

原子核衝突における非平衡物理

田屋 英俊 (慶應大)

専門: 素粒子・原子核物理 (正確には、高エネルギー原子核理論)

今日の話

「原子核衝突における非平衡物理」をレビューすることで

- 原子核衝突の物理はユニークでおもしろい、と宣伝したい
- 分野交流・議論の材料にしたい

1. 原子核衝突をなんでやってるか

2. 原子核衝突の非平衡物理

（時間/興味があれば、、、

3. 最近の話題: 原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究

4. まとめ

今日の話

「原子核衝突における非平衡物理」をレビューすることで

- 原子核衝突の物理はユニークでおもしろい、と宣伝したい
- 分野交流・議論の材料にしたい

1. 原子核衝突をなんでやってるか

2. 原子核衝突の非平衡物理

（時間/興味があれば、、、

3. 最近の話題: 原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究

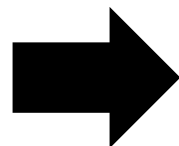
4. まとめ

Q: 物質を「XXX」すると何が起こるか？

(XXX = 温度、密度、電磁場、...)



普通の状況



外部環境下



- 誰しもが思う疑問だが「XXX」が“普通”のスケールของときはよくわかっている
(例: 水は100度で沸騰して気化)

Q: 物質を「XXX」すると何が起こるか？

(XXX = 温度、密度、電磁場、...)



- 誰しもが思う疑問だが「XXX」が“普通”のスケールของときはよくわかっている
(例: 水は100度で沸騰して気化)
- 「XXX」のスケールをめちゃくちゃ大きくすると？ ⇒ **極限環境の物理**
 - **未解明問題**: 単純な外挿でなく、非自明なことが起こる (例: 水は0(1万度)でプラズマ化)
 - 単なる学術的な課題でなくて、**現象論的にも、宇宙の始まり/今/終わりの理解に不可欠** (例: 中性子星 (超高密度)、初期宇宙 (超高温)、...)
- そういう極限状況では、ミクロな自由度である素粒子が顕在化 (素粒子の多体問題)

⇒ **素粒子・原子核物理屋の出番**

現在の理解

電磁気学 \approx 量子電磁力学 (QED) の類似物

電子・光子の類似物

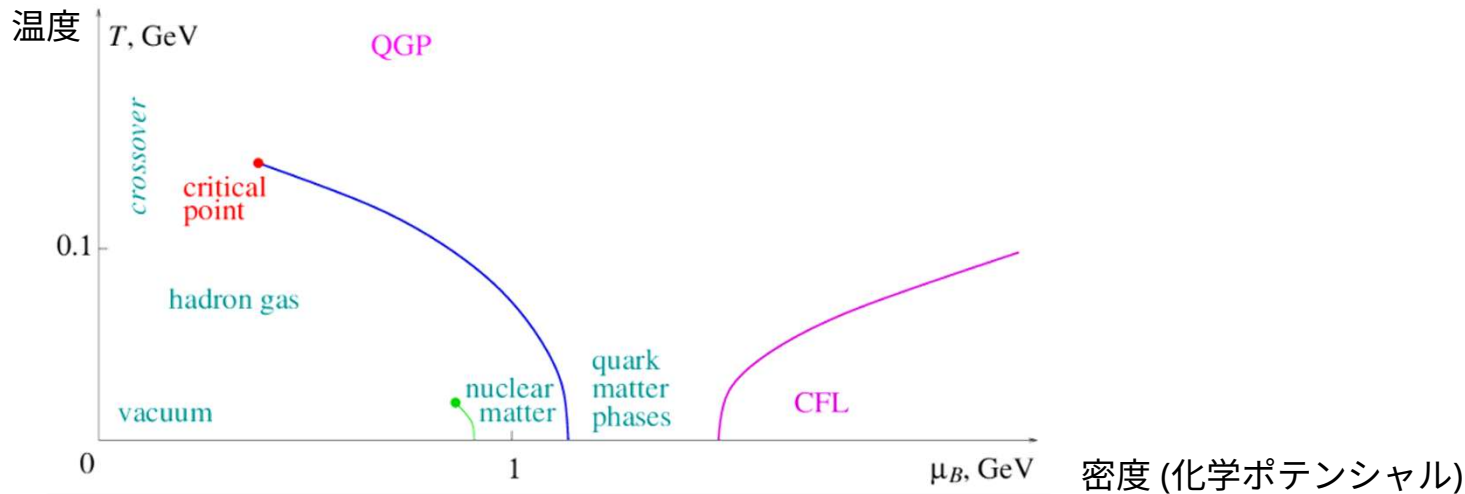
- 物質を構成する基本粒子 = クォーク・グルーオン ← 量子色力学 (QCD) が支配
- よって、QCDを解けば良いだけだが、これはめっちゃ難しい (cf. ミレニアム問題)
- しかし、有効模型や限られたパラメタ領域では第一原理計算できる (格子QCD)

現在の理解

電磁気学 \approx 量子電磁力学 (QED) の類似物

電子・光子の類似物

- 物質を構成する基本粒子 = クォーク・グルーオン \leftarrow 量子色力学 (QCD) が支配
- よって、QCDを解けば良いだけだが、これはめっちゃ難しい (cf. ミレニアム問題)
しかし、有効模型や限られたパラメタ領域では第一原理計算できる (格子QCD)
- 有名な予想: QCD相図 [Stephanov (2006)]

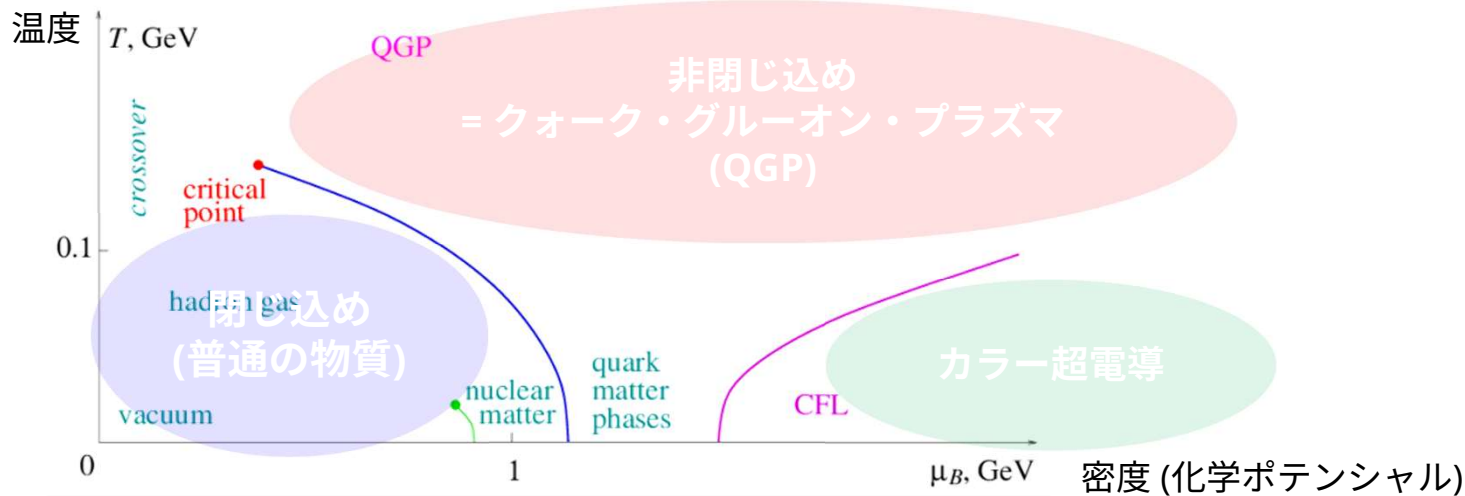


現在の理解

電磁気学 \approx 量子電磁力学 (QED) の類似物

電子・光子の類似物

- 物質を構成する基本粒子 = クォーク・グルーオン \leftarrow 量子色力学 (QCD) が支配
- よって、QCDを解けば良いだけだが、これはめっちゃ難しい (cf. ミレニアム問題)
しかし、有効模型や限られたパラメタ領域では第一原理計算できる (格子QCD)
- 有名な予想: QCD相図 [Stephanov (2006)]

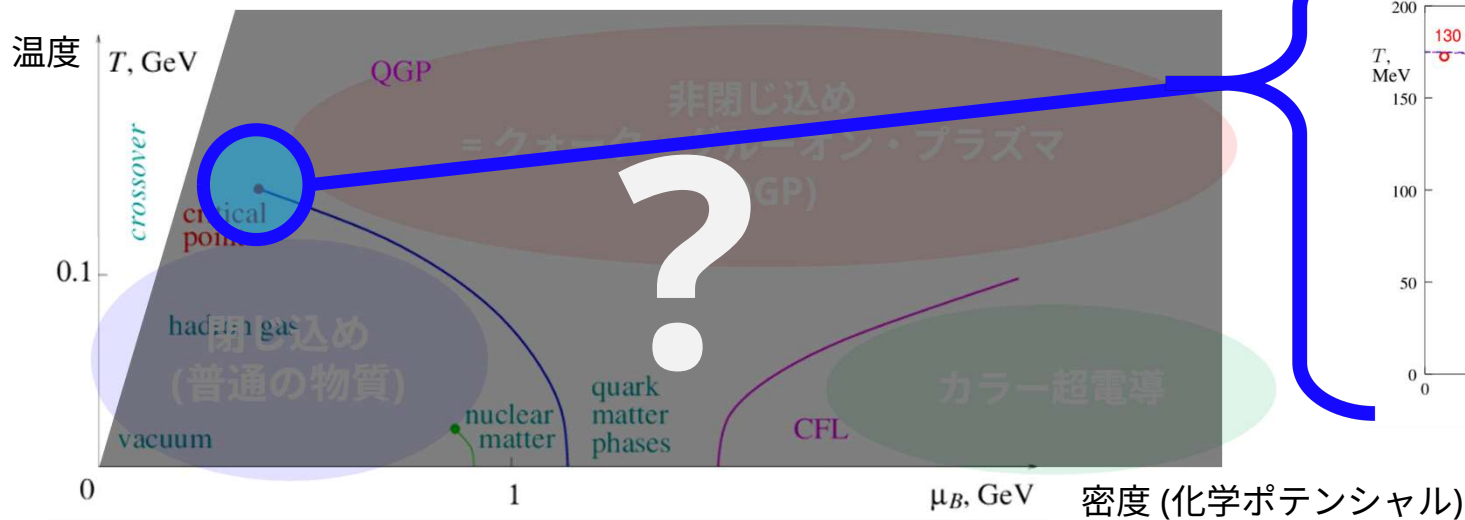


現在の理解

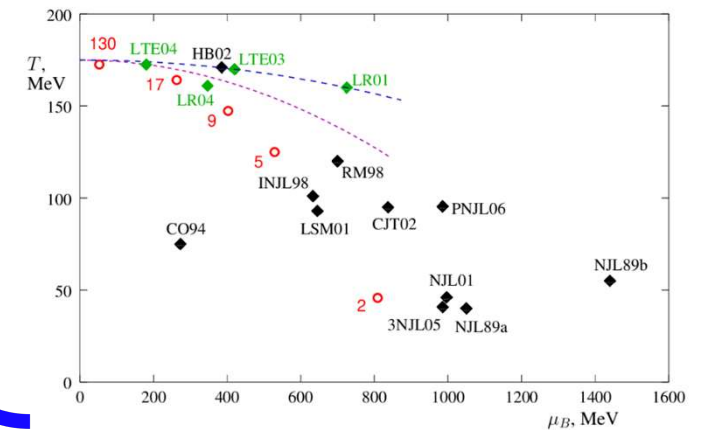
電磁気学 \approx 量子電磁力学 (QED) の類似物

電子・光子の類似物

- 物質を構成する基本粒子 = クォーク・グルーオン \leftarrow 量子色力学 (QCD) が支配
- よって、QCDを解けば良いだけだが、これはめっちゃ難しい (cf. ミレニアム問題)
しかし、有効模型や限られたパラメタ領域では第一原理計算できる (格子QCD)
- 有名な予想: QCD相図 [Stephanov (2006)]



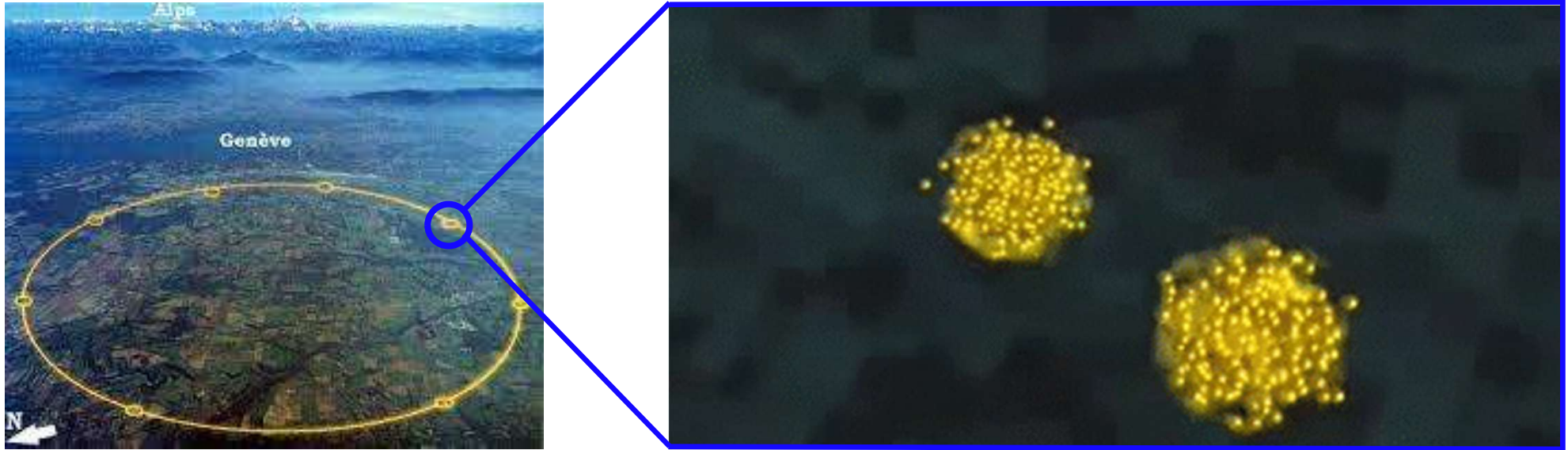
QCD臨界点の予想位置



- よくわかっているように一見見えるが、それは**誤り**
 - 格子QCDは $\mu=0$ (or $\ll T$)でしか使えない \Rightarrow それ以外の領域は謎
 - しかも、非平衡的な性質は ($\mu=0$ でも) まったくわからない (例: 粘性)
 - T - μ 以外の極限状況の解析も困難なことが多い (例: 電場、回転、...)

\therefore 理論の限界 \Rightarrow 実験的なインプットが必須

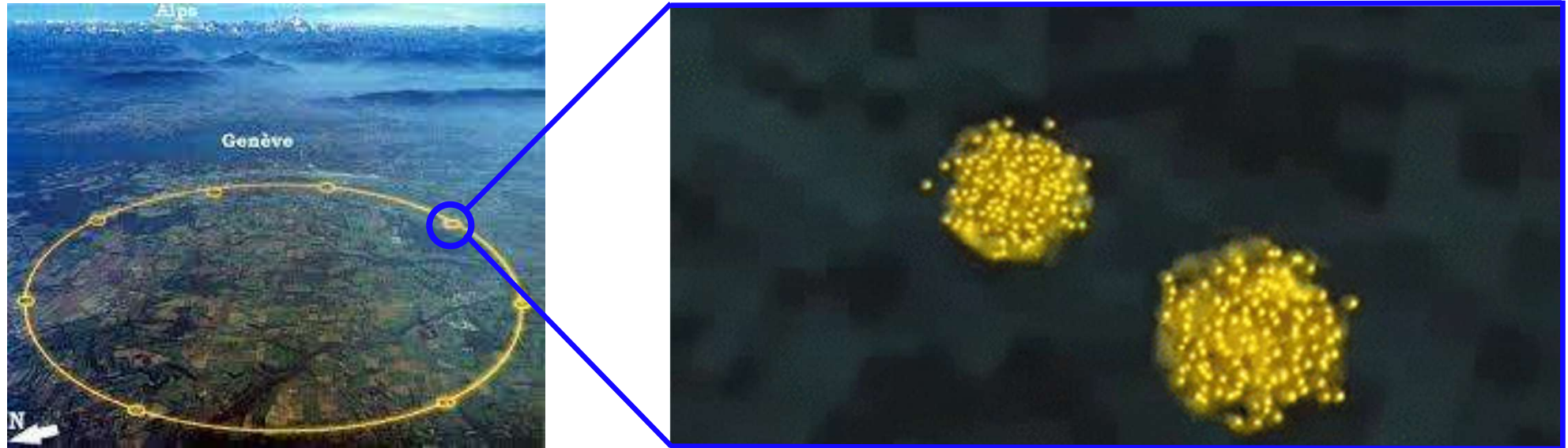
現在唯一の実験方法 = 原子核衝突



大型加速器を用いた実験: RHIC @ BNL (2000~) や LHC @ CERN (2010~)

- 原子核をぶつけ、衝突領域に超高温・高密度を過渡的に生成
- 過渡的だし、衝突途中はプローブできないので、
非平衡物理の理論が重要 (次のスライド)

現在唯一の実験方法 = 原子核衝突

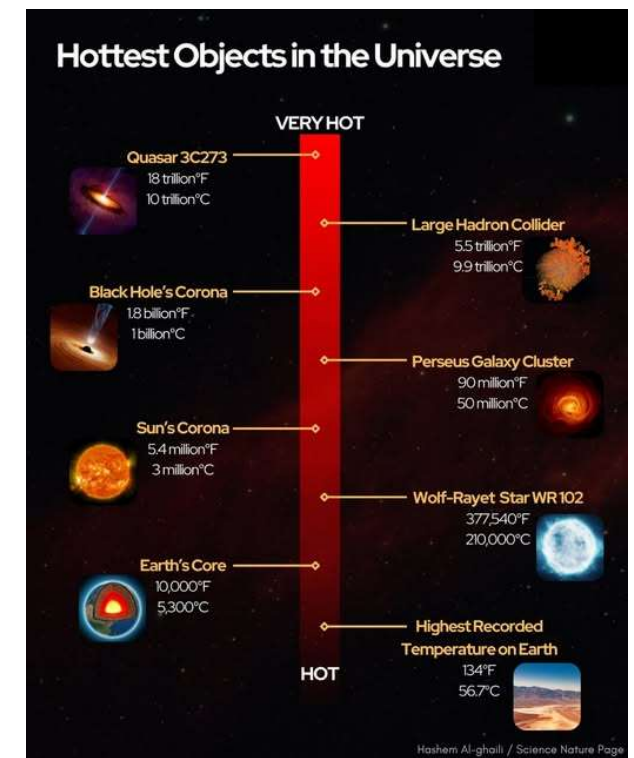


大型加速器を用いた実験: RHIC @ BNL (2000~) や LHC @ CERN (2010~)

- 原子核をぶつけ、衝突領域に超高温・高密度を過渡的に生成
- 過渡的だし、衝突途中はプローブできないので、
非平衡物理の理論が重要 (次のスライド)

これまでの結果

- ビッグバン数 μ 秒後に匹敵する超高温(数兆度)を地上で実現
- そこでQGPが生成されることを確認
- QGPの興味深い物性の発見 (今後、より詳細に)
 - 粘性がもつとも小さい液体 = ほぼ完全流体
 - 早い“熱化” = 衝突した「瞬間」から、なぜか流体的にふるまう
 - ...



今日の話

1. 原子核衝突をなんでやってるか

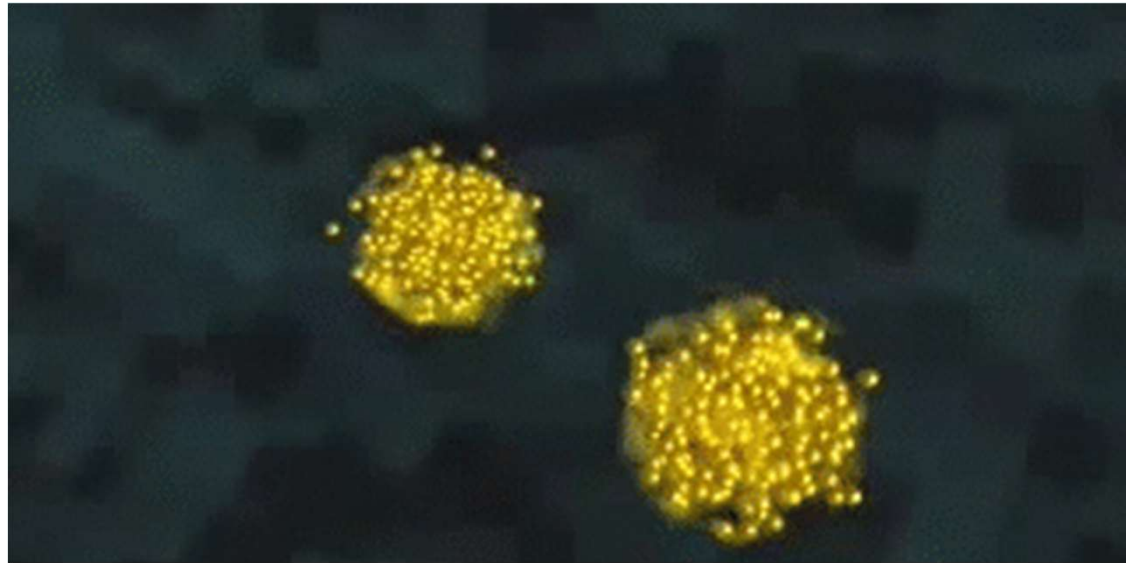
2. 原子核衝突の非平衡物理

3. 最近の話題:

原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究

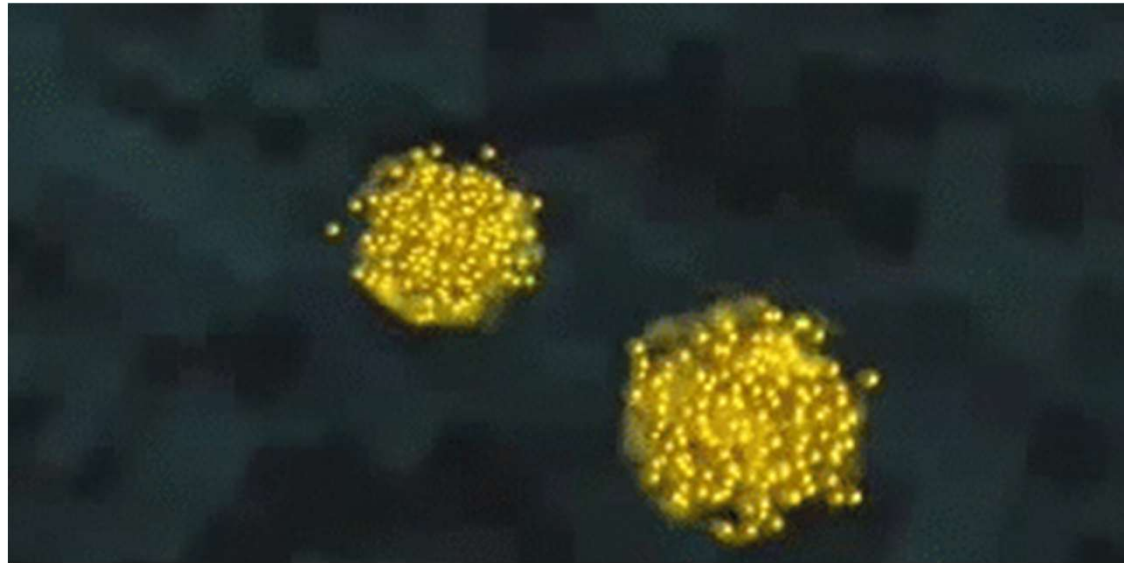
4. まとめ

原子核衝突という非平衡過程



理想: 初期値問題『 $|\psi(t)\rangle = \exp\left[-i \int_0^t H_{\text{QCD}} dt\right] |\psi(0)\rangle$ w/ $|\psi(0)\rangle = \text{原子核2個}$ 』を解く"だけ"

原子核衝突という非平衡過程



理想: 初期値問題『 $|\psi(t)\rangle = \exp\left[-i \int_0^t H_{\text{QCD}} dt\right] |\psi(0)\rangle$ w/ $|\psi(0)\rangle = \text{原子核2個}$ 』を解く"だけ"

現状: • **無理**

∵ QCD自身がむずいだけでなく、
基本自由度・スケールが時間発展で大きく変わる (し、初期条件も不定性)

⇒ 各時間の適切な自由度・スケールの有効理論を組合わせ「パッチワーク」で記述

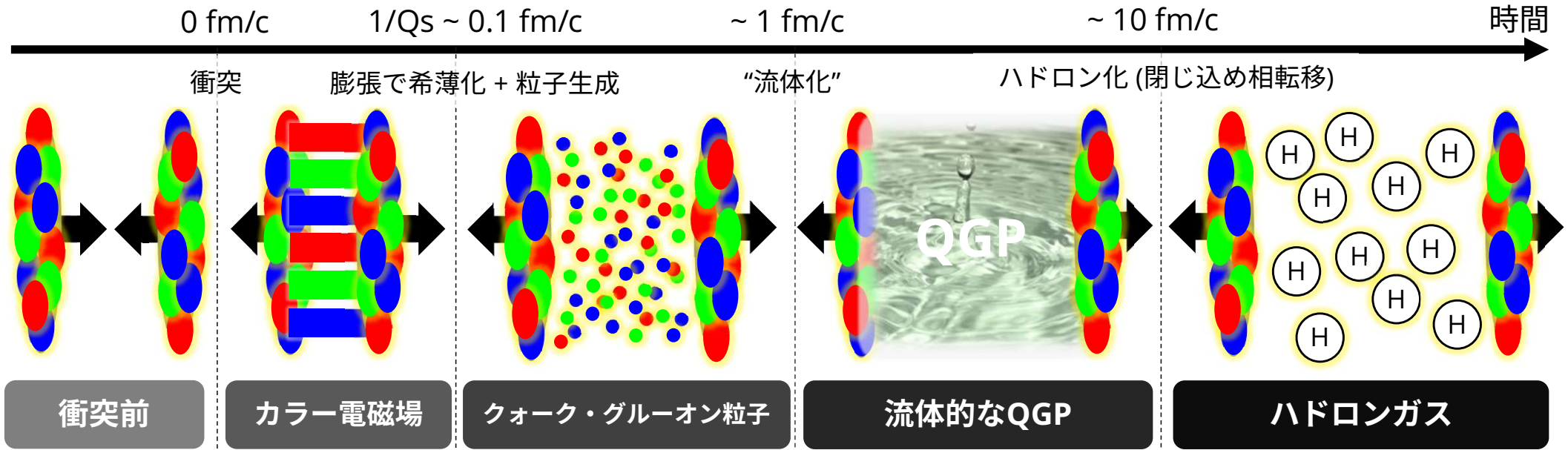
• パッチワークはそこそこうまくいっていると思っているが、**未解決問題がいろいろ残る**

• パッチワークするたびに不定パラメタが増える

⇒ QGPなどの興味ある物理パラメタの決定をしばしば妨げる

• 早い熱化などの実験事実について、万人が納得する説明はできてない

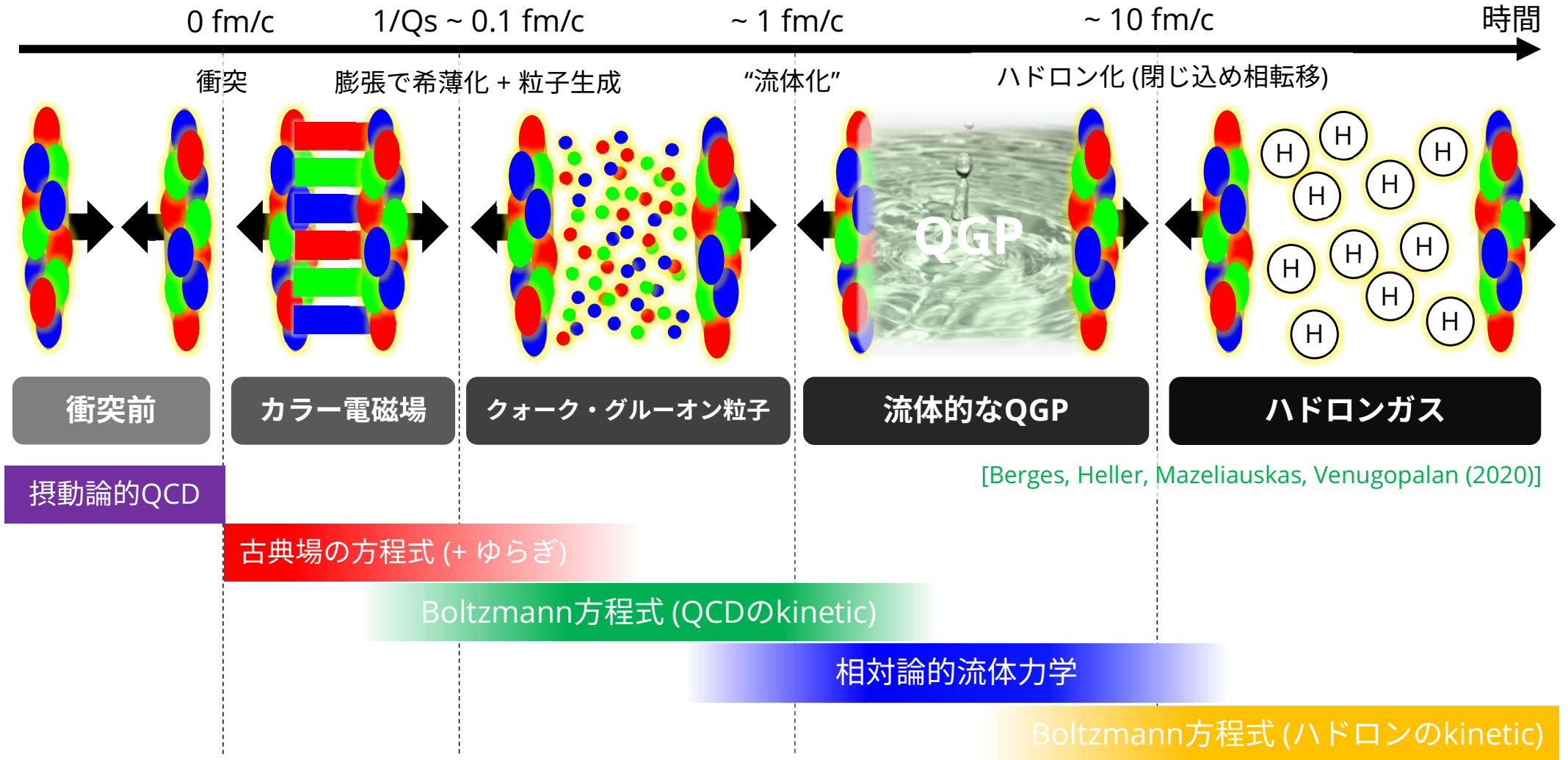
現在の理解



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

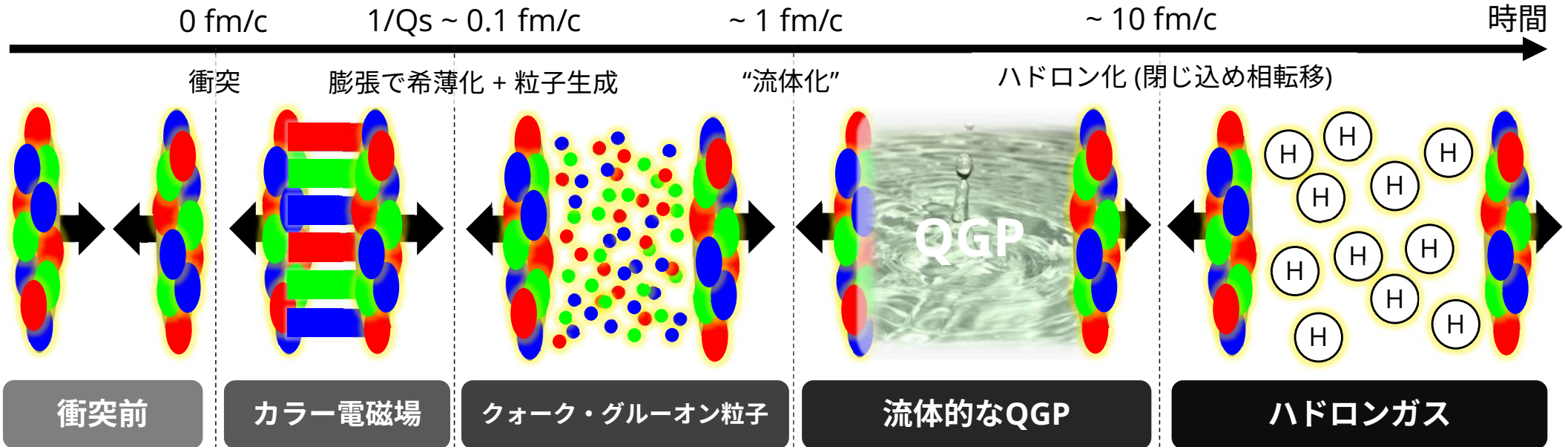
- 5つのフェーズに大別するのがひとつの見方

現在の理解



- 5つのフェーズに大別するのがひとつの見方
- それぞれの有効理論
それぞれで面白い物理・アイデア・発展がある

現在の理解



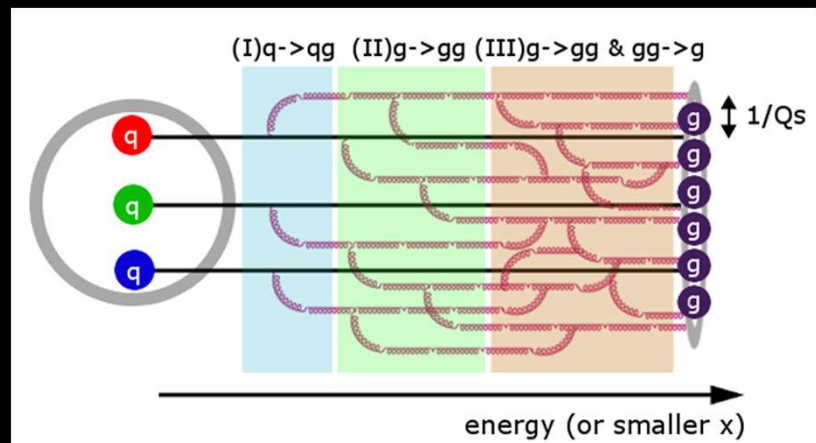
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

摂動論的QCD

古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

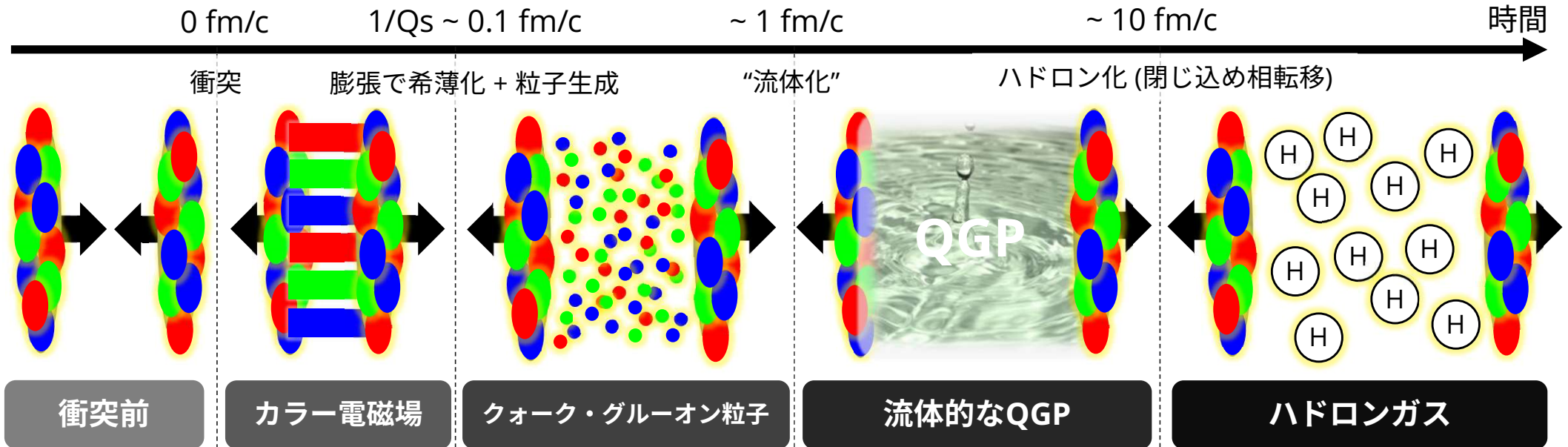
Boltzman

高エネルギー原子核 ≠ 核子の集合 but = グルーオンの塊



- グルーオン分布は実験で調べることができる (EIC実験によって今後より詳しく調べる分野の一大トピック)
 \Rightarrow 大雑把に、面密度 $\sigma \sim Q_s^2 = O((0.1 \text{ fm}^{-1})^2)$
 \sim 原子核面上にグルーオンが 1万個 くらい
- 理論的には、摂動論的QCDが有効 (グルーオンの弱結合多体系)

現在の理解



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

摂動論的QCD

古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

Boltzmann方程式 (QGP)

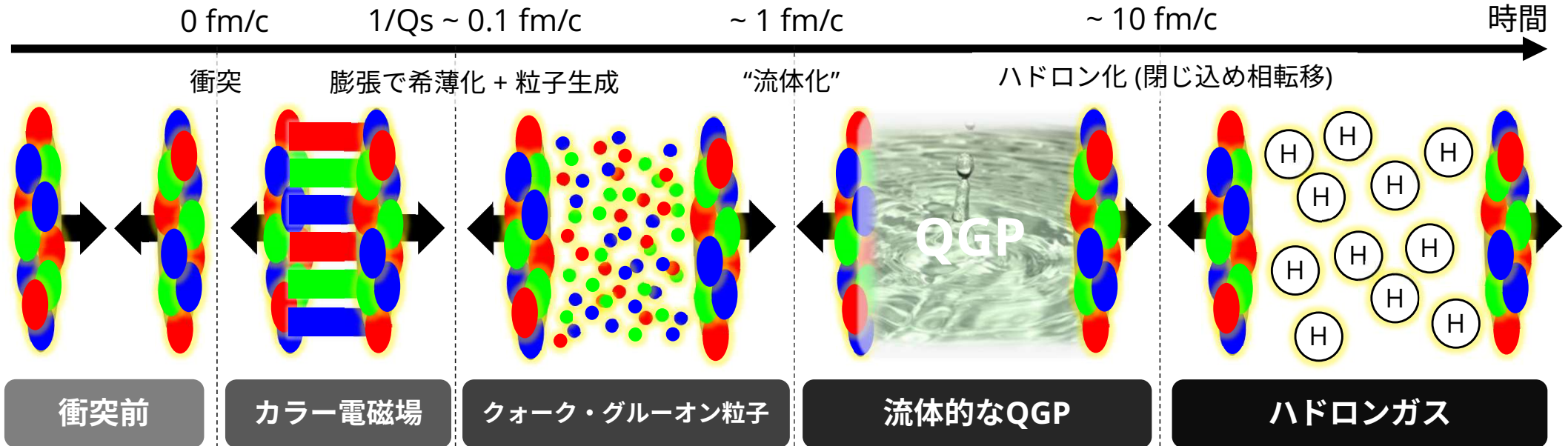
強いカラー電磁場の形成

∵ グルーオンはカラー電荷を持つ
 = 高エネルギー原子核はカラー極板みたいなもの
 ⇒ 原子核2枚でカラーコンデンサを形成

⇒ 原子核衝突の非平衡発展の肝は **「強いカラー電磁場がどう真空を励起しQGPを作るか」**

cf. 半導体 + レーザー での電子・正孔プラズマと類似

現在の理解



衝突前

カラー電磁場

クォーク・グルーオン粒子

流体的なQGP

ハドロンガス

摂動論的QCD

古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

Boltzmann方程式 (QCDのkinetic)

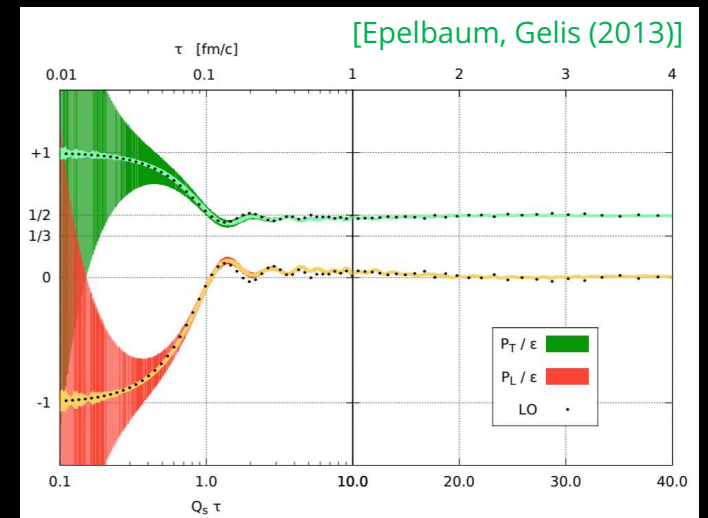
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]

強いカラー電磁場の時間発展 = Yang-Mills方程式を解く
(Maxwell方程式の親戚)

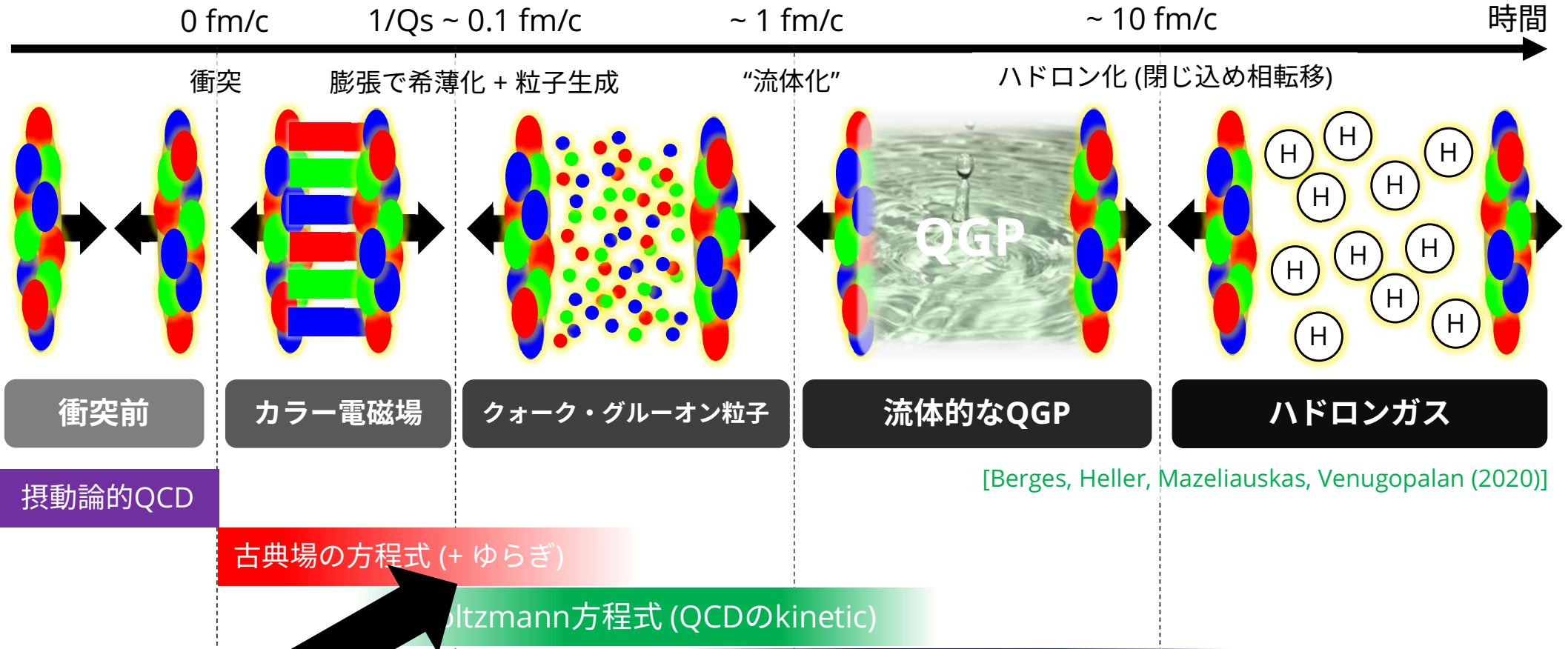
- 量子ゆらぎも入れたければ入れる (cf. 時間依存BdGに相当)
- 問題点: 古典場 (+ゆらぎ) は熱化しない [HT (2017)]

そもそも古典場描像は膨張による希薄と粒子生成で破綻

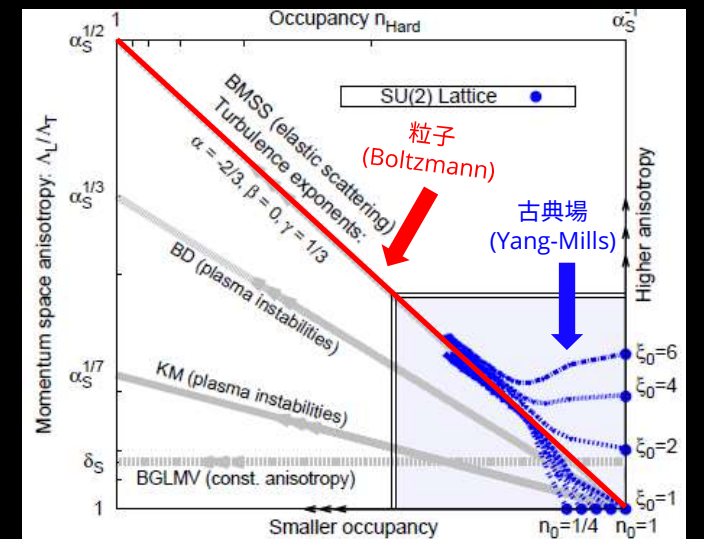
∴ 「古典場」 → 「粒子」 的な描像 (Boltzmann) に繋ぐ必要



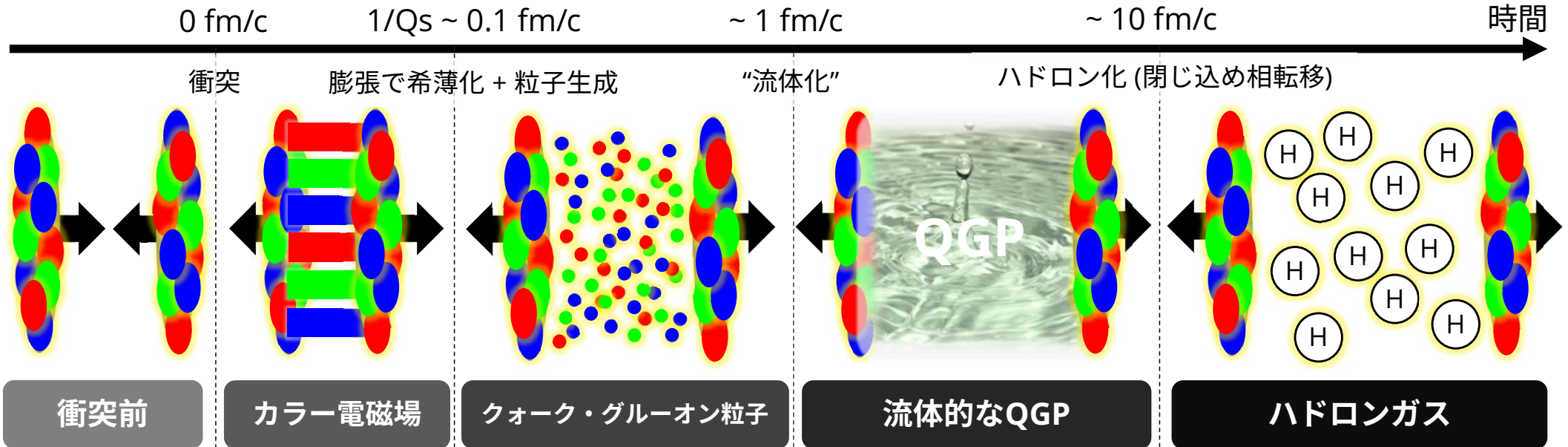
現在の理解



- 「古典」 → 「粒子」は滑らかに繋がる = 安心して繋いで良い
[Mueller, Son (2002)] [Jeon (2004)]
- ただ繋がるだけでなく **非平衡条件下で普遍的振舞い** を示す!
[Berges, Heller, Mazeliauskas, Venugopalan (2020)]
- **非平衡アトラクター**: 色んな初期条件の非平衡発展が何かに収束する
- **非熱的固定点**: 分布関数がスケーリング解に $f(t, p) = t^\alpha f_s(t^\beta p)$
(細かいこと: 指数はボトムアップ熱化という描像と整合)



現在の理解



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

摂動論的QCD

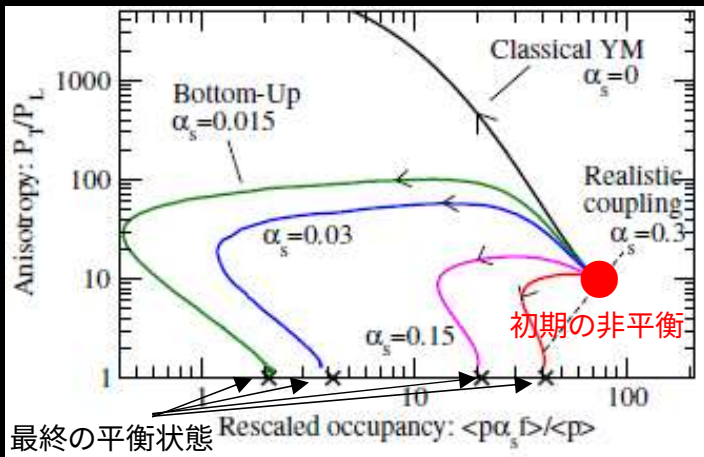
古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

Boltzmann方程式 (QCDのkinetic)

相対論的流体力学

Boltzmann方程式 (ハドロンのkinetic)

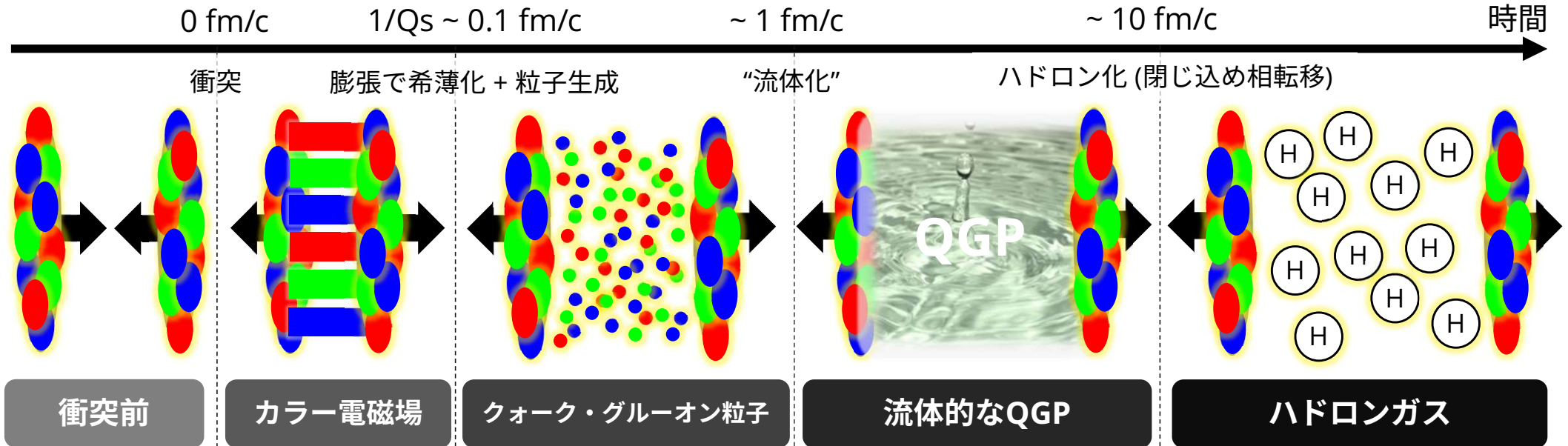
[Kurkela, Zhu (2015)]



- 熱平衡分布に落ちる様子をたしかに確認 (系が膨張しててもちゃんと熱化することは非自明)
- しかし、熱化時間が遅すぎる
流体描像が始まる時間 ~ 1 fm/c vs 熱化時間 ~ 10 fm/c

=: 早い熱化の問題 → 万人が納得してる解はないのが現状

現在の理解



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

摂動論的QCD

古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

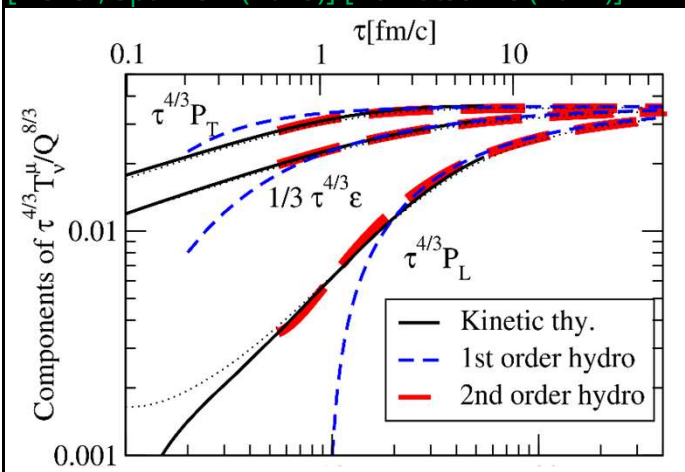
Boltzmann方程式 (QCDのkinetic)

相対論的流体力学

Boltzmann方程式 (ハドロンのkinetic)

[Kurkela, Zhu (2015)]

[Heller, Spalinski (2015)] [Romatschke (2017)]



ひとつのアイデア(観測事実): 流体化

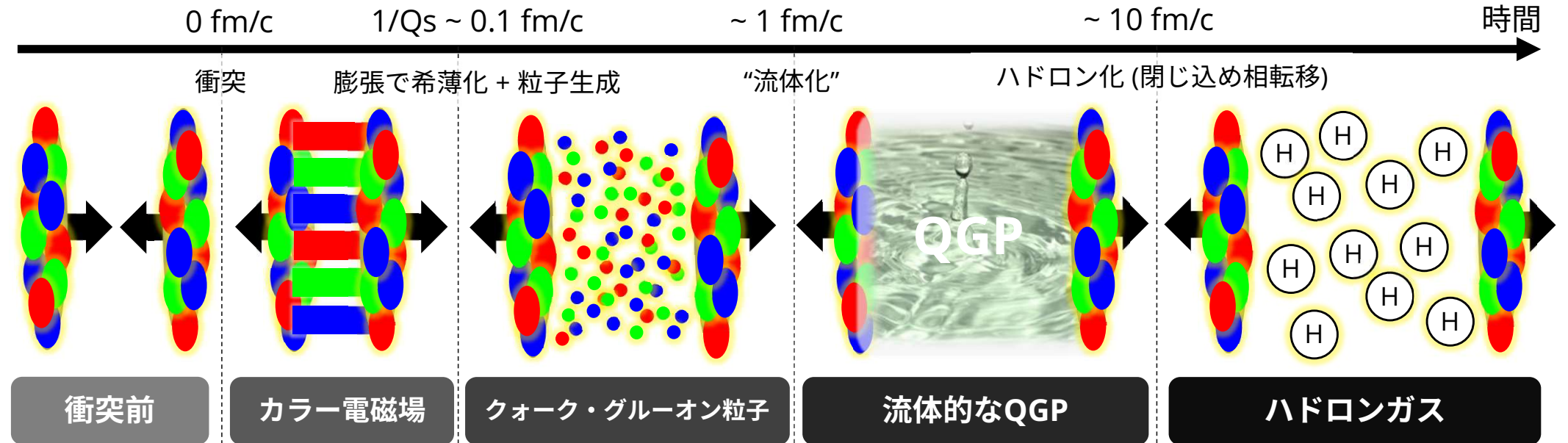
- 素朴には、流体力学 = 「局所熱平衡」まわりの微分展開 (赤外有効理論)

- だけど、**局所熱平衡は必ずしも必要ない**というのが流体化

⇒ “熱化” (キツイ条件) と “流体化” (ユルい条件) を区別

⇒ $\tau_{\text{流体化}} \ll \tau_{\text{熱化}}$ で、数値的にも $\tau_{\text{流体化}} = O(1) \text{ fm/c}$ と実験と無矛盾

現在の理解



摂動論的QCD

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

古典場の方程式 (+ ゆらぎ)

Boltzmann方程式 (QCDのkinetic)

相対論的流体力学

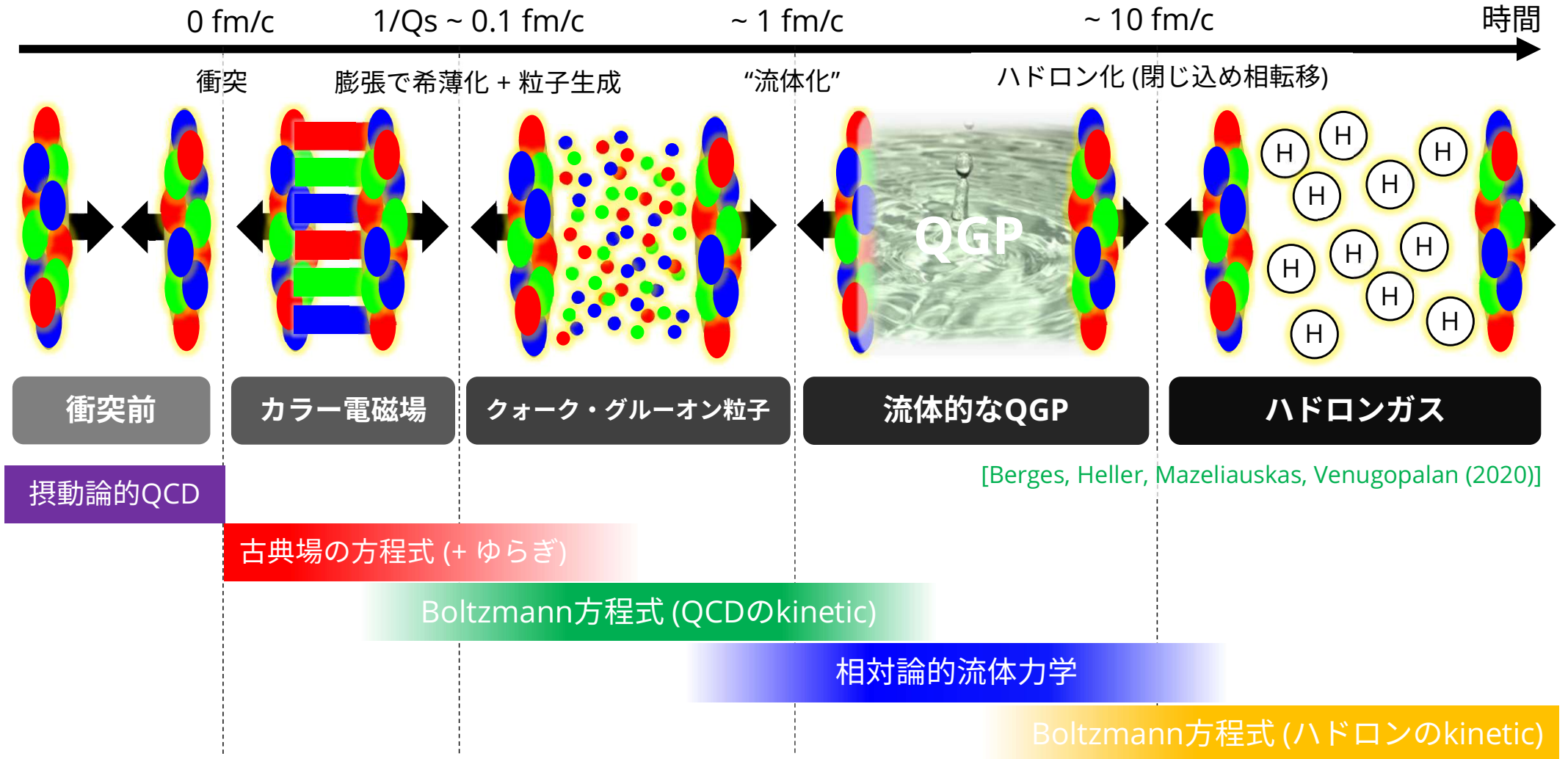
Boltzmann方程式 (ハドロン kinetic)

- いろいろと進展はあるが、これまでのとても非平衡なフェーズと比べると割と完成されているので、詳細は省く
(最近の進展: ゆらぐ流体、短波モードの取込 (aHydro)、core-corona描像、平均場の効果...)

• ここで大事なことは:

- 早い熱化を「認め」て、流体 + ハドロン輸送模型の計算をすると、
 - いろんな物理量を再現できる = パッチワークの成功
 - 再現するのに使ったパラメタから、QGPの物性などを引き出せる

現在の理解



- 5つのフェーズに大別
- それぞれの有効理論でパッチワーク
それぞれで面白い物理・発展・分野交流がある: 非平衡アトラクター、非熱的固定点、流体化
- パッチワークはそこそこうまくいっているが、未解決問題はいろいろ残る
例: 不定性の少ない統一的枠組み、早い熱化・流体化の一般的な理解、...

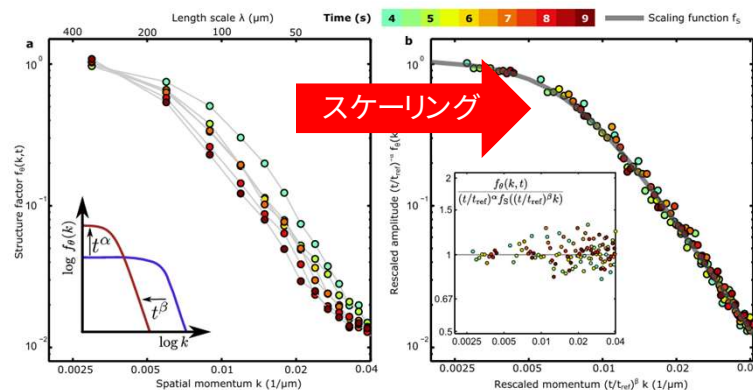
最近の話題

原子核衝突のアイデアと他分野の交流

例: 冷却原子系での非平衡アトラクターの実験

非熱的固定点

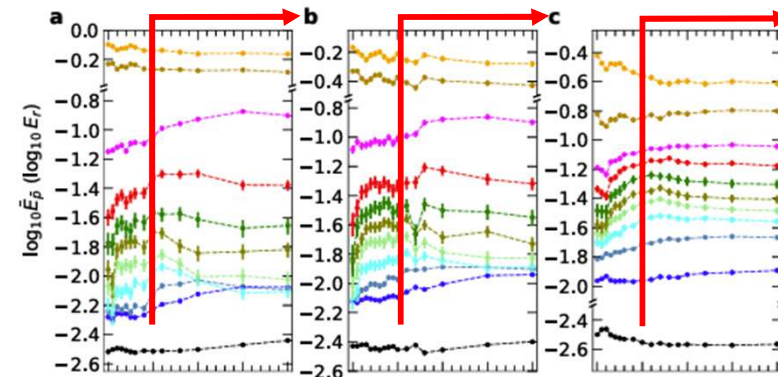
[Prufer et al. (2019)]



流体化

[Le et al. (2023)]

流体化



(* 田屋はなぜこれが流体化の証拠と思っているのかぜんぜん理解できない)

⇒ このあたりは非平衡物理の話としてちゃんと理解できると原子核もとてもうれしい
(cf. 核子-核子衝突で見られた小さな系での流体挙動)

実は宇宙で一番強い電磁場・渦渡場も生成される

⇒ 新しい非平衡物理の探求の場としておもしろい (以降のスライド)

今日の話

1. 原子核衝突をなんでやってるか

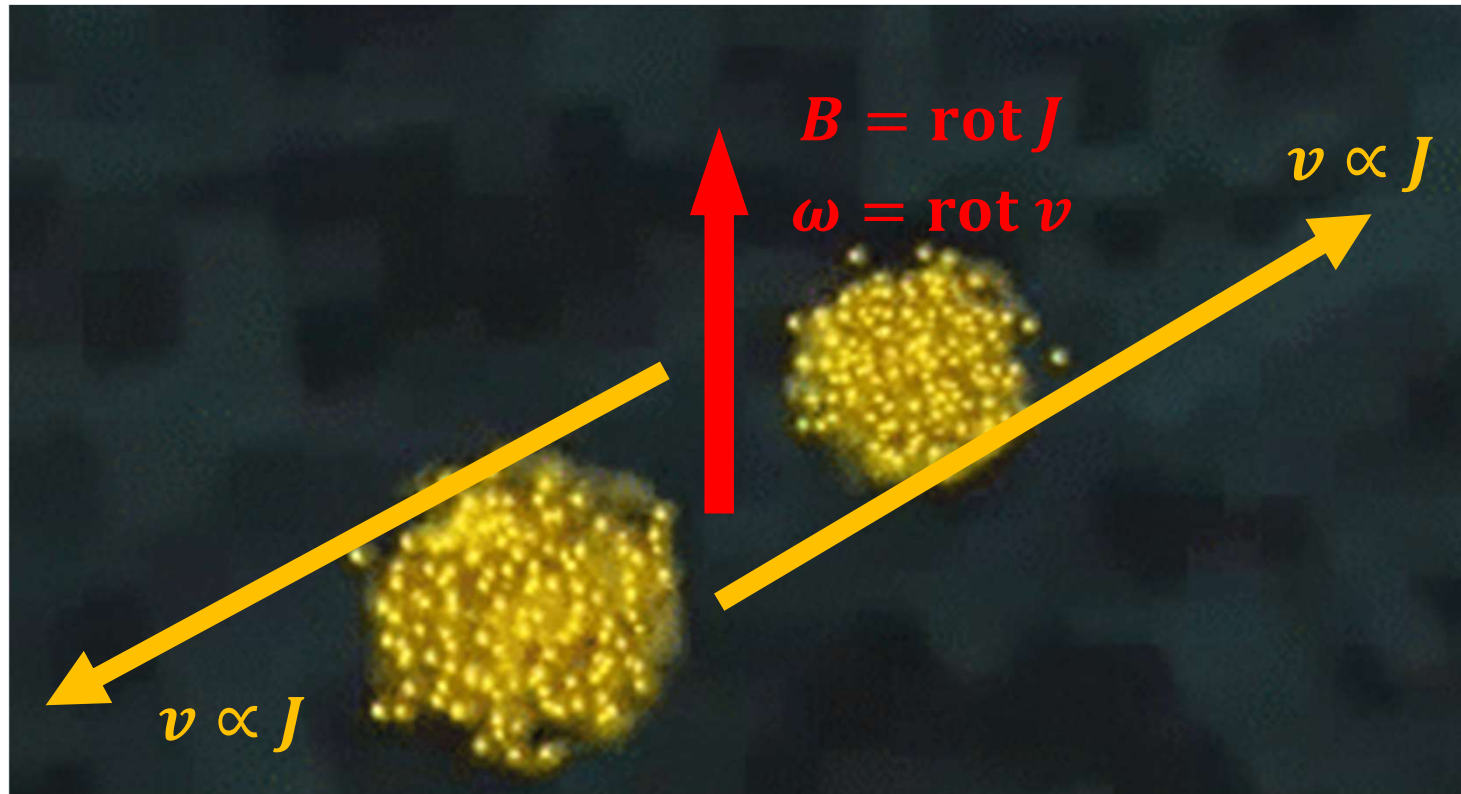
2. 原子核衝突の非平衡物理

3. 最近の話題:

原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究

4. まとめ

強い電磁場と渦渡場



高エネルギー ⇒ とても速く“回転”する速度/電流配位 ⇒ 強い渦渡場/電磁場

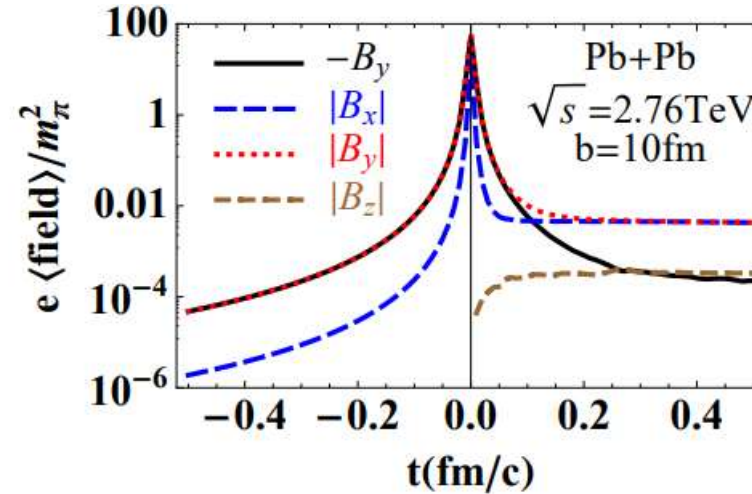
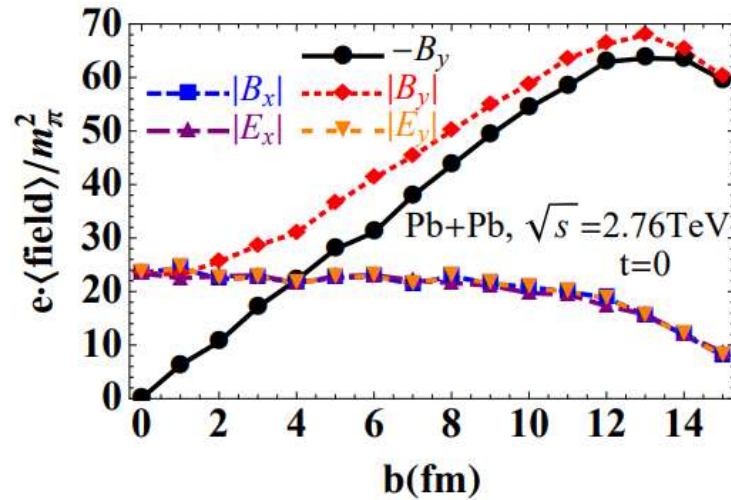
- ⇒
- 温度や密度でない「新しい極限条件」として注目
 - レーザー物理やスピントロニクスなどの学際的な交流のチャンス

強い電磁場 (1/3): どれくらいの強さ?

数値的にシミュレーション可能

[Deng, Huang (2012)]

(see also [Bzdak, Skokov (2012)] [Hattori, Huang (2016)] [HI (2024)] ...)



⇒ 宇宙最強 $eE, eB > m_\pi^2 = O((100 \text{ MeV})^2)$

LED

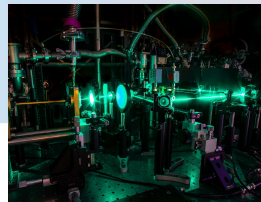
溶接

物性のTHzレーザー

ギネス世界記録

(宇宙空間で最強(?))
マグネター

原子核衝突



$eE, eB \sim (10^{-3} \text{ eV})^2$
 $\sim 10^{-5} \text{ W/cm}^2$

$\sim (10^{-1} \text{ eV})^2$
 10^6 W/cm^2

$\sim (1 \text{ eV})^2$
 10^{10} W/cm^2

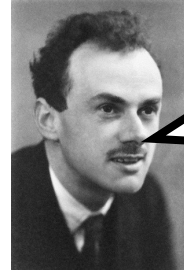
$\sim (1 \text{ keV})^2$
 10^{22} W/cm^2

$\sim (100 \text{ keV})^2$
 10^{30} W/cm^2

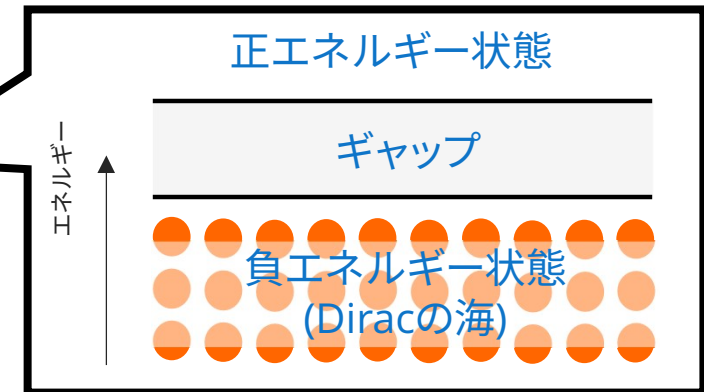
$\sim (100 \text{ MeV})^2$
 10^{42} W/cm^2

強い電磁場 (2/3): 強いと何がうれしい?

- 「最強の環境」 ⇒ 「ふつうの環境」では起きない「何か」が起こる
 - 場の強さが非線形効果を引起す
 - 物性での非線形光学と類似
 - ∴ QED真空 \simeq 物質のバンド構造



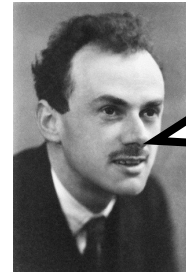
[Dirac (1930)]



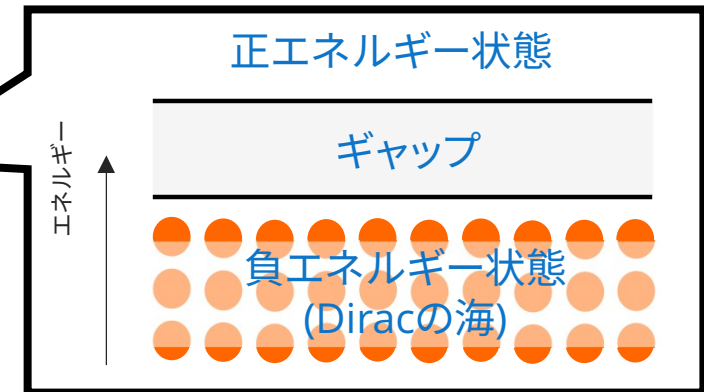
強い電磁場 (2/3): 強いと何がうれしい?

- 「最強の環境」 ⇒ 「ふつうの環境」では起きない「何か」が起こる

- 場の強さが非線形効果を引起す
- 物性での非線形光学と類似
∴ QED真空 \simeq 物質のバンド構造



[Dirac (1930)]

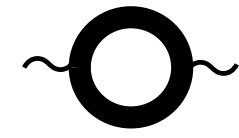
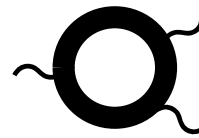
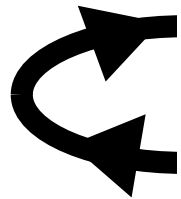


- 予想されている現象の例:

新しいQED過程

Review: [Fedotov, Ilderton, Karbstein, King, Seipt, [HT](#), Torgrimsson (2023)]

- Schwinger機構 (\leftrightarrow 絶縁破壊) • 光子分裂 (\leftrightarrow 光パラメトリック過程) • 真空複屈折 (\leftrightarrow カー効果)



QCD/ハドロン物質の光物性

Review: [Hattori, Itakura, Ozaki, (2023)]
[[HT](#) (2026)]

- ハドロンの性質の変更 • QCD相図の変更 • 異常輸送現象 (例: カイラル磁気効果)

- 現状:

- そういう現象が今見つかかり始めている (例: 光子-光子散乱、線形Breit-Wheeler過程) [ATLAS (2017)] [STAR (2021)]
- 他方、物性で非線形光学現象は、素粒子・原子核系よりもよく調べられている

⇒ 物性との交流がしばしば有用

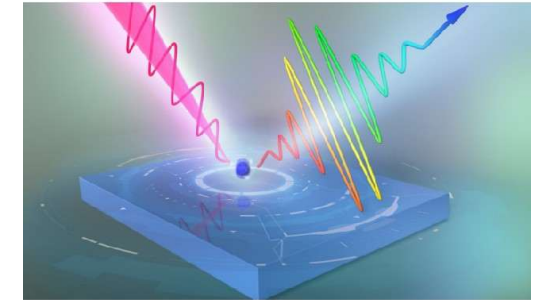
強い電磁場 (3/3): 物性 ↔ 素核の交流のチャンス

[HT, Hongo, Ikeda (2021)]

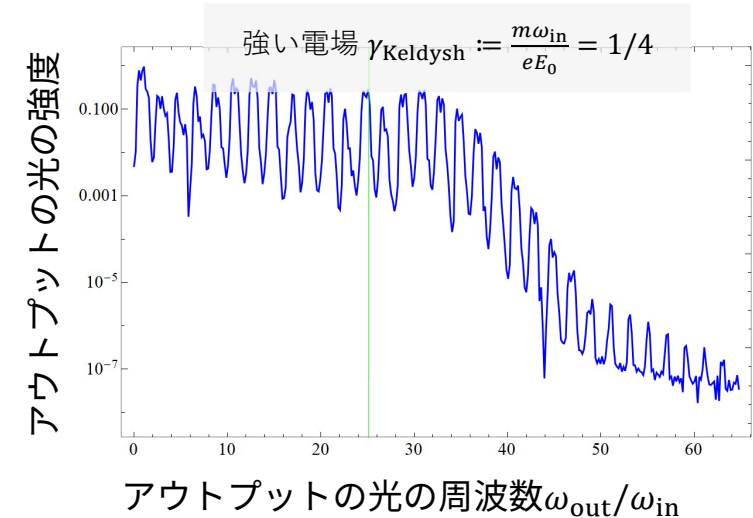
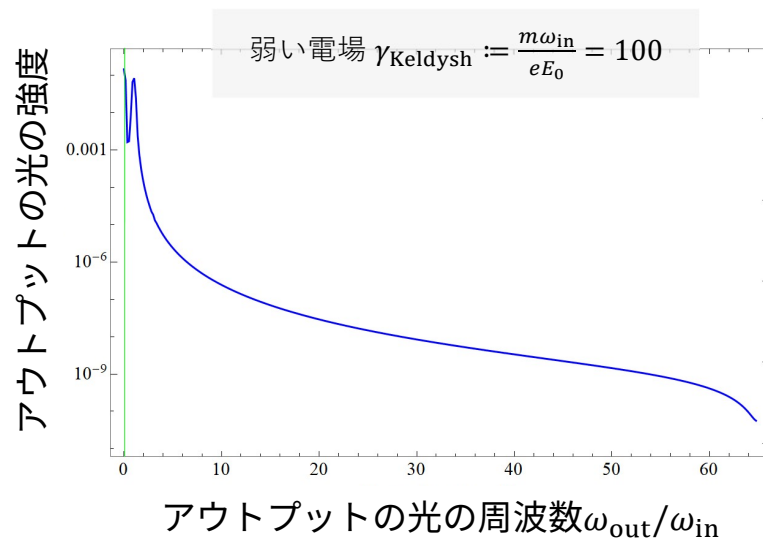
例: 真空からの高次高調波発生 (← バンド物質からの高次高調波発生への応用)

- 高次高調波発生(=周波数/波長の低い光から高い光を生む現象)自体はよく知られた現象

- ふつうは「モノ」に光を当てる
- たくさんの応用: 超高速測定、レーザーポインター、...
- 2023年のノーベル物理学賞

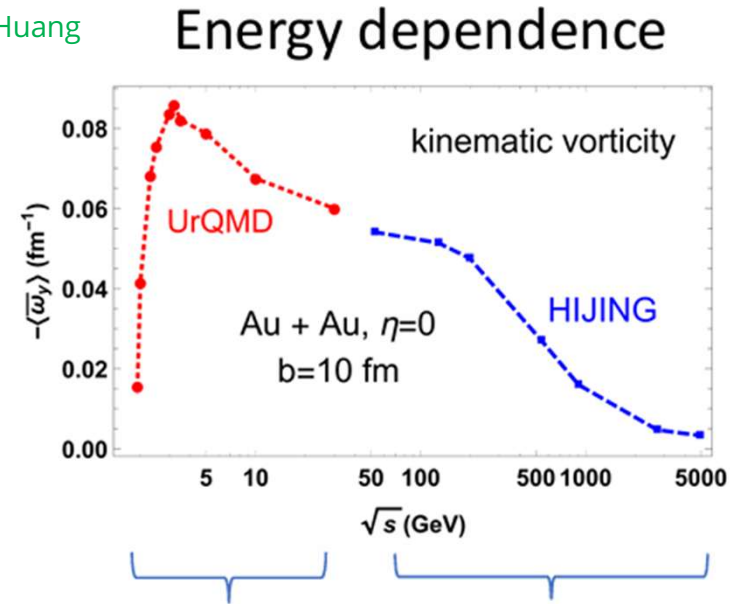
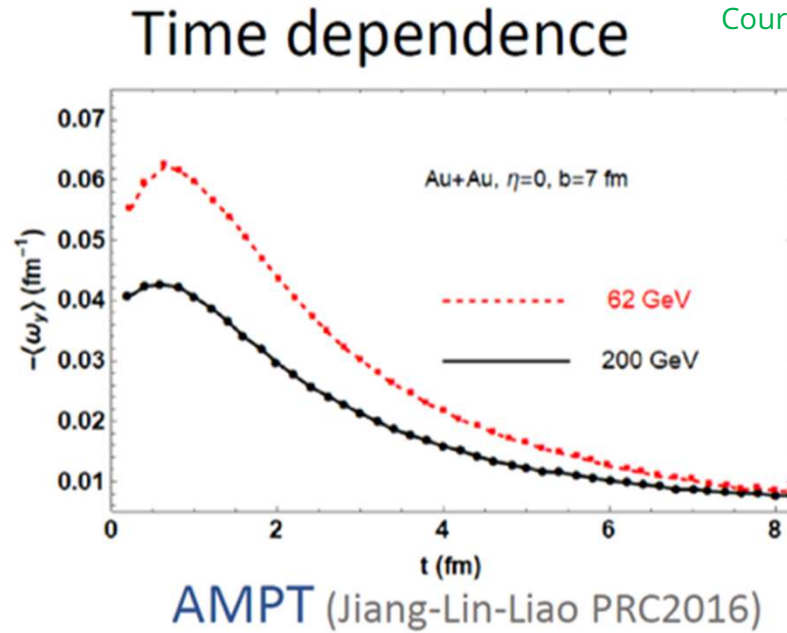


- 明らかにしたこと: **モノがない「真空」でも強い光を当てると高次高調波発生する!**
 - 直感的理由: 真空はバンド物質のような構造を持っているから (← 真面目には、粒子生成時のStueckelbergの量子干渉効果が本質)
 - 真空による高次高調波スペクトルの理論的予言 (← Dirac方程式を周期電場の背景場中で解いた結果)



強い渦渡場 (1/3): どれくらいの強さ?

これも数値的にシミュレーション可能



Deng-XGH-Ma-Zhang PRC2020 Deng-XGH PRC2016

⇒ これも宇宙最強 $\omega \sim 10^{21}$ Hz



銀河

10^{-1} Hz



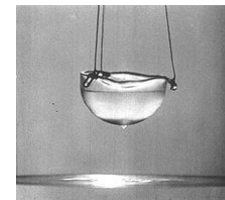
台風

10^{-1} Hz



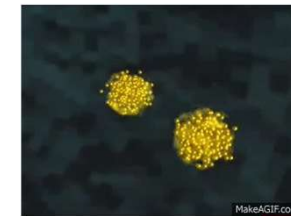
洗濯機

10^{+2} Hz



超流動

10^{+7} Hz



原子核衝突

10^{+21} Hz

[Gomez et al. (2014)]

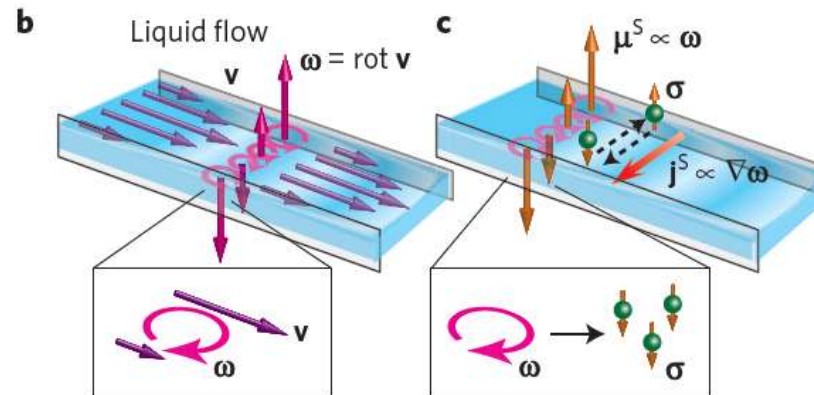
∴ (強い電磁場と同様に)

「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

強い渦渡場 (2/3): 何が起こりそうか?

いろいろある

- スピン-渦渡場結合 $E \rightarrow E - \omega \cdot s$ によるスピン偏極 [Liang, Wang (2004)]
 ⇐ 物性のスピントロニクスで観測済の現象の輸入
 [Takahashi et al. (2015)]

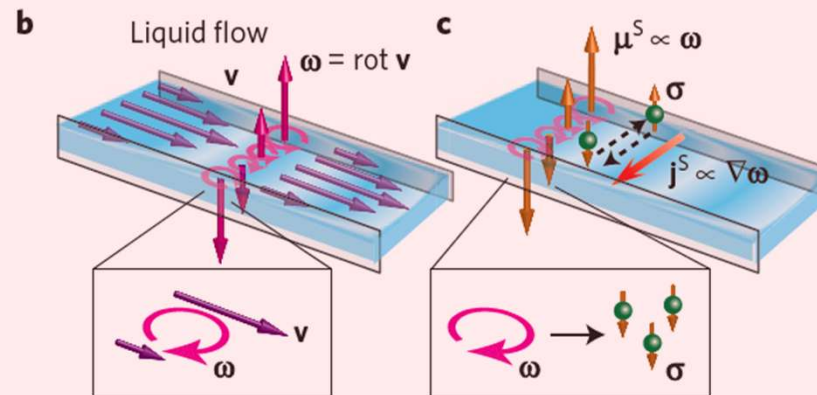


- 異常輸送現象: カイラル渦度効果 $J \propto \omega$ ⇐ カイラル磁気効果 $J \propto B$ の渦版
- QCD相図への影響
- ...

強い渦渡場 (2/3): 何が起こりそうか？

いろいろある

- スピン-渦渡場結合 $E \rightarrow E - \omega \cdot s$ によるスピン偏極 [Liang, Wang (2004)]
 ⇐ 物性のスピントロニクスで観測済の現象の輸入
 [Takahashi et al. (2015)]

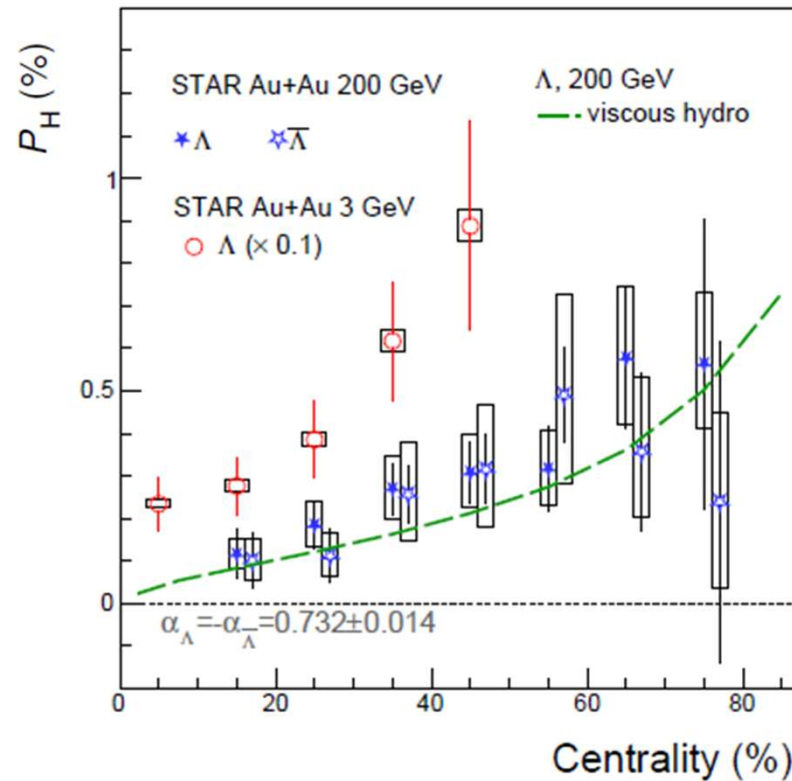


最注目

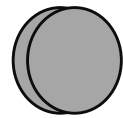
- 異常輸送現象: カイラル渦度効果 $J \propto \omega$ ⇐ カイラル磁気効果 $J \propto B$ の渦版
- QCD相図への影響
- ...

- **First result**

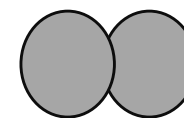
[STAR (2017)]



中心衝突 (渦度小)



周辺衝突 (渦度大)



たしかに偏極するし、理論とも一貫でうれしい
⇒ “Most vortical fluid” の実証



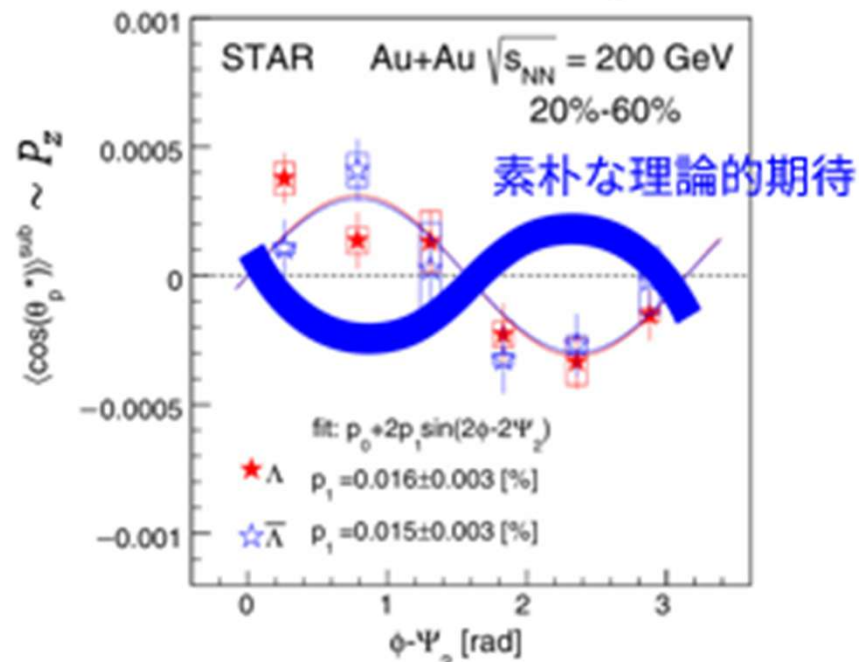
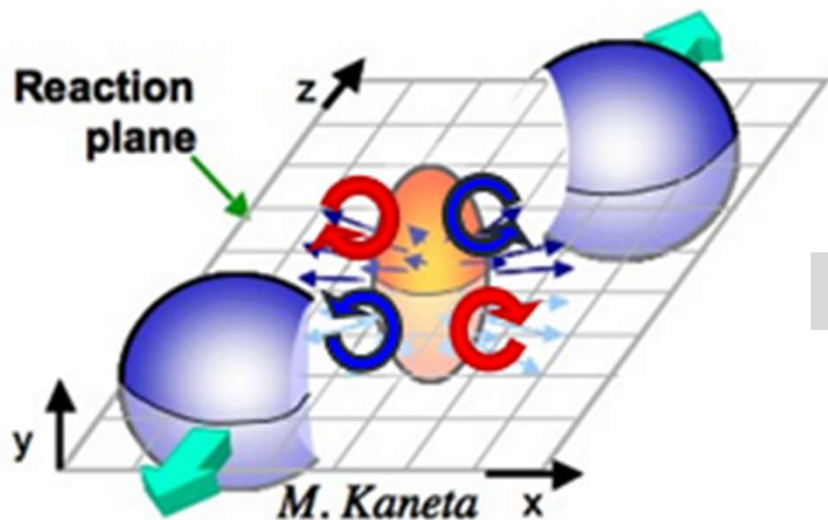
強い渦渡場 (3/3): スピン偏極の実験的観測

- しかし、詳しく調べると、ぜんぜん合わないデータが続々出てきた

例: スピン偏極「分布」の符号が合わない

Recent review [Niida, Voloshin (2024)]

4重極的な縦偏極 P_z



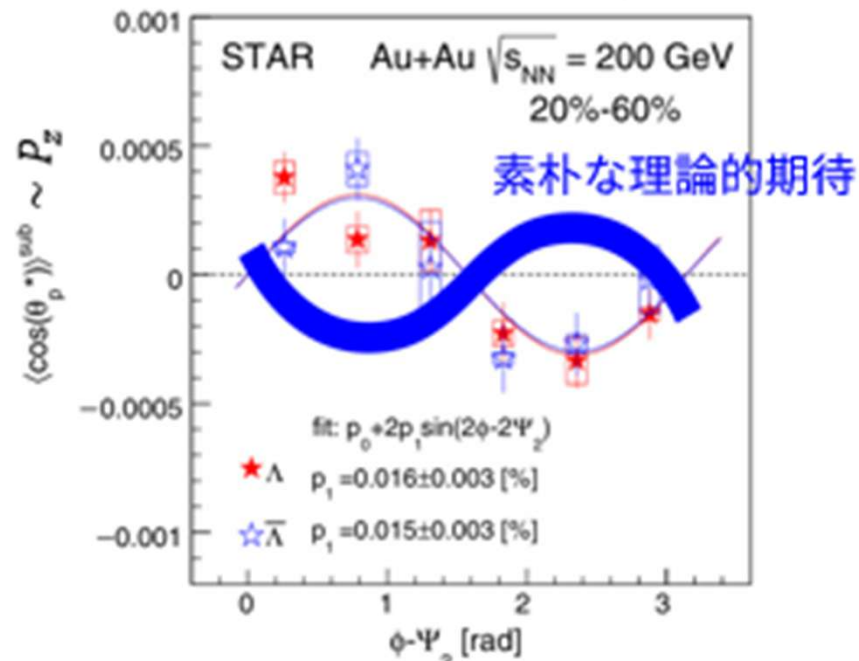
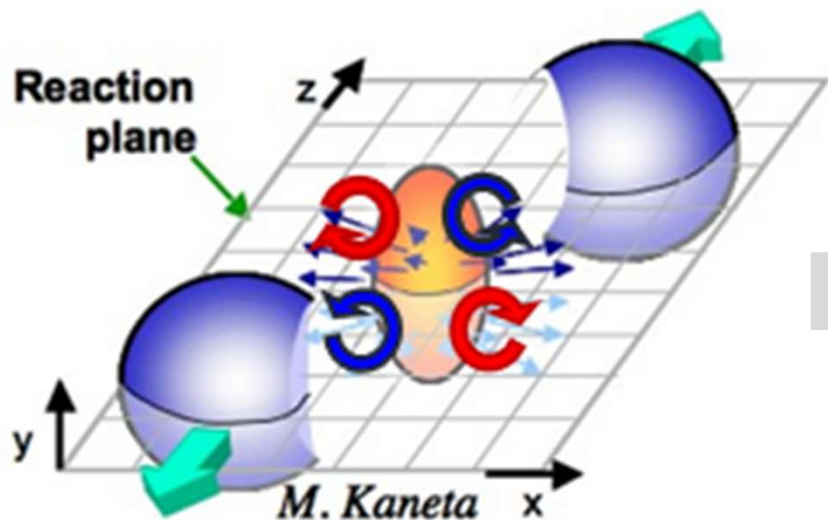
強い渦渡場 (3/3): スピン偏極の実験的観測

- しかし、詳しく調べると、ぜんぜん合わないデータが続々出てきた

例: スピン偏極「分布」の符号が合わない

Recent review [Niida, Voloshin (2024)]

4重極的な縦偏極 P_z



⇒ スピントロニクスなどのアイデアを入れながら基礎理論の整備中

例: 渦度以外のスピン偏極を入れると符号が合うかも? [Fu et al. (2021)] [Becattini et al. (2021)]

shearによるスピン偏極 (← 弾性体のstrainによるスピン偏極のアナログ)



⇐ 勾配の独立成分はrotだけじゃない: $\partial_x v_y = (\partial_x v_y - \partial_y v_x)/2 + (\partial_x v_y + \partial_y v_x)/2$

反対称部分 ~ rot v = 渦度

対称部分 = ずり変形 (shear)

(そんな感じで有用なので、何か新しいスピン偏極の種があるなら教えてほしい)

今日の話

1. 原子核衝突をなんでやってるか

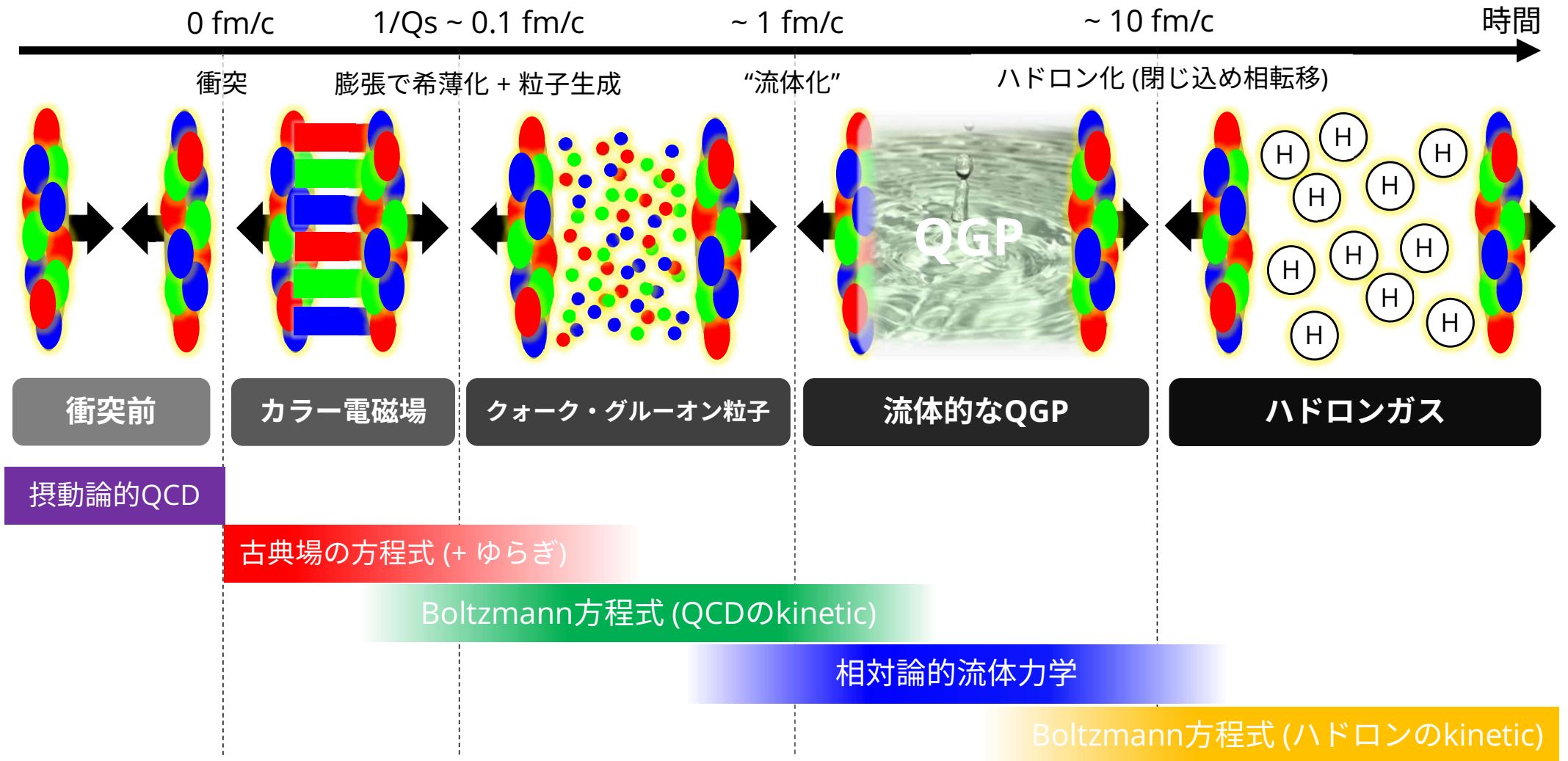
2. 原子核衝突の非平衡物理

3. 最近の話題:

原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究

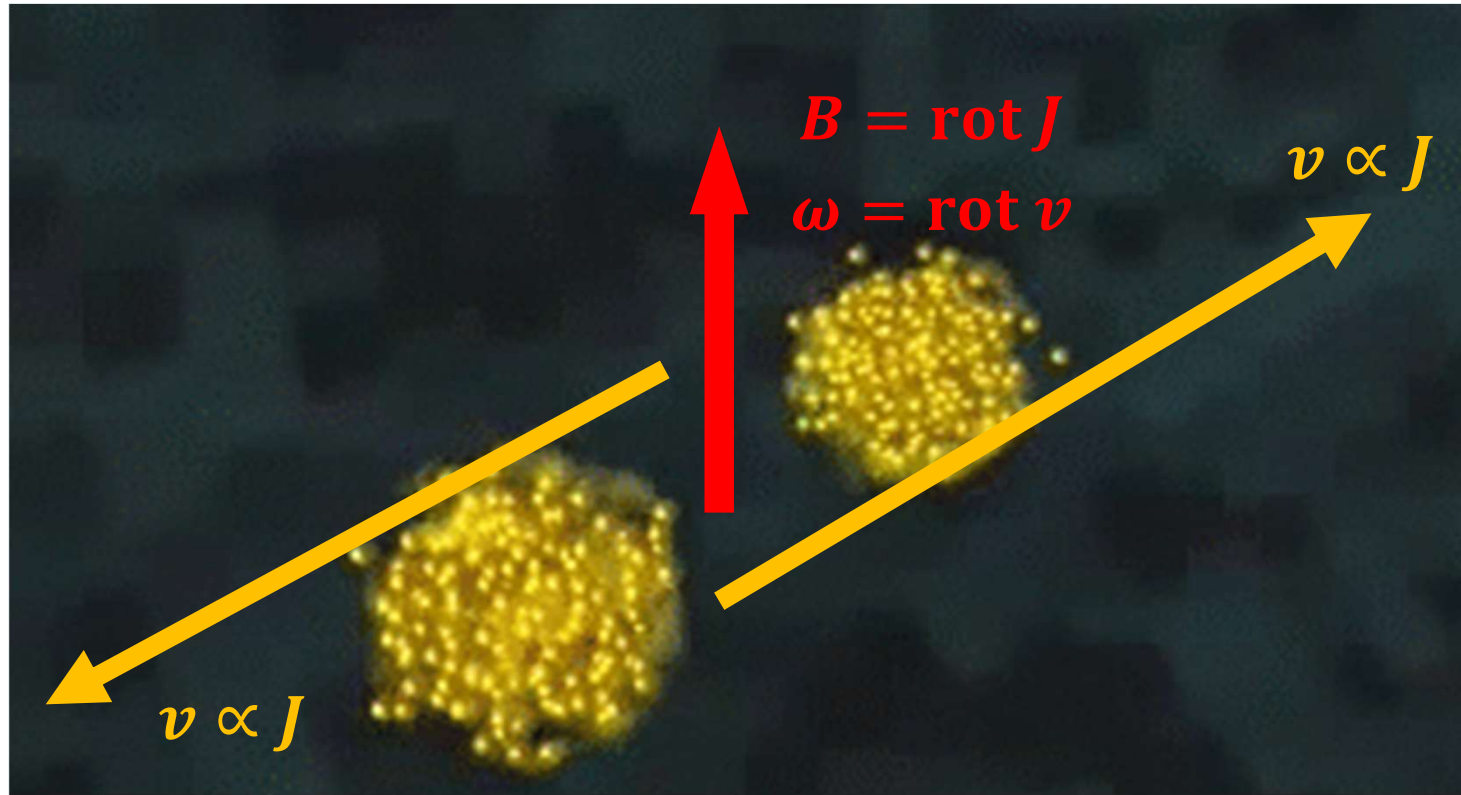
4. まとめ

まとめ (1/3): 原子核衝突の非平衡過程



- 5つのフェーズに大別
- それぞれの有効理論でパッチワーク
それぞれで面白い物理・発展・分野交流がある: 非平衡アトラクター、非熱的固定点、流体化
- パッチワークはそこそこうまくいっているが、未解決問題はいろいろ残る
例: 不定性の少ない統一的枠組み、早い熱化、流体化の一般的な理解、...

まとめ (2/3): 強い電磁場と渦渡場



高エネルギー ⇒ 速く“回転”する速度/電流配位 ⇒ **宇宙最強**の渦渡場/電磁場

⇒ ・ 温度や密度でない「新しい極限条件」として注目

例: 新奇QED現象、QCDの光物性、スピン物理、...

・ レーザー物理やスピントロニクスなどの学際的な交流のチャンス

例: いろんなアイデアの輸入 (高次高調波発生、shearによるスピン偏極)

(・ まだ比較的若いトピックなので、今やりがいがある話題)

まとめ (3/3)

「原子核衝突における非平衡物理」をレビューすることで

- 原子核衝突の物理はユニークでおもしろい、と宣伝したい
- 分野交流・議論の材料にしたい

1. 原子核衝突をなんでやってるか
2. 原子核衝突の非平衡物理
3. 最近の話題: 原子核衝突を利用した強い電磁場と渦渡場の研究
4. まとめ