

**中間エネルギー重イオン衝突で
どういう物理系が実現できるのか？
～ JAMに基づく推定 ～**

**田屋 英俊
(理研iTHEMS)**

共同研究者: 大西さん(YITP), 北沢さん(YITP), 神野さん(京大), 奈良さん(国際教養大), 西村さん(阪大)

今日の話

輸送模型JAMの1人の「ユーザー」として「中間エネルギーの重イオン衝突で
どういう系ができて、どういう物理が議論できる可能性があるのか？」を議論

I. 密度・化学ポテンシャルの推定

- 密度の大きさだけでなく、詳細 (体積やゆらぎ) にも注意を払う必要
- 臨界点サーチに非常に有用だろう

アブストには書いたが、時間的に略。。。興味があれば後で聞いてください。。。

II. 電磁場の推定

- 王道の高密度物理だけでなく、「強い場の物理」的にも楽しい
- 原子核物理的にも、EMの観測量を見るときには注意が必要

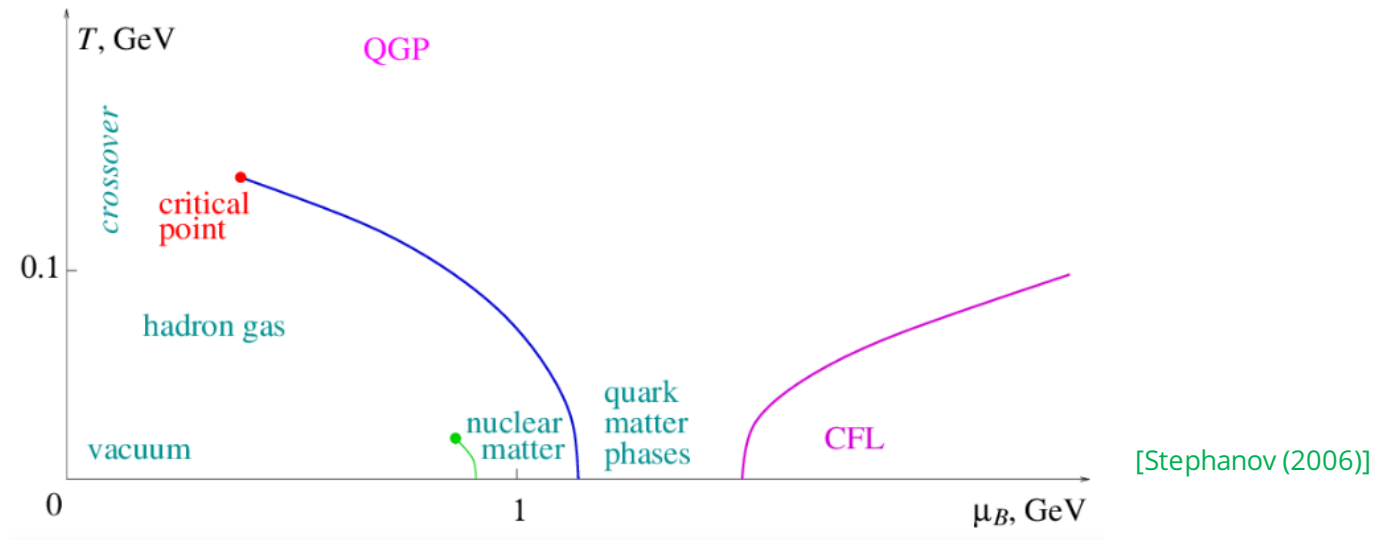
I. 密度・化学ポテンシャルの推定

動機 (1/2): 高密度QCD

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、 ...
 - \Rightarrow すごい「高」 ($\geq O(100\text{MeV})$) になると、必然的にミクロな自由度 (QCD) が出てきて、よくわからない = 原子核・ハドロン物理屋の出番

動機 (1/2): 高密度QCD

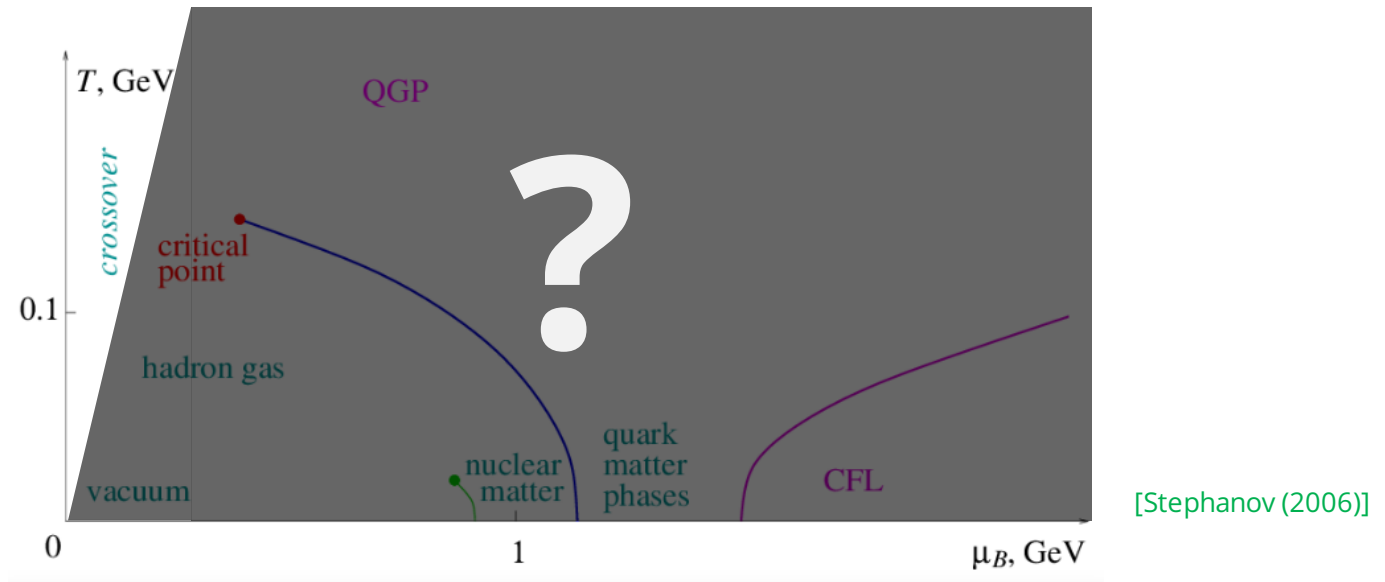
- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、 ...
 \Rightarrow すごい「高」 ($\geq O(100\text{MeV})$) になると、必然的にミクロな自由度 (QCD) が出てきて、よくわからない = 原子核・ハドロン物理屋の出番
- 現在の理解 (QCD相図)



動機 (1/2): 高密度QCD

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、 ...
 \Rightarrow すごい「高」 ($\geq O(100\text{MeV})$) になると、必然的にミクロな自由度 (QCD) が出てきて、よくわからない = 原子核・ハドロン物理屋の出番

- 現在の理解 (QCD相図)

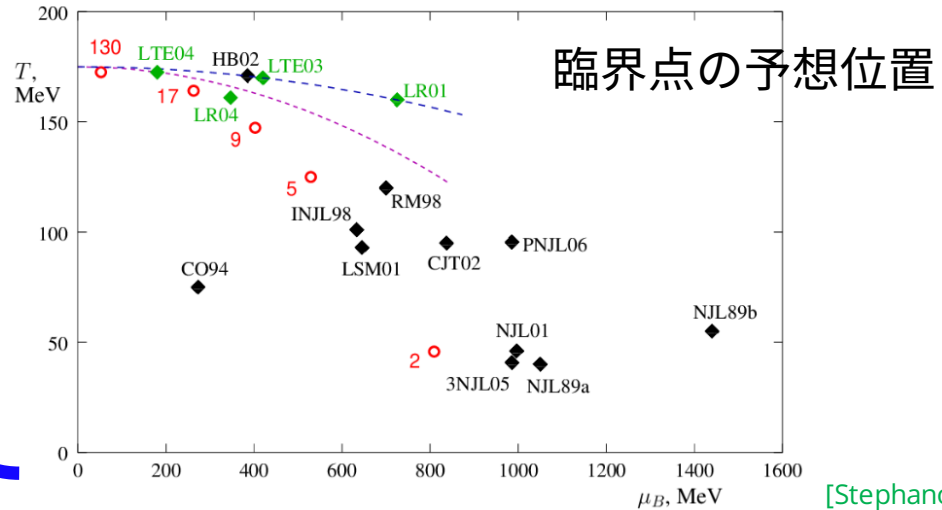
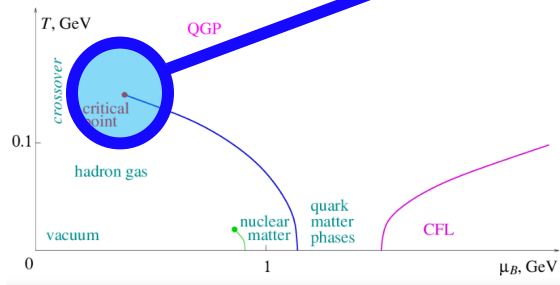


- 確かなのは「左」の部分だけ \leftarrow 理論: 格子QCD 実験: 高エネルギー重イオン

動機 (1/2): 高密度QCD

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、 ...
 \Rightarrow すごい「高」 ($\geq O(100\text{MeV})$) になると、必然的にミクロな自由度 (QCD) が出てきて、よくわからない = 原子核・ハドロン物理屋の出番

- 現在の理解 (QCD相図)



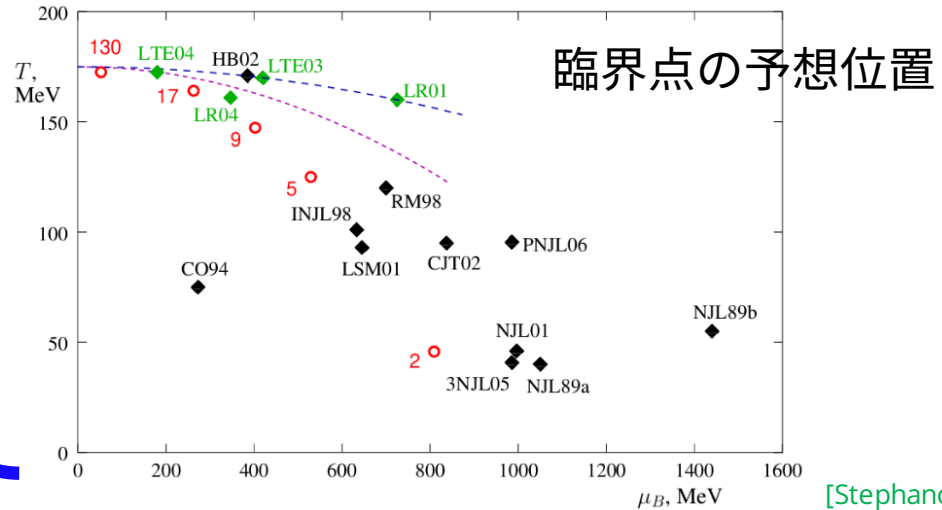
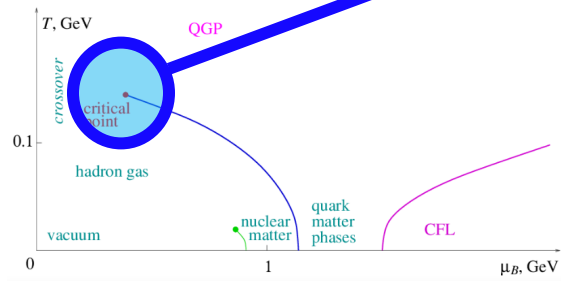
[Stephanov (2006)]

- 確かなのは「左」の部分だけ \leftarrow 理論: 格子QCD 実験: 高エネルギー重イオン
- 「右」の理論計算は、かなり不定性が大きい

動機 (1/2): 高密度QCD

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 ⇒ 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、 ...
⇒ すごい「高」 ($\geq O(100\text{MeV})$) になると、必然的にミクロな自由度 (QCD) が出てきて、よくわからない = 原子核・ハドロン物理屋の出番

- 現在の理解 (QCD相図)



- 確かなのは "左" の部分だけ ← 理論: 格子QCD 実験: 高エネルギー重イオン
- "右" の理論計算は、かなり不定性が大きい
⇒ 実験的なインプットがとてもほしい

『「熱平衡化」し「大きなバリオン化学ポテンシャル」を持ち、
「大きな時空間体積」を持つ系を「たくさん(大イベント数)」作りたい』

動機 (2/2): 中間エネルギー重イオン衝突

- ✓ $\sqrt{s_{NN}} \lesssim 10$ GeVの重イオン衝突で、どれくらい『「熱平衡化」し「大きなバリオン化学ポテンシャル」を持ち、「大きな時空間体積」を持つ系を「たくさん(大イベント数)」作りたい』を満たせるか？

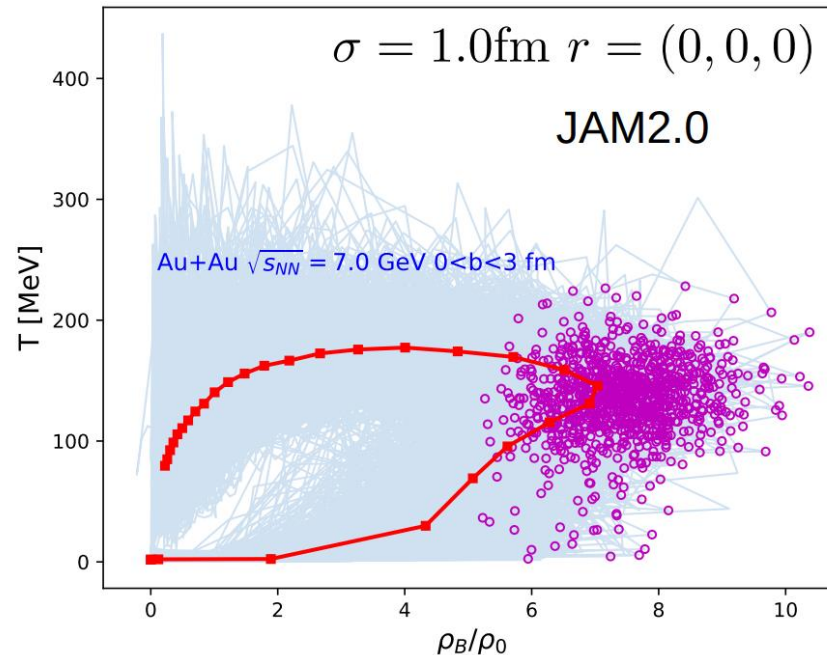
動機 (2/2): 中間エネルギー重イオン衝突

- ✓ $\sqrt{s_{NN}} \lesssim 10$ GeVの重イオン衝突で、どれくらい『「熱平衡化」し「大きなバリオン化学ポテンシャル」を持ち、「大きな時空間体積」を持つ系を「たくさん(大イベント数)」作りたい』を満たせるか？

- ✓ 先行研究:

例) 大西プロット

奈良さんのトーク@「QCD相転移やQGP生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験共同研究会」(2021年)



- たしかに「高密度」が実現されることは確からしい
- しかし、『...』の条件をどれだけ満たす/満たさないか、定かでない

⇒ 目的: 中間エネルギーでどんな系できるのか、『...』に注意して、調べてみよう

計算方法

[Nara, Otsuka, Ohnishi, Nitta, Chiba (2000)]

✓ JAM (Jet AA Microscopic transport model)

- 重イオン衝突で起きるハドロンの散乱過程を微視的にシミュレートする模型
= 古典運動するハドロンの弾性 + 非弾性散乱の重ね合わせ
- いろんな実験結果を再現する良い模型だが、厳密ではなく、あくまで模型の1つ
⇒ これから見せる結果は、あくまでベースライン
 - ☹️ クォーク・グルーオンの自由度はない
 - ☹️ 量子統計の効果は完全には入っていない
 - ☹️ (オプションとして取込めるが、今回の計算では) 非自明な状態方程式や相転移の効果は入っていない
 - ☹️ ...
- とにかく、ハドロンの位相分布(x^μ, p^μ)が求まる ⇒ いろんな物理量を計算できる

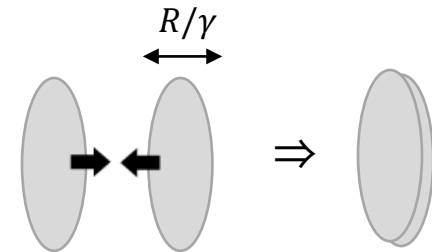
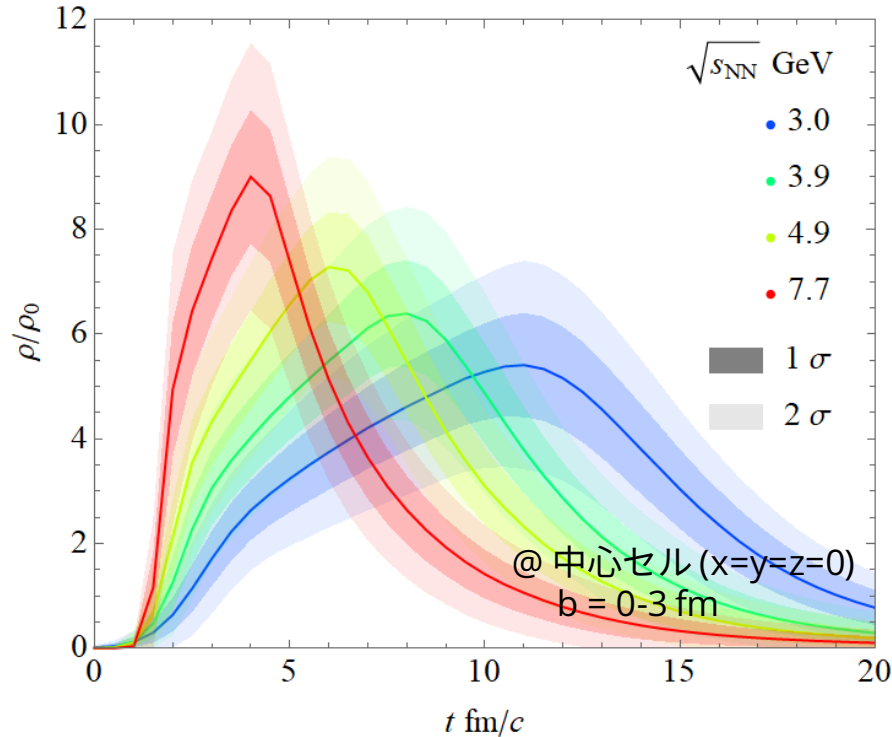
例) 局所静止系でのバリオンカレント:

$$J_{\text{LRF}}^\mu = \Lambda_\nu^\mu J_{\text{lab}}^\nu = \Lambda_\nu^\mu \sum_{i: \text{all hadrons}} Q_i \rho(\mathbf{x}_i) \frac{p_i^\mu}{p_i^0}$$

↑ ブースト行列 (Eckartフレームム)

↑ Gaussian smearing ($\sigma=1\text{fm}$)

結果 (1/6): バリオン密度の大きさ

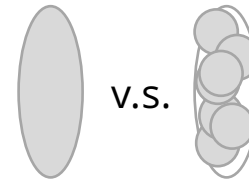


✓ 基本は古典物理: ローレンツ収縮した(一様な)原子核の重なり合い

⇒ ピーク = 最大に重なった時: $\rho_{\text{peak}} = 2 \times \rho_0 \gamma \approx \sqrt{s_{\text{NN}}} \rho_0$ & $t_{\text{peak}} = \frac{2 \times R/\gamma}{v} \approx 30/\sqrt{s_{\text{NN}}}$

✓ 原子核は一様でなく、核子分布はゆらぐ

⇒ たまたまたたくさん重なるともっと高密度

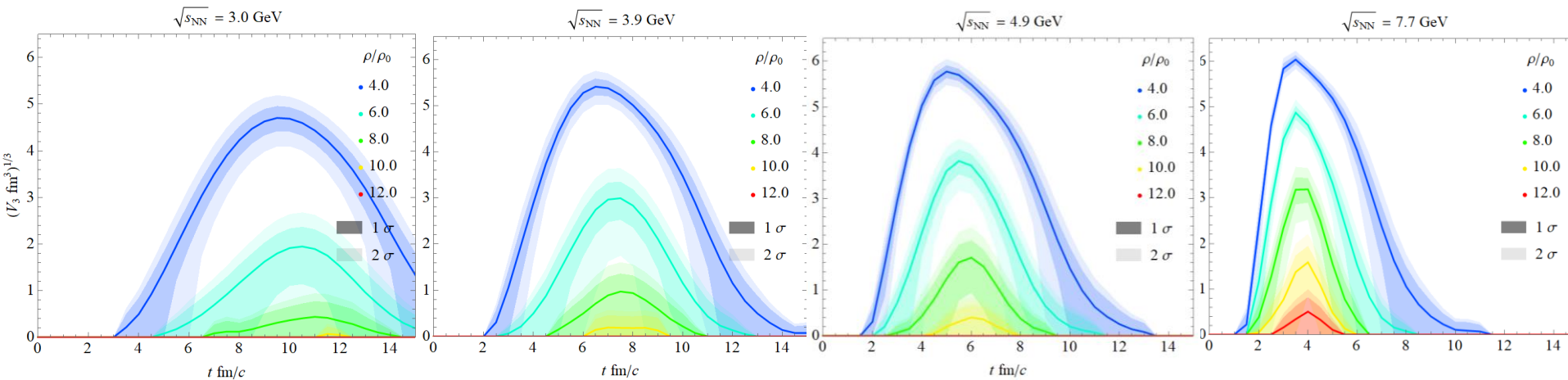


☺ イベント選択を頑張ると、かなりの高密度が作れる (例: 7.7 GeVの上位10%は10 x ρ₀ 超)

☹ しかし、QCD相図の研究的にはちょっと注意が要る ⇒ 体積、μの値、熱化 (次スライド)

結果 (2/6): 体積

$\rho > \rho_{\text{閾値}}$ となるような領域の体積



✓ **すごい高密度はゆらぎ起源なので、核子程度の長さスケールの時空間領域に限られる**

- 最大密度が大きい / イベント選択したといえど、その熱力学が調べられるかは微妙
⇒ 理論的課題: どれくらいのsmall systemで熱力学が正当化できる / からズレるのか?

cf. 高エネルギー重イオン衝突でのsmall systemの流体化 [Ambrus et al. (2023)]

- 高密度の $V((1\text{fm})^3)$ で特異なことが起こるとして、その他の大部分 $V=O((5\text{fm})^3)$ に埋もれないくらいのシグナルand/or データ解析が必要

✓ **最高密度より小さい、古典的な密度 $\rho_{\text{peak}} \approx \sqrt{s_{\text{NN}}} \rho_0$ は、大時空体積 + 小ゆらぎで実現**

- 古典的な密度でも、中性子星 $((2\sim 3) \times \rho_0)$ よりも大きい
⇒ 「宇宙最高密度を大時空体積で実現」は真。が、まだ μ と熱化に注意が必要(次スライド)

結果 (3/6): Tと μ (イベント平均)

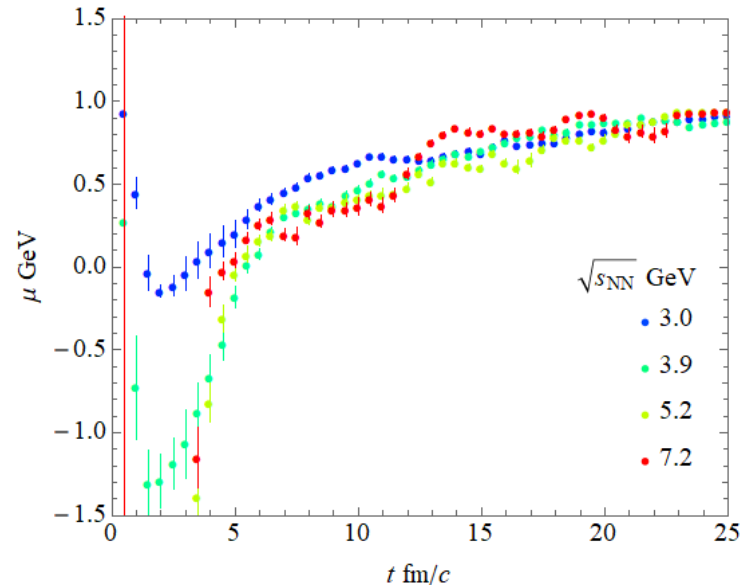
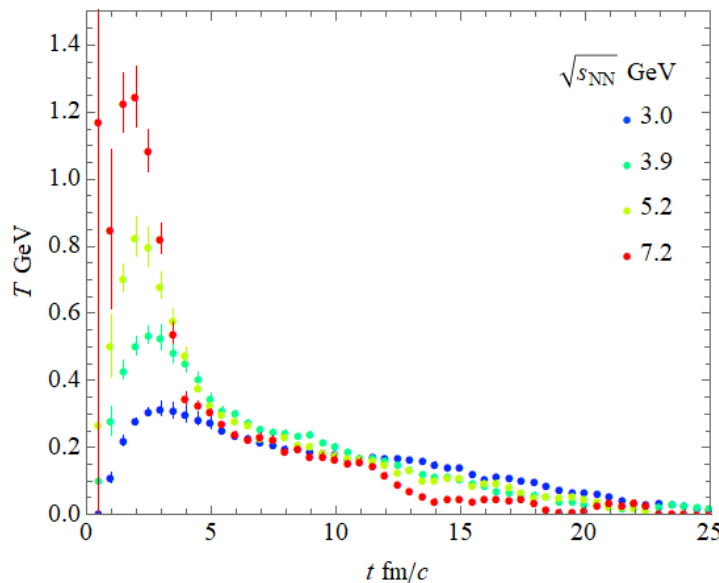
- ✓ 「 ρ 大」は「 μ 大」を必ずしも意味しない (\because 温度がある)

結果 (3/6): Tと μ (イベント平均)

✓ 「 ρ 大」は「 μ 大」を必ずしも意味しない (\because 温度がある)

✓ JAMで得られた中性子の運動量分布をフェルミ分布でフィットしてT, μ を推定

* 状態方程式やBoltzmannを使って推定したものもほとんど変わらない (O(10%)内)



T: 縦方向の運動で、はじめは高温 \rightarrow 相互作用と膨張で徐々に下がる

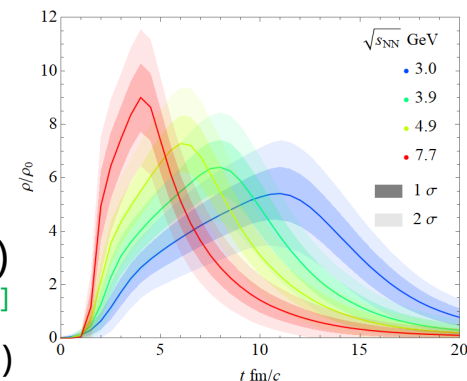
μ : • 密度が大きい \nRightarrow μ が大きい \leftarrow むしろTの大きさが効く

• $\mu \leq m \Rightarrow$ カラー超伝導の直接探索はきびしいかも

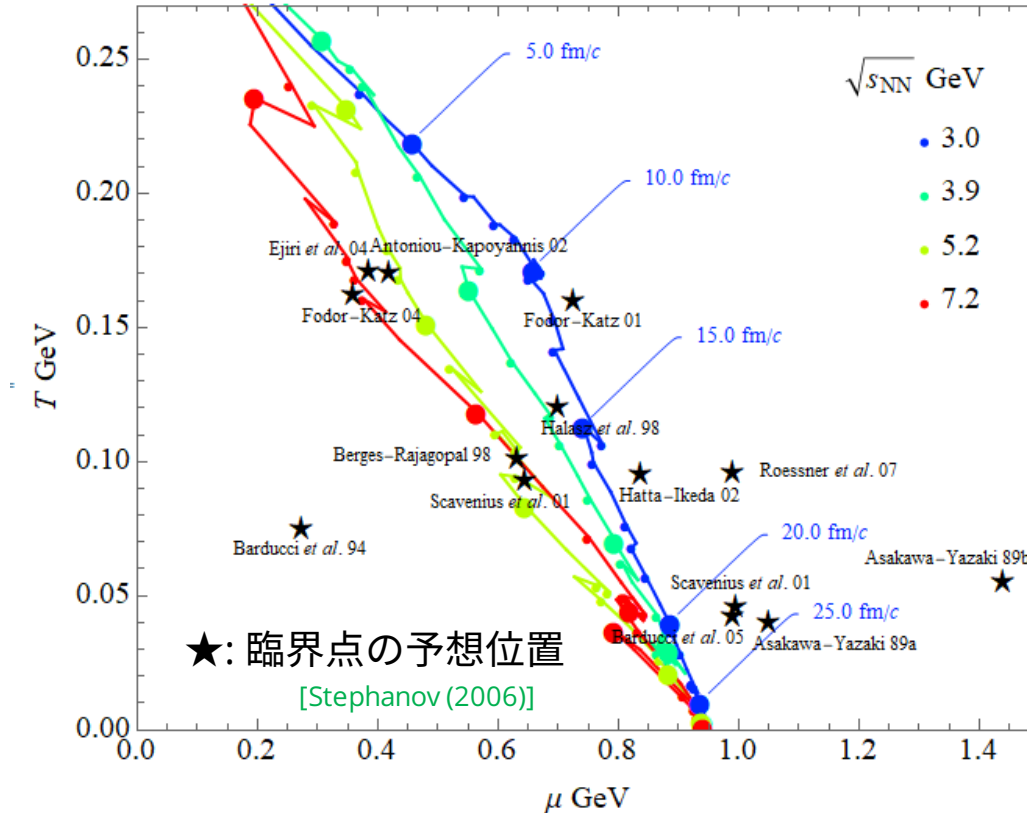
理論的課題: 間接的な前駆現象 (例: ダイレプトン収量増大)

[Nishimura, Kunihiko, Kitazawa (2022)]

\Rightarrow 臨界点サーチとか、 $\mu < m$ で起こる物理はいける (次スライド)



結果 (4/6): 相図上のトラジェクトリー (イベント平均)



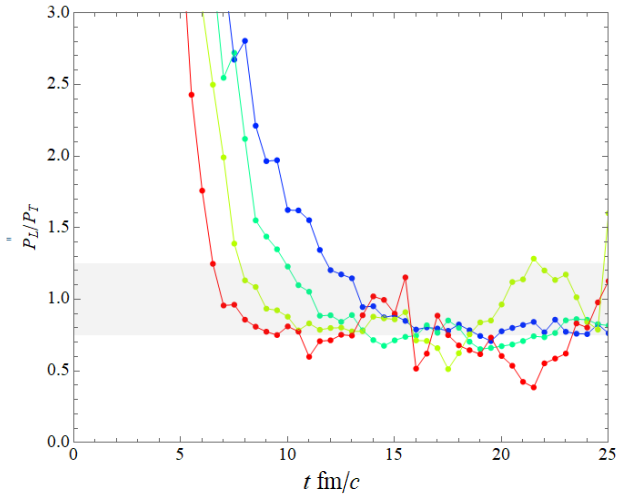
✓ 臨界点をちょうど通るし、エネルギーを変えると模型の選別もできそう

∴ 今までのまとめ: 「熱化」と「イベントゆらぎ」を忘れると、
そこそこ大きい密度が大きな時空体積で実現されて、
それは臨界点サーチに有用だろう

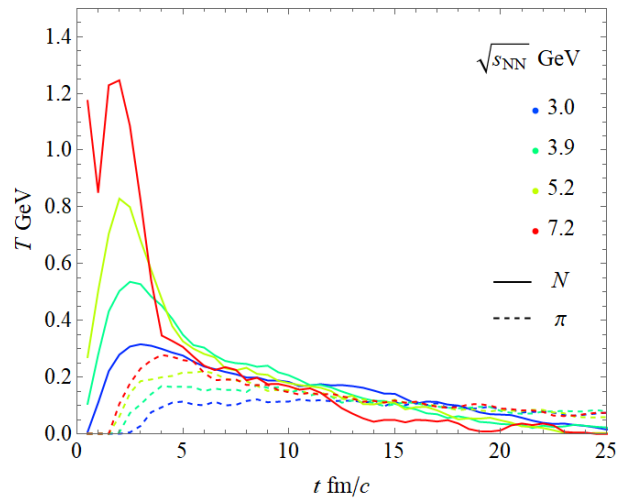
結果 (5/6): 熱化

✓ 最大密度を迎え、相互作用の数が最大化された後の $t \approx 5-10 \text{ fm}/c \gtrsim t_{\text{peak}}$ に「熱化」

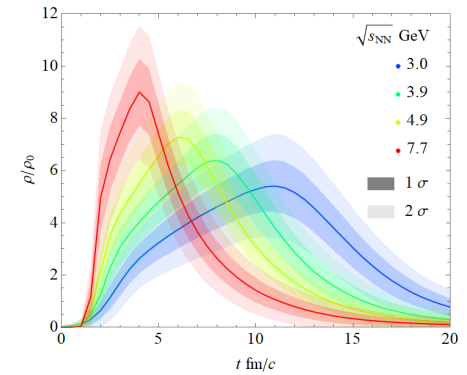
等方性



中性子の温度 vs パイオンの温度



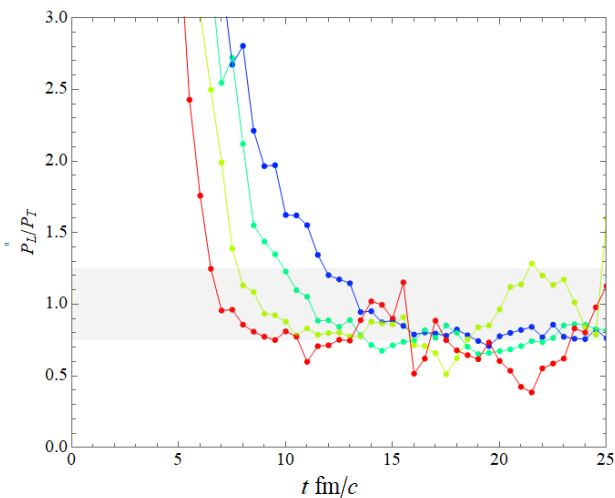
密度



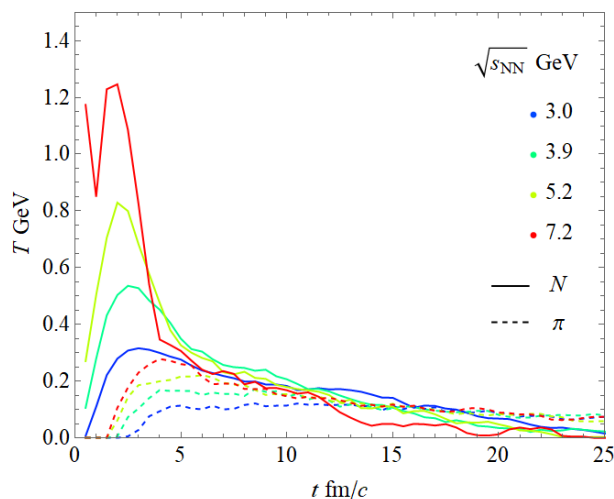
結果 (5/6): 熱化

✓ 最大密度を迎え、相互作用の数が最大化された後の $t \approx 5-10 \text{ fm}/c \gtrsim t_{\text{peak}}$ に「熱化」

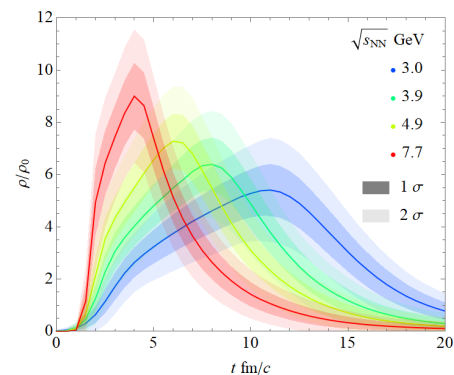
等方性



中性子の温度 vs パイオンの温度



密度

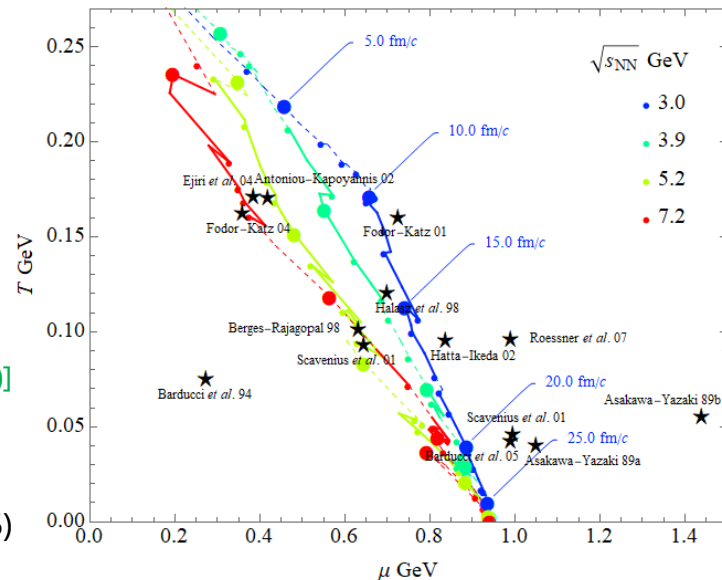


✓ 「臨界点サーチに有用」という結論は変わらない

- エネルギーが低い方 ($\sqrt{s_{\text{NN}}} \lesssim 5 \text{ GeV}$) が平衡に居やすい
- 理論的課題: 高エネルギーだと非平衡補正を考える必要
cf. 高エネルギー重イオン衝突での輸送係数への非平衡補正 [Romatschke (2018)]

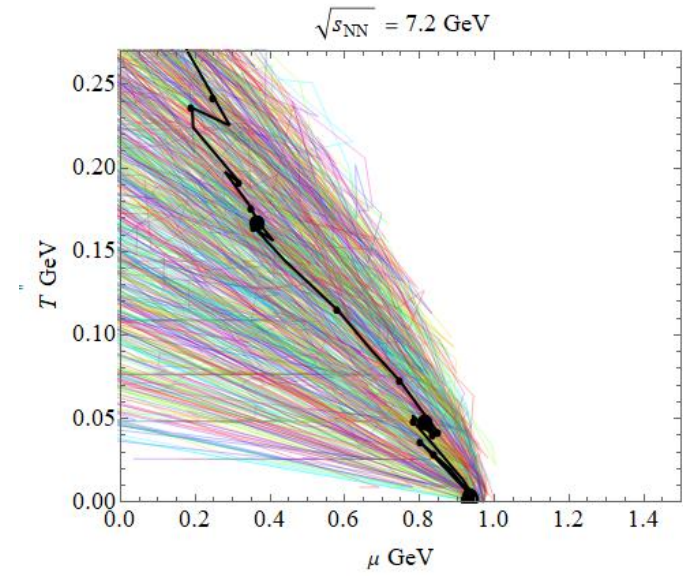
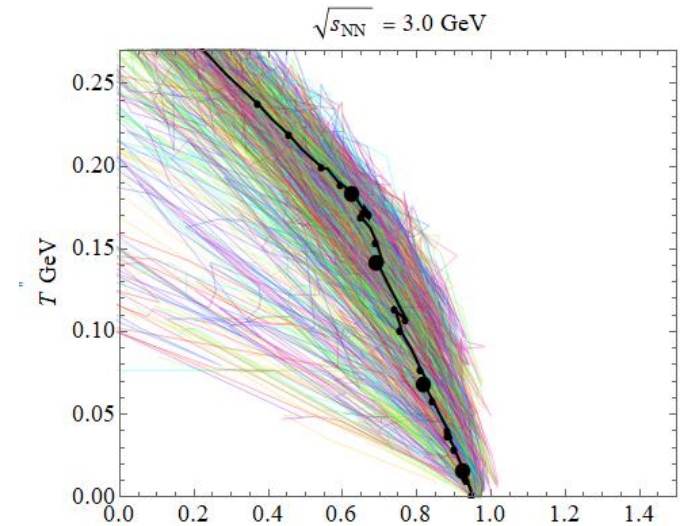
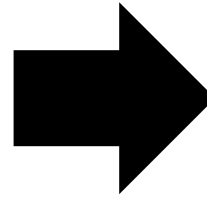
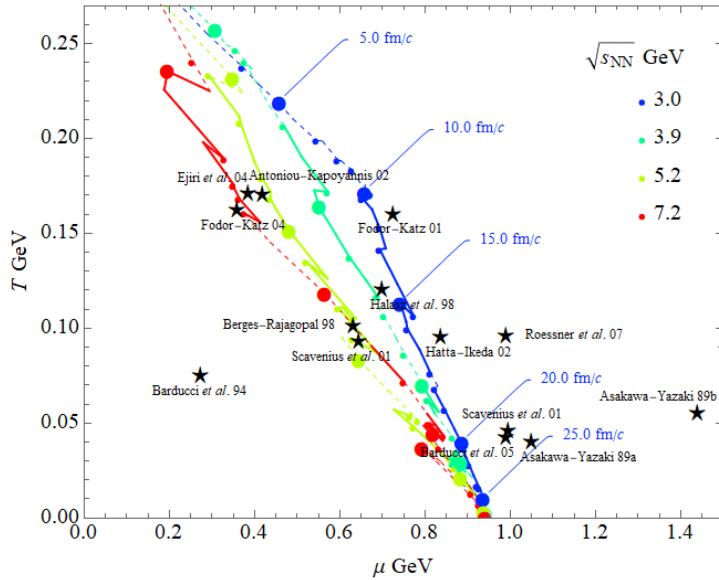
実線: 平衡 ($|P_L/P_T - 1| < 0.25$)

点線: 非平衡 ($|P_L/P_T - 1| > 0.25$)



結果 (6/6): イベントゆらぎ

イベント平均



✓ イベントゆらぎはかなり大きい

実験的には、イベント選択がとても大事
(特に高エネルギー)

色線: イベント毎の結果 (100イベント)
黒線: イベント平均

まとめ

$\sqrt{s_{NN}} \lesssim 10$ GeVの重イオン衝突で、どれくらい

『「熱平衡化」し → 最大密度を迎えた直後くらい $t \gtrsim t_{peak} \approx 30/\sqrt{s_{NN}}$

「大きなバリオン化学ポテンシャル」を持ち、 → $\mu \leq m$ でカラー超伝導の直接探索は難しいが、臨界点サーチに有用

「大きな時空間体積」を持つ系を → $\rho_{peak} \approx \sqrt{s_{NN}} \rho_0$ の密度なら、 $Vt \approx ((5 \text{ fm})^4)$ くらいの大い時空間体積で実現可能だが、最大密度は小さい領域 $Vt \approx ((1 \text{ fm})^4)$ しか無理

「たくさん(大イベント数) 作りたい』

を満たせるか？を調べた

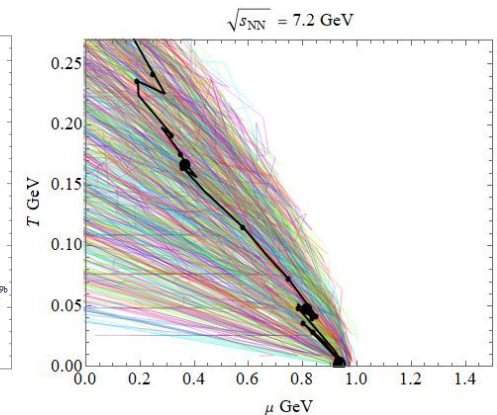
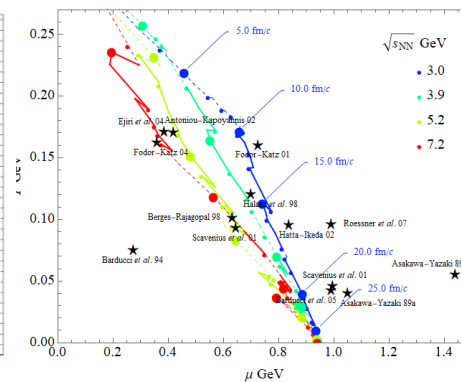
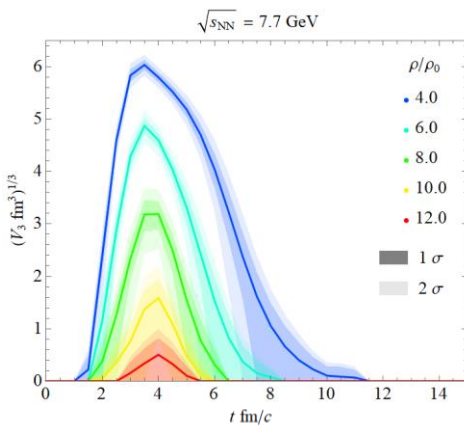
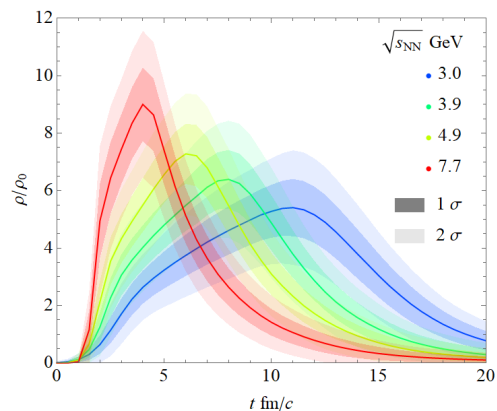
上位10%程度を選べば $10 \rho_0$ も実現できる。ゆらぎはT- μ で見るとすごい大きいので、イベント選択はすごい大事

密度

体積

トラジェクトリー (平均)

トラジェクトリー (ゆらぎ)



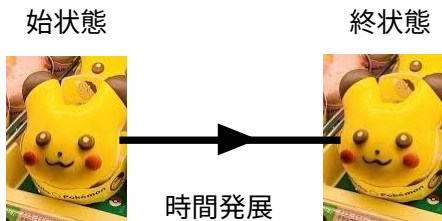
II. 電磁場の推定

動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、**電磁場**、...

動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、**電磁場**、...
- QCDスケール以下の、QEDスケールでもよくわかっていない (「**強い場の物理**」)



真空
(=電磁場なし)

弱い電磁場
($eF/m^2 \lesssim 1$)

強い電磁場
($eF/m^2 \gtrsim 1$)

画像は以下から借用

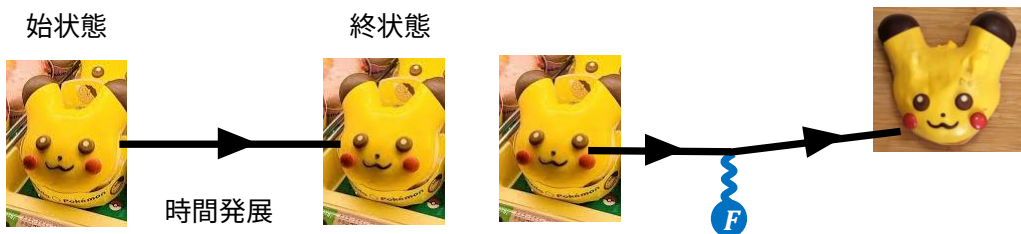
<https://news.line.me/detail/oa-walkerplus/59d36b1b92da>

<https://ananweb.jp/anan/319760>

<https://twitter.com/1007hiro/status/1274596230136344576>

動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、**電磁場**、...
- QCDスケール以下の、QEDスケールでもよくわかっていない (「強い場の物理」)



真空
(=電磁場なし)

弱い電磁場
($eF/m^2 \lesssim 1$)

強い電磁場
($eF/m^2 \gtrsim 1$)

ほとんど変化なし
 \Rightarrow 摂動的
 \Rightarrow よくわかっている

例) 電子の異常磁気モーメント $a := \frac{g-2}{2}$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)] $a(\text{theor.}) = 1159652182.03 \dots \times 10^{-12}$
 $a(\text{exp.}) = 1159652180.73 \dots \times 10^{-12}$

画像は以下から借用

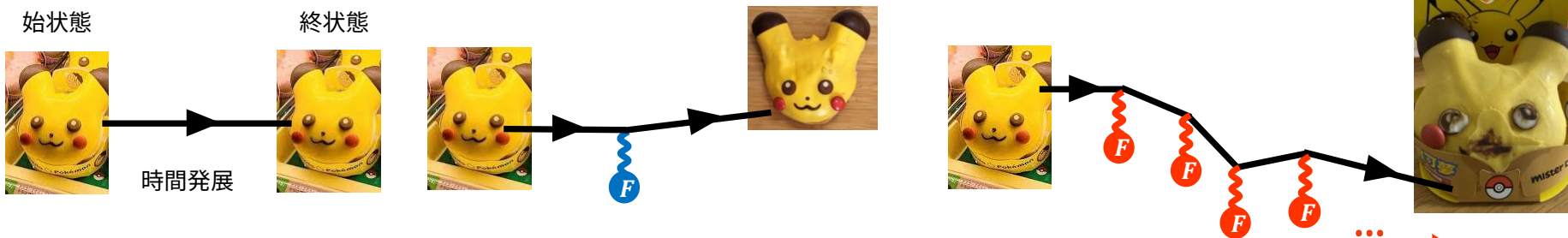
<https://news.line.me/detail/oa-walkerplus/59d36b1b92da>

<https://ananweb.jp/anan/319760>

<https://twitter.com/1007hiro/status/1274596230136344576>

動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、**電磁場**、...
- QCDスケール以下の、QEDスケールでもよくわかっていない (「強い場の物理」)



真空
(=電磁場なし)

弱い電磁場
($eF/m^2 \lesssim 1$)

強い電磁場
($eF/m^2 \gtrsim 1$)

ほとんど変化なし
 \Rightarrow 摂動的
 \Rightarrow よくわかっている

めちゃくちゃ違う！
 \Rightarrow 非摂動的
 \Rightarrow よくわからない

例) 電子の異常磁気モーメント $a := \frac{g-2}{2}$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)] $a(\text{theor.}) = 1159652182.03 \dots \times 10^{-12}$
 $a(\text{exp.}) = 1159652180.73 \dots \times 10^{-12}$

画像は以下から借用
<https://news.line.me/detail/oa-walkerplus/59d36b1b92da>
<https://ananweb.jp/anan/319760>
<https://twitter.com/1007hiro/status/1274596230136344576>

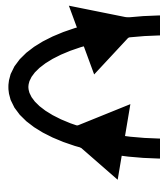
動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 \Rightarrow 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか予言可能
- XXX = 温度、密度、**電磁場**、...
- QCDスケール以下の、QEDスケールでもよくわかっていない (「強い場の物理」)
- いろんな楽しいことが起こると理論的には思っているが、**実験的な検証はない**

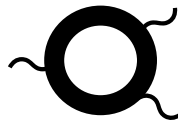
新しいQED過程 ($eF/m_e^2 \gtrsim 1$)

Review: [Fedotov, Ilderton, Karbstein, King, Seipt, HT, Torgrimsson (2022)]

例) Schwinger機構

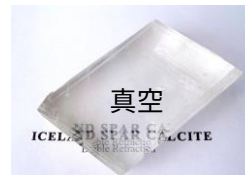


光子分裂



真空複屈折

(= 屈折率の偏極依存性)

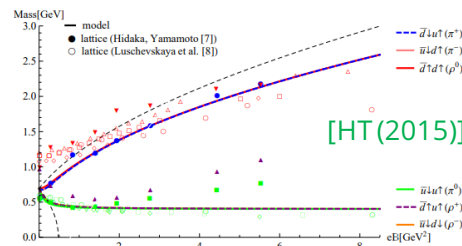


QCD・ハドロン物理への影響 ($eF/\Lambda_{\text{QCD}}^2 \gtrsim 1$)

例1) ハドロン性質:

e.g., 質量, 電荷分布, 崩壊モード, ...

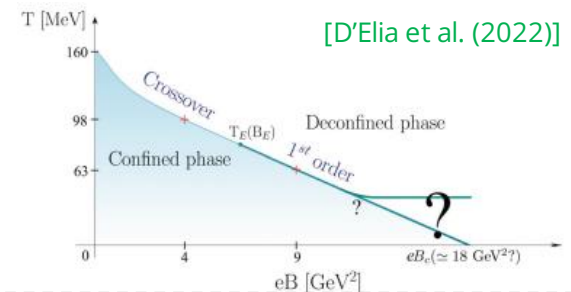
See also recent review [Iwasaki, Oka, Suzuki (2021)]



[HT (2015)]

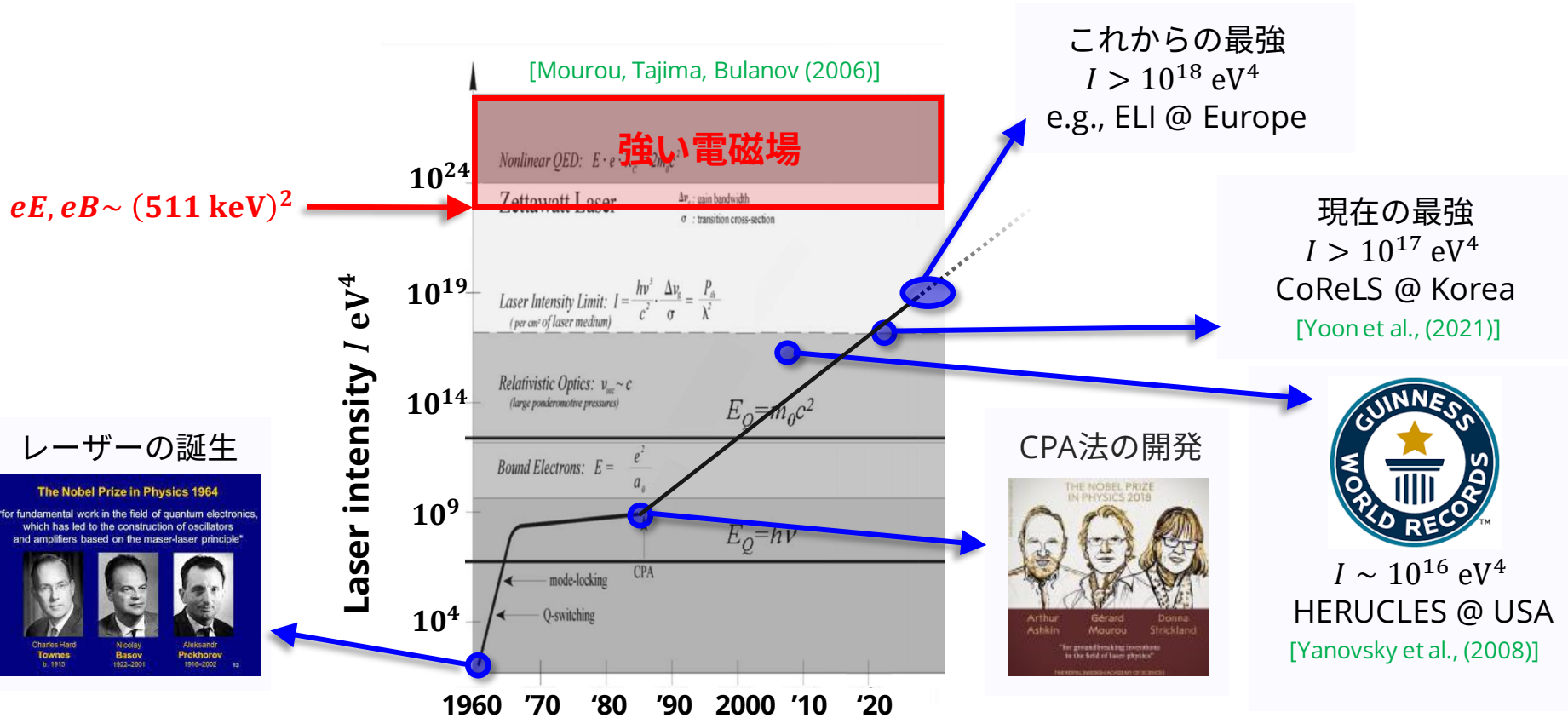
例2) QCD相図

e.g., (inverse) magnetic catalysis, 新しい相, ...



[D'Elia et al. (2022)]

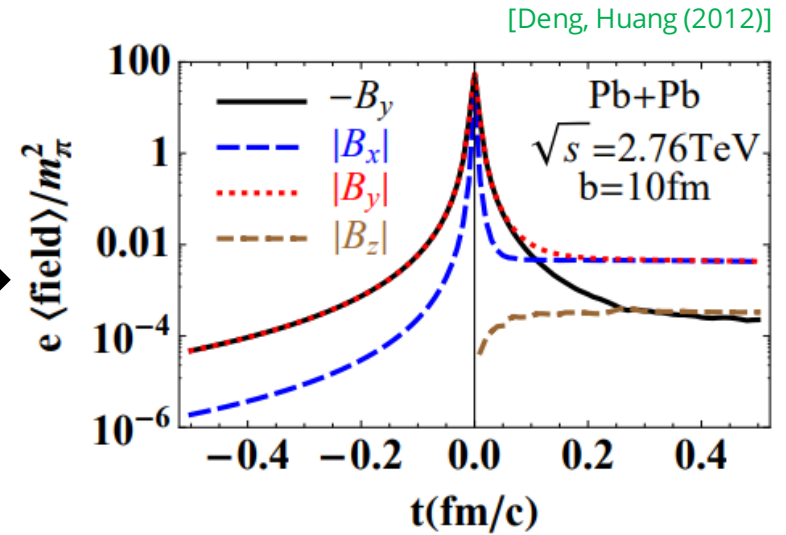
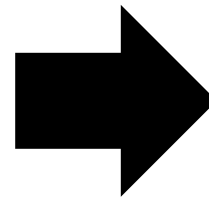
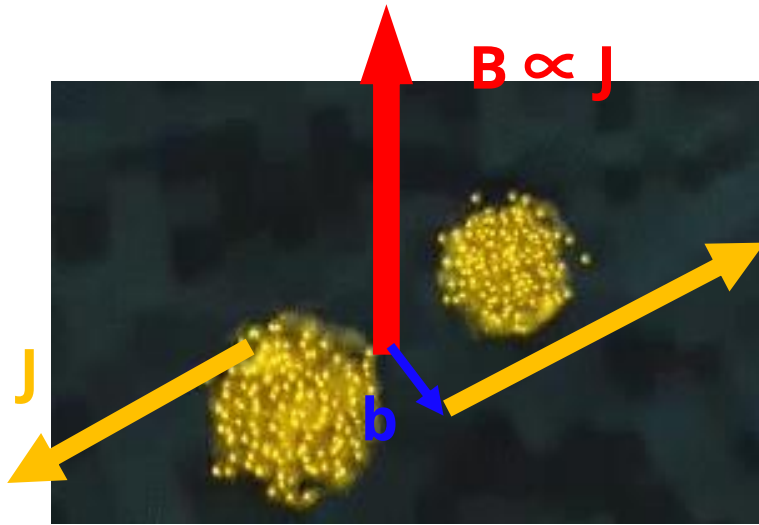
動機 (2/4): 先行研究 @ 高強度レーザー



⇒ まだまだ桁が足りないので、新しい実験方法が欲しい

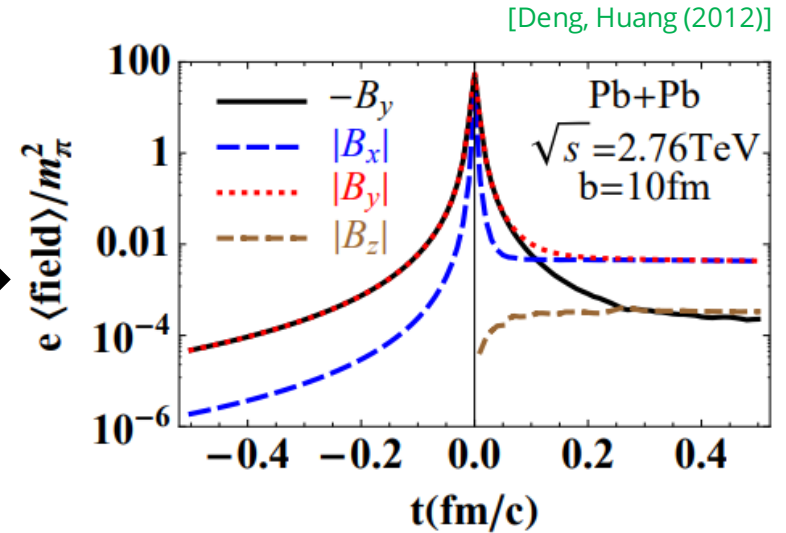
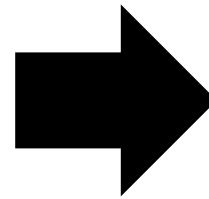
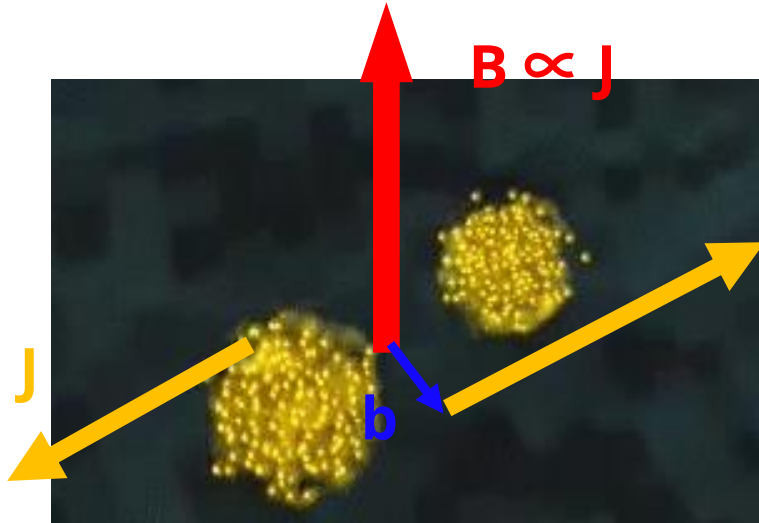
動機 (3/4): 重イオン衝突での強い場の物理

- 高エネルギーで、そういうことが議論されたことがある

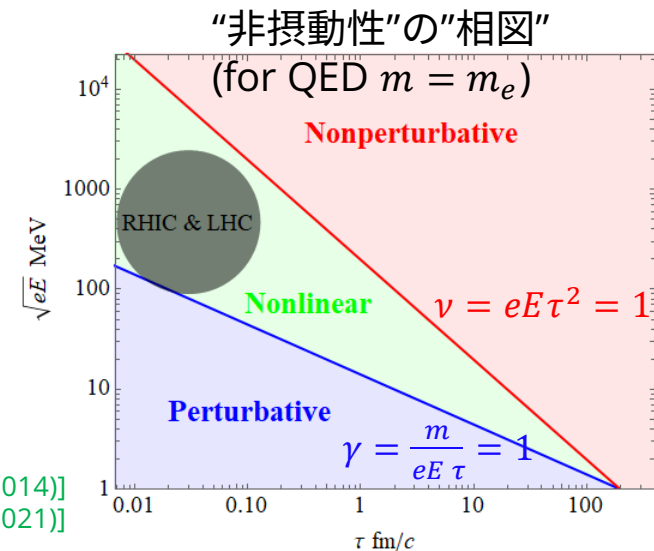
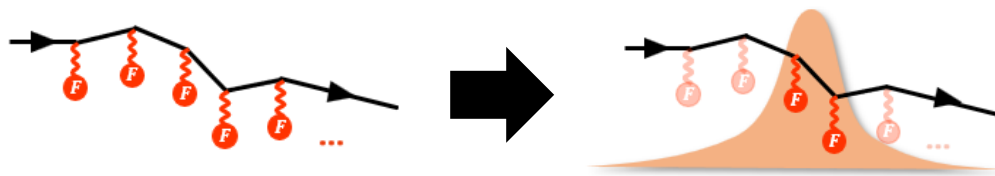


動機 (3/4): 重イオン衝突での強い場の物理

- 高エネルギーで、そういうことが議論されたことがある



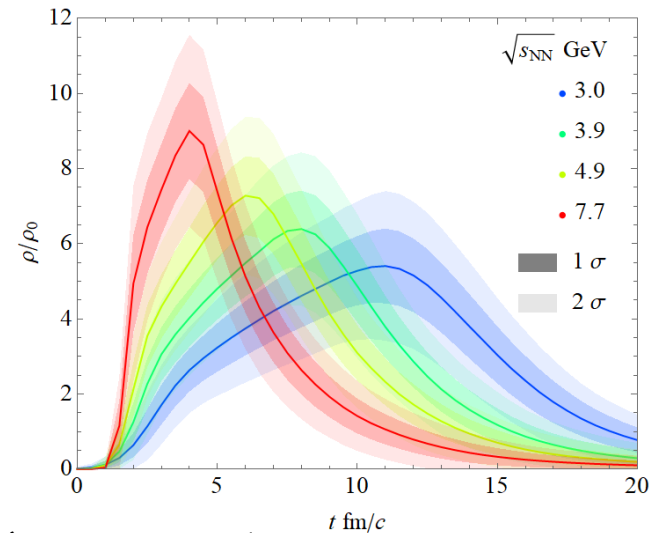
- しかし、寿命が短すぎて非自明なことは起きない



[HI, Fujii, Itakura (2014)]
[HI, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2021)]

動機 (4/4): 中間エネルギーでは?

- ✓ 高密度 = 高電荷密度 の状態が、Landau描像で長い時間 $O(10 \text{ fm}/c)$ くっつく

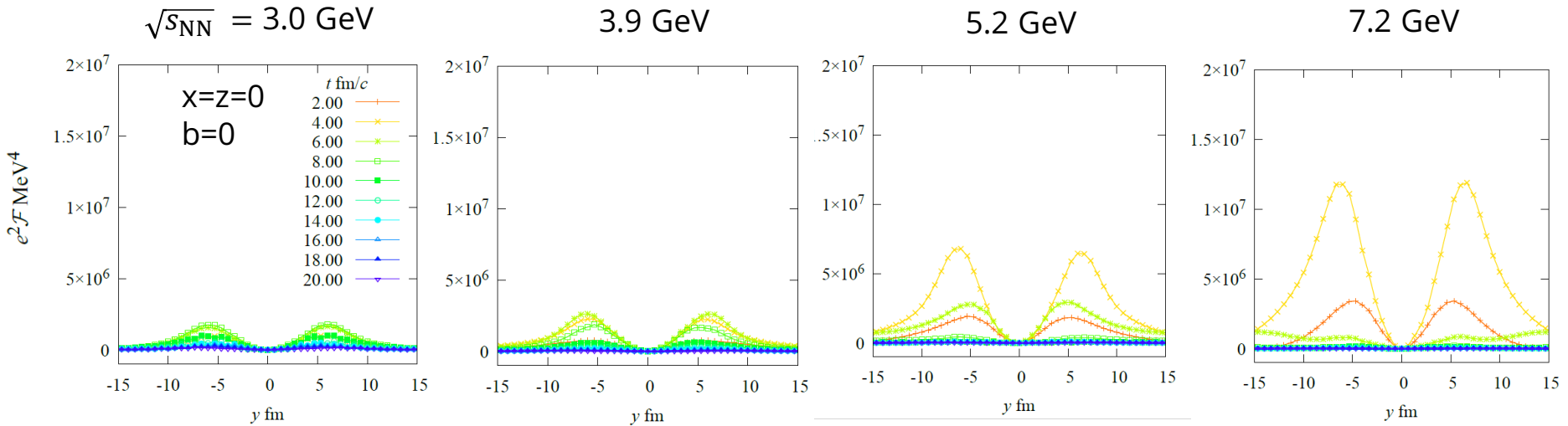


- 中心衝突のときに、強く長寿命のクーロン場ができるはず
∴ 大雑把なオーダー推定: $eE \sim \frac{Z\alpha}{r^2} \sim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2$
- 高エネルギーに比べ、場は $(1/10)^2$ 倍くらい弱いですが、寿命は100倍以上長い
⇒ QEDの強い場の物理の新しい舞台になるかも。QCDとしても無視できない。

⇒ 目的: 中間エネルギーにおける電磁場は実際どれくらいか、密度と同様にJAMを使って調べよう

結果 (1/2): 電磁場の大きなプロファイル

✓ ローレンツ不変量 $e^2\mathcal{F} := (eE)^2 - (eB)^2$ の空間分布

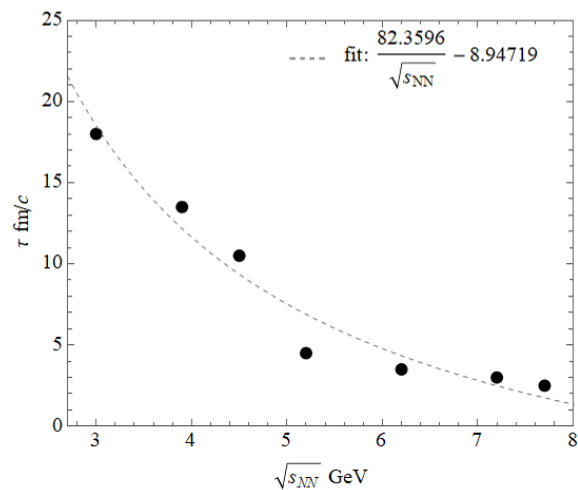
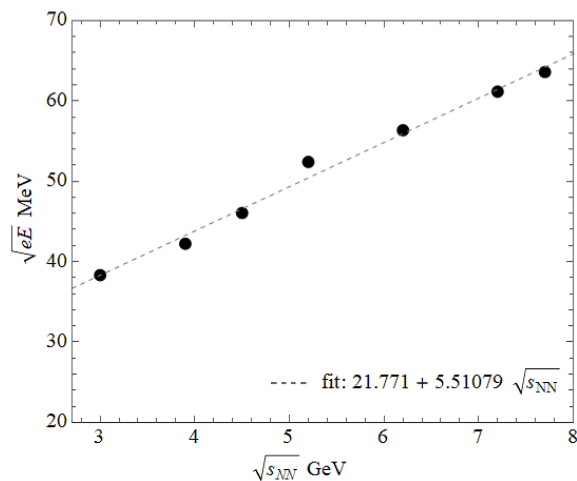


- \mathcal{F} の符号は正 \Rightarrow 磁場ではなく、電場ができている(支配している)
- 中心付近は0 = ドーナツ型の配位
 \Leftarrow Gaussの法則 $E \propto \int d^3x \rho$ より、中心領域では囲まれる電荷が0なので電場は中心で0
- そこそこ強くて、時空間体積的にもそこそこ大きいように見える
例) $(e^2\mathcal{F})^{1/4} = O((10^6 \sim 10^7 \text{ MeV}^4)^{1/4}) \approx 30 \sim 50 \text{ MeV}$

\Rightarrow 次スライドでもう少し詳しく見てみる

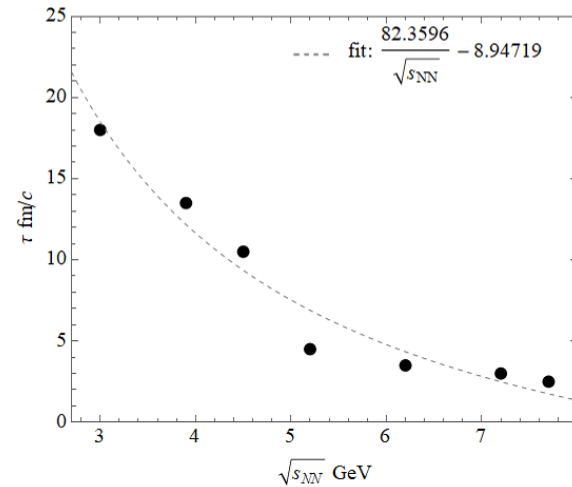
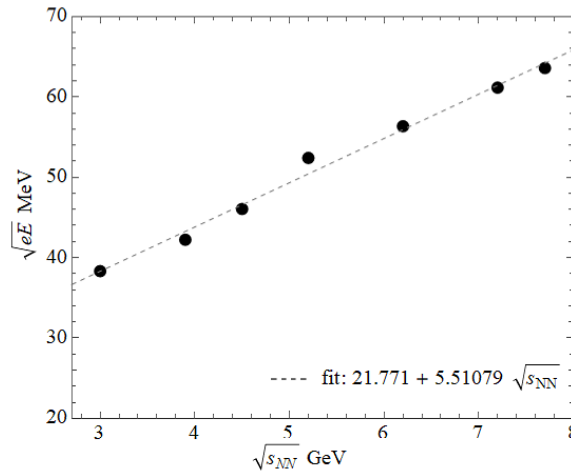
結果 (2/2): もう少し定量的な解析

✓ そこそこ強い電場 $O(50\text{MeV})$ が、そこそこ長い寿命 $O(10\text{ fm}/c)$ を持つ



結果 (2/2): もう少し定量的な解析

✓ そこそこ強い電場 $O(50\text{MeV})$ が、そこそこ長い寿命 $O(10\text{ fm}/c)$ を持つ

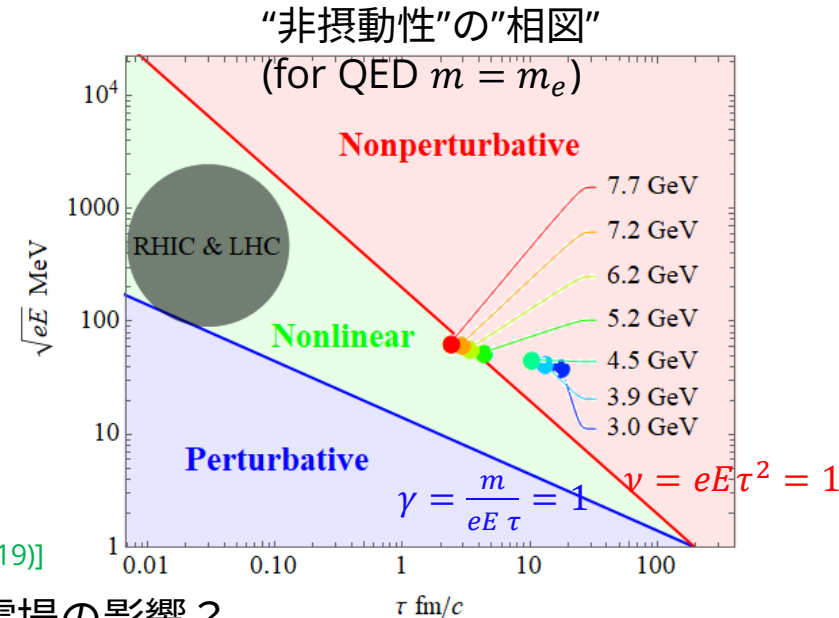


結論1: 低エネルギーでは、
非摂動領域にいける！

∴ 中間エネルギー重イオンは
強い場の物理的にも楽しい

結論2: QCD/ハドロン物理的にも
完全にネグれるほど小さくない

- EM観測に影響を与えるかも
cf. フローや荷電粒子数比への影響 [Sun, Wang, Li, Wang (2019)]
- 理論的課題: 高密度物理やQCD相図への電場の影響？
cf. 格子QCDを使った計算 [Endrodi, Marco, 2309.07058]



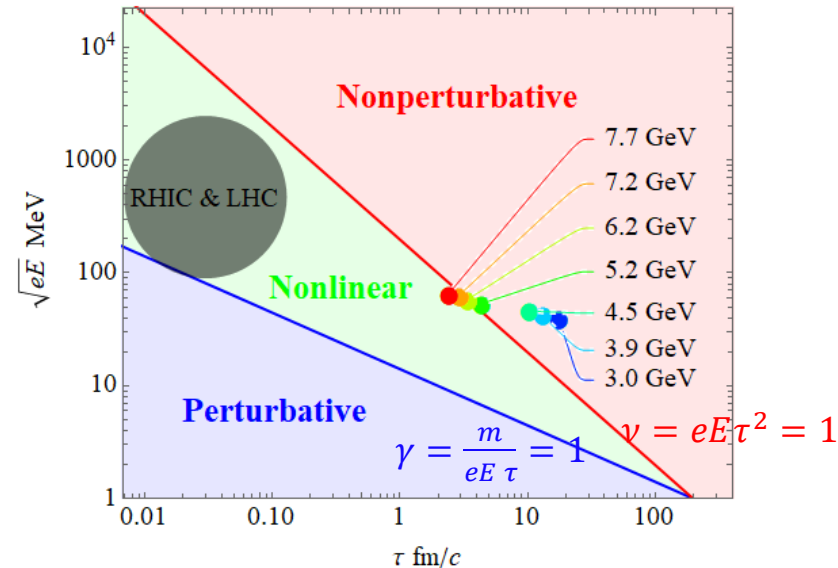
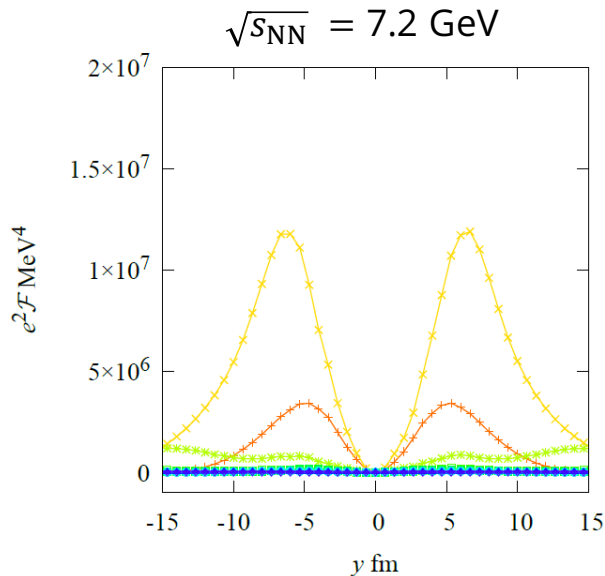
まとめ

$\sqrt{s_{NN}} \approx 10$ GeVの中間エネルギー重イオン衝突で、
どれくらいの電磁場が生成されるのかを調べた

7.2 GeV

O(50 MeV)くらいの強い電磁場が、大きな時空体積((10 fm)⁴)で実現

- 中間エネルギー重イオン衝突は、王道の高密度物理だけでなく、「強い場の物理」的にも楽しい
- 高密度物理の意味でも、EMの観測量を見るときには注意が必要かも



今日の話

輸送模型JAMの1人の「ユーザー」として「中間エネルギーの重イオン衝突で
どういう系ができて、どういう物理が議論できる可能性があるのか？」を議論

I. 密度・化学ポテンシャルの推定

- 密度の大きさだけでなく、詳細 (体積やゆらぎ) にも注意を払う必要
- 臨界点サーチに非常に有用だろう

II. 電磁場の推定

- 王道の高密度物理だけでなく、「強い場の物理」的にも楽しい
- 原子核物理的にも、EMの観測量を見るときには注意が必要かも



4次元体積

