高エネルギー重イオン衝突における強い場の物理の現状

(理論的な立場から)

田屋 英俊

慶應大

今日の話

重イオン衝突初期における
3つの強い場の物理の(主観的な)レビュー

0. 基礎的な話

- 強い場の物理の概観

1. 強いカラー場

- 衝突直後

2. 強い電磁場

- 非中心/超周辺衝突
- 非対称衝突
- 低エネルギー衝突

3. 強い渦度場

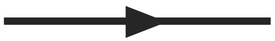
[新井田さんのトーク参照]

- 周辺衝突 (global)
- 系の膨張, jet ... (local)

0. 基礎的な話

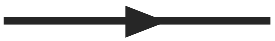
「強い場の物理」とは？

「強い場の物理」とは？



真空

「強い場の物理」とは？



真空

「強い場の物理」とは？

真空

弱い電磁場 ($eF/m^2 \ll 1$)

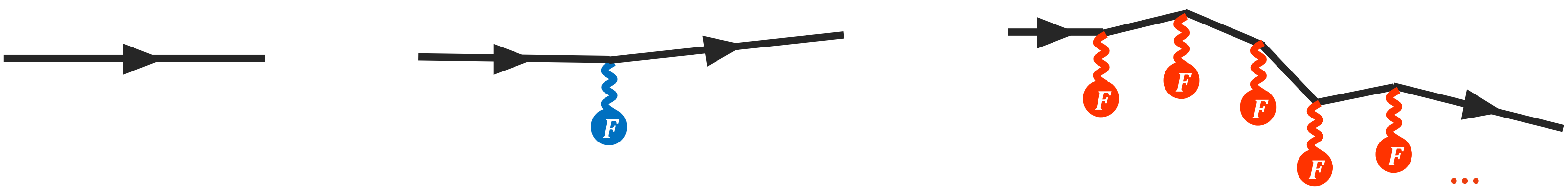
強い電磁場 ($eF/m^2 \gg 1$)

摂動・線形現象

実験・理論ともによくわかっている

cf. 磁気モーメント

「強い場の物理」とは？



真空

弱い電磁場 ($eF/m^2 \ll 1$)

強い電磁場 ($eF/m^2 \gg 1$)

摂動・線形現象

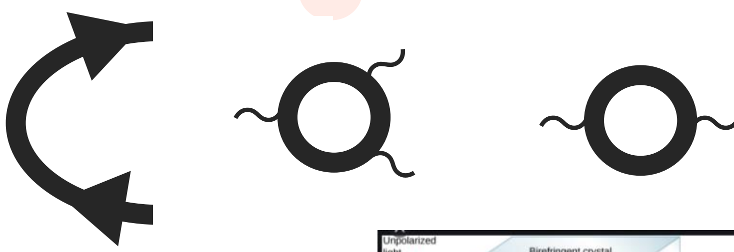
実験・理論ともによくわかっている

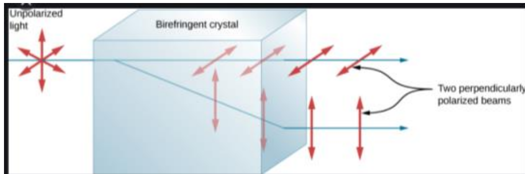
cf. 磁気モーメント

非摂動・**非**線形現象

実験・理論ともに**未踏の領域**

cf. Schwinger機構，光子分裂，真空複屈折 ...





楽しさ

1 物理学の基礎的課題

- 場の量子論の非線形領域は、実験・理論ともに未踏

楽しさ

❶ 物理学の基礎的課題

- 場の量子論の非線形領域は、実験・理論ともに未踏

❷ 現象論的な興味

- スケールの異なるさまざまな極限状況で
  強い場(カラー場・電磁場・重力場 etc)が実現
- 絶縁破壊とか冷却原子系、グラフェンなどでも似たような状況を実現できる

楽しさ

❶ 物理学の基礎的課題

- 場の量子論の非線形領域は、実験・理論ともに未踏

❷ 現象論的な興味

- スケールの異なるさまざまな極限状況で
  強い場(カラー場・電磁場・重力場 etc)が実現
- 絶縁破壊とか冷却原子系、グラフェンなどでも似たような状況を実現できる

❸ タイムリー

実験・観測が**今まさに**可能になってきた！

e.g.) レーザー： ELI実験 (2020年3月開始)
　　マグネター： IXPE衛星 (2021年打上予定)、XL-Calibur気球 (2021年打上予定)
　　重イオン衝突： 超周辺衝突事象の解析 (2019年)
　　コライダー実験：FACET-II (2022年?) [Yakimenko et al. (2019)]

理論的な話 (1/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

理論的な話 (1/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカルでない: 強い場はfixedな外場。ドレスされたプロパゲータで摂動論。

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} f_{\mu\nu} f^{\mu\nu} + \bar{\psi}[i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} + ie\bar{A}_{\mu}) - m]\psi + e a_{\mu} \bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi \quad \text{with} \quad A_{\text{total}} = \bar{A} + a$$

ゆらぎ

例) QED

非摂動的に扱う

相互作用項 (摂動的に扱う)

強い場: 手で固定した外場

理論的な話 (1/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカルでない: 強い場はfixedな外場。ドレスされたプロパゲータで摂動論。

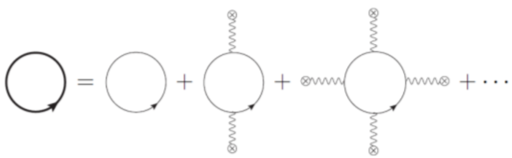
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} f_{\mu\nu} f^{\mu\nu} + \bar{\psi}[i\gamma^\mu(\partial_\mu + ie\bar{A}_\mu) - m]\psi + e a_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu \psi \quad \text{with} \quad A_{\text{total}} = \bar{A} + a$$

ゆらぎ

例) QED　非摂動的に扱う　相互作用項 (摂動的に扱う)　強い場: 手で固定した外場

できていること

- 簡単な電磁場配位 (特に、一様定常電磁場、平面波) ならプロパゲータが厳密に求まる
  ⇒ 有効作用や断面積も (しばしば) 厳密に求まる
- 有名な例: Euler-Heisenberg effective action (一様定常電磁場中の1ループ有効作用)



$$\Rightarrow \mathcal{L} = -\mathcal{F} - \frac{1}{8\pi^2}\int_0^\infty \frac{ds}{s^3}\exp(-m_e^2 s)\left[(es)^2 \frac{\mathrm{Re}\cosh\left(es\sqrt{2(\mathcal{F}+i\mathcal{G})}\right)}{\mathrm{Im}\cosh\left(es\sqrt{2(\mathcal{F}+i\mathcal{G})}\right)}\mathcal{G} - \frac{2}{3}(es)^2\mathcal{F} - 1\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2\right) + \frac{2\alpha^2}{45 m_e^4}\left[\left(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2\right)^2 + 7(\mathbf{E}\cdot\mathbf{B})^2\right] + \cdots$$

[Heisenberg, Euler (1936)]

理論的な話 (1/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカルでない: 強い場はfixedな外場。ドレスされたプロパゲータで摂動論。

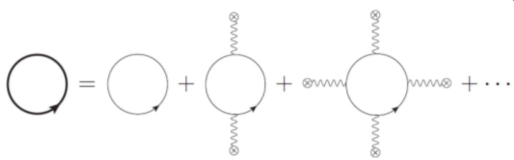
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} f_{\mu\nu} f^{\mu\nu} + \bar{\psi}[i\gamma^\mu(\partial_\mu + ie\bar{A}_\mu) - m]\psi + \underline{e a_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu\psi} \quad \text{with} \quad A_{\text{total}} = \bar{A} + a$$

ゆらぎ

例) QED　非摂動的に扱う　相互作用項 (摂動的に扱う)　強い場: 手で固定した外場

できていること

- 簡単な電磁場配位 (特に、一様定常電磁場、平面波) ならプロパゲータが厳密に求まる
  ⇒ 有効作用や断面積も (しばしば) 厳密に求まる
- 有名な例: Euler-Heisenberg effective action (一様定常電磁場中の1ループ有効作用)



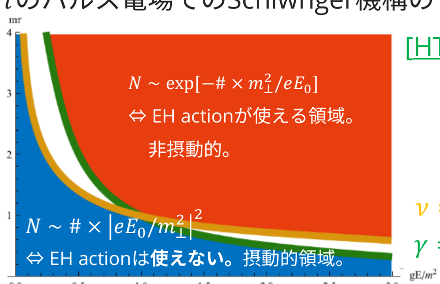
$$\Rightarrow \mathcal{L} = -\mathcal{F} - \frac{1}{8\pi^2}\int_0^\infty \frac{ds}{s^3}\exp(-m_e^2 s)\left[(es)^2 \frac{\mathrm{Re}\cosh\left(es\sqrt{2(\mathcal{F}+i\mathcal{G})}\right)}{\mathrm{Im}\cosh\left(es\sqrt{2(\mathcal{F}+i\mathcal{G})}\right)}\mathcal{G} - \frac{2}{3}(es)^2\mathcal{F} - 1\right]$$

$$= \frac{1}{2}(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2) + \frac{2\alpha^2}{45 m_e^4}\left[(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2)^2 + 7(\mathbf{E}\cdot\mathbf{B})^2\right] + \cdots$$

[Heisenberg, Euler (1936)]

未解明なこと

- 簡単な電磁場配位しかやられてない
  e.g., 電磁場が非一様だとEH actionは全然使えない
  (寿命τのパルス電場でのSchiwnger機構の”相図”)

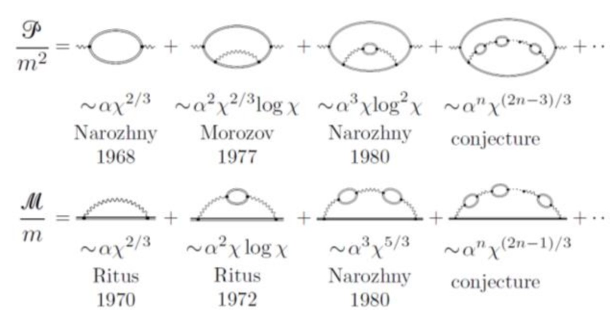


[HT, Fujii, Itakura (2014)]

$\nu = gE_0\tau^2 = 1$

$\gamma = gE_0\tau/m = 1$

- 量子補正がα^nでコントロールできない可能性
  ($\alpha\chi^{2/3}$ problem, Ritus-Narozhny conjecture)



[Ritus (1972)]
[Narozhny (1980)]
[Fedotov (2017)]

理論的な話 (2/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカル: (量子ゆらぎと結合した)強い場の発展も陽に追う。

現状

・完璧な理論はない。よく使われるのが：

理論的な話 (2/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカル: (量子ゆらぎと結合した)強い場の発展も陽に追う。

現状

- 完璧な理論はない。よく使われるのが：

- 古典場(+量子ゆらぎ)のアプローチ

  - 平均場近似：Kluger, Mottola, Cooper, Svetitsky, Tanji, HT, ...

$$\begin{cases} \left[i\gamma^\mu\left(\partial_\mu + ie\bar{A}_\mu\right) - m\right]\psi = 0 \\ \partial^\mu \bar{F}_{\mu\nu} = e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi \to e\langle\bar{\psi}\gamma^\mu\psi\rangle \end{cases}$$

  - Real-time lattice fermion technique: Berges, Schlichting, Tanji, ...
  - Classical statistical simulation: Gelis, Epelbaum, Tanji, ...
  - Classical EoM: Lappi, Kyoto group, ...

[Mueller, Son (2004)] [Jeon (2004)]

適用条件: 場がとても強く ≃ 系がとても密($f \gg 1$) ⇒ 系はcoherent (粒子描像は適用不可)

理論的な話 (2/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカル: (量子ゆらぎと結合した)強い場の発展も陽に追う。

現状

- 完璧な理論はない。よく使われるのが：

- 古典場(+量子ゆらぎ)のアプローチ

- 平均場近似: Kluger, Mottola, Cooper, Svetitsky, Tanji, HT, ...

- Real-time lattice fermion technique: Berges, Schlichting, Tanji, ...
- Classical statistical simulation: Gelis, Epelbaum, Tanji, ...
- Classical EoM: Lappi, Kyoto group, ...

$$\begin{cases} \left[i\gamma^\mu(\partial_\mu + ie\bar{A}_\mu) - m\right]\psi = 0 \\ \partial^\mu \bar{F}_{\mu\nu} = e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi \to e\langle\bar{\psi}\gamma^\mu\psi\rangle \end{cases}$$

[Mueller, Son (2004)] [Jeon (2004)]

適用条件: 場がとても強く ≃ 系がとても密($f \gg 1$) ⇒ 系はcoherent (粒子描像は適用不可)

- 運動学的アプローチ

Matsui, Kerman, Gattoff, Asakawa, Blaschke, Smolyansky, Hebenstreit, Kurkela, ...

$$p^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} f(x,p) = (\text{collision term}) + (\text{source term})$$

適用条件: 場がそんなに強くない ≃ 系がそこそこ疎($e^2 f \ll 1$) ⇒ 系はincoherent (粒子描像が適用可)

理論的な話 (2/2)

✔ 強い場がダイナミカルか否か大別できる

ダイナミカル: (量子ゆらぎと結合した)強い場の発展も陽に追う。

現状

- 完璧な理論はない。よく使われるのが：

- 古典場(+量子ゆらぎ)のアプローチ

- Real-time lattice fermion technique: Berges, Schlichting, Tanji, ...
- Classical statistical simulation: Gelis, Epelbaum, Tanji, ...
- Classical EoM: Lappi, Kyoto group, ...
- 平均場近似：Kluger, Mottola, Cooper, Svetitsky, Tanji, HT, ...

$$\begin{cases} \left[i\gamma^\mu\left(\partial_\mu + ie\bar{A}_\mu\right) - m\right]\psi = 0 \\ \partial^\mu \bar{F}_{\mu\nu} = e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi \to e\langle\bar{\psi}\gamma^\mu\psi\rangle \end{cases}$$

[Mueller, Son (2004)] [Jeon (2004)]

適用条件: 場がとても強く ≃ 系がとても密($f \gg 1$) ⇒ 系はcoherent (粒子描像は適用不可)

- 運動学的アプローチ

Matsui, Kerman, Gattoff, Asakawa, Blaschke, Smolyansky, Hebenstreit, Kurkela, ...

$$p^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} f(x,p) = (\text{collision term}) + (\text{source term})$$

適用条件: 場がそんなに強くない ≃ 系がそこそこ疎($e^2 f \ll 1$) ⇒ 系はincoherent (粒子描像が適用可)

未解明なこと

- 古典場/運動学的アプローチをつなぐ統一的な手法 (Kadanoff-Baymをまじめに解く。2PI。) Nishiyama, Hatta, Tsutsui, Berges, Aarts, ...
- ”ちゃんとした”collision/source termのインプリ
- 放射のバックリアクションを含んだ有効模型 (Lorentz-Abraham-Dirac模型, Landau-Lifshitz模型, ...)
- カスケード的な過程：マグネター、レーザー ...

1. 重イオンにおける強いカラー場

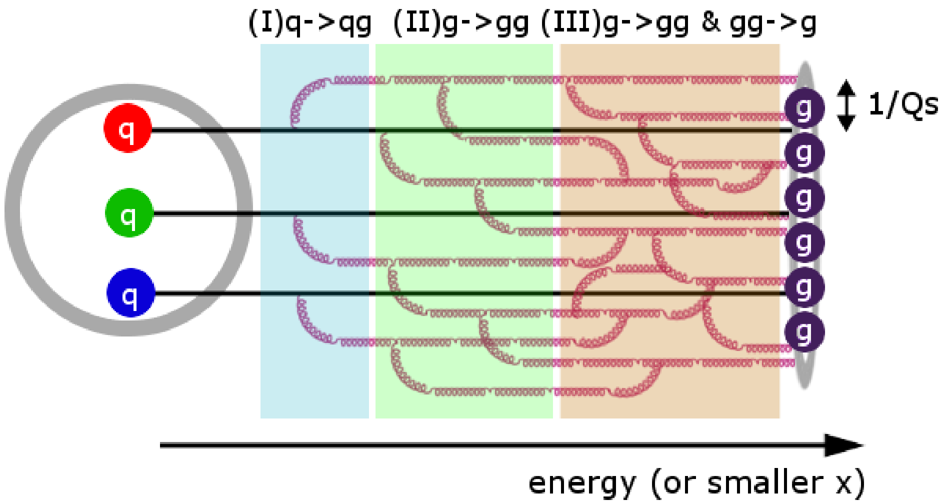
強いカラー場のできかた

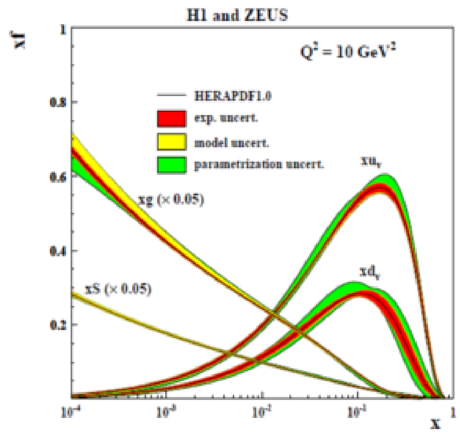
強いカラー場のできかた

✔ **高エネルギー原子核はグルーオンだらけ** (カラーグラス凝縮(CGC)状態) [McLerran, Venugopalan (1994)]

⇒ カラー電荷が濃密に詰まった"カラー電極"みたいな状態

with 電荷密度= $O(Q_s) = O(\text{a few GeV})$



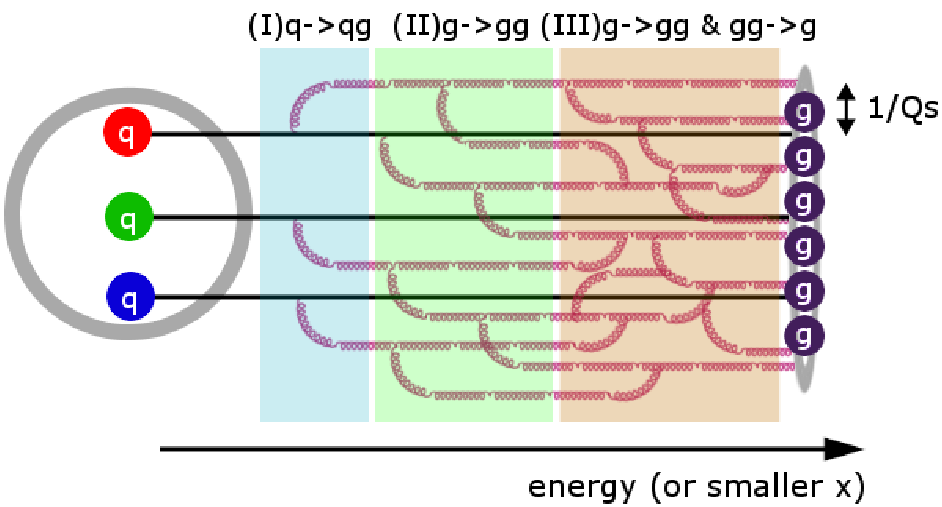


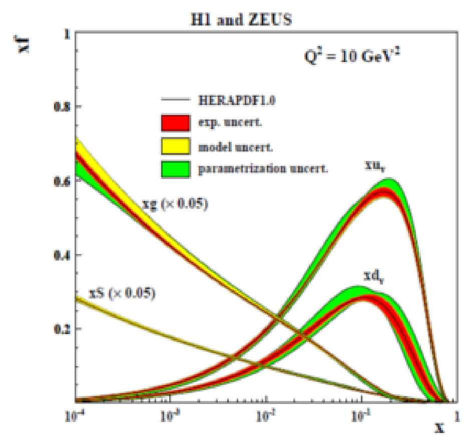
強いカラー場のできかた

✔ **高エネルギー原子核はグルーオンだらけ** **(カラーグラス凝縮(CGC)状態)** [McLerran, Venugopalan (1994)]

⇒ カラー電荷が濃密に詰まった”カラー電極”みたいな状態

with 電荷密度$= O(Q_s) = O(\text{a few GeV})$



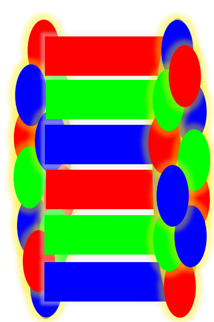


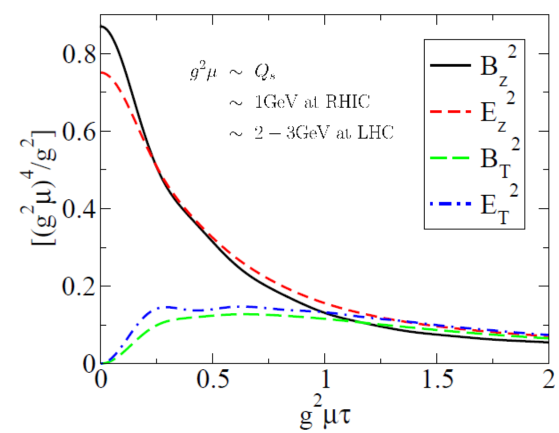
[Lappi, McLerran (2006)]

✔ **高エネルギー原子核衝突**

≃ カラーコンデンサの形成

⇒ 非常に強いカラー電磁場の形成





昔のflux tube modelの現代版:
[Low (1975)] [Nussinov (1975)] [Casher, Neuberger, Nussinov (1979)]

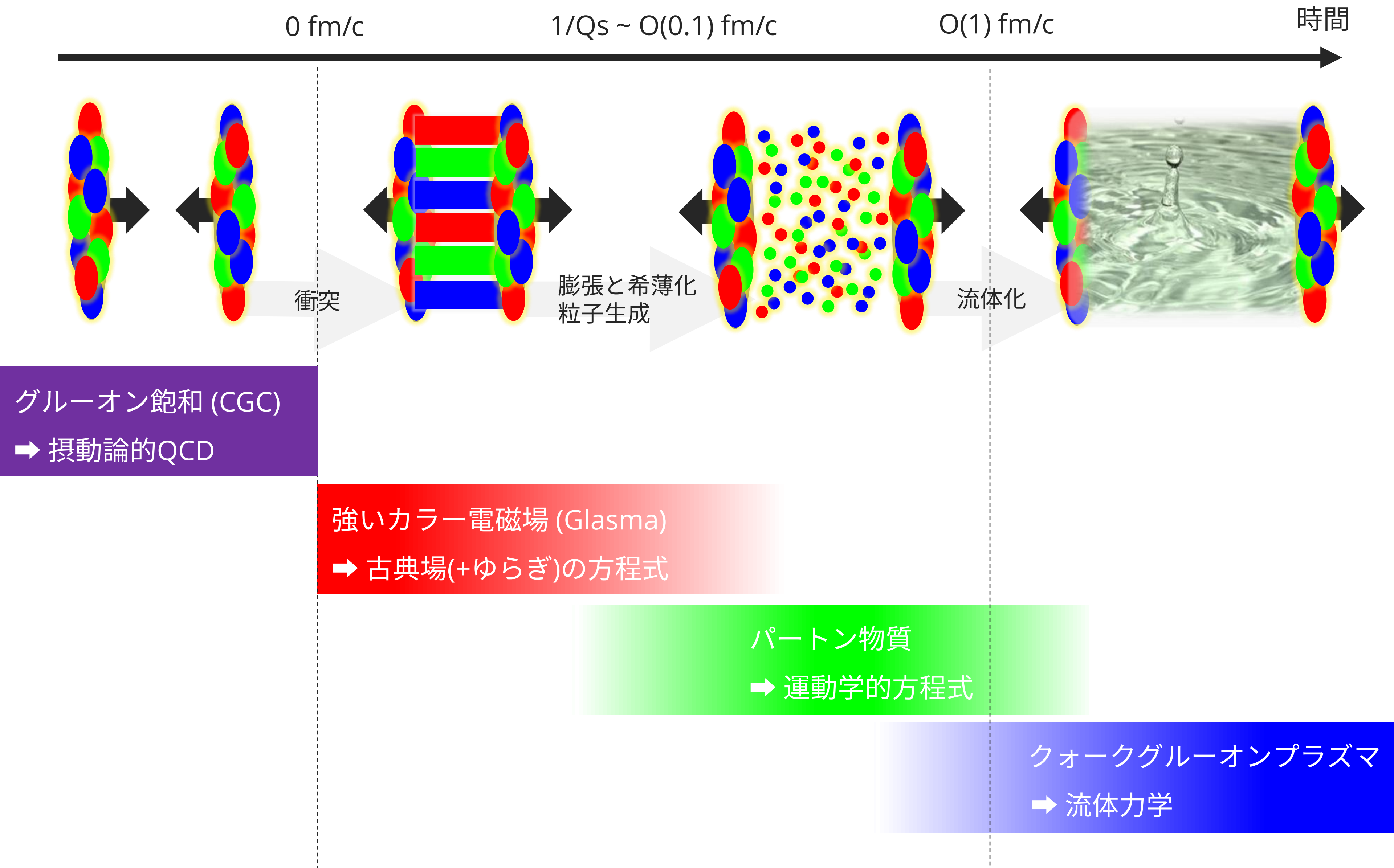
強いカラー場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

✔ **QGP生成過程の理解** (弱結合領域における) [Review: Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

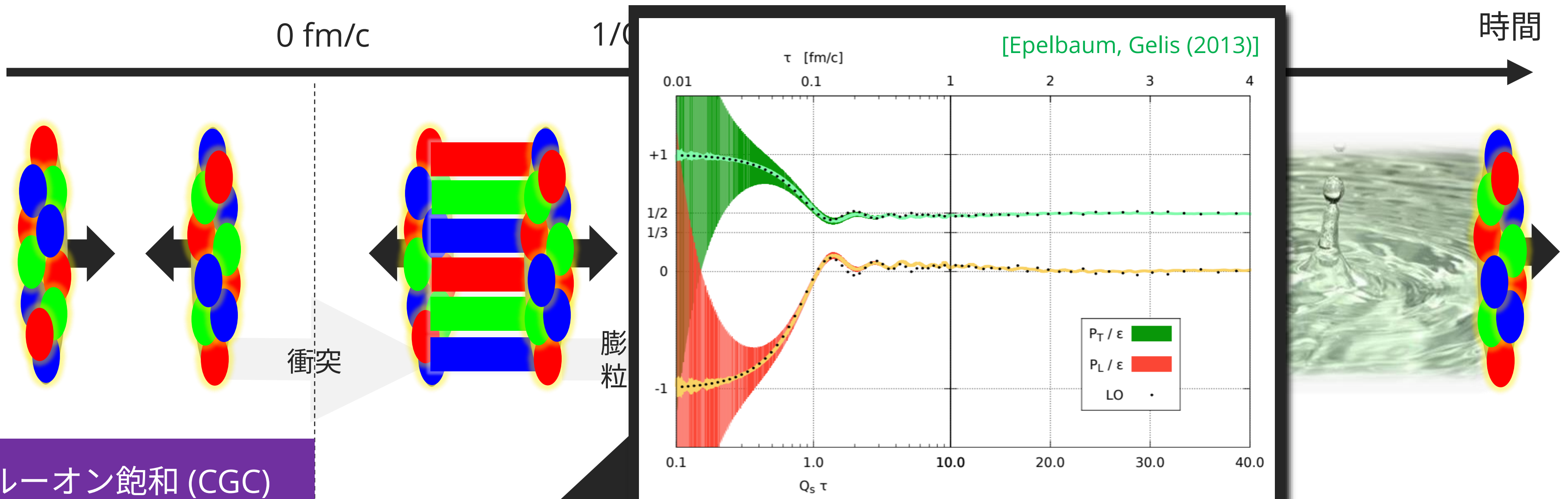
✔ **それに関連した話題・進展**

- クォーク生成、カイラリティ生成 Gelis, Kajantie, Lappi, Tanji, Berges, Fukushima, Copinger, HT, …
- charged v1 flow [Hirono, Hongo, Hirano (2014)] [Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)] [実験: STAR Collaboration (2016), 新井田さんが詳しい]
- 光子・ダイレプトン生成 Matsui, Asakawa, Tanji, Berges, Venugopalan, Liao, McLerran, Gale, …
- Ridge, 長距離rapidity相関 [実験: 関口さんが詳しい]
- 初期由来のpreflow [Dusling, Mace, Venugopalan (2018)]
- KøMPøST [Kurkela, Mazeliauskas, Paquet, Schlichting, Teaney (2018)]
- 非平衡アトラクター・"universality" [Berges, Rothkopf, Schmidt (2008)] [Berges, Boguslavski, Schlichting, Venugopalan (2013)] [Spinor Bose gasでの観測: Prufer et al. (2018)]
- off-equilibrium hydrodynamics [Heller, Spalinski (2015)] [Romatschke (2018)]
- …

QGPの生成シナリオ (弱結合領域における)



QGPの生成シナリオ (弱結合領域における)



- 永久に等方化しない ⇒ 熱平衡に達しない
- UVの取扱いに問題 [Epelbaum, Gelis, Wu (2014)]

グルーオン飽和 (CGC)
➡ 摂動論的QCD

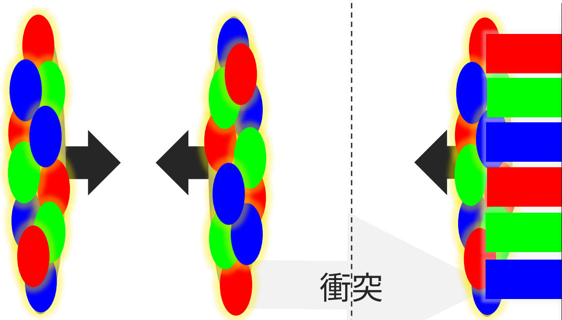
強いカラー電磁場 (Glasma)
➡ 古典場(+ゆらぎ)の方程式

パートン物質
➡ 運動学的方程式

クォークグルーオンプラズマ
➡ 流体力学

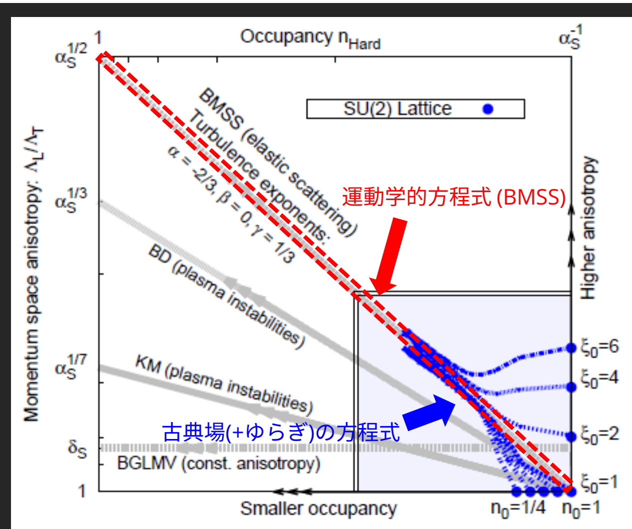
QGPの生成シナリオ (弱結合領域における)

0 fm/c　　1/Qs ~ O(0.1) fm/c　　O(1) fm/c　　時間



衝突

グルーオン飽和 (CGC)
➡ 摂動論的QCD



- 古典場(+ゆらぎ)の方程式は、運動学的方程式に滑らかに繋がる
  - $1/g^2 \gg f \gg 1$でoverlap
    [Mueller, Son (2004)] [Jeon (2004)]
  - ボトムアップ的な描像を支持
    [Baier, Mueller, Schiff, Son (2001)]
  - 非熱的/非平衡なアトラクター

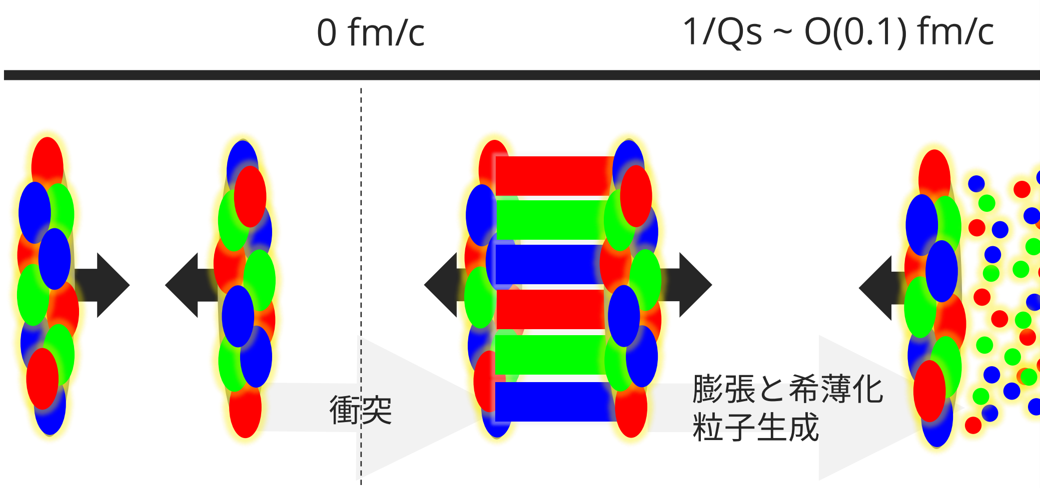
[Berges, Boguslavski, Schlichting, Venugopalan (2014)]

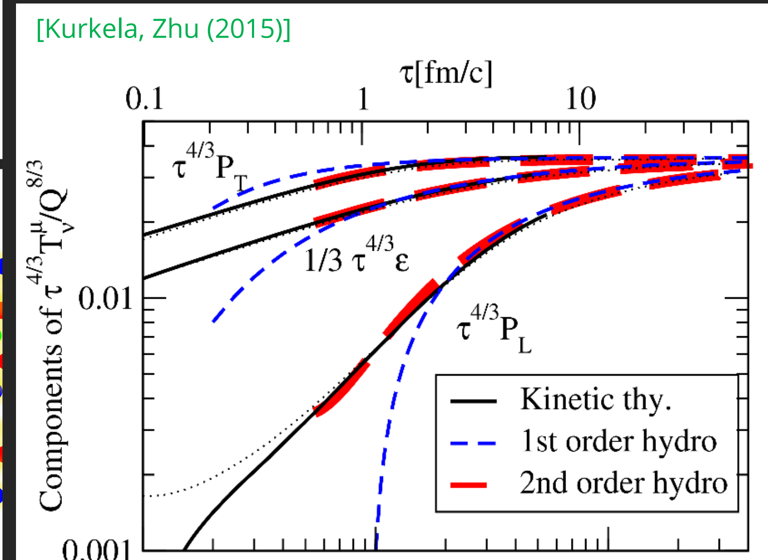
強いカラー電磁場 (Glasma)
➡ 古典場(+ゆらぎ)の方程式

パートン物質
➡ 運動学的方程式

クォークグルーオンプラズマ
➡ 流体力学

QGPの生成シナリオ (弱結合領域における)





- 運動学的方程式は、流体計算に滑らかにつながる
- 「非等方(非平衡)でも流体が使える」と思えば、時間スケールは短い：$\tau \sim O(1)$ fm/c
  - 「早い熱化問題」と矛盾しない
  - off-equilibriumなhydrodynamics？
  - 「流体化」と等方化や熱化を区別する必要？

[Romatschke (2018)]

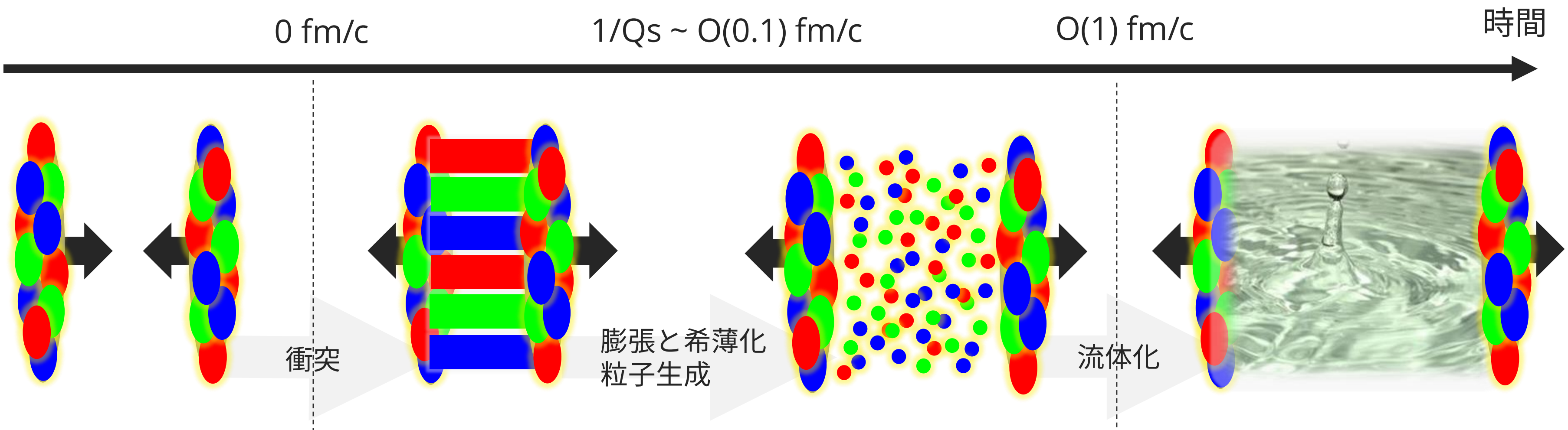
グルーオン飽和 (CGC)
➡ 摂動論的QCD

強いカラー電磁場 (Glasma)
➡ 古典場(+ゆらぎ)の方程式

パートン物質
➡ 運動学的方程式

クォークグルーオンプラズマ
➡ 流体力学

QGPの生成シナリオ (弱結合領域における)



グルーオン飽和 (CGC)
➡ 摂動論的QCD

強いカラー電磁場 (Glasma)
➡ 古典場(+ゆらぎ)の方程式

パートン物質
➡ 運動学的方程式

クォークグルーオンプラズマ
➡ 流体力学

強いカラー場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

✔ QGP生成過程の理解 (弱結合領域における)

[Review: Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

⇒ それっぽいシナリオは出来つつある
しかし、実験的にどうconfirmするかは依然open problem

✔ それに関連した話題・進展

- クォーク生成、カイラリティ生成 Gelis, Kajantie, Lappi, Tanji, Berges, Fukushima, Copinger, HT, ...
- charged v1 flow [Hirono, Hongo, Hirano (2014)] [Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)] [実験: STAR Collaboration (2016), 新井田さんが詳しい]
- 光子・ダイレプトン生成 Matsui, Asakawa, Tanji, Berges, Venugopalan, Liao, McLerran, Gale ...
- Ridge, 長距離rapidity相関 [実験: 関口さんが詳しい]
- 初期由来のpreflow [Dusling, Mace, Venugopalan (2018)]
- KøMPøST [Kurkela, Mazeliauskas, Paquet, Schlichting, Teaney (2018)]
- 非平衡アトラクター・"universality" [Berges, Rothkopf, Schmidt (2008)] [Berges, Boguslavski, Schlichting, Venugopalan (2013)] [Spinor Bose gasでの観測: Prufer et al. (2018)]
- off-equilibrium hydrodynamics [Heller, Spalinski (2015)] [Romatschke (2018)]
- ...

2. 重イオンにおける強い電磁場

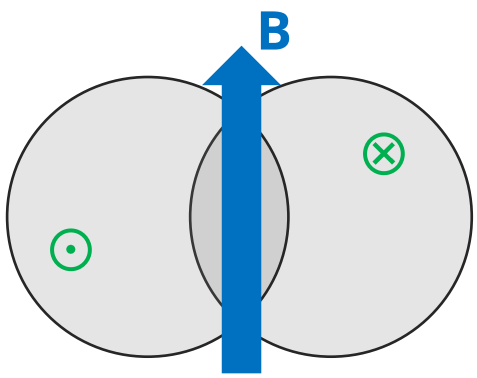
強い電磁場のできかた

✔ 3種類ある

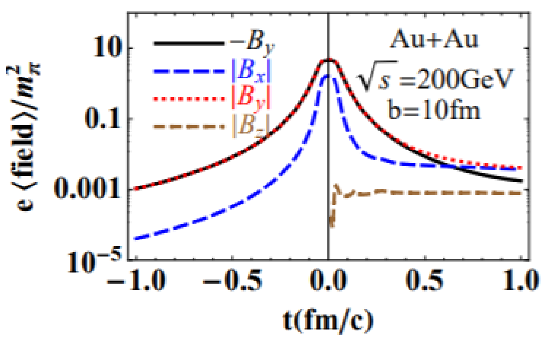
強い電磁場のできかた

✔ 3種類ある

① 非中心/(超)周辺衝突



$$eB \sim \frac{\alpha Z v \gamma}{r^2} \sim \alpha Z \gamma \times m_\pi^2$$

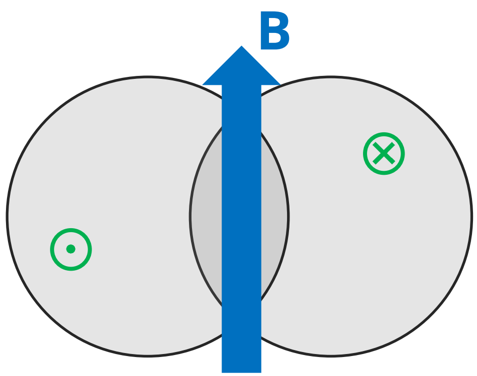


[Deng, Huang (2012)]

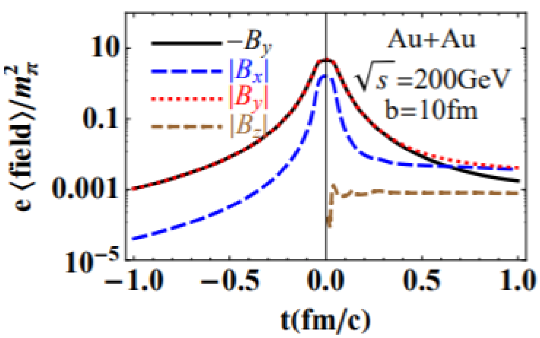
強い電磁場のできかた

✔ **3種類ある**

① 非中心/(超)周辺衝突

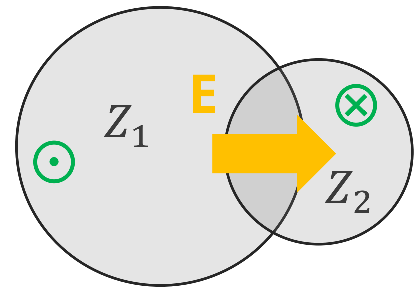


$$eB \sim \frac{\alpha Z v \gamma}{r^2} \sim \alpha Z \gamma \times m_\pi^2$$

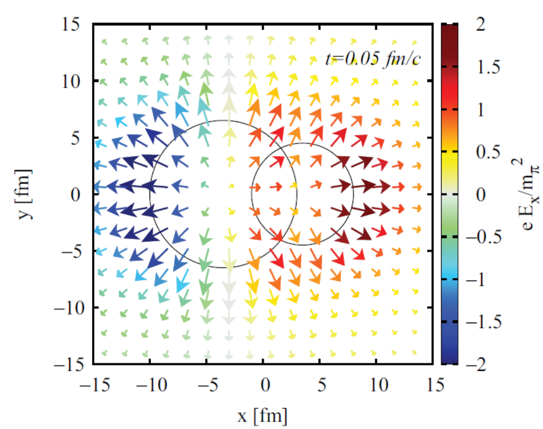


[Deng, Huang (2012)]

② 非対称衝突



$$eE \sim \frac{\alpha (Z_1 - Z_2)\gamma}{r^2}$$
$$\sim \alpha (Z_1 - Z_2)\gamma \times m_\pi^2$$

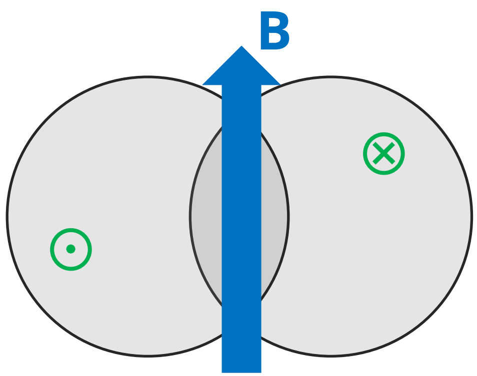


[Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)]

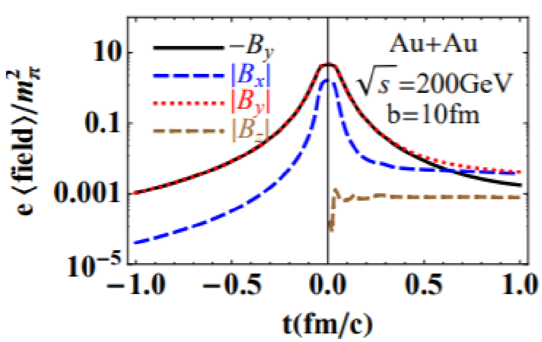
強い電磁場のできかた

✔ **3種類ある**

① 非中心/(超)周辺衝突

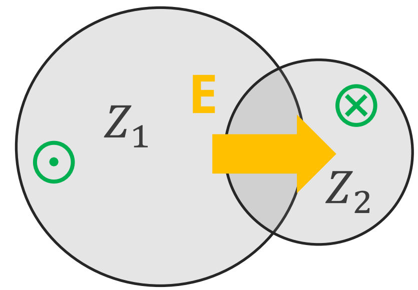


$$eB \sim \frac{\alpha Z v \gamma}{r^2} \sim \alpha Z \gamma \times m_\pi^2$$

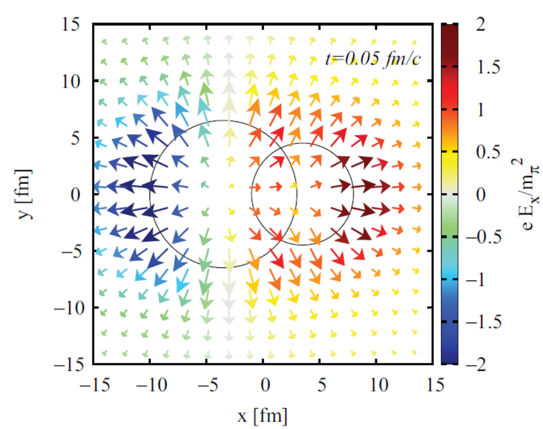


[Deng, Huang (2012)]

② 非対称衝突

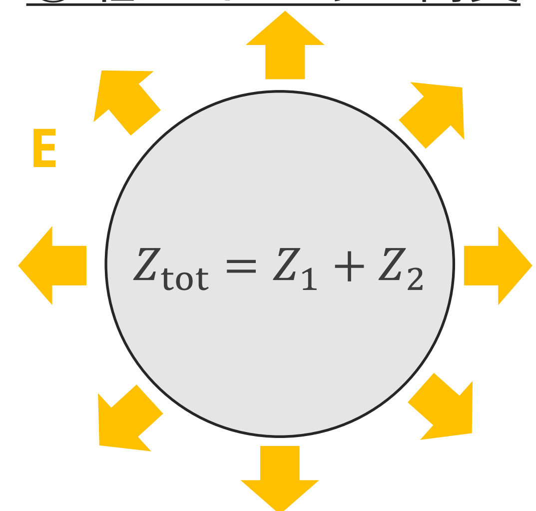


$$eE \sim \frac{\alpha (Z_1 - Z_2)\gamma}{r^2} \sim \alpha (Z_1 - Z_2)\gamma \times m_\pi^2$$

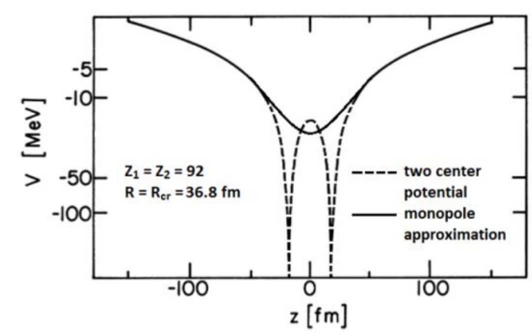


[Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)]

③ 低エネルギー衝突



$$eE \sim \frac{\alpha Z_{\rm tot}}{r^2} \sim \alpha Z_{\rm tot} \times m_\pi^2$$



[Review: Rafelski, Kirsch, Muller, Reinhardt, Greiner (2014)]

(まともなシミュレーションを田屋は知らない)

強い電磁場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

① 非中心/超周辺衝突

- 光子光子散乱 [Enterria, Silveira (2013)] [Klusek-Gawenda, Lebiedowicz (2016)] [実験: ATLAS Collaboration (2017)]
- 真空複屈折の"観測" [理論: 服部さんが詳しい] [Hattori, Huang, HT, Yoshida (in prep.)] [(?) STAR Collaboration (2019)]
- カイラル磁気効果 [理論: 本郷, 広野, ...さんあたりが詳しい]

② 非対称衝突

- charged v1 flow [実験: STAR Collaboration (2016), 新井田さんが詳しい] [Hirono, Hongo, Hirano (2014)] [Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)]

③ 低エネルギー衝突

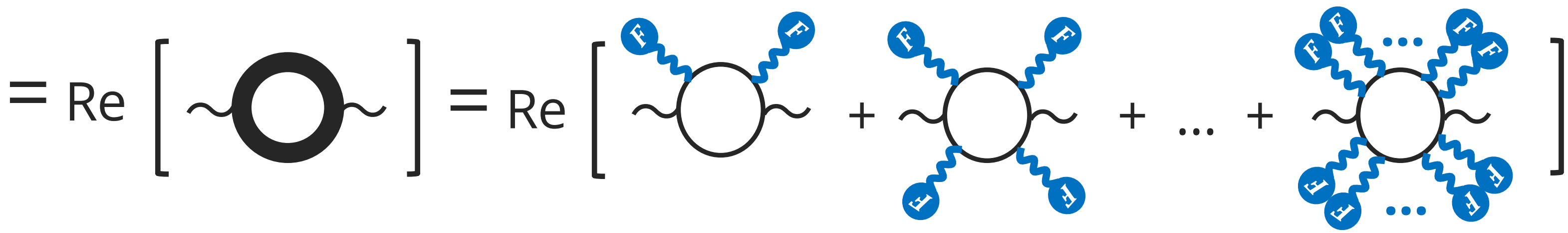
- 低エネルギー衝突での真空崩壊 (~Schwinger機構) [Review: Rafelski, Kirsch, Muller, Reinhardt, Greiner (2014)] [理論による実験への最近の提案: Maltsev et al (2019)] [グラフェンでの類似物の観測: Wang et al. (2013)]
- ...

定義: 強い電磁場による複屈折

未観測

[中性子星での観測?: Mignani, Testa, Caniulef, Taverna, Turolla, Zane, Wu (2017)]

複屈折 $\stackrel{\text{def}}{\equiv}$ 強い電磁場との(多重)散乱で、光子の伝搬が偏極に依存する現象

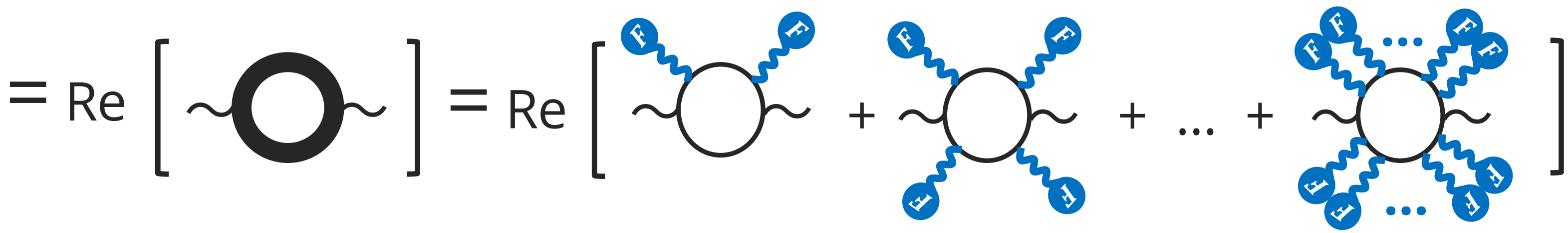


定義: 強い電磁場による複屈折

未観測

[中性子星での観測?: Mignani, Testa, Caniulef, Taverna, Turolla, Zane, Wu (2017)]

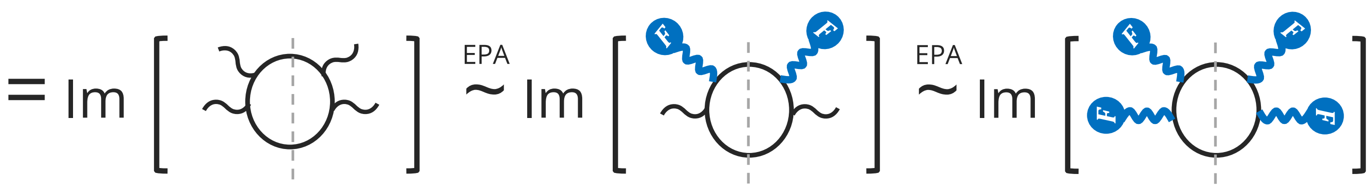
複屈折 $\overset{\text{def}}{\equiv}$ 強い電磁場との(多重)散乱で、光子の伝搬が偏極に依存する現象



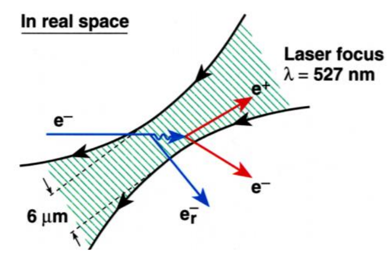
未観測

Breit-Wheeler過程 $\overset{\text{def}}{\equiv} 2\gamma \to e^+e^-$過程

(正確には、Landau-Lifshitz過程)



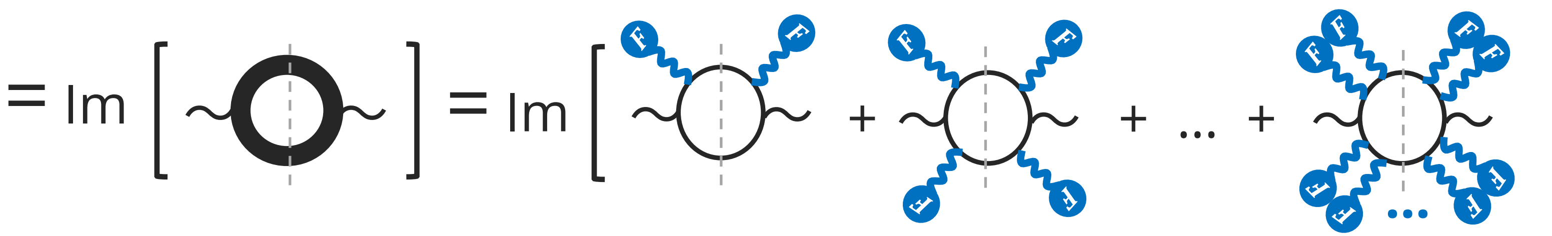
(正確には、Bether-Heitler過程)



観測済

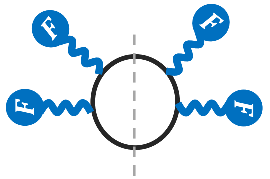
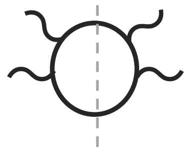
非線形Breit-Wheeler過程 $\overset{\text{def}}{\equiv} \gamma + n\gamma^* \to e^+e^-$過程

[SLAC E144実験: Burke et al (1997)]



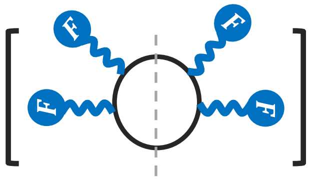
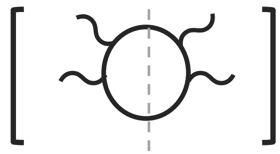
実験で見えていること (1/2)

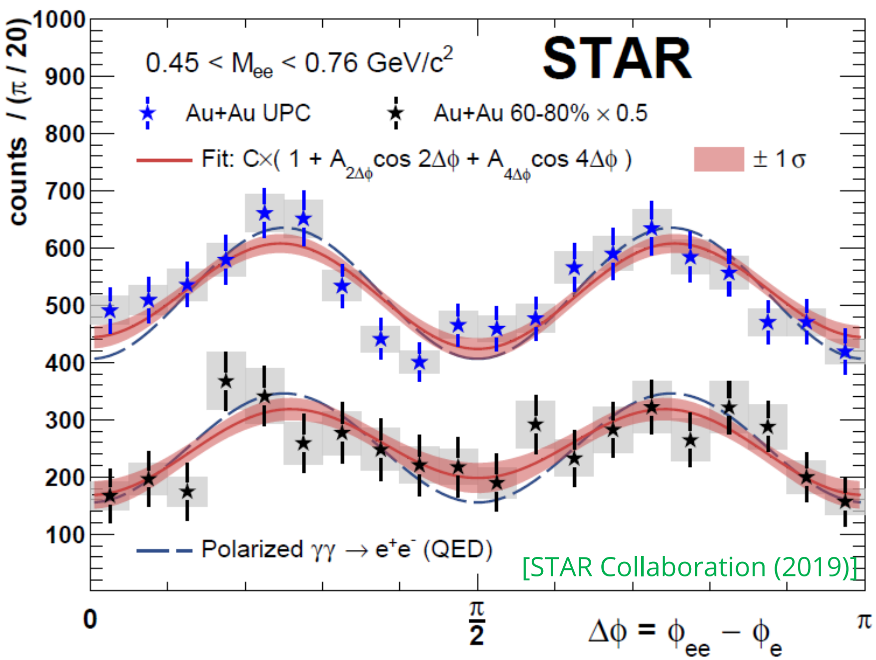
✔ **超周辺衝突事象において、強い電磁場の衝突で作られたダイレプトンを測った**

⇔ Im [] $\overset{\text{EPA}}{\sim}$ Im [] **(i.e., Breit-Wheeler過程)を測った**

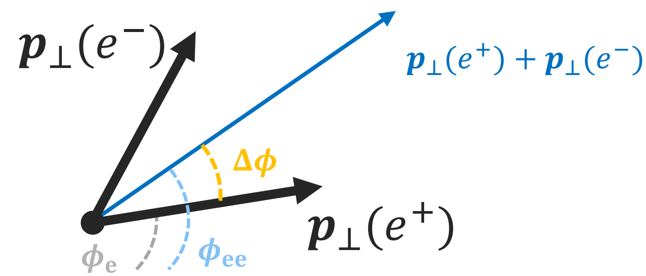
実験で見えていること (1/2)

✔ 超周辺衝突事象において、強い電磁場の衝突で作られたダイレプトンを測った

⇔ Im  $\overset{\text{EPA}}{\sim}$ Im  (i.e., Breit-Wheeler過程)を測った



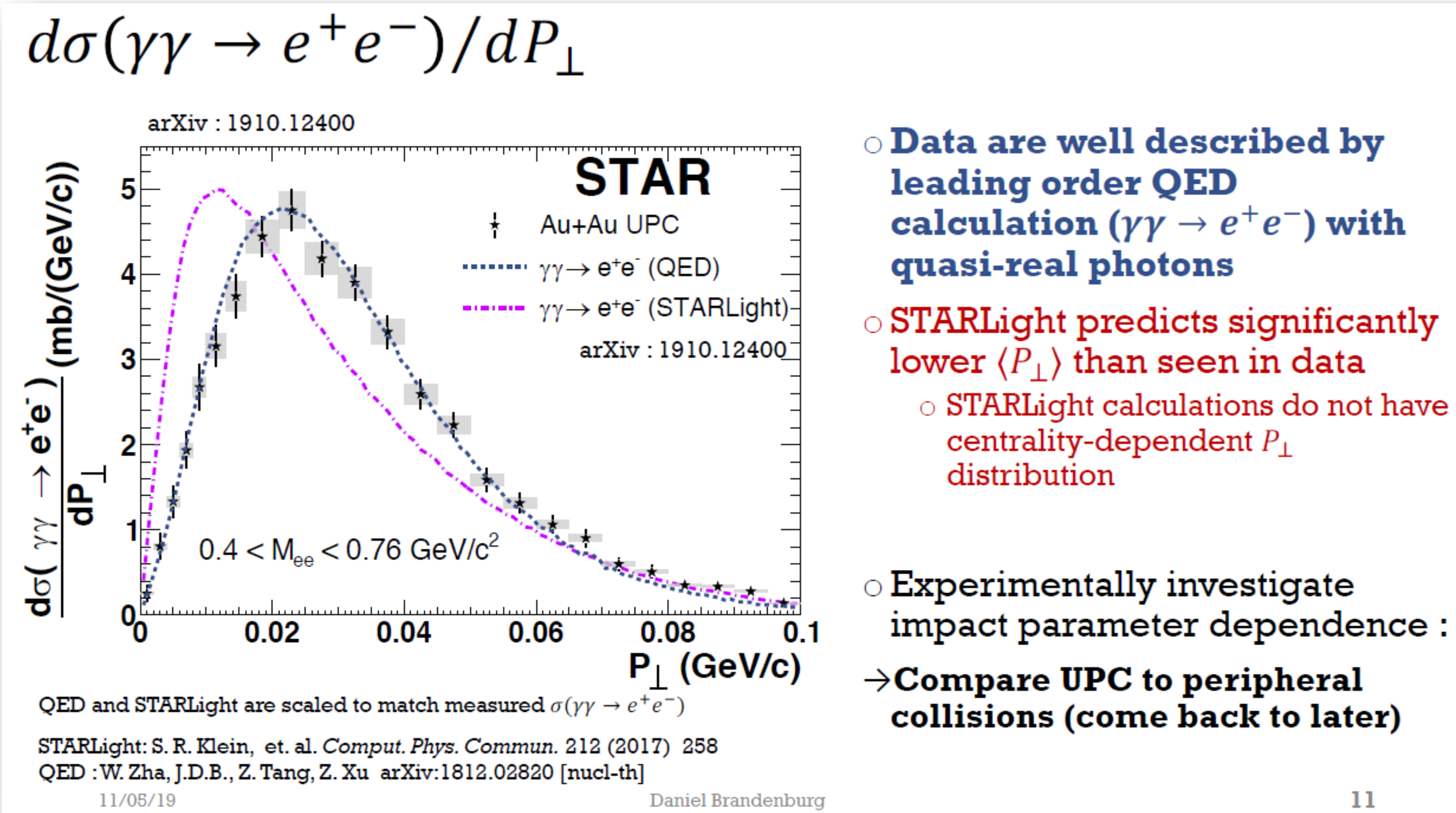
[STAR Collaboration (2019)]



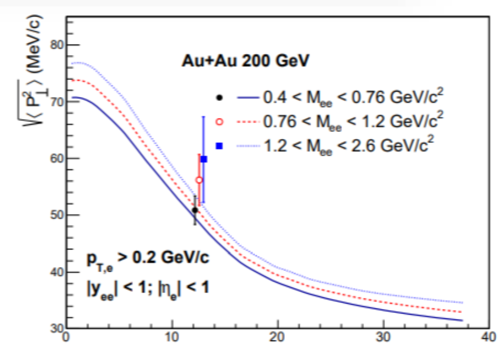
Differential Quantities	Ultra-Peripheral			Peripheral HHICs		
	Measured	QED	χ^2/ndf	Measured	QED	χ^2/ndf
$\lvert A_{4\Delta\phi}\rvert$ (%)	16.8 ± 2.5	22	18.8 / 16	27±6	39	10.2 / 17
$\lvert A_{2\Delta\phi}\rvert$ (%)	2.0 ± 2.4	0	18.8 / 16	6±6	0	10.2 / 17
$\sqrt{\langle P_\perp^2\rangle}$ (MeV/c)	38.1±0.9	37.6	—	50.9±2.5	48.5	—

- ローレンツ収縮した電磁場 ~ 直線偏光した(ほぼ)実光子の集合 → 方位角方向の依存性
- 高次補正は見えてなさそう(?)。最低時のQED計算 (2$\gamma \to e^+e^-$の断面積をEPAの光子分布で積分) と大体合致
  [Zha, Brandenburg, Tang, Xu (2019)] [Li, Zhou, Zhou (2019)]
- 実部は測っていない (原理的には関係しているが、複屈折というのはミスリーディング)

実験で見えていること (2/2)



[Zha, Brandenburg, Tang, Xu (2019)]



- di-leptonの横運動量$P_\perp$分布は、インパクトパラメータbと相関
  ($\because$ 親光子の横運動量$\sim 1/b$)

- STARLightはインパクトパラメータbを積分/平均した結果
  $\Rightarrow$ $P_\perp$分布がソフトに。b依存性を適切に入れた計算が必要

強い電磁場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

① 非中心/超周辺衝突

- 光子光子散乱 [Enterria, Silveira (2013)] [Klusek-Gawenda, Lebiedowicz (2016)] [実験: ATLAS Collaboration (2017)]

- 真空複屈折の"観測" [理論: 服部さんが詳しい] [Hattori, Huang, HT, Yoshida (in prep.)] [(?) STAR Collaboration (2019)]

  ⇒ 重イオン衝突を「強い場の物理」の実験場として利用できる可能性

  理論的課題: 高次補正、磁場強度の推定、cos(2ΔΦ)以外の観測量、etc

- カイラル磁気効果 [理論: 本郷, 広野, ...さんあたりが詳しい]

② 非対称衝突

- charged v1 flow [実験: STAR Collaboration (2016), 新井田さんが詳しい] [Hirono, Hongo, Hirano (2014)] [Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)]

③ 低エネルギー衝突

- 低エネルギー衝突での真空崩壊 (~Schwinger機構)

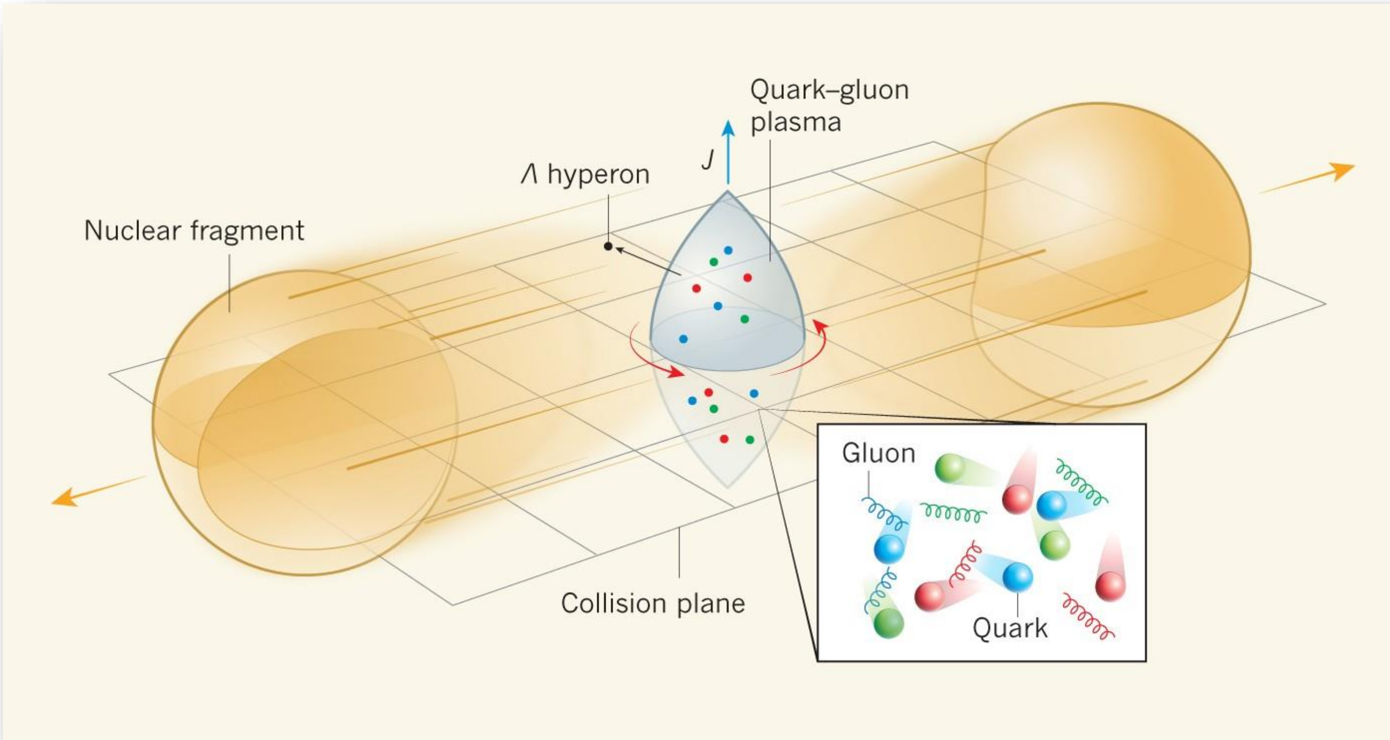
  [Review: Rafelski, Kirsch, Muller, Reinhardt, Greiner (2014)]
  [理論による実験への最近の提案: Maltsev et al (2019)]
  [グラフェンでの類似物の観測: Wang et al. (2013)]

- ...

3. 重イオンにおける強い渦度場

[新井田さんのトークがもっと詳しい]

強い渦度場のできかた

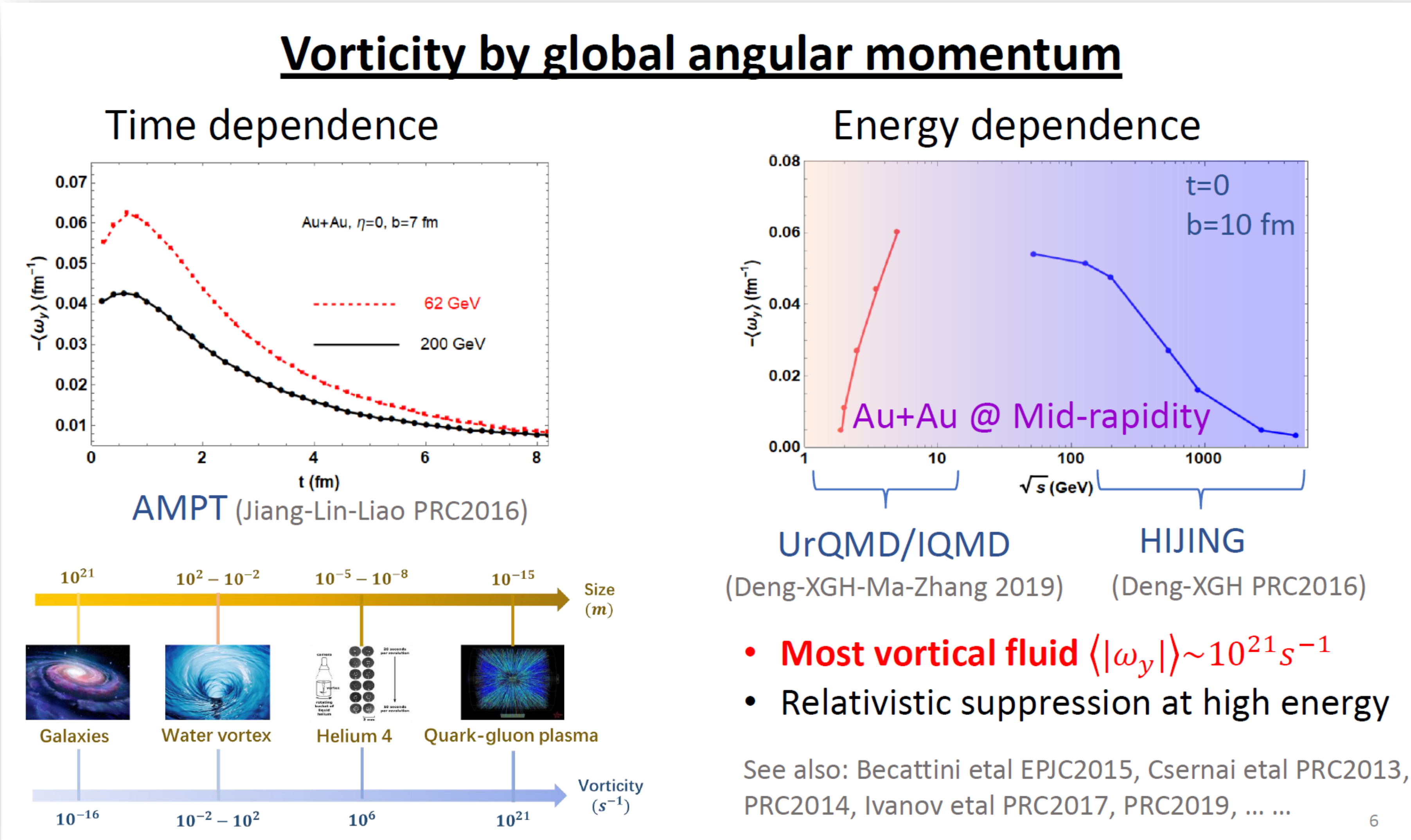


✔ **系は巨大な角運動量を** (globalに) **持つ:** $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{x} \sim \sqrt{s}A \times \boldsymbol{b}/2 \;\sim 10^6 \hbar$

〜 生成されたQGPは大きな渦度 $\boldsymbol{\omega} \equiv \mathbf{rot}\, \boldsymbol{v}$ を持ち<u>そう</u>

(localなvorticityも存在する → 新井田さんのトークを参照)

数値計算的に正しそう



Slides by Xu-Guang Huang at QM2019

なにが期待されるか

[Liang, Wang (2005)]
[Voloshin (2004)]

QGPはスピン偏極する

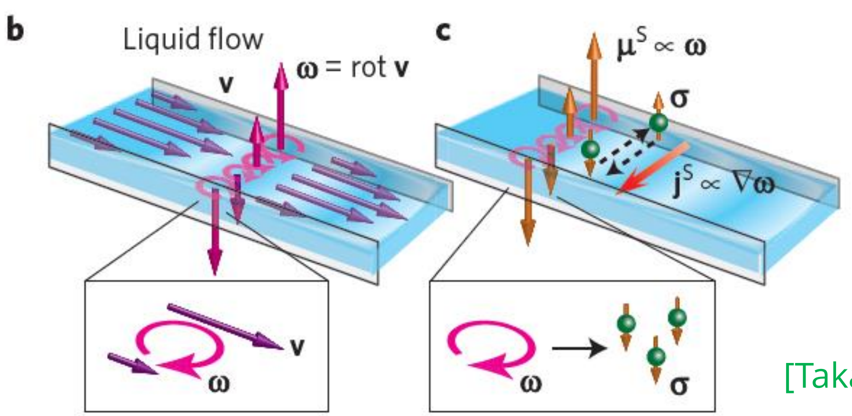
✔ **spin-vorticity coupling** $\boldsymbol{E} \to \boldsymbol{E} - \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{s}$ (~ LS force $\delta E \propto L \cdot s$)

- 分布関数が、$f_s(E/T) \to f_s(\frac{E-\omega\cdot s}{T})$ と変更される

$$\Rightarrow \quad P \equiv \frac{f_\uparrow - f_\downarrow}{f_\uparrow + f_\downarrow} = O(\omega/T) = O(0.1 - 1\%)$$

[Vilenkin (1980)]
[Hehl, Ni (1990)]
[Matsuo *et al.* (2011)]
[Beccatini (2012)]
[Beccatini *et al.* (2013)]
[Hattori *et al*. (2019)] ...

- スピントロニクスでアナログが観測済



[Takahashi *et al* (2015)]

実験でも見えてるっぽい

[STAR Collaboration (2018)] [新井田さんのトークも参照]

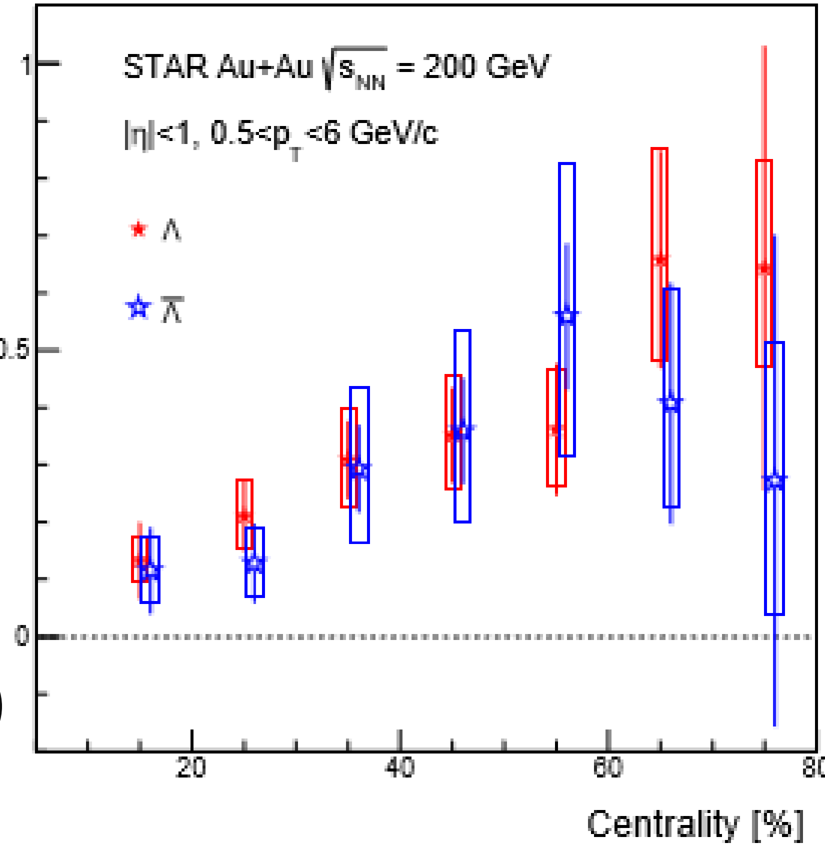
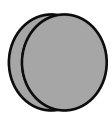
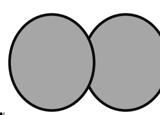


FIG. 5. Λ ($\bar{\Lambda}$) polarization as a function of the collision centrality in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Open boxes and vertical lines show systematic and statistical uncertainties. The data points for $\bar{\Lambda}$ are slightly shifted for visibility.

central
$\omega \sim 0$



non-central
$\omega \gg 1$



実験結果は $\omega = O(10^{20}\ \mathrm{Hz}) = O(1 \sim 10\ \mathrm{MeV})$を示唆

⇒ 理論的予想とオーダーはコンシステント

強い渦度場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

- 新しい観測量
  - Vector meson (e.g., Φ, K*) の spin alignment [Liang, Wang (2005)] [実験: STAR Collaboration (2008), (2019)] [実験: ALICE Collaboration (2020)]
  - スピン依存したハドロン収量 [HT et al (ExHIC-P Collaboration) (2020)]
  - 方位角依存性とかlocalな量 [Becattini, Karpenko (2018)] [Xia, Li, Tang, Wang (2018)] …
  - …
- “符号問題” (Λ偏極の方位角依存性) [実験: STAR Collaboration (2018)]
- カイラル渦度効果(CVE) [理論: 本郷, 広野, …さんあたりが詳しい]
- スピン流体力学 [非相対論: “micropolar fluid”; Eringen (1998), Lukaszewicz (1999)] [ideal: Florkowski, Friman, Jaiswal, Speranza (2018)] [1st order: Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]
- カイラル運動論 Son, Yamamoto, Stephanov, Yang, Hattori, Hidaka, Huang, Memeda, … [スピン流体の導出: Shi, Gale, Jeon (2020)]
- 角運動量/スピンの分解 [pQCDや光学でいろいろ発展がある。最近のレビューとして: Fukushima, Pu (2020)]
- …

スピン流体の現状

✔ **QGPの発展は流体力学でよく理解できる**

⇒ スピン偏極したQGPの発展も流体力学的記述が有効だろう

スピン流体の現状

- ✔ **QGPの発展は流体力学でよく理解できる**

  ⇒ スピン偏極したQGPの発展も流体力学的記述が有効だろう

- ✔ **相対論的なスピン流体は発展途上**

スピン流体の現状

- ✔ **QGPの発展は流体力学でよく理解できる**

  ⇒ スピン偏極したQGPの発展も流体力学的記述が有効だろう

- ✔ **相対論的なスピン流体は発展途上**

非相対論的

既に確立している (e.g. micropolar fluid) [Eringen (1998)] [Lukaszewicz (1999)]

・実際の物理現象の記述にも成功している e.g. spintronics: [Takahashi et al. (2015)]

・**スピンは保存しない**。保存するのは、全角運動量=軌道角運動量+スピン

スピン流体の現状

✔ QGPの発展は流体力学でよく理解できる

⇒ スピン偏極したQGPの発展も流体力学的記述が有効だろう

✔ 相対論的なスピン流体は発展途上

非相対論的

既に確立している (e.g. micropolar fluid) [Eringen (1998)] [Lukaszewicz (1999)]

- 実際の物理現象の記述にも成功している e.g. spintronics: [Takahashi et al. (2015)]
- **スピンは保存しない。**保存するのは、全角運動量=軌道角運動量+スピン

相対論的

確立していない [Florkowski, Ryblewski, Kumar, ...]

- “ideal”なスピン流体はあるが、そもそも**スピンは保存しないので変。**
- しばしば目にする“流体力学の数値計算”にはスピン自由度は入っていない

(スピンが入っていない普通の流体を解く → Freeze-outでの(thermal) vorticityを計算

→ Cooper-Fryeにspin-vorticity coup.を手で入れて、スピンに依存した観測量を出す)

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1:

ステップ2:

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2:

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

-

-

-

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$
-
-

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$\begin{aligned} T^{\mu\nu} = {} & f_1(\beta) g^{\mu\nu} + f_2(\beta) u^\mu u^\nu \\ & + f_3(\beta) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\rho u_\sigma + f_4(\beta) \partial^\mu u^\nu + f_5(\beta) \partial^\nu u^\mu \\ & + f_6(\beta) g^{\mu\nu} \partial^\rho u_\rho + f_7(\beta) u^\mu u^\nu \partial^\rho u_\rho + f_8(\beta) u^\mu \partial_\mu u^\nu + \cdots + O(\partial^2) \end{aligned}$$

-

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$
\begin{aligned}
T^{\mu\nu} = & f_1(\beta) g^{\mu\nu} + f_2(\beta) u^\mu u^\nu \\
& + f_3(\beta) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\rho u_\sigma + f_4(\beta) \partial^\mu u^\nu + f_5(\beta) \partial^\nu u^\mu \\
& + f_6(\beta) g^{\mu\nu} \partial^\rho u_\rho + f_7(\beta) u^\mu u^\nu \partial^\rho u_\rho + f_8(\beta) u^\mu \partial_\mu u^\nu + \cdots + O(\partial^2)
\end{aligned}
$$

- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

(1) 対称性

(2) Power counting ⇒ **勾配展開:** 0次→Euler, 1次→Navier-Stokes

(3) 他の物理的要請 ⇒ **熱力学の法則:** $\mathrm{d}s = \beta \mathrm{d}e$, $0 \le \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu (s u^\mu + O(\partial))$

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$T^{\mu\nu} = f_1(\beta) g^{\mu\nu} + f_2(\beta) u^\mu u^\nu$$
$$+ f_3(\beta)\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\partial_\rho u_\sigma + f_4(\beta)\partial^\mu u^\nu + f_5(\beta)\partial^\nu u^\mu$$
$$+ f_6(\beta) g^{\mu\nu}\partial^\rho u_\rho + f_7(\beta) u^\mu u^\nu \partial^\rho u_\rho + f_8(\beta) u^\mu \partial_\mu u^\nu + \cdots + O(\partial^2)$$

- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

  (1) 対称性

  (2) Power counting ⇒ **勾配展開:** 0次→Euler, 1次→Navier-Stokes

  (3) 他の物理的要請 ⇒ **熱力学の法則:** $\mathrm{d}s = \beta \mathrm{d}e$, $0 \leq \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu(s u^\mu + O(\partial))$

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出

[textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$T^{\mu\nu} = f_1(\beta) g^{\mu\nu} + f_2(\beta) u^\mu u^\nu$$
$$+ f_3(\beta) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\rho u_\sigma + f_4(\beta) \partial^\mu u^\nu + f_5(\beta) \partial^\nu u^\mu$$
$$+ f_6(\beta) g^{\mu\nu} \partial^\rho u_\rho + f_7(\beta) u^\mu u^\nu \partial^\rho u_\rho + f_8(\beta) u^\mu \partial_\mu u^\nu + \cdots + O(\partial^2)$$

- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

(1) 対称性
(2) Power counting ⇒ **勾配展開:** 0次→Euler, 1次→Navier-Stokes
(3) 他の物理的要請 ⇒ **熱力学の法則:** $ds = \beta de$, $0 \leq \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu (s u^\mu + O(\partial))$

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出 [textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$T^{\mu\nu}_{(0)} = e u^\mu u^\nu + p(g^{\mu\nu} + u^\mu u^\nu)$$

$$T^{\mu\nu}_{(1)} = -2\kappa\left(Du^{(\mu} + \beta\partial_\perp^{(\mu}\beta^{-1}\right)u^{\nu)} - 2\eta\partial_\perp^{<\mu}u^{\nu>} - \zeta\left(\partial_\mu u^\mu\right)\Delta^{\mu\nu}$$

heat current　shear viscosity　bulk viscosity

- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

(1) 対称性
(2) Power counting ⇒ **勾配展開:** 0次→Euler, 1次→Navier-Stokes
(3) 他の物理的要請 ⇒ **熱力学の法則:** $ds = \beta de$, $0 \leq \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu(su^\mu + O(\partial))$

ステップ3:

流体力学 w/o スピンの導出

流体力学 ≡ 長波長モード(流体変数)のダイナミクスを記述する有効理論(EFT)

EFT的な導出 [textbook by Landau & Lifshitz]

ステップ1: 保存則を書き下す $0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu\} \sim P^\mu$の化学ポテンシャル $\begin{pmatrix} u^\mu = \gamma(1, \boldsymbol{v}/c) \\ u^2 = -1 \end{pmatrix}$

- $T^{\mu\nu}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す

$$T^{\mu\nu}_{(0)} = e u^\mu u^\nu + p(g^{\mu\nu} + u^\mu u^\nu)$$

$$T^{\mu\nu}_{(1)} = -2\kappa\left(Du^{(\mu} + \beta\partial_\perp^{(\mu}\beta^{-1}\right)u^{\nu)} - 2\eta\partial_\perp^{<\mu}u^{\nu>} - \zeta(\partial_\mu u^\mu)\Delta^{\mu\nu}$$

heat current　shear viscosity　bulk viscosity

- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

  (1) 対称性

  (2) Power counting ⇒ **勾配展開:** 0次→Euler, 1次→Navier-Stokes

  (3) 他の物理的要請 ⇒ **熱力学の法則:** $ds = \beta de$, $0 \le \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu(s u^\mu + O(\partial))$

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

流体力学 w/ スピンの導出

[Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

同じEFT的な導出が可能

ステップ1: 保存則を書き下す

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ と$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}$を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

流体力学 w/ スピンの導出

[Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

同じEFT的な導出が可能

ステップ1: 保存則を書き下す

$\psi(x) \to S(\Lambda)\psi(\Lambda^{-1}x)$

$0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$ に加え $\boldsymbol{0 = \partial_\mu M^{\mu,\alpha\beta} = \partial_\mu\left(L^{\mu,\alpha\beta} + \Sigma^{\mu,\alpha\beta}\right) \Rightarrow \partial_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta} = T^{\alpha\beta} - T^{\beta\alpha}}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ と$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}$を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

流体力学 w/ スピンの導出

[Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

同じEFT的な導出が可能

ステップ1: 保存則を書き下す

$\psi(x) \to S(\Lambda)\psi(\Lambda^{-1}x)$

$0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$ に加え $\mathbf{0} = \boldsymbol{\partial_\mu M^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{\partial_\mu}\left(\boldsymbol{L^{\mu,\alpha\beta}} + \boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}\right) \Rightarrow \boldsymbol{\partial_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{T^{\alpha\beta}} - \boldsymbol{T^{\beta\alpha}}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ と$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}$を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu, \boldsymbol{\omega^{\mu\nu}}\}$ ～ P^μとスピン密度$\sigma^{\alpha\beta} \sim -u_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}$ の化学ポテンシャル (w/ $\omega^{\mu\nu} = -\omega^{\nu\mu}$)
- $T^{\mu\nu}$と$\boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す
- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

  (1) 対称性　(2) 勾配展開　(3) 熱力学の法則: $\mathrm{d}s = \beta\left(\mathrm{d}e - \boldsymbol{\omega_{\mu\nu}}\mathbf{d}\boldsymbol{\sigma^{\mu\nu}}\right)$

  $0 \le \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu\left(s u^\mu + O(\partial)\right)$

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

流体力学 w/ スピンの導出

[Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

同じEFT的な導出が可能

ステップ1: 保存則を書き下す

$\psi(x) \to S(\Lambda)\psi(\Lambda^{-1}x)$

$0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$　に加え　$\mathbf{0} = \boldsymbol{\partial_\mu M^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{\partial_\mu}\left(\boldsymbol{L^{\mu,\alpha\beta}} + \boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}\right) \Rightarrow \boldsymbol{\partial_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{T^{\alpha\beta}} - \boldsymbol{T^{\beta\alpha}}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ と$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}$を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu, \boldsymbol{\omega^{\mu\nu}}\}$ ～ P^μとスピン密度$\sigma^{\alpha\beta} \sim -u_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}$の化学ポテンシャル (w/ $\omega^{\mu\nu} = -\omega^{\nu\mu}$)
- $T^{\mu\nu}$と$\boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す
- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化
  (1) 対称性　(2) 勾配展開　(3) 熱力学の法則: $\mathrm{d}s = \beta\left(\mathrm{d}e - \boldsymbol{\omega_{\mu\nu}}\mathbf{d}\boldsymbol{\sigma^{\mu\nu}}\right)$
  $0 \leq \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu(su^\mu + O(\partial))$

結果: $T^{\mu\nu}_{(0)} = eu^\mu u^\nu + p(g^{\mu\nu} + u^\mu u^\nu)$

heat current　shear viscosity　bulk viscosity

$T^{\mu\nu}_{(1)} = -2\kappa\left(Du^{(\mu} + \beta\partial_\perp^{(\mu}\beta^{-1}\right)u^{\nu)} - 2\eta\partial_\perp^{<\mu}u^{\nu>} - \zeta(\partial_\mu u^\mu)\Delta^{\mu\nu}$

NEW !

$-2\lambda\left(-Du^{[\mu} + \beta\partial_\perp^{[\mu}\beta^{-1} + 4u_\rho\omega^{\rho[\mu}\right)u^{\nu]} - 2\gamma\left(\partial_\perp^{[\mu}u^{\nu]} - 2\Delta^\mu_\rho\Delta^\nu_\lambda\omega^{\rho\lambda}\right)$

"boost heat current"　"rotational (spinning) viscosity

$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}_{(0)} = u^\mu\sigma^{\alpha\beta}$

- 非相対論的なmicropolar fluidの一般化 [Eringen (1998)] [Lukaszewicz (1999)]
- Chiral kinetic theoryでも導出可能 [Shi, Gale, Jeon (2020)]

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

流体力学 w/ スピンの導出

[Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

同じEFT的な導出が可能

ステップ1: 保存則を書き下す

$\psi(x) \to S(\Lambda)\psi(\Lambda^{-1}x)$

$0 = \partial_\mu T^{\mu\nu}$ に加え $\mathbf{0} = \boldsymbol{\partial_\mu M^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{\partial_\mu}\left(\boldsymbol{L^{\mu,\alpha\beta}} + \boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}\right) \Rightarrow \boldsymbol{\partial_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}} = \boldsymbol{T^{\alpha\beta}} - \boldsymbol{T^{\beta\alpha}}$

ステップ2: $T^{\mu\nu}$ と$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}$を"流体変数"で書き直す (構成方程式)

- "流体変数"を定義する $\{\beta, u^\mu, \boldsymbol{\omega^{\mu\nu}}\}$ ～ P^μとスピン密度$\sigma^{\alpha\beta} \sim -u_\mu \Sigma^{\mu,\alpha\beta}$の化学ポテンシャル (w/ $\omega^{\mu\nu} = -\omega^{\nu\mu}$)
- $T^{\mu\nu}$と$\boldsymbol{\Sigma^{\mu,\alpha\beta}}$の可能なテンソル構造をすべて書き下す
- 要請/仮定を置いて、テンソル構造を簡単化

(1) 対称性 (2) 勾配展開 (3) 熱力学の法則: $\mathrm{d}s = \beta\left(\mathrm{d}e - \boldsymbol{\omega_{\mu\nu}}\mathbf{d}\boldsymbol{\sigma^{\mu\nu}}\right)$

$0 \le \partial_\mu S^\mu = \partial_\mu\left(su^\mu + O(\partial)\right)$

結果:

$$T^{\mu\nu}_{(0)} = eu^\mu u^\nu + p(g^{\mu\nu} + u^\mu u^\nu)$$

heat current / shear viscosity / bulk viscosity

$$T^{\mu\nu}_{(1)} = -2\kappa\left(Du^{(\mu} + \beta\partial_\perp^{(\mu}\beta^{-1}\right)u^{\nu)} - 2\eta\partial_\perp^{<\mu}u^{\nu>} - \zeta\left(\partial_\mu u^\mu\right)\Delta^{\mu\nu}$$

$$-2\lambda\left(-Du^{[\mu} + \beta\partial_\perp^{[\mu}\beta^{-1} + 4u_\rho\omega^{\rho[\mu}\right)u^{\nu]} - 2\gamma\left(\partial_\perp^{[\mu}u^{\nu]} - 2\Delta^\mu_\rho\Delta^\nu_\lambda\omega^{\rho\lambda}\right)$$

"boost heat current" "rotational (spinning) viscosity"

NEW !

$$\Sigma^{\mu,\alpha\beta}_{(0)} = u^\mu\sigma^{\alpha\beta}$$

- 非相対論的なmicropolar fluidの一般化 [Eringen (1998)] [Lukaszewicz (1999)]
- Chiral kinetic theoryでも導出可能 [Shi, Gale, Jeon (2020)]

ステップ3: 流体方程式 = 保存則 + 構成方程式

強い渦度場に関連した話題・進展 (個人的に気になる)

- 新しい観測量
  - Vector meson (e.g., Φ, K*) の spin alignment [Liang, Wang (2005)] [実験: STAR Collaboration (2008), (2019)] [実験: ALICE Collaboration (2020)]
  - スピン依存したハドロン収量 [HT et al (ExHIC-P Collaboration) (2020)]
  - 方位角依存性とかlocalな量 [Becattini, Karpenko (2018)] [Xia, Li, Tang, Wang (2018)] ...
  - ...
- “符号問題” (Λ偏極の方位角依存性) [実験: STAR Collaboration (2018)]
- カイラル渦度効果(CVE) [理論: 本郷, 広野, ...さんあたりが詳しい]
- スピン流体力学 [非相対論: “micropolar fluid”; Eringen (1998), Lukaszewicz (1999)] [ideal: Florkowski, Friman, Jaiswal, Speranza (2018)] [1st order: Hattori, Hongo, Huang, HT, Matsuo (2019)]

  ⇒ 重イオンの現象論の議論的にはまだまだ発展途上
  e.g., 二次流体, 輸送係数, 数値コードの実装, ...
- カイラル運動論 Son, Yamamoto, Stephanov, Yang, Hattori, Hidaka, Huang, Memeda, ... [スピン流体の導出: Shi, Gale, Jeon (2020)]
- 角運動量/スピンの分解 [pQCDや光学でいろいろ発展がある。最近のレビューとして: Fukushima, Pu (2020)]
- ...

まとめ

まとめ

重イオン衝突初期における
3つの強い場の物理の(主観的な)レビュー

0. 基礎的な話
- 強い場の物理の概観
- 理論の現状と問題点

1. 強いカラー場
- でき方: CGCの衝突〜カラーコンデンサー
- 最近の話題: QGPの生成シナリオ

2. 強い電磁場
- でき方: 非中心/非対称/低エネルギー衝突
- 最近の話題: 複屈折の観測(?)

3. 強い渦度場
- でき方: 非中心衝突 (global vorticity)
- 最近の話題: スピン流体力学

[新井田さんのトーク参照]