

中間エネルギーの重イオン衝突 における強い電磁場の物理

田屋 英俊
(理研iTHEMS)

言いたいこと

$\sqrt{s_{NN}} = 0(1-10 \text{ GeV})$ の中間重イオン衝突は強い電磁場の物理的にもおもしろい (かも)

- 昨年10月のREIMEIワークショップの掘り下げ
- ハドロン輸送模型(JAM)を用いた比較的現実的な電磁場強度の推定
⇒ $O(10 \text{ MeV})$ 以上のそこそこ強い電磁場が長寿命 $O(10 \text{ fm}/c)$ できる
⇒ 非線形QED研究の良い舞台かも。QCD過程への影響も無視できないだろう
- しかし、良い物理過程/観測量が現時点で頭にあるわけじゃないし、よくわからないこともたくさんあるので、ぜひ議論してください

1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

- 電磁場の強度・寿命と非摂動性

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

- ハドロン輸送模型(JAM)を用いた電磁場強度の推定

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

(4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化)

[HT, Ironside (Curtin), in progress]

1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), [HT](#), in progress]

4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化

[[HT](#), Ironside (Curtin), in progress]

5. まとめ

強い電磁場という極限環境

始状態

終状態



真空
(=電磁場なし)

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>

強い電磁場という極限環境

始状態

終状態



時間発展

真空
(=電磁場なし)

弱い電磁場
($eF/m^2 \lesssim 1$)

強い電磁場
($eF/m^2 \gtrsim 1$)

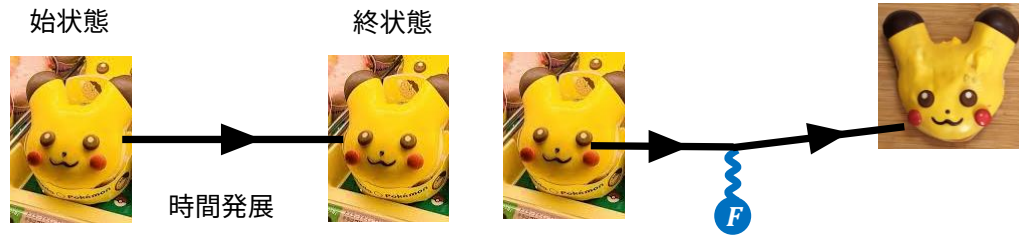
画像は以下から借用

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

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

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

強い電磁場という極限環境



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
⇒ 摂動的
⇒ 実験・理論的
によくわかっている

例) 電子の異常磁気モーメント $a := \frac{g-2}{2}$
 $a(\text{theor.}) = 1159652182.03 \dots \times 10^{-12}$
 $a(\text{exp.}) = 1159652180.73 \dots \times 10^{-12}$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

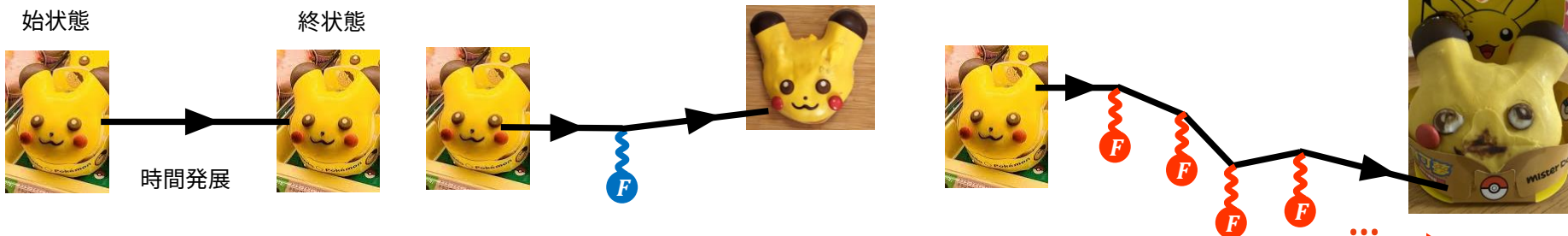
画像は以下から借用

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

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

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

強い電磁場という極限環境



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

⇒ 摂動的

⇒ 実験・理論的
によくわかっている

めちゃくちゃ違う！

⇒ 非摂動的

⇒ 実験・理論的に
あまり開拓されていない

例) 電子の異常磁気モーメント $a := \frac{g-2}{2}$

$a(\text{theor.}) = 1159652182.03 \dots \times 10^{-12}$

$a(\text{exp.}) = 1159652180.73 \dots \times 10^{-12}$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

画像は以下から借用

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

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

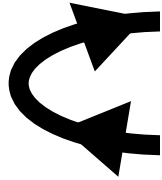
<https://twitter.com/1007hiro/status/1274596230136344576>

強い電磁場の物理

✓ 新しいQED素過程 ($eF/m_e^2 \gtrsim 1$)

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

例) Schwinger機構

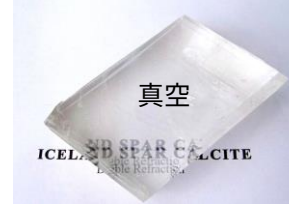


光子分裂



真空複屈折

(= 屈折率の偏極依存性)

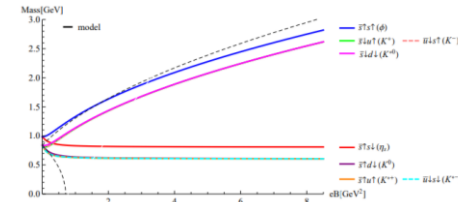
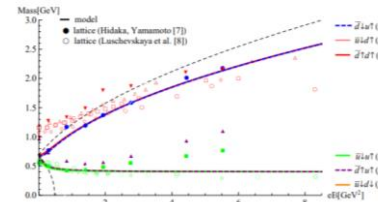


✓ QCDやハドロン物理への影響 ($eF/\Lambda^2 \gtrsim 1$ (or 非閉じ込め相 $\Rightarrow eF/m_{\text{current } q \text{ mass}}^2 \gtrsim 1$))

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)]



[HT (2015)]

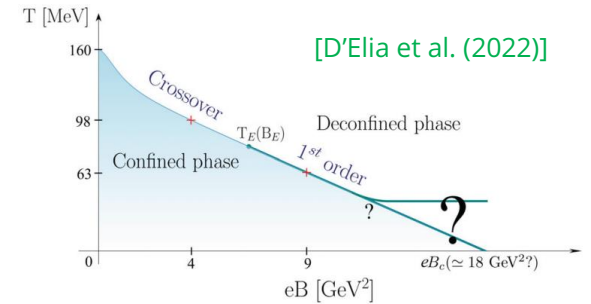
例2) QCD相図

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

例3) その他: 異常輸送現象,

(カラー電磁場に対する) グラズマやString breaking, ...

Many reviews, e.g., [Kharzeev, Liao, Voloshin, Wang (2016)] [Hattori, Huang (2017)] ...



[D'Elia et al. (2022)]

いろいろ理論的に議論されてるが、実験的に見つかったことは (ほぼ) ない

「超」強力な電磁場が必要

✓ 最低必要な強さ: $eE, eB \text{ MeV}^2 > m_e^2 = (0.511 \text{ MeV})^2 \approx 0(10^{28} \text{ W/cm}^2)$

LED $\approx 10^{-5} \text{ W/cm}^2$



虫眼鏡 $\approx 10^3 \text{ W/cm}^2$



レーザー加工機 $< 10^{10} \text{ W/cm}^2$



「超」強力な電磁場が必要

✓ 最低必要な強さ: $eE, eB \text{ MeV}^2 > m_e^2 = (0.511 \text{ MeV})^2 \approx O(10^{28} \text{ W/cm}^2)$

LED $\approx 10^{-5} \text{ W/cm}^2$



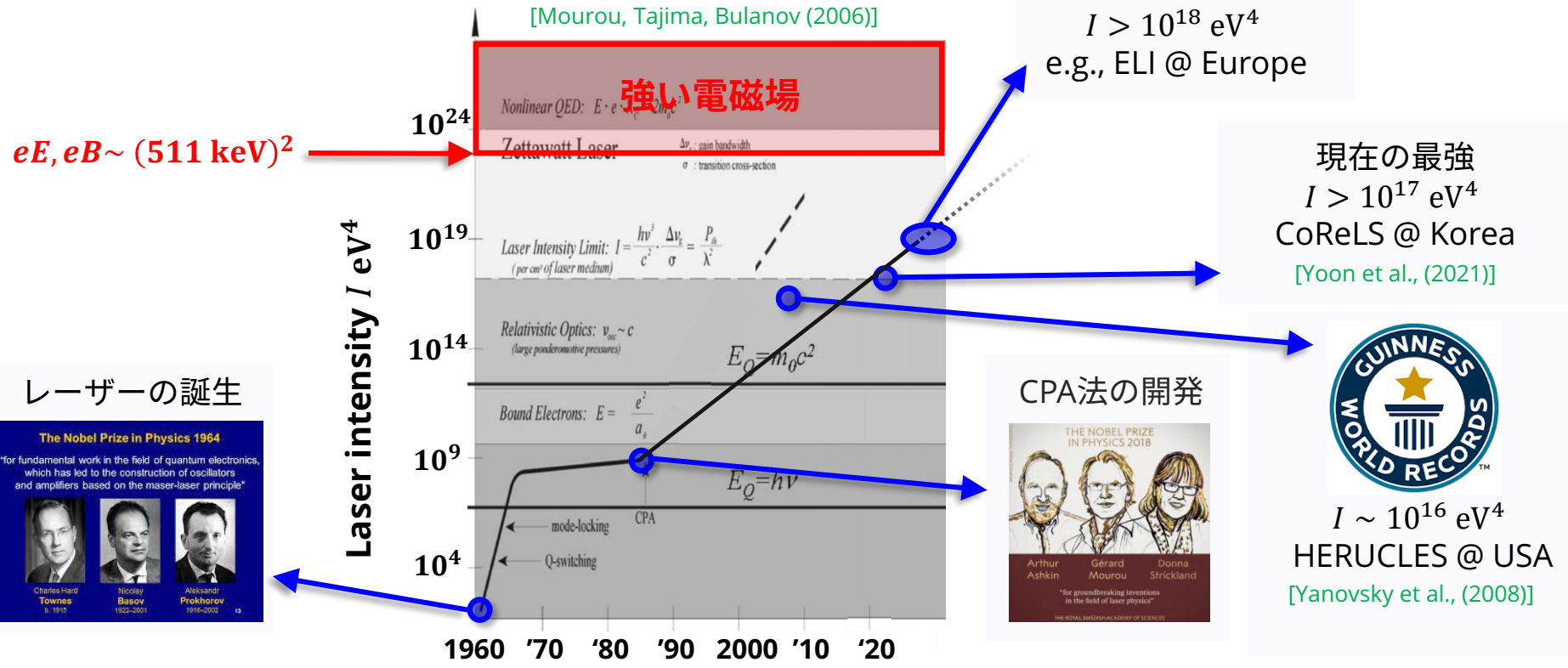
虫眼鏡 $\approx 10^3 \text{ W/cm}^2$



レーザー加工機 $< 10^{10} \text{ W/cm}^2$



✓ (地上の)実験は高強度レーザーがけん引している



「超」強力な電磁場が必要

✓ 最低必要な強さ: $eE, eB \text{ MeV}^2 > m_e^2 = (0.511 \text{ MeV})^2 \approx O(10^{28} \text{ W/cm}^2)$

LED $\approx 10^{-5} \text{ W/cm}^2$



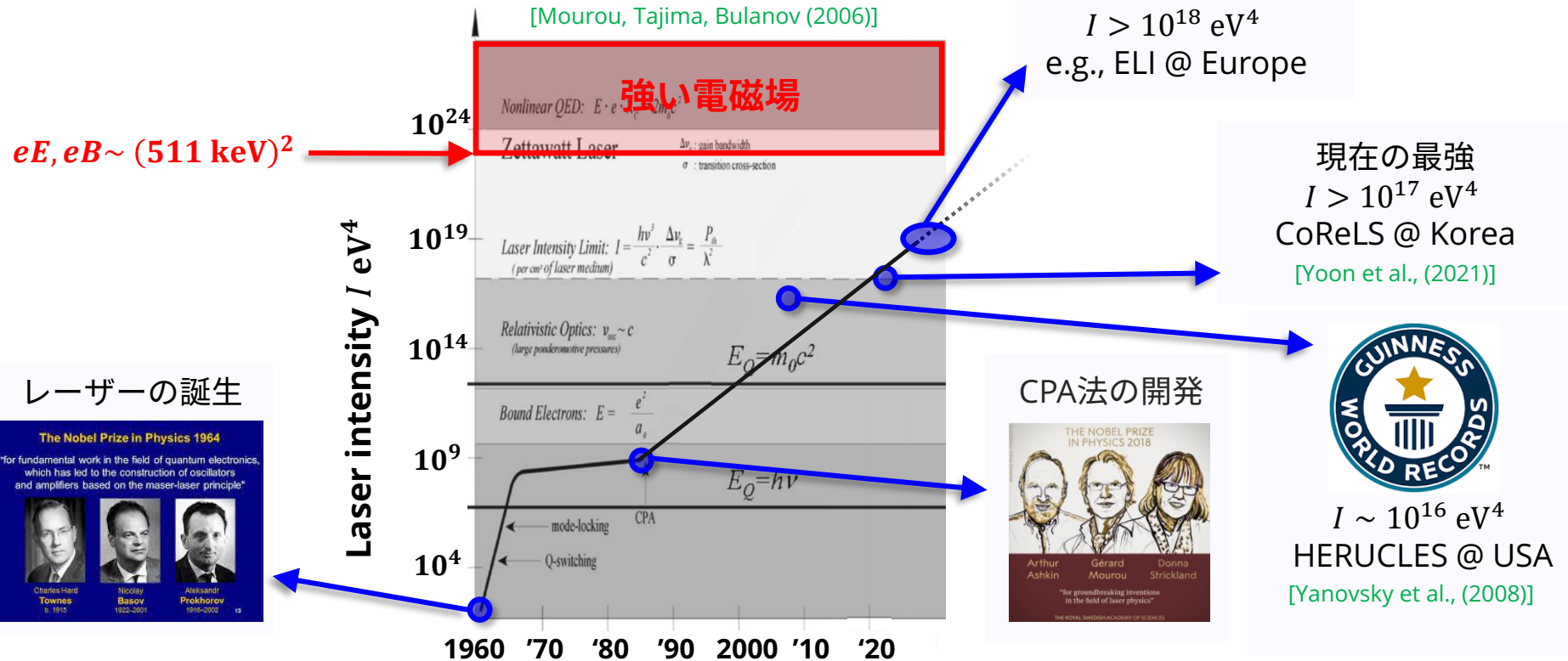
虫眼鏡 $\approx 10^3 \text{ W/cm}^2$



レーザー加工機 $< 10^{10} \text{ W/cm}^2$



✓ (地上の)実験は高強度レーザーがけん引している



まだまだ弱い。ここに重イオン衝突が新しい機会を与えるかも？

1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

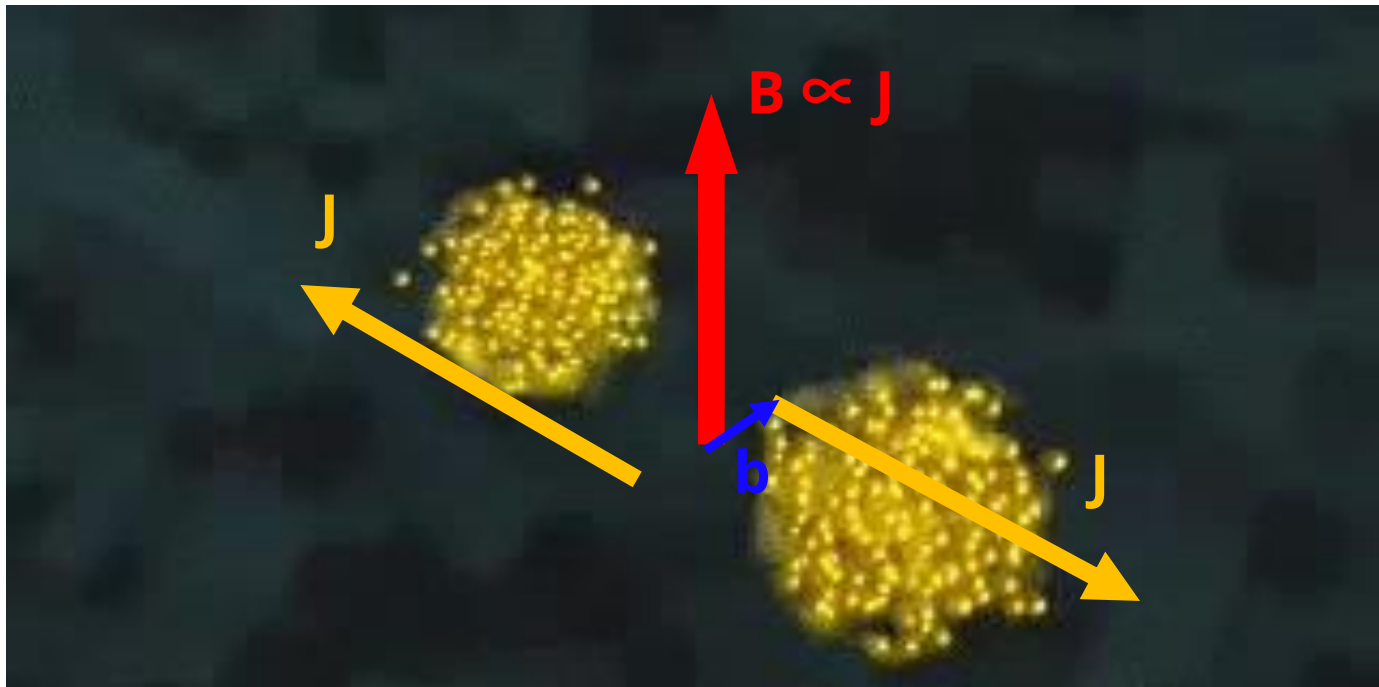
[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化

[HT, Ironside (Curtin), in progress]

5. まとめ

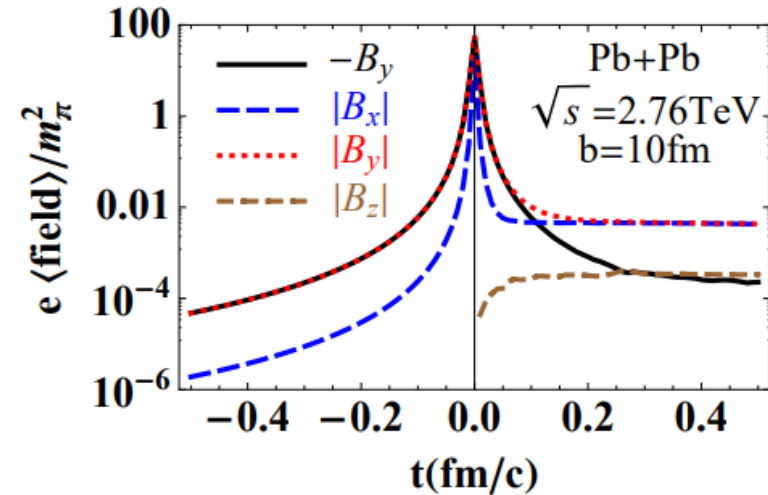
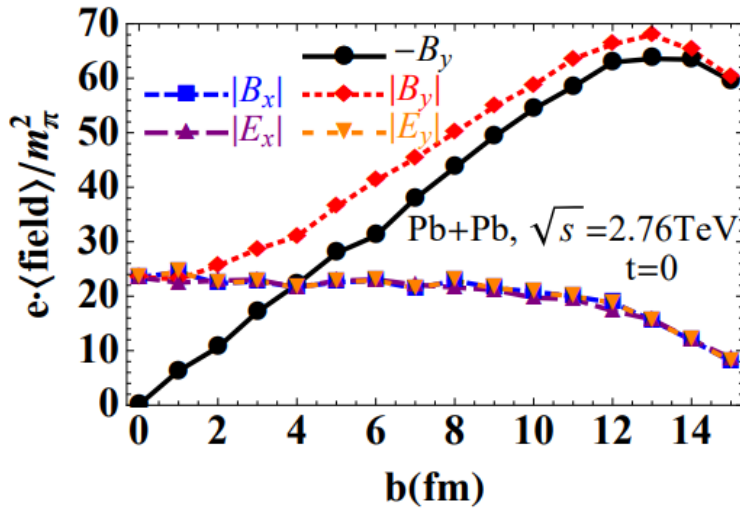
「高」エネルギー重イオン衝突の強い電磁場



Animation stolen from Internet

✓ めちゃくちゃ強い磁場が生成される

「高」エネルギー重イオン衝突の強い電磁場



[Deng, Huang (2012)]

See also [Bzdak, Skokov (2012)] [Hattori, Huang (2016)]

✓ めちゃくちゃ強い磁場が生成される

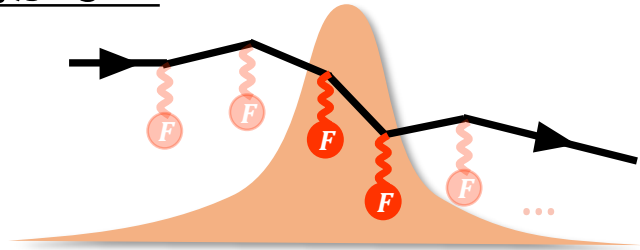
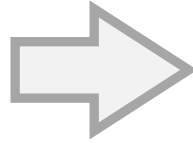
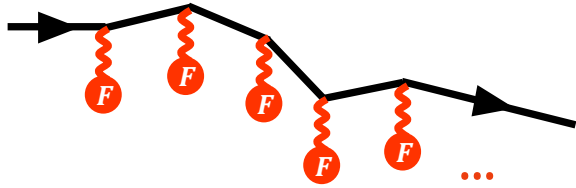
長所: 超強い $eB \gg \Lambda_{\text{QCD}}^2$ (田屋が知る限り、現宇宙で最強)

短所: 寿命が超短い ($\tau \ll 1 \text{ fm}/c$)

⇒ 物理の「非摂動性」に大きく影響する

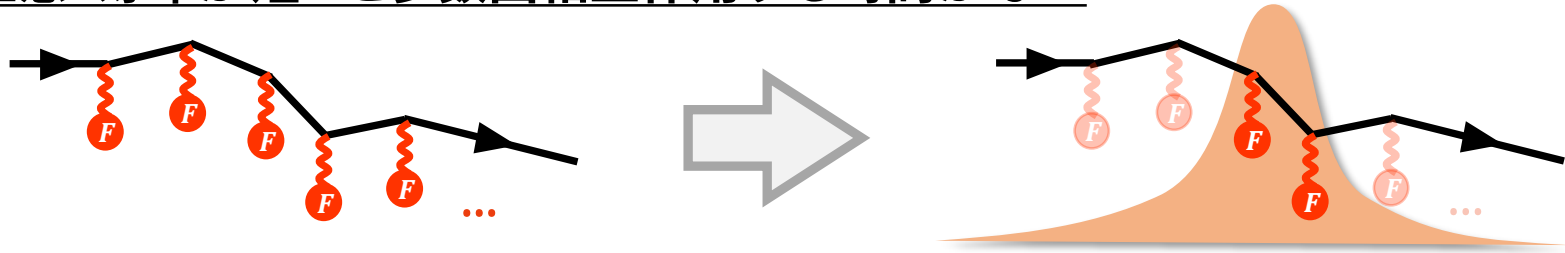
短寿命 ⇒ 摂動的 (NOT 非摂動的)

✓ 直感: 寿命が短いと多数回相互作用する時間がない



短寿命 ⇒ 摂動的 (NOT 非摂動的)

✓ 直感: 寿命が短いと多数回相互作用する時間がない



✓ 強い電磁場の物理の“相図” (例: 有限寿命電場による真空からの粒子生成)

[HT, Fujiii, Itakura (2014)]
[HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2021)]

- 3つの次元量が系を特徴づける: eE, τ, m
⇒ 2つの「無」次元量で物理は決まる

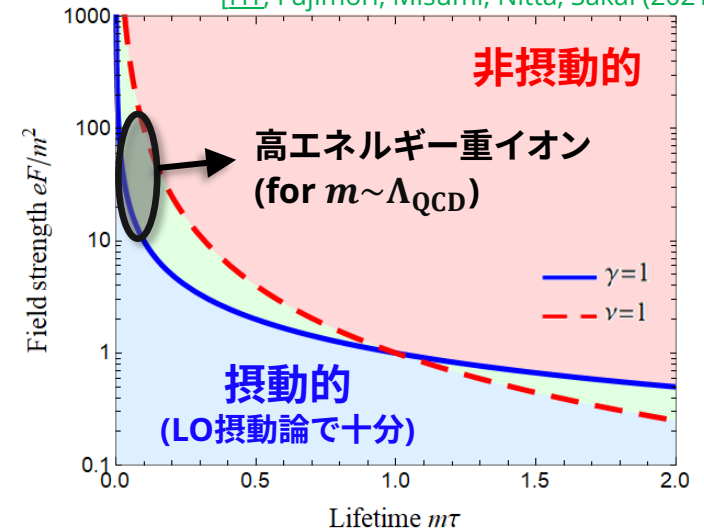
$$\gamma = \frac{m}{eE\tau} = \frac{\text{(系の典型的なエネルギー)}}{\text{(場がした仕事)}} = \text{(仕事の典型的な大きさ)}$$

$$\nu = \frac{eE\tau}{1/\tau} = \frac{\text{(場がした仕事)}}{\text{(光子のエネルギー)}} = \text{(関与光子数)}$$

- $\gamma \ll 1, \nu \gg 1$ のとき非摂動的

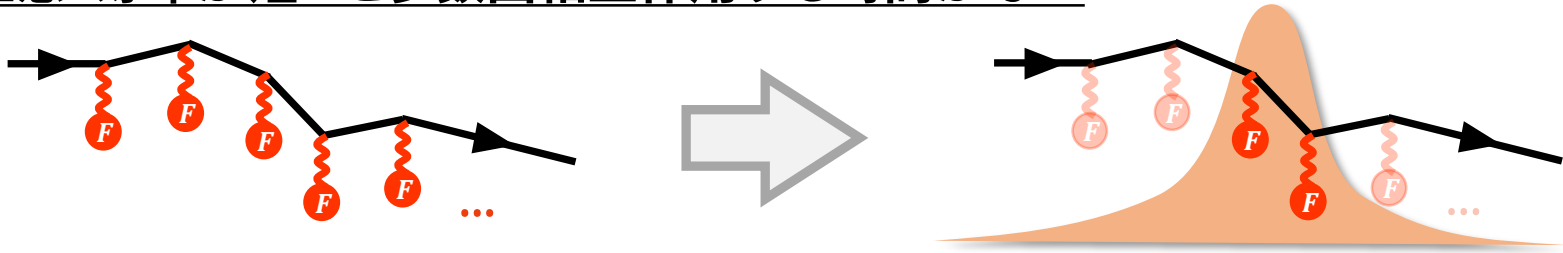
⇐ しばしば γ の大小で決まる、と文献に書いてあるが、これはウソ ($eE/m^2 \ll 1$ のときしか正しくない)

- 高エネルギー重イオン衝突: $eF \sim (1 \text{ GeV})^2, \tau \sim 0.1 \text{ fm}/c \Rightarrow \gamma \sim \begin{cases} 10^{-3} (m = \Lambda_{\text{QCD}}) \\ 10^{-5} (m = m_e) \end{cases}, \nu \sim 0.1$



短寿命 ⇒ 摂動的 (NOT 非摂動的)

✓ 直感: 寿命が短いと多数回相互作用する時間がない



✓ 強い電磁場の物理の“相図” (例: 有限寿命電場による真空からの粒子生成)

[HT, Fujiii, Itakura (2014)]
[HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2021)]

- 3つの次元量が系を特徴づける: eE, τ, m
⇒ 2つの「無」次元量で物理は決まる

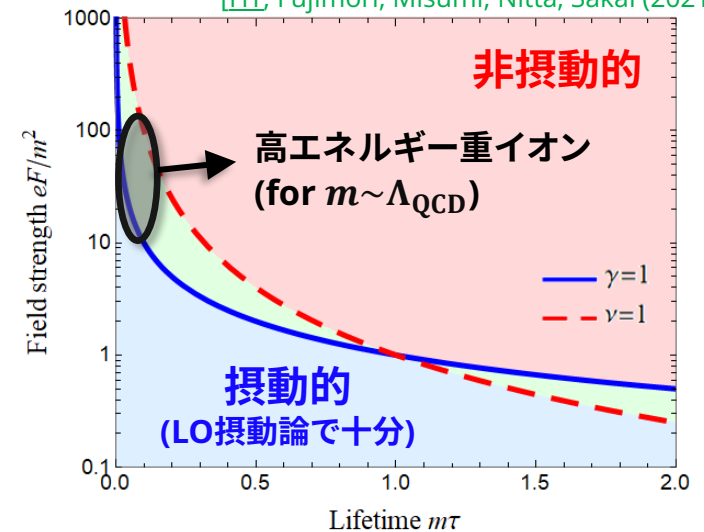
$$\gamma = \frac{m}{eE\tau} = \frac{\text{(系の典型的なエネルギー)}}{\text{(場がした仕事)}} = \text{(仕事の典型的な大きさ)}$$

$$\nu = \frac{eE\tau}{1/\tau} = \frac{\text{(場がした仕事)}}{\text{(光子のエネルギー)}} = \text{(関与光子数)}$$

- $\gamma \ll 1, \nu \gg 1$ のとき非摂動的

⇐ しばしば γ の大小で決まる、と文献に書いてあるが、これはウソ ($eE/m^2 \ll 1$ のときしか正しくない)

- 高エネルギー重イオン衝突: $eF \sim (1 \text{ GeV})^2, \tau \sim 0.1 \text{ fm}/c \Rightarrow \gamma \sim \begin{cases} 10^{-3} (m = \Lambda_{\text{QCD}}) \\ 10^{-5} (m = m_e) \end{cases}, \nu \sim 0.1$



⇒ 高エネルギー重イオン衝突では非摂動物理は見えない(だろう...)

(実際、今のところ、低次の摂動計算の結果と無矛盾。例) 線形Breit-Wheeler過程の観測 [STAR (2019)]

1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), [HT](#), in progress]

4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化

[[HT](#), Ironside (Curtin), in progress]

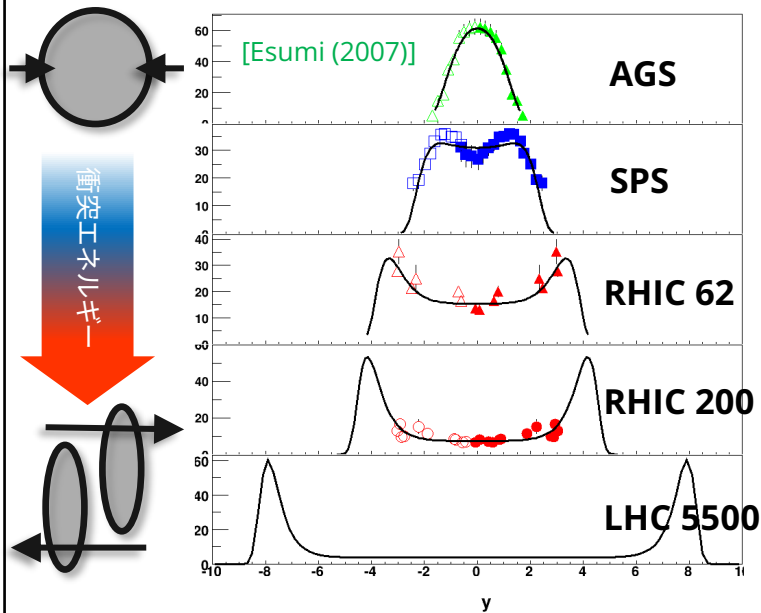
5. まとめ

中間エネルギー衝突における強い電磁場

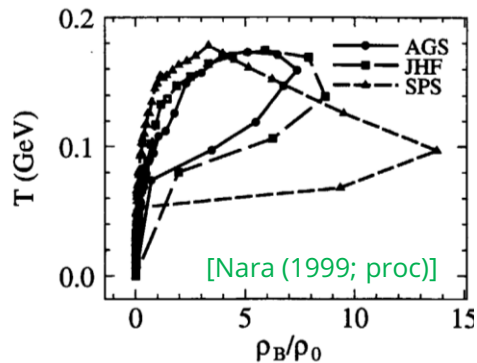
✓ エネルギー低 ⇒ ランダウ描像

• 実験: 陽子数のラピディティ分布 dN/dy

• 輸送模型を使ったシミュレーション



(運動エネルギー ⇒ $O(10 \text{ GeV/核子})$)



Time evolution of baryon density and effective temperature in Au+Au at 11.6 AGeV/c from 0 fm/c to 20 fm/c by 1.0 fm/c step, Au+Au at 25 AGeV, and Pb+Pb at 158 AGeV, respectively.

$O(10 \text{ MeV/核子})$

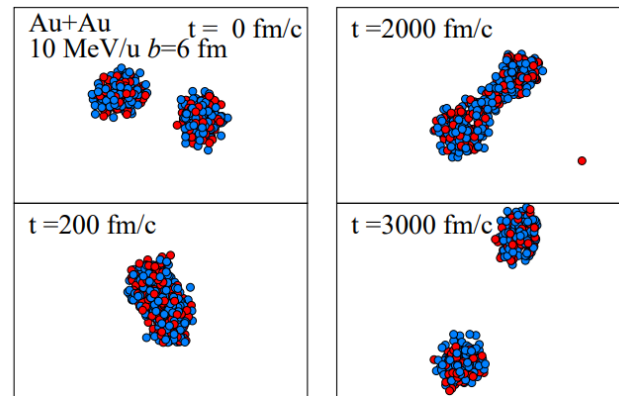


Figure 1. Snapshot of $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ at $E_{\text{lab}} = 10 \text{ MeV/nucleon}$ $b = 6 \text{ fm}$. The time indicated in each panel is not from the contact of two nuclei but indicates only that of the simulation.

[Maruyama, Bonasera, Papa, Chiba (2002)]

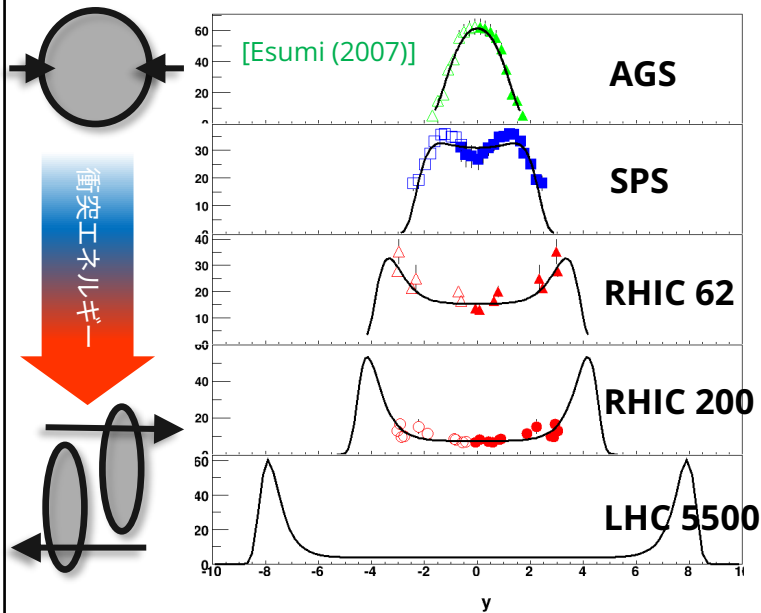
⇒ 非常に密な物質がそこそこ長い時間形成される $O(10 - 1000 \text{ fm/c})$

中間エネルギー衝突における強い電磁場

✓ エネルギー低 ⇒ ランダウ描像

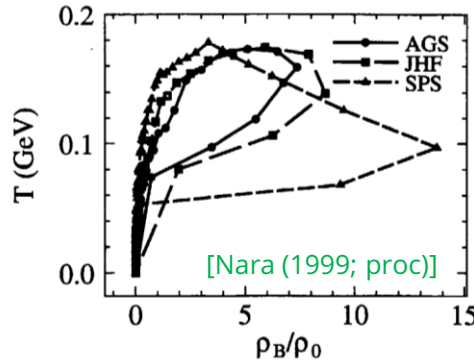
• 実験: 陽子数のラピディティ分布 dN/dy

• 輸送模型を使ったシミュレーション



(運動エネルギー ⇒ O(10 GeV/核子))

O(10 MeV/核子)



Time evolution of baryon density and effective temperature in Au+Au at 11.6 AGeV/c from 0 fm/c to 20 fm/c by 1.0 fm/c step, Au+Au at 25 AGeV, and Pb+Pb at 158 AGeV, respectively.

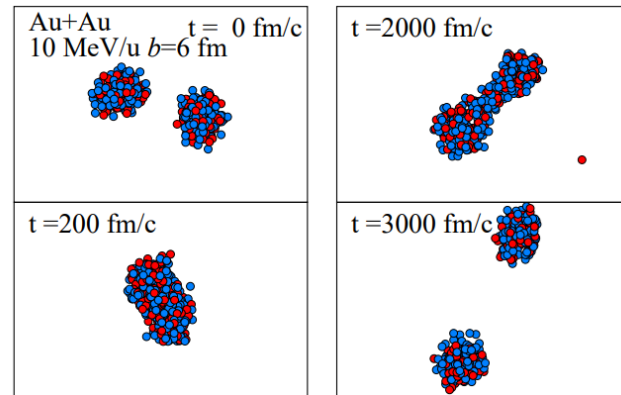


Figure 1. Snapshot of $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ at $E_{\text{lab}} = 10$ MeV/nucleon $b = 6$ fm. The time indicated in each panel is not from the contact of two nuclei but indicates only that of the simulation.

[Maruyama, Bonasera, Papa, Chiba (2002)]

⇒ 非常に密な物質がそこそこ長い時間形成される $O(10 - 1000 \text{ fm/c})$

⇒ 電荷密度も大きい ("High Z atom" s.t. $Z \gtrsim 1/\alpha$) ので、強いクーロン電場が形成される

• 高エネルギー ⇒ 電流駆動の磁場 vs 低/中間エネルギー ⇒ 電荷駆動の電場

• (かなり雑な)オーダー推定: $eE \sim \frac{Z\alpha}{r^2} \sim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2$

⇒ $\gamma = \frac{m}{eE\tau} \lesssim \begin{cases} 10^{-1} (m = \Lambda_{\text{QCD}}) \\ 10^{-4} (m = m_e) \end{cases} \sim 0.1, \nu = eE\tau^2 \gtrsim 10 \Rightarrow \text{QED/QCDともに非摂動的} \left\{ \begin{array}{l} \gamma \ll 1 \\ \nu \gg 1 \end{array} \right. \text{なり得る}$

∴ 非線形QED的におもしろいかも。ハドロン/QCD物理にも影響するかも ⇒ まじめに検討しよう

ハドロン輸送模型(JAM)による推定 (1/5)

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

✓ 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2体散乱の重ね合わせ + 非弾性散乱チャンネル

低エネルギー: 共鳴 ($E_{CM} \lesssim 4 \text{ GeV}$)

高エネルギー: PYHITA → ストリング破碎 ($E_{CM} \gtrsim 4 \text{ GeV}$)

ミニジェット ($E_{CM} \gtrsim 20 \text{ GeV}$)

- RHICエネルギー $O(100 \text{ GeV})$ 以下の低エネルギー領域で比較的信頼できる
- とにかく、系の荷電粒子の位相分布の時間発展が求まる

✓ 位相分布が求めれば電磁場は計算可

$$A^\mu(x^0, \mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d^3x' \frac{J^\mu(x^0 - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}$$

JAMから読み取れる

注1: 点粒子に対するLWポテンシャルは使わない

← 粒子生成があると素朴なLienard-Wiechertポテンシャルは適用不可

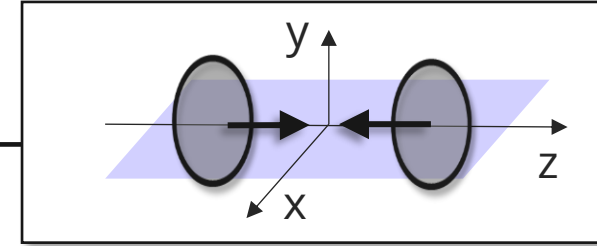
注2: 以降の結果は $N=100$ イベントで平均: $\langle A \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_n$

ハドロン輸送模型(JAM)による推定 (2/5)

Preliminary
results

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

✓ 電荷分布の時間発展 (中心衝突 $b=0$) @ $z=0$



$E_{CM} = 2.0$ GeV

3.0 GeV

4.0 GeV

6.3 GeV

7.7 GeV

$j_{\phi}/|e| \text{ fm}^{-3}$

$j_{\phi}/|e| \text{ fm}^{-3}$

$j_{\phi}/|e| \text{ fm}^{-3}$

$j_{\phi}/|e| \text{ fm}^{-3}$

$j_{\phi}/|e| \text{ fm}^{-3}$

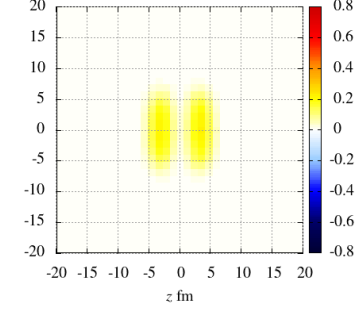
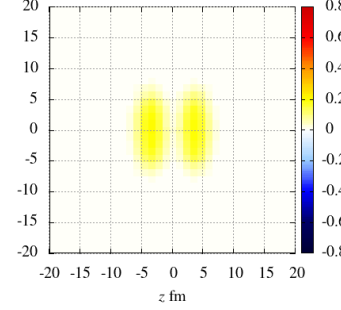
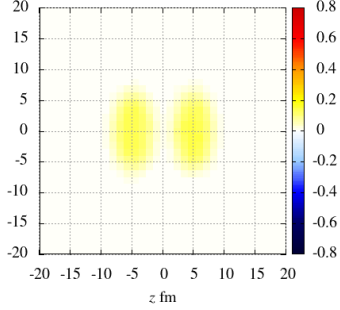
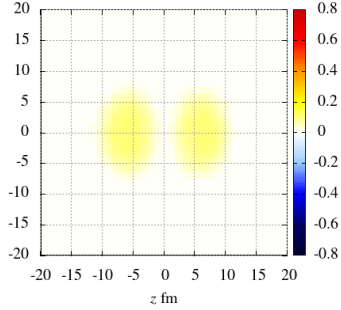
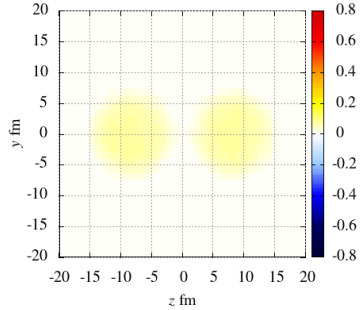
at $x = 0.00$ fm, $t = 0.00$ fm/c

at $x = 0.00$ fm, $t = 0.00$ fm/c

at $x = 0.00$ fm, $t = 0.00$ fm/c

at $x = 0.00$ fm, $t = 0.00$ fm/c

at $x = 0.00$ fm, $t = 0.00$ fm/c



• たしかに大きな電荷密度が比較的長時間生成されている

- 静止した原子核の電荷密度 $\rho_{\text{電荷密度}} \sim \rho_{\text{原子核飽和密度}} / 2 \sim 0.08 \text{ fm}^{-3}$ に対し、 $O(10)$ 倍
- エネルギー $\nearrow \Rightarrow$ 電荷密度 \nearrow (\because Lorentz contraction)
- $O(20 \text{ fm}/c)$ 程度の寿命を持つ

• 4 GeVくらいからLandau \leftrightarrow Bjorkenの描像が切り替わり始める

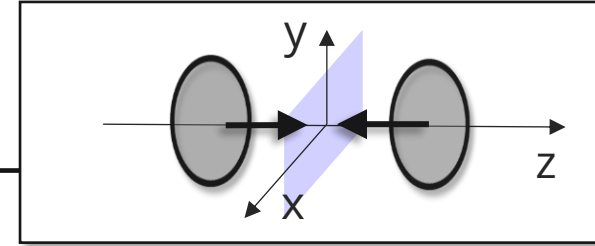
が、完全にすり抜けてないので、見る範囲(10GeV以下)だと中心部に電荷が残る
 \Rightarrow エネルギー \nearrow で時空体積 \nearrow

ハドロン輸送模型(JAM)による推定 (3/5)

Preliminary
results

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

✓ 電磁場の時間発展 (中心衝突 $b=0$) @ $z=0$



- ローレンツ不変量 $F := E^2 - B^2$ をプロット ($F>0$: 電場的, $F<0$: 磁場的)

$E_{CM} = 2.0 \text{ GeV}$

3.0 GeV

4.0 GeV

6.3 GeV

7.7 GeV

$|eE|^2 - |eB|^2 \text{ fm}^{-4}$

$|eE|^2 - |eB|^2 \text{ fm}^{-4}$

$|eE|^2 - |eB|^2 \text{ fm}^{-4}$

$|eE|^2 - |eB|^2 \text{ fm}^{-4}$

$|eE|^2 - |eB|^2 \text{ fm}^{-4}$

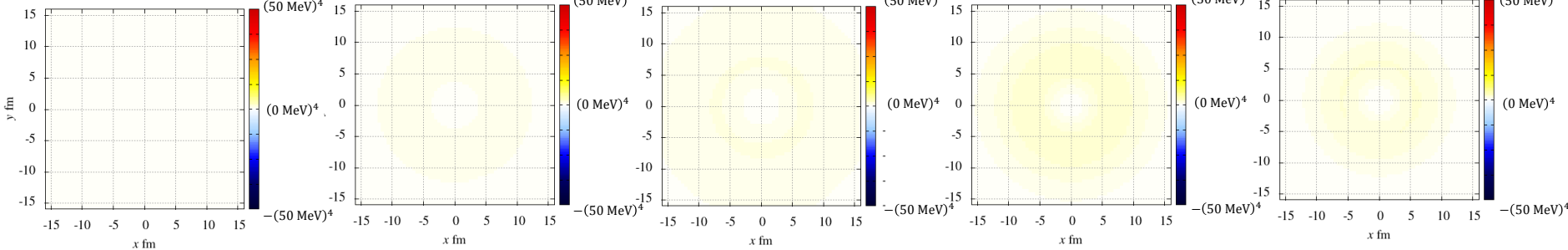
at $z = 0.00 \text{ fm}$, $t = 0.00 \text{ fm}/c$

at $z = 0.00 \text{ fm}$, $t = 0.00 \text{ fm}/c$

at $z = 0.00 \text{ fm}$, $t = 0.00 \text{ fm}/c$

at $z = 0.00 \text{ fm}$, $t = 0.00 \text{ fm}/c$

at $z = 0.00 \text{ fm}$, $t = 0.00 \text{ fm}/c$



- ドーナツ的な電場ができる

⇐ 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

- 電場の強さは $eE = O((50 \text{ MeV})^4)$ のオーダーに及び得る

⇒ QED($m_e = 0.511 \text{ MeV}$)的にはかなり強い

QCD ($\Lambda_{QCD} = 200 \text{ MeV}$)的にも完全にネグれる大きさではない

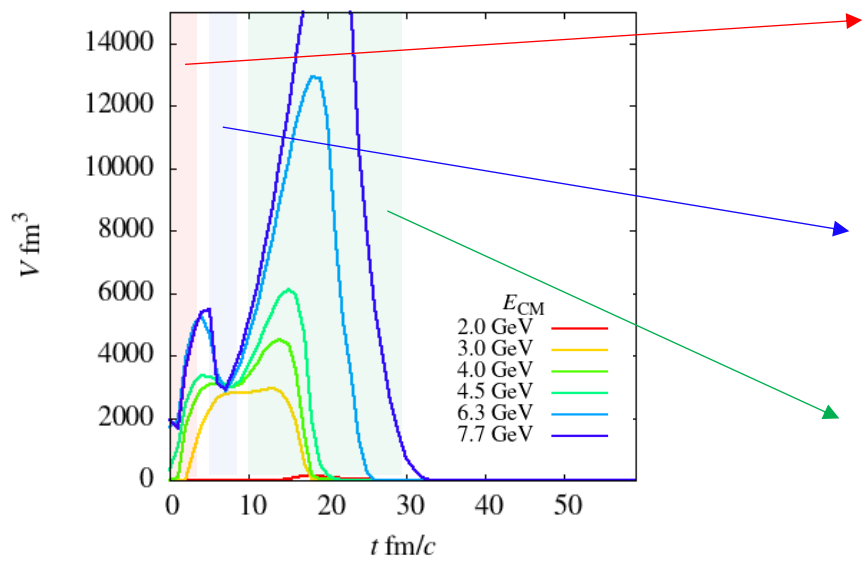
(もしもカイラル対称性が回復してれば、current quark mass的には十分強い)

ハドロン輸送模型(JAM)による推定 (4/5)

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

✓ 電磁場の時空間体積 (中心衝突**b=0**)

$e^2F = |eE|^2 - |eB|^2 > (30 \text{ MeV})^4$ な領域の体積



衝突前

衝突

衝突後

= 電場はそこそこ強く、
そこそこ体積が大きい

= 電場は最も強く
体積は小さい

= 電場は比較的弱い
体積は最も大きい

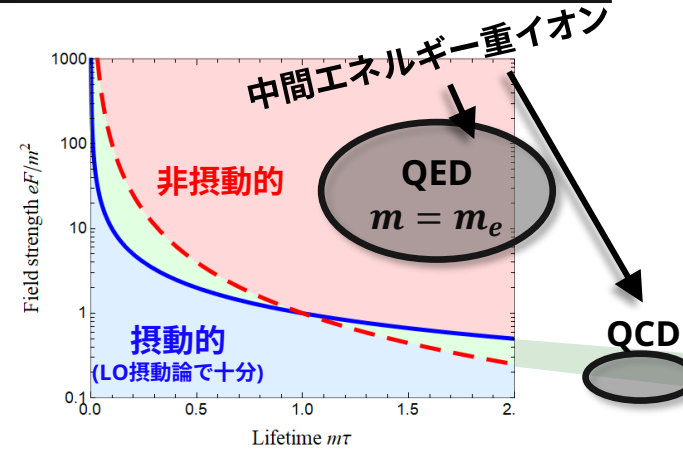
- $e^2F \sim (eE)^2 \sim (30 \text{ MeV})^2$ の強電場が
寿命 $\tau \gtrsim 20 \text{ fm}/c$, 体積 $V \gtrsim (15 \text{ fm})^3$

⇒ QEDなら非摂動的。QCDでも非線形的。

$$\gamma = \frac{m}{eE\tau} \text{ or } \frac{m}{eEl} = \begin{cases} O(1) & (m = \Lambda_{\text{QCD}}) \\ O(0.1) & (m = m_e) \end{cases}, \nu = eE\tau^2 \text{ or } eEl^2 = O(10)$$

- 10 GeV以下程度だと体積は単調に増加する (正直、若干、不思議)

⇒ もっとエネルギー高いと衝突後の体積は0はずなので、その解析は今後の課題

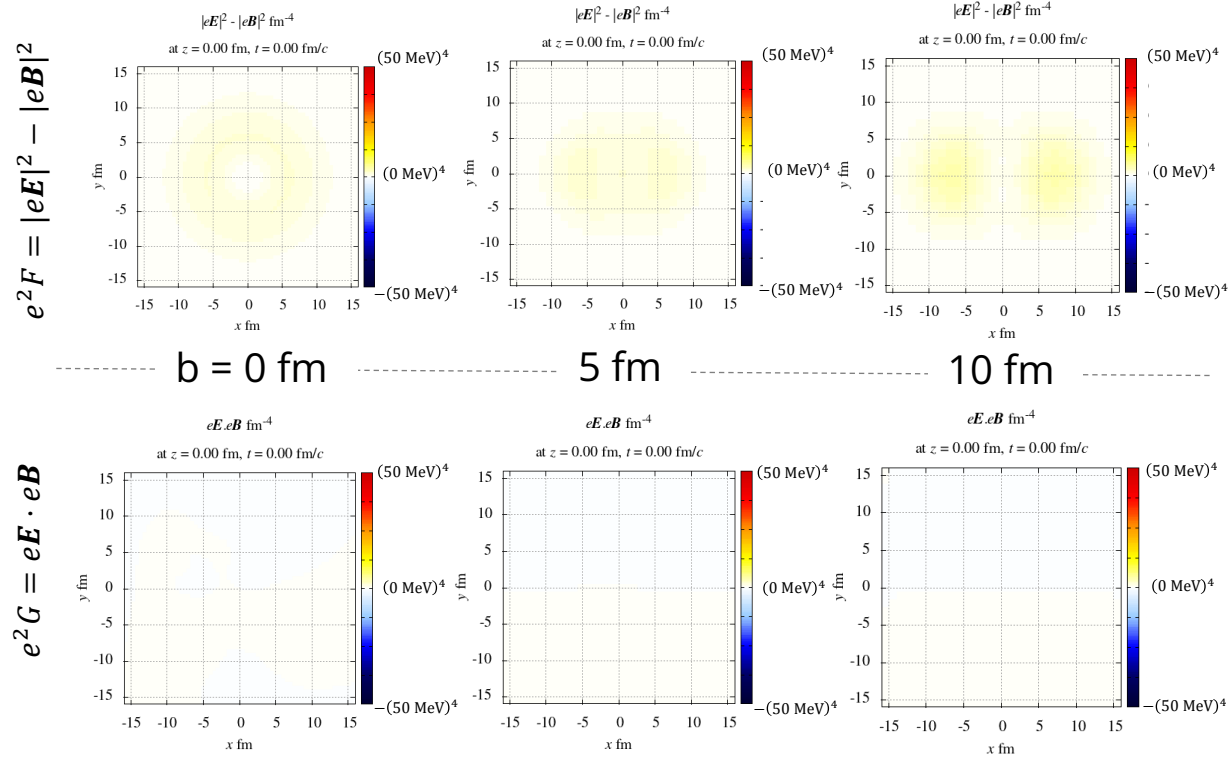
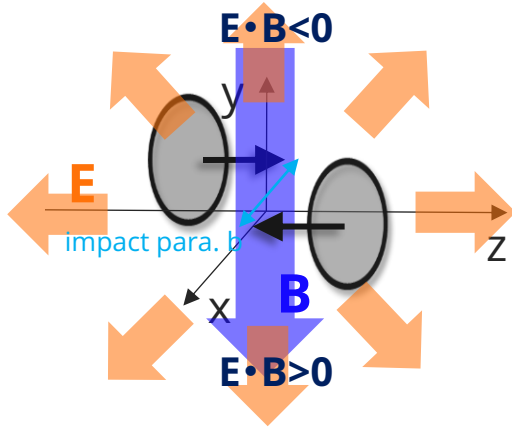


ハドロン輸送模型(JAM)による推定 (5/5)

Preliminary results

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

✓ 非中心衝突 ⇒ 磁場B & E·Bも生成



@ $E_{CM} = 7.7 \text{ GeV}$

• 非中心だと寿命は短くなるが、 $E \cdot B \neq 0$ の状況ができる

⇒ $e\mathbf{E} \cdot e\mathbf{B} = O((50 \text{ MeV})^4)$ なので、QCD的にもそこそこ強い (電子やcurrent quarkに対しては十分強い)

⇒ カイラル量子異常を通じた何かで遊べる新しいチャンスかも

例) Schwinger機構を通じたカイラリティ生成
$$N_5 = VT \frac{e\mathbf{E} \cdot e\mathbf{B}}{2\pi^2} \exp\left[-\pi \frac{m^2}{eE}\right]$$

1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), [HT](#), in progress]

4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化

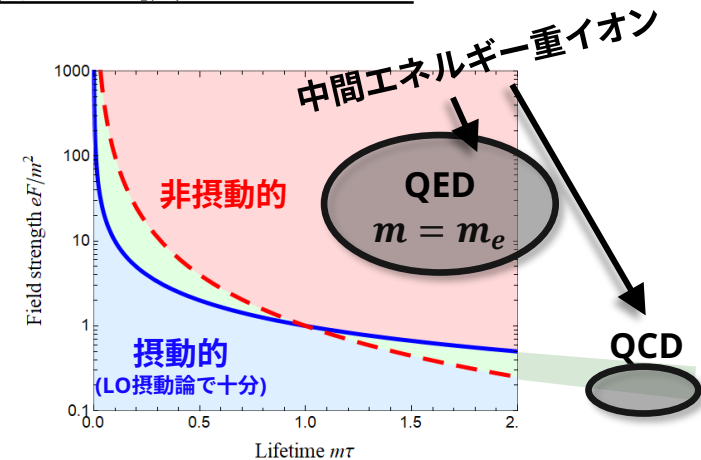
[[HT](#), Ironside (Curtin), in progress]

5. まとめ

現象的に何がうれしいか？

✓ 中間エネルギー重イオン衝突は、「強い」「電場」の物理に役立つかも？

• **point 1:** 高エネルギー衝突やレーザーでは探索できなかった非摂動領域のプローブになり得る



• **point 2:** 「電」場の物理は「磁」場の物理とは違う

高エネルギー \Rightarrow 磁場 \Rightarrow 系は安定

中間エネルギー \Rightarrow 電場 \Rightarrow 系は不安定

✓ QCDスケールのO(10%)なので、ハドロン・QCD過程にも影響し得る

例) 中間エネルギーの非中心衝突の磁場はフローや荷電粒子比に影響

[Sun, Wang, Li, Wang (2019)]

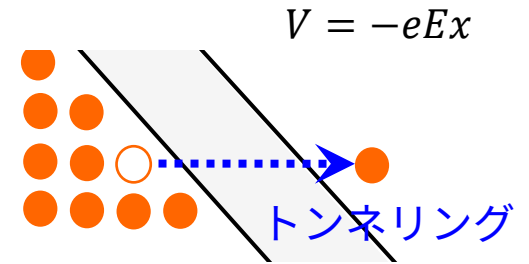
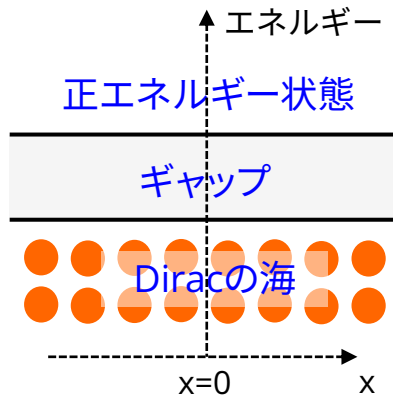
非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (1/4)

- ✓ 真空崩壊 = 強い電場の下では、真空は不安定になり、粒子を作って壊れる

非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (1/4)

✓ 真空崩壊 = 強い電場の下では、真空は不安定になり、粒子を作って壊れる

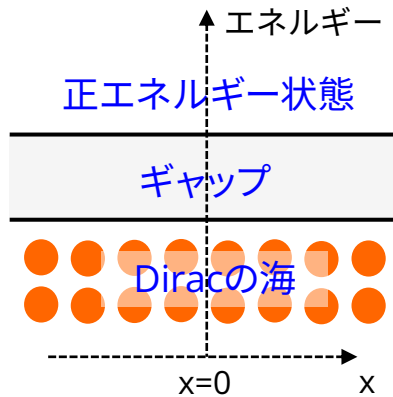
- 定常電場の場合 ⇒ Schwinger機構 [Sauter 1931] [Schwinger (1951)]



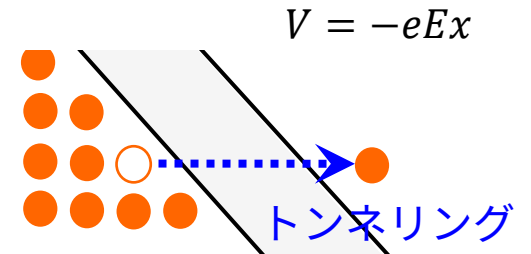
非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (1/4)

✓ 真空崩壊 = 強い電場の下では、真空は不安定になり、粒子を作って壊れる

• 定常電場の場合 ⇒ Schwinger機構 [Sauter 1931] [Schwinger (1951)]



定常電場



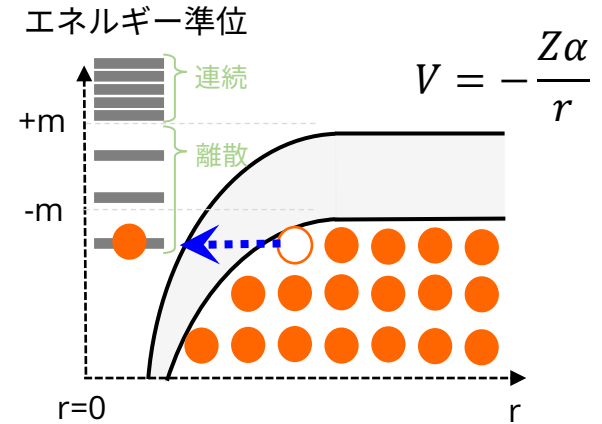
Coulomb

• Coulomb場の場合でも本質的に同じ

違い: $E < +m$ でエネルギーは離散化

⇒ トンネリングは $E < -m$ にエネルギー準位があるときだけ起こる

⇐ (いろんな簡単化の下で) Z が十分に大きければOK: $Z > \alpha^{-1}$

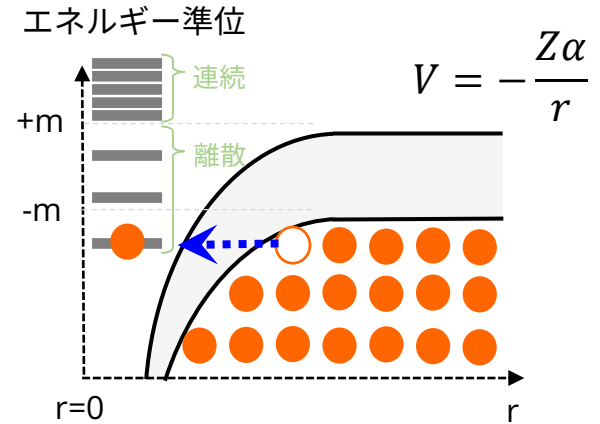
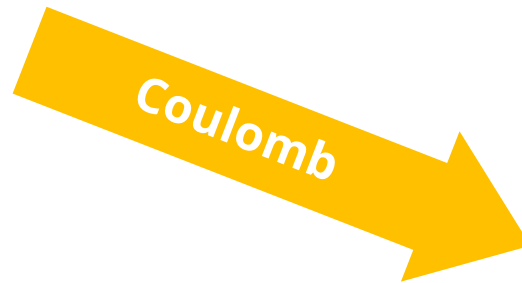
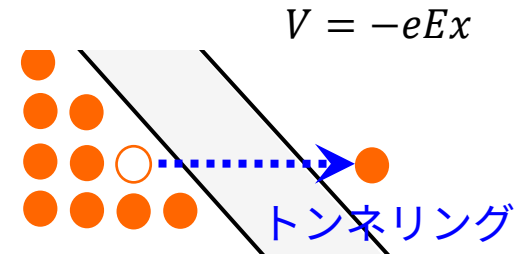
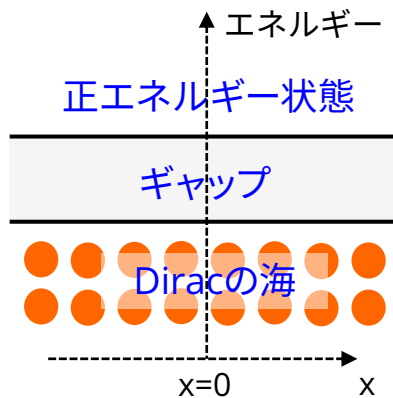


[Pieper, Greiner (1969)]
[Gershtein, Zeldovich (1970)]

非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (1/4)

✓ 真空崩壊 = 強い電場の下では、真空は不安定になり、粒子を作って壊れる

- 定常電場の場合 ⇒ Schwinger機構 [Sauter 1931] [Schwinger (1951)]



- Coulomb場の場合でも本質的に同じ

違い: $E < +m$ でエネルギーは離散化

⇒ トンネリングは $E < -m$ にエネルギー準位があるときだけ起こる

⇐ (いろんな簡単化の下で) Z が十分に大きければOK: $Z > \alpha^{-1}$

[Pieper, Greiner (1969)]
[Gershtein, Zeldovich (1970)]

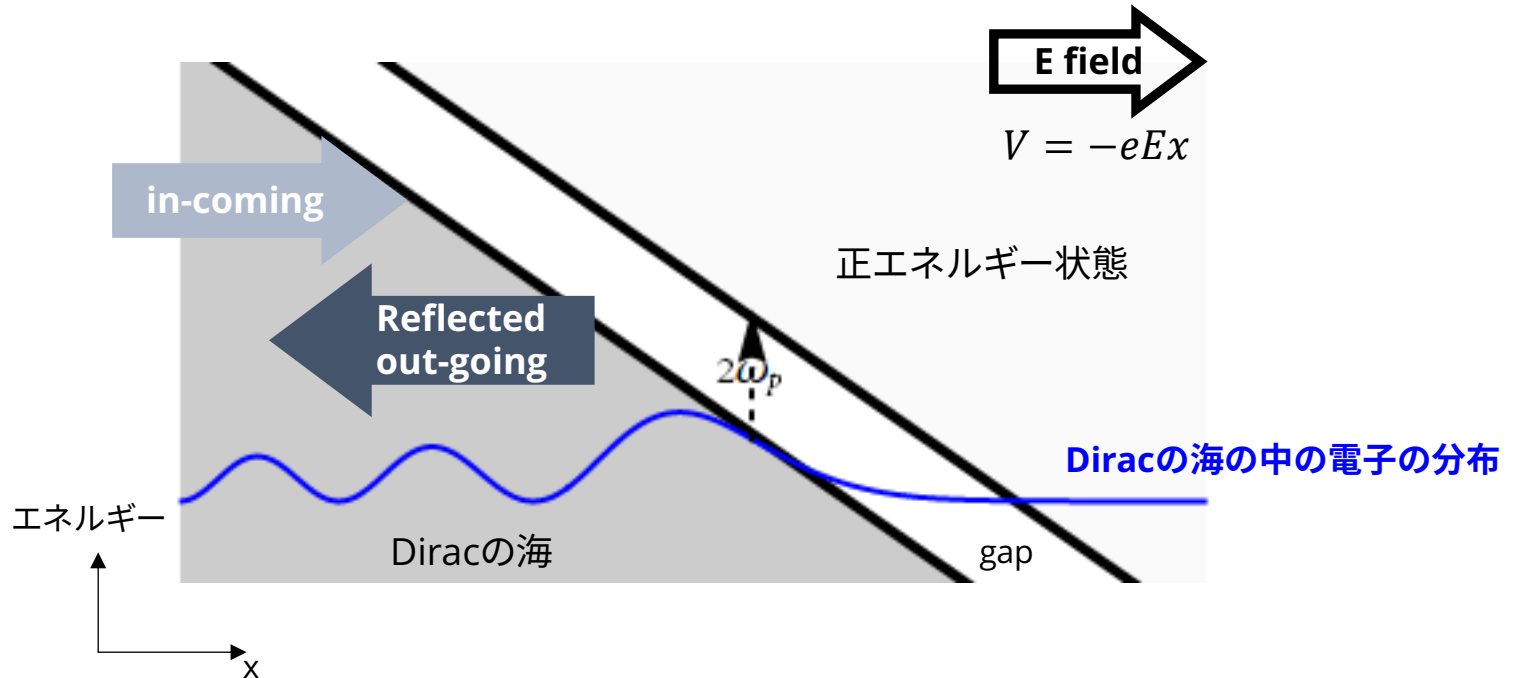
∴ 中間エネルギー重イオン衝突で (レイイベントかもしれないが) 陽電子の過剰生成が起こる

これだけでもおもしろいが、実はこれだけではない ⇒ 光子の伝搬の様子の変化

非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (2/4)

✓ 真空の“歪み”は、真空上の光子の伝搬に影響する

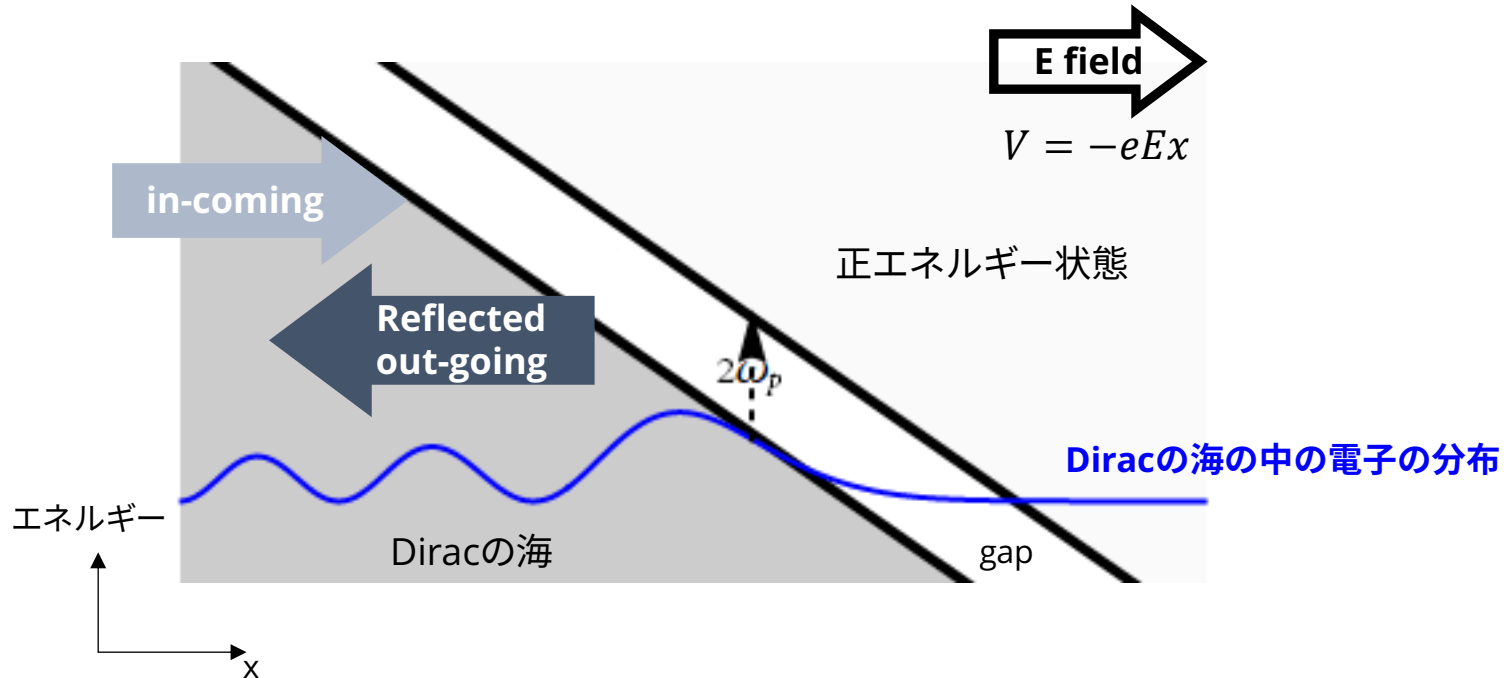
← ギャップによる反射によって、Diracの海の電子が干渉模様を示すため [HT (2019)]



非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (2/4)

✓ 真空の“歪み”は、真空上の光子の伝搬に影響する

← ギャップによる反射によって、Diracの海の電子が干渉模様を示すため [HT (2019)]



⇒ 真空上の光子はDiracの海の電子と相互作用しながら飛ぶので、電子分布の情報を拾う

期待1: 光子の伝搬(=屈折率の実部や虚部)は、電子分布の振動的な様子を拾うだろう

期待2: 電場は方向を持っているので、光子の伝搬の様子は電場の方向に依存して変わるだろう
(vacuum birefringence)

磁場の場合: [Hattori, Itakura (2013)]

非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (3/4)

[HT, Ironside (Curtin), in progress]

✓ 簡単な問題設定でチェック: 定常電場に振動するプローブ電場を打ち込む

$\mathcal{E} \propto e^{-i\omega t}$

$\mathcal{D} = \epsilon \mathcal{E} = n^2 \mathcal{E} = (1 + \chi) \mathcal{E}$

✓ 計算量: 誘電率 ϵ の虚部と実部

虚部 \Rightarrow プローブの崩壊率

電場で非摂動的にドレスされた波動関数
s.t. $0 = [i\partial - eA - m]\Psi$

$$\text{Im} \sim \text{bubble} = \sim \text{crescent} \sim \int d^3\mathbf{p} \bar{\Psi} \mathcal{A} \Psi$$

実部 \Rightarrow プローブの伝搬速度や複屈折

光学定理 (Kramers-Kronig relation)

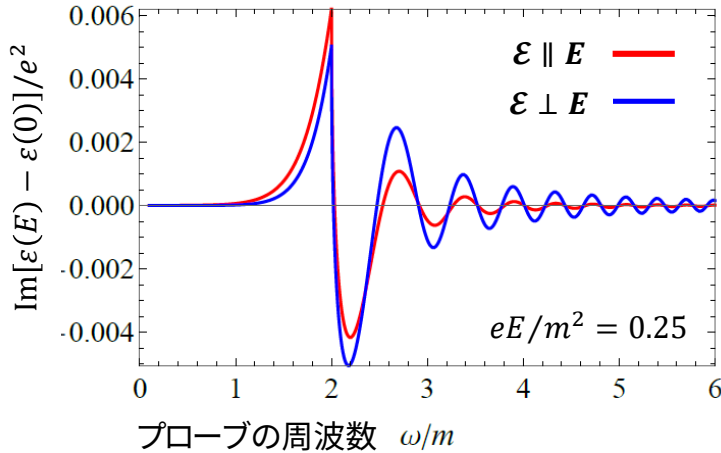
$$\text{Re} \sim \text{bubble} = \epsilon_R(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \text{P.V.} \int_0^\infty d\omega' \frac{\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \epsilon_I(\omega')$$

非自明な電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬 (4/4)

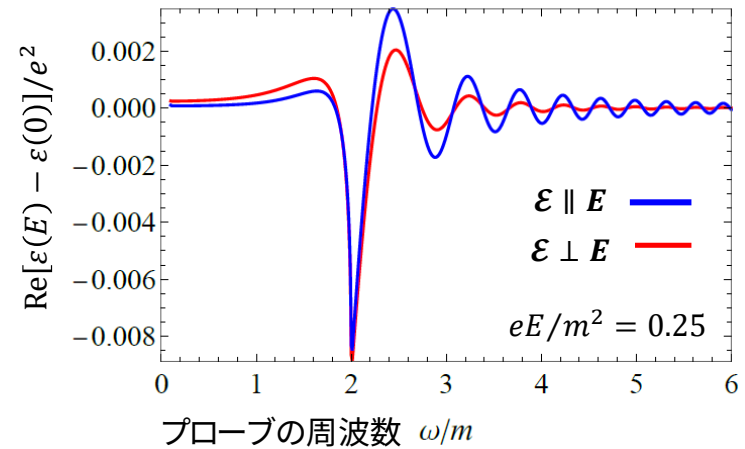
[HT, Ironside (Curtin), in progress]

✓ 結果

虚部 ⇒ プローブの崩壊率



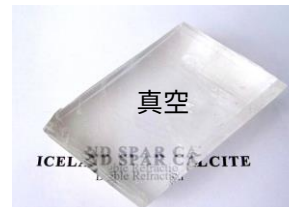
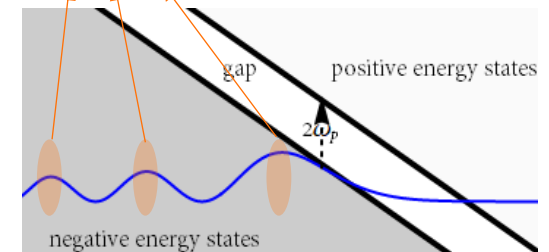
実部 ⇒ プローブの伝搬速度や複屈折



Preliminary results

- 振動的振る舞いがちゃんと出る
⇐ Diracの海の非自明な干渉構造の反映
- プローブの方向に依存した誘電率
⇒ 複屈折

存在確率大きい ⇒ より影響する



1. 強い電磁場の物理のレビュー

2. 高エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

3. 中間エネルギーの重イオン衝突における強い電磁場の物理

[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), [HT](#), in progress]

4. 強い電場の物理の例: 真空崩壊と光子の伝搬の変化

[[HT](#), Ironside (Curtin), in progress]

5. まとめ

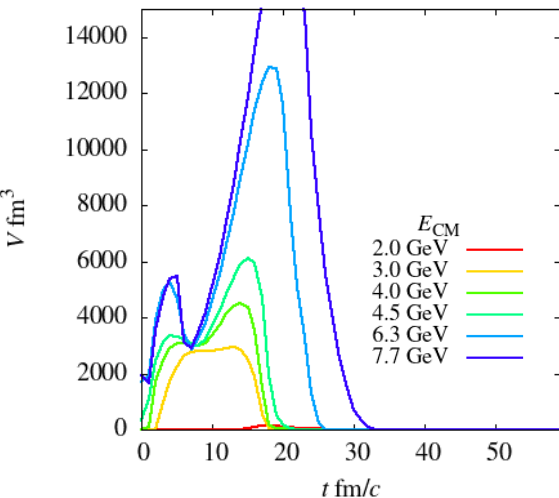
言いたいこと

$\sqrt{s_{NN}} = O(1-10 \text{ GeV})$ の中間重イオン衝突は強い電磁場の物理的にもおもしろい (かも)

- 昨年10月のREIMEIワークショップの掘り下げ
- ハドロン輸送模型(JAM)を用いた比較的現実的な電磁場強度の推定
 $\Rightarrow O(10 \text{ MeV})$ 以上のそこそこ強い電磁場が長寿命 $O(10 \text{ fm}/c)$ できる
 \Rightarrow 非線形QED研究の良い舞台かも。QCD過程への影響も無視できないだろう
- しかし、良い物理過程/観測が現時点で頭にあるわけじゃないし、よくわからないこともたくさんあるので、ぜひ議論してください

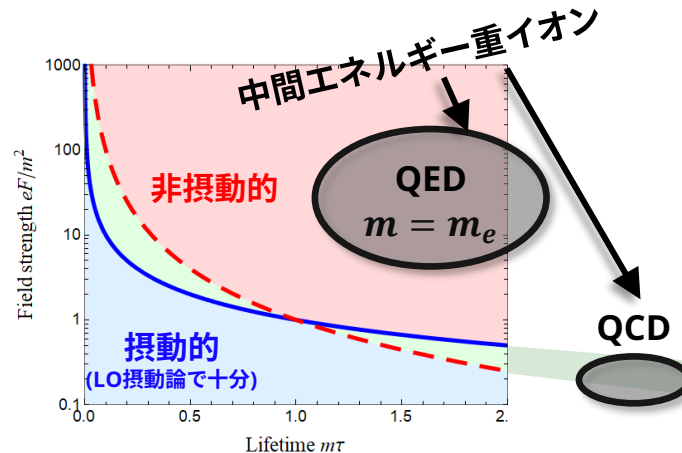
電磁場の時空間体積

$$e^2 F = |e\mathbf{E}|^2 - |e\mathbf{B}|^2 > (30 \text{ MeV})^4$$

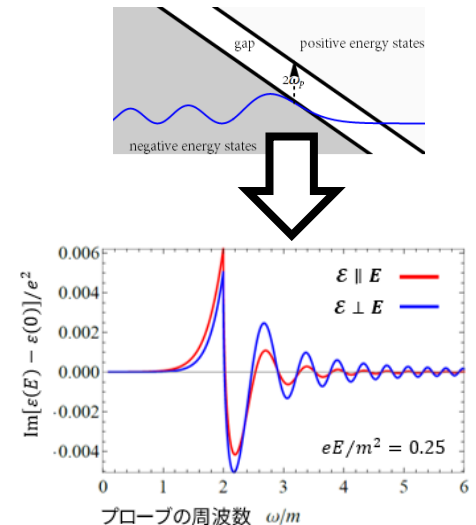


[Nishimura (Osaka), Ohnishi (Kyoto), HT, in progress]

電磁場の物理の「相図」



崩壊する真空中の光子の伝搬



[HT, Ironside (Curtin), in progress]