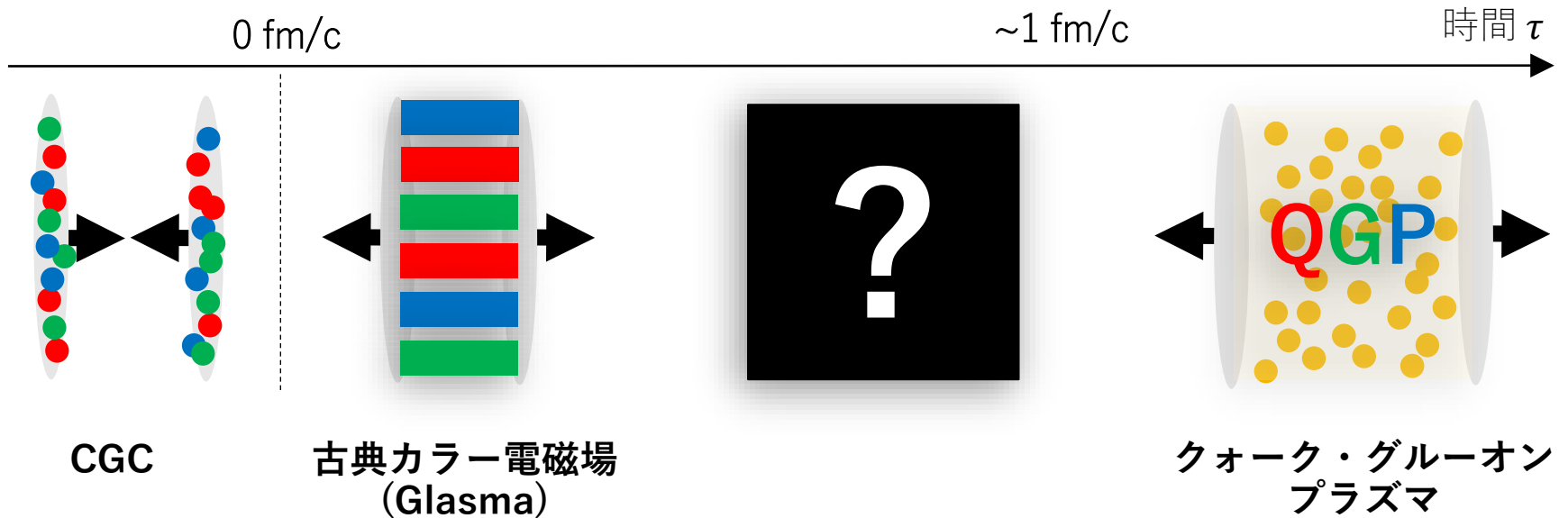


ブースト不変に膨張するカラー電場からの クォーク・グルーオン粒子生成とその遮蔽効果

田屋 英俊 (東大理 ⇒ 理研)

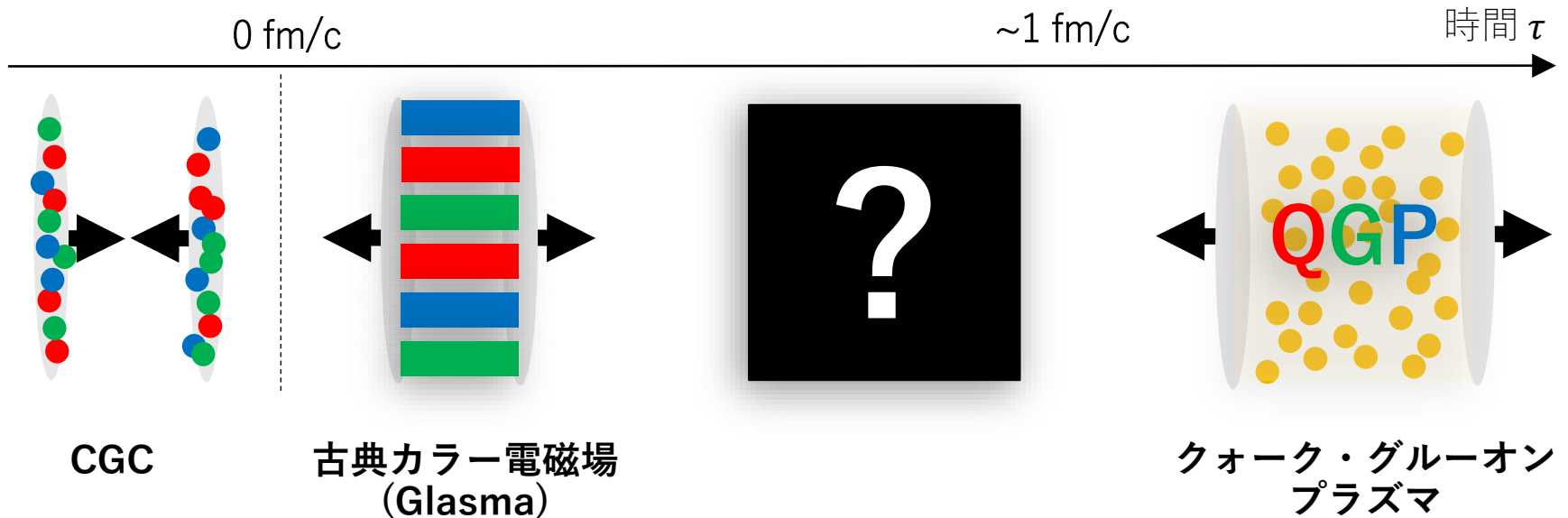
藤井 宏次 (東大総文)

動機：HIC初期のQGP生成過程



✓ 縦方向に膨張する古典カラー場が壊れ、粒子化して、QGP生成に至る

動機：HIC初期のQGP生成過程



- ✓ 縦方向に膨張する古典カラー場が壊れ、粒子化して、QGP生成に至る
- ✓ そのダイナミクスはよくわかっていない
 - ・ 古典場と粒子の自由度は、どのように移り変わるのか？
 - ・ 大量のクォーク、グルーオン粒子生成は説明できるか？
 - ・ 早期($\sim 0(1)$ fm/c)に流体化するか？

動機



理論



数値計算



まとめ

理論^(1/2) : QCDの平均場近似

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}] + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

理論^(1/2) : QCDの平均場近似

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}] + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

STEP 1 全体のゲージ場(A)を、古典場($\bar{A} = \langle A \rangle$)と、量子ゆらぎ(a)に分解 $A = \bar{A} + a$

STEP 2 ゆらぎ(a)について摂動展開

理論 (1/2) : QCDの平均場近似

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}] + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

STEP 1 全体のゲージ場(A)を、古典場($\bar{A} = \langle A \rangle$)と、量子ゆらぎ(a)に分解 $A = \bar{A} + a$

STEP 2 ゆらぎ(a)について摂動展開

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[\bar{F}^{\mu\nu} \bar{F}_{\mu\nu}] + \underbrace{(a \text{ の 1 次 })}_{\text{①}} + \underbrace{(a \text{ の 2 次 })}_{\text{②}} + \underbrace{g \times (a \text{ の 3 次 })}_{\text{③}} + \underbrace{g^2 \times (a \text{ の 4 次 })}_{\text{④}} + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

ここで、 a の伝播関数 は、 \bar{A} との相互作用を非摂動的に含む： = + + + ...

理論 (1/2) : QCDの平均場近似

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}] + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

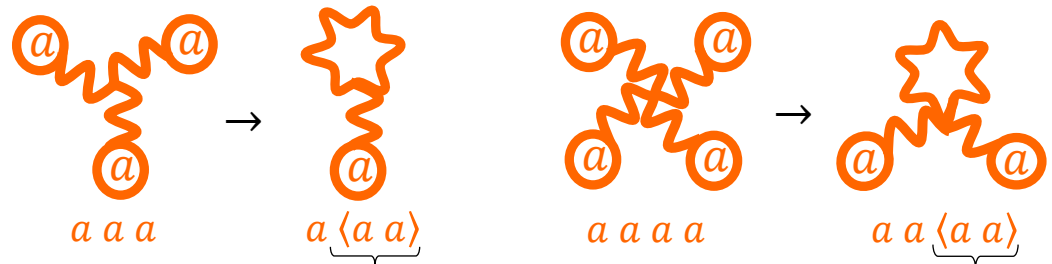
STEP 1 全体のゲージ場(A)を、古典場($\bar{A} = \langle A \rangle$)と、量子ゆらぎ(a)に分解 $A = \bar{A} + a$

STEP 2 ゆらぎ(a)について摂動展開

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{2} \text{tr}[\bar{F}^{\mu\nu} \bar{F}_{\mu\nu}] + \underbrace{(a \text{ の 1 次 })}_{\text{①}} + \underbrace{(a \text{ の 2 次 })}_{\text{②}} + \underbrace{g \times (a \text{ の 3 次 })}_{\text{③}} + \underbrace{g^2 \times (a \text{ の 4 次 })}_{\text{④}} + L_{\text{quark}} + L_{\text{FP+GF}}$$

ここで、 a の伝播関数 は、 \bar{A} との相互作用を非摂動的に含む： = + + + ...

STEP 3 3, 4点相互作用を平均場近似：



生成粒子のカレント $\langle j \rangle$

生成粒子の有効質量 $\langle M \rangle$

$$L_{\text{QCD}} = (\text{量子場について高々2次})$$

理論^(2/2) : QCDの平均場近似

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

$$0 = [(\partial + ig\bar{A})^2 g^{\mu\nu} + \langle M^{\mu\nu} \rangle] a_\nu$$

古典場(\bar{F})のEoM

$$\langle j^\mu \rangle = \partial_\nu [\bar{F}^{\nu\mu} + \langle f^{\nu\mu} \rangle]$$

理論^(2/2) : QCDの平均場近似

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

$$0 = [(\partial + ig\bar{A})^2 g^{\mu\nu} + \langle M^{\mu\nu} \rangle] a_\nu$$

古典場(\bar{F})のEoM

$$\langle j^\mu \rangle = \partial_\nu [\bar{F}^{\nu\mu} + \langle f^{\nu\mu} \rangle]$$

1. 式が簡単で物理的解釈がし易い
2. 古典 \leftrightarrow 量子の自由度の転換が滑らかに記述できる
3. 数値計算のコストが少なく、解ける

動機



理論



数値計算



まとめ

数値計算_(1/4) : セットアップ

ブースト不変に膨張する古典カラー電場中のQCD

✓ QCD :

- ・ カラー $N_c = 3$
- ・ フレーバー $N_f = 3$ (massless 3 quarks)
- ・ 結合定数 $g = 1$

✓ 初期条件 :

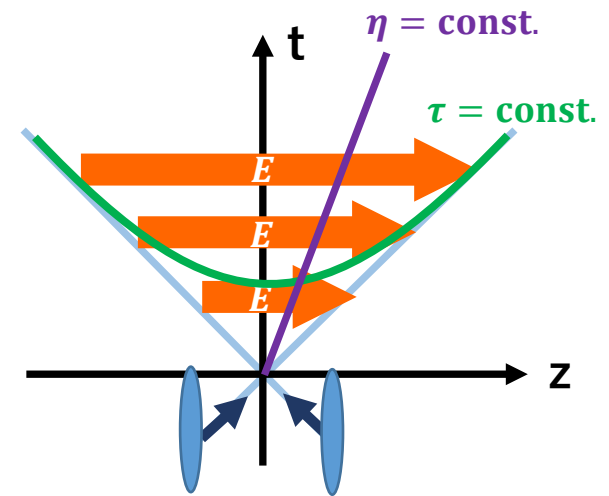
- ・ ブースト不変に膨張する古典カラー電場

$$E(\tau = \tau_0) = E_0 \times \frac{\lambda^3}{2}$$

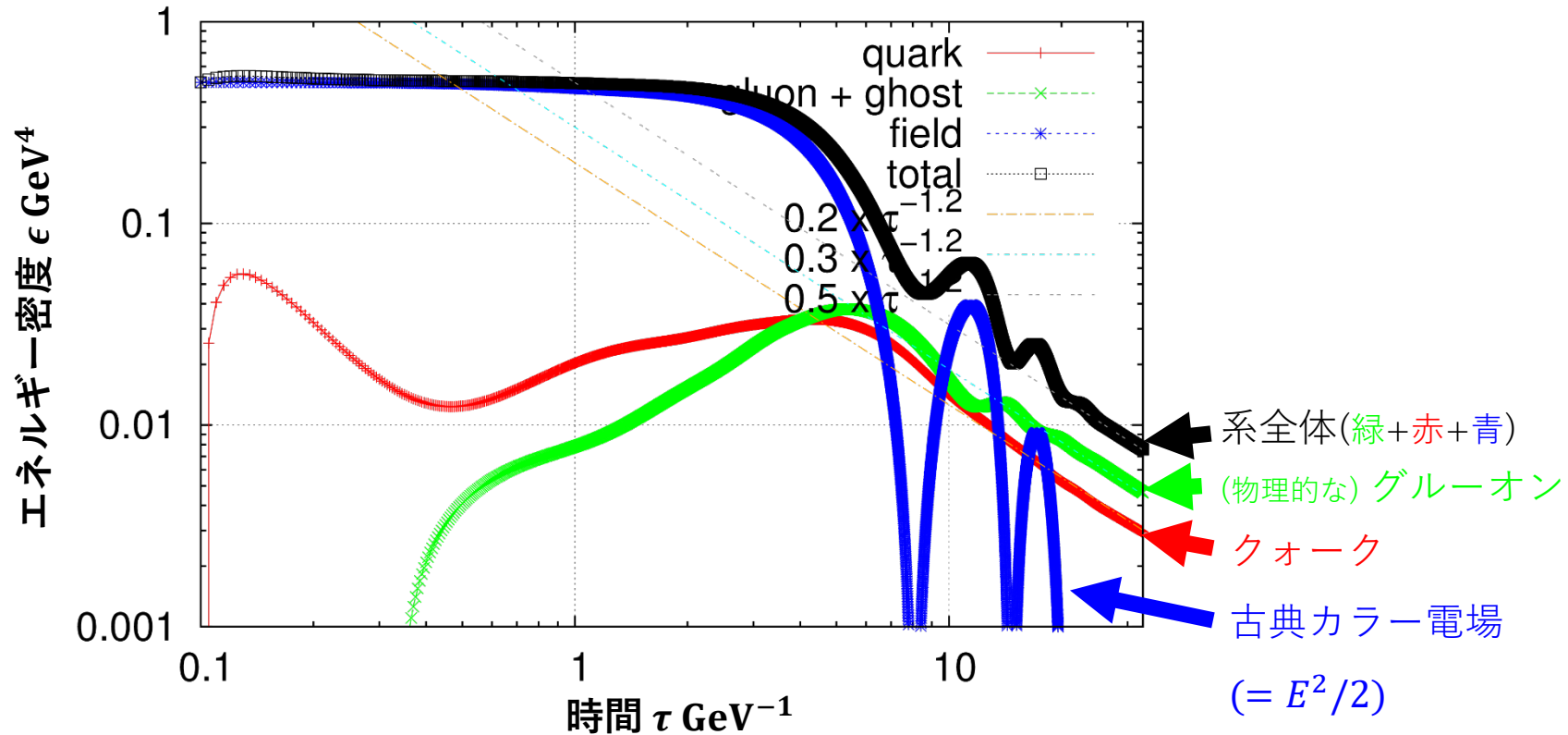
$$E_0 = 1 \text{ GeV}^2, \tau_0 = 0.1 \text{ GeV}^{-1}$$

✓ 近似 :

- ・ 有効質量 $\langle M \rangle = 0$ と近似 \rightarrow 弱結合 or 生成粒子間の散乱を無視



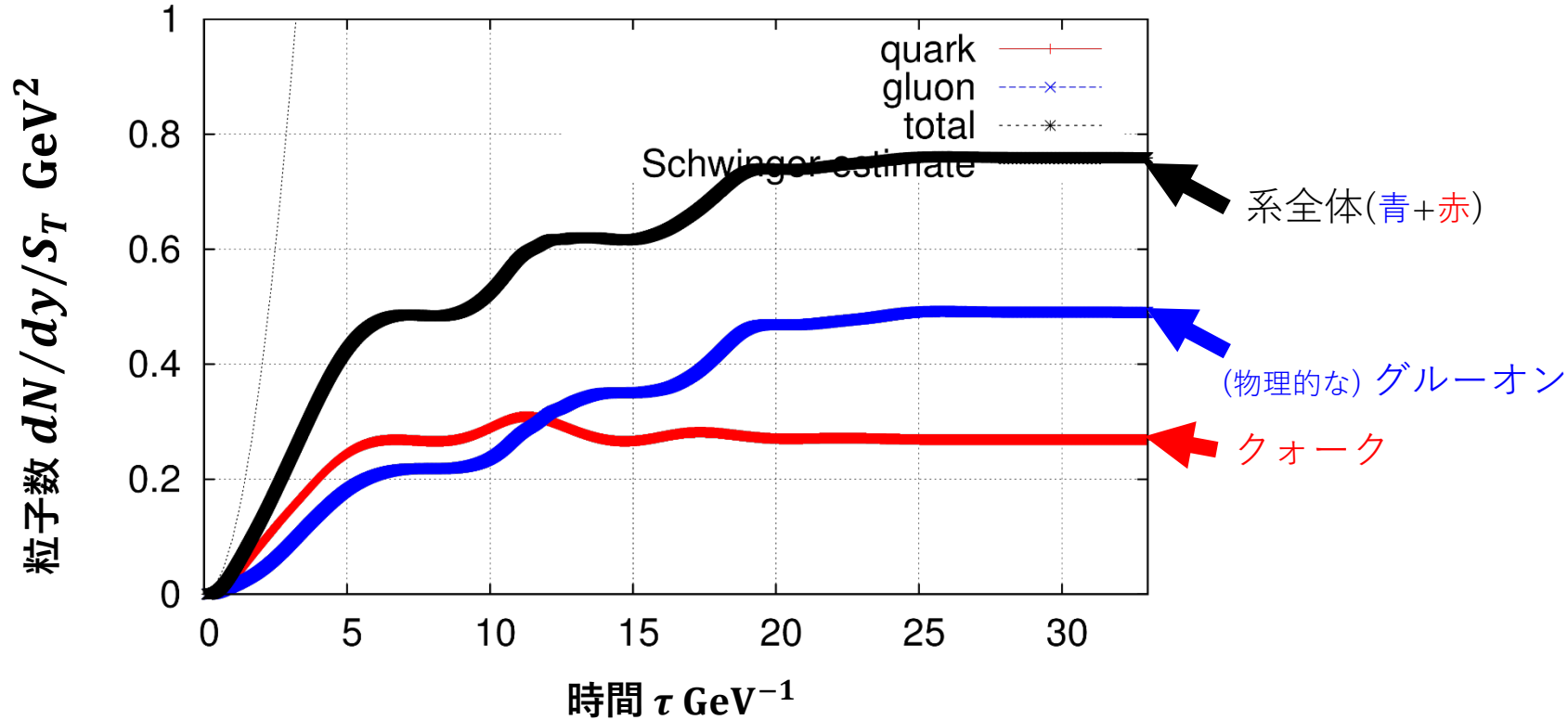
数値計算 (2/4) : エネルギー密度



✓ 古典カラー場は、粒子生成を通じ、崩壊する

✓ $\tau \sim 10 \text{ GeV}^{-1}$ 程度の短い時間で、クォーク・グルーオン「粒子」が支配的

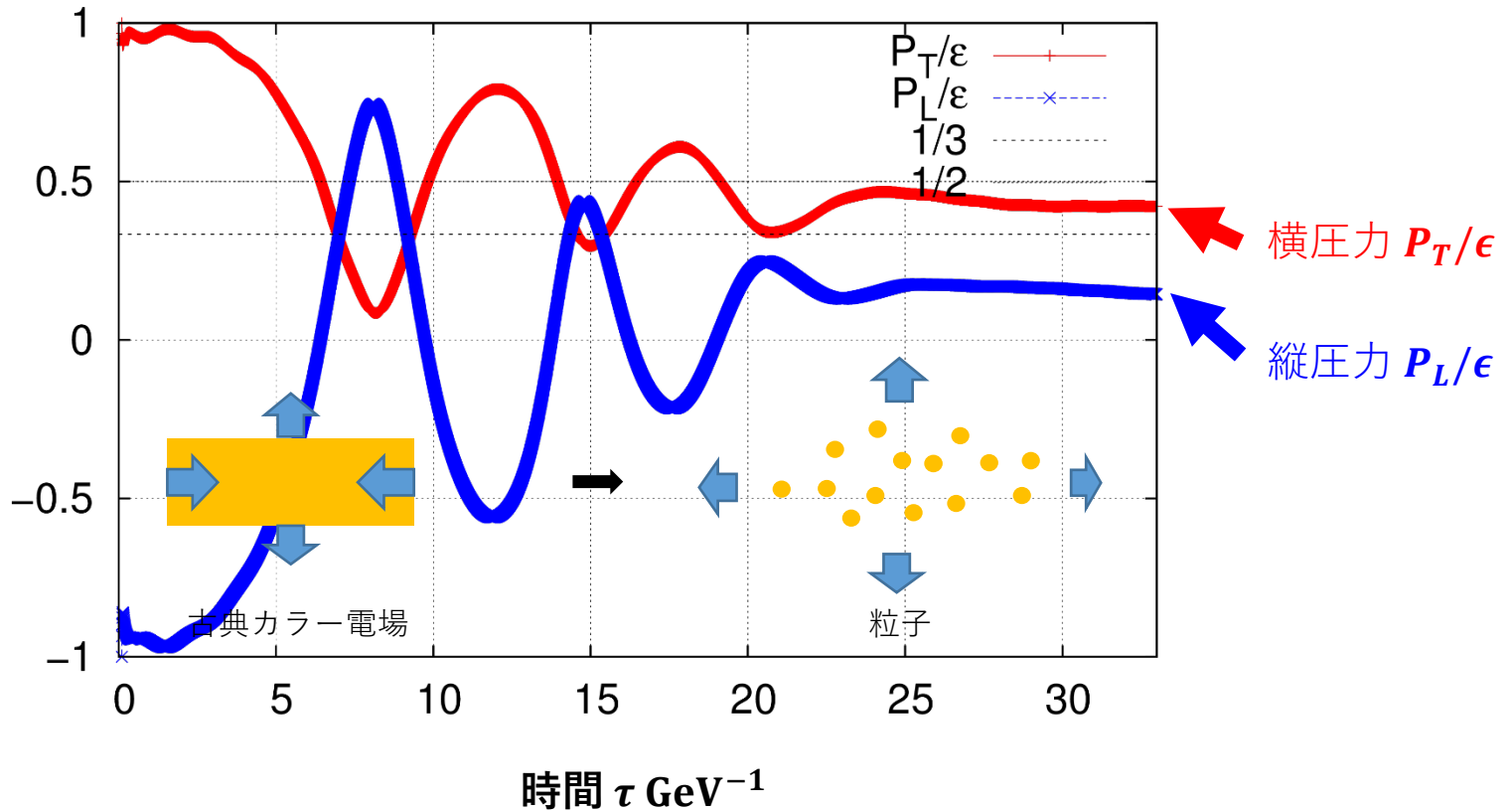
数値計算 ^(3/4) : 生成粒子数



- ✓ 粒子生成は早期に完了する。特に、クォーク生成が早い($\tau \sim 5$ GeV⁻¹)
- ✓ 大量の粒子生成(\sim クォーク1000個+グルーオン2000個 for $S_{\perp} \sim \pi(7 \text{ fm})^2$)

cf. RHICでのハドロン収量 \sim 1000個の荷電ハドロン

数値計算^(4/4)：圧力



- ✓ 古典カラー電場からの粒子生成と崩壊により、初期の強い非等方性を緩和
- ✓ $P_L/P_T \sim 0.5$ within $\tau \sim 20 \text{ GeV}^{-1}$

動機



理論



数値計算

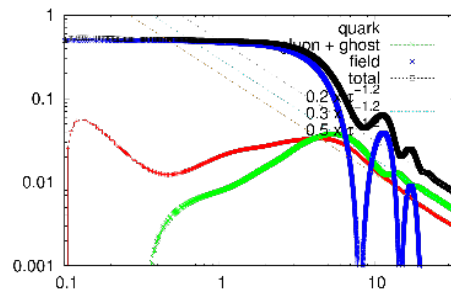


まとめ

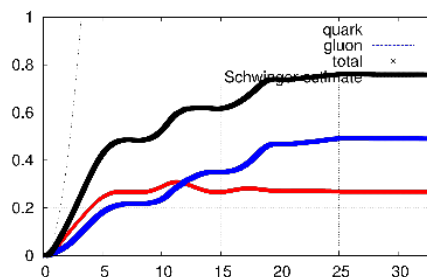
まとめ

- ✓ 強場中のQCDの動力学を平均場近似によって定式化
- ✓ HICのQGP生成過程の理解を狙い、縦方向に膨張する古典カラー電場の崩壊とクォーク・グルーオン粒子生成を数値的に議論
 - ・ 古典電場の崩壊と $O(1000)$ 個の大量のクォーク・グルーオン生成が数fm/cという短時間のうちに完了
 - ・ 古典場からの粒子生成と崩壊によって、系の異方性は比較的に大きく改善される: $P_L/P_T \sim 0.5$

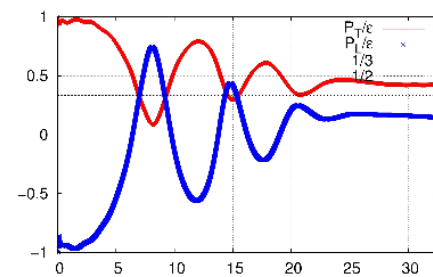
エネルギー



生成粒子数



圧力



今後の展望

✓ QGP生成過程の(より現実的な)解明に向けた拡張

- ・ 生成粒子間の相互作用を入れる → 熱化の記述
- ・ 磁場の効果
- ・ 横方向の非一様性

✓ クォークに関係した物理量

- ・ 電磁気的なプローブ(photon, dilepton)
- ・ 重イオン衝突直後の強いU(1)電磁場($eE, eB \sim m_\pi^2$)の影響

例) Chiral Magnetic Effect Vilenkin, Fukushima, Kharzeev, Warringa ...

非対称原子核衝突における v_1^\pm

理論: Hirono, Hongo, Hirano (2014);
Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)

実験: Talk by Niida for STAR at QM2015