

重イオン衝突で、高密度・大体積な 物質生成に最適なエネルギー帯はどこか？

田屋 英俊
(慶應大)

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)

[\[HT, Nishimura, Ohnishi, 2402.17136\]](#) [\[HT, Jinno, Kitazawa, Nara, 2409.07685\]](#) [\[HT, 2501.18171\]](#)

言いたいこと

重イオン衝突で、高密度・大体積な物質生成に最適なエネルギー帯はどこか？

数値計算
(JAM)

$\sqrt{s_{NN}} = 3 \sim 5 \text{ GeV}$ がベスト

で、そこでは中性子星($\rho = (2 \sim 3)\rho_0$)を凌ぐ宇宙最強密度が大時空間体積で実現される

目次

1. 導入: 高密度QCDと中間エネルギー重イオン衝突
2. 数値計算の結果: 密度
3. まとめ
- (4. オマケ: 電磁場の物理もとても楽しい)

目次

1. 導入: 高密度QCDと中間エネルギー重イオン衝突

2. 数値計算の結果: 密度

3. まとめ

(4. オマケ: 電磁場の物理もとても楽しい)

素朴な疑問: 物質に「XXX」すると何が起こるか?

✓ XXX = 温度、密度 ...

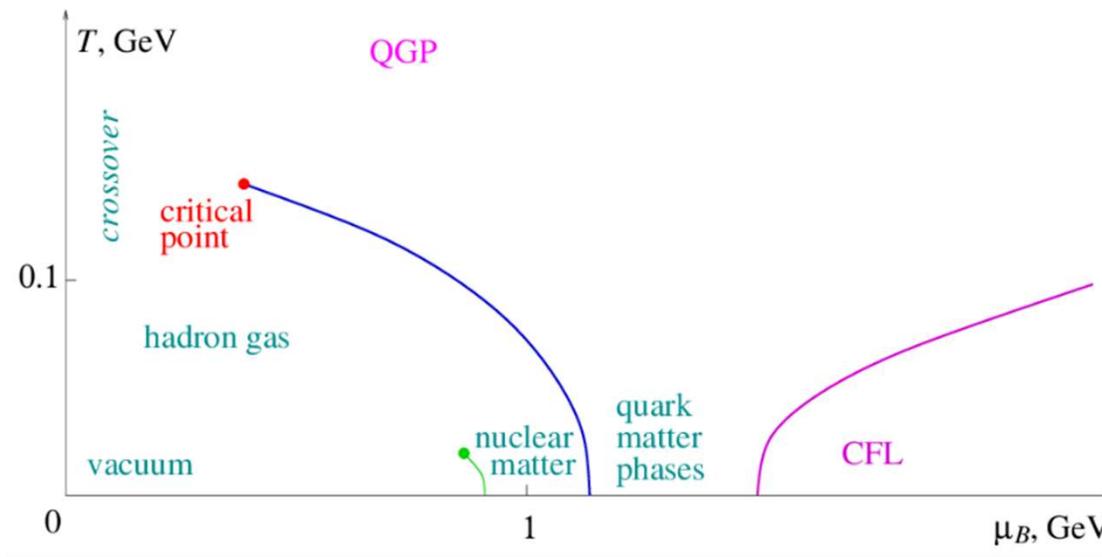
- 「XXX」が“普通”のスケールのおきはよくわかっている (例: 水は100度で沸騰して気化)
- 「XXX」のスケールをめちゃくちゃ大きくすると?
⇒ 単純な外挿ではなく、非自明 (例: 水は0(1万度)でプラズマ化)。よくわかってない
- 単なる学術的な課題でなくて、現象論的にも、宇宙の始まり/今/終わりの理解に絶対に欠かせない (例: 中性子星、初期宇宙における物質生成、...)
- そういう極限状況では、ミクロな自由度 (QCD) が顕在化
⇒ 我々、原子核・ハドロン物理屋の出番

素朴な疑問: 物質に「XXX」すると何が起こるか?

✓ XXX = 温度、密度 ...

- 「XXX」が“普通”のスケールのお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?
⇒ 単純な外挿ではなく、非自明 (例: 水は0(1万度)でプラズマ化)。よくわかってない
- 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/終わりの理解に絶対に欠かせない (例: 中性子星、初期宇宙における物質生成、...)
- そういう極限状況では、ミクロな自由度 (QCD) が顕在化
⇒ 我々、原子核・ハドロン物理屋の出番

✓ 現在の予想 (QCD相図)



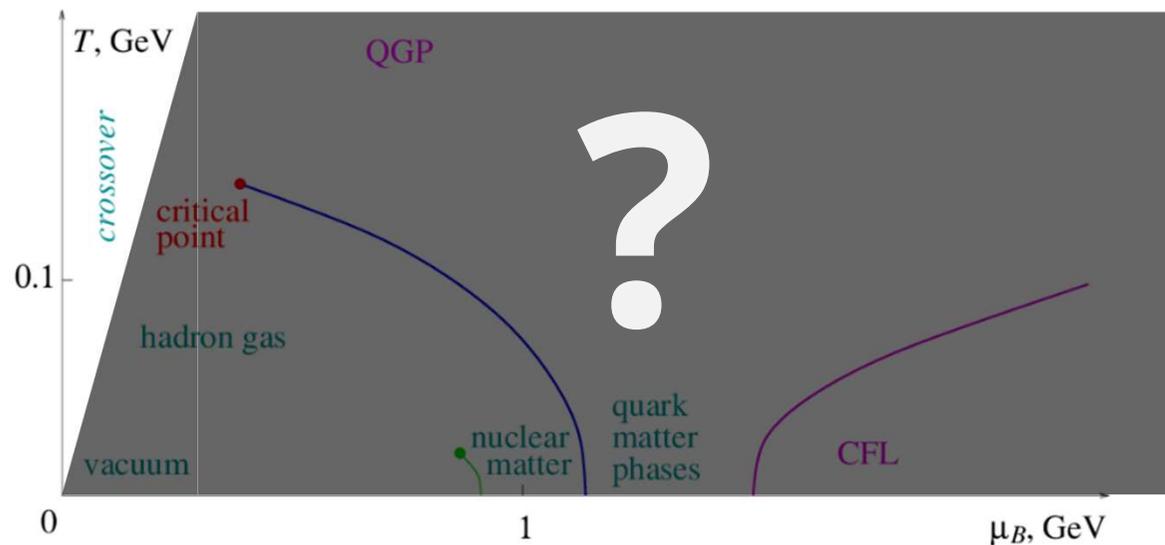
[Stephanov (2006)]

素朴な疑問: 物質に「XXX」すると何が起こるか?

✓ XXX = 温度、密度 ...

- 「XXX」が“普通”のスケールのお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?
⇒ 単純な外挿ではなく、非自明 (例: 水は0(1万度)でプラズマ化)。よくわかってない
- 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/終わりの理解に絶対に欠かせない (例: 中性子星、初期宇宙における物質生成、...)
- そういう極限状況では、ミクロな自由度 (QCD) が顕在化
⇒ 我々、原子核・ハドロン物理屋の出番

✓ 現在の予想 (QCD相図)



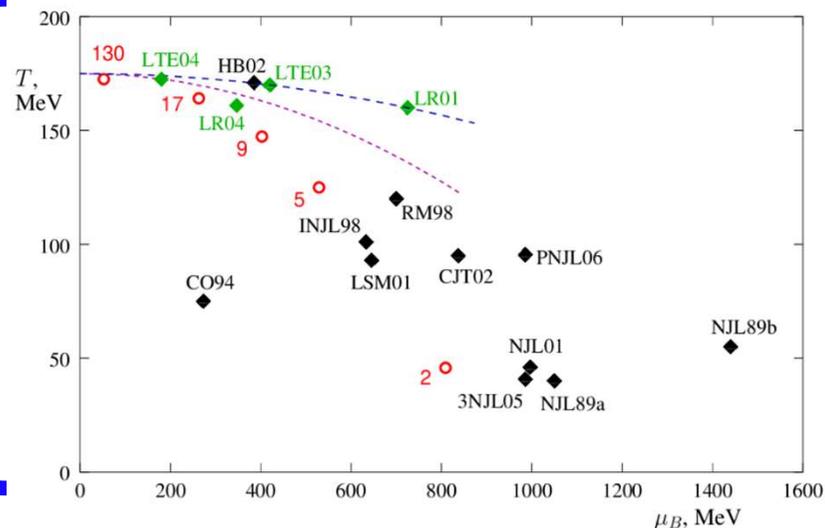
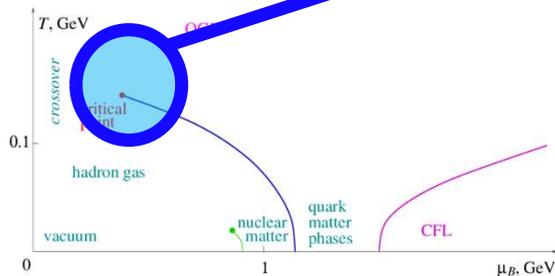
- 確かなのは「左」の部分だけ ← 理論: 格子QCD 実験: 高エネルギー重イオン

素朴な疑問: 物質に「XXX」すると何が起こるか?

✓ XXX = 温度、密度 ...

- 「XXX」が“普通”のスケール有的时候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?
⇒ 単純な外挿ではなく、非自明 (例: 水は0(1万度)でプラズマ化)。よくわかってない
- 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/終わりの理解に絶対に欠かせない (例: 中性子星、初期宇宙における物質生成、...)
- そういう極限状況では、ミクロな自由度 (QCD) が顕在化
⇒ 我々、原子核・ハドロン物理屋の出番

✓ 現在の予想 (QCD相図)



[Stephanov (2006)]

- 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」の高密度領域 (高密度QCD) の理論は、不定性がとてもとても大きい
∴ 実験的なインプットがとてもほしい ⇒ **中間エネルギー重イオン衝突**

中間エネルギー重イオン衝突

- ✓ 中間エネルギー重イオン衝突
= 「高密度な物質(=マクロな大きさを持ったもの)」を地上で作る (現在) 唯一の可能性

中間エネルギー重イオン衝突

✓ 中間エネルギー重イオン衝突

= 「高密度な物質(=マクロな大きさを持ったもの)」を地上で作る (現在) 唯一の可能性

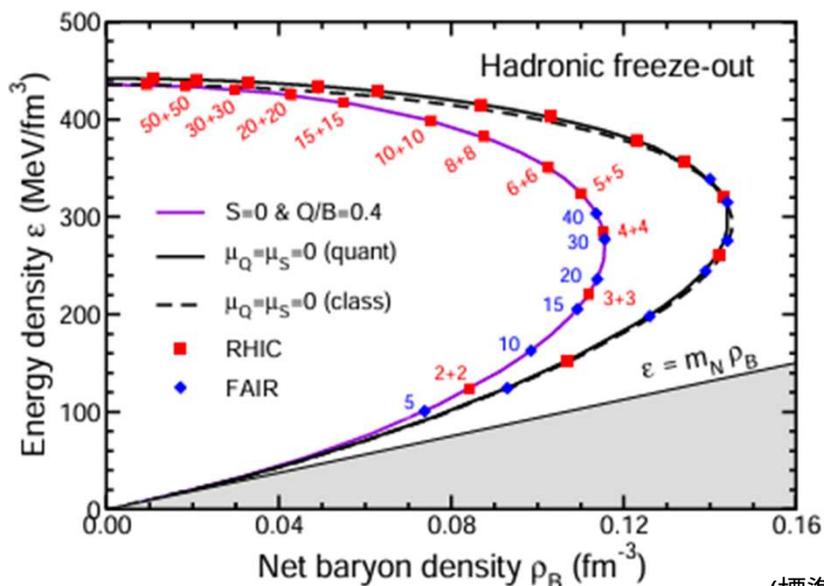
✓ 先行する理論計算: 本当に高密度物質は作れるのか?

- 統計模型: [Randrup, Cleymans (2006)]

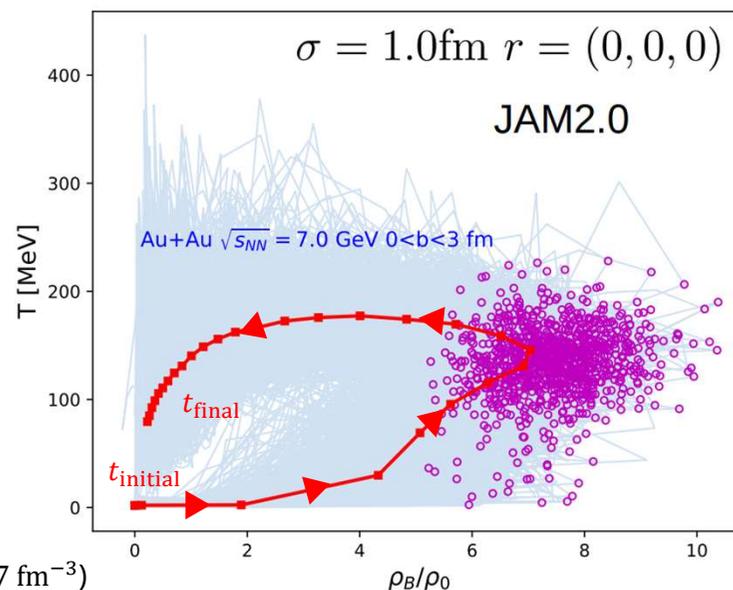
終状態(フリーズアウト)での粒子分布から推定

- 微視的輸送模型: 大西プロット [奈良さんのトーク (2021)]

時間発展をちゃんと追い、(中心セルでの)密度を計算



(標準核密度 $\rho_0 \approx 0.17 \text{ fm}^{-3}$)



⇒ 「高密度 $\rho = (6 \sim 10) \times \rho_0$ 」は過渡的に確かに実現できて、
最適な衝突エネルギーは「 $\sqrt{s_{NN}} = 6 \sim 10 \text{ GeV}$ 」らへんっぽい

中間エネルギー重イオン衝突

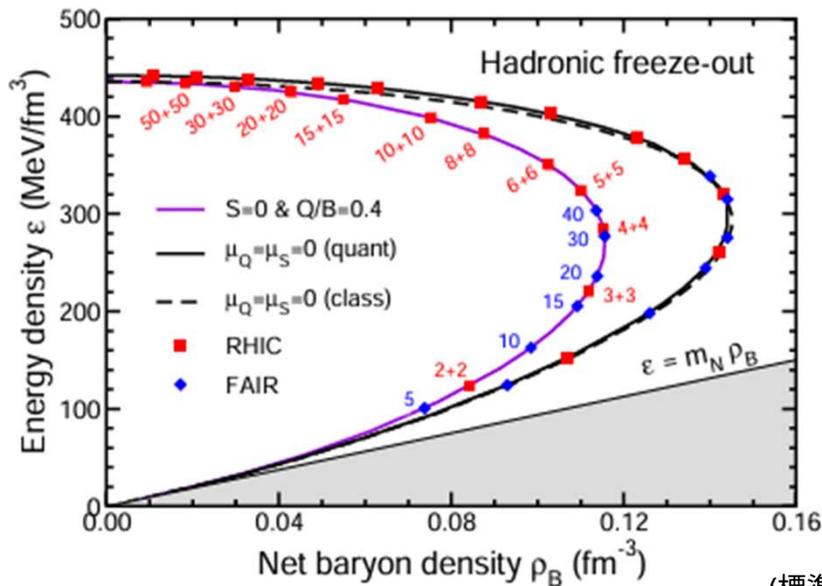
✓ 中間エネルギー重イオン衝突

= 「高密度な物質(=マクロな大きさを持ったもの)」を地上で作る (現在) 唯一の可能性

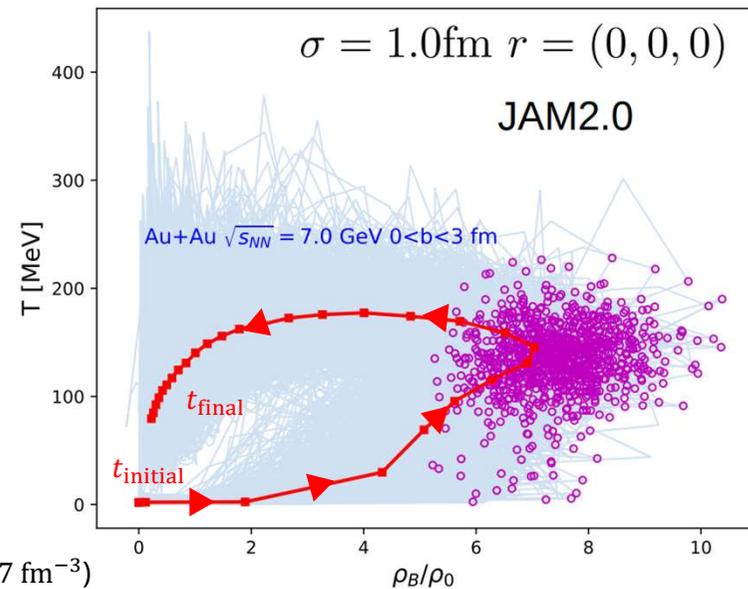
✓ 先行する理論計算: 本当に高密度物質は作れるのか?

- 統計模型: [Randrup, Cleymans (2006)]
終状態(フリーズアウト)での粒子分布から推定

- 微視的輸送模型: 大西プロット [奈良さんのトーク (2021)]
時間発展をちゃんと追い、(中心セルでの)密度を計算



(標準核密度 $\rho_0 \approx 0.17 \text{ fm}^{-3}$)



⇒ 「高密度 $\rho = (6 \sim 10) \times \rho_0$ 」は過渡的に確かに実現できて、
最適な衝突エネルギーは「 $\sqrt{s_{NN}} = 6 \sim 10 \text{ GeV}$ 」らへんっぽい

✓ 大欠点: できた高密度状態が「十分大きさを持つか」はまったく気にしていない

⇒ 本研究で示したいこと:

高密度状態は十分な大きさを持てるか? そのときの密度や最適エネルギーは?

目次

1. 導入: 高密度QCDと中間エネルギー重イオン衝突

2. 数値計算の結果: 密度

3. まとめ

(4. オマケ: 電磁場の物理もとても楽しい)

計算方法

✓ 微視的輸送模型: JAM (Jet AA Microscopic transport model)

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

- 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
- とにかく、ハドロンの位相分布(x^μ, p^μ)が求まる \Rightarrow 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 ($J_{\text{LRF}}^0 =: \rho$ がバリオン密度):

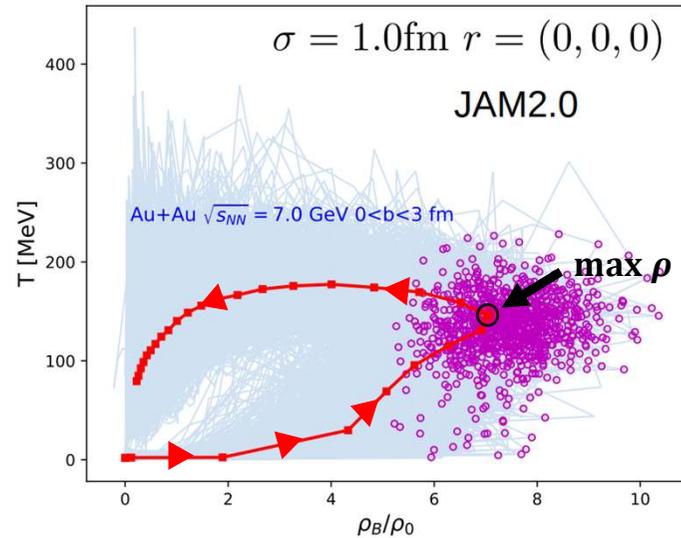
$$J_{\text{LRF}}^\mu = \Lambda^\mu_\nu J_{\text{lab}}^\nu = \Lambda^\mu_\nu \sum_{i: \text{all hadrons}} Q_i \rho(\mathbf{x}_i) \frac{p_i^\mu}{p_i^0}$$

ブースト行列 (Eckartフレーム) Gaussian smearing ($\sigma=1\text{fm}$)

結果 (1/4): 最大密度 @ 中心セル ($x = 0$)

✓ まずは先行研究 (大西プロット) と一貫してるか確認: $\max \rho := \max_t J_{\text{LRF}}^0$ を計算

大西プロット

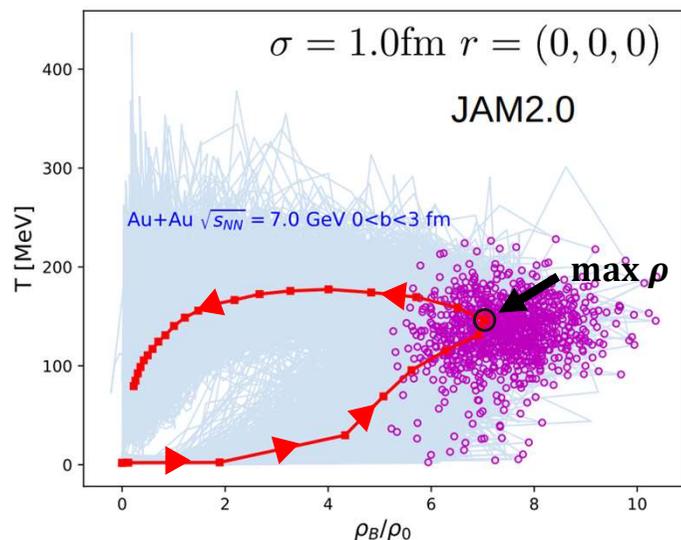


⇒ $\sqrt{s_{NN}} = 7 \text{ GeV}$ の中心セルでの最大密度は
「 $\max \rho \approx 7\rho_0$ 」で「30%くらいゆらぐ」

結果 (1/4): 最大密度 @ 中心セル ($x = 0$)

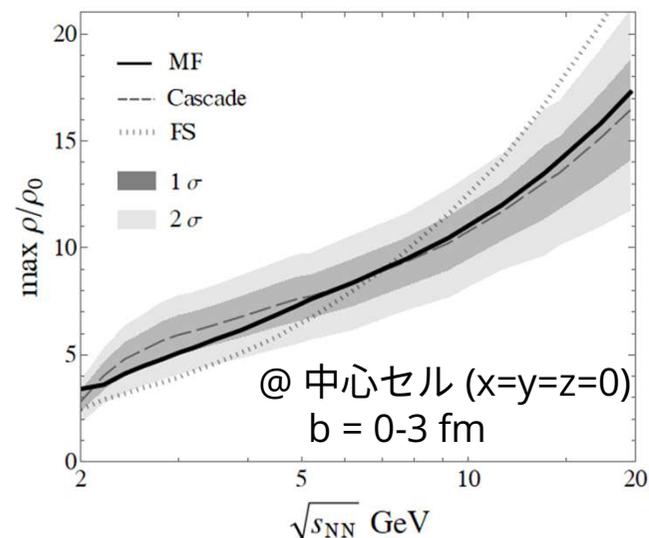
✓ まずは先行研究 (大西プロット) と一貫してるか確認: $\max \rho := \max_t J_{\text{LRF}}^0$ を計算

大西プロット



⇒ $\sqrt{s_{NN}} = 7$ GeVの中心セルでの最大密度は「 $\max \rho \approx 7\rho_0$ 」で「30%くらいゆらぐ」

今研究

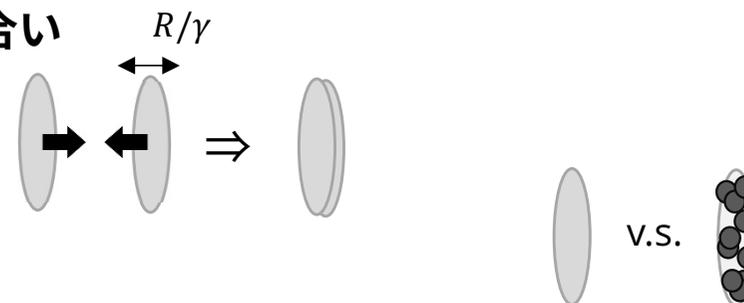


⇒ 最大密度は大西プロットとconsistent (見せないが、時間発展も同様)

• 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

⇒ 最大値 = 最大に重なった時

= だいたい: $\max \rho = 2 \times \rho_0 \gamma \approx \sqrt{s_{NN}} [\text{GeV}] \times \rho_0$



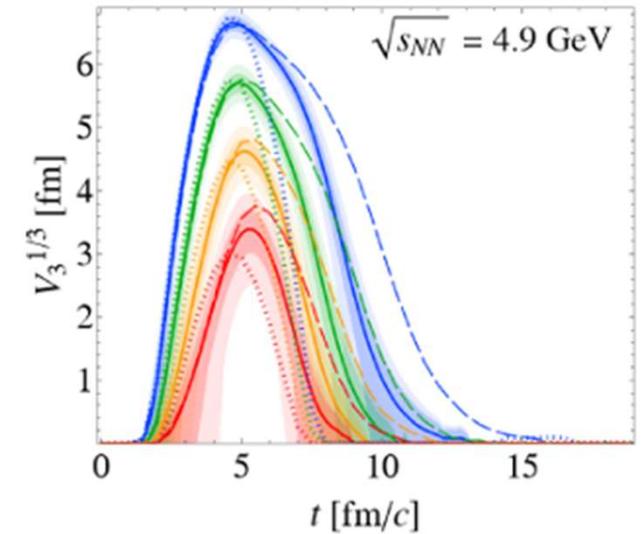
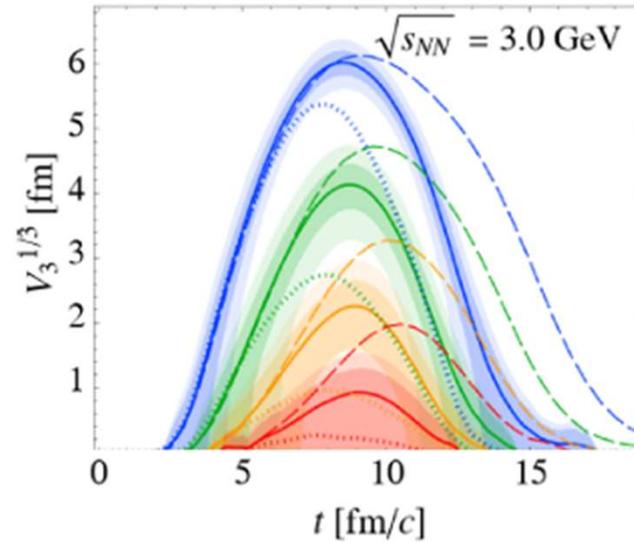
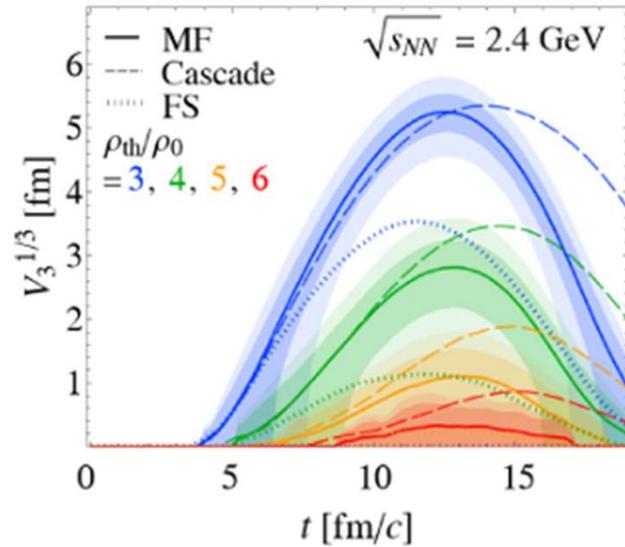
• 現実的には、原子核は一様でなく、核子分布はゆらぐ

- たまたまたくさん重なる(重ならない)ともっと高(低)密度 ⇒ 30%くらいの大きなゆらぎ

- イベント選択で超高密度が少なくとも局所的には作れる (例: 7.7 GeVの上位10%は $10 \times \rho_0$ 超)

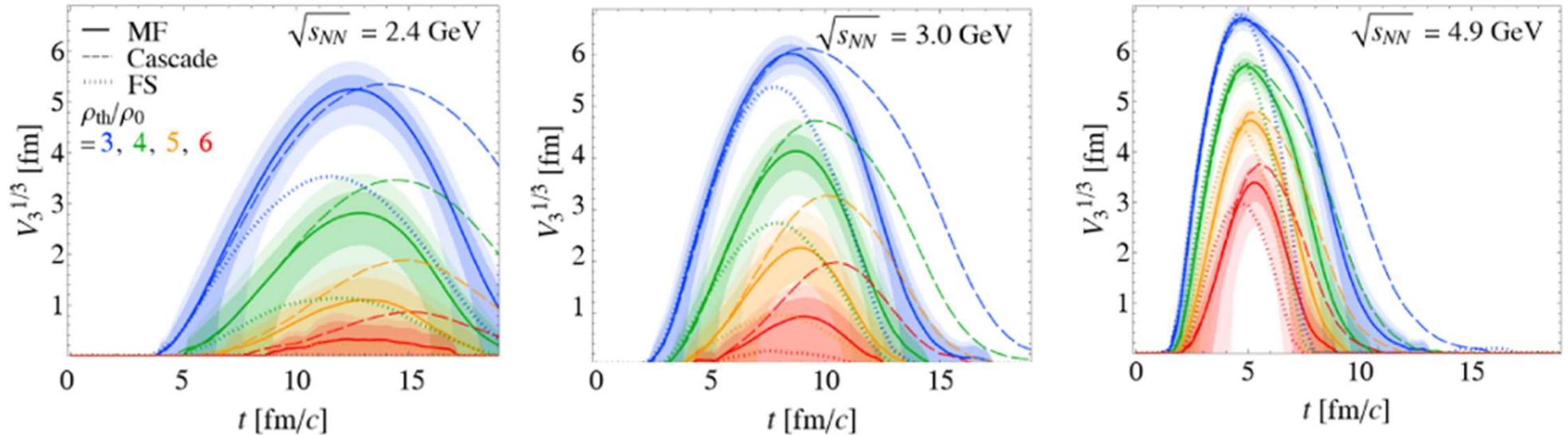
結果 (2/4): 3次元体積

✓ 3次元体積: $V_3(t) := \int_{\rho(t,x) > \rho_{th}} d^3x \gamma(t, x)$ (\Leftrightarrow 密度 ρ が閾値 ρ_{th} より大きい領域の局所静止系での体積)



結果 (2/4): 3次元体積

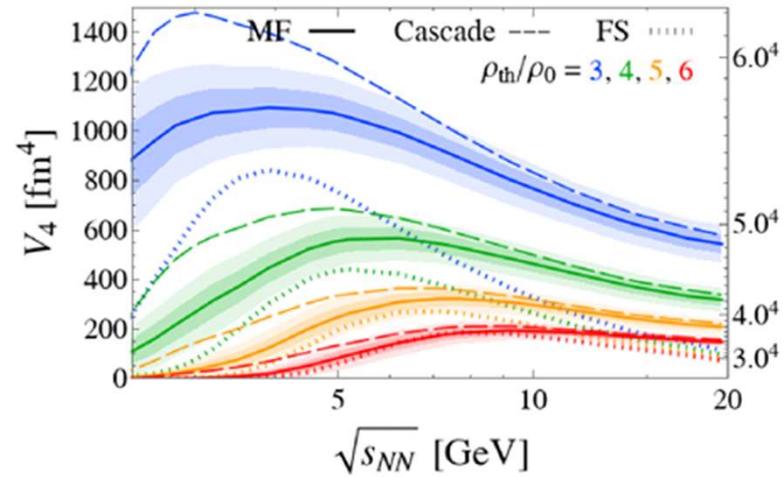
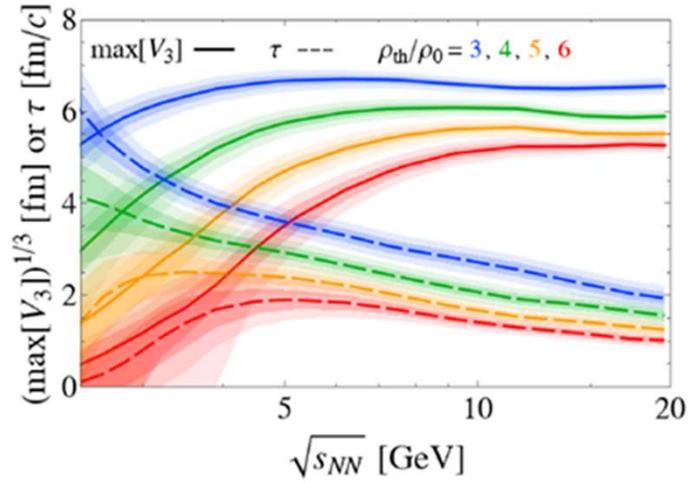
✓ 3次元体積: $V_3(t) := \int_{\rho(t,x) > \rho_{th}} d^3x \gamma(t, x)$ (\Leftrightarrow 密度 ρ が閾値 ρ_{th} より大きい領域の局所静止系での体積)



- 超高密度はゆらぎ起源 \Rightarrow 核子の大きさ程度の空間領域に限られる (例: $\rho/\rho_{th} = 6$ (赤線) @ $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ GeV)
 - 最大密度が大きいイベント選択を頑張ったとしても、そこでの物理(熱力学)が調べられるかは微妙
 - 超高密度の $V_3 = O((1 \text{ fm})^3)$ の領域で特異なことが起こったとしても、その他の大部分 $V_3 = O((5 \text{ fm})^3)$ に埋もれないくらいのシグナル and/or データ解析 が必要
- 古典的な重ね合わせで作れる"程々な"密度 $\rho \approx \sqrt{s_{NN}} [\text{GeV}] \times \rho_0$ なら、大空間体積 + 小ゆらぎで実現可
 - 「中性子星 $((2\sim3) \times \rho_0)$ よりも高密度」を「原子核の大きさ $O((6 \text{ fm})^3)$ くらいの大体積で実現」
 - \therefore 中間エネルギー重イオン衝突は、たしかに「宇宙最高密度を大空間体積で実現」
 - 高密度領域の体積は、 $\sqrt{s_{NN}}$ を大きくするほど大きくできるが、**寿命は減る**
 - \Rightarrow 疑問: 寿命と空間体積を同時に最適化するには $\sqrt{s_{NN}}$ をどうしたら良いのか? (次のスライド)

結果 (3/4): 4次元体積と寿命

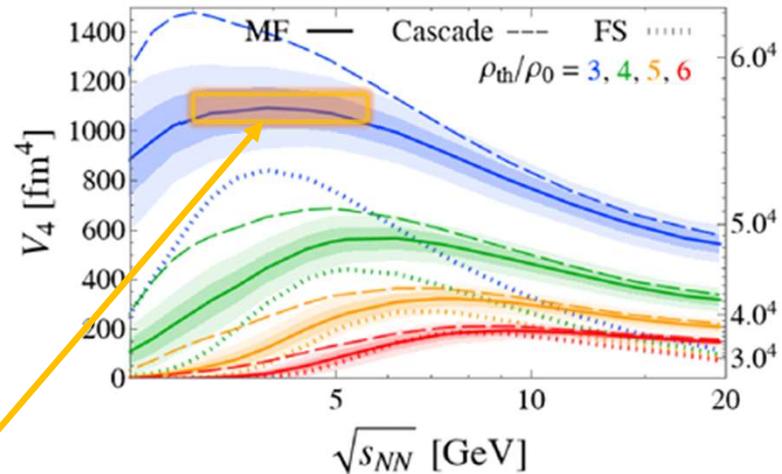
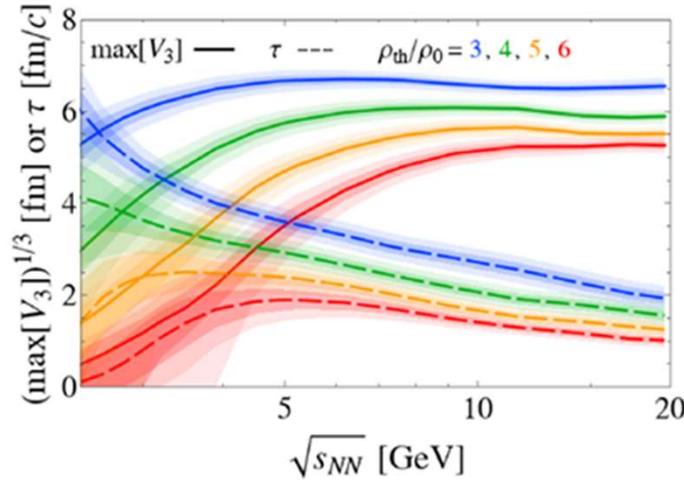
✓ 3次元体積だけじゃなくて、寿命や4次元体積も重要



- 定義: $V_4 := \int_{\rho(t,x) > \rho_{th}} dt d^3x$ と $\tau := V_4 / \max_t V_3$ ($V_4 \sim \tau \times \max V_3$ と台形近似した)

結果 (3/4): 4次元体積と寿命

✓ 3次元体積だけじゃなくて、寿命や4次元体積も重要



• **定義:** $V_4 := \int_{\rho(t,x) > \rho_{th}} dt d^3x$ と $\tau := V_4 / \max_t V_3$ ($V_4 \sim \tau \times \max V_3$ と台形近似した)

• $\sqrt{s_{NN}} \nearrow \Rightarrow V_3 \curvearrowright$ & $\tau \searrow \Rightarrow V_4$ は**プラトー**を持つ

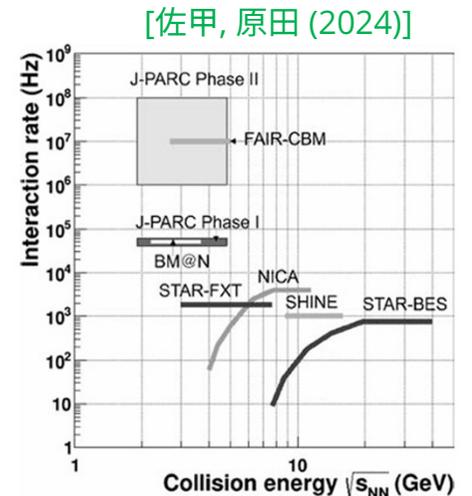
- プラトー = 寿命と空間体積が同時に(できる限り)最大化されているところ

∴ プラトー位置 = 「高密度物質を大時空体積で作るのに最適なエネルギー」

⇒ $-\rho > 3\rho_0$ の物質生成に最適エネルギーは $\sqrt{s_{NN}} = 3 \sim 5$ GeV
 (このときの対応する時空間体積は十分大きい、 $V_4 \approx (5.6 \text{ fm})^4$)

- もっと高密度も一応いけるが、 V_4 は小さくなり実験は難しくなる

- J-PARC-HIは、まさにこのプラトー領域を超高統計でカバー
 ← **大きな強み**だと思う (しかし、FAIR-CMBとの差別化は?)



- 注: 以上の議論は熱化を気にしていない (future work)。しかし、熱化なしの議論は熱化を考慮した高密度物質の「必要条件」なので、最適エネルギーは絞られるが、大変更はないと (素朴に) 期待

結果 (4/4): 温度と化学ポテンシャル

✓ 対応する温度・バリオン化学ポテンシャルは？

- 本質的に非平衡な系なので、厳密に定義できないけど、古典理想気体のEoSで推定 (e.g., $P = nT$):
⇐ 粒子分布を熱平衡分布でフィットして抜き出した結果とほとんど変わらない

目次

1. 導入: 高密度QCDと中間エネルギー重イオン衝突

2. 数値計算の結果: 密度

3. まとめ

(4. オマケ: 電磁場)

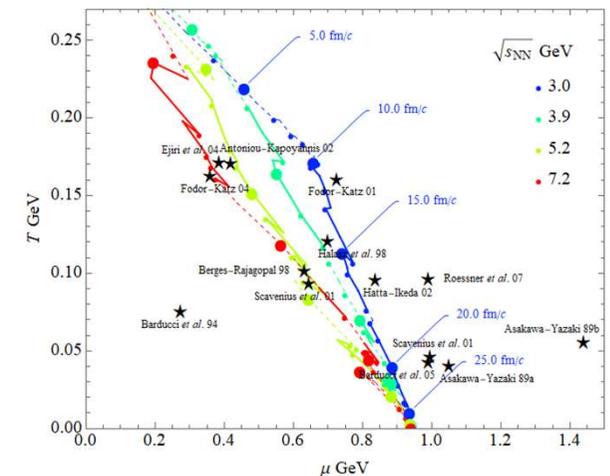
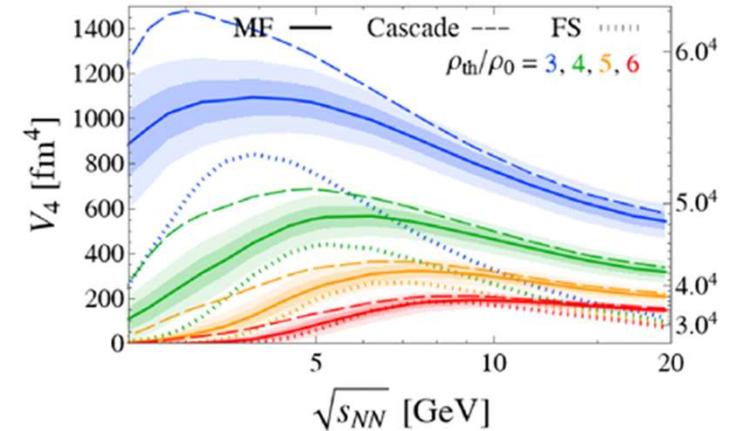
まとめ (と議論になるかもしれないコメント群)

重イオン衝突で、高密度・大体積な物質生成に最適なエネルギー帯はどこか？

数値計算
(JAM)

✓ $\sqrt{s_{NN}} = 3 \sim 5 \text{ GeV}$ がベスト

- 統計模型の予言 ($\sqrt{s_{NN}} = 6 \sim 10 \text{ GeV}$) よりも有意に小さい
 - J-PARC-HIがまさにカバーする領域で、これはうれしいニュースだと思う (ただ、FAIRもカバー)
 - $\rho \gtrsim 3\rho_0$ の密度はとても大きな時空間体積で実現できるが、それ以上の密度は時空間体積的に不利
 - ⇒ 実験的問題: S/N比がどんどん悪くなって測定が難しい
 - 理論的問題: 体積が小さくても、どれ程の小ささなら熱力学が正当化できて、意味ある物理が得られる？
 - QCD相図上の臨界点のあたりを通るので、臨界点サーチには有用が、カラー超伝導などの $\mu >$ 核子質量 の物理の直接探索は厳しそう
 - ほかの理論的課題: JAM以外でのクロスチェック、熱化の取り扱い、この結果をインプットにして何か予言、イベント選別の方法、...
- [Deng, Huang, Ma, Zhang (2020)]
- 今日は触れなかったが、電磁場(オマケ)や渦渡場の物理も中間エネルギーで楽しい
 - ⇒ 重イオン衝突を「道具」として強い場の物理という新物理探索に活かす
 - 逆に、高密度物理のシグナルに対して、強い場はノイズを与えるので、ちゃんと理解する必要



目次

1. 導入: 高密度QCDと中間エネルギー重イオン衝突
2. 数値計算の結果: 密度
3. まとめ
4. オマケ: 電磁場の物理もとても楽しい

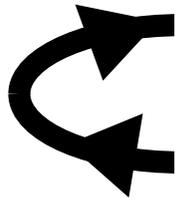
動機 (1/4): 強い電磁場の物理

- 一番最初の疑問: 物質に「XXX」すると何が起こるか?
- 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**」)
- 新しい/楽しい**非摂動現象**が起こると理論的には思っているが、**実験的検証はない**

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

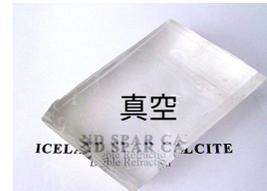


光子分裂



真空複屈折

(= 屈折率の偏極依存性)

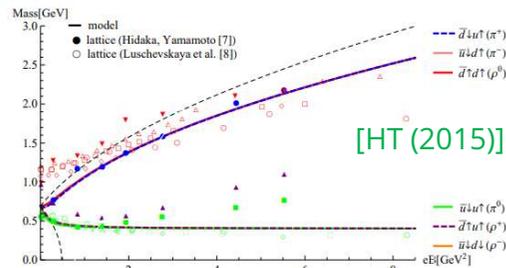


QCD・ハドロン物理への影響 ($eF/\Lambda_{\text{QCD}}^2 \gtrsim 1$)

例1) ハドロンの性質:

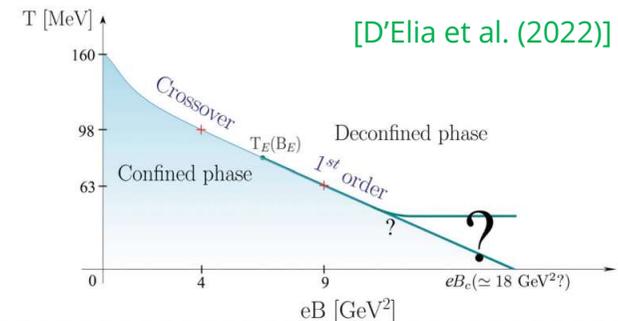
e.g., 質量, 電荷分布, 崩壊モード, ...

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

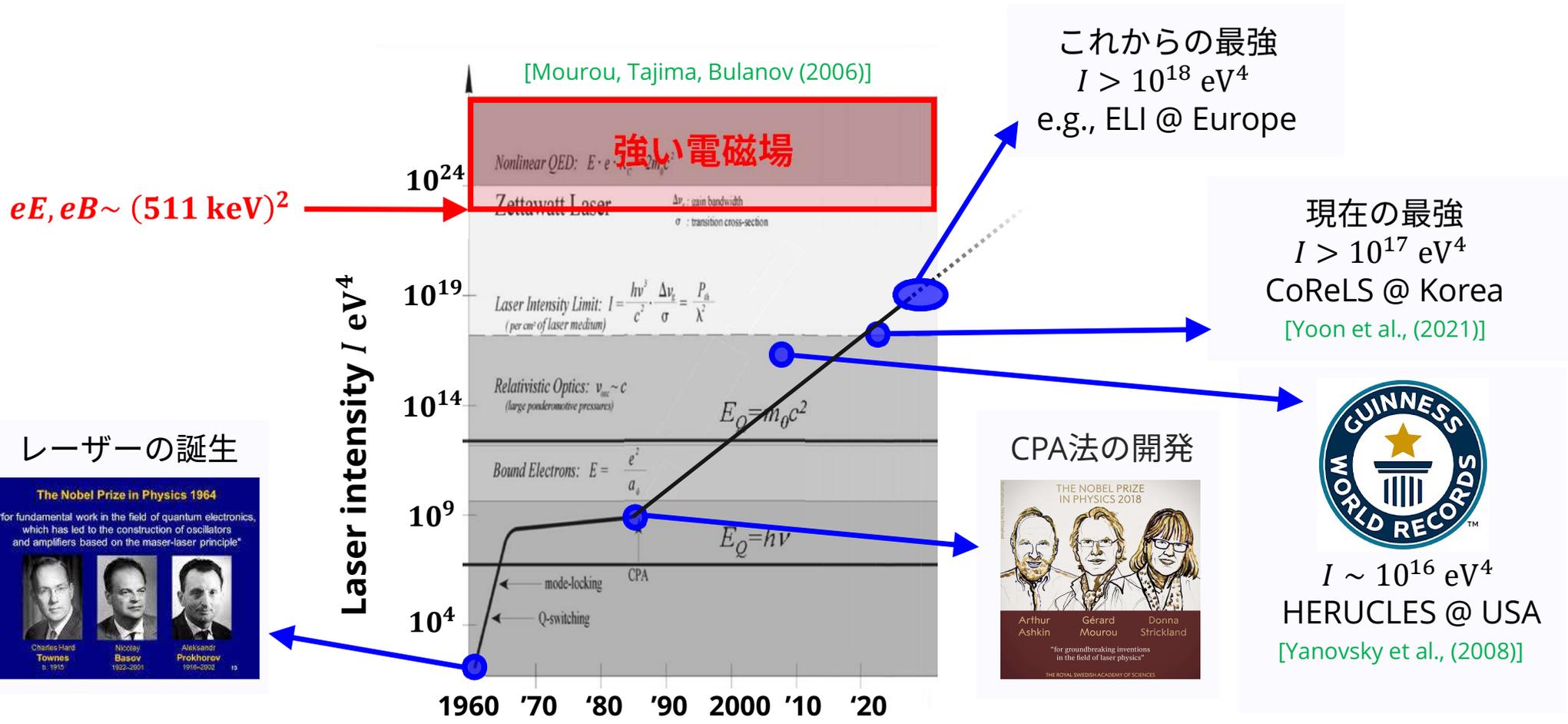


例2) QCD相図

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



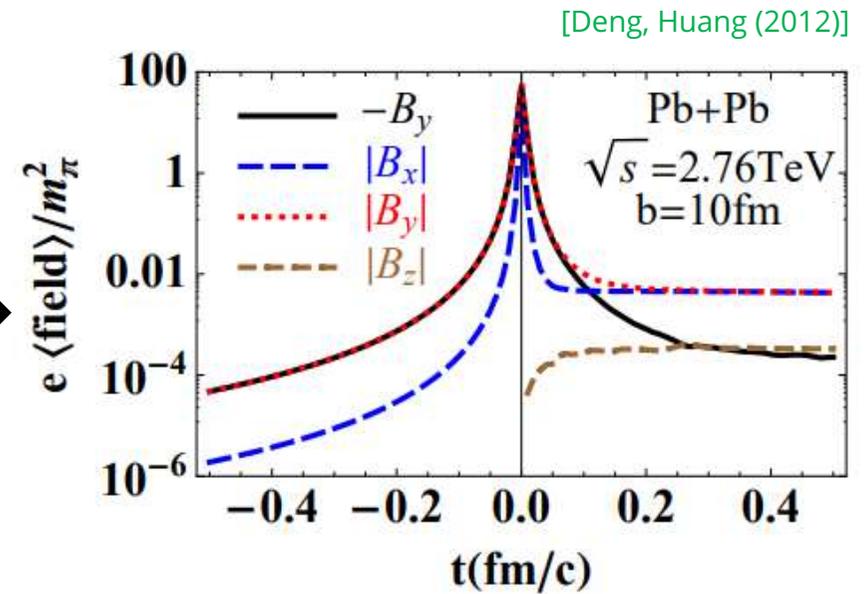
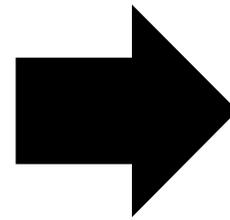
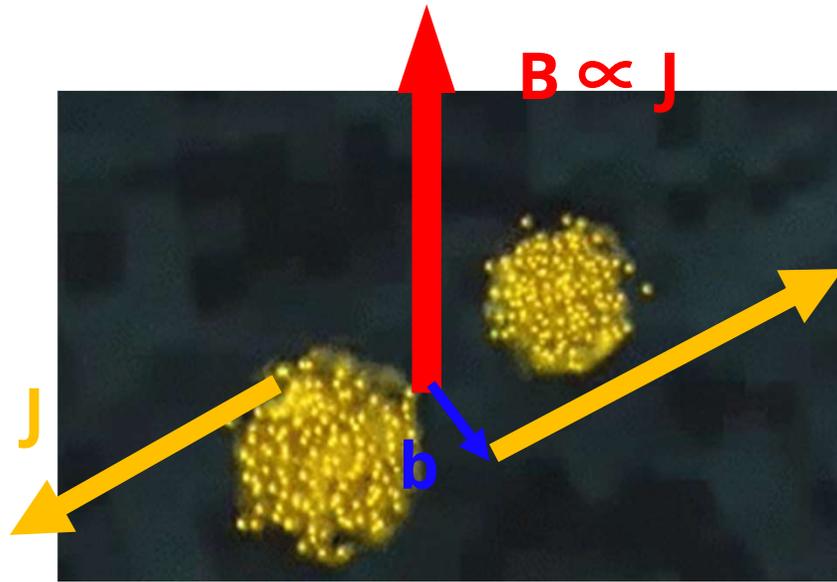
動機 (2/4): 先行研究 @ 高強度レーザー



⇒ まだまだ桁が足りないので、新しい実験方法が欲しい

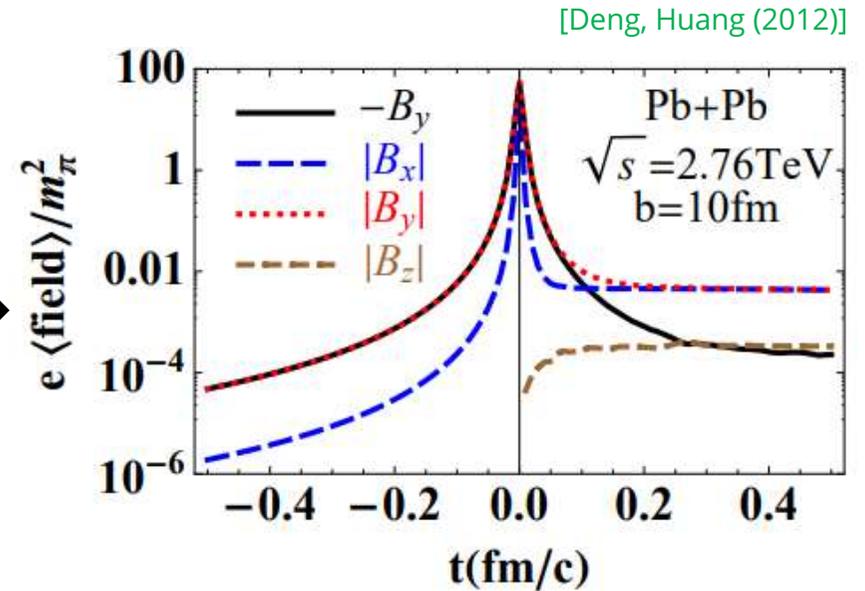
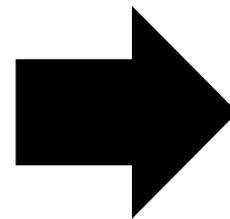
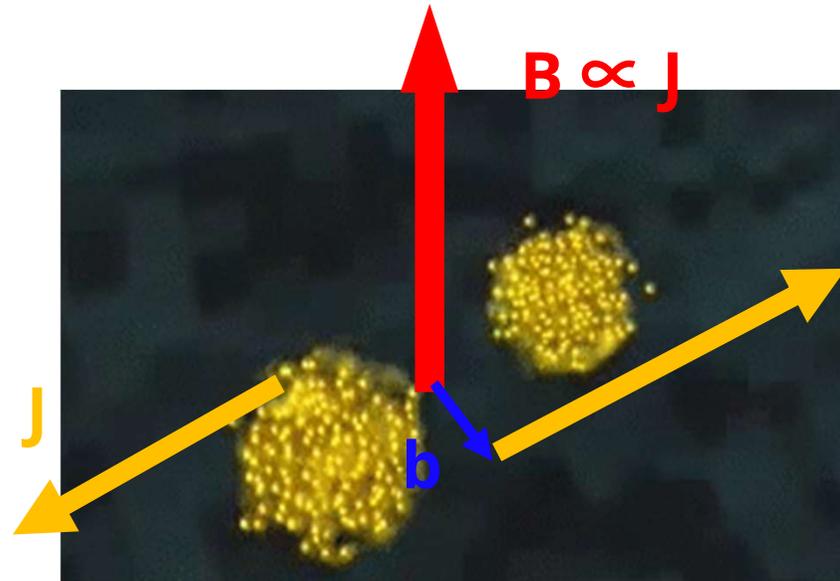
動機 (3/4): 重イオン衝突での強い場の物理

- 高エネルギーでは、ここ10年くらいでたくさん議論された

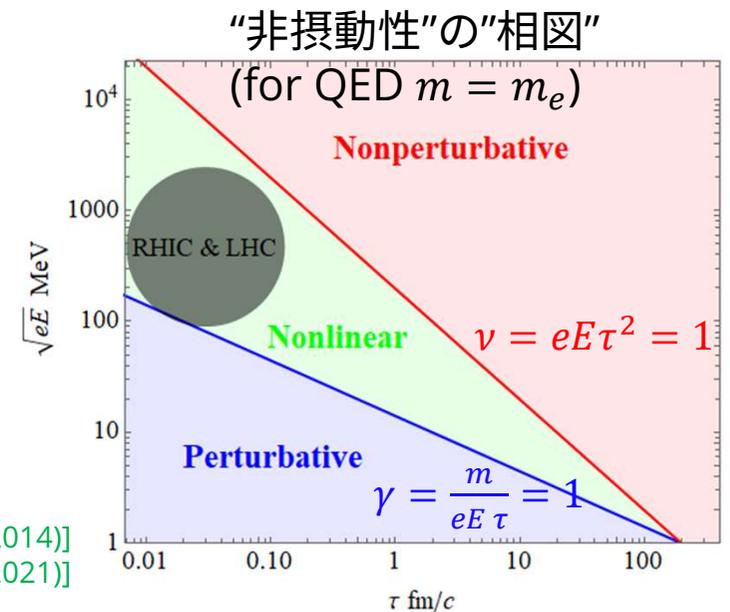
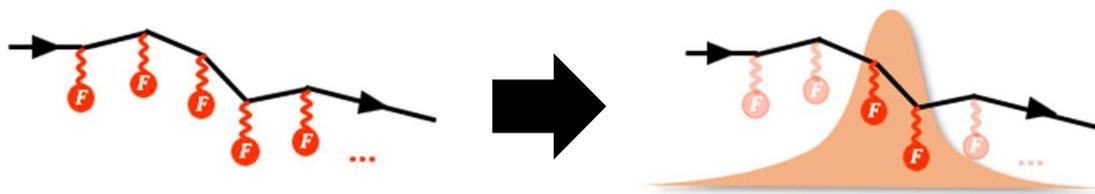


動機 (3/4): 重イオン衝突での強い場の物理

- 高エネルギーでは、ここ10年くらいでたくさん議論された



- しかし、寿命が短すぎで非自明なことは起きない



[HT, Fujiii, Itakura (2014)]

[HT, 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、バリオンストッピングで長い時間 $O(5 \text{ fm}/c)$ くらいくっつく

• 高電荷密度 \Rightarrow 強いクーロン場ができるはず

∴ 大雑把なオーダー推定: $eE \sim \frac{Z\alpha}{r^2} \sim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2$

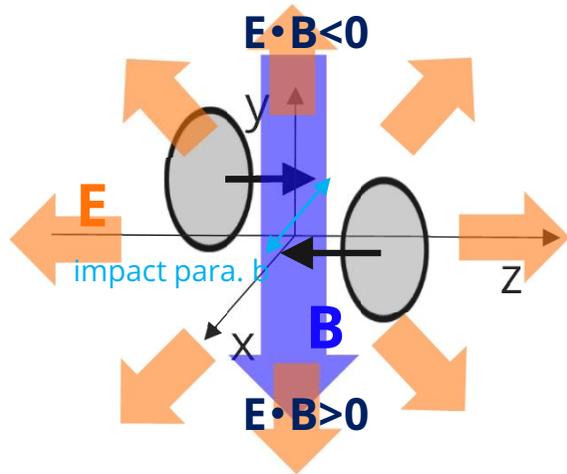
• 高エネルギーに比べ、場は $(1/10)^2$ 倍くらい弱いけど、寿命は100倍以上長い

∴ 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。

⇒ 本研究でやりたいこと:

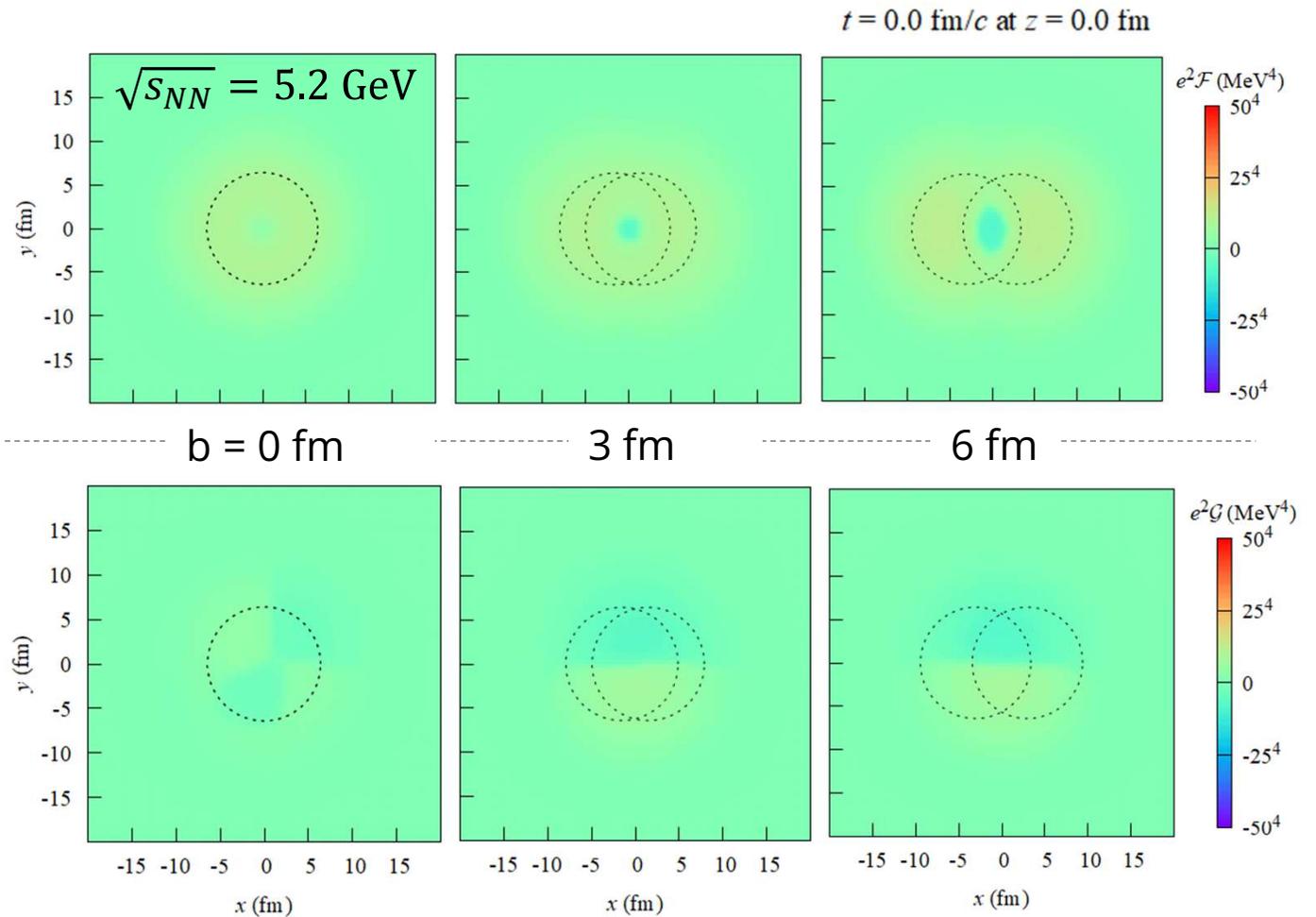
中間エネルギーでの電磁場は実際どれくらいか、密度同様にJAMで調べよう

結果(1/2): 電磁場のプロファイル



$$\mathcal{F} = E^2 - B^2$$

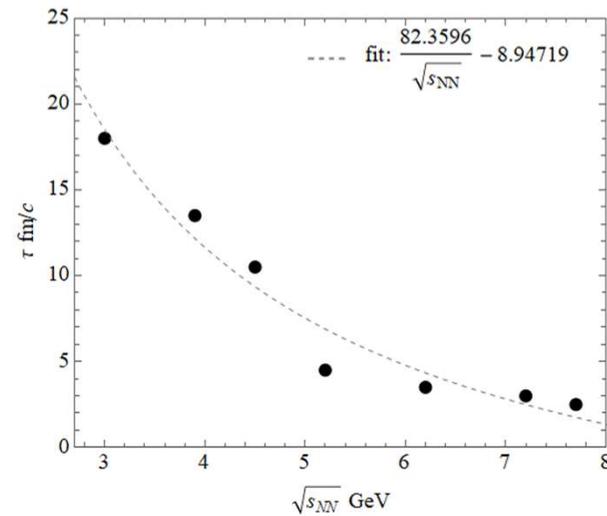
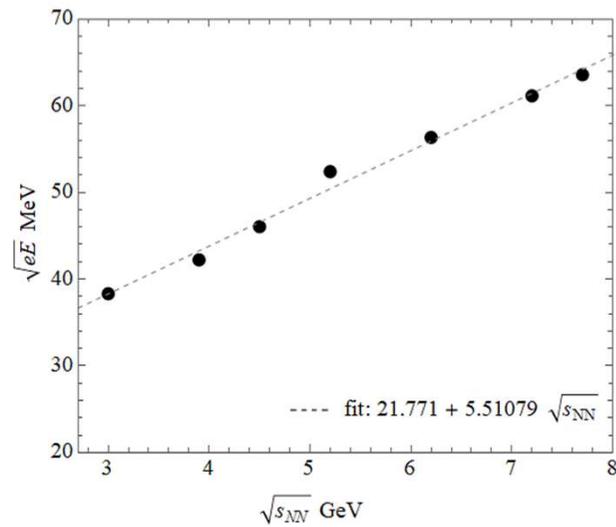
$$\mathcal{G} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$



- 50~100 MeV程度のそこそこ強い電磁場が生成 (次のスライドでもう少し詳しく)
- 電場は、中心付近が0のドーナツ型の配位
 ⇐ 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
- インパクトパラメータを増やすと、磁場が中心付近に現れる
 ⇐ が、電場の方が空間的にはいつでも大きい。つまり、磁場よりも電場の物理が重要
- “トポロジカル”な電磁場配位 $g = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \neq 0$ が実現
 ⇒ アノマリー/カイラルな物理を引き起こすおもしろい状況 (cf. ABJ relation $\partial_\mu J_5^\mu \propto \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$)

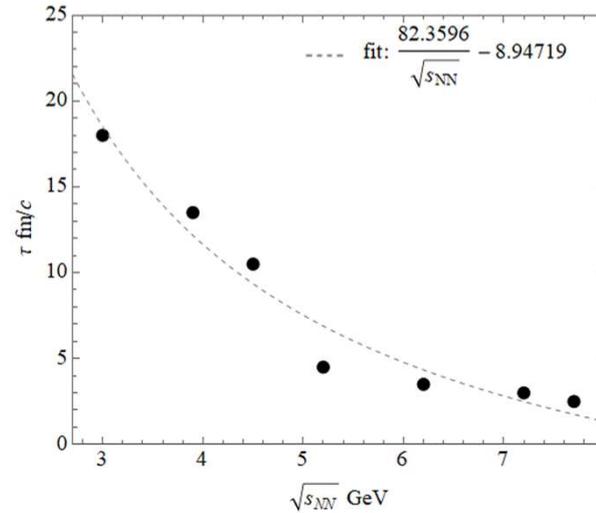
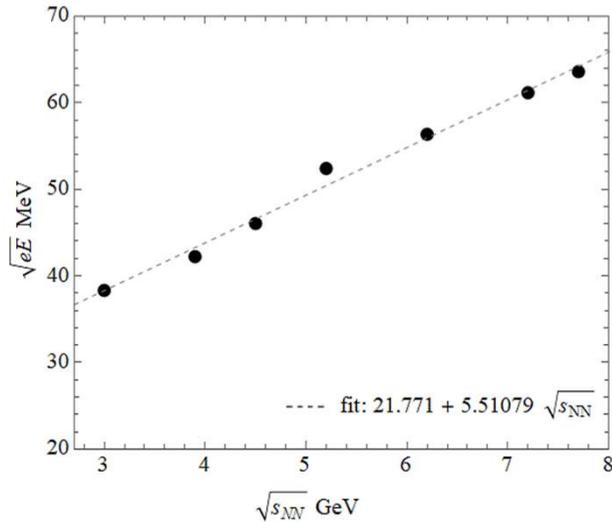
結果 (2/2): もう少し定量的な解析

- ✓ 電場のピーク値と寿命(FWHM)を解析 (簡単のため、中心衝突にfocus)



結果 (2/2): もう少し定量的な解析

✓ 電場のピーク値と寿命(FWHM)を解析 (簡単のため、中心衝突にfocus)



- そこそこ強い電場 O(50MeV) が、かなり長い寿命 O(10 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の新しい舞台になる

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 = 影響を与える

⇒ 電磁プローブ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: QCD相図への電磁場の影響?

cf. 格子QCDを使った計算 [Endrodi, Marco, (2023)]

“非摂動性”の“相図”
(for QED $m = m_e$)

