

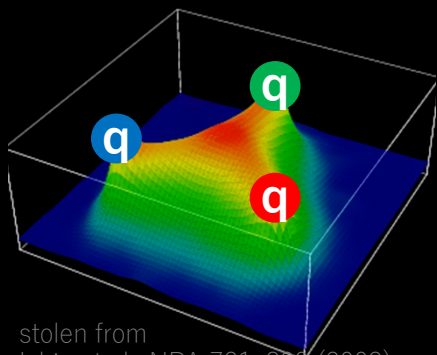
QCDにおけるSchwinger機構と 強いカラー電場の崩壊過程

田屋 英俊 (東大理、東大総文)

藤井 宏次 (東大総文)

研究背景 強いカラー電場の物理は、QCDでとても重要

例1 カラー閉じ込め

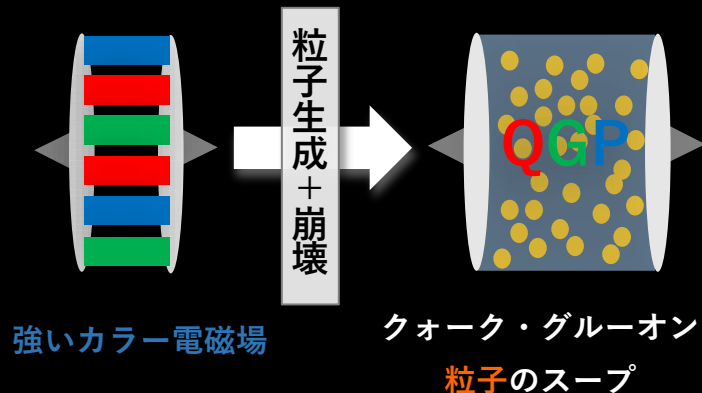


stolen from
Ichie et al., NPA 721, 899 (2003)

例2 高エネルギー散乱での多重発生

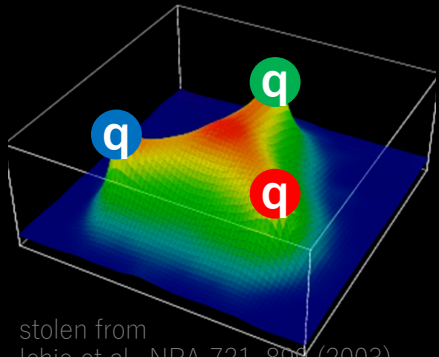


例3 高エネルギー重イオン衝突



研究背景 強いカラー電場の物理は、QCDでとても重要

例1 カラー閉じ込め



stolen from
Ichie et al., NPA 721, 899 (2003)

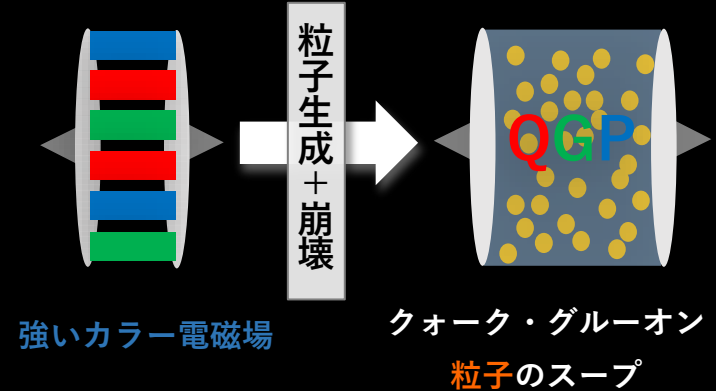
静力学

○ 格子QCDでわかる

例2 高エネルギー散乱での多重発生



例3 高エネルギー重イオン衝突



動力学

- ✗ 格子QCDは**使えない**
- ✗ 有効模型による研究が中心 = QCDに基づく理解は**乏しい**
例) Lund模型, フラックスチューブ模型

粒子生成 + 崩壊

目的 QCDに基づいてカラー電場の**動力学**を理解したい

目的 QCDに基づいてカラー電場の**動力学**を理解したい

I) QCDに基づく定式化

II) 数値計算

I) QCDに基づく定式化 (1/2)

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

I) QCDに基づく定式化 (1/2)

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

- 
- ① 全体のゲージ場(\mathbf{A})を、強い場($\bar{\mathbf{A}}$)と、その周りの量子ゆらぎ(a)に分解： $\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}} + a$
 - ② ゆらぎ(a)について摂動展開

I) QCDに基づく定式化 (1/2)

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

- ① 全体のゲージ場(\mathbf{A})を、強い場($\bar{\mathbf{A}}$)と、その周りの量子ゆらぎ(a)に分解： $\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}} + a$
- ② ゆらぎ(a)について摂動展開

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

ここで、 a の伝播関数 は、 $\bar{\mathbf{A}}$ との相互作用を非摂動的に含む： $\text{gluon propagator} = \text{free gluon} + \text{gluon with } \bar{\mathbf{A}} \text{ loop} + \text{gluon with } \bar{\mathbf{A}} \text{ self-energy} + \dots$

I) QCDに基づく定式化 (1/2)

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

- ① 全体のゲージ場(A)を、強い場(\bar{A})と、その周りの量子ゆらぎ(a)に分解： $A = \bar{A} + a$
- ② ゆらぎ(a)について摂動展開

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



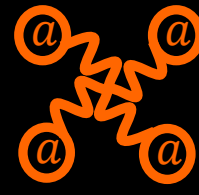
ここで、 a の伝播関数 は、 \bar{A} との相互作用を非摂動的に含む： $\text{wavy line} = \text{wavy line} + \text{wavy line with } \bar{A} \text{ loop} + \text{wavy line with } \bar{A} \text{ loops} + \dots$

- ③ 3, 4点相互作用を平均場近似：



$a \langle a a \rangle$

生成粒子のカレント j



$a a \langle a a \rangle$

生成粒子の有効質量 M

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

I) QCDに基づく定式化 (2/2)

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

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

強いカラー電場(\bar{F})のEoM

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

I) QCDに基づく定式化 (2/2)

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

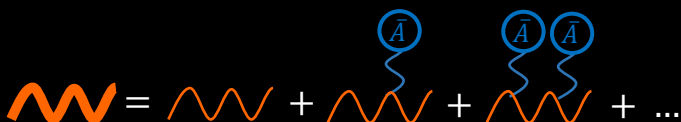
$$0 = [(\partial + ig\bar{A})^2 g^{\mu\nu} + M^{\mu\nu}] a_\nu$$

強いカラー電場(\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

強いカラー場(\bar{A})と量子ゆらぎ(a)の多重散乱 → 粒子生成


$$\text{thick wavy line} = \text{thin wavy line} + \text{thin wavy line with } \bar{A} + \text{thin wavy line with } \bar{A}\bar{A} + \dots$$

生成粒子のカレント($\langle j^\mu \rangle$)がソースとなって強いカラー電場(\bar{F})を遮蔽する

(参考) Maxwell方程式: $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B} - \dot{\mathbf{E}}$

→ 強いカラー電場の崩壊

②

③

④

I) QCDに基づく定式化 (2/2)

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

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

強いカラー電場(\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

強いカラー場(\bar{A})と量子ゆらぎ(a)の多重散乱 → 粒子生成

$$\text{wavy orange line} = \text{wavy orange line} + \text{wavy orange line with } \bar{A} \text{ above it} + \text{wavy orange line with } \bar{A} \bar{A} \text{ above it} + \dots$$

生成粒子のカレント($\langle j^\mu \rangle$)がソースとなって強いカラー電場(\bar{F})を遮蔽する

(参考) Maxwell方程式: $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B} - \dot{\mathbf{E}}$

→ 強いカラー電場の崩壊

② 高次の量子効果を (平均場の範囲内で) 取り込んだ → 生成粒子による遮蔽効果や散乱の効果を記述できる

③

④

I) QCDに基づく定式化 (2/2)

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

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

強いカラー電場(\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

強いカラー場(\bar{A})と量子ゆらぎ(a)の多重散乱 → 粒子生成

$$\text{wavy orange line} = \text{wavy orange line} + \text{wavy orange line with } \bar{A} \text{ above it} + \text{wavy orange line with } \bar{A} \bar{A} \text{ above it} + \dots$$

生成粒子のカレント($\langle j^\mu \rangle$)がソースとなって強いカラー電場(\bar{F})を遮蔽する

(参考) Maxwell方程式: $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B} - \dot{\mathbf{E}}$

→ 強いカラー電場の崩壊

② 高次の量子効果を (平均場の範囲内で) 取り込んだ → 生成粒子による遮蔽効果や散乱の効果を記述できる

③ 運動方程式が線形なので、正準量子化ができて、粒子数が直接計算できる

④

I) QCDに基づく定式化 (2/2)

線形な運動方程式を解くことに帰着：

ゆらぎ(a)のEoM

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

強いカラー電場(\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

強いカラー場(\bar{A})と量子ゆらぎ(a)の多重散乱 → 粒子生成

$\text{wavy line} = \text{wavy line} + \text{wavy line} + \text{wavy line} + \dots$

生成粒子のカレント($\langle j^\mu \rangle$)がソースとなって強いカラー電場(\bar{F})を遮蔽する

(参考) Maxwell方程式: $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B} - \dot{\mathbf{E}}$

→ 強いカラー電場の崩壊

② 高次の量子効果を (平均場の範囲内で) 取り込んだ → 生成粒子による遮蔽効果や散乱の効果を記述できる

③ 運動方程式が線形なので、正準量子化ができて、粒子数が直接計算できる

④ 数値計算のコストが少ないので、簡単に解ける

II) 数値計算 (1/4)

簡単化

- SU(2) pure YM
 - 有効グルーオン質量 $M = 0$ と近似
-

初期条件

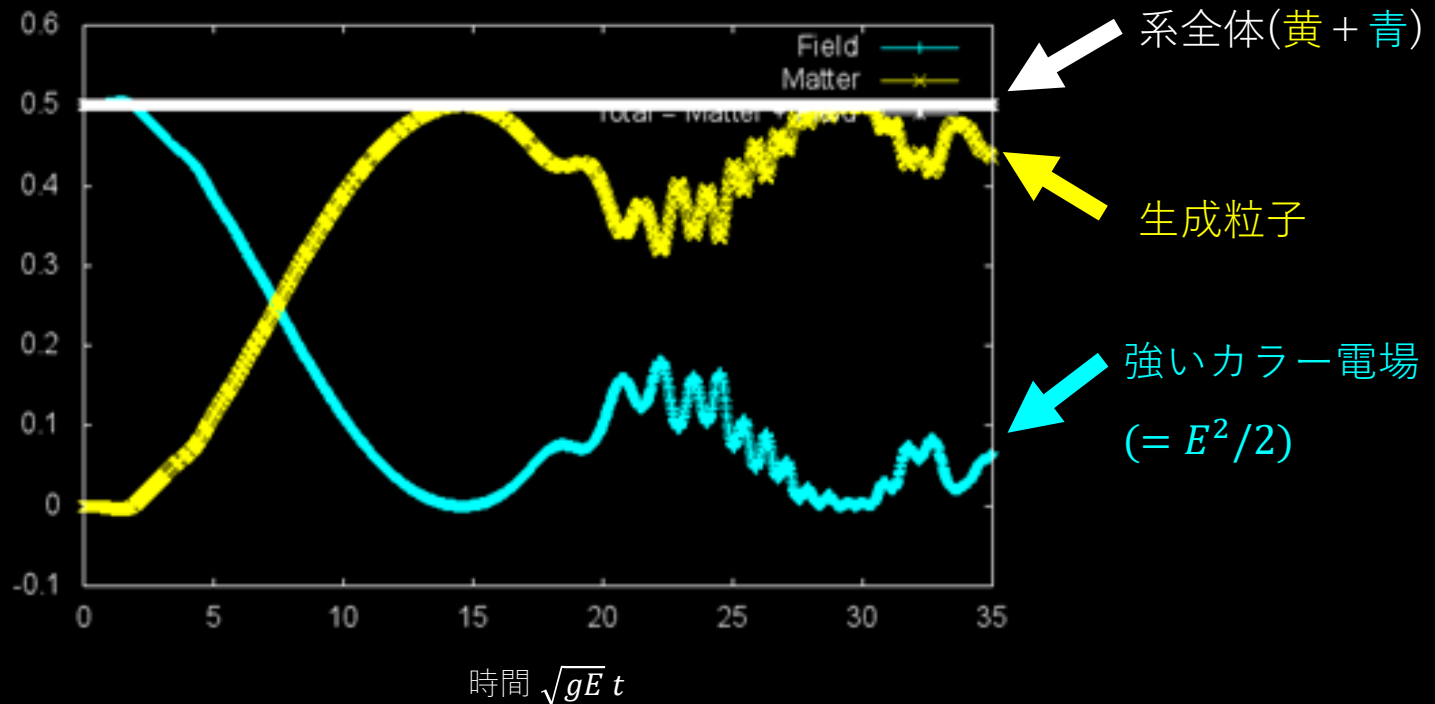
- 空間一様な強いカラー電場
-

計算量

- エネルギー収支 (生成粒子 vs 強いカラー電場)
- 生成グルーオン分布
- 系全体 (生成粒子 + 強いカラー電場) の縦/横圧力

II) 数値計算 (2/4)

エネルギー収支



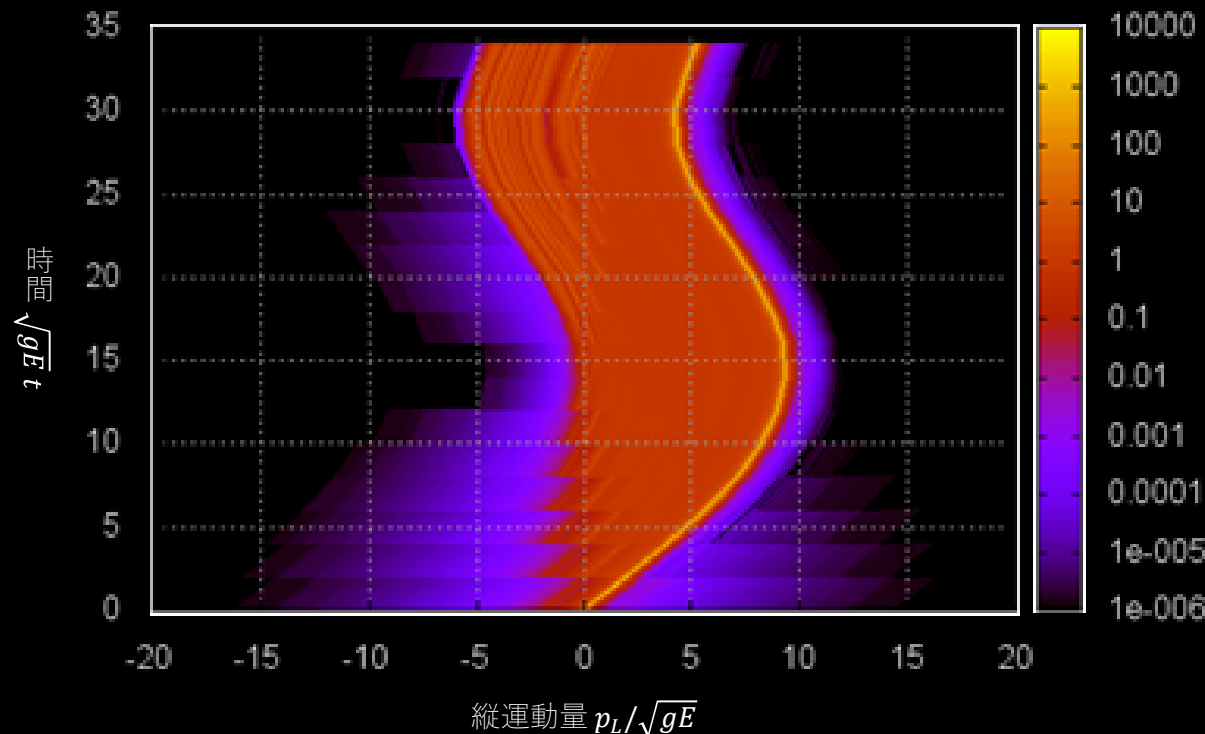
- ・ 強いカラー電場は、粒子生成を通じ、振動しながら崩壊する

(参考) 物性系でのプラズマ振動

II) 数値計算 (3/4)

生成グルーオン分布

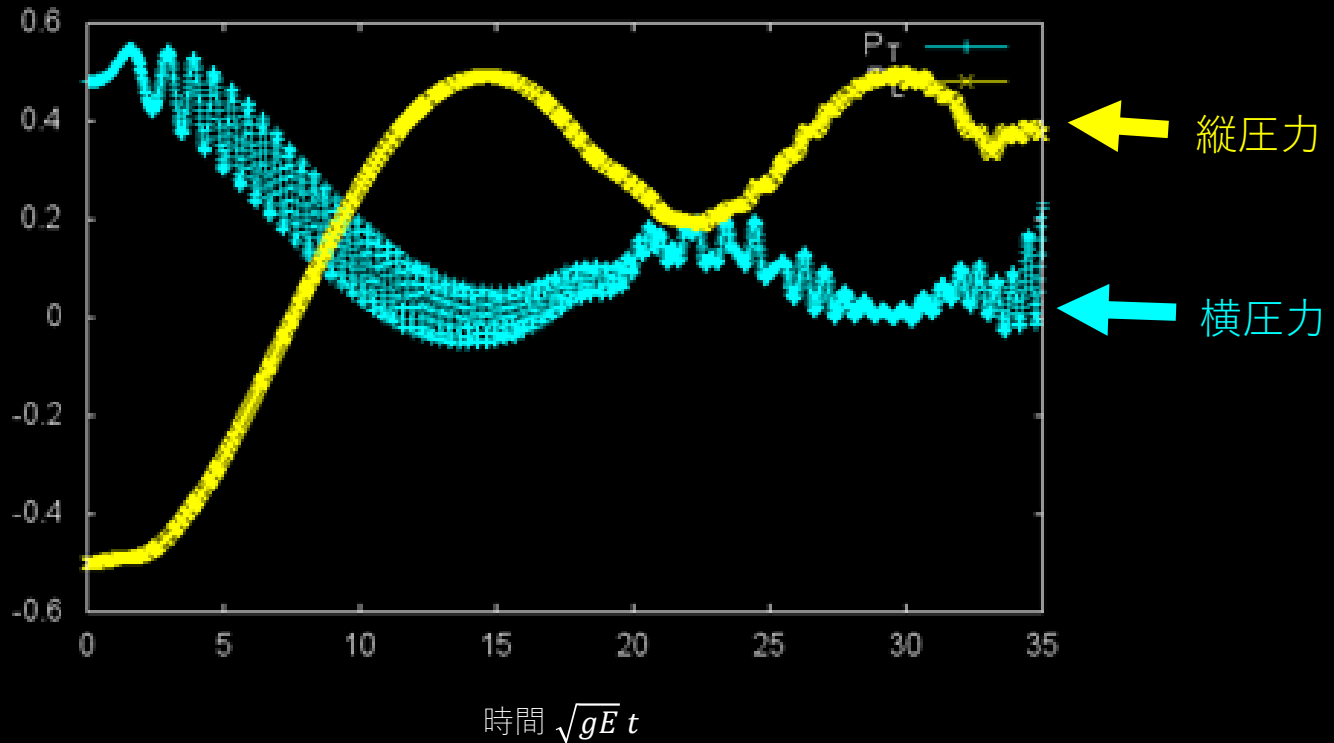
p_L -依存性 (at fixed $p_T \sim 0$)



- ・ エネルギーコストの小さい $\mathbf{p} \sim \mathbf{0}$ のグルーオンが主に生成される
- ・ 生成後、粒子は電場によって縦方向に加減速され、縦方向に振動する

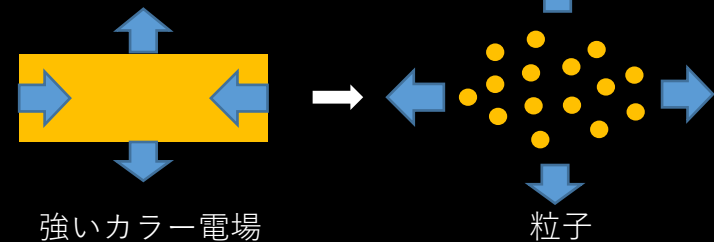
II) 数値計算 (4/4)

(系全体の) 縦/横圧力



・ 粒子生成と、それによるカラー電場の崩壊が起こることで

- 縦圧力は負ではなくなる
- 初期の強い非等方性は緩和される

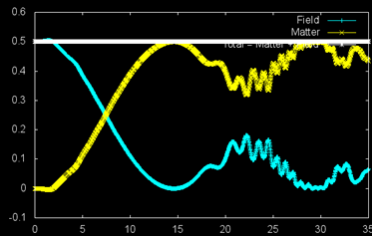


まとめ

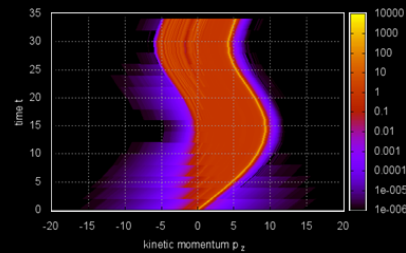
強いカラー電場からの粒子生成と崩壊過程をQCDに基づいて議論した

- ▶ 平均場近似の範囲内で、QCDに基づく定式化を開発した。
- ▶ SU(2) pure YMの場合に数値計算を実行し、

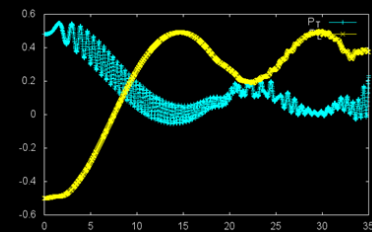
✓ エネルギー



✓ 生成粒子分布



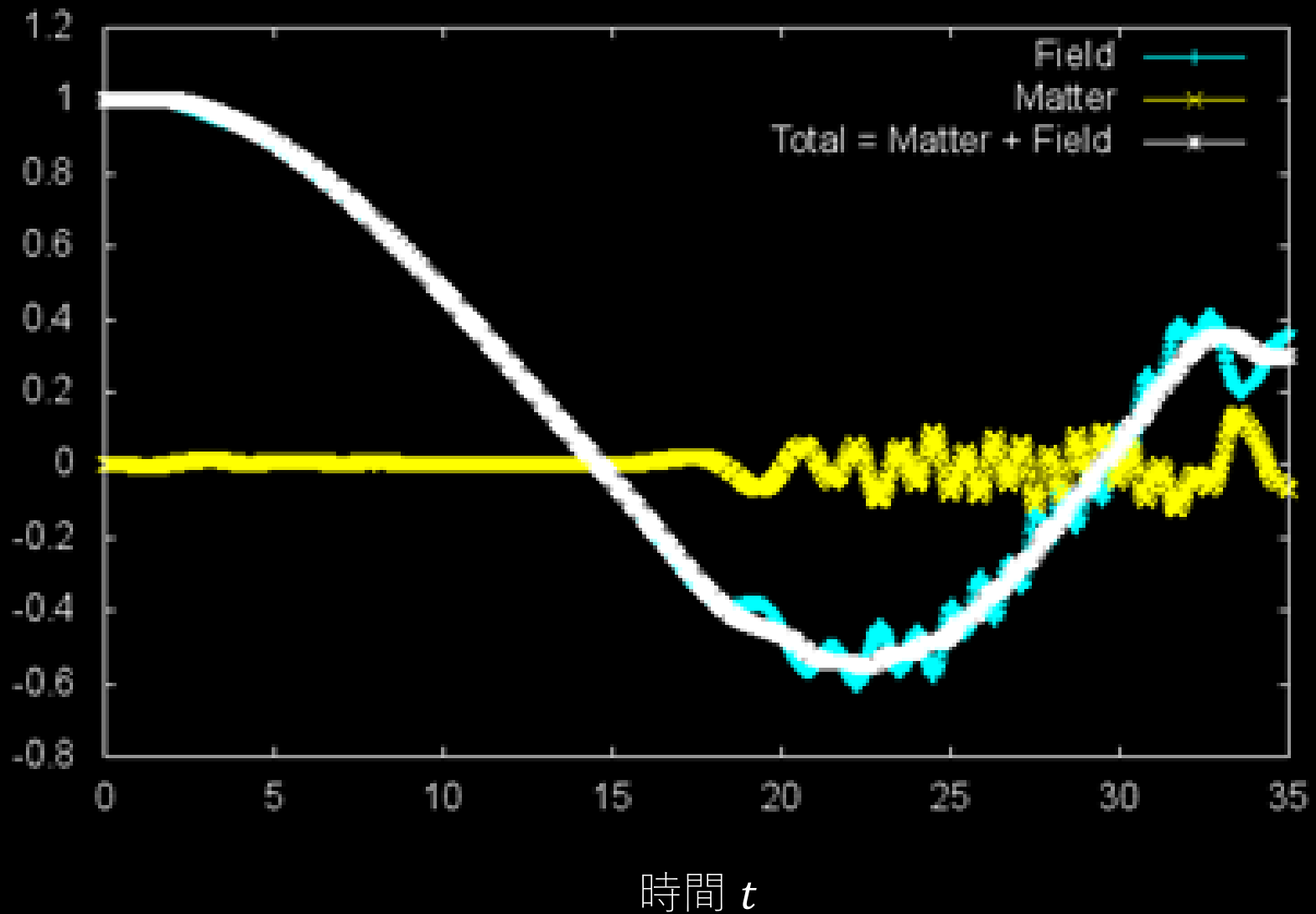
✓ 縦/横圧力



といった物理量の時間発展を見た。

補是

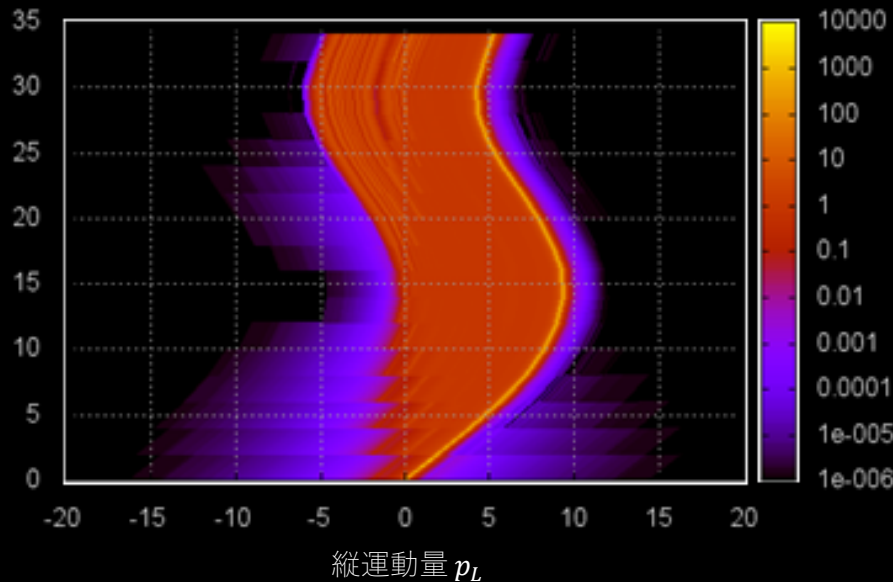
カラー電場の強度



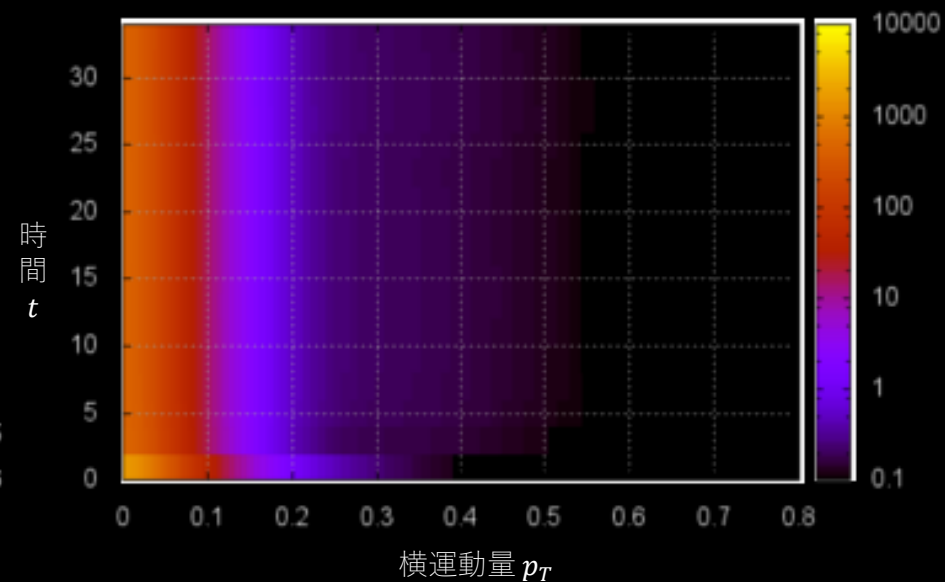
II) 数値計算 (3/4)

生成グルーオン分布

p_L -依存性 (at fixed $p_T \sim 0$)



p_T -依存性 (at fixed $p_L \sim 0$)

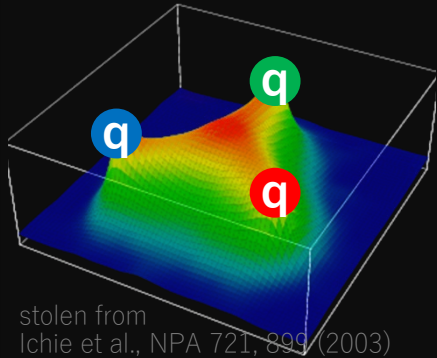


- ・ エネルギーコストの小さい $\mathbf{p} \sim \mathbf{0}$ のグルーオンが主に生成される
- ・ 生成後、粒子は電場によって縦方向に加速され、縦方向に振動する
- ・ 生成粒子の横分布は大体ガウシアン $\propto \exp[-\pi p_T^2 / gE_0]$ (参考) Schwingerの公式

縦方向のプラズマ振動

研究背景 強いカラー電場の物理は、QCDでとても重要

例1 カラー閉じ込め



静力学

○ 格子QCDでわかる

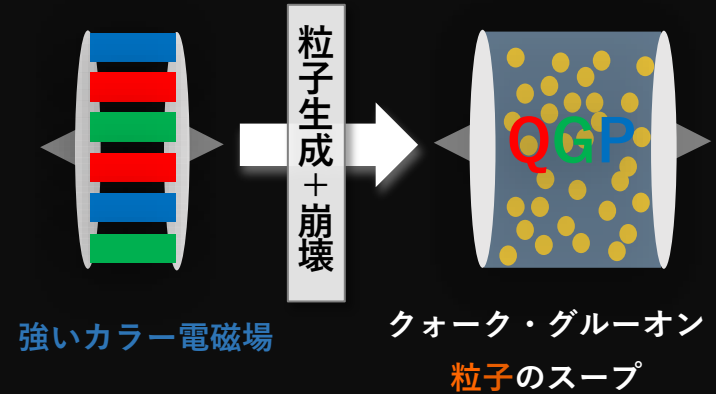
例2 高エネルギー散乱での多重散乱



動力学

- ✗ 格子QCDは**使えない**
- ✗ 有効モデルによる研究が中心 = QCDに基づく理解は**乏しい**

例3 高エネルギー重イオン衝突



目的 QCDに基づいてカラー電場の**動力学**を理解したい

QCDにおけるSchwinger機構と 強いカラー電場の崩壊過程

田屋 英俊 (東大理、東大総文)

藤井 宏次 (東大総文)