

初期ダイナミクス (理論)

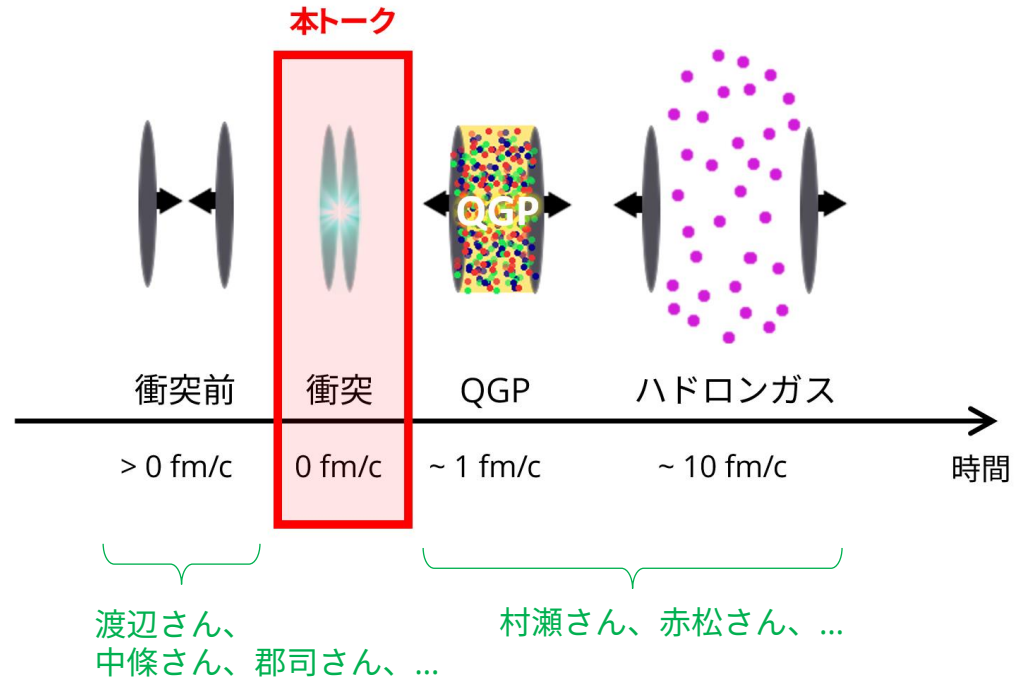
田屋 英俊

(慶應大)

今日の話

目的:

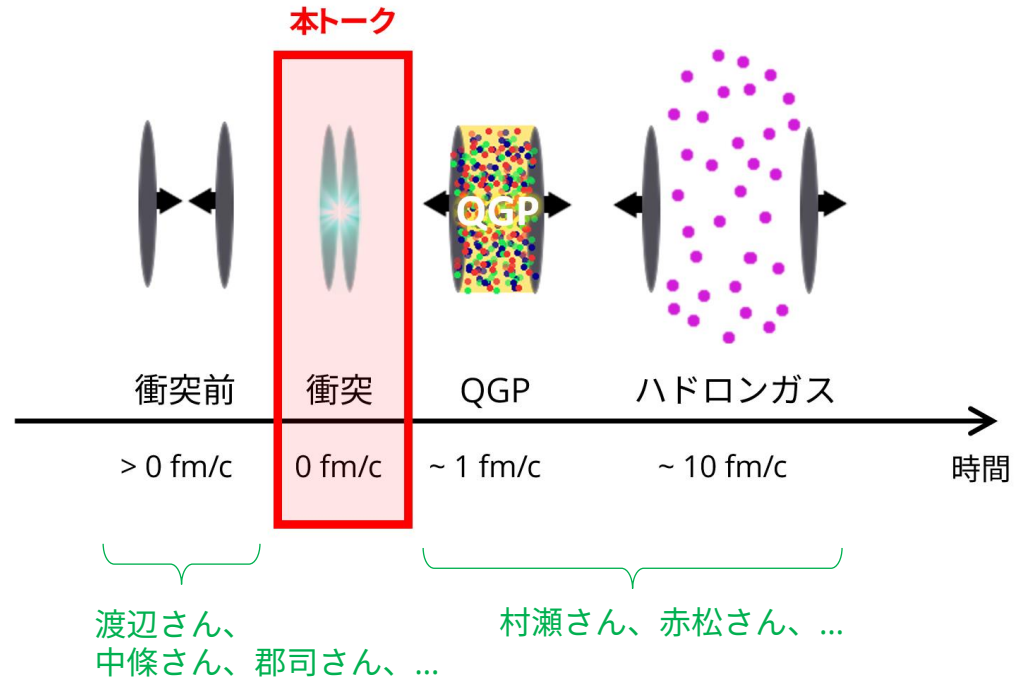
重イオン衝突の初期
ダイナミクス基礎と発展



今日の話

目的:

重イオン衝突の初期
ダイナミクスの基礎と発展



なぜ初期ダイナミクス?:

すごい非平衡なので、すごい「極端な状況」 or 「強い場」が実現
⇒ 「極端」 ≠ 「大事じゃない/楽しくない」。むしろ逆に「大事かつ楽しい」

例1) QGP生成過程という重イオン衝突の「ブラックボックス」の解明

⇒ 強いカラー場

例2) 他の物理系では実現できない「極限状況」を作る道具 = 新物理のチャンス

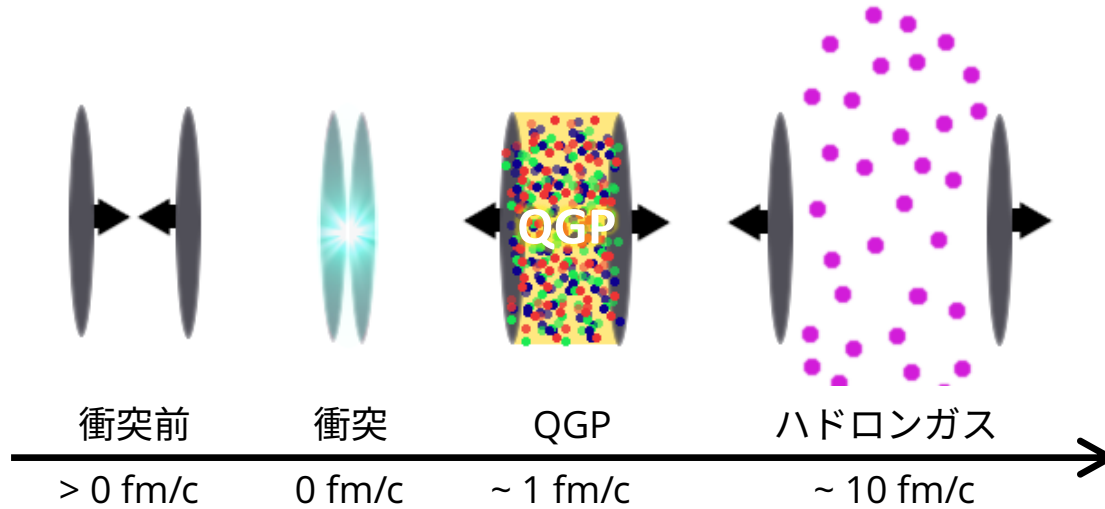
⇒ 強い電磁場、強い渦渡場

目次

1. 強いカラー場
2. 強い電磁場
3. 強い渦渡場

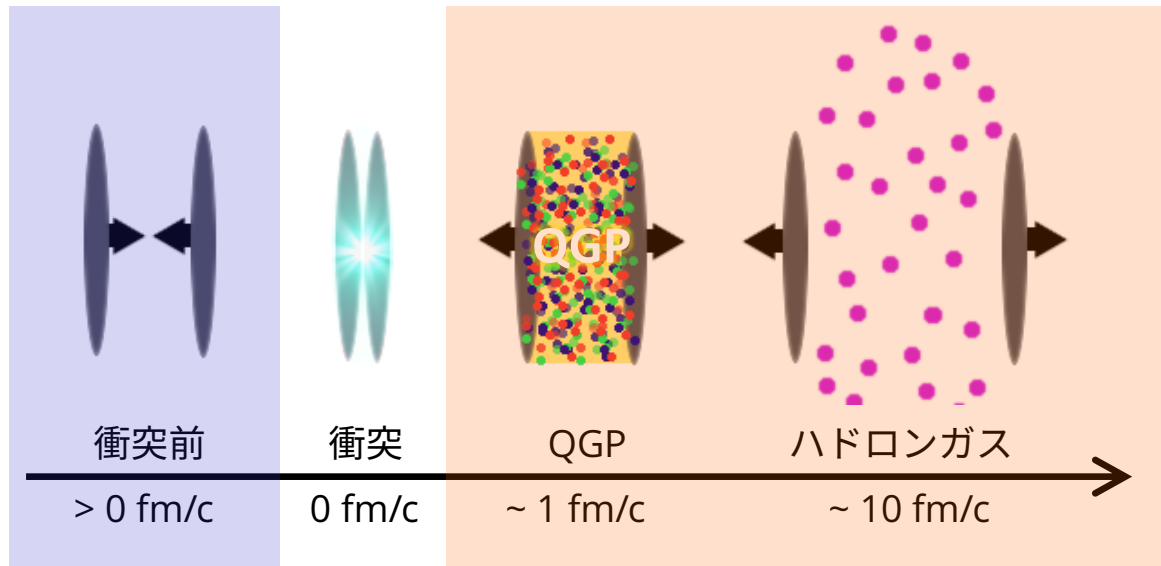
基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

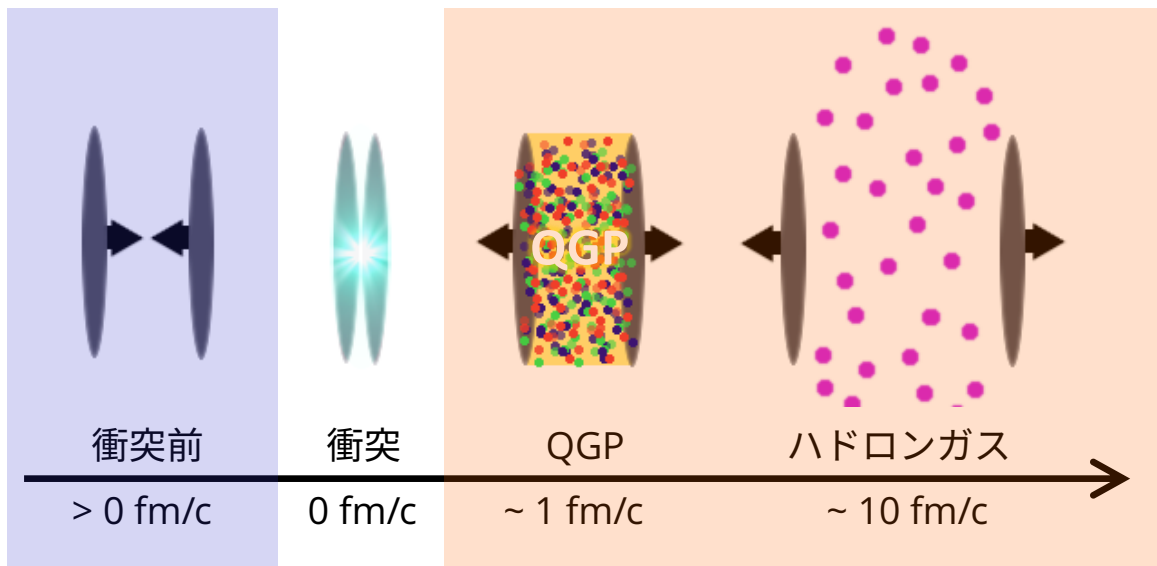
重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



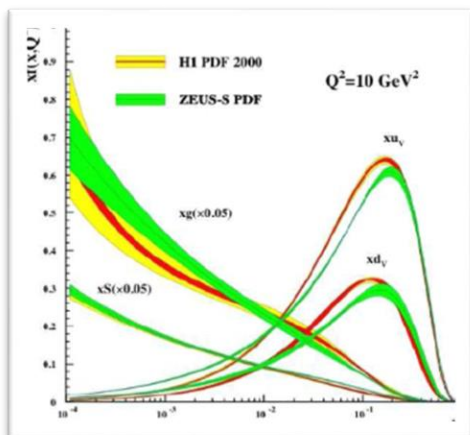
- ■ & ■ は (比較的) よくわかっている

基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」

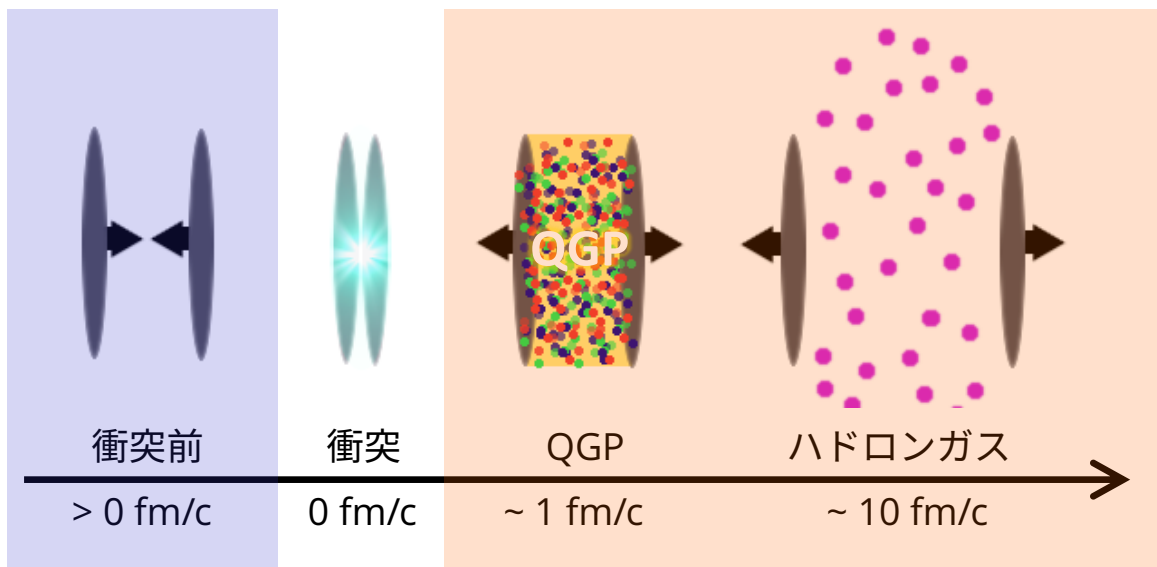


- & ■ は (比較的) よくわかっている



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」

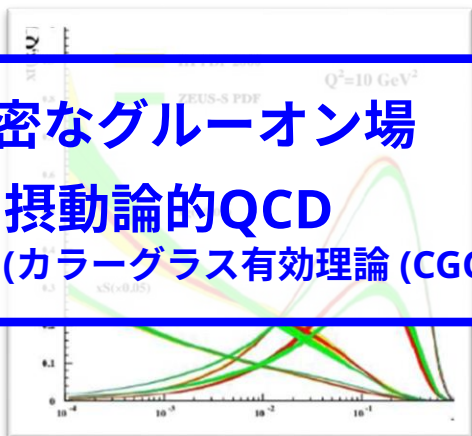


- & ■ は (比較的) よくわかっている

密なグルーオン場

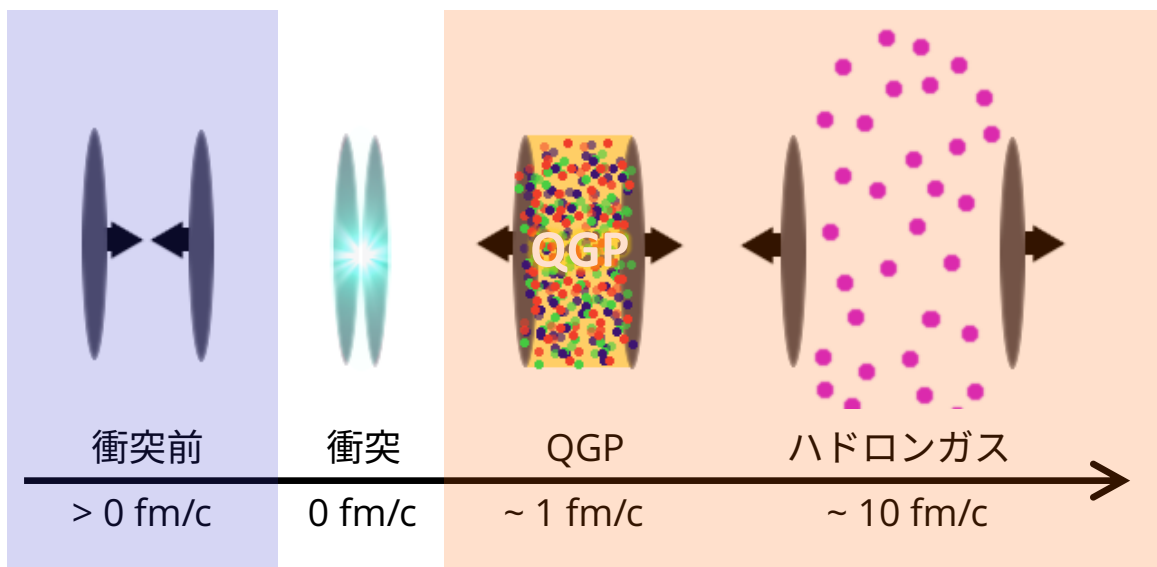
⇒ 摂動論的QCD

(カラーグラス有効理論 (CGC)?)



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」

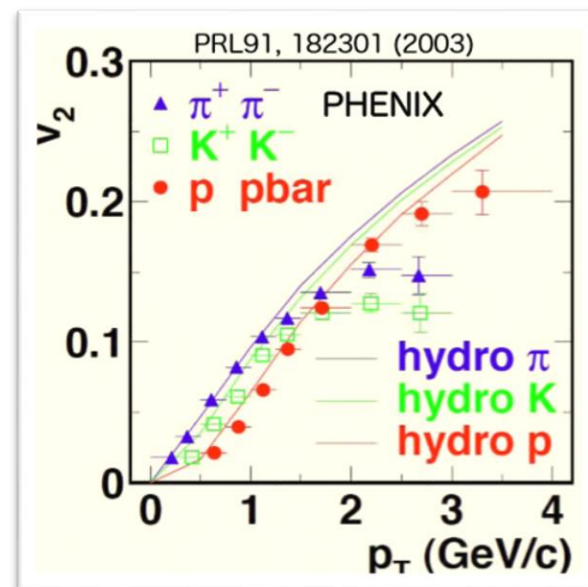
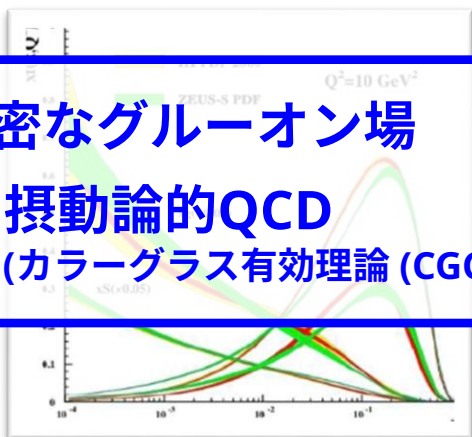


- & ■ は (比較的) よくわかっている

密なグルーオン場

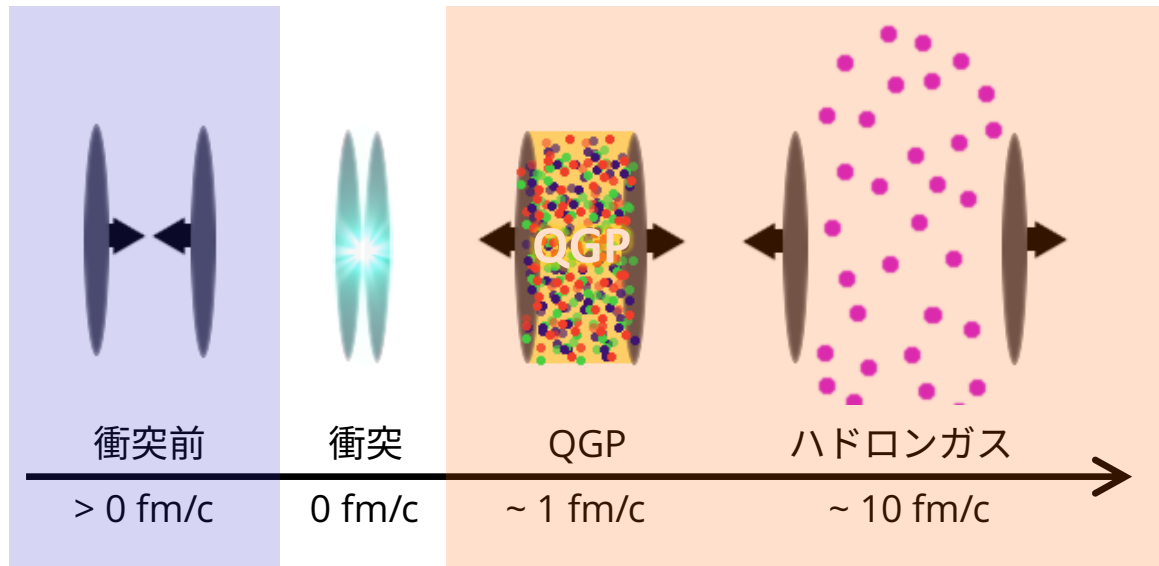
⇒ 摂動論的QCD

(カラーグラス有効理論 (CGC)?)



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」

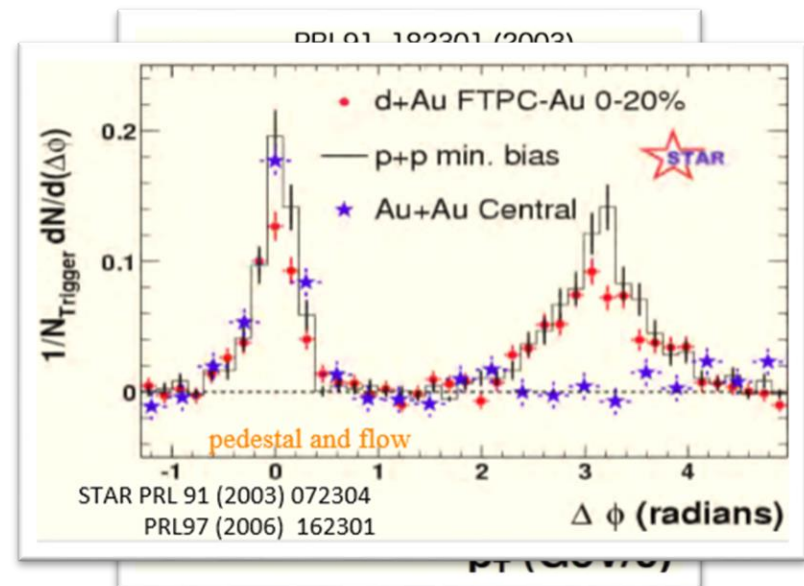
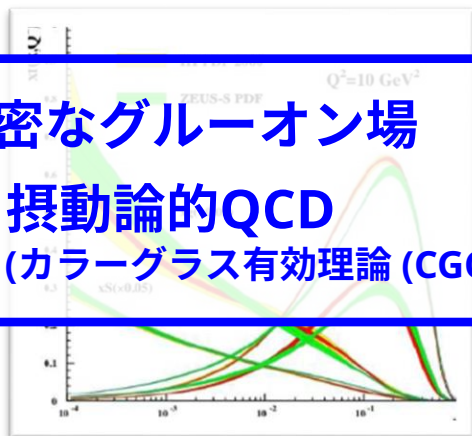


- & ■ は (比較的) よくわかっている

密なグルーオン場

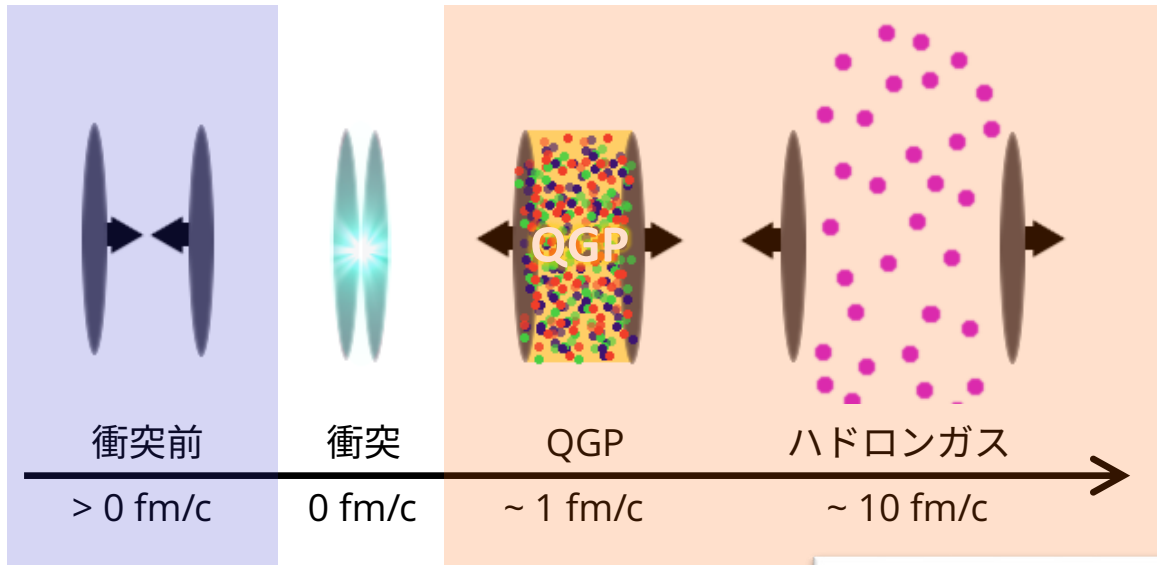
⇒ 摂動論的QCD

(カラーグラス有効理論 (CGC)?)



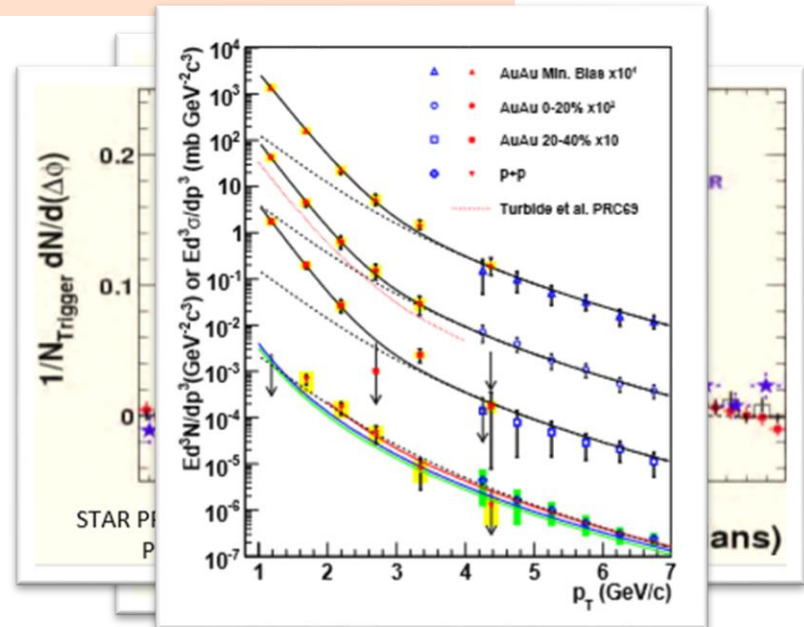
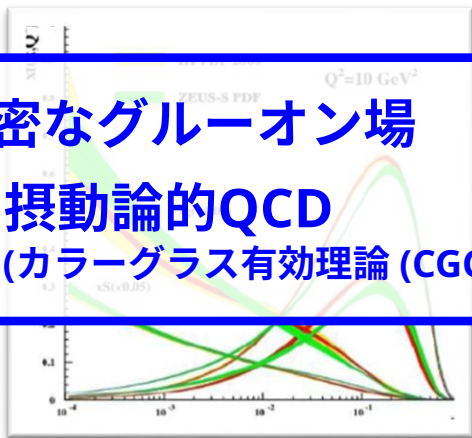
基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



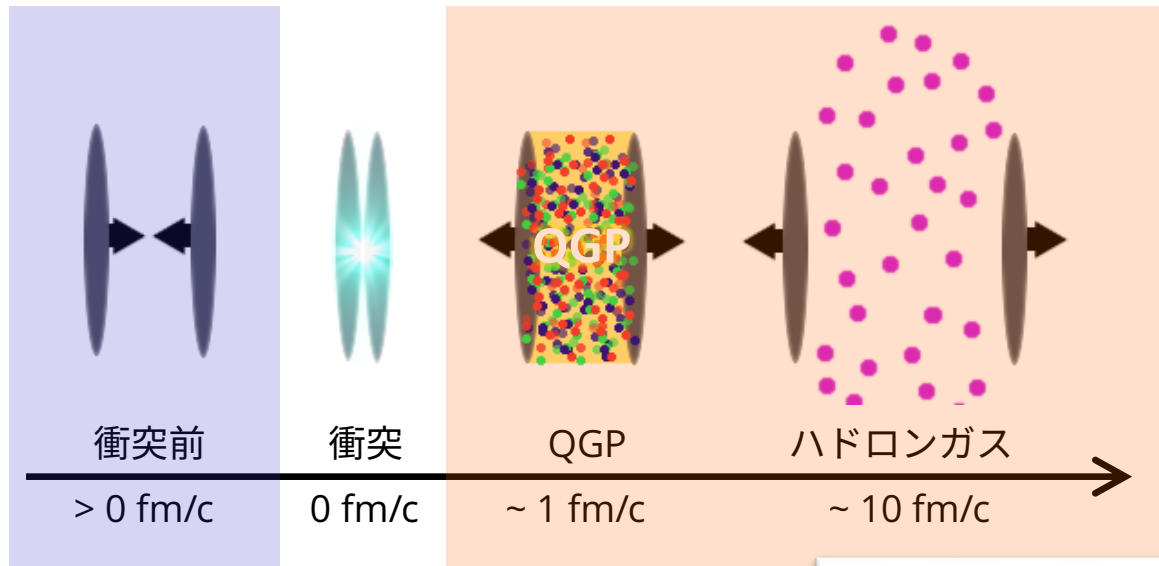
- & ■ は (比較的) よくわかっている

密なグルーオン場
 ⇒ 摂動論的QCD
 (カラーグラス有効理論 (CGC)?)



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



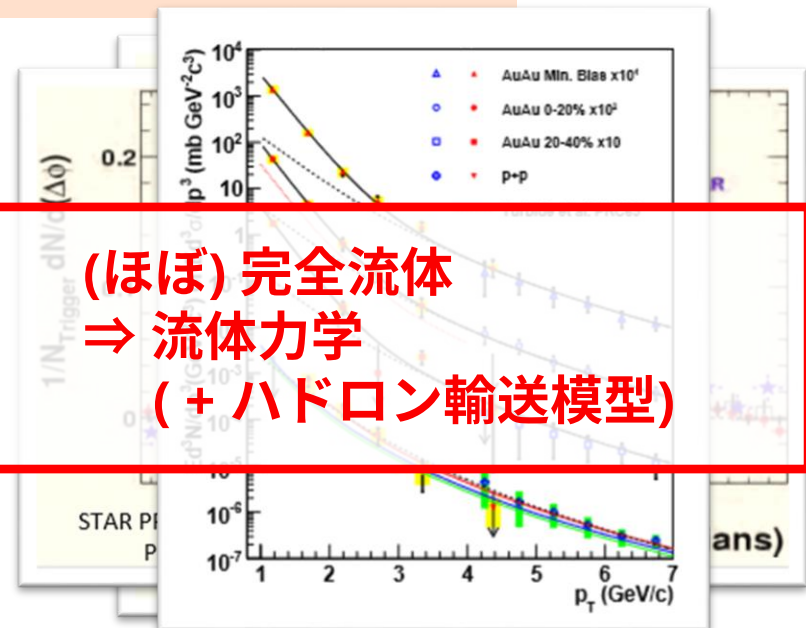
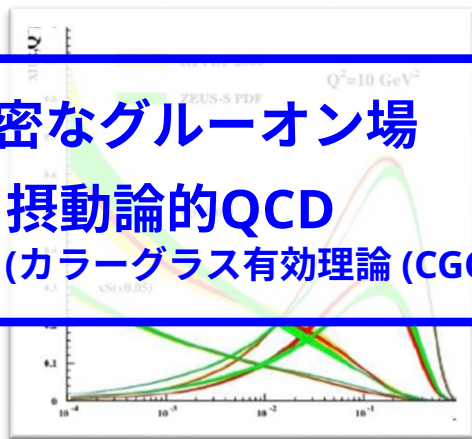
- & ■ は (比較的) よくわかっている

密なグルーオン場

⇒ 摂動論的QCD

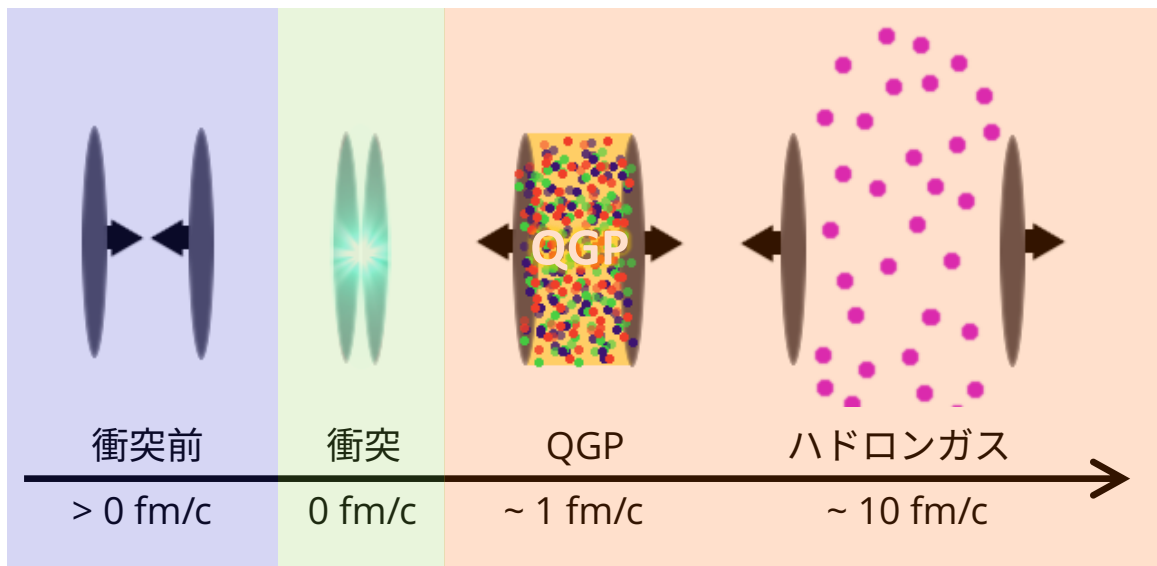
(カラーグラス有効理論 (CGC)?)

(ほぼ) 完全流体
⇒ 流体力学
(+ ハドロン輸送模型)



基礎(1/3): QGP生成過程の問題

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



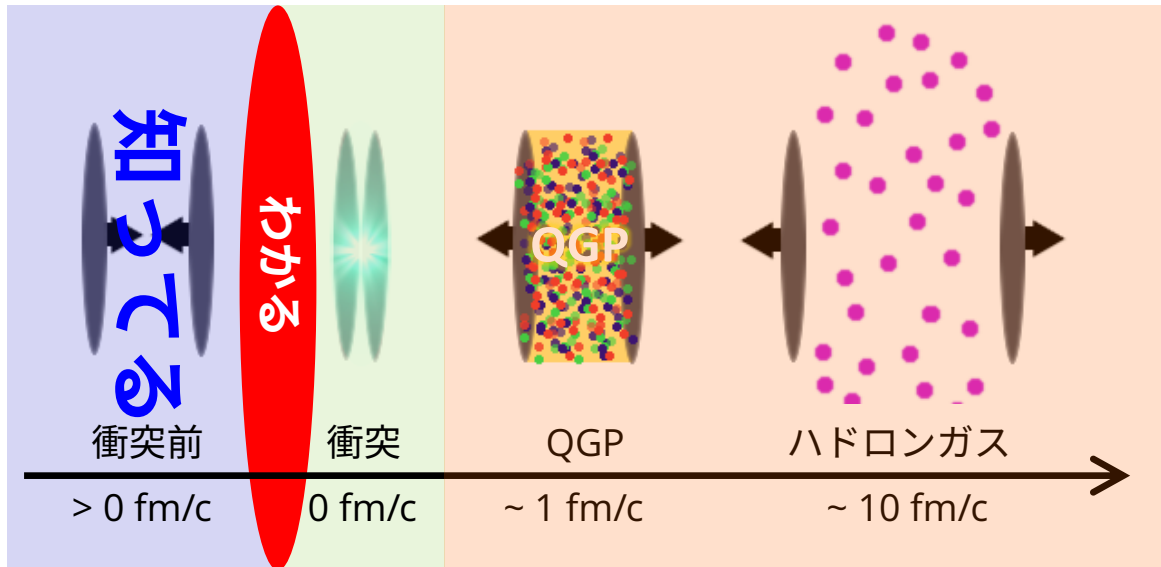
- ■ & ■ は (比較的) よくわかっている
- ■ は (万人が納得する) 物理描像・モデルは存在しない (=: QGP生成過程の問題)

未解明な問いの数々

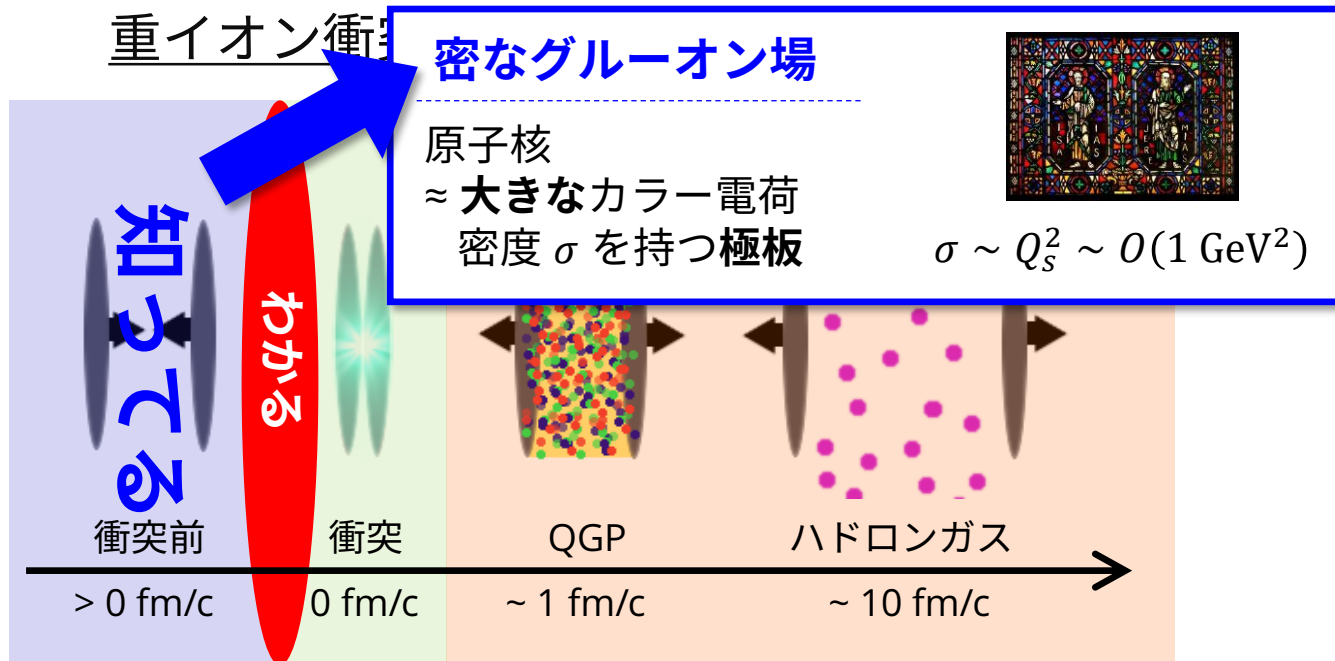
- 大量のクォークやグルーオン粒子はどうやって作られるのか？
- どのように熱平衡化し(あるいはせず)、どのように流体的なQGPができるのか？
- 実験解析が示唆する $O(1$ fm/c)の早い熱化(流体化)は可能か？
- 流体モデルの信頼できる初期条件はどう作れば良いのか？
- 実験的にはどうプローブすれば良いのか？
- ...

基礎(2/3): 衝突直後の強いカラー場

重イオン衝突の時空発展の「標準模型」



基礎(2/3): 衝突直後の強いカラー場



基礎(2/3): 衝突直後の強いカラー場

重イオン衝突

密なグルーオン場



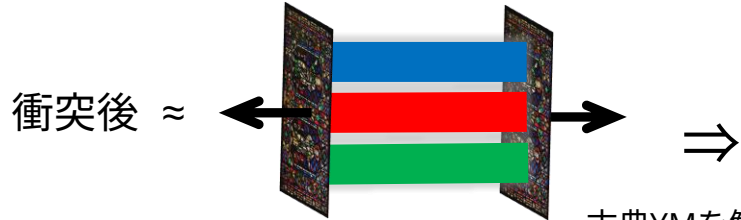
原子核
 ~ 大きなカラー電荷
 密度 σ を持つ極板

$$\sigma \sim Q_s^2 \sim O(1 \text{ GeV}^2)$$

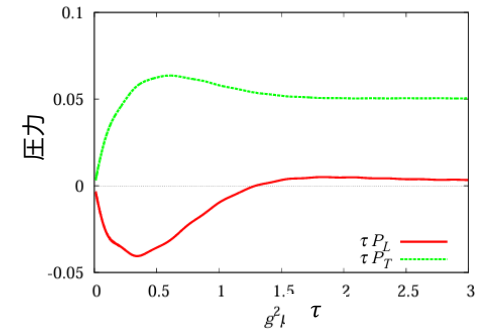
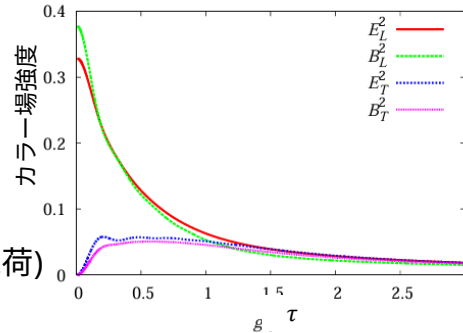
“カラーコンデンサー” \Rightarrow 強いカラー場 (Glasma)

[Fukushima, Gelis (2011)]

unit in $Q_s = O(1 \text{ GeV})$



古典YMを解く
 (B.C.: 極板のカラー電荷)



基礎(2/3): 衝突直後の強いカラー場

重イオン衝突

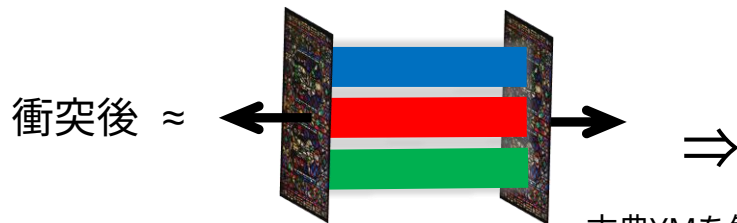
密なグルーオン場

原子核
 ~ 大きなカラー電荷
 密度 σ を持つ極板

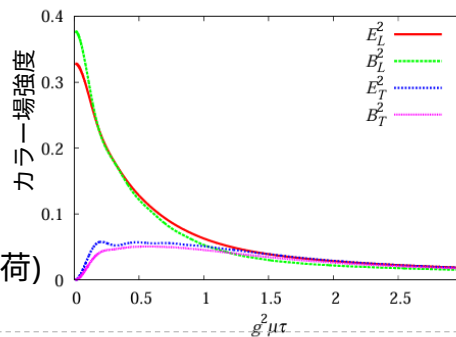


$$\sigma \sim Q_s^2 \sim O(1 \text{ GeV}^2)$$

“カラーコンデンサー” ⇒ 強いカラー場 (Glasma)

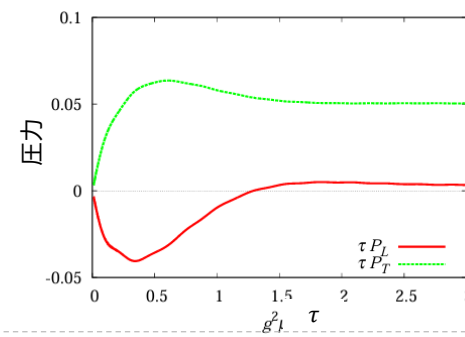


古典YMを解く
 (B.C.: 極板のカラー電荷)



[Fukushima, Gelis (2011)]

unit in $Q_s = O(1 \text{ GeV})$



- **大事な点:** (1) 普通の電磁気と同じく flux tube 状の縦方向のカラー場が極板間に生成 (=: Glasma)
- (2) カラー場は強い ← カラー電荷密度が大きい $E \propto \sigma \propto Q_s = O(1 \text{ GeV})$ [Lappi, McLerran (2006)]
- (3) 電場と平行な磁場がある ← グルーオンの非可換性

$$D_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = ig[A^i, E^i] \ \& \ \nabla \cdot \mathbf{B} = ig[A^i, B^i]$$
- (4) とても非等方的 ← $P_T = (E_z^2 + B_z^2) > 0$ だけど $P_L = (E_T^2 + B_T^2) - (E_z^2 + B_z^2) < 0$
- (5) しかし、ブースト不変に膨張 ⇒ このままだと絶対に等方化しない ⇒ **何かが必要**
- **注意:** Flux tube のアイデア自体は古いし、現象論的にはよくある話 [Lund 模型, Low-Nussinov model]
 新しい点: 平行磁場の存在、CGC 初期条件で古典YMを解けば精密 (≠現象論) に計算可

基礎(3/3): 現状の理解

今のところ、みんなが同意していること

QGP生成過程

= 強いカラー「場」 (= Glasma) を初期条件として、
それがどうやって「粒子」に壊れ、
それが「熱化(あるいは等方化、流体化)」してQGPになるか？

基礎(3/3): 現状の理解

今のところ、みんなが同意していること

QGP生成過程

= 強いカラー「場」 (= Glasma) を初期条件として、
それがどうやって「粒子」に壊れ、
それが「熱化(あるいは等方化、流体化)」してQGPになるか？

- 万人が納得する回答は (今現在は) ない (が、着実に理解は進展してる)
- 代表的なシナリオ:

(1) 強いカラー場による不安定性

[Romatchke, Venugopalan (2006)]
[Berges, Sheffler, Sexty (2008)] [Fujii, Itakura (3008)] ...

- 磁場による不安定性 (Weibel, Nielsen-Olesen) が等方化を促す
(× 10~100fmくらい必要で遅すぎだし、粒子生成しない...)
- 電場による不安定性 (Schwinger) による粒子生成
(× 熱化/等方化はしない...)

[Kerman, Matsui, Gatoff (1987)]
[Tanji (2008)] [HI (2017)] ...

(2) Boltzmann的な粒子描像 (ボトムアップ熱化)

[Baier et al. (2001)]

- 膨張で早期に希薄化 ⇒ 粒子描像OK ⇒ パートン散乱で熱化 (と粒子生成)
(× 5fm/cくらい必要でちょっと遅い...)

(3) 流体化

- 熱化/等方化しなくても実は流体は適用化？ [Kurkela, Zhu (2015)] [Romatchke (2017)]

基礎(3/3): 現状の理解

今のところ、みんなが同意していること

QGP生成過程

= 強いカラー「場」 (= Glasma) を初期条件として、
それがどうやって「粒子」に壊れ、
それが「熱化(あるいは等方化、流体化)」してQGPになるか？

- 万人が納得する回答は (今現在は) ない (が、着実に理解は進展してる)
- 代表的なシナリオ:

(1) 強いカラー場による不安定性

[Romatchke, Venugopalan (2006)]
[Berges, Sheffler, Sexty (2008)] [Fujii, Itakura (3008)] ...

- 磁場による不安定性 (Weibel, Nielsen-Olesen) が等方化を促す
(× 10~100fmくらい必要で遅すぎだし、粒子生成しない...)
- 電場による不安定性 (Schwinger) による粒子生成 [Kerman, Matsui, Gatoff (1987)]
(× 熱化/等方化はしない...) [Tanji (2008)] [HI (2017)] ...

(2) Boltzmann的な粒子描像 (ボトムアップ熱化)

[Baier et al. (2001)]

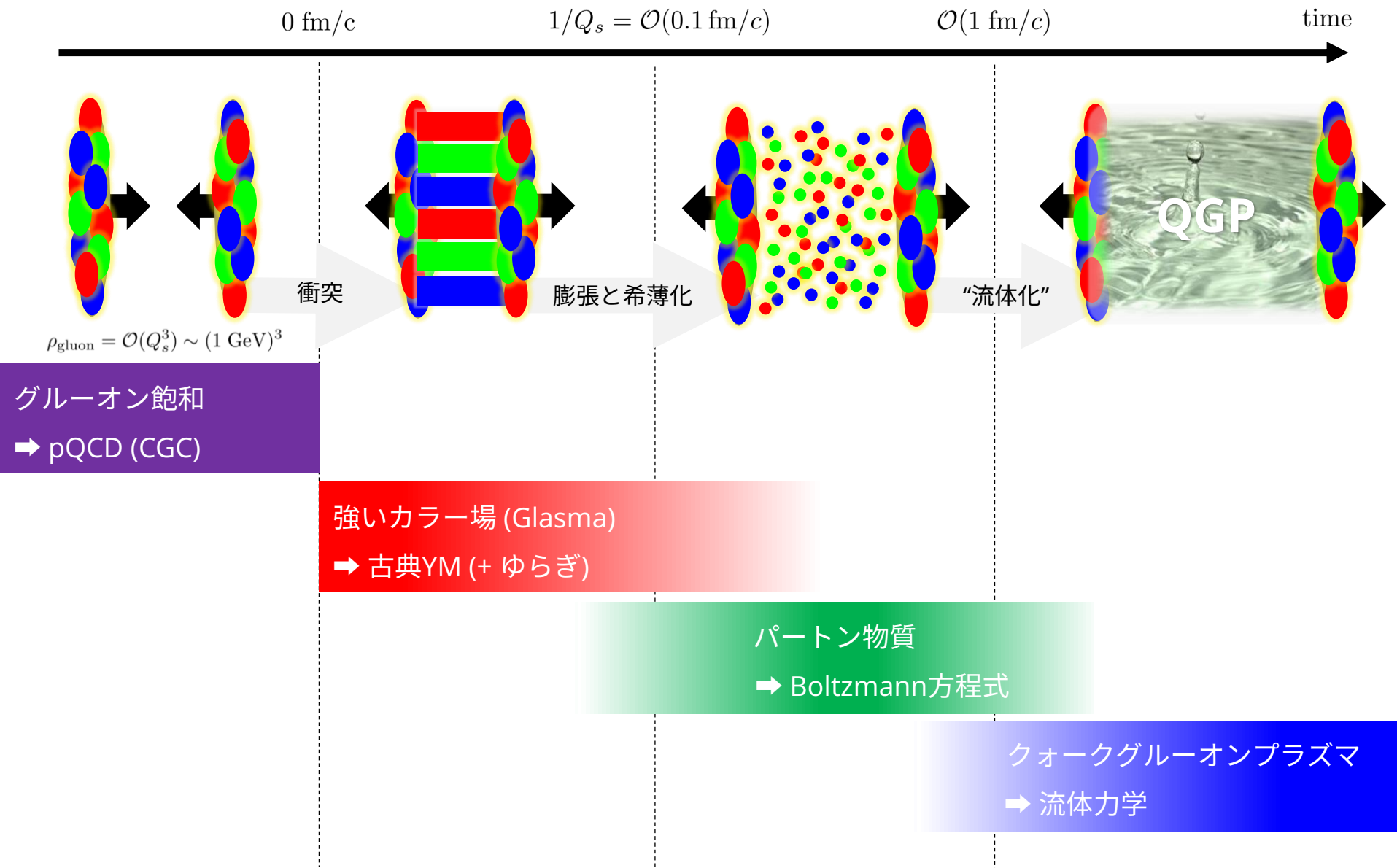
- 膨張で早期に希薄化 ⇒ 粒子描像OK ⇒ パートン散乱で熱化 (と粒子生成)
(× 5fm/cくらい必要でちょっと遅い...)

(3) 流体化

- 熱化/等方化しなくても実は流体は適用化？ [Kurkela, Zhu (2015)] [Romatchke (2017)]

発展(1/3): Boltzmann + 流体化の描像

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



発展(1/3): Boltzmann + 流体化の描像

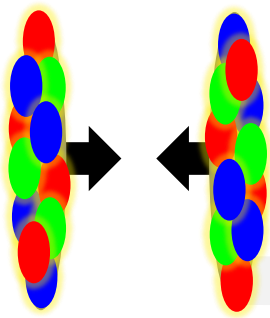
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

0 fm/c

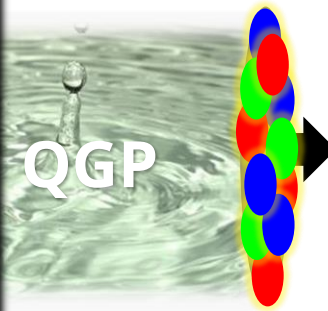
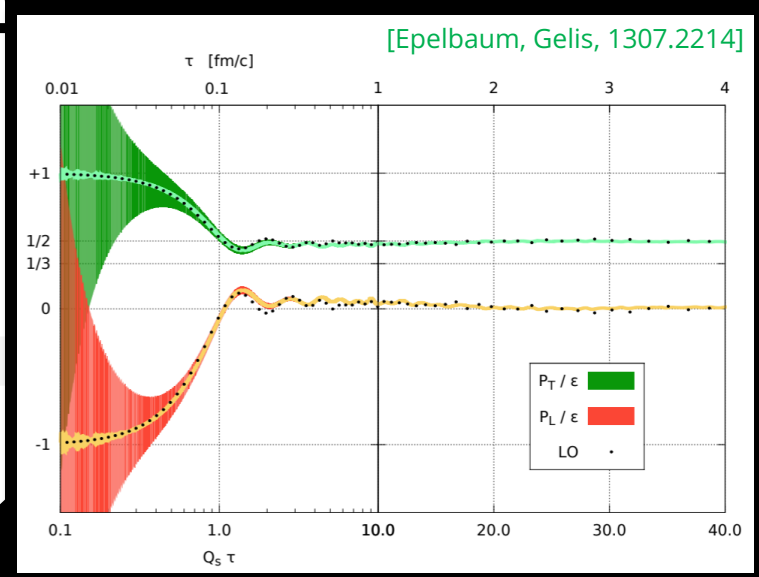
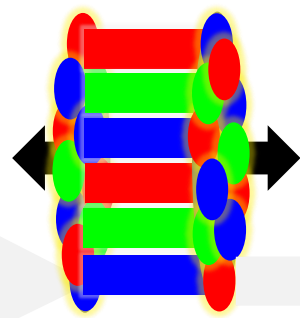
$1/Q_s = \mathcal{O}(0.1 \text{ fm}/c)$

$\mathcal{O}(1 \text{ fm}/c)$

time



衝突



QGP

$\rho_{\text{gluon}} = \mathcal{O}(Q_s^3) \sim (1 \text{ GeV})^3$

グルーオン飽和
 → pQCD (CGC)

強いカラー場 (asm)
 → 古典YM (+ ゆらぎ)

- 自由膨張 (free streaming) = 等方化しない
- 希薄化してるので、「場」から「粒子」にスイッチする必要

パートン物質
 → Boltzmann方程式

クォークグルーオンプラズマ
 → 流体力学

発展(1/3): Boltzmann + 流体化 の描像

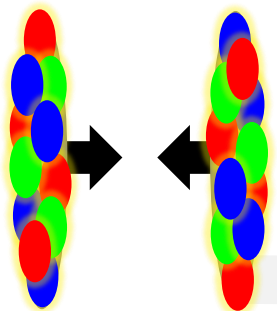
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

0 fm/c

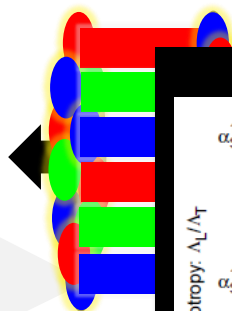
$1/Q_s = \mathcal{O}(0.1 \text{ fm}/c)$

$\mathcal{O}(1 \text{ fm}/c)$

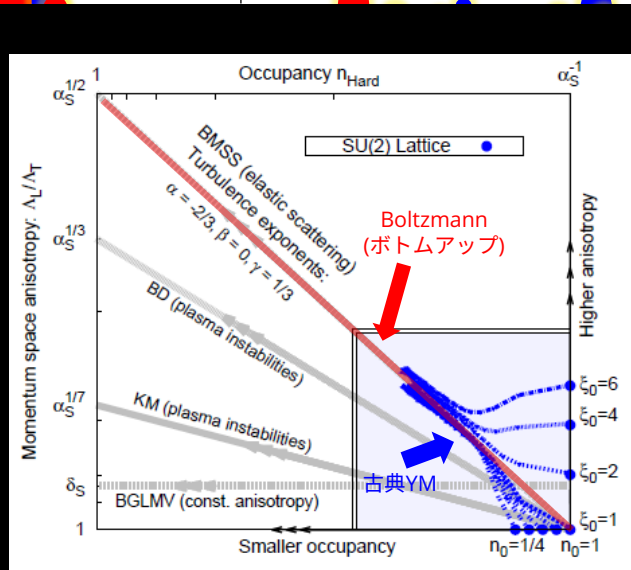
time



衝突



$$\rho_{\text{gluon}} = \mathcal{O}(Q_s^3) \sim (1 \text{ GeV})^3$$



古典YM と Boltzmannの記述は滑らかにつながっている

- どんな初期条件の古典YM計算でも Boltzmann(ボトムアップ)に帰着 [Baier et al., hep-ph/0009237]
- 理論的にも $1/g^2 \gg f \gg 1$ で オーバーラップすることを示せる [Mueller, Son, hep-ph/0212198] [Jeon, hep-ph/0412121]
- 熱平衡には至っていないけど、準定常的な振る舞い (非熱的固定点) [Berges, Boguslavski, Schlichting, Venugopalan, 1303.5650]

グルーオン飽和
⇒ pQCD (CGC)

強いカラー
⇒ 古典YM

パートン物質
⇒ Boltzmann方程式

クォークグルーオンプラズマ
⇒ 流体力学

発展(1/3): Boltzmann + 流体化 の描像

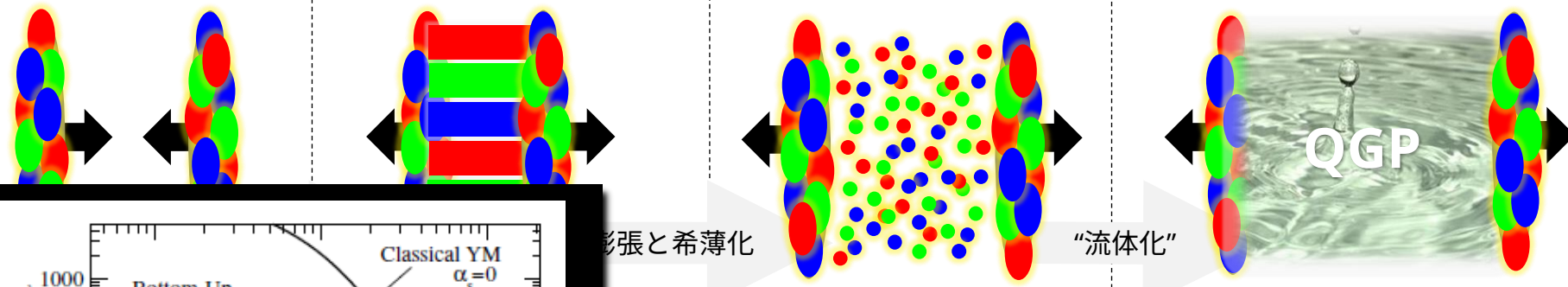
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

0 fm/c

$1/Q_s = \mathcal{O}(0.1 \text{ fm}/c)$

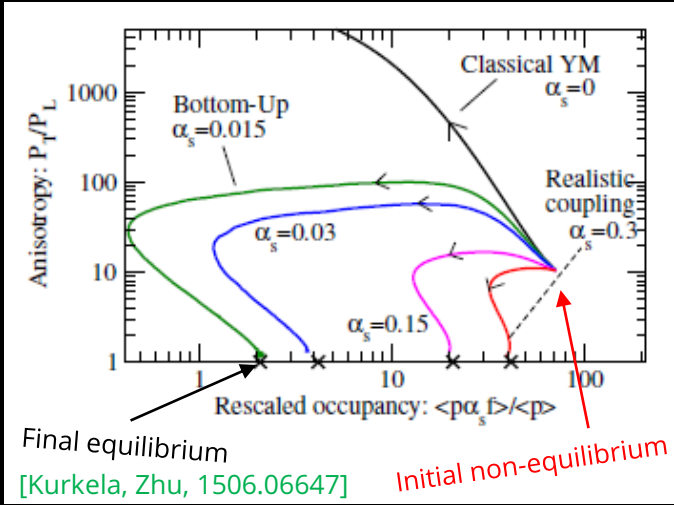
$\mathcal{O}(1 \text{ fm}/c)$

time



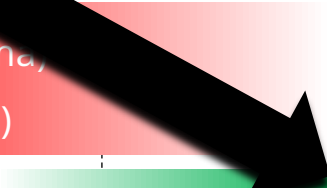
膨張と希薄化

"流体化"



- Boltzmann的記述 (AMY) はたしかに等方化&熱化を記述する
- しかし、とても遅い $\tau \sim 10 \text{ fm}/c$

[Arnold, Moore, Yaffe, hep-ph/0209353]



パートン物質
→ Boltzmann方程式

クォークグルーオンプラズマ
→ 流体力学

発展(1/3): Boltzmann + 流体化の描像

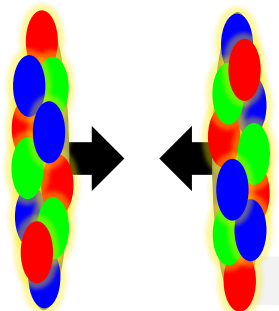
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

0 fm/c

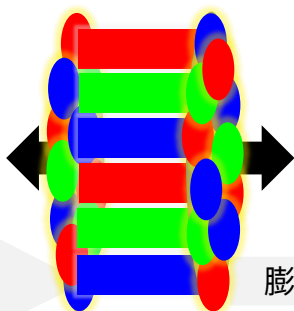
$1/Q_s = \mathcal{O}(0.1 \text{ fm}/c)$

$\mathcal{O}(1 \text{ fm}/c)$

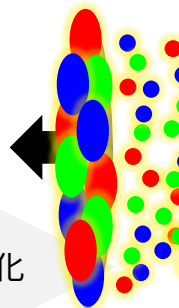
time



衝突



膨張と希薄化



$$\rho_{\text{gluon}} = \mathcal{O}(Q_s^3) \sim (1 \text{ GeV})^3$$

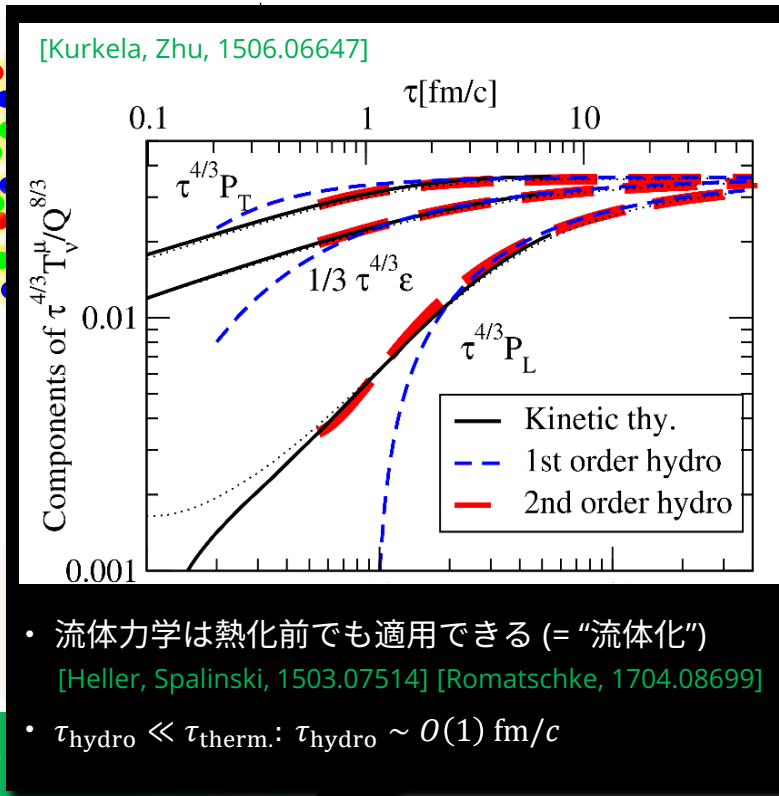
グルーオン飽和
→ pQCD (CGC)

強いカラー場 (Glasma)

→ 古典YM (+ ゆらぎ)

パー

→ Boltzmann方程式



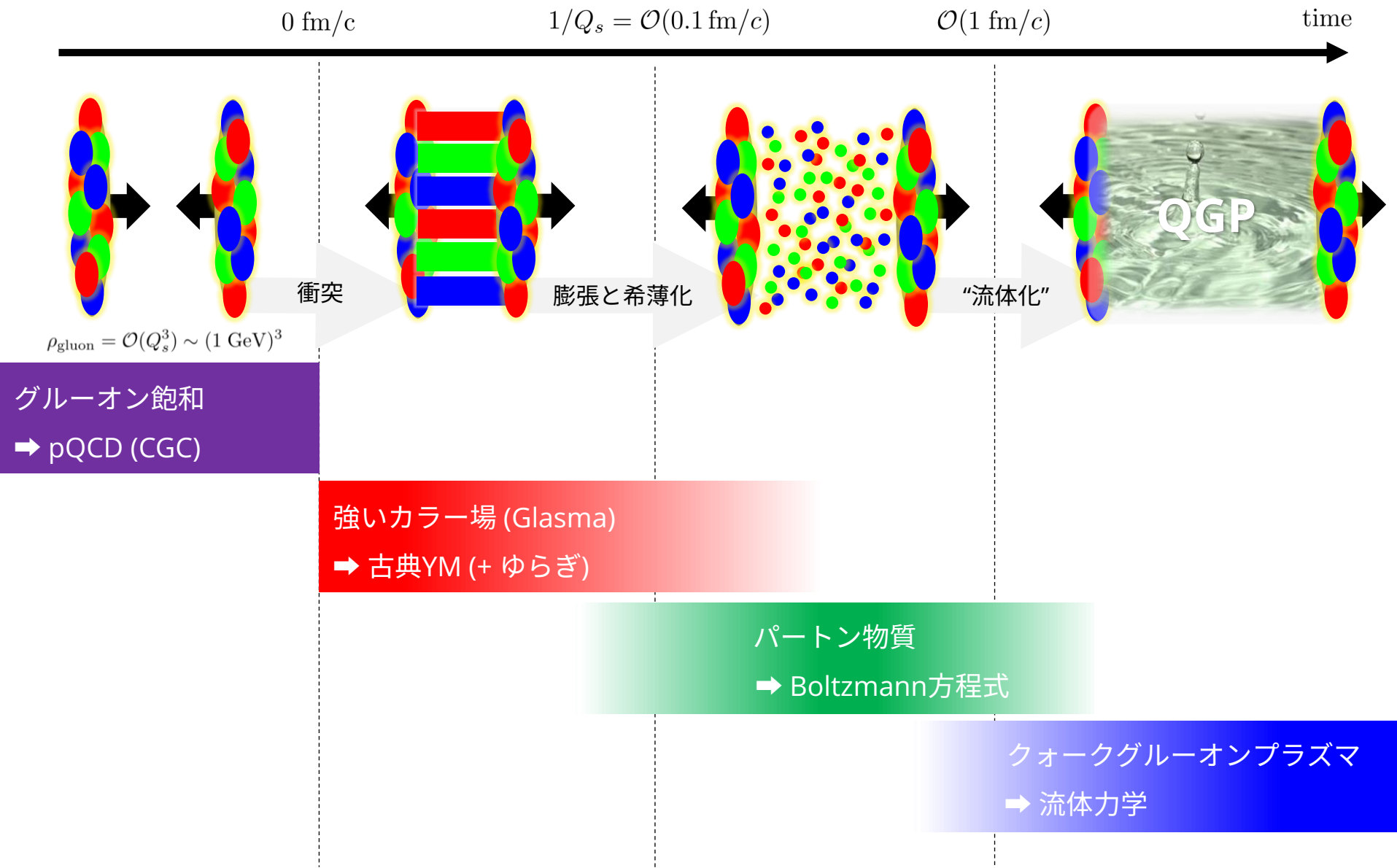
- 流体力学は熱化前でも適用できる (= “流体化”) [Heller, Spalinski, 1503.07514] [Romatschke, 1704.08699]
- $\tau_{\text{hydro}} \ll \tau_{\text{therm.}}$: $\tau_{\text{hydro}} \sim \mathcal{O}(1) \text{ fm}/c$

オークグルーオンプラズマ

→ 流体力学

発展(1/3): Boltzmann + 流体化の描像

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



発展 (2/3): 批判 / open question

- 「Boltzmann + 流体化」の描像はそれっぽいが、これで完全決着かと言われると...
- 例えば ...

Q: 弱結合でしかダメですよ?

⇒ そうだが、強結合は模型(e.g. AdS/CFT)に頼るしかない
ただ、弱結合と傾向は同じっぽいので外挿できそう(?)

Q: 流体化って本当にマトモ?

⇒ 簡単な設定(e.g. 1次元Bjorken膨張)ではたしかっぽい
現実的な場合(e.g. 3次元膨張、non conformal)はこれから

Q: クォーク生成は? ⇒ 基本的にはグルオンしか考えてない

Q: で、強いカラー場の役割は?

⇒ 謎。だけど何も無いのは変 [Gelis, Kajantie, Lappi (2006)] [Tanji (2008)]
少なくとも電場の不安定性(Schwinger効果)は効く

Q: Boltzmann以外の描像は死んだの?

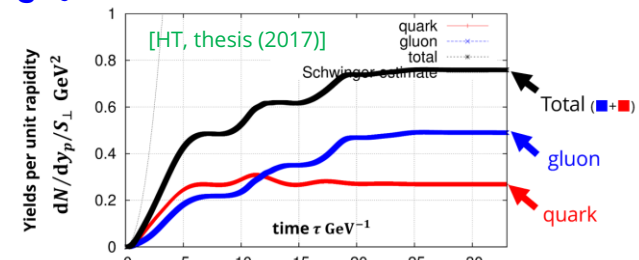
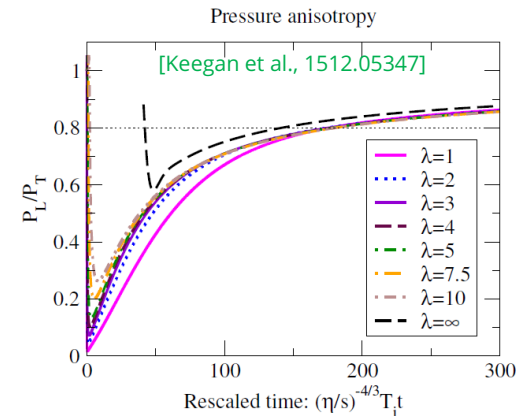
⇒ まだ早急。しかし、流体のonsetまでちゃんとできた人は存在しない

Q: パッチワークでちょっと気持ち悪い?

⇒ 場の理論 (Kadanoff-Baymとか2PI) で原理的にはできるはずだが、
ゲージ理論でやるのは(主に)数値的に難しくて誰もまだできていない...

Q: で、実験的/現象論的には結局なんなの? ⇒ 次のスライド

- なので、理解は着実に進展したが考えることはまだたくさんある



[Hatta, Nishiyama (2011)]
cf. Φ_4 の最近の計算 [Gelis, Hauksson (2024)]

発展(3/3): 実験的/現象論的には?

実験

現象論

(1)

(2)

発展(3/3): 実験的/現象論的には?

実験

良いシグナルはまだない... EMプローブ (レプトン・光子) やRidgeがしばしば議論されるが...

現象論

(1)

(2)

発展(3/3): 実験的/現象論的には?

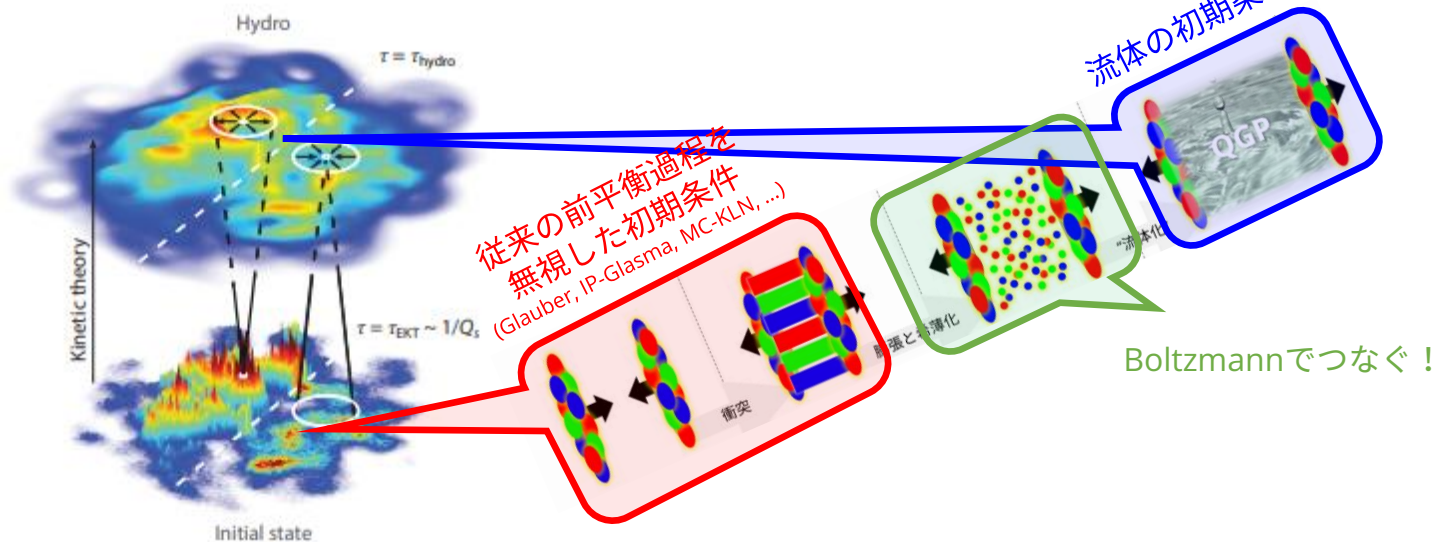
実験

良いシグナルはまだない... EMプローブ (レプトン・光子) やRidgeがしばしば議論されるが...

現象論

[Kurkela, Mazeliauskas, Paquet, Schlichting, Teaney, 1805.00961 & 1805.01604]

(1) さっきのBoltzmannの描像に基づいた流体初期条件: KΦMPOST



(2)

発展(3/3): 実験的/現象論的には?

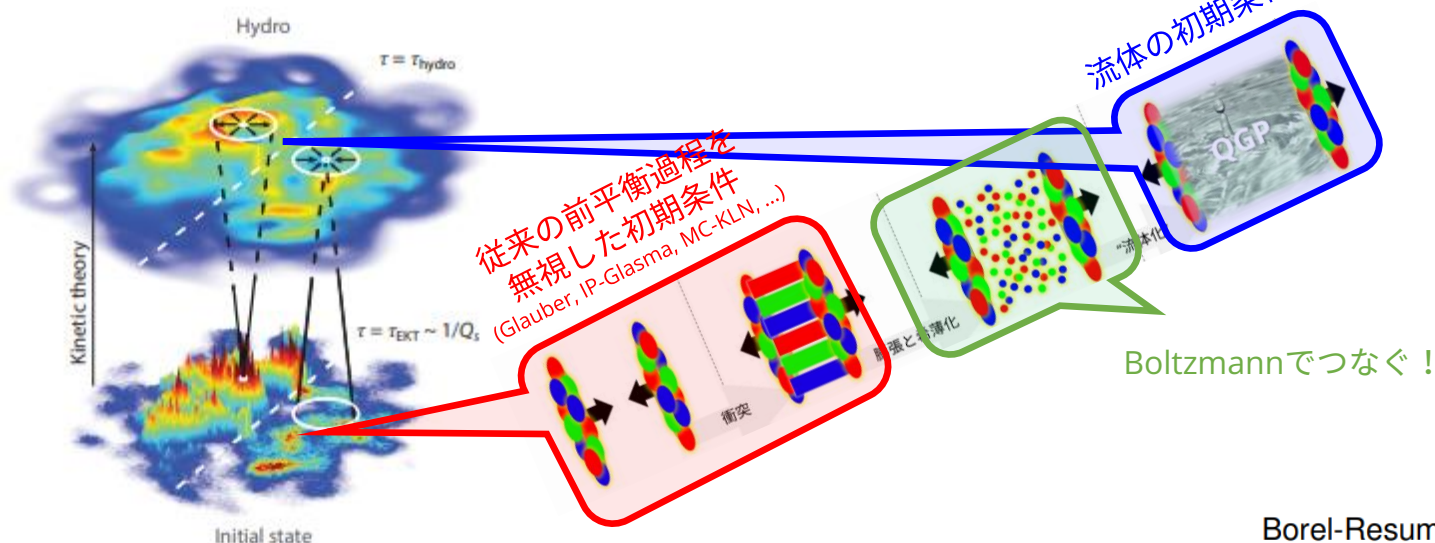
実験

良いシグナルはまだない... EMプローブ (レプトン・光子) やRidgeがしばしば議論されるが...

現象論

[Kurkela, Mazeliauskas, Paquet, Schlichting, Teaney, 1805.00961 & 1805.01604]

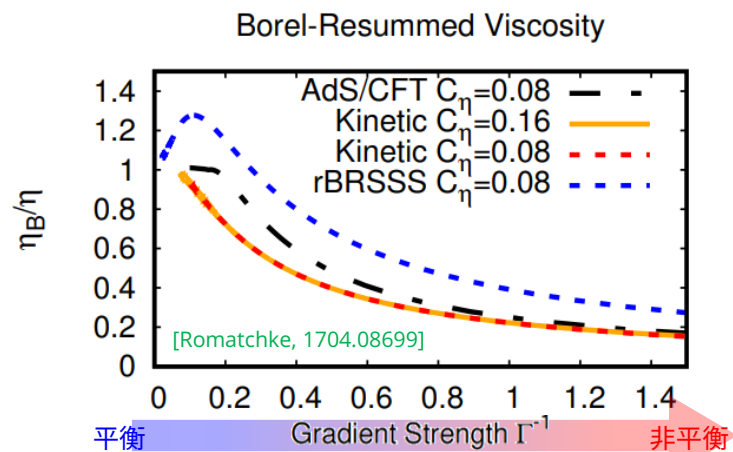
(1) さっきのBoltzmannの描像に基づいた流体初期条件: KΦMPOST



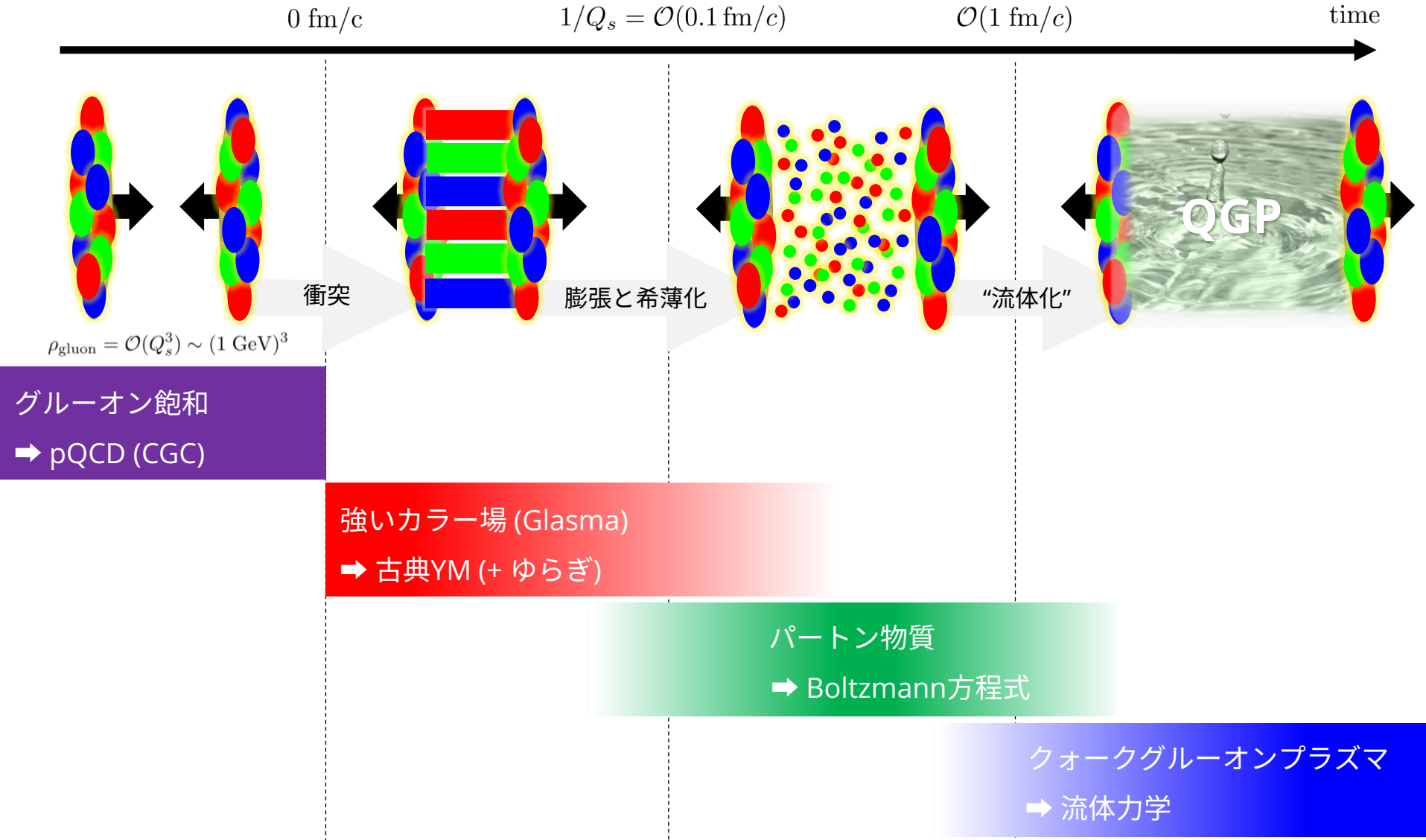
(2) 非平衡補正: 重イオンの"QGP"は本当に"QGP"?

流体化 \Rightarrow 「重イオンの"QGP"」は必ずしも熱平衡化していない

\Rightarrow 「重イオンの"QGP"」の物性パラメタは「平衡QGP」のそれとは違うかも



小まとめ: 強いカラー場とQGP生成過程の現状



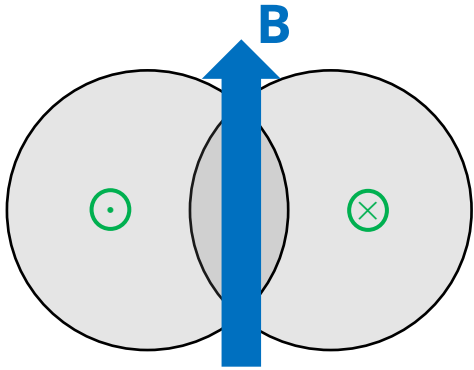
- ここ10年で進展 (e.g. ↑の弱結合の描像) したが、まだ問題は多い
- 重イオンだけに留まらない広がりがある (e.g. 非熱的固定点@冷却原子系)

目次

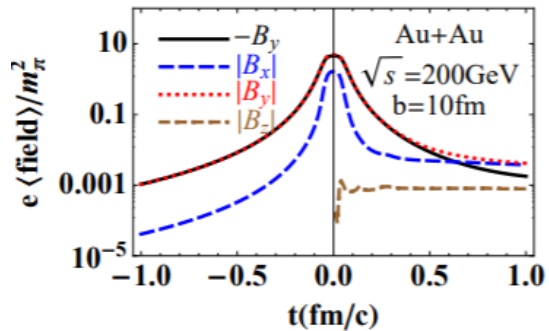
1. 強いカラー場
2. 強い電磁場
3. 強い渦渡場

基礎(1/5): 強い電磁場のできかた

① 非中心/(超)周辺衝突



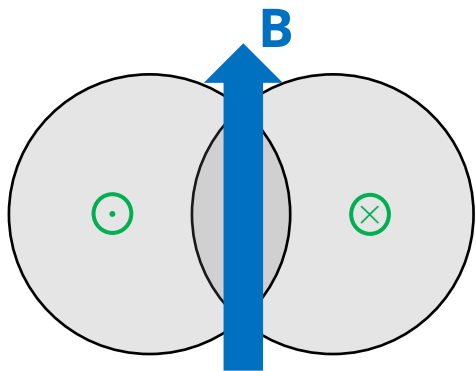
$$eB \sim \frac{\alpha Z v \gamma}{r^2} \sim \alpha Z \gamma \times m_\pi^2$$



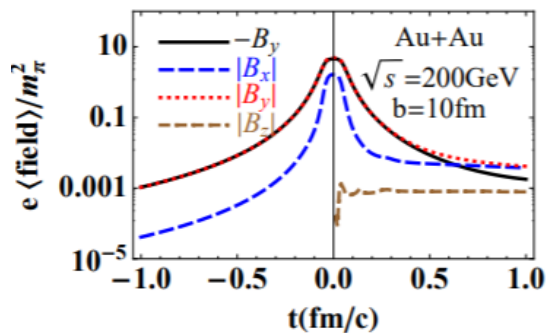
[Deng, Huang (2012)]

基礎(1/5): 強い電磁場のできかた

① 非中心/(超)周辺衝突

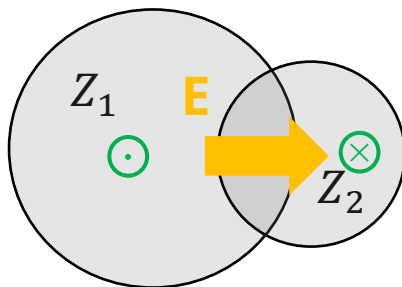


$$eB \sim \frac{\alpha Z v \gamma}{r^2} \sim \alpha Z \gamma \times m_\pi^2$$

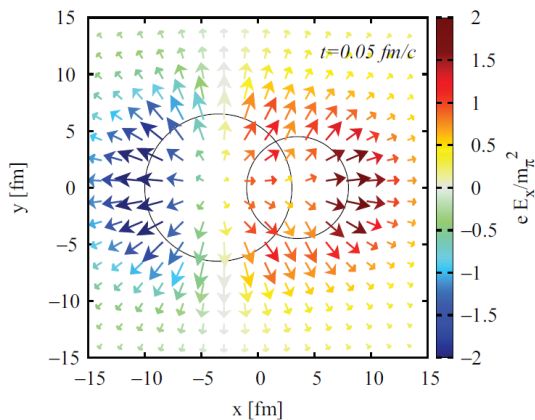


[Deng, Huang (2012)]

② 非対称衝突

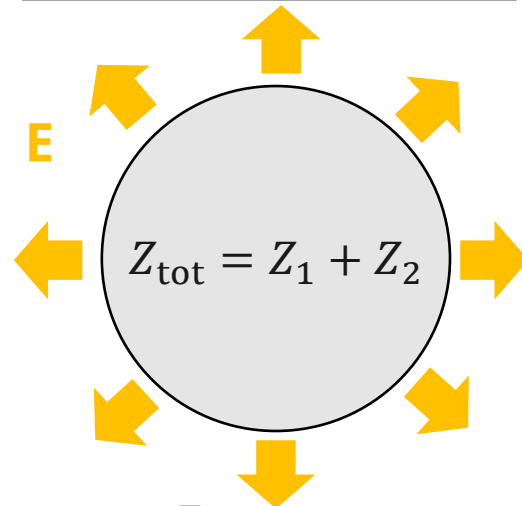


$$eE \sim \frac{\alpha(Z_1 - Z_2)\gamma}{r^2} \sim \alpha(Z_1 - Z_2)\gamma \times m_\pi^2$$

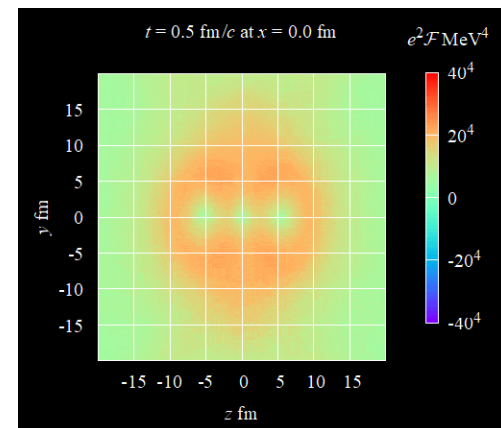


[Voronyuk, Toneev, Voloshin, Cassing (2014)]
[Hirono, Hongo, Hirano (2014)]

③ 低エネルギー衝突



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



[HT, Nishimura, Ohnishi (2024)]

基礎(2/5): 最強!

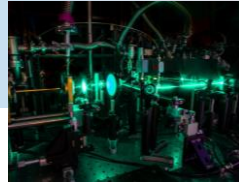
LED



溶接

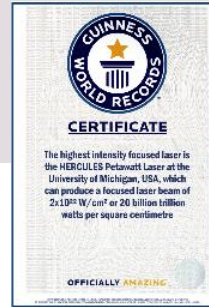


物性のTHzレーザー

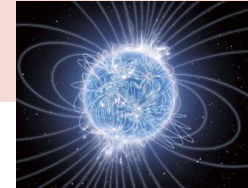


ギネス世界記録

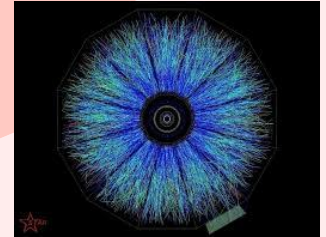
HERCULESレーザー
@ USA (2008)



(現宇宙で最強(?))
マグネター



重イオン衝突



$$eE, eB \sim (10^{-3} \text{eV})^2$$

$$\sim (10^{-1} \text{eV})^2$$

$$\sim (1 \text{eV})^2$$

$$\sim (1 \text{keV})^2$$

$$\sim (100 \text{keV})^2$$

$$\sim (100 \text{MeV})^2$$

「最強の環境」 ⇒ 「ふつうの環境」では起きない「何か」が起こる

基礎(3/5): 電磁場が強いと何が起こり得るか?

基本アイデア: 場が強い \Rightarrow 非摂動効果/高次効果が重要になりえる

基礎(3/5): 電磁場が強いと何が起こり得るか?

基本アイデア: 場が強い \Rightarrow 非摂動効果/高次効果が重要になりえる

始状態

終状態



時間発展

真空

基礎(3/5): 電磁場が強いと何が起こり得るか?

基本アイデア: 場が強い \Rightarrow 非摂動効果/高次効果が重要になりえる

始状態

終状態



真空

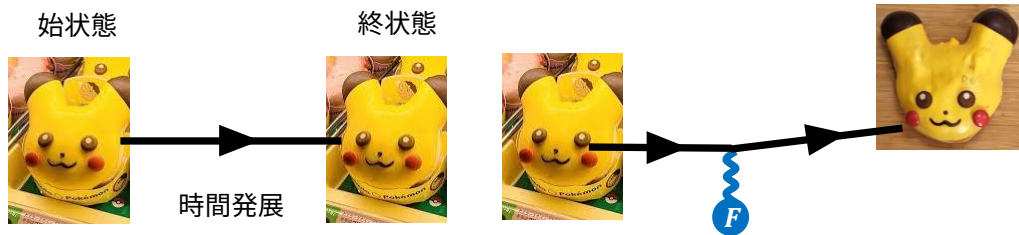
弱い場 ($eF/m^2 \ll 1$)

強い場 ($eF/m^2 \gg 1$)



基礎(3/5): 電磁場が強いと何が起こり得るか?

基本アイデア: 場が強い \Rightarrow 非摂動効果/高次効果が重要になりえる



真空

弱い場 ($eF/m^2 \ll 1$)

強い場 ($eF/m^2 \gg 1$)

摂動的な物理

\Rightarrow 理論・実験ともに
よくわかっている

e.g., 電子の異常磁気モーメント

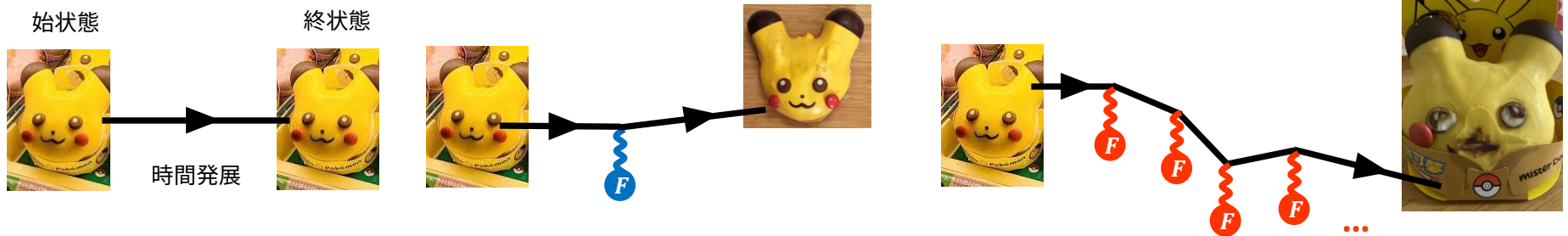
$$\alpha^{-1}(\text{theor.}) = 137.03599914 \dots$$

$$\alpha^{-1}(\text{exp.}) = 137.03599899 \dots$$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

基礎(3/5): 電磁場が強いと何が起こり得るか?

基本アイデア: 場が強い \Rightarrow 非摂動効果/高次効果が重要になりえる



真空

弱い場 ($eF/m^2 \ll 1$)

強い場 ($eF/m^2 \gg 1$)

摂動的な物理

\Rightarrow 理論・実験ともによくわかっている

e.g., 電子の異常磁気モーメント

$$\alpha^{-1}(\text{theor.}) = 137.03599914 \dots$$
$$\alpha^{-1}(\text{exp.}) = 137.03599899 \dots$$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

非摂動的な物理

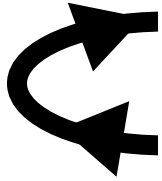
\Rightarrow 「摂動的」= 「普通の状況」では起きないことが起こる

基礎(4/5): 強い電磁場の物理の例

✓ 新しいQED過程

Review: [Fedotov, Ilderton, Karbstein, King, Seipt, [HI](#), Torgrimsson, 2203.00019]

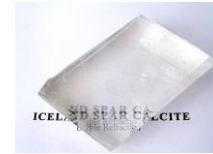
例1) Schwinger機構



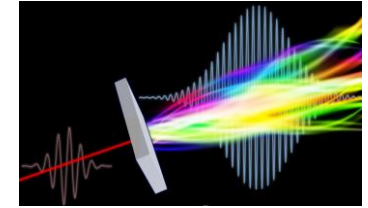
例2) 光子分裂



例3) 真空複屈折



例4) 高次高調波発生

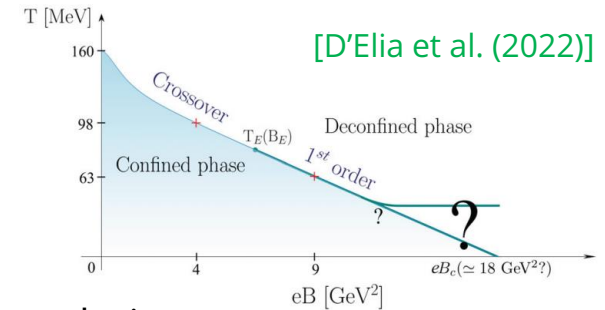
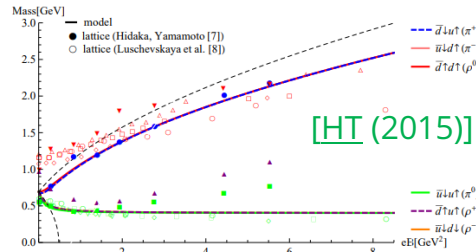


[[HI](#), Hongo, Ikeda (2021)]

✓ スーパー強ければ、QCD・ハドロン物理にも影響する

例1) ハドロンの性質:

例) 質量、形状、崩壊モード、...



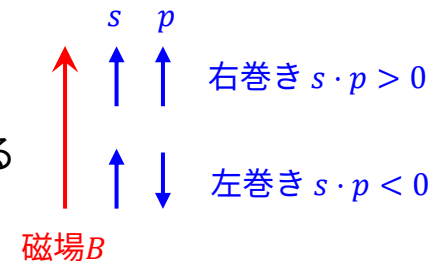
例2) QCD相図

例) カイラル/閉じ込め相転移への影響、(inverse) magnetic catalysis、...

例3) 異常輸送現象

例) カイラル磁気効果(CME): カイラリティ不均一 $\Rightarrow J \propto B$ の電流流れる

[[Fukushima, Kharzeev, Warringa \(2008\)](#)]



基礎(4/5): 強い電磁場の物理の例

✓ 新しいQED過程

例1) Schwinger機構

例2) 光子分裂

例3) 真空屈折

例4) 高次高調波発生

全部、実験的には未発見!

∴ 他のいかなる実験でも強い電磁場を作れなかったから

⇒ 重イオンを「道具」として、こういう物理が調べられたらQGP研究の枠を超えて楽しい

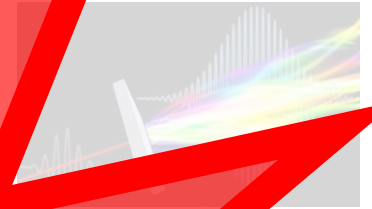
例5) QCD相図

例6) カイラル/閉じ込め相転移への影響、(inverse) magnetic catalysis、

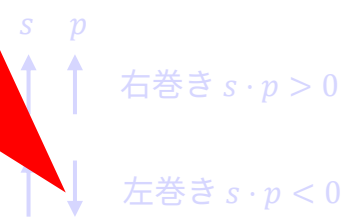
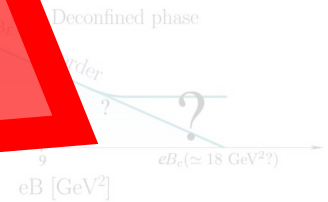
例7) 異常輸送現象

例8) カイラル磁気効果(CME): カイラルスピニ不均一 ⇒ $J \propto B$ の電流流れる

[Fukushima, Kharzeev, Warringa (2008)]



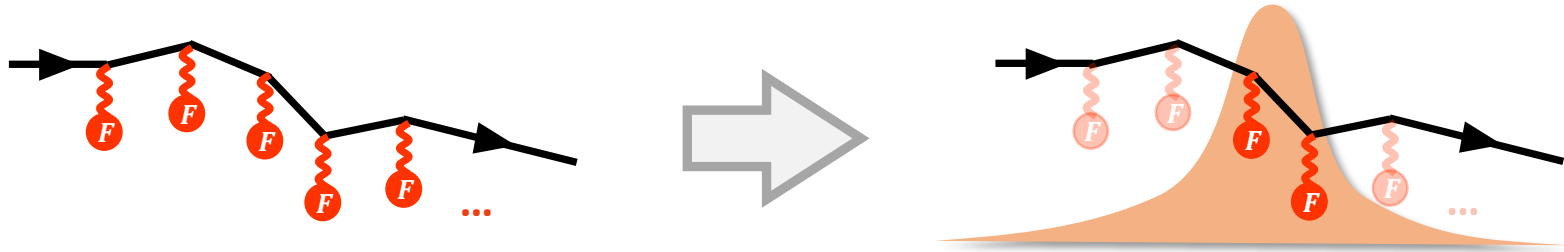
[HT, Hong, Ueda (2021)]



磁場B

基礎(5/5): しかしながら、寿命の短さには注意

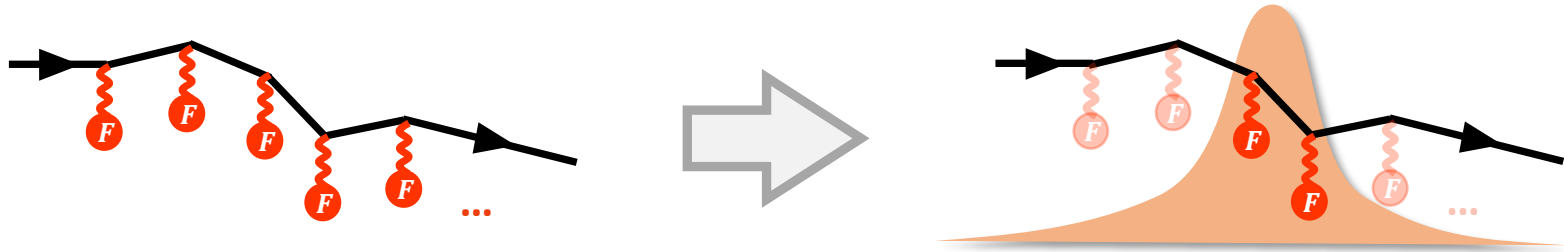
- ちょっとナイーブすぎる: **重イオンの電磁場は短寿命** ($\tau \sim 2R/\gamma \lesssim 0.1 \text{ fm}/c$)
⇒ 一瞬で無くなるなら、いくら強かろうが影響しない



注: 物質効果 (電気伝導度) で寿命が延びる可能性はあるが... [Tuchin (2013)] [Skokov, McLerran (2014)]

基礎(5/5): しかしながら、寿命の短さには注意

- ちょっとナイーブすぎる: 重イオンの電磁場は短寿命 ($\tau \sim 2R/\gamma \lesssim 0.1 \text{ fm}/c$)
 \Rightarrow 一瞬で無くなるなら、いくら強かろうが影響しない

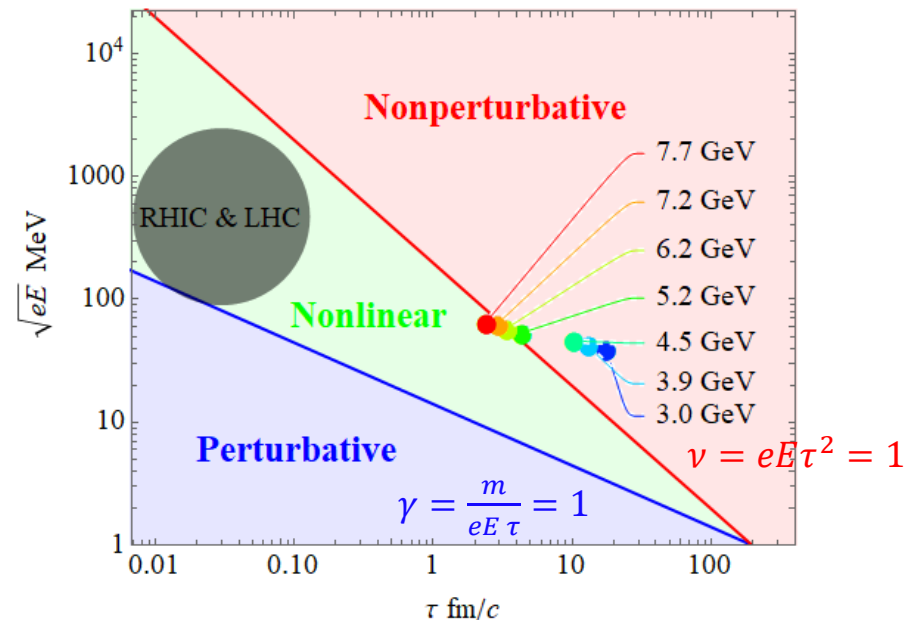


注: 物質効果 (電気伝導度) で寿命が延びる可能性はあるが... [Tuchin (2013)] [Skokov, McLerran (2014)]

- 重イオン衝突のsensitivity region

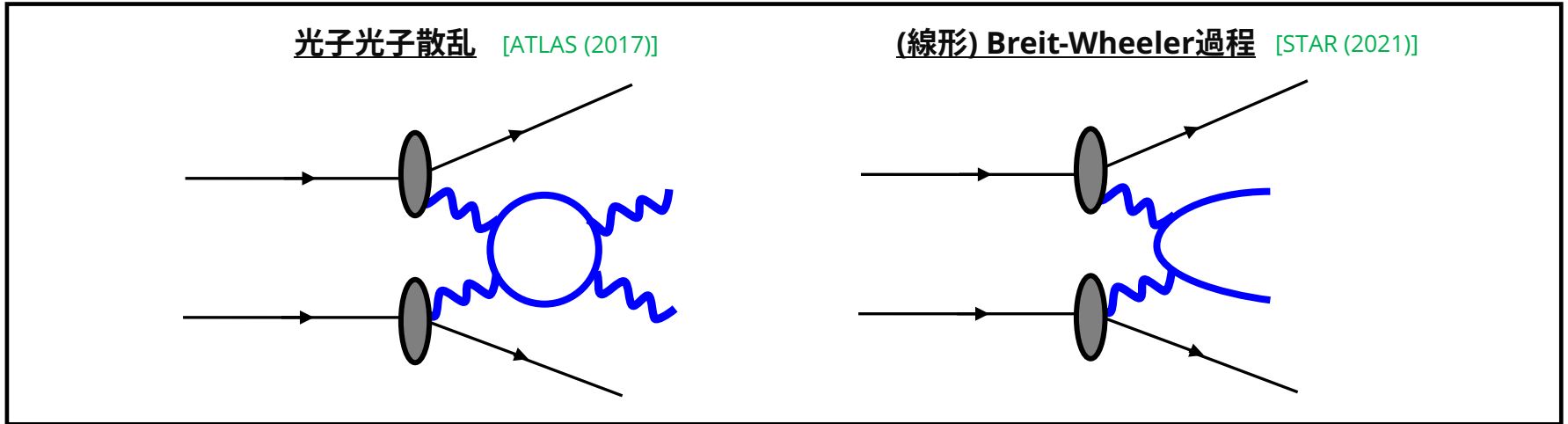
[HI, Nishimura, Ohnishi (2024)]

[Baltz et al., (2007)]



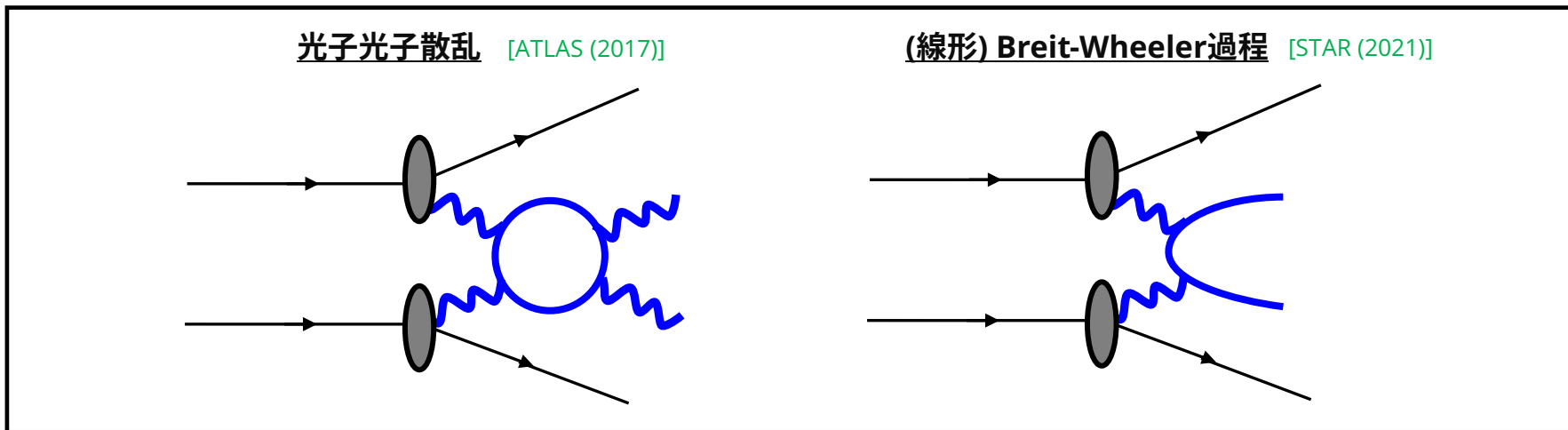
非摂動領域は (高エネルギーでは) 厳しいかもだけど、高次の非自明な効果は見えるはず

発展(1/3): 最近の実験結果: 新しいQED効果の発見

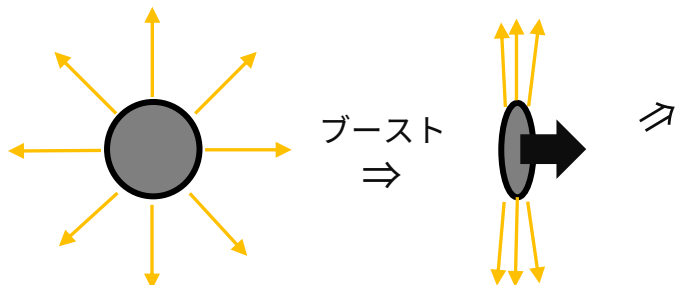


- α で抑制されてるせいで他のいかなる実験でも見えてなかったが、重イオンは光子密度が大きい(=場が強い)ので見えた

発展(1/3): 最近の実験結果: 新しいQED効果の発見

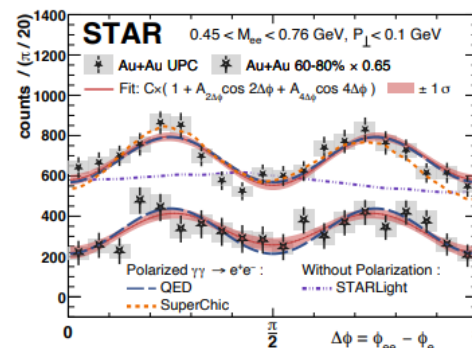


- α で抑制されてるせいで他のいかなる実験でも見えてなかったが、重イオンは光子密度が大きい(=場が強い)ので見えた [Li, Zhou, Zhou (2019)]
- 理論: 等価光子場近似 (equivalent photon approx. とか Weizsacker-Williams approx. とも)
 - 仮定: すごくブーストされた重イオンのクーロン場は、実光子の集まりと見なせる



[全散乱断面積]
 = [(実)光子の分布関数] × [素過程の断面積]

- よく合う
 ⇒ より高次の散乱効果は今のところ見えていない
 (← 寿命の観点からは自然)



発展(2/3): 最近の実験結果: ハドロンのフロー

電磁場は(寿命が短いけれど)強いので、QCD/ハドロン過程にも影響し得る

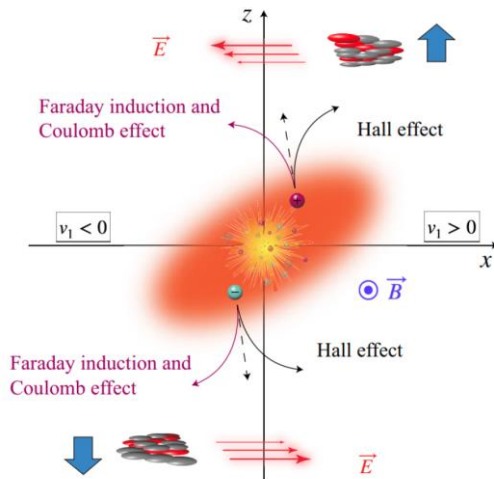
発展(2/3): 最近の実験結果: ハドロンのフロー

電磁場は(寿命が短いけれど)強いので、QCD/ハドロンの過程にも影響し得る

⇒ 例: 電荷依存した v_1 フロー (\approx ハドロンの収量が横平面の右/左にどれくらい偏るか)

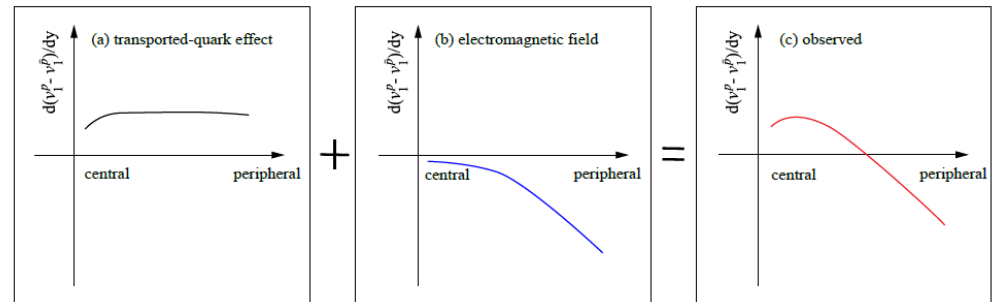
cf. 非対称衝突での観測 [STAR (2017), (2018)]

- 理論的期待



⇒

[Gursoy, Kharzeev, Marcus, Rajagopal, Shen (2018)]



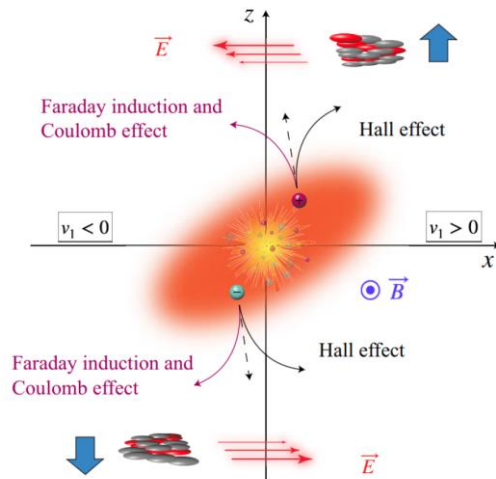
発展(2/3): 最近の実験結果: ハドロンのフロー

電磁場は(寿命が短いけれど)強いので、QCD/ハドロン過程にも影響し得る

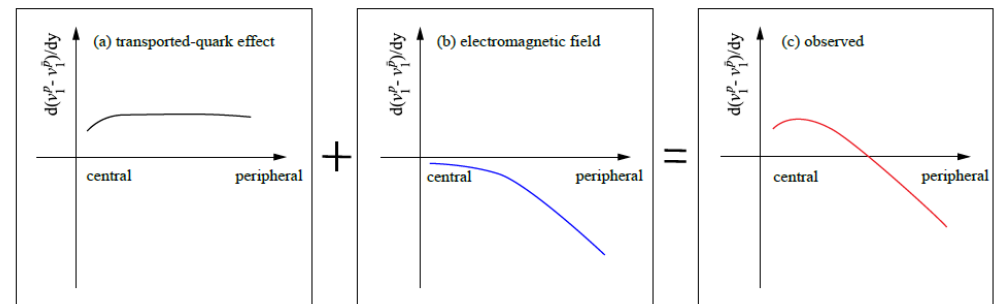
⇒ 例: 電荷依存した v_1 フロー (\approx ハドロン収量が横平面の右/左にどれくらい偏るか)

cf. 非対称衝突での観測 [STAR (2017), (2018)]

- 理論的期待



[Gursoy, Kharzeev, Marcus, Rajagopal, Shen (2018)]

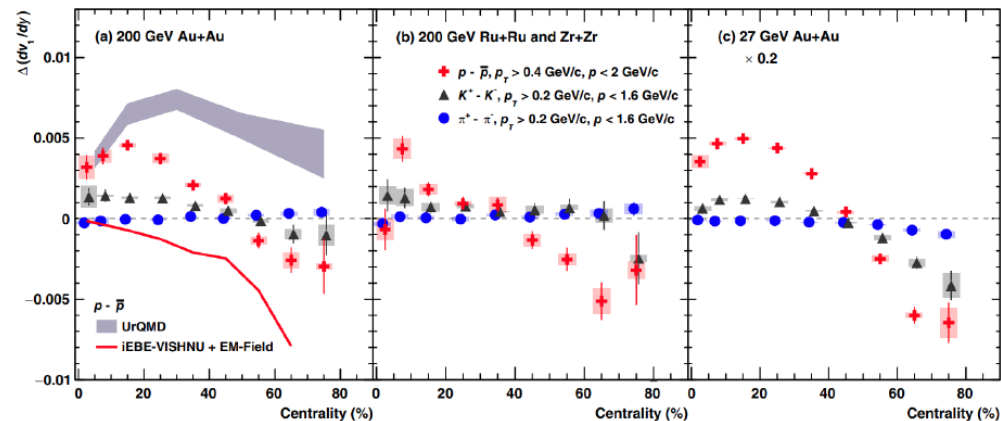


- 実験でそれっぽい振る舞いが見えた!

- ちょうど、流体計算 + (b) (w/o (a)) と
ハドロン輸送模型の計算 + (a) (w/o (b))
の間にあるように見える

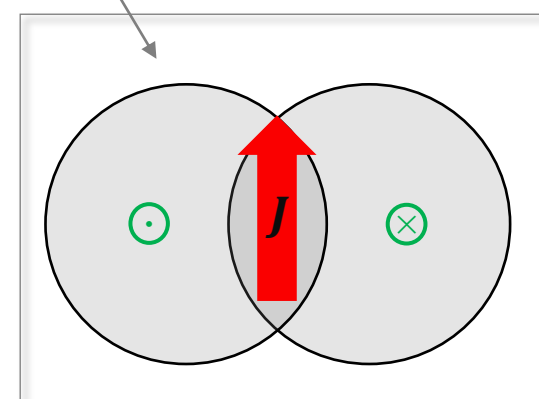
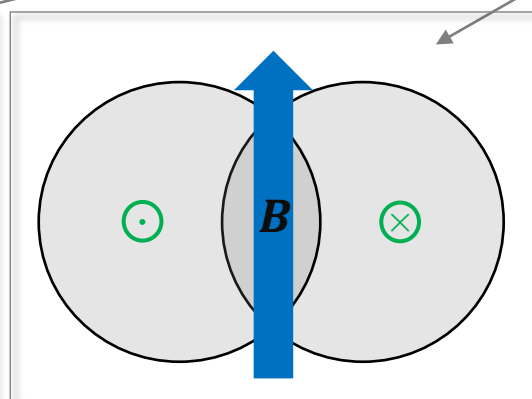
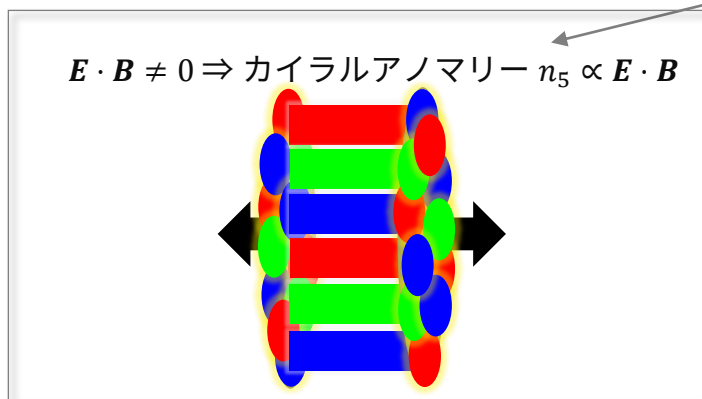
- (完全再現した計算は知らない...)

[STAR (2024)]



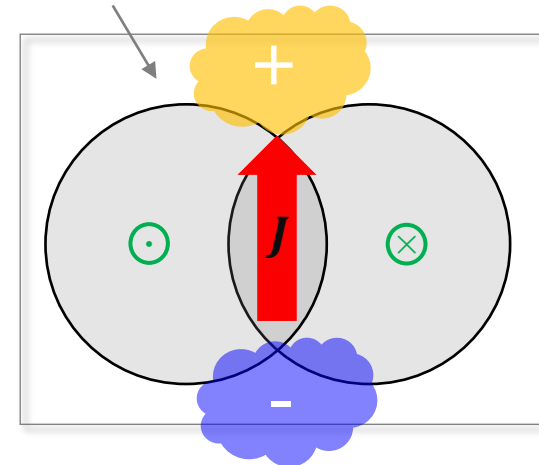
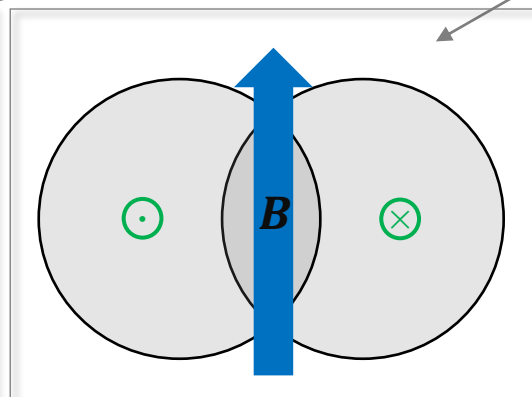
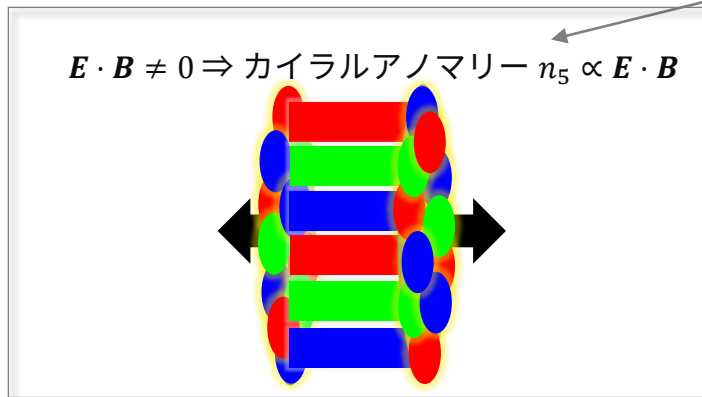
発展(3/3): 最近の実験結果: CME探索

- 復習: カイラル磁気効果(CME) = カイラリティ不均一 + 磁場 ⇒ 磁場方向の電流



発展(3/3): 最近の実験結果: CME探索

- 復習: カイラル磁気効果(CME) = カイラリティ不均一 + 磁場 ⇒ 磁場方向の電流

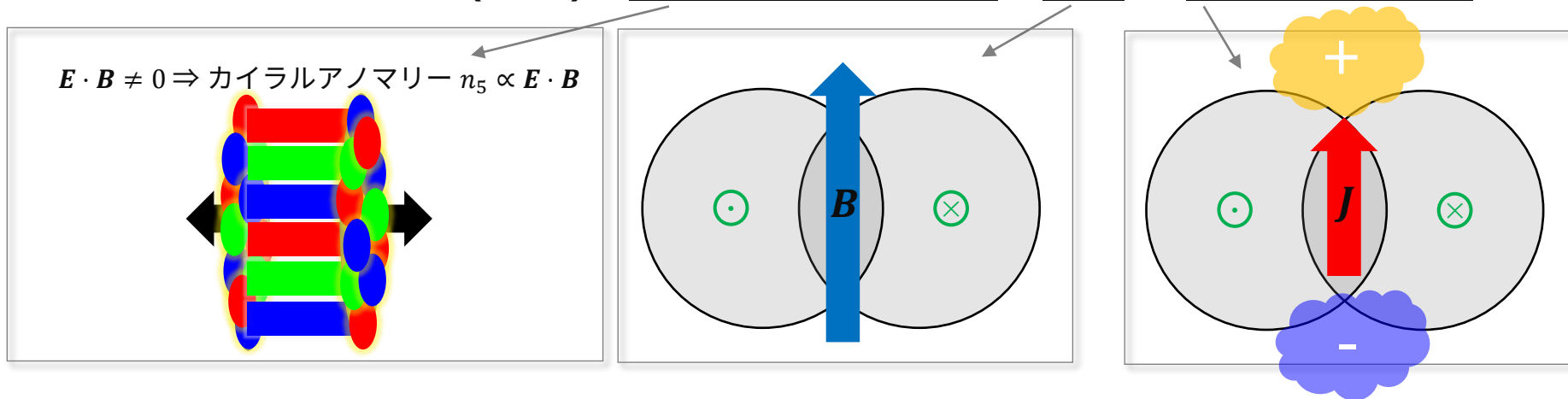


- 素朴には、衝突平面の上と下の電荷差 (= a とよく書かれる) を測れば良いが...

- グラズマのフラックスチューブは横方向にランダムなので、平均すると $n_5 = 0 \Rightarrow \langle \text{電荷差} \rangle = 0$
- なので、ゆらぎを測る $\langle (\text{電荷差})^2 \rangle \neq 0$ (= γ とよく書かれる) [Voloshin (2004)]
- しかし、ゆらぎなので必然的に雑音の影響を受けやすい \Rightarrow 賢い雑音の除去の必要性 (\leftarrow ムズイ!)

発展(3/3): 最近の実験結果: CME探索

- 復習: カイラル磁気効果(CME) = カイラリティ不均一 + 磁場 ⇒ 磁場方向の電流

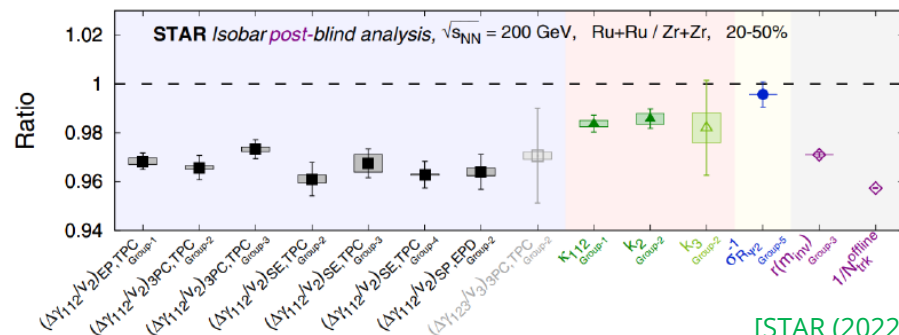


- 素朴には、衝突平面の上と下の電荷差 (= a とよく書かれる) を測れば良いが...

- グラズマのフラックスチューブは横方向にランダムなので、平均すると $n_5 = 0 \Rightarrow \langle \text{電荷差} \rangle = 0$
- なので、ゆらぎを測る $\langle (\text{電荷差})^2 \rangle \neq 0$ (= γ とよく書かれる) [Voloshin (2004)]
- しかし、ゆらぎなので必然的に雑音の影響を受けやすい \Rightarrow 賢い雑音の除去の必要性 (\leftarrow ムズイ!)

- 最近のアイデア: 同重核衝突 = 質量数 A 同じ、原子核番号 Z だけ違う原子核衝突

- 強い相互作用の効果 (\approx 雑音) は同じで、磁場の大きさだけが違う (だろう)
- \Rightarrow シグナル γ の比 $R := \gamma(Z_{大}) / \gamma(Z_{小}) > 1$
- 実験結果: 今のところ 「 >1 」 とは ならない
- \leftarrow 同重核ならではの雑音も考えないと... (e.g. 中性子スキン)



[STAR (2022)]

より包括的なレビューは[Kharzeev, Liao, Tribedy (2024)]

小まとめ: 重イオン衝突における強い電磁場の物理

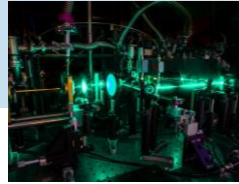
LED



溶接

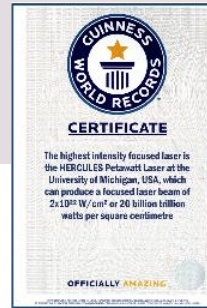


物性のTHzレーザー

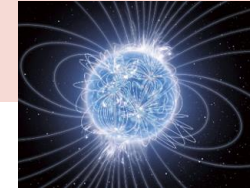


ギネス世界記録

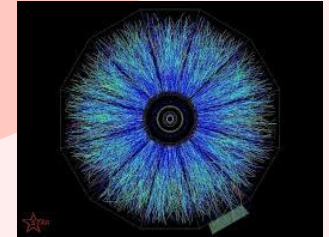
HERCULESレーザー
@ USA (2008)



(現宇宙で最強(?))
マグネター



重イオン衝突



$$eF \sim (10^{-3} \text{eV})^2$$

$$\sim (10^{-1} \text{eV})^2$$

$$\sim (1 \text{eV})^2$$

$$\sim (1 \text{keV})^2$$

$$\sim (100 \text{keV})^2$$

$$\sim (100 \text{MeV})^2$$

最強の電磁場 ⇒ 非自明な電磁場効果 (e.g. 非線形QED)

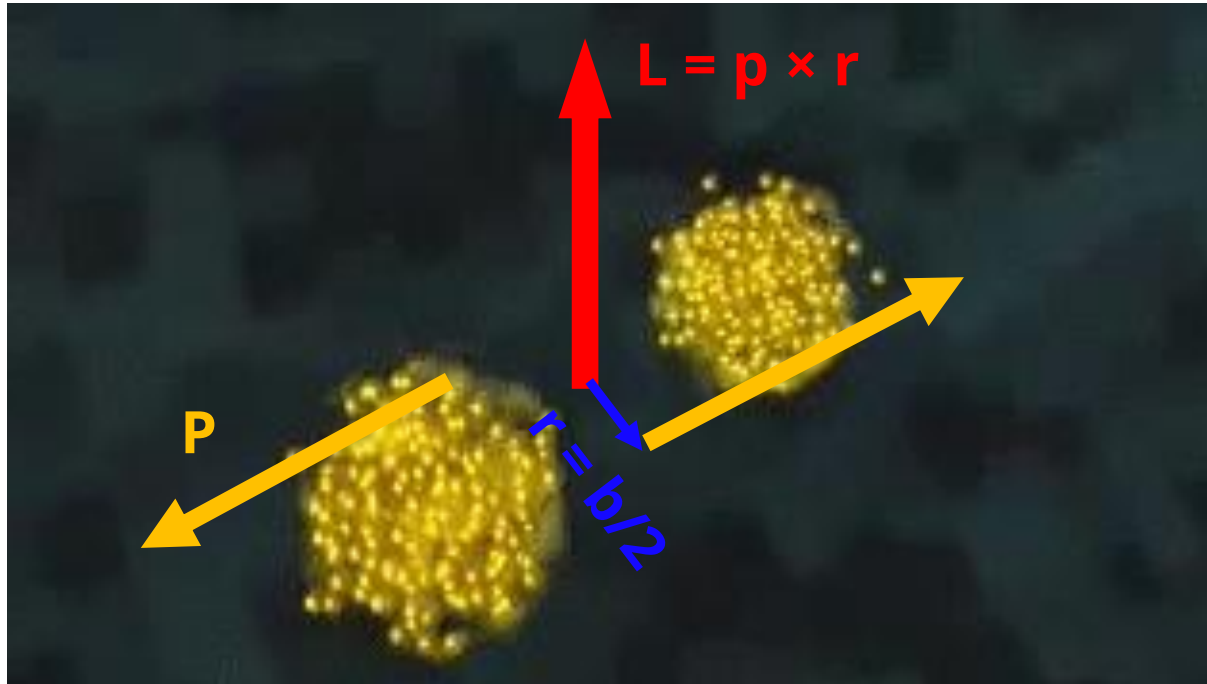
寿命が短いので、非摂動的な領域にいけるかは微妙だが (低エネルギーならいけるかも)、それでも高次の非自明な効果は見える (e.g., 光子光子散乱や線形BW効果の初観測)

⇒ 重イオンを強い電磁場の物理の「道具」として使う楽しみ

目次

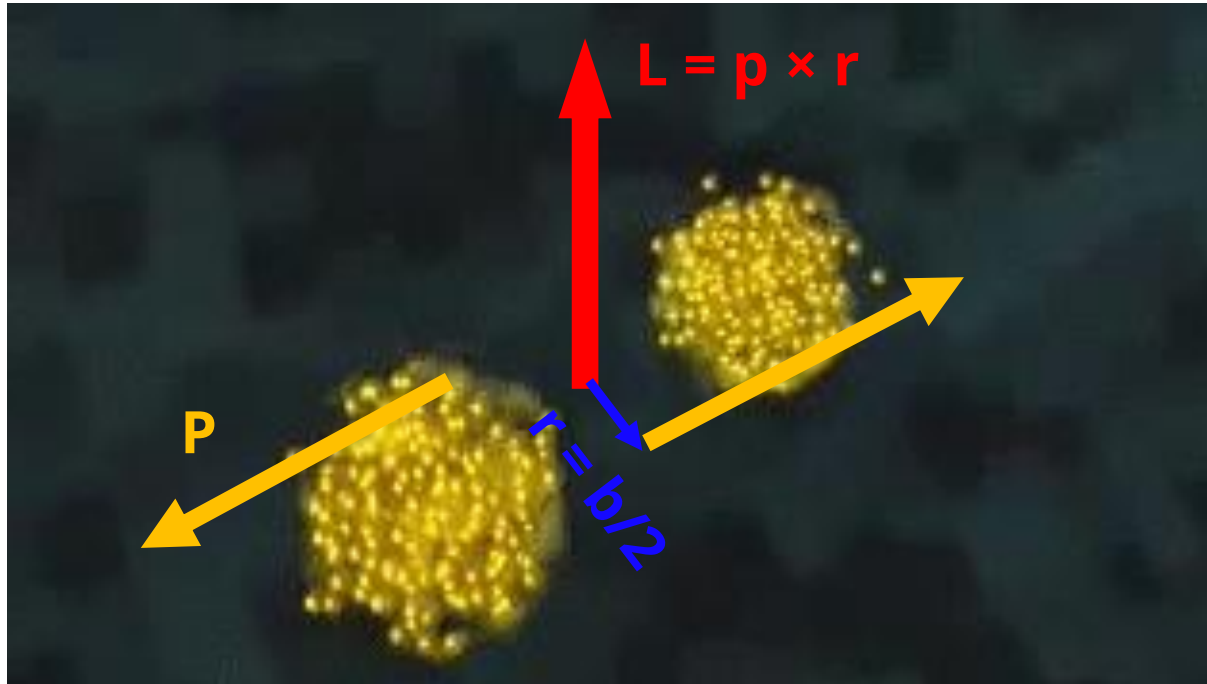
1. 強いカラー場
2. 強い電磁場
3. 強い渦渡場

基礎(1/5): (globalな) 強い渦渡場のできかた



- 全角運動量は大きい: $J \sim L = \mathbf{p} \times \mathbf{r} \sim \sqrt{s_{NN}} A \times b/2 \sim 10^6 \hbar \gg$ (原子核1個のスピン $0(1\hbar)$)

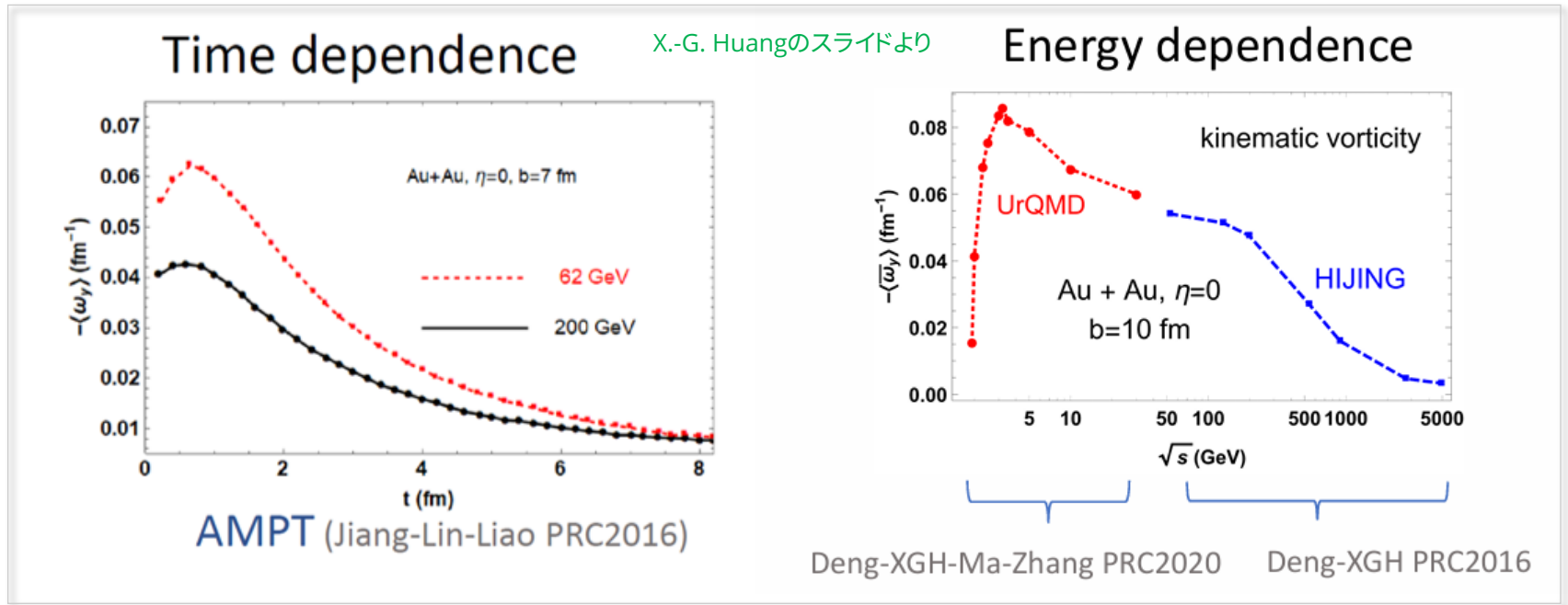
基礎(1/5): (globalな) 強い渦渡場のできかた



- 全角運動量は大きい: $J \sim L = \mathbf{p} \times \mathbf{r} \sim \sqrt{s_{NN}} A \times b/2 \sim 10^6 \hbar \gg$ (原子核1個のスピン $O(1\hbar)$)
- 角運動量 (の一部) はQGPへ \Rightarrow QGPは早く「回転」するだろう (流速分布が渦的になる)
- 流体の回転速度の指標 = 渦度 $\omega := \text{rot } \mathbf{v}$
 \Leftarrow 剛体回転の角速度 $\Omega := v/r$ の局所版



基礎(2/5): 宇宙最強!



• 宇宙最強の角速度 $\sim 10^{21}\text{Hz}$ が実現

⇒ (強い電磁場と同様に)

「最強の環境」 ⇒ 「ふつうの環境」では起きない「何か」が起こる可能性



銀河

10^{-15}Hz



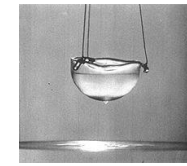
台風

10^{-1}Hz



洗濯機

10^{+2}Hz



超流動

10^{+7}Hz

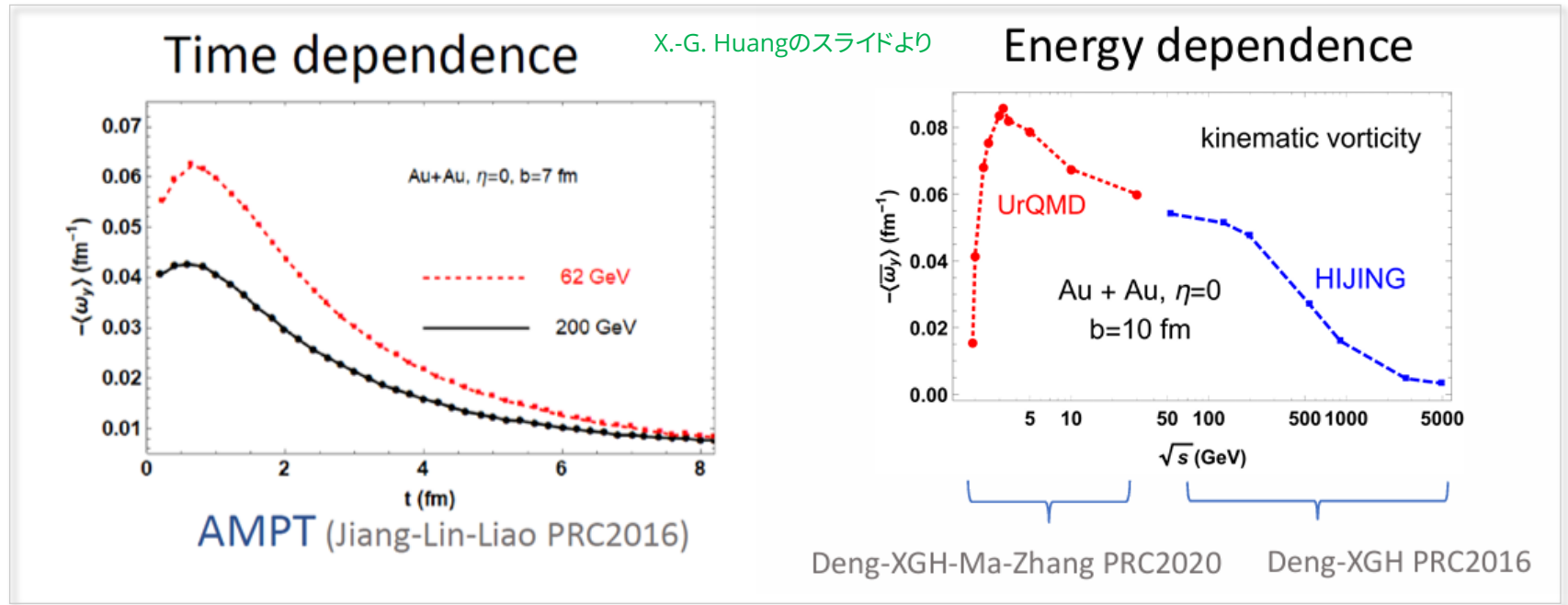
[Gomez et al. (2014)]



QGP

10^{+21}Hz

基礎(2/5): 宇宙最強!



• 宇宙最強の角速度 $\sim 10^{21}\text{Hz}$ が実現

⇒ (強い電磁場と同様に)

「最強の環境」 ⇒ 「ふつうの環境」では起きない「何か」が起こる可能性



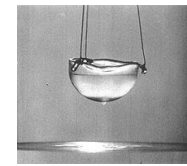
銀河
 10^{-15}Hz



台風
 10^{-1}Hz



洗濯機
 10^{+2}Hz



超流動
 10^{+7}Hz



QGP
 10^{+21}Hz

[Gomez et al. (2014)]

• しかしながら、eVで見ると弱い: $\omega = O(10 \text{ MeV})$

とはいえ、長く持続する $O(5 \text{ fm}/c)$ ので、 $\omega/T \sim 1\%$ 程度のシグナルが見えても良さそう

基礎(3/5): 期待される物理

A: スピンとカイラリティの物理

基礎(3/5): 期待される物理

A: スピンとカイラリティの物理

- スピン偏極 by スピン渦度結合 $E \rightarrow E - \omega \cdot s$ [Liang, Wang (2004)]

- LS力 $\delta E \propto L \cdot s$ の局所版。Zeeman効果のアナログ $\delta E \propto B \cdot s$

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

[Vilenkin (1980)] [Hehl, Ni (1990)]
[Beccatini (2012)] [Beccatini et al. (2013)] ...

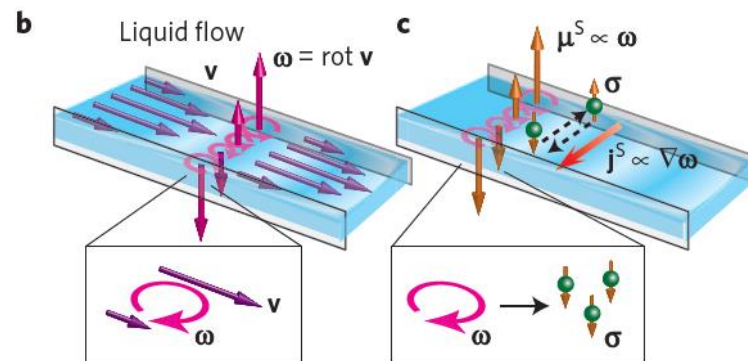
$$\Rightarrow P \equiv \frac{f_{\uparrow} - f_{\downarrow}}{f_{\uparrow} + f_{\downarrow}} = O(\omega/T) = O(0.1 - 1\%)$$

- 物性 (スピントロニクス) でアナログが観測

\Rightarrow スピントロニクスのアイデアが他にも輸入

cf. baryonic spin Hall effect [Fu, Pang, Song, Yin (2022)]

[Takahashi et al. (2015)]



• 異常輸送現象

- カイラル渦効果(CVE): $J \propto \omega \Leftarrow \text{CME } J \propto B$ のアナログ $B \leftrightarrow \omega$

[Vilenkin (1979)]
ググればたくさんレビューが出てくる

基礎(3/5): 期待される物理

A: スピンとカイラリティの物理

- スピン偏極 by スピン渦度結合 $E \rightarrow E - \omega \cdot s$ [Liang, Wang (2004)]

- LS力 $\delta E \propto L \cdot s$ の局所版。Zeeman効果のアナログ $\delta E \propto B \cdot s$

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

[Vilenkin (1980)] [Hehl, Ni (1990)]
[Beccatini (2012)] [Beccatini et al. (2013)] ...

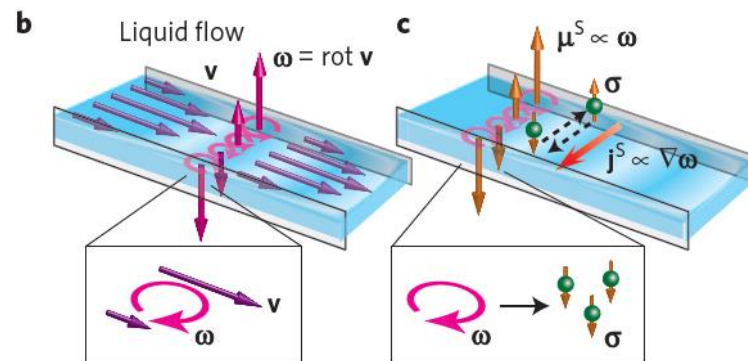
$$\Rightarrow P \equiv \frac{f_{\uparrow} - f_{\downarrow}}{f_{\uparrow} + f_{\downarrow}} = O(\omega/T) = O(0.1 - 1\%)$$

- 物性 (スピントロニクス) でアナログが観測

\Rightarrow スピントロニクスのアイデアが他にも輸入

cf. baryonic spin Hall effect [Fu, Pang, Song, Yin (2022)]

[Takahashi et al. (2015)]



• 異常輸送現象

- カイラル渦効果(CVE): $J \propto \omega \Leftarrow$ CME $J \propto B$ のアナログ $B \leftrightarrow \omega$

[Vilenkin (1979)]
ググればたくさんレビューが出てくる

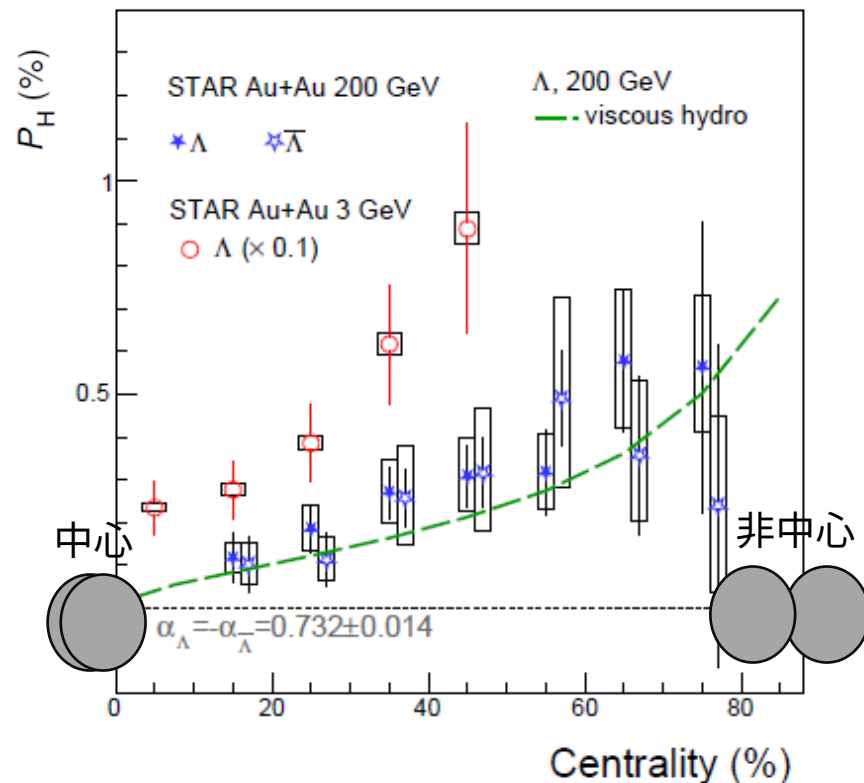
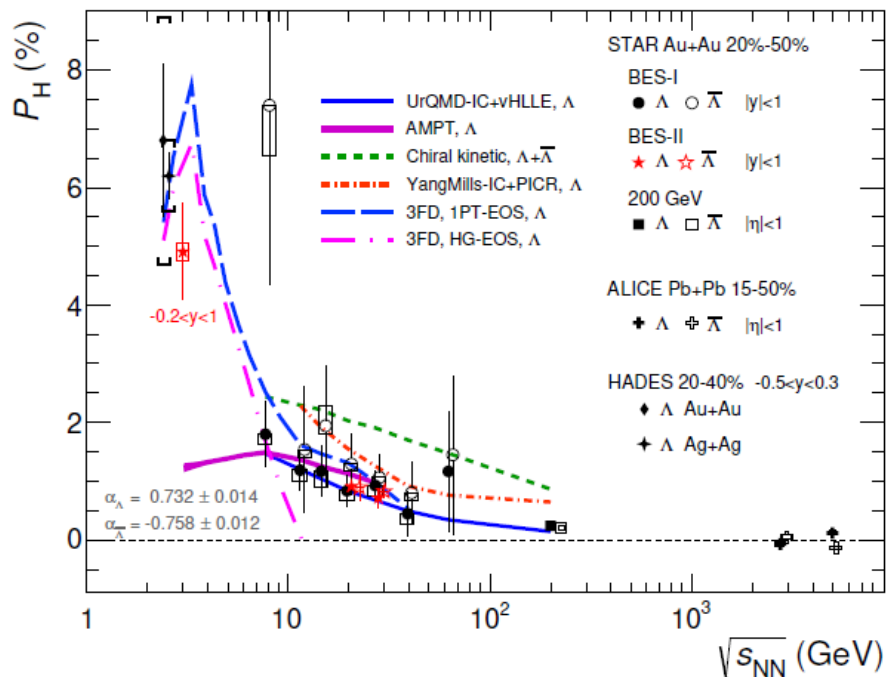
基礎(4/5): 実験で確かに見えた!

エネルギー依存性

1st result: [STAR (2017)]

最新のレビュー: [Niida, Voloshin (2024)]

中心度依存性



• たしかに $O(1\%) = \omega/T$ の効果が見える

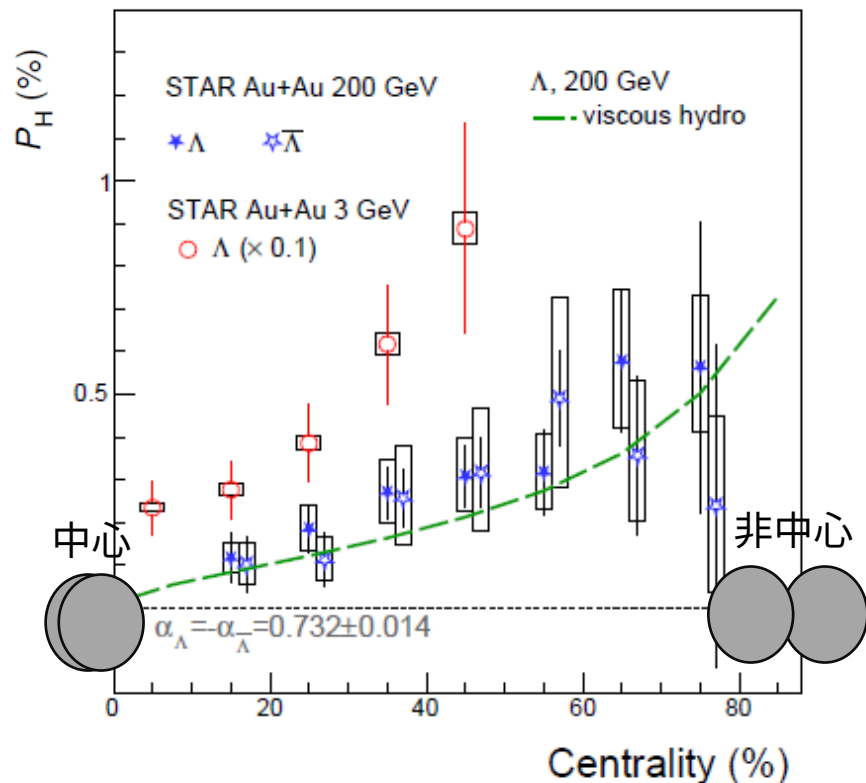
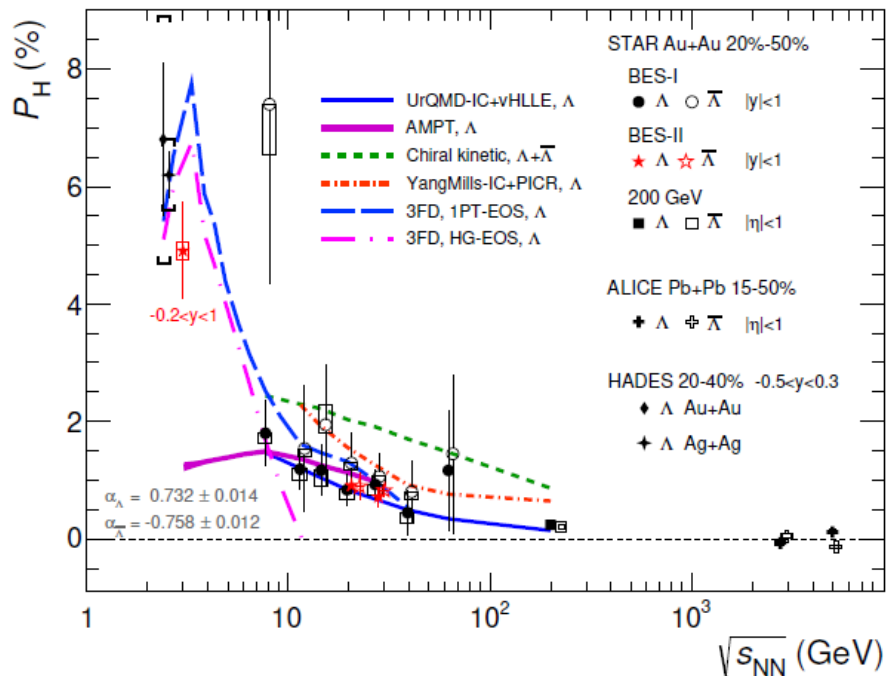
- 低エネルギー、非中心衝突ほど偏極が大きい
- スピン渦度結合を入れた理論で良く再現できる

基礎(4/5): 実験で確かに見えた!

エネルギー依存性

1st result: [STAR (2017)]
最新のレビュー: [Niida, Voloshin (2024)]

中心度依存性



• たしかに $O(1\%) = \omega/T$ の効果が見える

- 低エネルギー、非中心衝突ほど偏極が大きい
- スピン渦度結合を入れた理論で良く再現できる

• ちなみに、 Λ と $\bar{\Lambda}$ の違いは有意に無 \Rightarrow 磁場の効果は見えてない

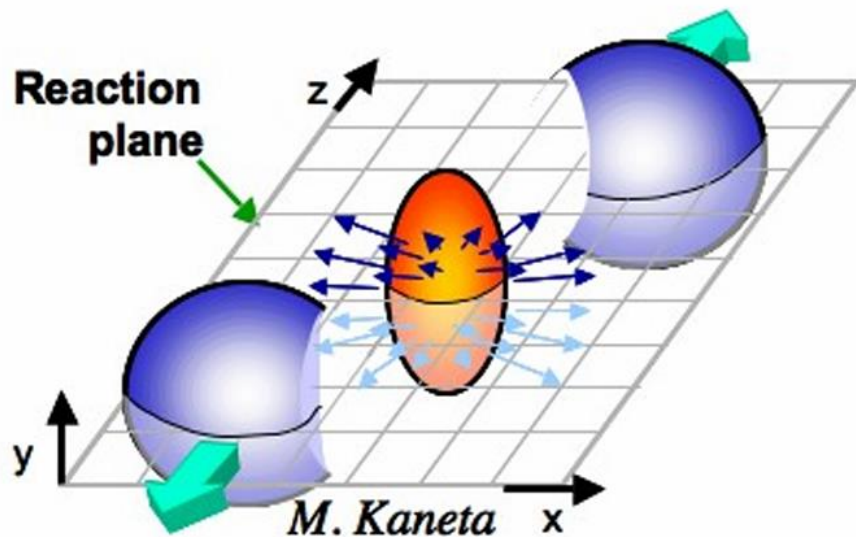
\Rightarrow (フリーズアウト時の) 磁場はゼロと一貫 [STAR (2023)]
(まだゆるい制限だけど: $eB \lesssim 10^{13}$ T $\sim (50 \text{ MeV})^2$)

基礎(5/5): Global → Local

- 重イオン系はぜんぜん一様じゃないので、
全角運動量由来のglobalな渦度だけでなく、localな渦度も存在する
⇒ スピン偏極は一様じゃなくて、分布 (方位角依存、ラピディティ依存、...) を持つ

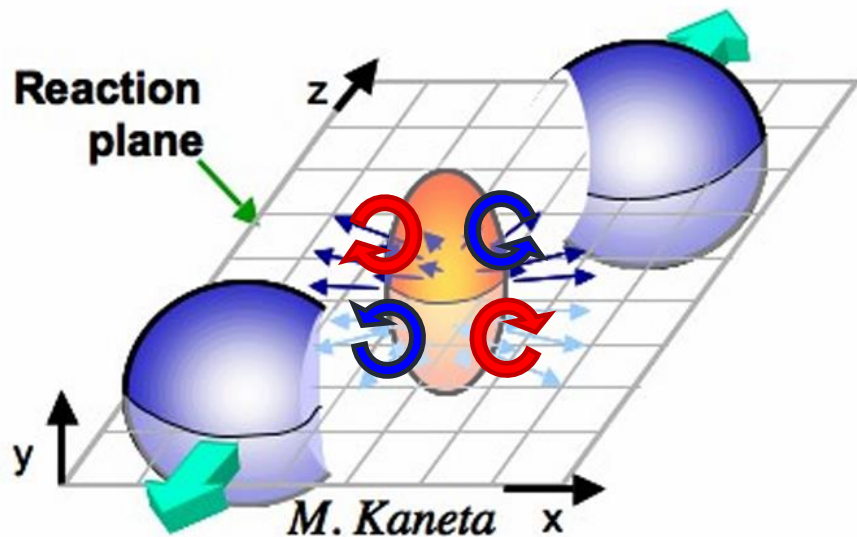
基礎(5/5): Global → Local

- 重イオン系はぜんぜん一様じゃないので、
全角運動量由来のglobalな渦度だけでなく、localな渦度も存在する
⇒ スピン偏極は一様じゃなくて、分布 (方位角依存、ラピディティ依存、...) を持つ
- localな渦度の源は何？ ⇒ たくさんある
代表例: 楕円フローによる渦度 (ほかの例: ジェット、非対称衝突、高次フロー、...)



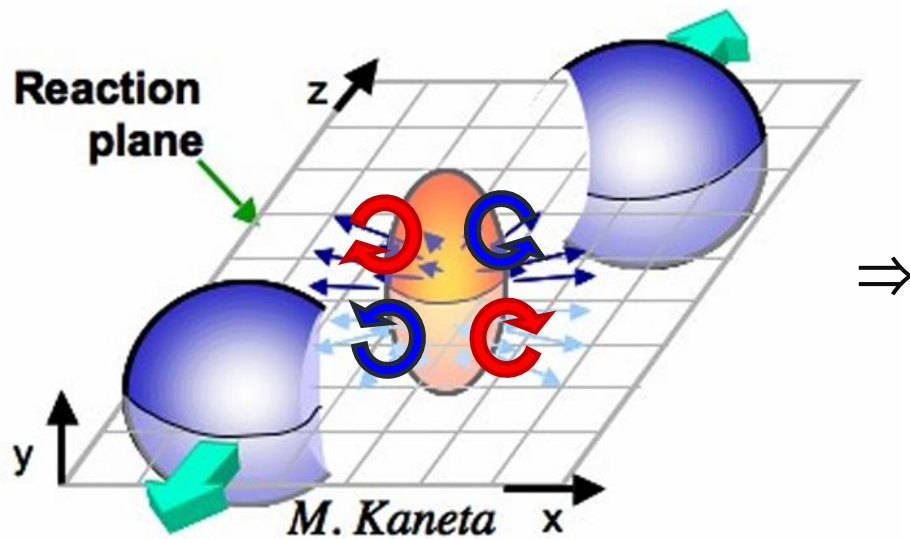
基礎(5/5): Global → Local

- 重イオン系はぜんぜん一様じゃないので、
全角運動量由来のglobalな渦度だけでなく、localな渦度も存在する
⇒ スピン偏極は一様じゃなくて、分布 (方位角依存、ラピディティ依存、...) を持つ
- localな渦度の源は何？ ⇒ たくさんある
代表例: 楕円フローによる渦度 (ほかの例: ジェット、非対称衝突、高次フロー、...)

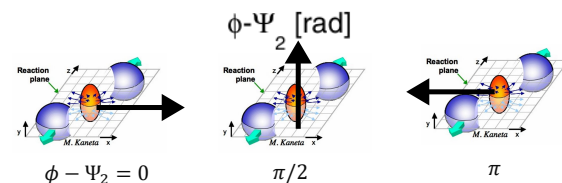
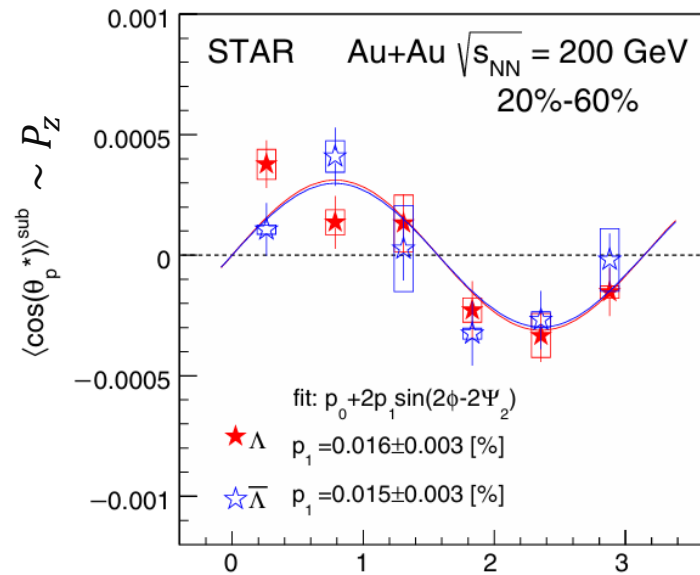


基礎(5/5): Global → Local

- 重イオン系はぜんぜん一様じゃないので、
全角運動量由来のglobalな渦度だけでなく、localな渦度も存在する
⇒ スピン偏極は一様じゃなくて、分布 (方位角依存、ラピディティ依存、...) を持つ
- localな渦度の源は何？ ⇒ たくさんある
代表例: 楕円フローによる渦度 (ほかの例: ジェット、非対称衝突、高次フロー、...)



4重極的な縦偏極 P_z [STAR (2019)]



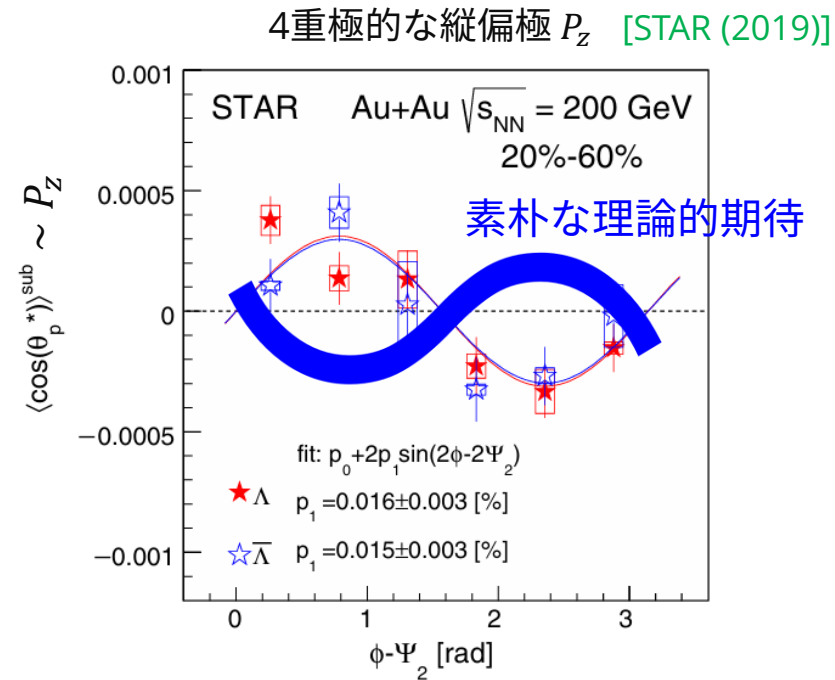
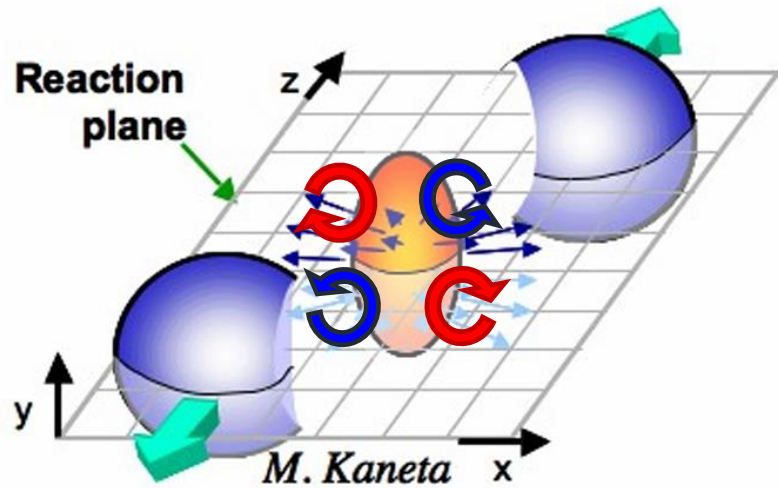
発展(1/3): local \wedge 偏極の “spin puzzle”

- Localなスピン偏極の実験結果が謎

発展(1/3): local Λ 偏極の “spin puzzle”

- Localなスピン偏極の実験結果が謎

⇐ よくよく見ると符号が変！ 素朴には、 $E \rightarrow E - \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{s}$ だから $\boldsymbol{\omega} \parallel \boldsymbol{s}$



- 少なくとも、素朴なスピン渦度結合だけでは説明ができない

⇒ “spin puzzle” (“sign problem”とか“spin sign puzzle”などとも)

発展(2/3): local \wedge 偏極の “spin puzzle” の理論

- いろいろな理論的な提案がある (Feed down効果、サイドジャンプ、...)
- 有力候補: shear induced spin polarization
= ずり変形 (shear) によるスピン偏極

[Fu et al. (2021)] [Becattini et al. (2021)]

cf. 弾性体などのstrain induced spin polarizationの流体版

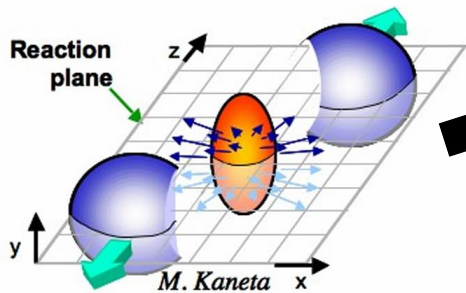
発展(2/3): local \wedge 偏極の “spin puzzle” の理論

- いろんな理論的な提案がある (Feed down効果、サイドジャンプ、...)
- 有力候補: shear induced spin polarization
= ずり変形 (shear) によるスピン偏極

[Fu et al. (2021)] [Becattini et al. (2021)]

cf. 弾性体などのstrain induced spin polarizationの流体版

楕円フローによる勾配



渦度しかない (寄与しない)

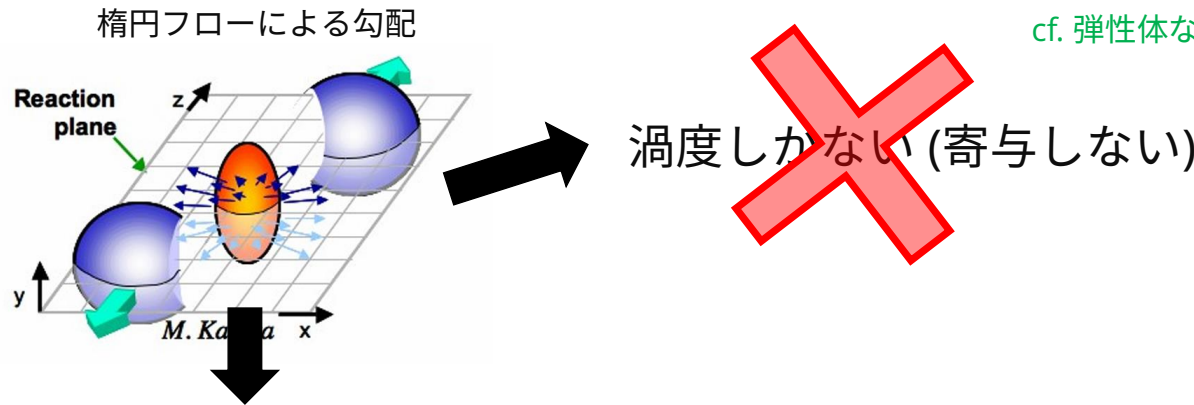
M. Kaneta

発展(2/3): local Λ 偏極の “spin puzzle” の理論

- いろんな理論的な提案がある (Feed down効果、サイドジャンプ、...)
- 有力候補: shear induced spin polarization
= ずり変形 (shear) によるスピン偏極

[Fu et al. (2021)] [Becattini et al. (2021)]

cf. 弾性体などのstrain induced spin polarizationの流体版



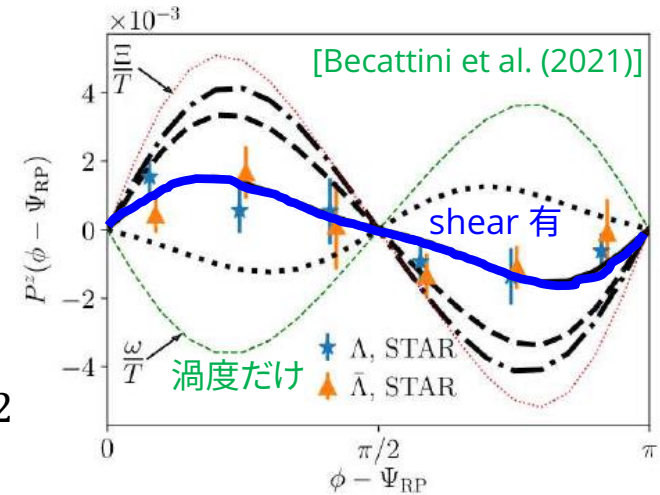
勾配は、複数の独立成分を一般に持つ

• 例: 速度勾配:

$$\uparrow\uparrow \quad \leftarrow\leftarrow \quad \uparrow\uparrow \quad \rightarrow\rightarrow$$

$$\partial_x v_y = (\partial_x v_y - \partial_y v_x)/2 + (\partial_x v_y + \partial_y v_x)/2$$

反対称部分 ~ rot v = 渦度 対称部分 = ずり変形 (shear)



- 独立成分に対応した寄与が原理的には存在

⇒ スピン偏極 = 渦度 + ずり (+ その他: 温度勾配、バリオン密度勾配、...)

注: 対称性・熱力学・パワー勘定などから寄与が消えることもある

[Becattini (2012)]

例: 大域熱平衡ではずりは消える ⇒ 「大域熱平衡を仮定する」と渦度だけがスピン偏極に寄与

発展(3/3): 別の"spin puzzle" = ベクター中間子のglobalスピン偏極

- 実はglobalなスピンも完全に理解できていない...
 - ⇒ ベクトル中間子のglobalスピン偏極

発展(3/3): 別の"spin puzzle" = ベクトル中間子のglobalスピン偏極

- 実はglobalなスピンも完全に理解できていない...

⇒ ベクトル中間子のglobalスピン偏極

- アイデア: クォークが偏極していると、|ベクトル中間子⟩ = 特定のスピン状態はできづらく/易くなる

$$\begin{cases} |s_z = +1\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle \\ |s_z = 0\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2} \\ |s_z = -1\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle \end{cases}$$

[Liang, Wang (2005)]

⇒ Prob. ($|s_z = 0\rangle$) は、偏極があると1/3から $10^{-4}(= (1\%)^2)$ くらい下がる

期待: $\rho_{00} := \text{Prob.}(|s_z = 0\rangle)$

$$= \frac{1 - P_q P_{\bar{q}}}{3 + P_q P_{\bar{q}}} \approx \frac{1}{3} - \frac{4}{9} P_q P_{\bar{q}}$$

それぞれ
 $\omega/T \sim O(1\%)$

発展(3/3): 別の"spin puzzle" = ベクトル中間子のglobalスピンの偏極

- 実はglobalなスピンも完全に理解できていない...

⇒ ベクトル中間子のglobalスピン偏極

- アイデア: クォークが偏極してると、|ベクトル中間子⟩ = 特定のスピン状態はできづらく/易くなる

$$\begin{cases} |s_z = +1\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle \\ |s_z = 0\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2} \\ |s_z = -1\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle \end{cases}$$

[Liang, Wang (2005)]

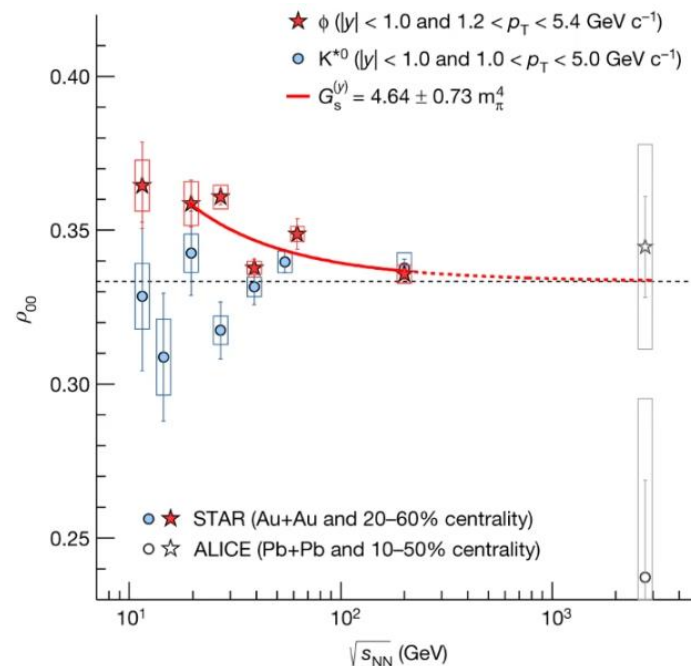
⇒ Prob. ($|s_z = 0\rangle$) は、偏極があると1/3から 10^{-4} (= (1%)²)くらい下がる

期待: $\rho_{00} := \text{Prob.}(|s_z = 0\rangle)$

$$= \frac{1 - P_q P_{\bar{q}}}{3 + P_q P_{\bar{q}}} \approx \frac{1}{3} - \frac{4}{9} P_q P_{\bar{q}}$$

それぞれ
 $\omega/T \sim O(1\%)$

- 実験結果: なぜか 10^{-1} くらい上がる
(ただし、Kは期待通り)



発展(3/3): 別の"spin puzzle" = ベクター中間子のglobalスピン偏極

理論的にはたくさんの可能性が考えられているが、謎

$$\phi\text{-meson } \rho_{00} \approx \frac{1}{3} + C_{\Lambda} + C_B + C_S + C_F + C_L + C_H + C_{\phi} + C_g$$

Physics Mechanisms	ρ_{00}
c_{Λ} : Quark coalescence + vorticity ^[1]	$< 1/3$, magnitude $\sim 10^{-4}$
c_B : Quark coalescence + EM-field ^[1]	$> 1/3$, magnitude $\sim 10^{-4}$
c_S : Medium induced vector meson spectrum splitting ^[2]	$> \text{ or } < 1/3$, magnitude unclear
c_F : Quark fragmentation ^[3]	$> 1/3$, magnitude $\sim 10^{-5}$
c_L : Local spin alignment ^[4]	$< 1/3$, magnitude $\sim 10^{-2}$
c_H : Second order hydro fields ^[5]	$> \text{ or } < 1/3$, magnitude unclear
c_{ϕ} : Vector meson field ^[6]	$> 1/3$, magnitude can fit to data
c_g : Fluctuating glasma fields ^[7]	$< 1/3$, magnitude unclear

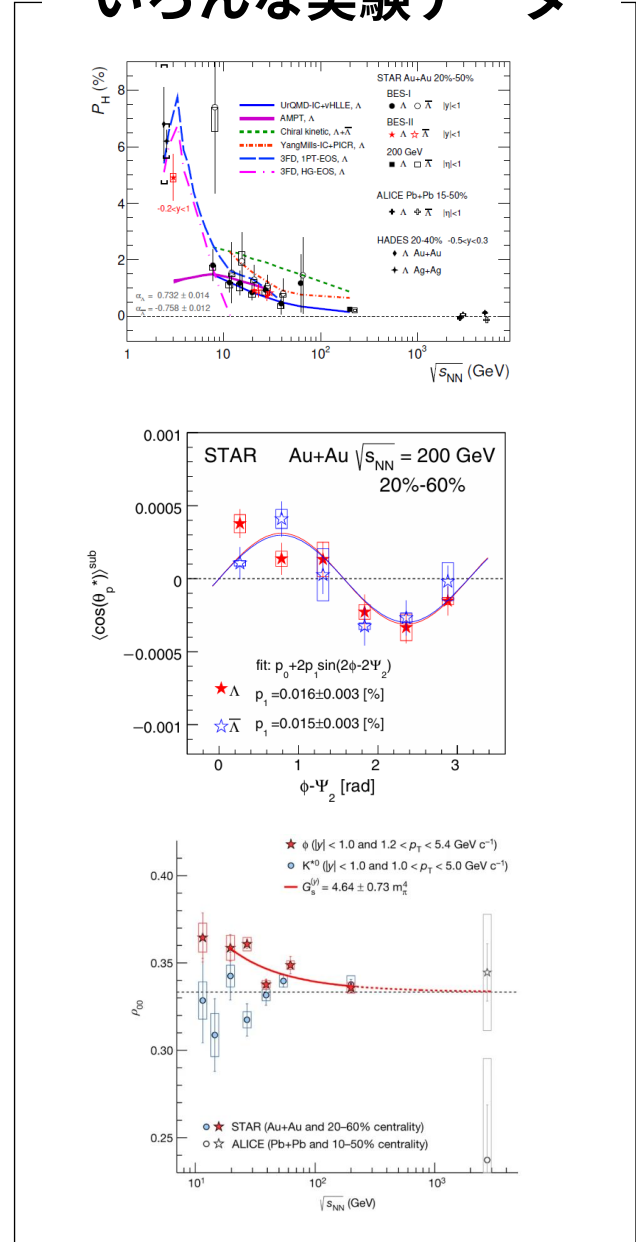
- [1]. Liang et. al., Phys. Lett. B 629, (2005);
Yang et. al., Phys. Rev. C 97, 034917 (2018);
Xia et. al., Phys. Lett. B 817, 136325 (2021);
Beccattini et. al., Phys. Rev. C 88, 034905 (2013).
- [2]. Liu and Li, arxiv:2206.11890;
Sheng et. al., Eur.Phys.J.C84, 299 (2024);
Wei and Huang, Chin.Phys.C47, 104105 (2023);
- [3]. Liang et. al., Phys. Lett. B 629, (2005).
- [4]. Xia et. al., Phys. Lett. B 817, 136325 (2021);
Gao, Phys. Rev. D 104, 076016 (2021).
- [5]. Kumar, Yang, Gubler, Phys.Rev.D109, 054038(2024);
Gao and Yang, Chin.Phys.C48, 053114 (2024);
Zhang, Huang, Becattini, Sheng, 2024.
- [6]. Sheng et. al., Phys. Rev. D 101, 096005 (2020);
Phys. Rev. D 102, 056013 (2020);
Phys Rev. Lett. 131, 042304 (2023).
- [7]. Muller and Yang, Phys. Rev. D 105, L011901 (2022);
Kumar et.al., Phy. Rev. D108, 016020 (2023).

小まとめ: 重イオン衝突における強い渦渡場の物理

最強の渦渡場



いろんな実験データ



最強の渦渡場

⇒ 非自明なスピン・カイラリティ物理

- いろんなデータが出てきたが、わからないものもいろいろとある
- 分野横断的な広がり: スピントロニクスとの接点
 e.g., 輸入: スピン渦度結合、バリオンスピンホール効果、...
 輸出: 相対論的スピン流体、shear induced spin pol.、...

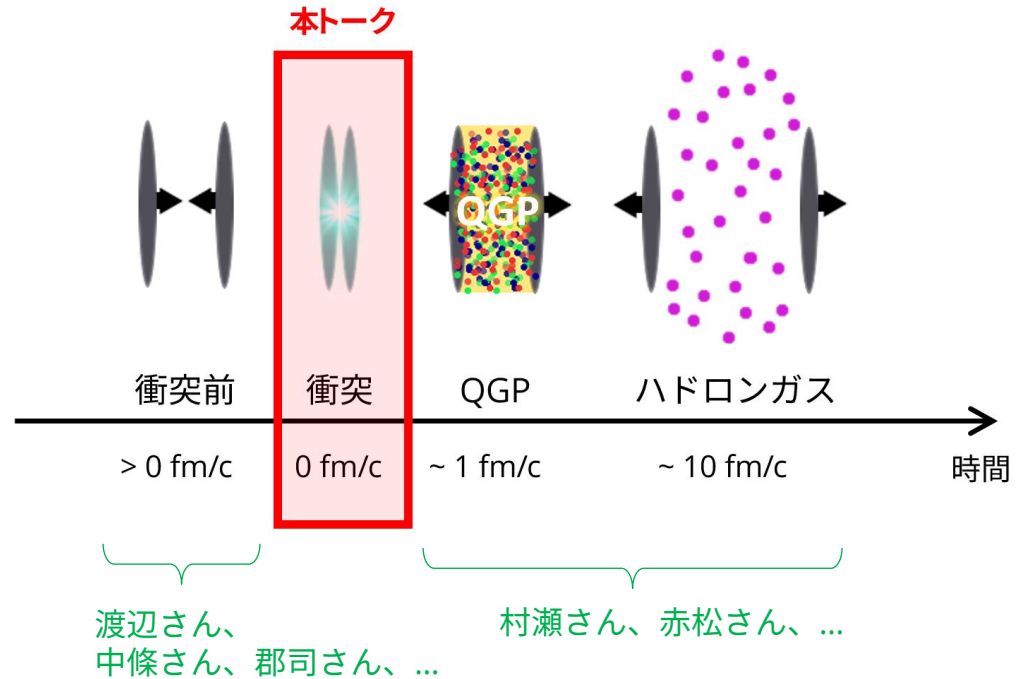
目次

1. 強いカラー場
2. 強い電磁場
3. 強い渦渡場

今日の話

目的:

重イオン衝突の初期
ダイナミクスの基礎と発展



なぜ初期ダイナミクス?:

すごい非平衡なので、すごい「極端な状況」or「強い場」が実現
⇒「極端」≠「大事じゃない/楽しくない」。むしろ逆で「大事かつ楽しい」

例1) QGP生成過程という重イオン衝突の「ブラックボックス」の解明

⇒ 強いカラー場

例2) 他の物理系では実現できない「極限状況」を作る道具 = 新物理のチャンス

⇒ 強い電磁場、強い渦渡場