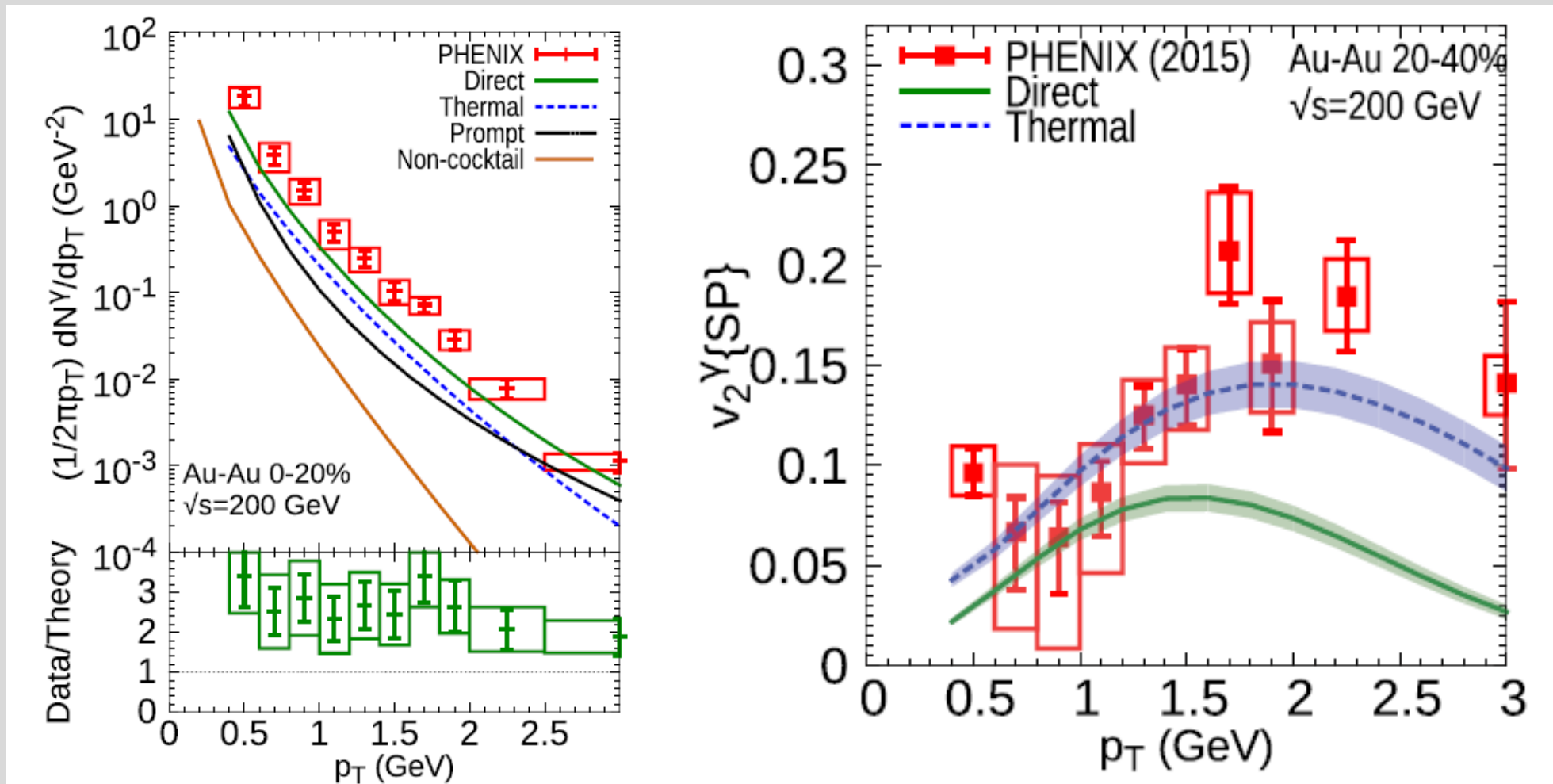
Glasma instability

Plasma instabilityの議論に触発され、より現実的なCGC-Glasma描像でも不安定性があるのではないかと考察



Direct photon puzzle

- 光子の収量は標準的な理論的枠組みでは説明しきれないほど多い ← 初期?
- 光子はパイ中間子と同程度の強い楕円流れを持つ ← 後期?



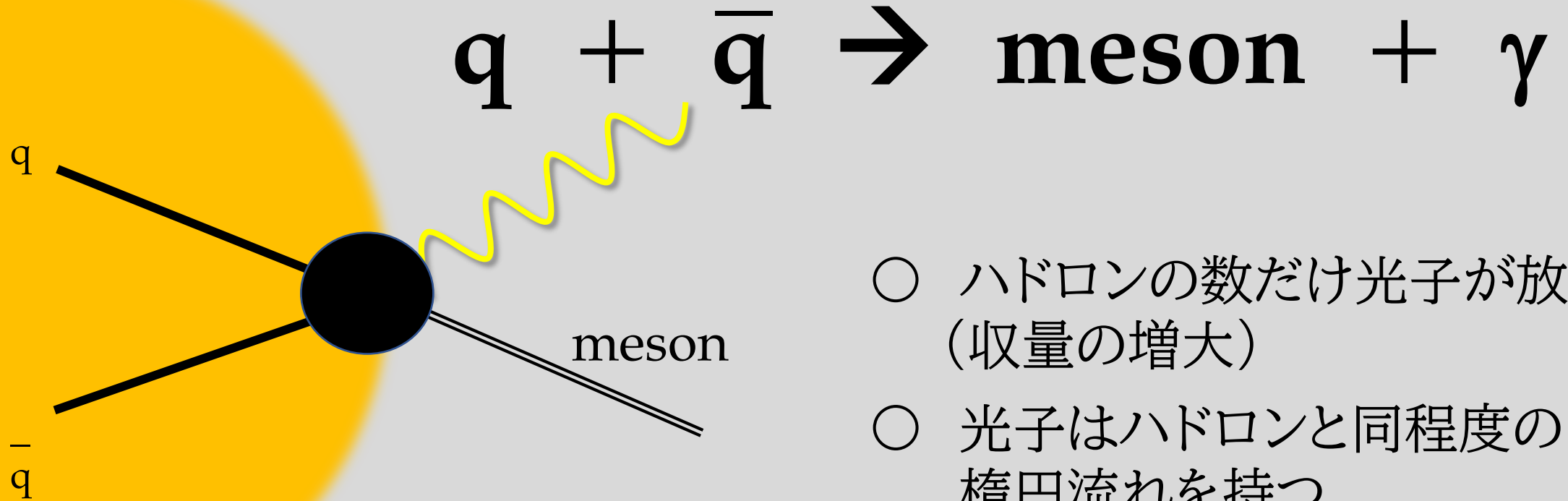
同時に
説明する
方法？

Radiative hadronization

H.Fujii, KI, K.Miyachi, C. Nonaka,
Phys. Rev. C106 (2022) 3, 034906

QGPがハドロンになる際に、 $q + q\text{bar} \rightarrow \text{meson}$ や $q+q+q \rightarrow \text{baryon}$ などが議論されていたが、エネルギー運動量を保存するために光子の放出が伴ってもよからう

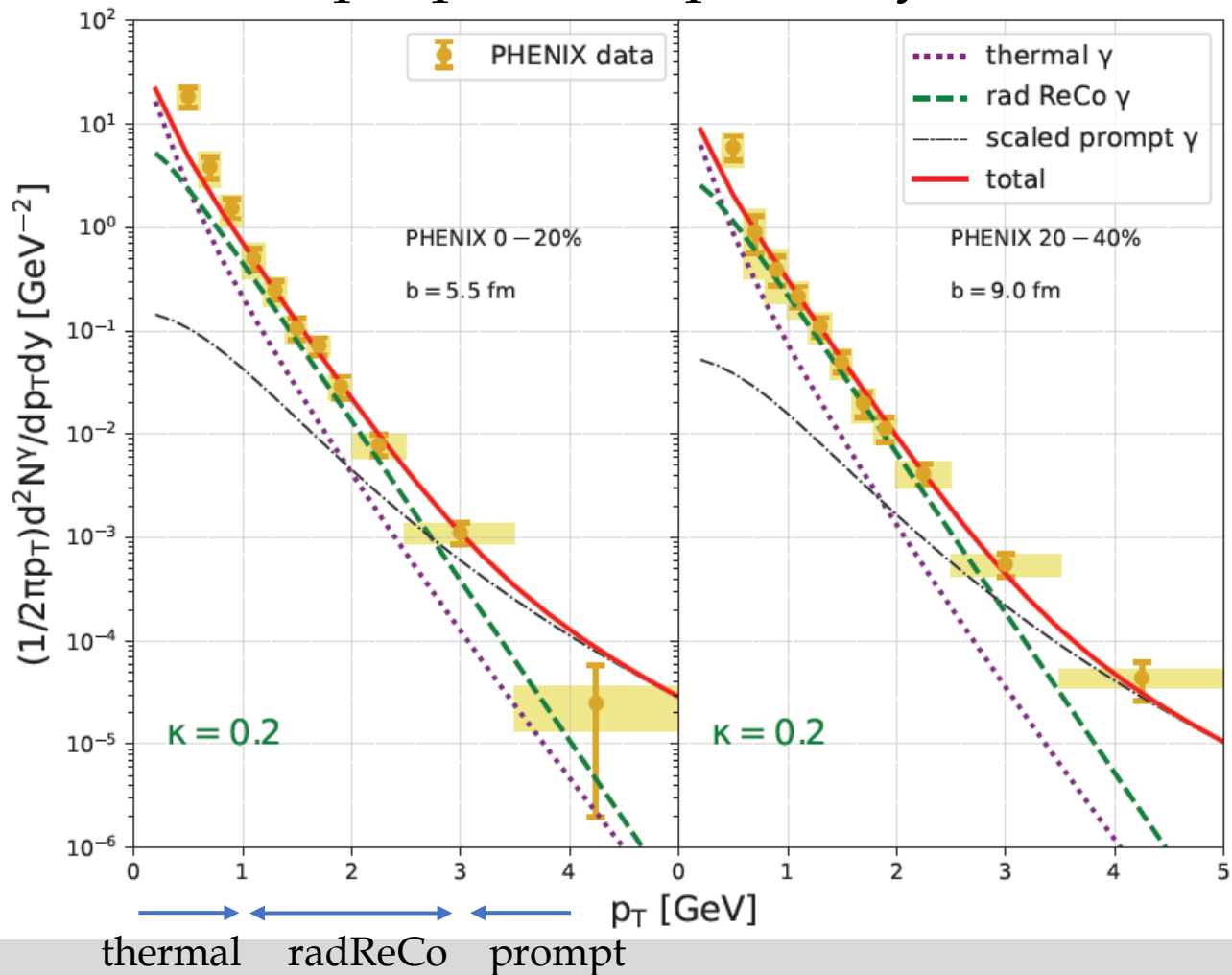
← EM plasmaにおける再結合過程の応用



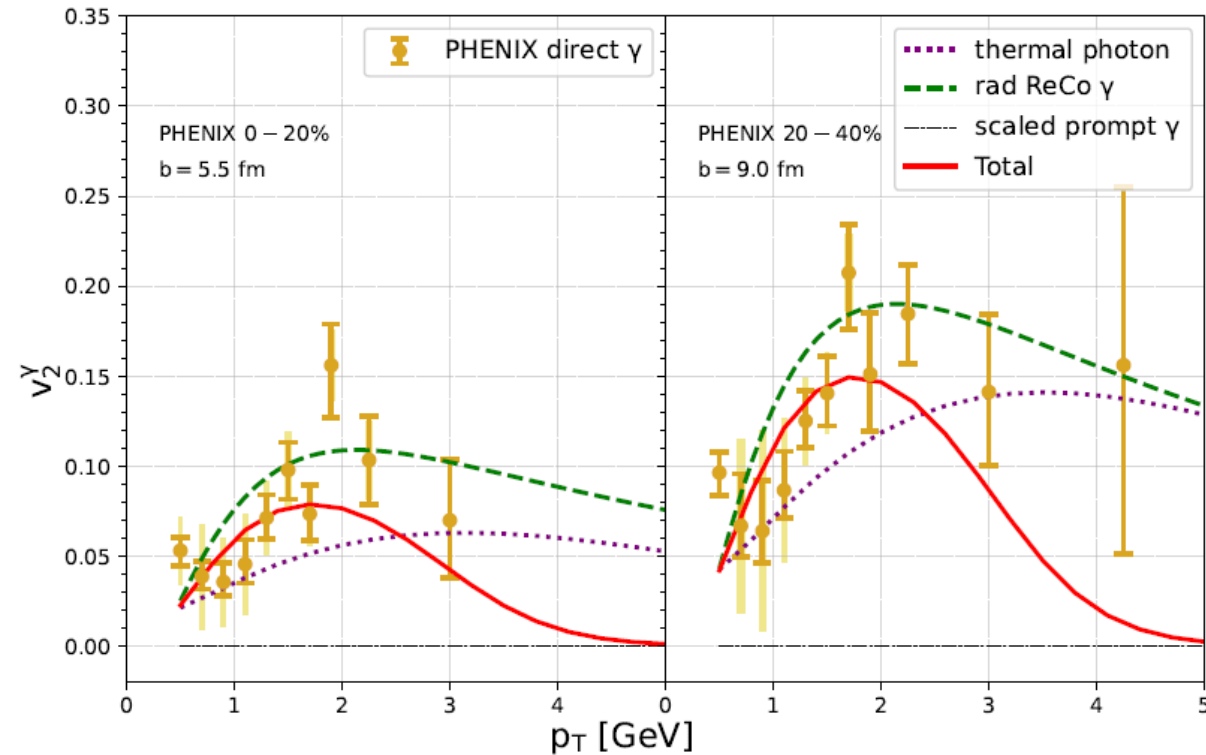
- ハドロンの数だけ光子が放出 (収量の増大)
- 光子はハドロンと同程度の楕円流れを持つ

Results

pt spectra of photon yield



elliptic flow



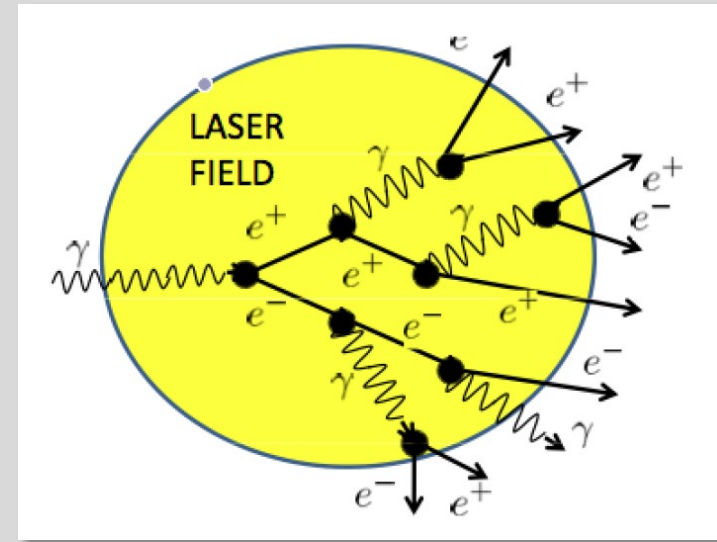
全体的な傾向を説明できる。
 但し、パラメータをいくつか持つ

More hints?

QED cascade

Schwinger 機構で生成した電子・陽電子対が加速されて高エネルギー光子を生成し、それがさらに電子・陽電子対を生成する、という雪崩過程。

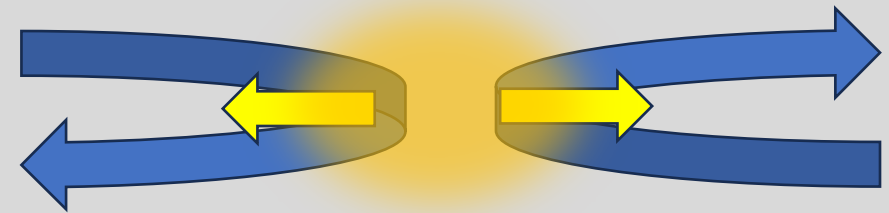
Schwinger 機構で電場の遮蔽をするよりも遥かに早く、大量の対生成によって電場の遮蔽を行う。たった一つの電子・陽電子対からでも可能。



Magnetic reconnection



ガラスフラックスチューブ



ビーム軸方向の運動量の獲得

QCDで可能か？

Higher harmonic generation

Future directions

Future directions

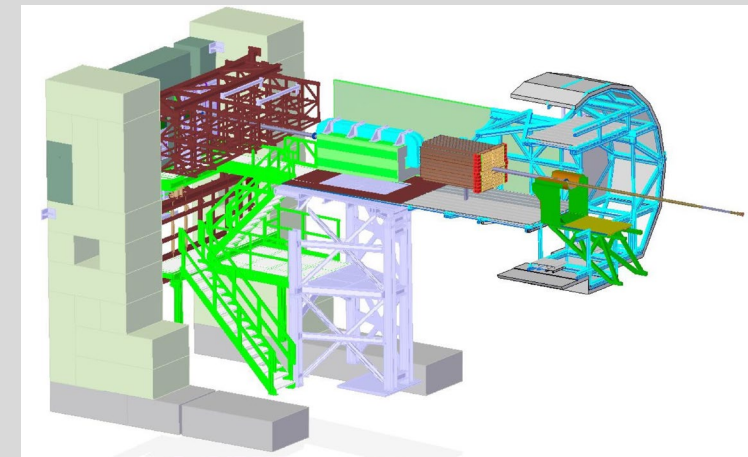
未解決問題に取り組む方向性

• よりビーム軸方向を探索 (ALICE-FoCal)

- ビーム軸方向は、QGPの影響が少なく、衝突初期の情報が残っている可能性有
- QGP生成機構の解明へつながる。グラスマの物理。
- 衝突前のカラーグラス凝縮自体の検出

• より高密度領域を探索 (J-PARC-HI, GSI-FAIR)

- 低エネルギーの重イオン衝突では標準核密度の数倍の高密度状態が作られる
- 相図中の「臨界終点」を探索する
- 中性子星内部の状態方程式の解明により、中性子星連星からの重力波放出の理解へ

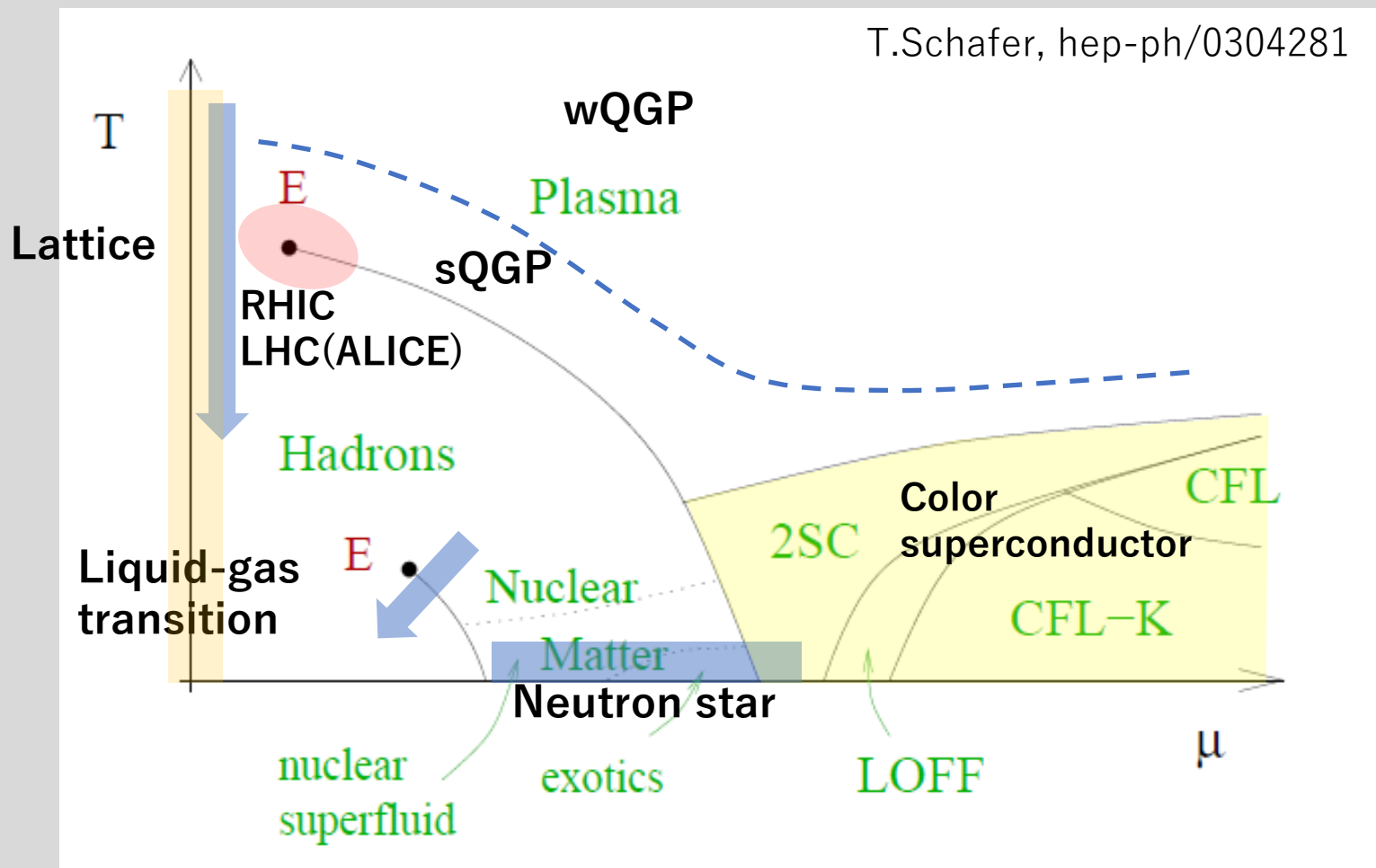


Summary

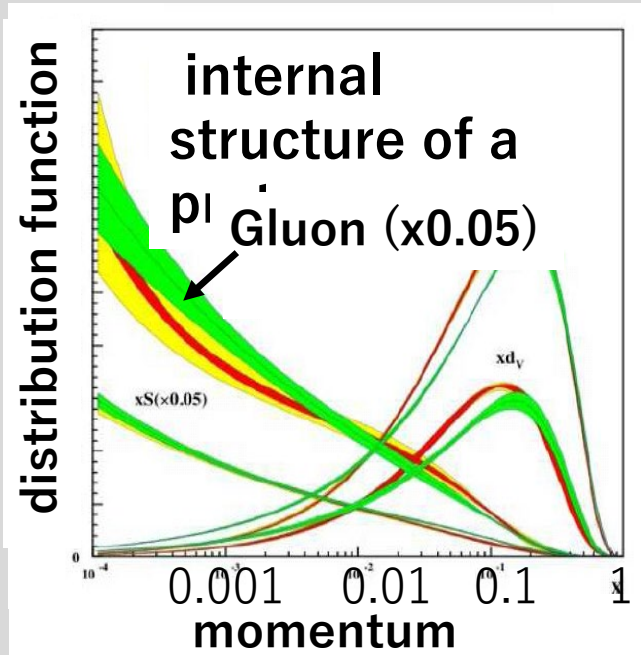
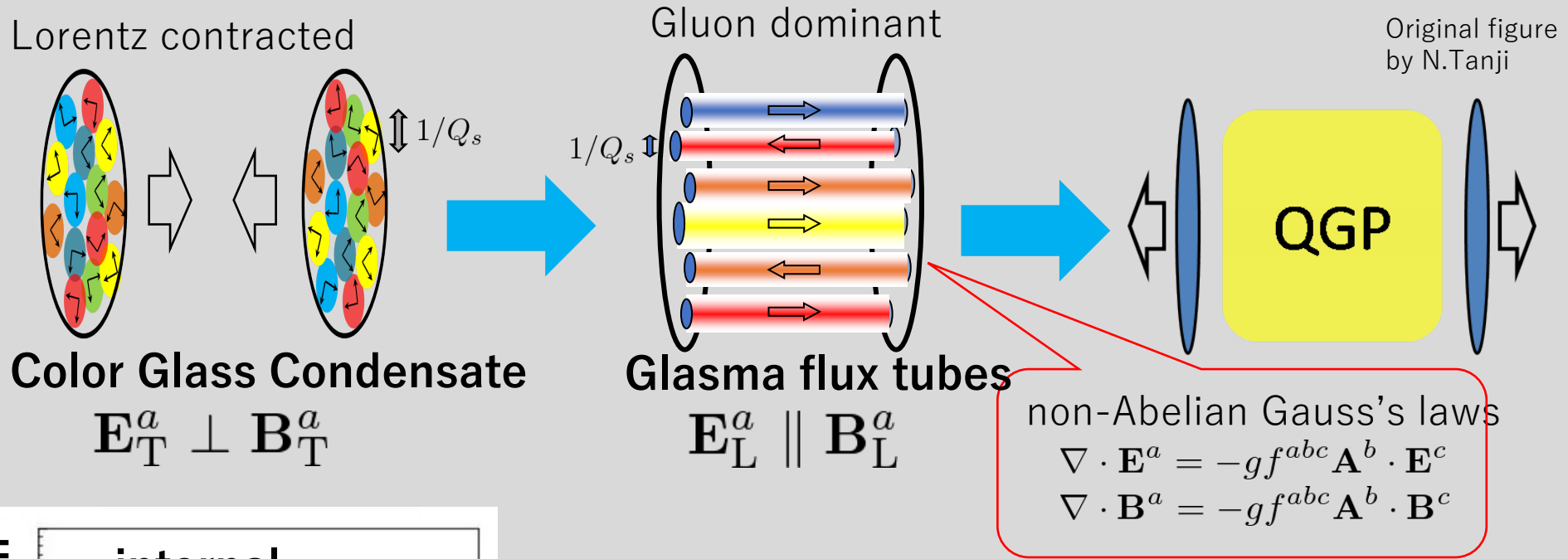
- QGPは宇宙誕生直後に存在した状態で、現在の物質の構成要素が作る存在形態としては極限的なもの。
- 高エネルギー重イオン衝突実験の結果、QGP生成を証拠づける多くの実験事実が得られた。
- 重イオン衝突で生成したQGPは、高い阻止能を持ち、強い集団性を示す。これらは、「弱く相互作用するガス」というより「強く結合した流体的なQGP」を示唆する。
- 早期熱平衡化問題や、直接光子パズルなどの未解決問題があるが、早期熱平衡化は衝突直後に存在する不安定性(Weibelなど)が鍵だと考えられており、直接光子パズルの一つの解決策としては、ハドロン化の際の再結合光子を考慮する案が提案されている。
- QEDで起こることはQCDでも起こると考えるとEM plasmaからのヒントが豊富にあり、今後もQGP研究にEM plasmaの知見は必要だろう。
- 重イオン衝突の物理はQGPの物理よりも豊かであり、極限状態の物理の総合的な場である。

QCD phase diagram (higher resolution)

T.Schafer, hep-ph/0304281



A modern picture of HICs



After the collision: GLASMA

Very strong color SU(3) electromagnetic fields

with flux structure

Both color ELECTRIC and MAGNETIC fields

$$\sqrt{gB} \sim \sqrt{gE} \sim Q_s \sim 1 - \text{a few GeV} \gg m_q$$

Strong fields, but weak coupling $Q_s \gg \Lambda_{\text{QCD}}$