量子色力学系における物性物理

板倉数記
KEK理論センター

素核物性クロスオーバー研究会
1/14-16, 2019

本講演の目標

- （世話人として本研究会の主旨を全うするため）物性研究者の皆様に、原子核・ハドロン物理での「QCD物性物理」（とされるもの）を概観することで、我々にとって物性物理および物性研究者との共同研究が如何に重要であるかを認識してもらう。

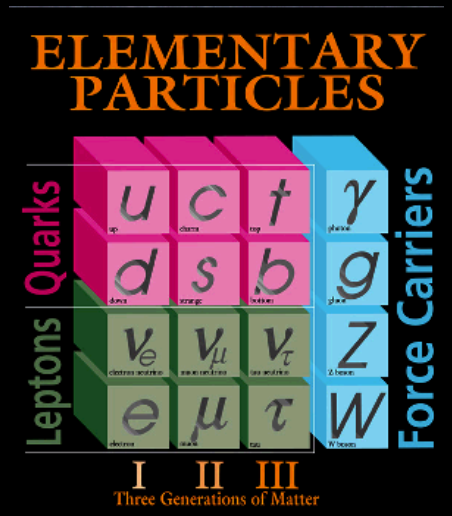
（QCD関係者には退屈かもしれませんが、ご容赦を、、、）

QCD minimum

量子色力学（Quantum ChromoDynamics）

- 強い相互作用に関する現象の基礎理論

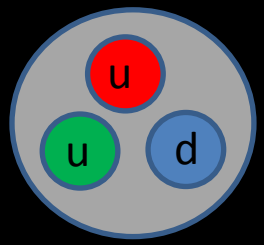
  束縛状態としてのハドロン（メソン（中間子）・バリオン（核子など））
  ハドロン間相互作用（核力）
  ハドロンの崩壊 (strong decay)



- 素粒子であるクォークとグルーオンの
  ダイナミクスを記述する非可換ゲージ理論

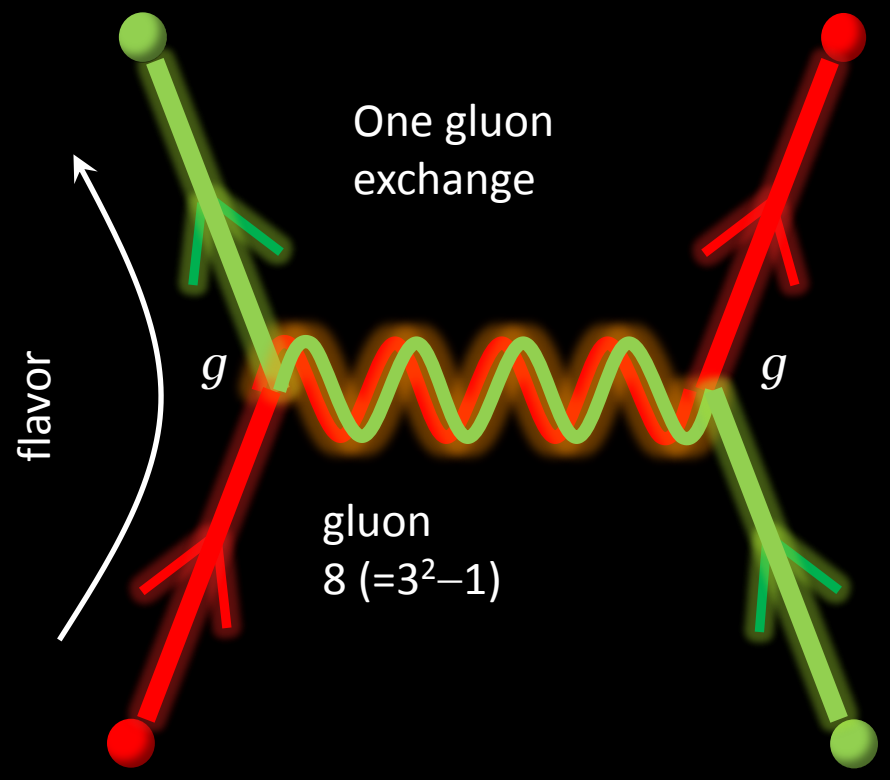
クォーク： スピン1/2、 質量の異なる6種類（フレーバー）、3種のカラー（SU(3)基本表現）
u,d,s（軽い）、c,b,t（重い）
電荷も持つ u: +(2/3)e, d: –(1/3)e

ex) 陽子： uud 中性子： udd

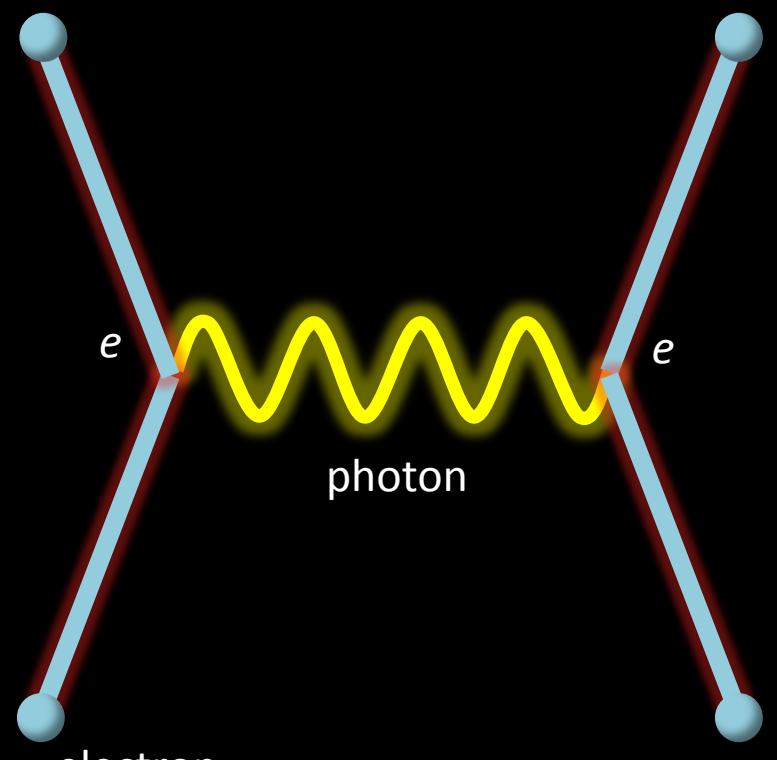


グルーオン： スピン1、質量ゼロ、8種類（SU(3)随伴表現）、クォーク間の相互作用

Quantum ChromoDynamics Quantum ElectroDynamics



quark
3 colors (RGB)→ SU(3)
6 flavors



electron
Electric charge → U(1)

グルーオンは3点、4点相互作用がある ← 対称性の非可換性

QCDの対称性

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

$$D_\mu = \partial_\mu + igA^a_\mu t^a,$$
$$F^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu - gf_{abc}A^b_\mu A^c_\nu$$

ψ^i_f : ***quarks*** fermions in fundamental representation of $SU(3)_c$

have "**color**" $i = 1, 2, 3$ (red, blue, green) and

"**flavor**" $f = 1, \ldots N_f$ (u, d, s, c, b, t) (also electric charges)

A^a_μ : ***gluons*** vector fields in adjoint rep. of $SU(3)_c$: $a = 1, \ldots 8$

Gauge symmetry

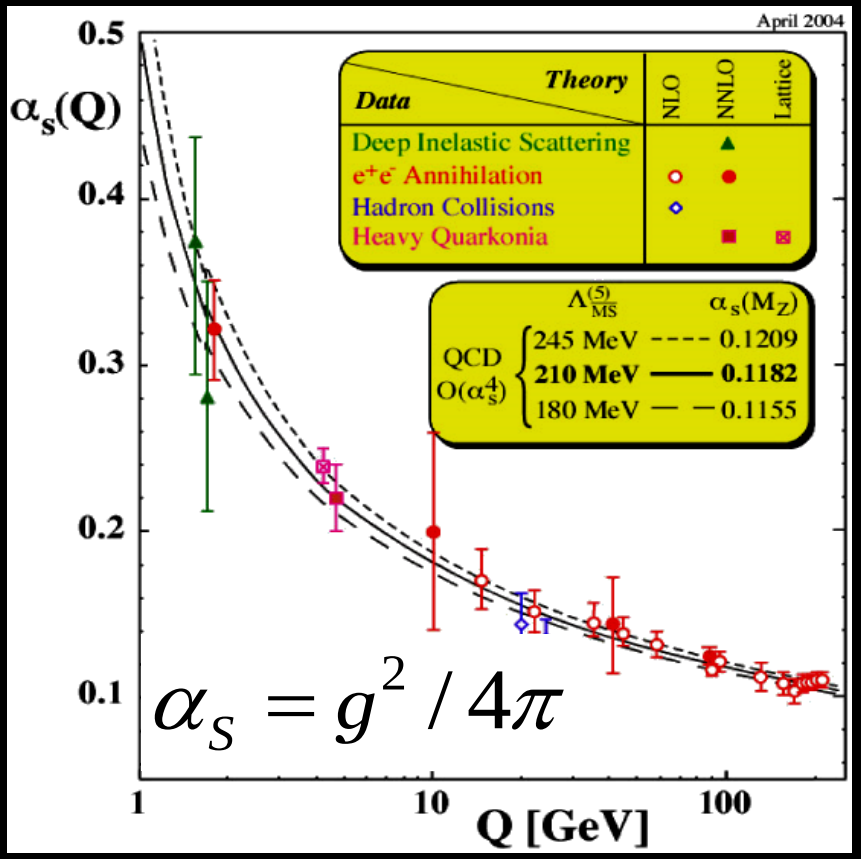
Rotation in three **color** space , Non-Abelian (analog of U(1) in QED)

Chiral symmetry

Rotation in **flavor** space w/ handedness, valid for **massless quarks**, $U_A(1)$ is anomalously broken. → $SU(N_f)_{L/R}$

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

漸近的自由性



有効結合定数がスケールによって変化する

強結合 @ low scales

「強い」相互作用の所以
非摂動的なため、解析は困難
QCDの重要な性質
- カイラル対称性の自発的破れ
- 閉じ込め

弱結合 @ high scales

高エネルギー反応、高温、高密度などの大きなスケールを含む状況では摂動計算が可能
- 深非弾性散乱、パートン描像
- クォーク･グルーオンプラズマ

Λ_{QCD} ：非摂動領域の典型的スケール ~ 200MeV

強結合領域での非摂動現象

- **閉じ込め**

  （低エネルギーでは）クォークやグルーオンはハドロンという束縛状態としてしか存在できず、単体では観測されない

  Order parameter (massless quark): Polyakov loop

$$L(\boldsymbol{x}) = \mathcal{P}\exp\left[-\mathrm{i}g\int_0^\beta \mathrm{d}x_4\, A_4(\boldsymbol{x}, x_4)\right] \quad \langle L\rangle \begin{cases} = 0 \Leftrightarrow \text{confined phase,} \\ > 0 \Leftrightarrow \text{deconfined phase,} \end{cases}$$

- **カイラル対称性の自発的破れ**

  Lagrangianにある質量を足しただけでは、ハドロンの質量を説明できない

  ex) $m_u \sim 2\mathrm{MeV}$, $m_d \sim 5\mathrm{MeV}$, $m_p \sim 938\mathrm{MeV}$

  Masslessの時にあるカイラル対称性が自発的に破れて、クォークが有効的に「重く」なると考える。軽いパイ中間子はそれに伴うNGボゾン。

  Order parameter: Chiral condensate

$$\langle\bar{\psi}\psi\rangle = \langle\bar{\psi}_{\mathrm{R}}\psi_{\mathrm{L}} + \bar{\psi}_{\mathrm{L}}\psi_{\mathrm{R}}\rangle$$

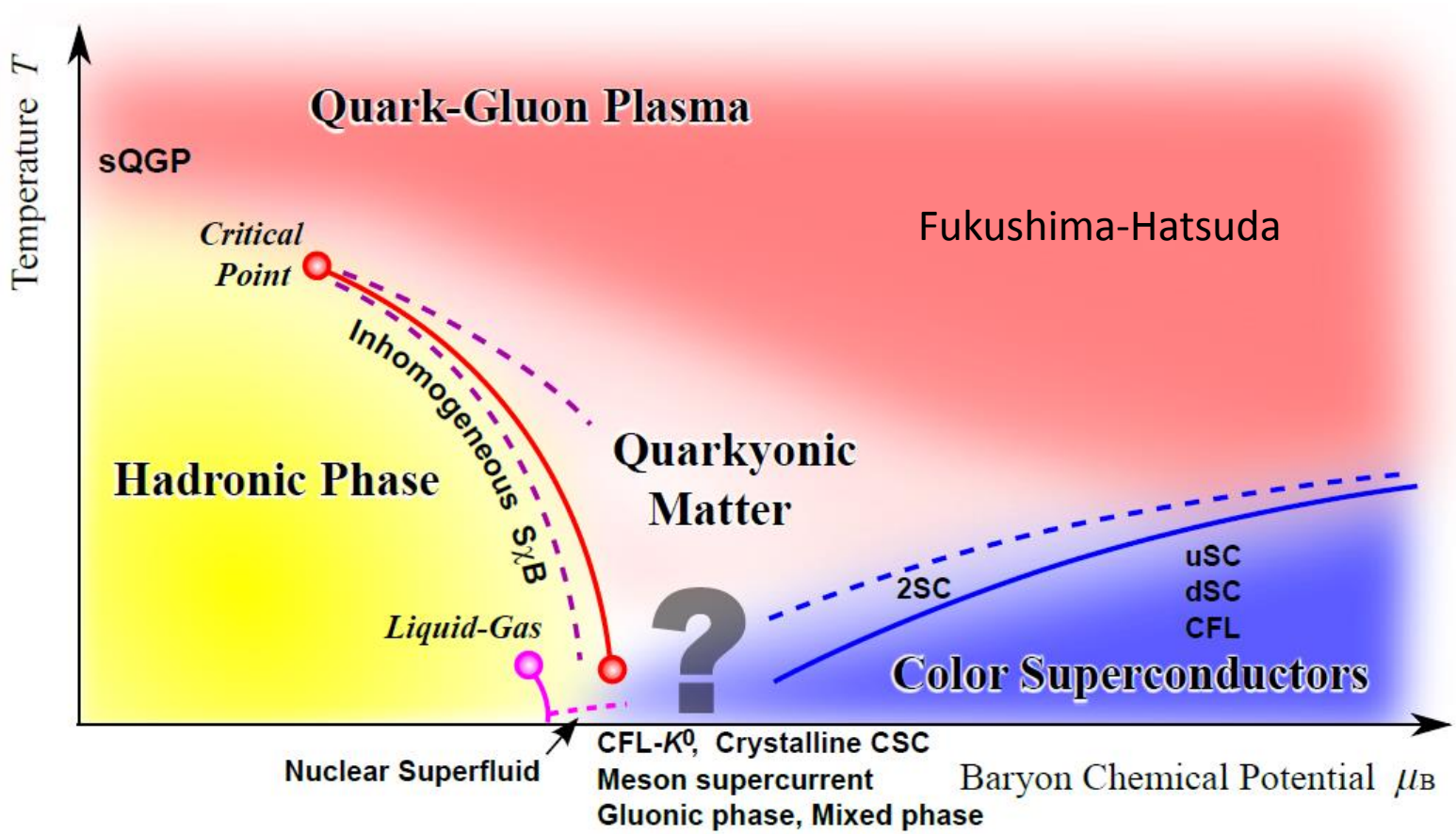
右巻きと左巻きを混ぜる

$$\mathrm{SU}(N_f)_L \times \mathrm{SU}(N_f)_R \to \mathrm{SU}(N_f)_V$$

QCD物性物理

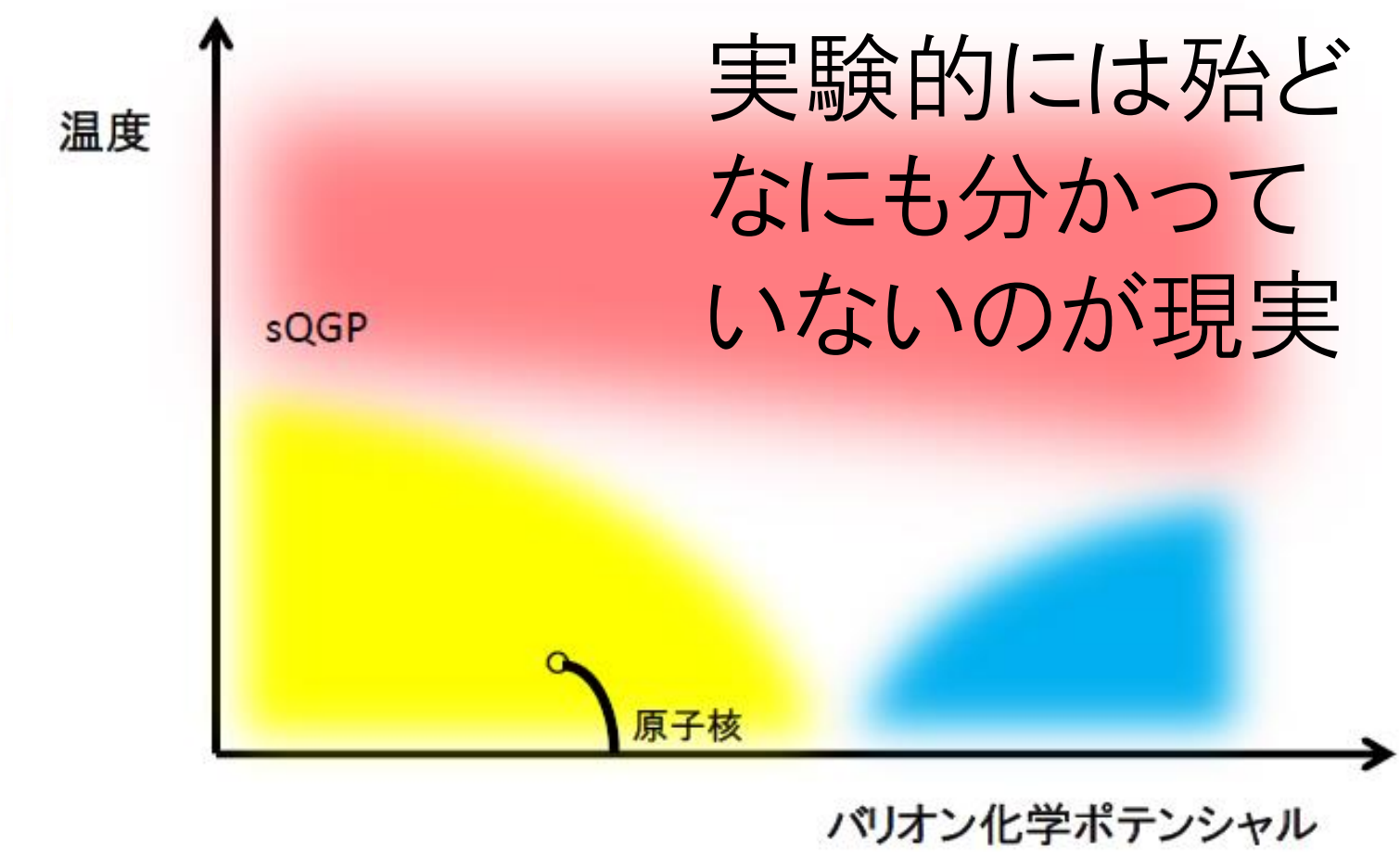
「QCD物性物理」の理想と現実

conjectured “QCD phase diagram”



Fukushima-Hatsuda

「QCD物性物理」の理想と現実



実験的には殆どなにも分かっていないのが現実

Phase diagram (一番粗い議論)

コントロールパラメータ: 結合定数の引数になり得る

T 温度, μ クォーク(バリオン)化学ポテンシャル ←「QCD相図」

E, Q^2 散乱エネルギー、分解能

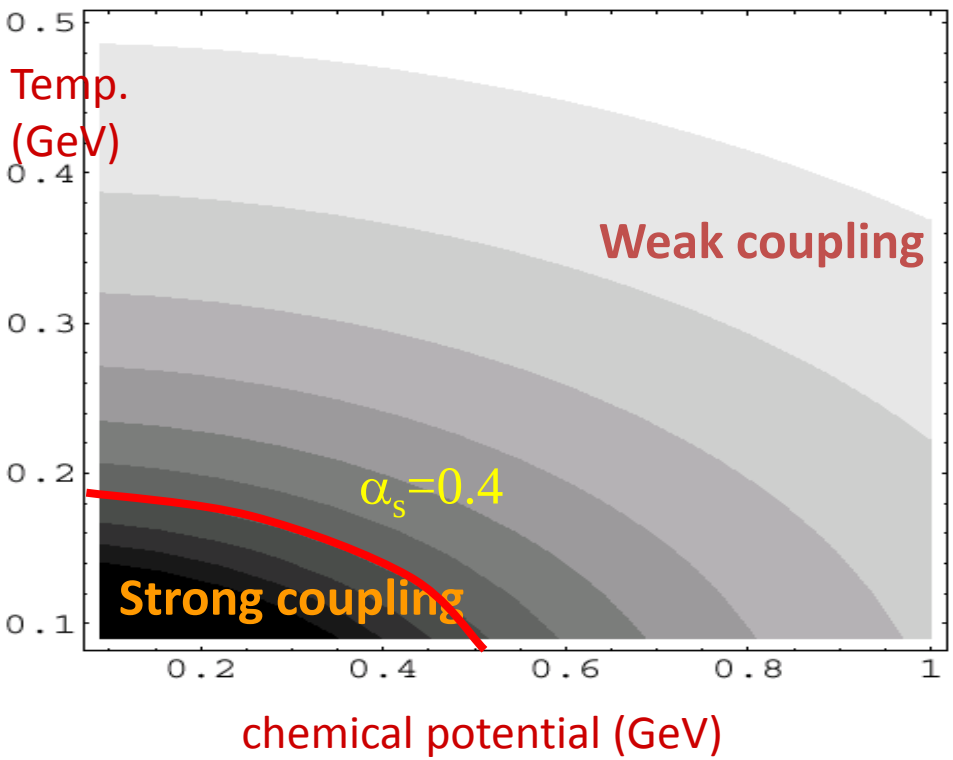
$$\alpha_S(Q), \quad Q = 2\pi\sqrt{T^2 + \mu^2/\pi^2}$$

有限温度・有限密度の場の理論での引数としての自然な入り方

カイラル対称性の破れも閉じ込めも「強結合」に起因する現象

Collins-Perry, PRL34(1975) 1353

漸近的自由性と遮蔽効果があれば
高密度で非閉じ込め状態が可能と推測



Phase diagram (一番粗い議論)

コントロールパラメータ: 結合定数の引数になり得る

T 温度, μ クォーク(バリオン)化学ポテンシャル ←「QCD相図」

E, Q^2 散乱エネルギー、分解能

$$\alpha_S(Q), \quad Q = 2\pi\sqrt{T^2 + \mu^2/\pi^2}$$

有限温度・有限密度の場の理論での引数としての自然な入り方

カイラル対称性の破れも閉じ込めも「強結合」に起因する現象

Collins-Perry, PRL34(1975) 1353

漸近的自由性と遮蔽効果があれば
高密度で非閉じ込め状態が可能と推測

Cabibbo-Parisi PLB 59 (1975) 67

-- 最初の相図
-- 漸近的自由性について触れず

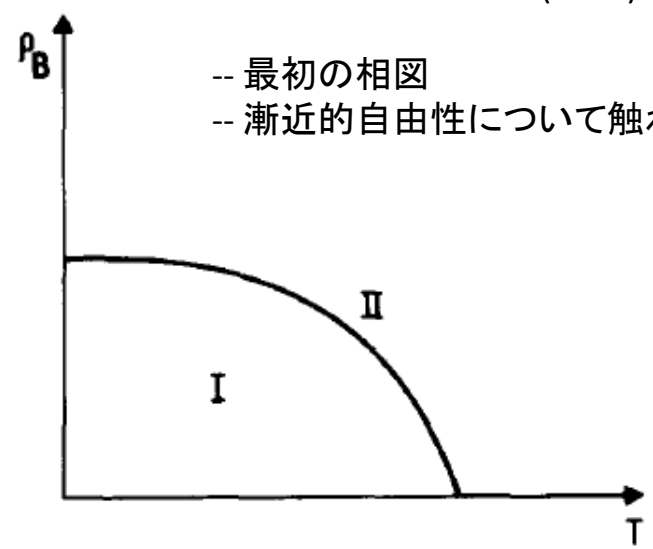


Fig. 1. Schematic phase diagram of hadronic matter. ρ_B is the density of baryonic number. Quarks are confined in phase I and unconfined in phase II.

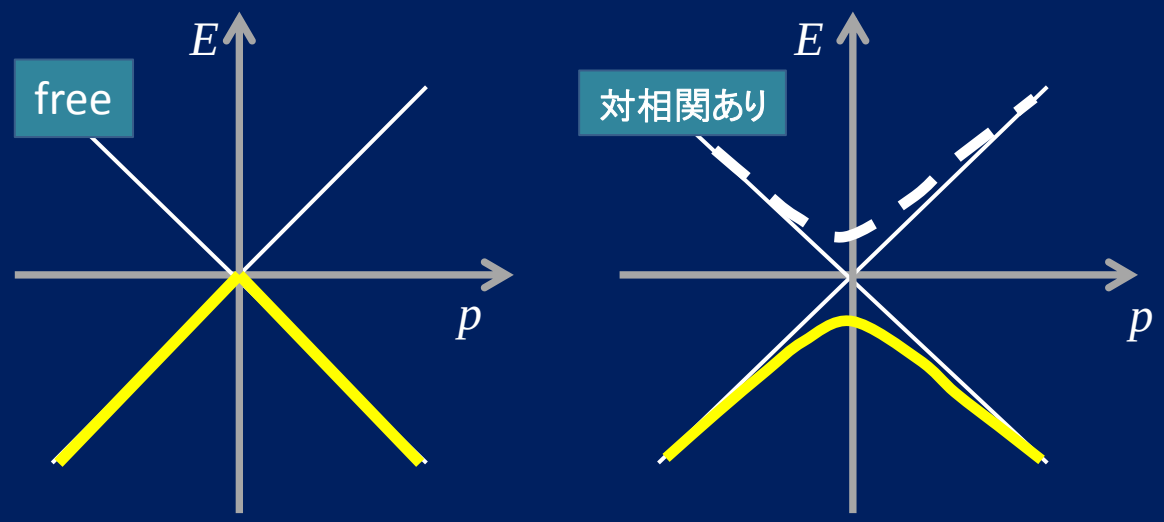
QCD物性物理とは？

クォークとグルーオンという自由度の量子多体系の物理

1. 真空の物理

フェルミ系の相対論的場の量子論： 真空 ＝ Dirac seaが詰まった状態

カイラル対称性の破れ ＝ 粒子と反粒子とのpairingによるギャップ生成



「真空は媒質として振る舞う」 Weisskopf 1936

媒質としての性質： 外場に対する応答に顕在化 ← 強い場の物理

cf）誘電体、磁性体 の 電場、磁場に対する応答

QCD物性物理とは？

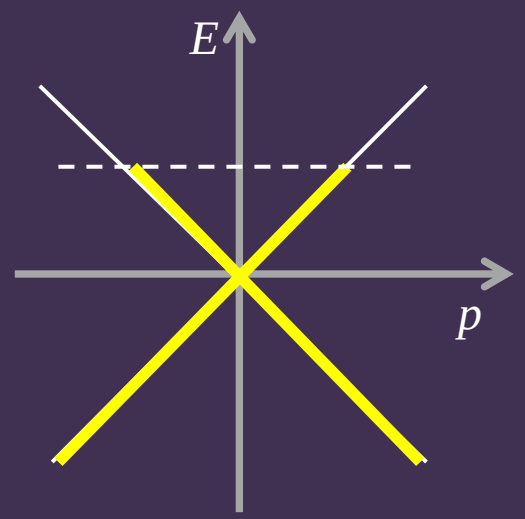
クォークとグルーオンという自由度の量子多体系の物理

1. 真空の物理

2. 低温･高密度の状態 ： 非閉じ込め相

低温で、クォーク密度が大きい状態 ： static matterの物理

カラー超伝導 ＝ クォーク･クォーク間のpairingによるギャップ生成



反粒子から十分離れていれば（高密度なら）、反クォークとのPairingは考えなくて良い

クォークの持つカラーとフレーバーによって様々なパターンが可能

QCD物性物理とは？

クォークとグルーオンという自由度の量子多体系の物理

1. 真空の物理

2. 低温･高密度の状態　：　非閉じ込め相

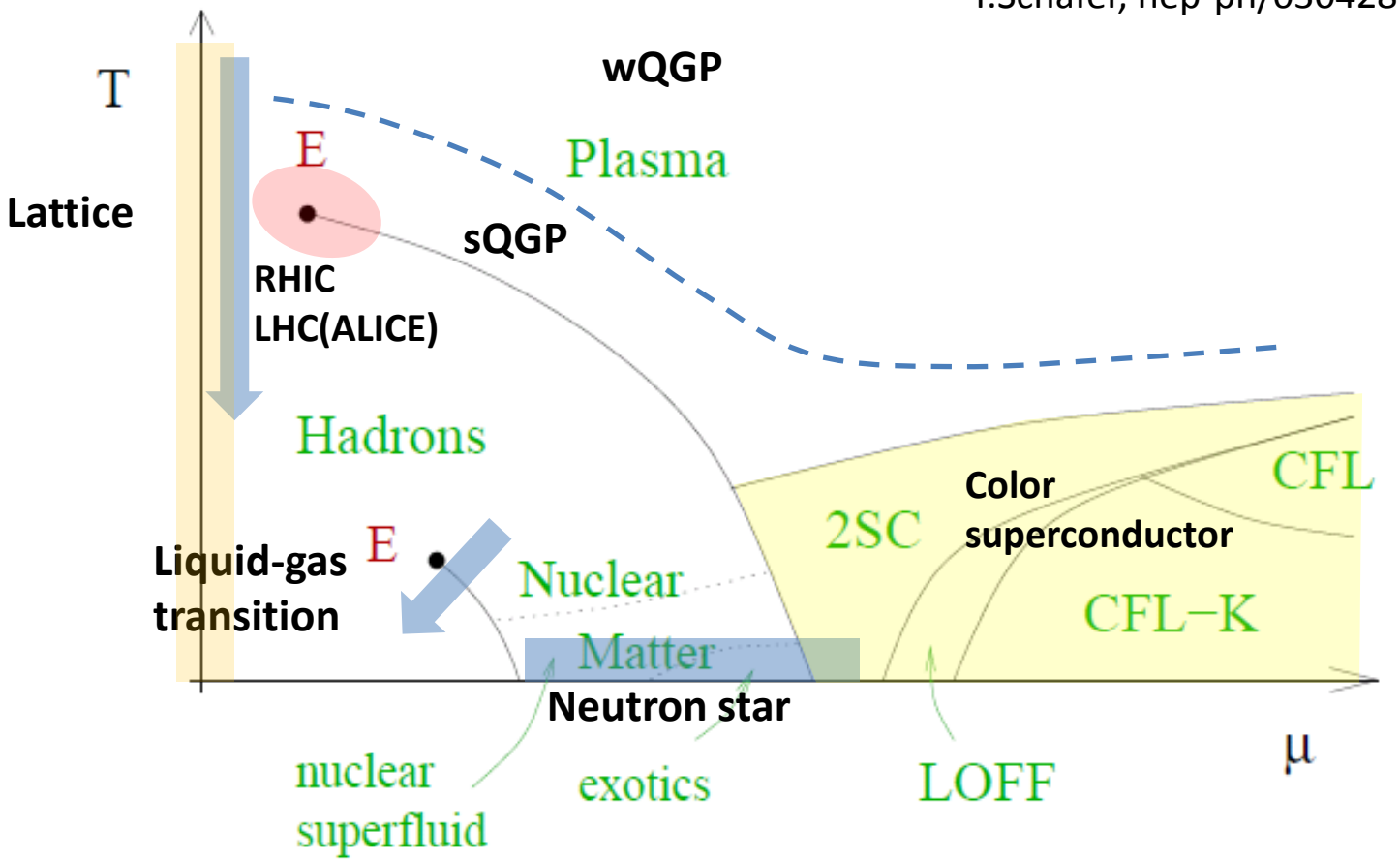
3. 高温･低密度の状態　：　非閉じ込め相

クォーク･グルーオンプラズマ

重イオン衝突で生成し、定常的に存在はできない：　dynamic matter
時間発展（膨張）する局所熱平衡状態
→ 強い集団的流れ、揺らぎを持つ流体　“sQGP”（⇔ wQGP)
→ 輸送係数による特徴づけ
　　ずり粘性、体積粘性、エネルギー阻止能、など
→ 相対論的流体力学の発展
　　粘性、量子異常を含む相対論的流体
類似の物性系：　レーザーによるペアプラズマ、半導体の電子正孔プラズマ

QCD Phase diagram

T.Schafer, hep-ph/0304281



More about color superconductivity

Color superconductivity

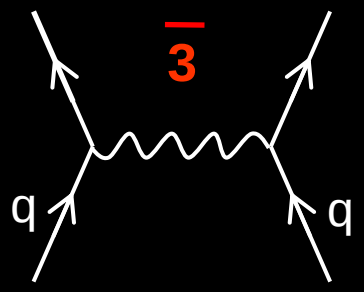
クォーク対がpairingを形成して起こる現象

クォーク対の引力は？どのようなクォーク対に働く？

$[3]_C \times [3]_C = [6]_S + [\bar{3}]_A$

非可換性に起因

$$(\tau_a)_{ij}(\tau_a)_{kl} = \frac{2}{3}(\tau_S)_{ik}(\tau_S)_{lj} - \frac{4}{3}(\tau_A)_{ik}(\tau_A)_{lj}$$



あらゆるクォーク対が引力のチャンネルを持つ → フェルミ面を大きく変更しうる

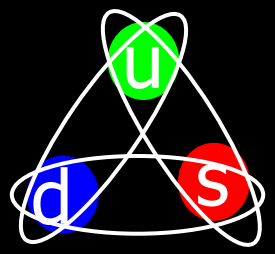
クォークの持つカラー、フレーバーがもたらす非自明な構造は？

$\mu \gg m_s$ のとき：u, d, sをゼロ質量と扱える

→ カラー対称性とフレーバー対称性の「区別」なくなる

Color Flavor Locking (CFL)

$$\left\langle \psi_i^{\alpha} C \gamma_5 \psi_j^{\beta} \right\rangle = \Delta_{CFL} \varepsilon^{\alpha\beta A} \varepsilon_{ijA}$$



カラー(α,β) とフレーバー(i,j)が勝手に回転できない(ロックされている)

$$\sum_I \epsilon_{ijI}\epsilon^{\alpha\beta I} = \delta_i^{\alpha}\delta_j^{\beta} - \delta_j^{\alpha}\delta_i^{\beta}$$

$SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(3)_R \rightarrow SU(3)_{C+L+R}$

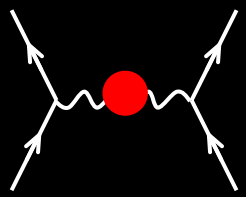
Color superconductivity

ギャップはどれくらい大きいのか？

有限密度ではカラー磁気相互作用は遮蔽されない

Gluon propagator

$$D_{\mu\nu} \approx -\frac{P^L_{\mu\nu}}{\vec{p}^2 + m_D^2} - \frac{P^T_{\mu\nu}}{\vec{p}^2 + i(\pi/4)m_D^2 |\omega/\vec{p}|}$$



カラー磁気相互作用が「非BCS的」で大きなギャップを与える（ $\Delta/\mu \sim T_C/\varepsilon_F \sim 0.1$ ）

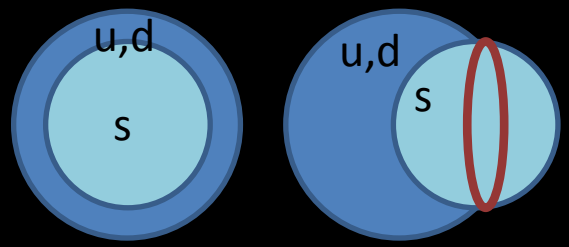
$$\Delta \sim \mu g^{-5} \exp\left(-\frac{3\pi^2}{\sqrt{2}g}\right)$$

← BCS的ならg^2依存性

結合定数やμの値によるが、大きい場合には100MeV程度にもなる

ストレンジクォークはアップ、ダウンに比べて比較的重いが？

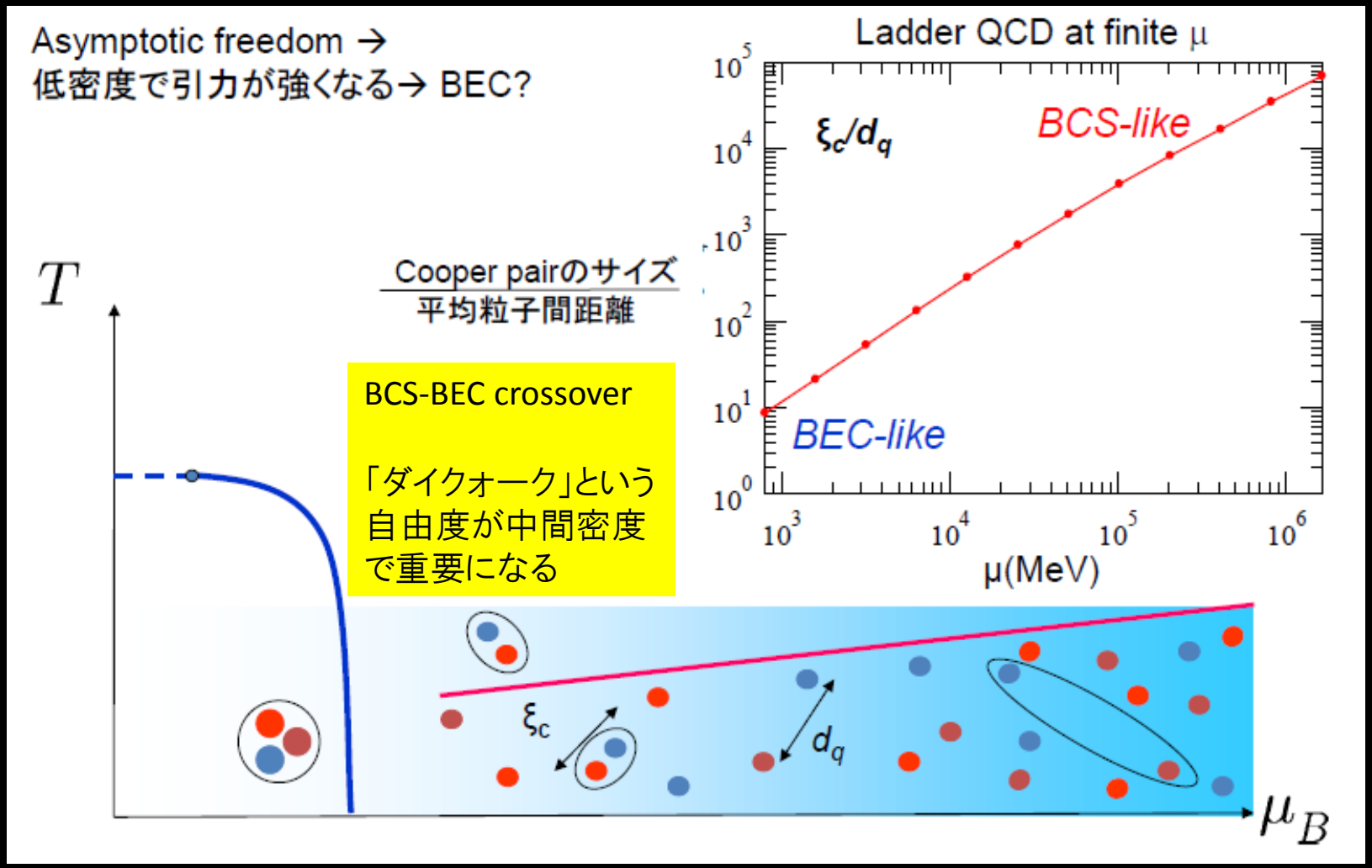
μがm_sよりも十分に大きくない場合は、Fermiエネルギーのミスマッチが生じる



→ Fermi球をずらし、オーバーラップを作ることで
Cooper対を生成
FFLO　非一様な超伝導の可能性

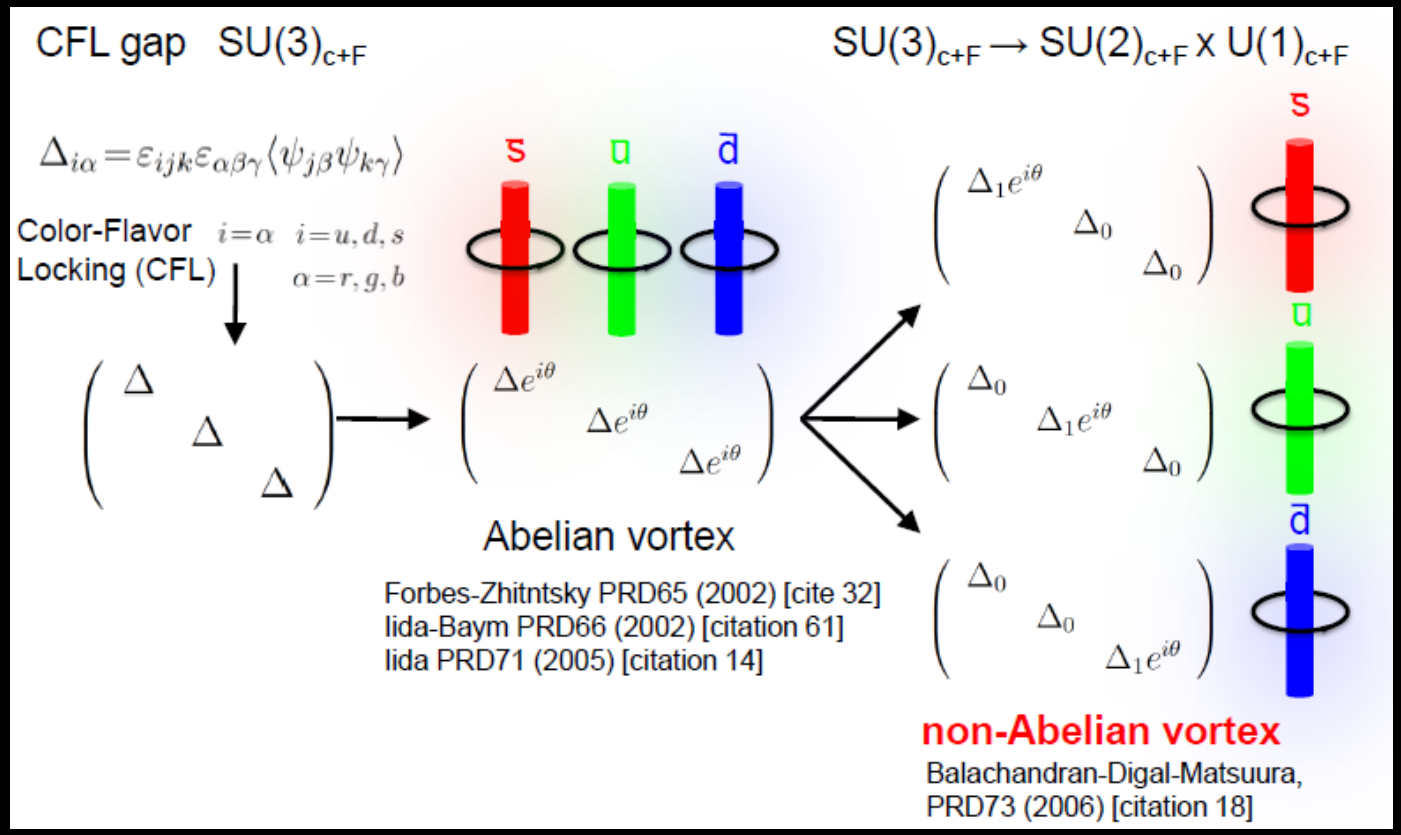
その他の注目すべき点

低密度で結合定数が大きくなったら？ Abuki-Hatsuda-KI 2002



その他の注目すべき点

渦はあるのか？その性質は？



QCD 渦にはゼロモードが存在

→ マヨラナモードを持つQCD渦は非可換統計を示す (Yasui-KI-Nitta PRB 2011)

Abelian verticesの非可換統計を示す群と

QCDの非可換性に起因するCoxeter群の直積構造

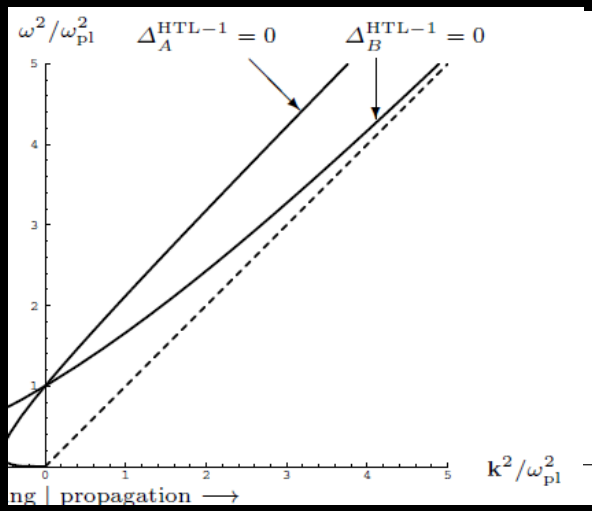
More about quark gluon plasma

物性物理としてのQGP

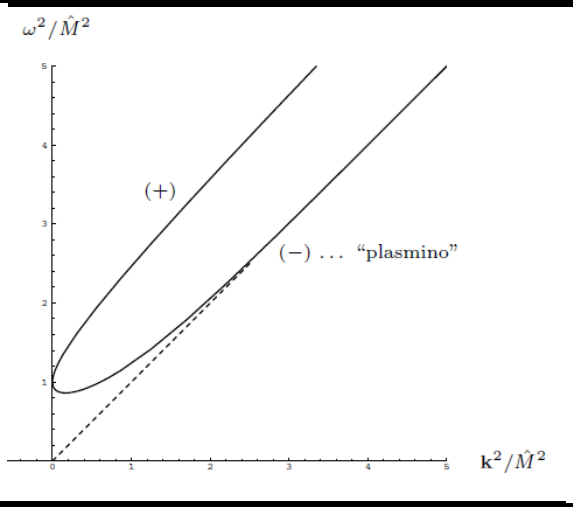
有限温度・有限密度場の理論で議論されるQGPの性質

Hard Thermal/Dense Loop: soft momentum (*gT*) のpropagatorを計算する手法

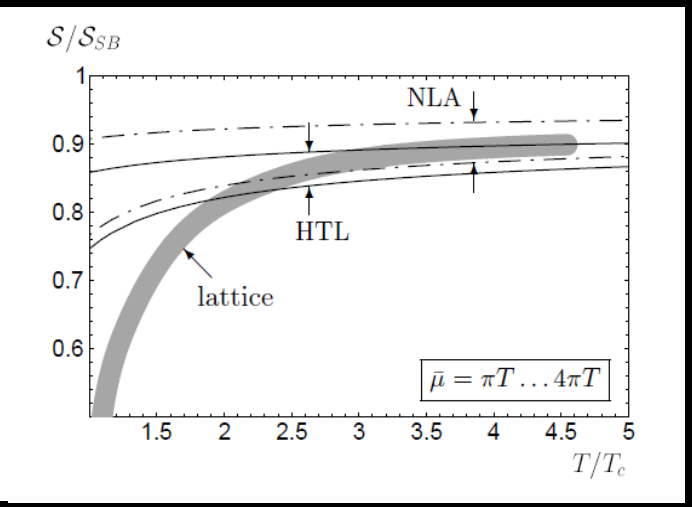
→ 熱力学量(entropy, etc)、グルーオン、クォークの集団モード、Debye質量、などなど



Gluon dispersion



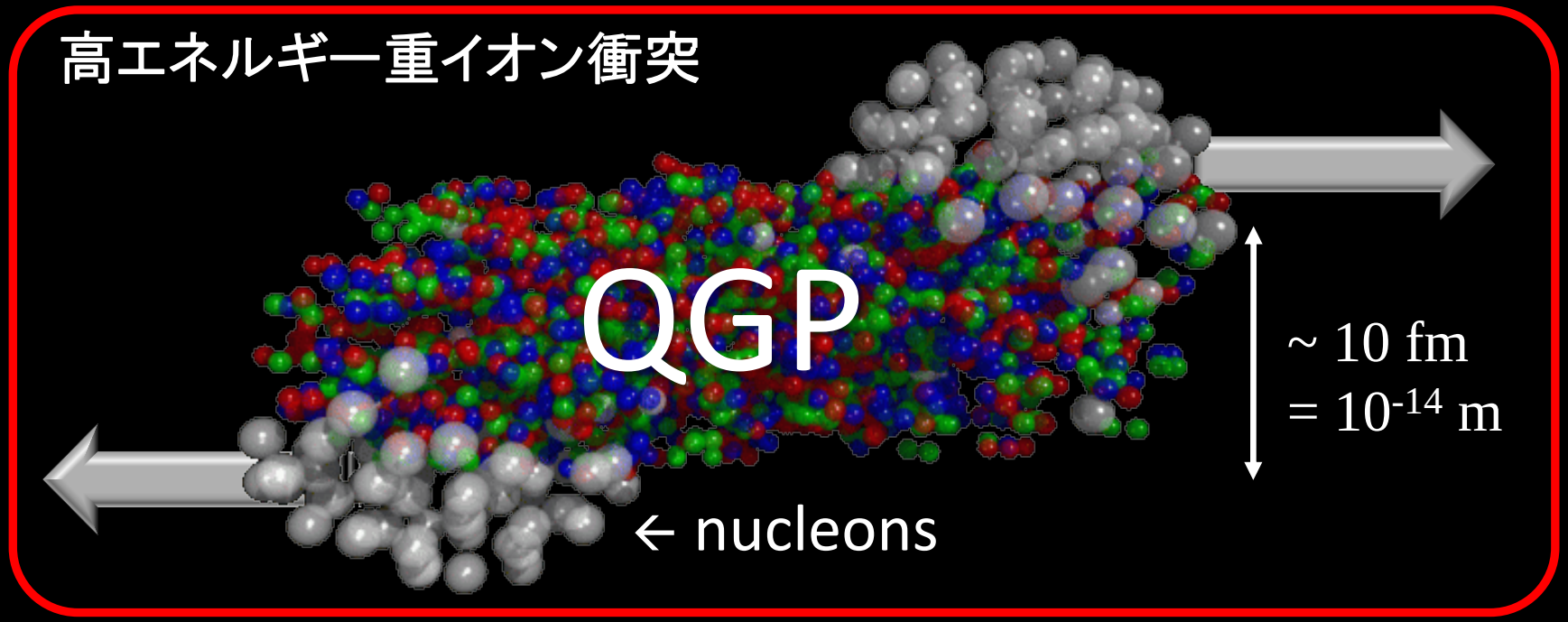
quark dispersion



entropy of pure SU(3) glue

しかし、これらの「static matter」としての物理は、重イオン衝突実験でQGPを生成した今でも理解は深まっていない

Dynamical matterとしてのQGP



重イオン衝突で生成するQGPは、膨張系で、強い時間依存性を持つ dynamical matter。その状態からstatic matterの情報を取り出さなくてはならないという困難。

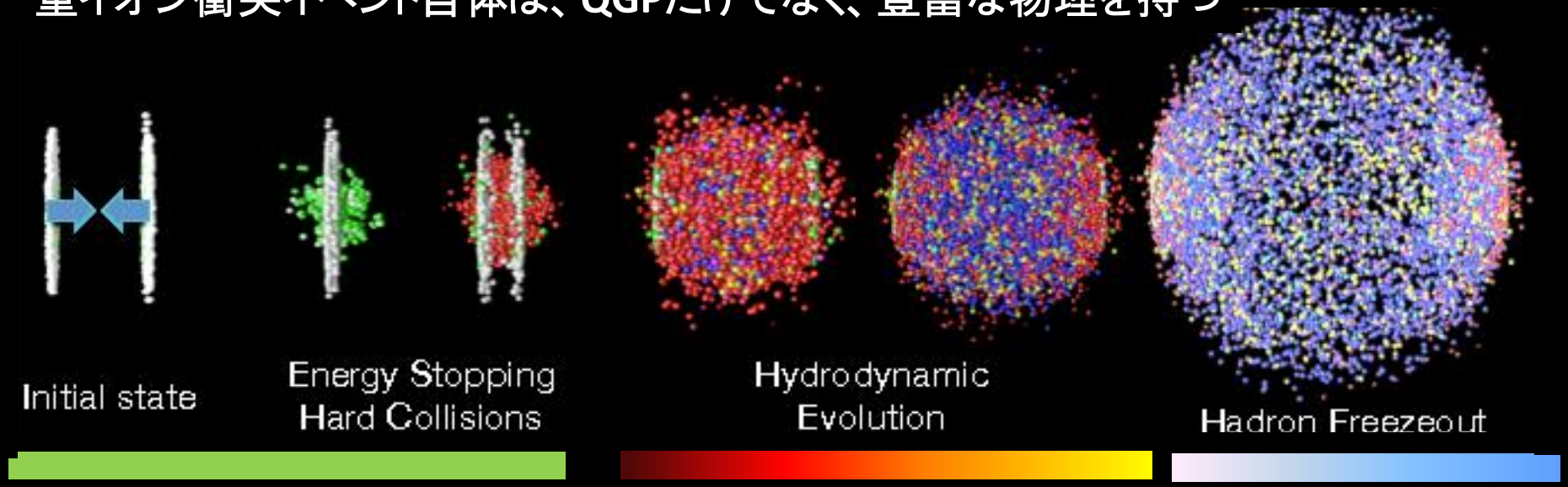
さらに閉じ込めのために観測できるのはハドロンのみ。膨大な数のハドロンの情報から、衝突直後のQGPの状態の情報を引き出す必要がある。

重イオン衝突は、階層間を行き来する「マルチスケール」の問題。

原子核→ QGP → ハドロン

Dynamical matterとしてのQGP

重イオン衝突イベント自体は、QGPだけでなく、豊富な物理を持つ



強い電磁場とカラー電磁場　　QGP　　hadrons

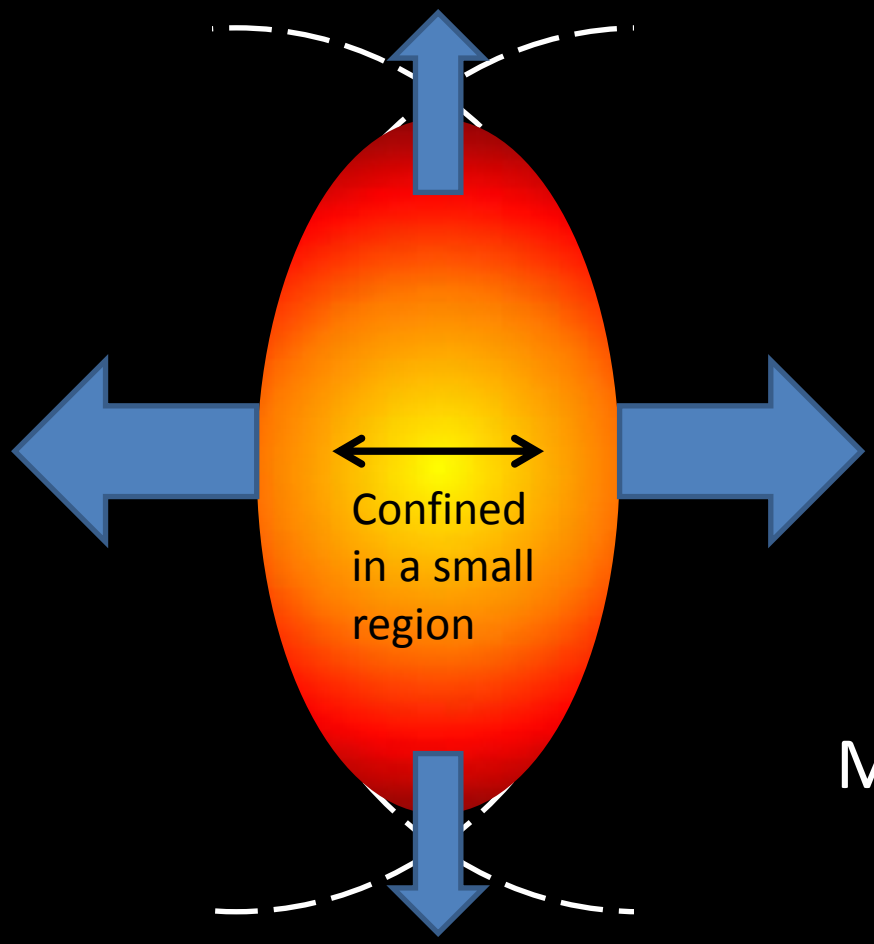
QGPの存在を証拠づけるための物理量が主に議論されてきた

強い集団的流れ　：　熱平衡状態にあれば集団的流れが大きくなる
→ ずり粘性

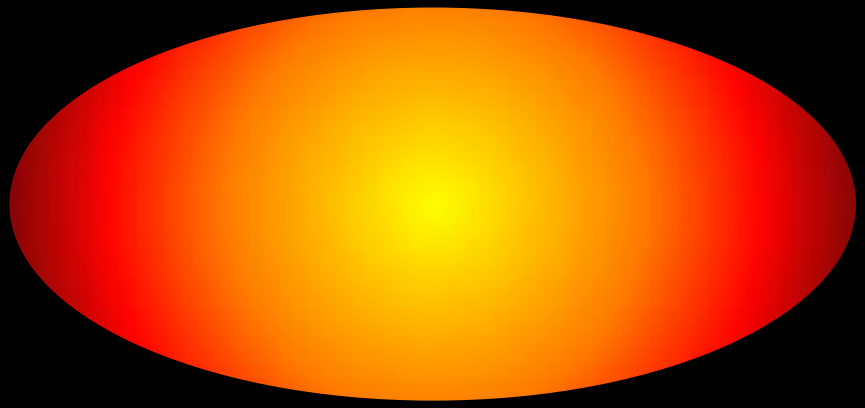
媒質中を走るジェットの変化：大きなエネルギー阻止能

Flow as a signature of QGP

Coordinate anisotropy
(eccentricity)



Momentum anisotropy



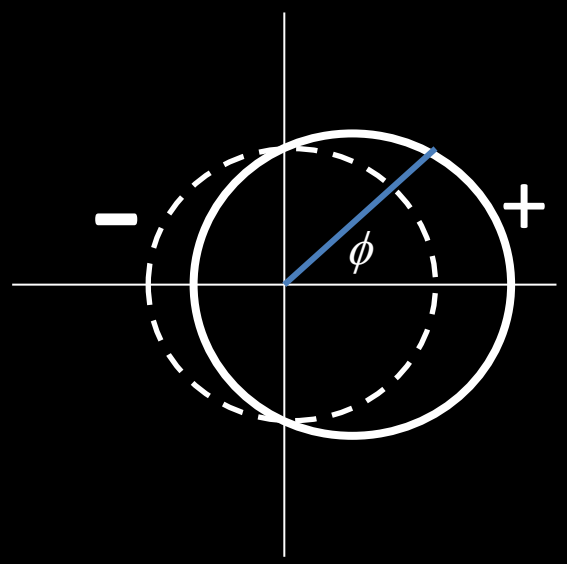
Most effectively converted when the matter is a perfect fluid

Flow

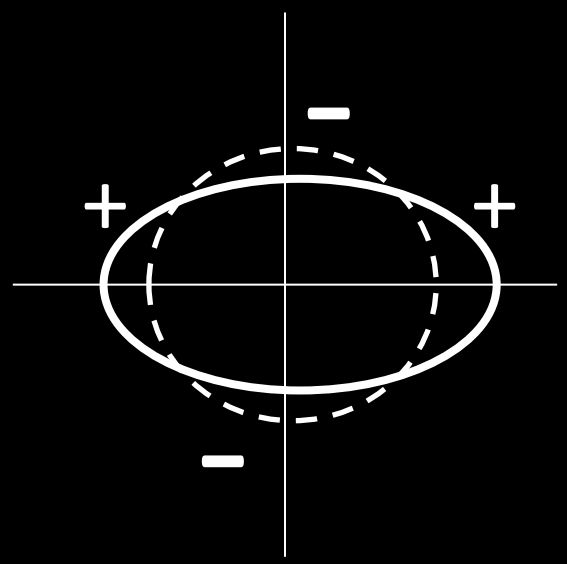
Azimuthal angle (phi) dependence (v_0=1/2)

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

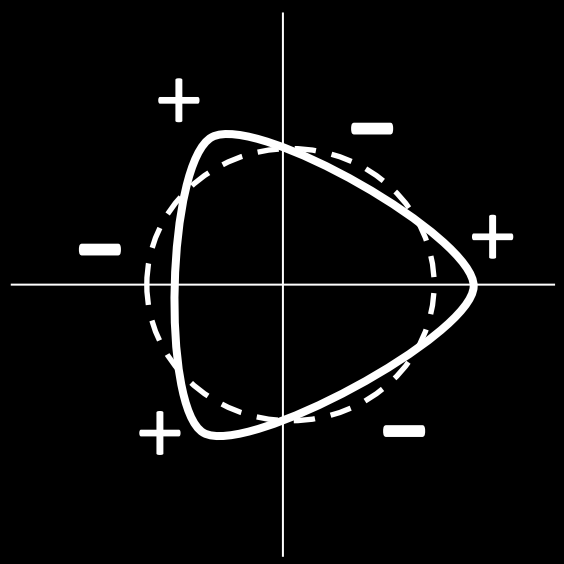
n=1 directed flow



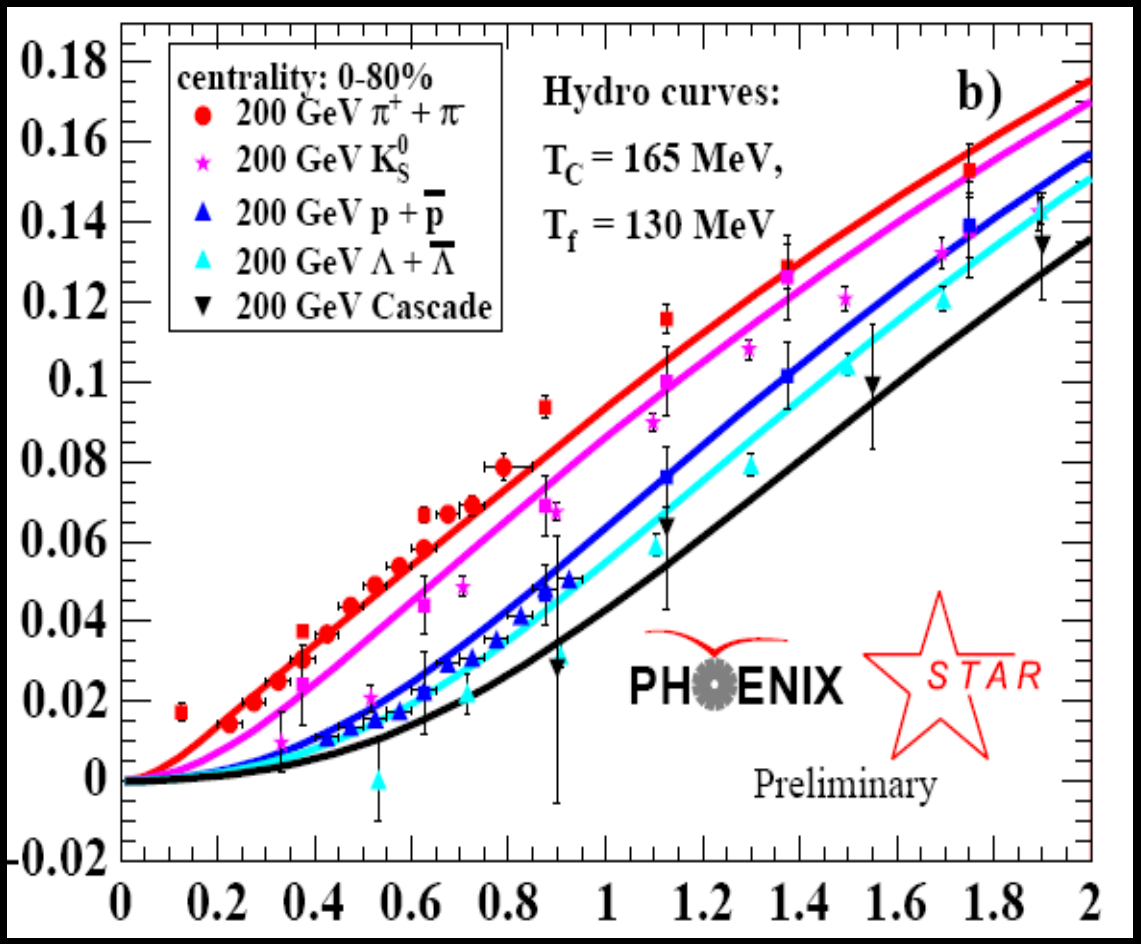
n=2 elliptic flow



n=3 triangular flow



Hydrodynamics explains flow data for the first time at RHIC energy

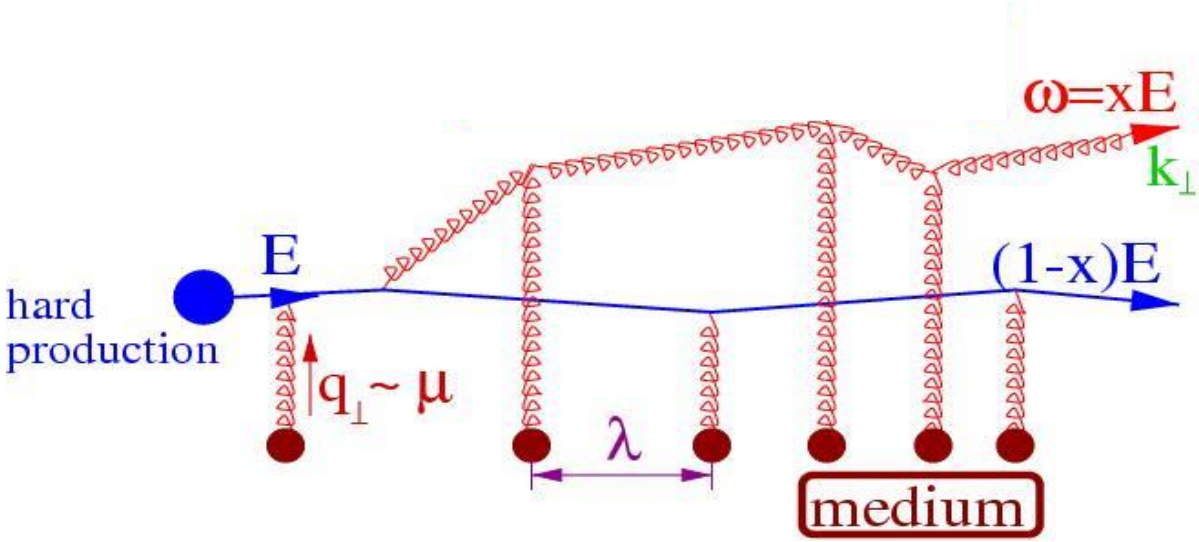


Relativistic hydrodynamics w/o viscosity (ideal fluid) can describe the elliptic flow data.

→ Indicating **formation of locally thermalized states = QGP!!**

Moreover, it is even Strongly interacting QGP (sQGP)!!!!

Parton energy loss in QGP



$$\hat{q} \equiv \frac{\mu^2}{\lambda} \propto n_{density}$$

Nuclear modification factor

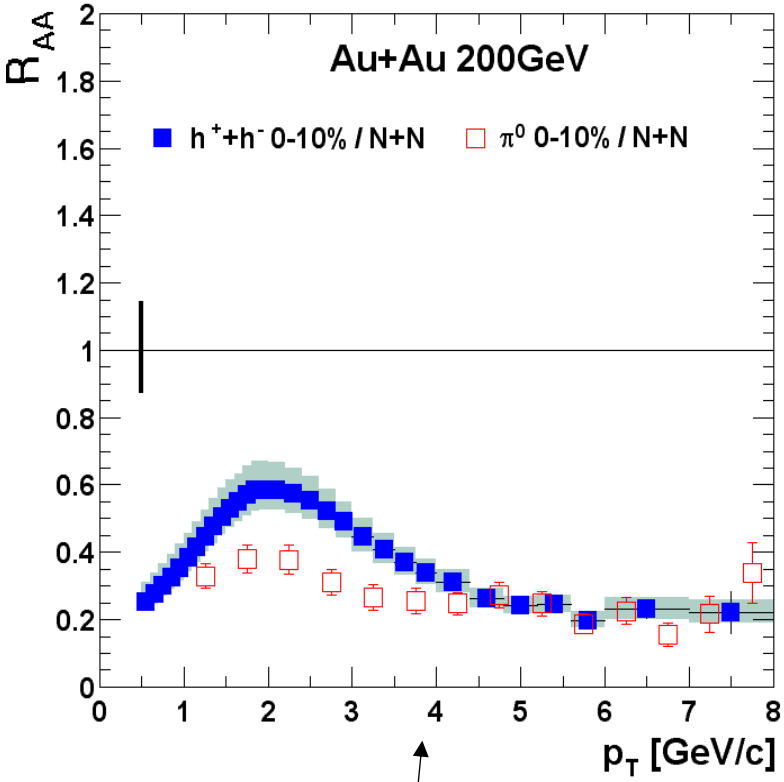
$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2N^{AA}/dp_T d\eta}{T_{AA} d^2\sigma^{NN}/dp_T d\eta}$$

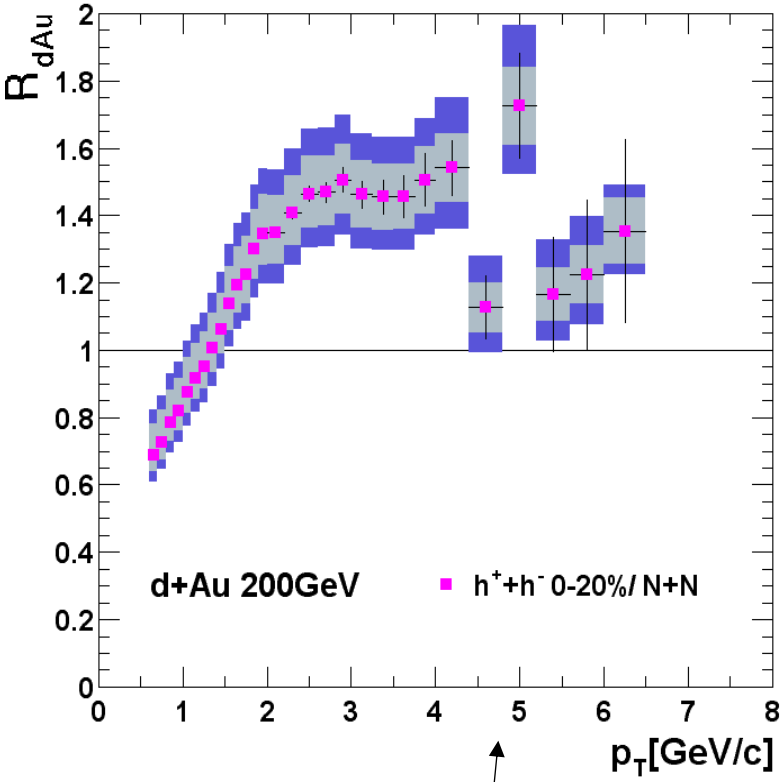
Particle yield in AA collision

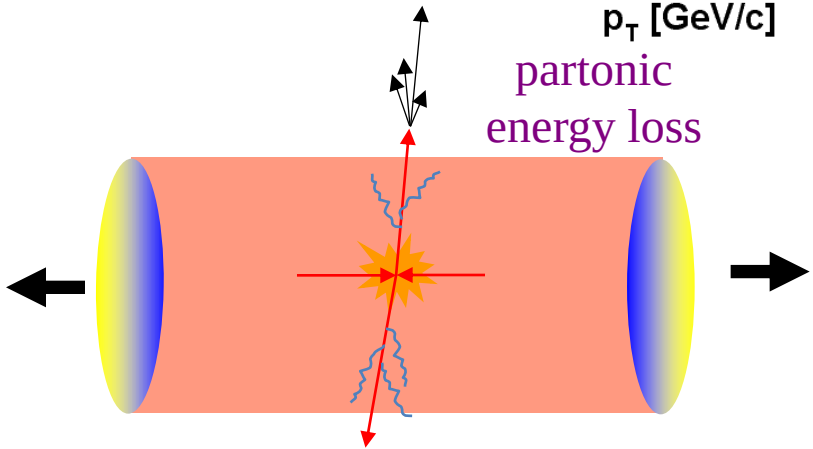
Scaled particle yield in NN collision

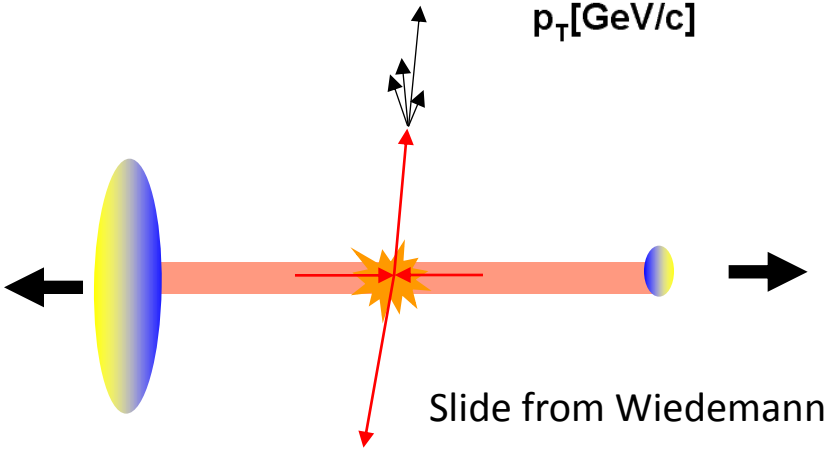
Parton energy loss : comparison with dAu

- Final state suppression
- Initial state enhancement





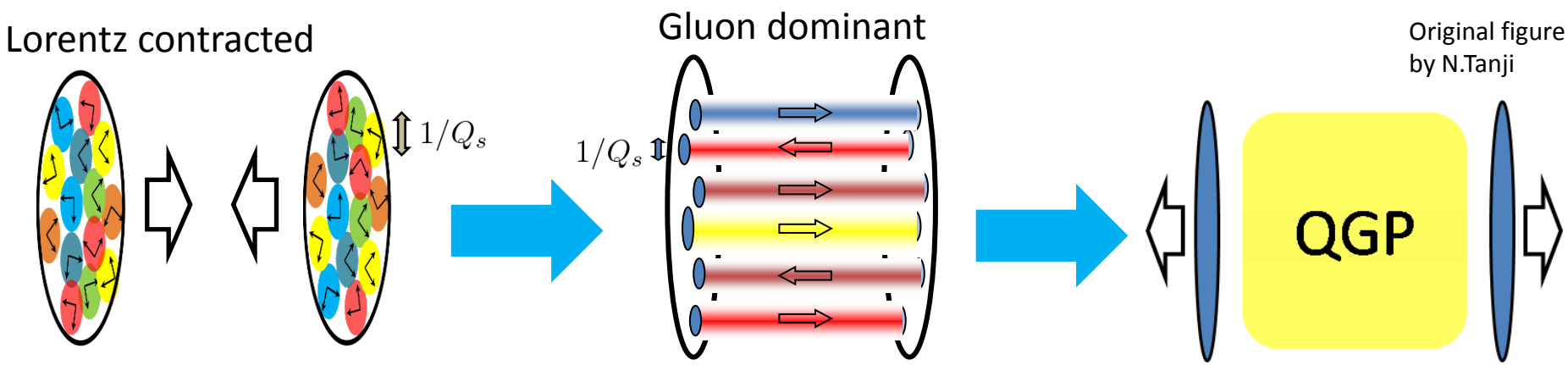




Slide from Wiedemann

QGP生成機構

いったん局所熱平衡状態としてQGPが生成されれば、その時間発展は流体力学で記述される。しかし、QGPの生成過程自体が分かっていない。特に、実験が示唆する**早い熱平衡化**を説明する機構は今のところない。



Color Glass Condensate

$\mathbf{E}_{\mathrm{T}}^{a} \perp \mathbf{B}_{\mathrm{T}}^{a}$

Glasma flux tubes

$\mathbf{E}_{\mathrm{L}}^{a} \parallel \mathbf{B}_{\mathrm{L}}^{a}$

必要な過程： グラズマの非自明な時間発展

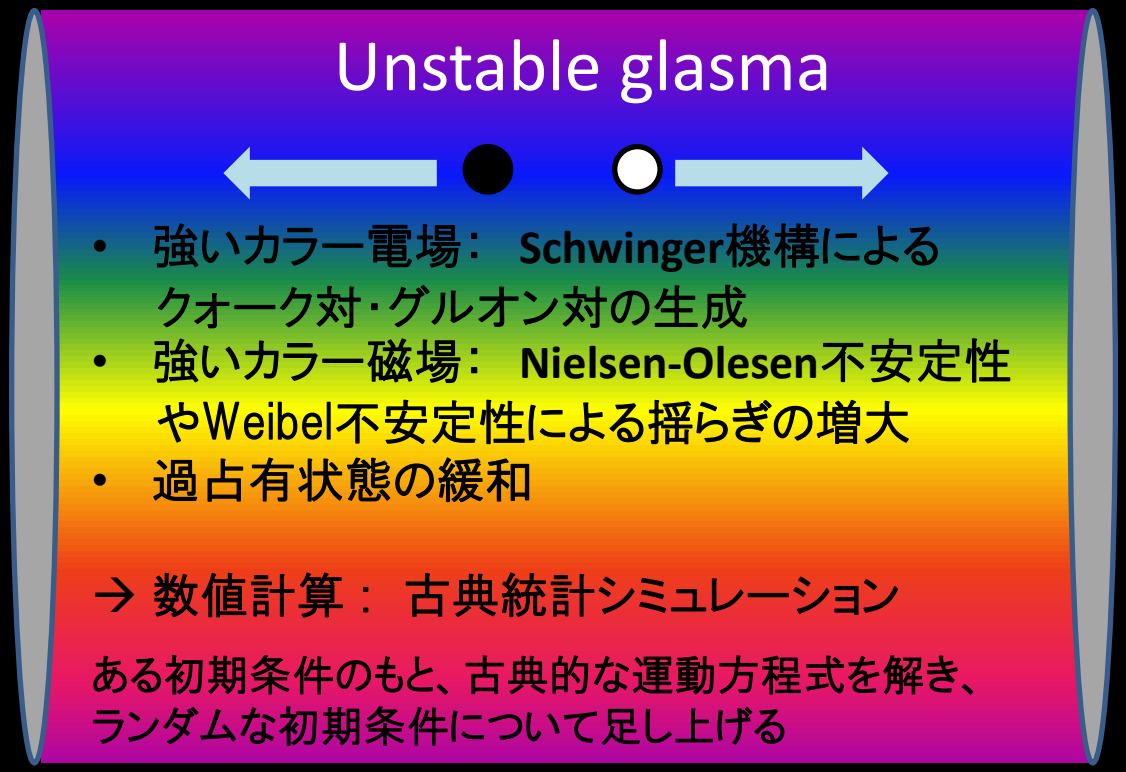
非常に強いグルーオン場から粒子への転換
ゲージ場から物質粒子の生成
熱平衡化、流体化、等方化

QGP生成機構

衝突直後は、真空に強いカラー外場を印加した状態。

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

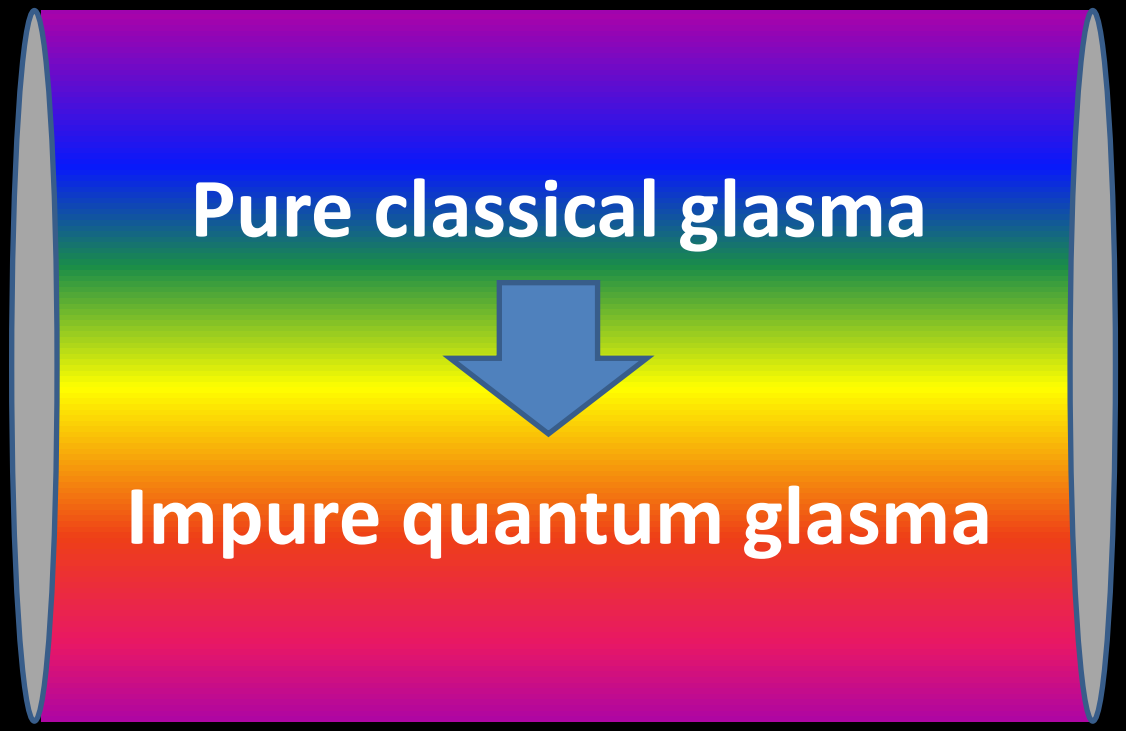
→ 「媒質としての真空」の構造を外場によって掘り起す



しかし、これだけでは説明できない

QGP生成機構

1. 「古典場のみが存在」は、理想化しすぎ。
   現実には多数のジェットが貫いていて、全てを古典場で表せない
2. クォーク対生成を考慮するとは、強い場の効果の虚数部分を
   評価すること。同時に実数部分の変化(非線形項)も考慮すべき。
   → 量子補正　強い非線形性を誘起(非線形光学)



Other interesting phenomena

Heavy quarks as impurity

QGPやquark matterは、主にup, down, strangeクォークからなる

m_u~2MeV, m_d~5MeV, m_s~95MeV

しかし、少量だがcharm, bottomなどの重いクォークも存在する

m_c~1.3GeV, m_b~5GeV

これらの重いクォークは、QGP, quark matterにとって不純物

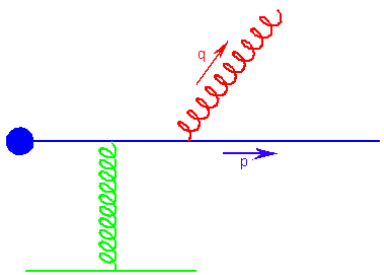
Heavy quark diffusion in QGP

Kondo effect in Quark Matter

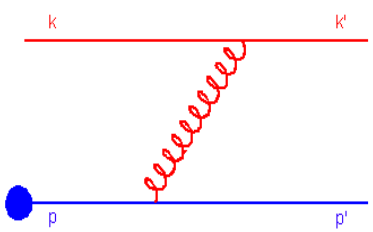
Heavy quark diffusion

パートンのエネルギー損失過程

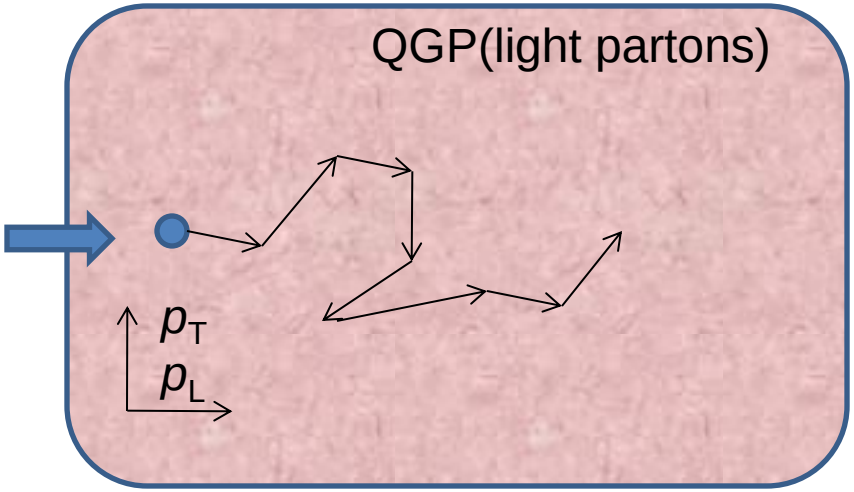
radiative energy loss



collisional energy loss



軽いパートンではradiativeが重要だが、重いクォークではcollisionalが重要



重いクォークの運動はブラウン運動

→ Langevin description

Moore-Teaney, PRC71 (2005)

$$\frac{dp_i}{dt} = \xi_i(t) - \eta_D p_i \ , \qquad \langle \xi_i(t)\xi_j(t')\rangle = \kappa\delta_{ij}\delta(t-t')$$

η_D: momentum drag coefficient

3κ : mean squared momentum transfer/time

(computable in pQCD)

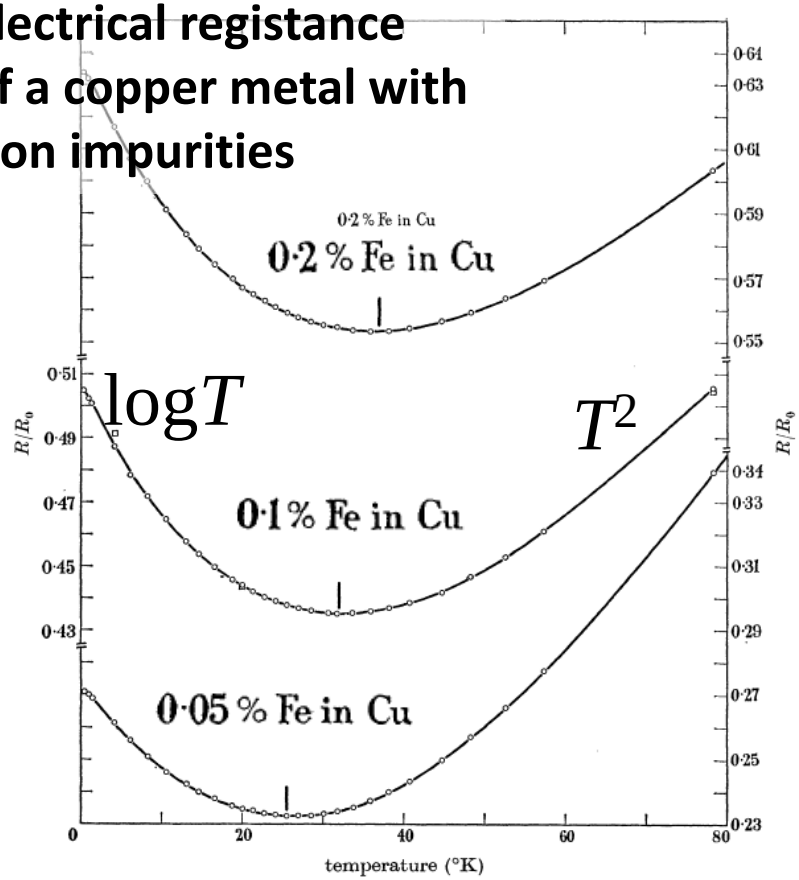
軽いクォークは既に平衡に達していて、その中で重いクォークが平衡に緩和していく

Heavy quark as impurity in quark matter

Kondo effect

- impurity causes a drastic change of transport properties
- log enhancement of registance at low temperatures

Electrical registance
of a copper metal with
Iron impurities



temperature

Three necessary ingredients
1) Fermi surface
2) Quantum effect
3) Non-Abelian interaction

QCD Kondo effect (Hattori,Yasui,Ozaki,KI 2015)

Possible in light quark matter with heavy quark impurities

3) Non-Abelian int → one gluon exchange

(Ozaki,Kuramoto,Itakura 2015)

Mag.-induced QCD Kondo effect

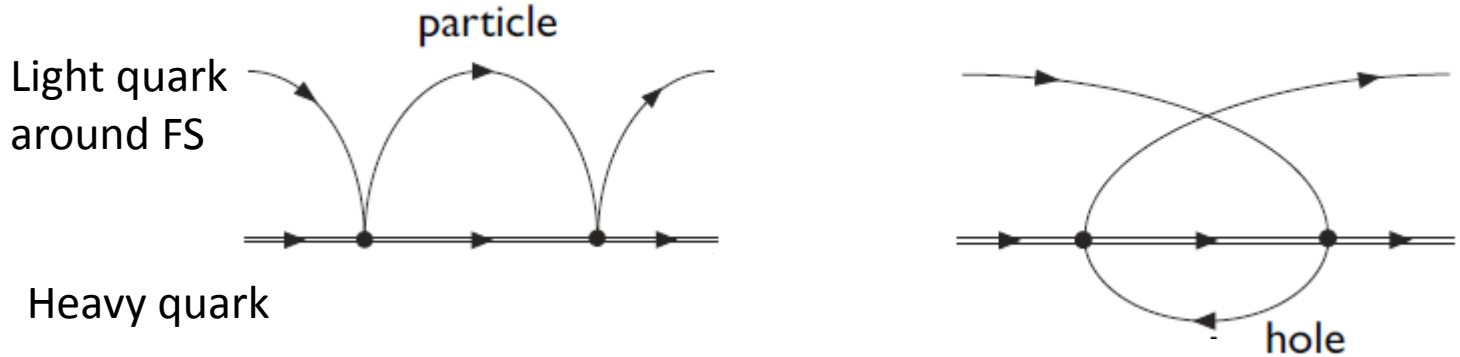
1) → Strong magnetic field

Lowest Landau level has degeneracy

Impurity effect

- **Attractive interaction btw a light quark and a heavy impurity becomes stronger with decreasing temperature**

  → enhanced registivity, suppressed shear viscosity (Yasui,Ozaki 2018)

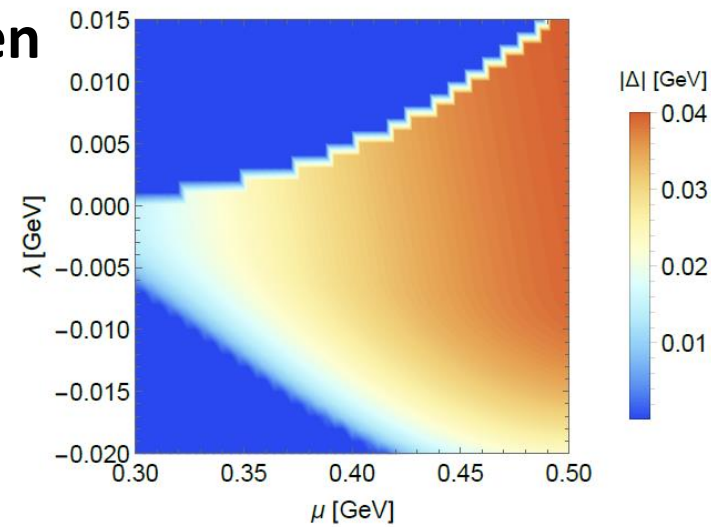


- **Non-perturbative analysis shows that a new type of condensate "heavy-light condensate" appears when impurities are uniformly distributed.**

  (Yasui,Suzuki,KI,2016)

$$\Delta_{\delta\alpha} \equiv \frac{G_c}{2}\langle\bar{\psi}_\alpha \Psi_{v\delta}\rangle,$$

λ chemical potential for heavy impurities
μ chemical potential for light quarks



まとめに代えて

- QCD物性物理とは、そもそも物質の超高温・超高密度などの極限状態を学ぶもの。典型的な例として、相図に現れる多様な物理を概観した。
- QCDの多体系はコントロール可能ではないが、豊富な物理を持ち、物性物理からの示唆によって理解が深まる一方で、QCD系の独自の面白さもある。
- 現時点でQCD物性にアクセス可能な実験である重イオン衝突では理解されていない現象が多くある。また、今後実験的に明らかになる事もあるだろう。それらの理解には物性物理との連携が必要。これからも物性系との関係はより強固なものとして、相互の理解促進に進めていきたい。