

**Schwinger機構を
レーザー実験で見るためには
どうしたらよいか？**

田屋 英俊

(慶應大)

今日の話

現状: レーザーでの実験的検証はまだ難しそう...

しかし: ここ10年でいろんなアイデアが生まれたので、
みんな (理論・実験・他分野) で議論する良い時期

なので: 今日の目的 = 議論材料を提供する

内容: (1) 導入: 「高強度場物理」と「Schwinger機構」
(2) いろんなアイデアの紹介
(3) まとめ

今日の話

現状: レーザーでの実験的検証はまだ難しそう...

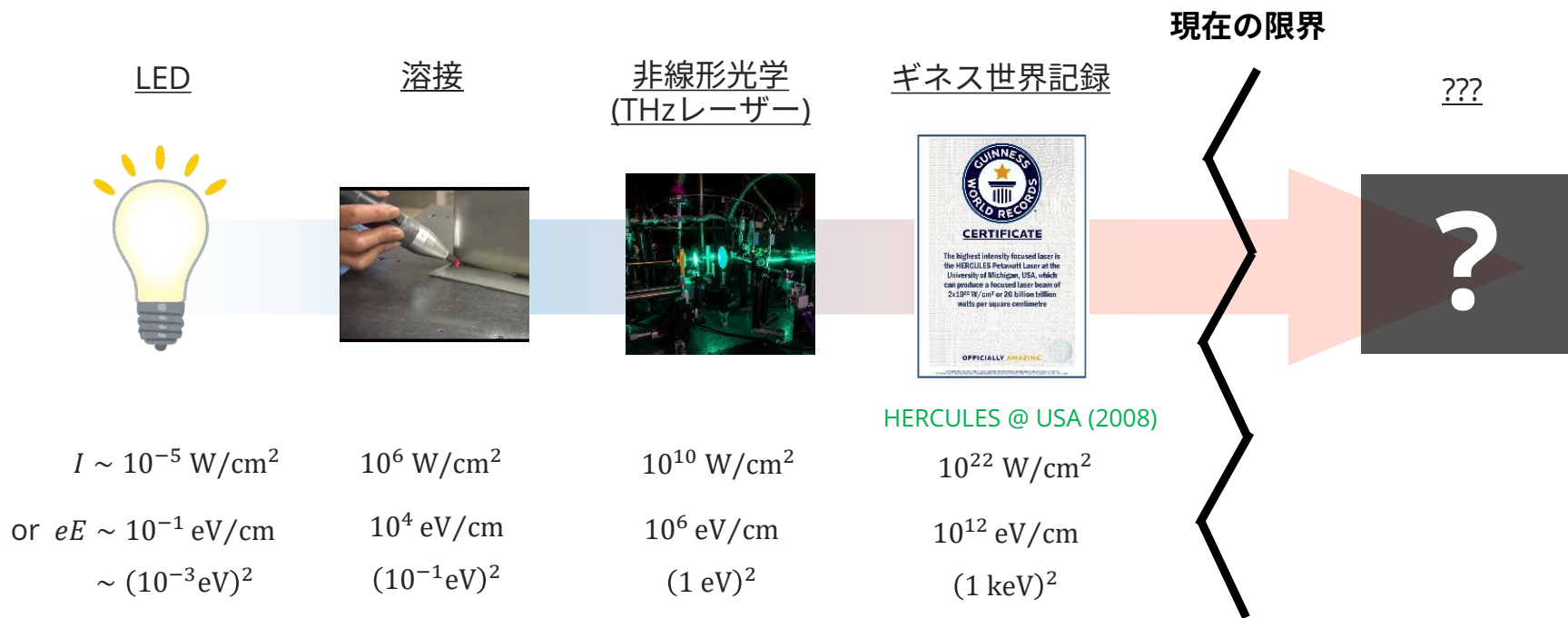
しかし: ここ10年でいろんなアイデアが生まれたので、
みんな (理論・実験・他分野) で議論する良い時期

なので: 今日の目的 = 議論材料を提供する

内容: (1) 導入: 「高強度場物理」と「Schwinger機構」
(2) いろんなアイデアの紹介
(3) まとめ

「高強度場物理」とは？

✓ めちゃくちゃ強い光があると何が起こるか？ ⇒ 高強度場物理

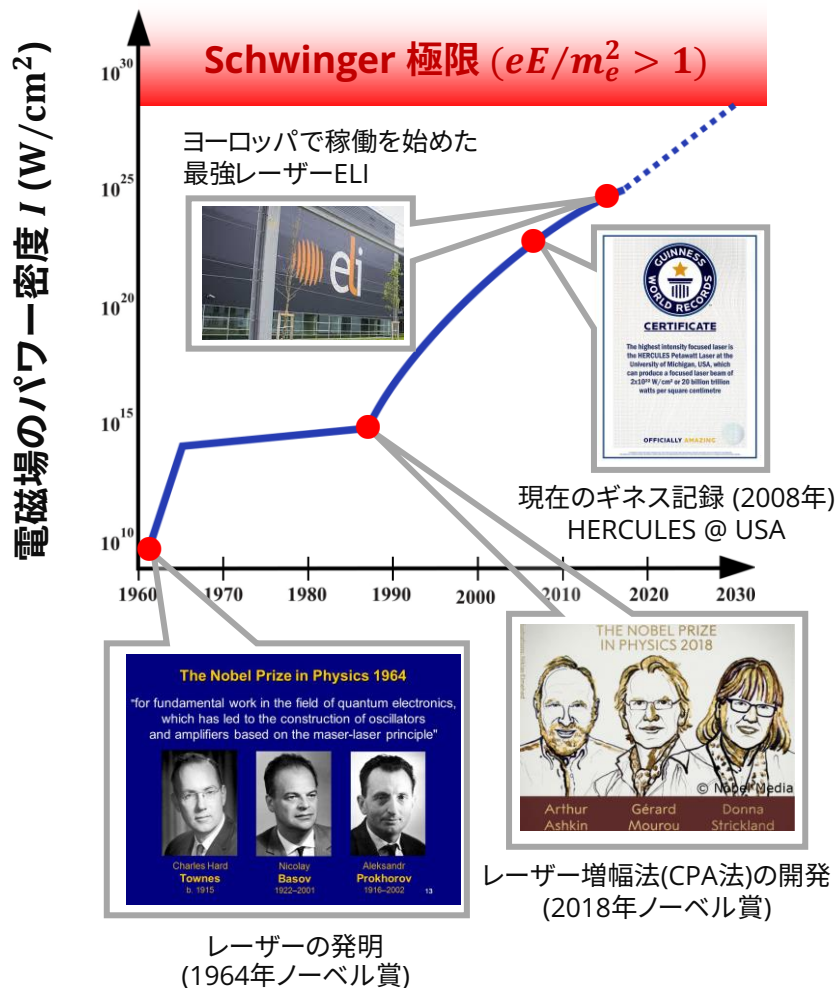


✓ なぜ楽しい？

- ・ 「**人類の未踏領域**」で「**普通ではありえない現象**」が起こる
- ・ 単なる学問的興味ではなく「**この宇宙や物質の起源の理解**」などの幅広い現実の物理の理解に役立ち、しかも「**実験が今まさにできそう**」

強い電磁場はどこに？

高強度レーザー



素/核/宇/物性の極限状況

• 重イオン衝突

RIC (2000~), LHC (2012~), FAIR/NICA/HIAF/J-Parc-HI/... (20XX~)

$$I \sim 10^{35} \text{ W}/\text{cm}^2$$

$$(eE, eB \sim m_\pi^2 \sim (140 \text{ MeV})^2)$$

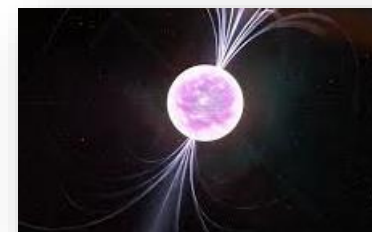


• コンパクト星: マグネター

すざく (2005~2015), NICER (2017~) XL-Calibur (2018~), IXPE (2021~), ...

$$I \sim 10^{29} \text{ W}/\text{cm}^2$$

$$(eE, eB > m_e^2 \sim (1 \text{ MeV})^2)$$



• アナログ系 (= 一般の強い場の物理)

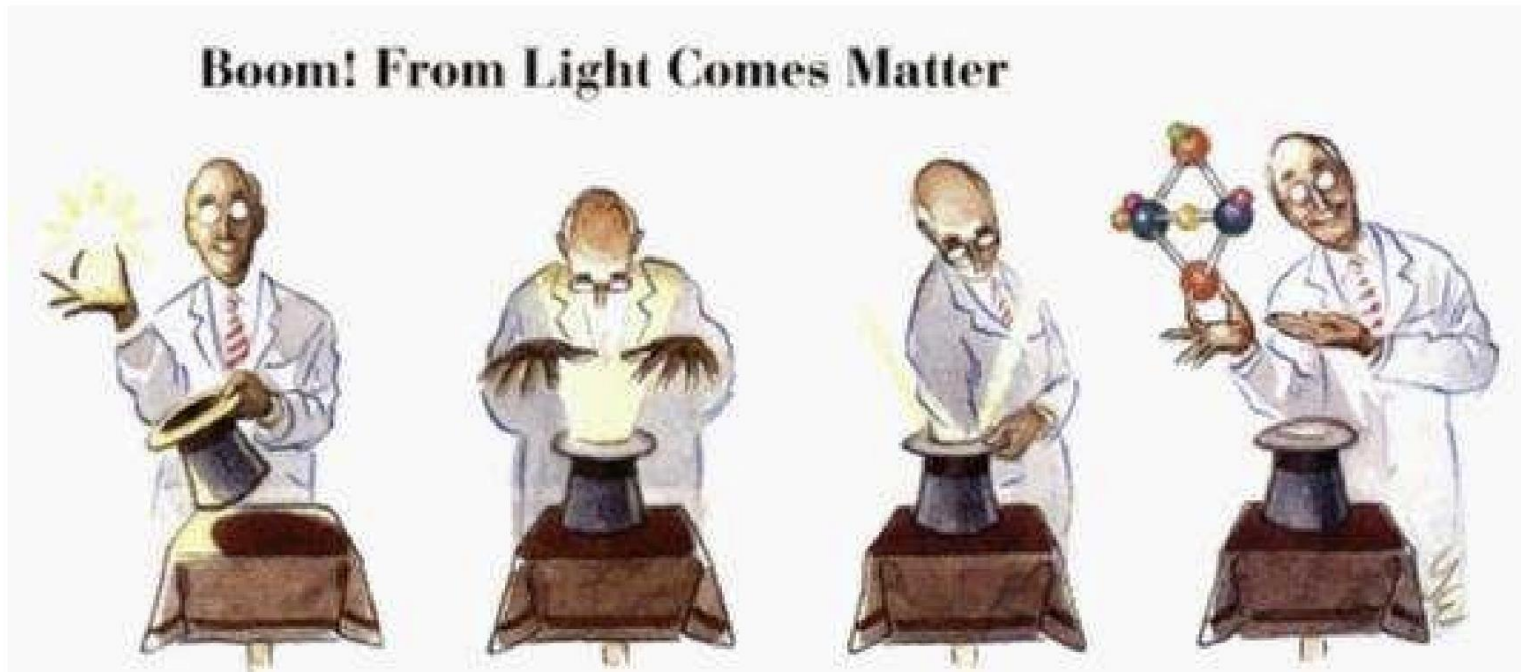
重イオン衝突 (強いカラー場)
 ブラックホール (強い重力場)
 宇宙の再加熱 (強いインフレーション場)
 絶縁破壊 (物性系での強い電磁場)

...

レーザーによる高強度場物理の研究が今まさに可能に ⇒ 広い物理の理解に役立つ

「普通ではあり得ない現象」の例: Schwinger機構

- たくさんの非自明な現象が予言されている ⇒ ほかの人のトーク
Review: [Fedotov, Ilderton, Karbstein, King, Seipt, [HT](#), Torgrimsson (2023)]
- このトーク: Schwinger機構 = 「無」から「有」を作る過程
[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)] [Schwinger (1951)]



どういう原理？なぜ未検証？

Schwinger機構の原理: 量子トンネリング ⇒ 指数関数的な強い抑制



- 定常電場における粒子数: Schwingerの公式 [Schwinger (1951)] [Nikishov (1969)]

$$N = \frac{(eE)^2 VT}{(2\pi)^3} \times \exp\left[-\pi \frac{m^2}{eE}\right] \sim \exp[-\# \times (\text{ギャップの長さ}) \times (\text{ギャップの高さ})]$$

- **Schwinger極限** $eE_{cr} = m_e^2$ 程度以上のめちゃくちゃ強い電場が必要

現在の1~10PWクラスのレーザーでは絶望的 (P=ペタ= 10^{15})

$$I \lesssim 10^{23} \text{ W/cm}^2 \Rightarrow eE \lesssim 10^{15} \text{ V/m} \approx (10 \text{ keV})^2 \ll m_e^2 \approx (500 \text{ keV})^2$$

⇒ 1ペア作るのに大雑把に 10^{3500} 年 (\gg 宇宙年齢 10^{10} 年!)

⇒ **うまい工夫でPWでもなんとかできないか？**

(注: 他の高強度場現象はPWクラスでも十分にいけたりする。他の人のトーク参照)

今日の話

(1) 導入: 「高強度場物理」と「Schwinger機構」

(2) いろいろなアイデアの紹介

(3) まとめ・議論

いろいろなアイデア

✓ 直接検証: 粒子数が増えるように電磁場をデザインする

- 動的にアシストされたSchwinger機構 → 定常電場 + 速い電場 ⇒ N が指数関数的に増
(dynamically assisted Schwinger effect) (× だいぶ速くないと増大しない...)
[Dunne, Gies, Schutzhold (2008), (2009)] [Piazza et al. (2009)] [HT (2019)]
- 量子干渉 → n パルスで周期的に粒子生成 ⇒ $N \propto n^2$ で増 (× 冪だと足りない...)
[Dumlu, Dunne (2011)] [Akkerman, Dunne (2012)]
- 複数パルスのフォーカシング: n パルスの集約 → $eE \propto \sqrt{n}$ で電場が強くなる (× 冪だと足りない...)
[Bulanov et al. (2010)] [Gonoskov et al. (2013)]
- 他分野のアイデア: 縦磁場を使う → ランダウ量子化 ⇒ $N \propto eB$ で増 [Hidaka, Iritani, Suganuma (2011)] (× Schwinger極限
程度以上の磁場が必要...)
Twisted Schwinger effect → 回転電場 ⇒ 特定の回転周波数で増
[Takayoshi, Wu, Oka (2020)] (× $\Omega \sim 4m$ の早い回転...)

✓ 間接検証: Schwinger機構を「反映」した現象を見る

- 真空複屈折 → Schwinger機構で真空は「ゆがむ」 ⇒ 光子の伝搬を変える [HT, Ironside (2023)]
 - 真空からの光子放射 (含: 高次高調波発生) → 粒子生成後には放射が起こる [HT, Hongo, Ikeda (2021)]
- (本トークの内容(レーザー)からは外れるが、アナログ現象を見るのはひとつの方法:
絶縁破壊、超重原子核、冷却原子系、 ...)

いろいろなアイデア

✓ 直接検証: 粒子数が増えるように電磁場をデザインする

- 動的にアシストされたSchwinger機構 → 定常電場 + 速い電場 ⇒ N が指数関数的に増 (dynamically assisted Schwinger effect) (× だいぶ速くないと増大しない...)
[Dunne, Gies, Schutzhold (2008), (2009)] [Piazza et al. (2009)] [HT (2019)]
- 量子干渉 → n パルスで周期的に粒子生成 ⇒ $N \propto n^2$ で増 (× 冪だと足りない...)
[Dumlu, Dunne (2011)] [Akkerman, Dunne (2012)]
- 複数パルスのフォーカシング: n パルスの集約 → $eE \propto \sqrt{n}$ で電場が強くなる (× 冪だと足りない...)
[Bulanov et al. (2010)] [Gonoskov et al. (2013)]
- 他分野のアイデア: 縦磁場を使う → ランダウ量子化 ⇒ $N \propto eB$ で増 [Hidaka, Iritani, Suganuma (2011)] (× Schwinger極限程度以上の磁場が必要...)
Twisted Schwinger effect → 回転電場 ⇒ 特定の回転周波数で増 [Takayoshi, Wu, Oka (2020)] (× $\Omega \sim 4m$ の早い回転...)

✓ 間接検証: Schwinger機構を「反映」した現象を見る

- 真空複屈折 → Schwinger機構で真空は「ゆがむ」 ⇒ 光子の伝搬を変える [HT, Ironside (2023)]
 - 真空からの光子放射 (含: 高次高調波発生) → 粒子生成後には放射が起こる [HT, Hongo, Ikeda (2021)]
- (本トークの内容(レーザー)からは外れるが、アナログ現象を見るのはひとつの方法: 絶縁破壊、超重原子核、冷却原子系、...)

✓ たくさんのアイデアがここ10年で提案された

- それぞれに長/短所があって決定打はない
が、Schwingerの検証は、もはや超非現実的ではなく、今議論する価値がある
- 例として、2つを本トークでは紹介

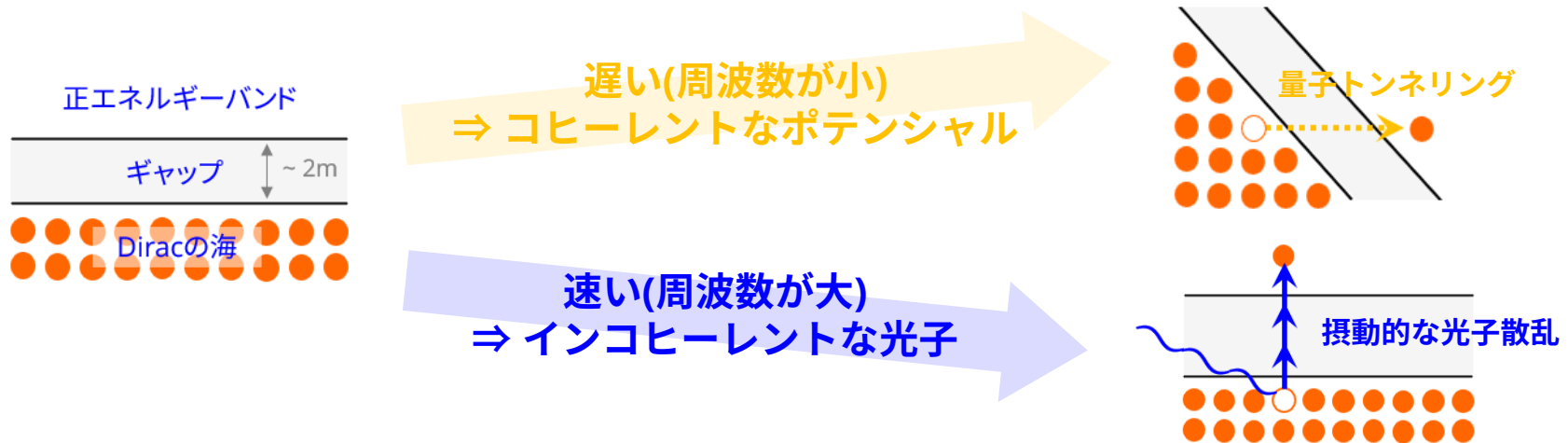
直接検証 (1/3): 動的にアシストされたSchwinger機構

アイデア = 光電効果 + トンネリングの短縮 \Rightarrow 指数関数的な粒子生成の増大

直接検証 (1/3): 動的にアシストされたSchwinger機構

アイデア = 光電効果 + トンネリングの短縮 ⇒ 指数関数的な粒子生成の増大

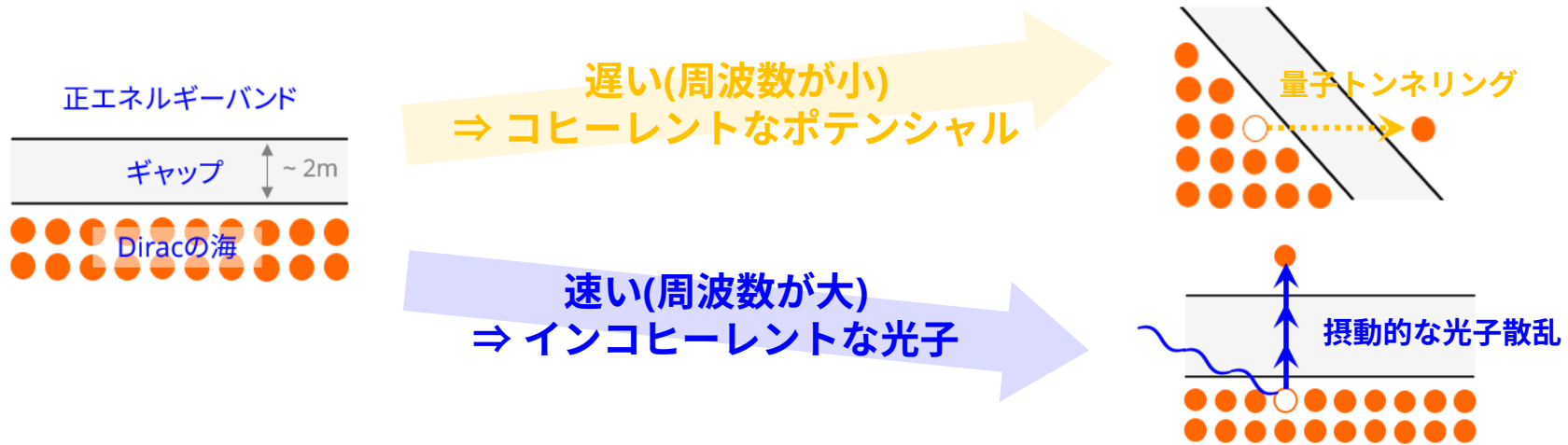
- 光電効果: 電磁場の速さ(周波数の大小)で相互作用の仕方が違う



直接検証 (1/3): 動的にアシストされたSchwinger機構

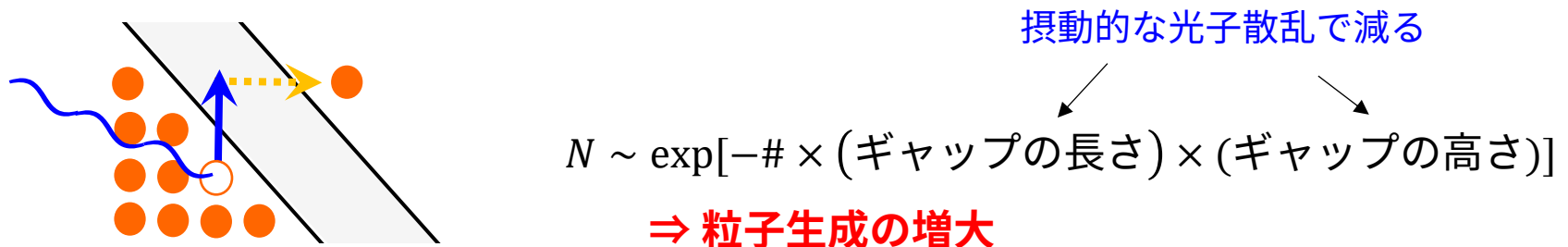
アイデア = 光電効果 + トンネリングの短縮 ⇒ 指数関数的な粒子生成の増大

- 光電効果: 電磁場の速さ(周波数の大小)で相互作用の仕方が違う



- トンネリングの短縮:

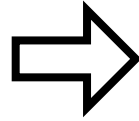
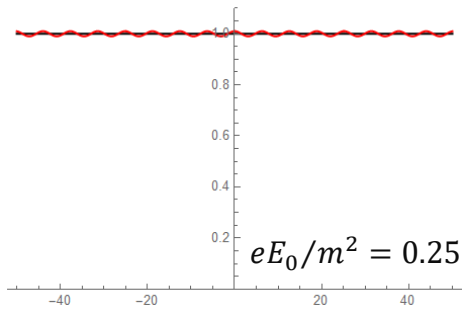
速い・遅い電磁場が同時にあると、光子散乱 + 量子トンネリングが両方起こる



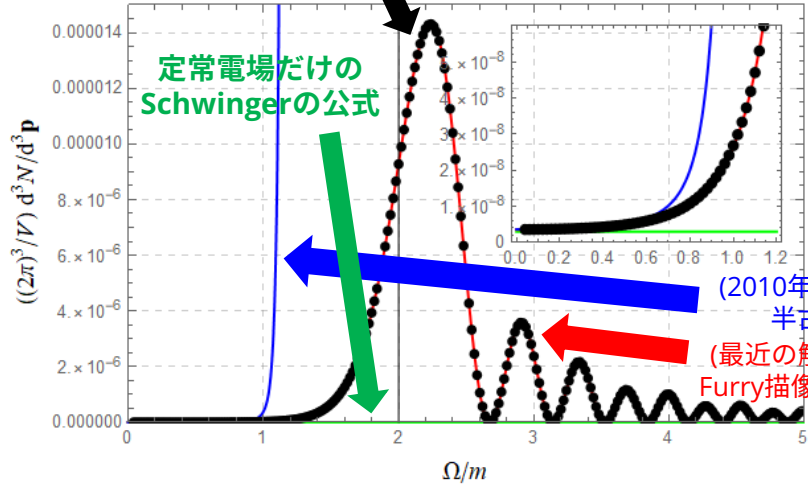
直接検証 (2/3): 実証

電場の配位

$$E = E_0 \left(1 + \frac{1}{100} \cos \Omega t \right)$$



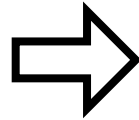
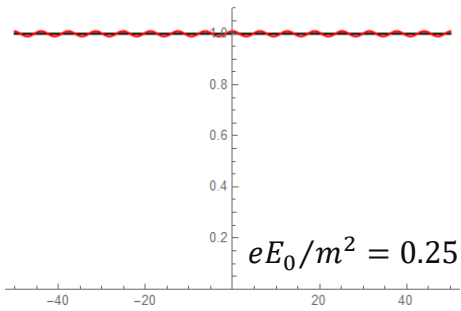
厳密な数値計算



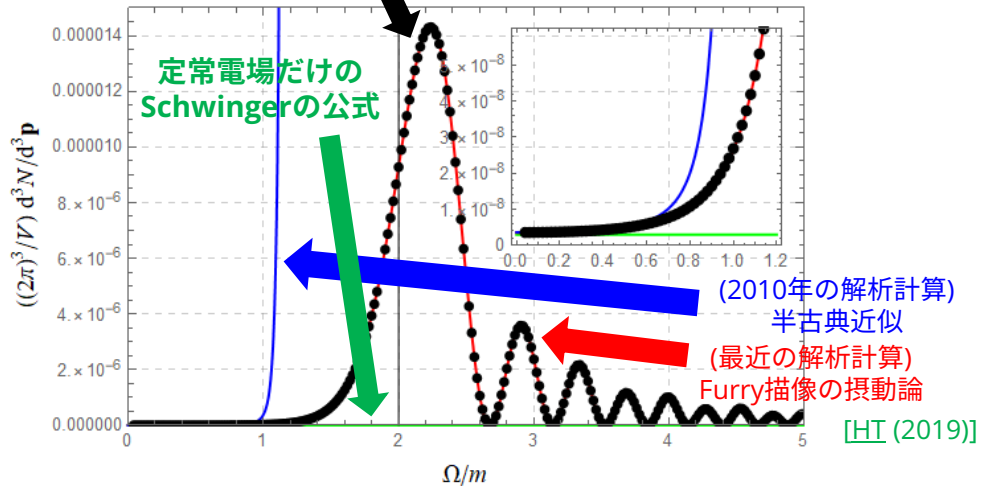
直接検証 (2/3): 実証

電場の配位

$$E = E_0 \left(1 + \frac{1}{100} \cos \Omega t \right)$$



厳密な数値計算



✓ 物理としてわかったこと

- 予想通り: 速い電場がとても弱くても、たしかにとても増大する
- 予想外: 高周波領域に行くと、振動する ← 高強度場中の真空の構造と関係 (次のスライド)

[HI (2019)]

✓ 定量的な話

- もしも $\Omega \sim 2m_e \sim 1 \text{ MeV}$ くらいのzeptosecond光源 (γ 線領域) があるなら、 [HI, Ironside (2023)]

$$N \sim 0.22 \times \left(\frac{\text{スポットサイズ}}{\mu\text{m}} \right)^3 \left(\frac{\text{パルス幅}}{\text{fs}} \right) \left(\frac{eE \text{ 速い電場}}{1 \times 10^{15} \text{ V/m}} \right)^2 \left(\frac{I \text{ 遅い電場}}{1 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2} \right)^{0.15} \Rightarrow \text{1日1ペアくらい}$$

- ただ現実にはXFELの $\Omega \sim 10 \text{ keV}$ くらいで、周波数が小さすぎて増大はかなり小さい...

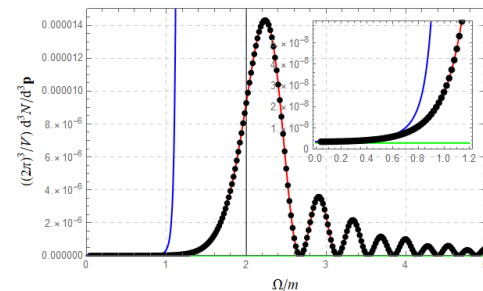
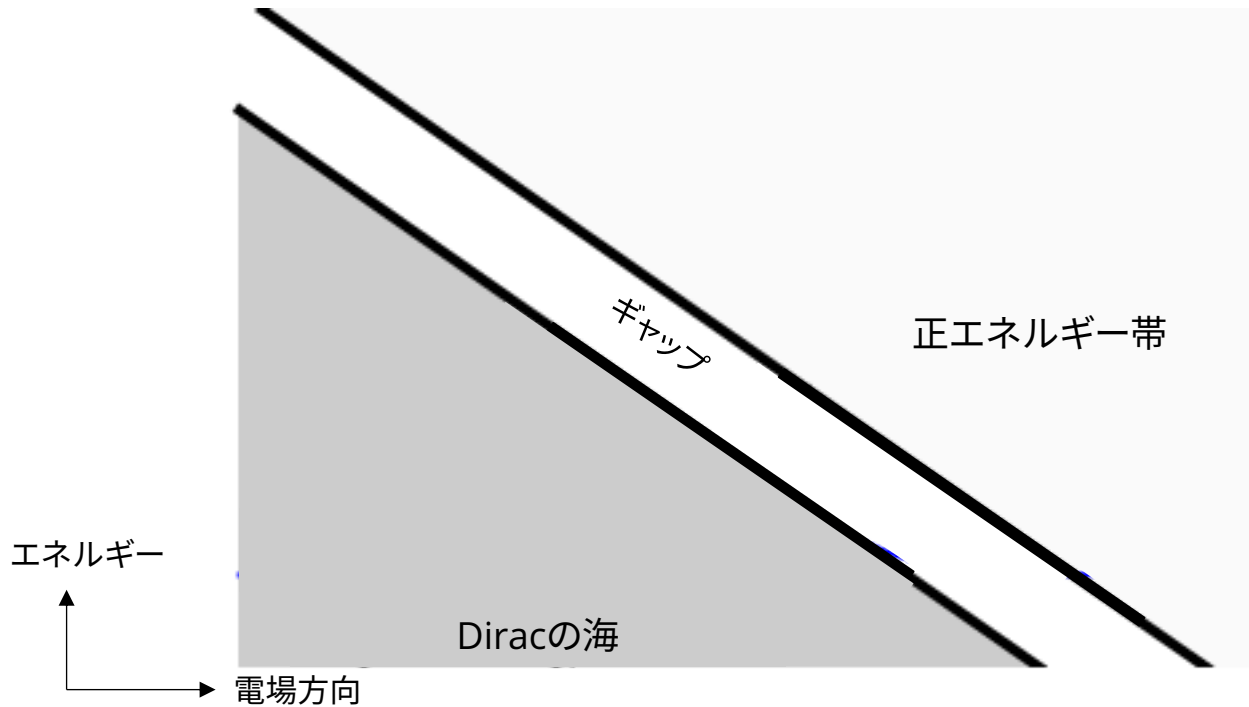
* $I \approx 1 \text{ PW}$, $eE \approx 1 \text{ GW}$ を仮定
* スポットサイズやパルス幅によってはもっと増やせる

⇒ もう1工夫以上は要る (例: 高速光源の開発、ほかのアイデアとの融合、...) が、少なくとも、Schwingerの検証が超非現実的という段階は過ぎたと思う

直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

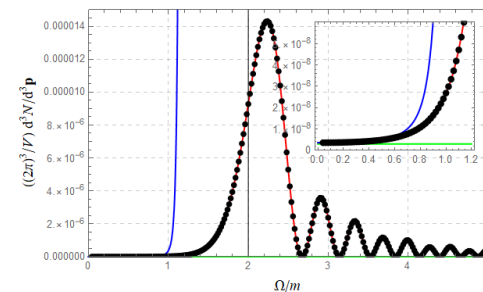
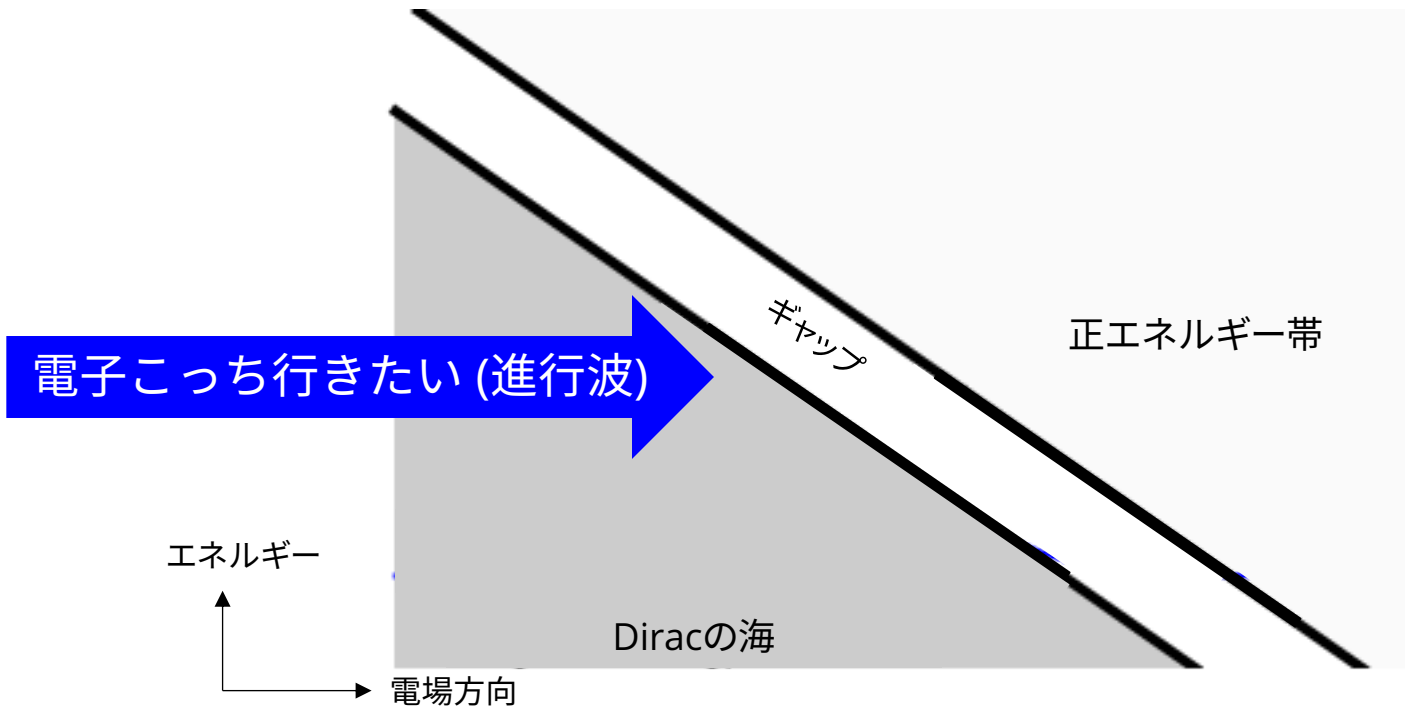
\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

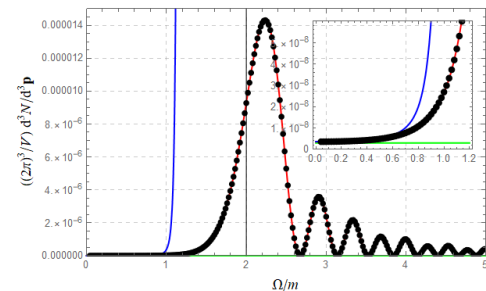
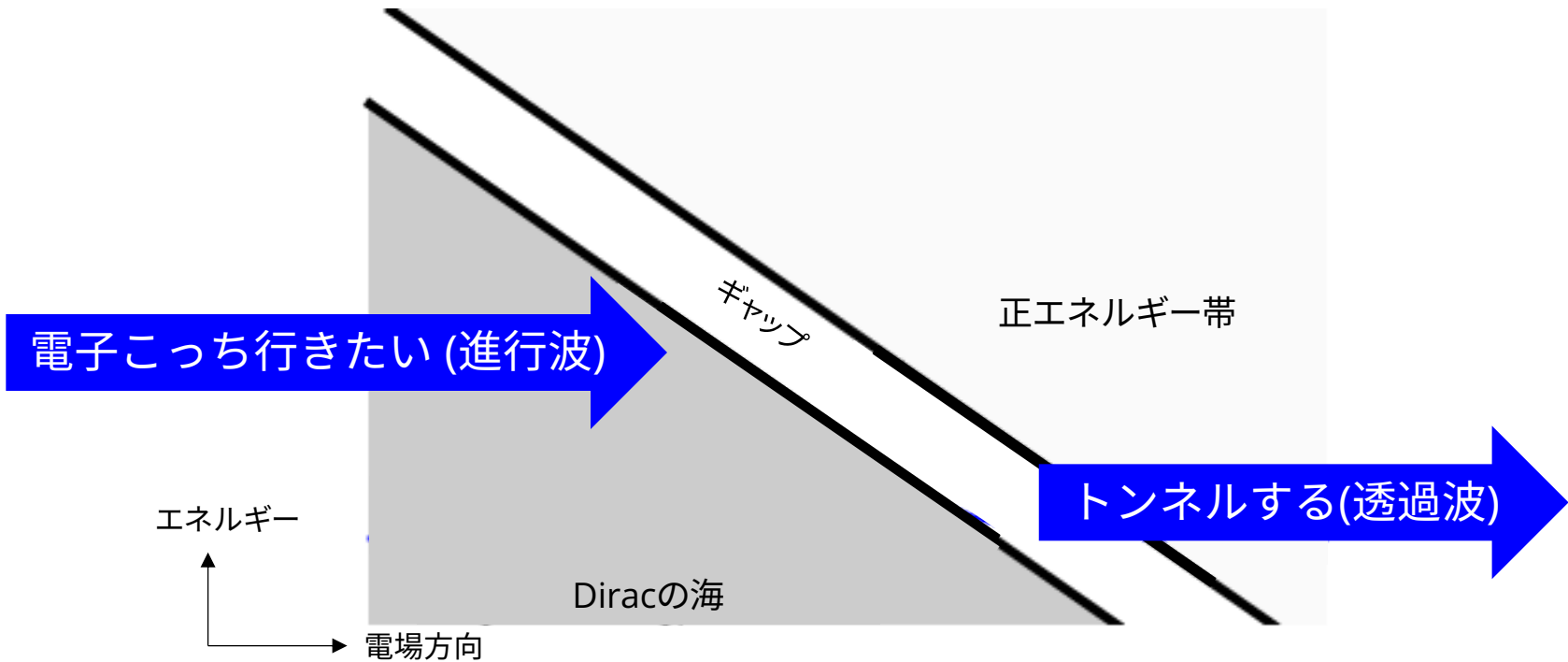
\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

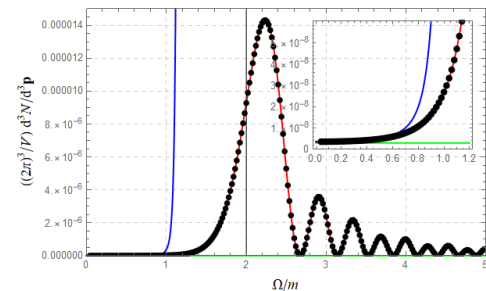
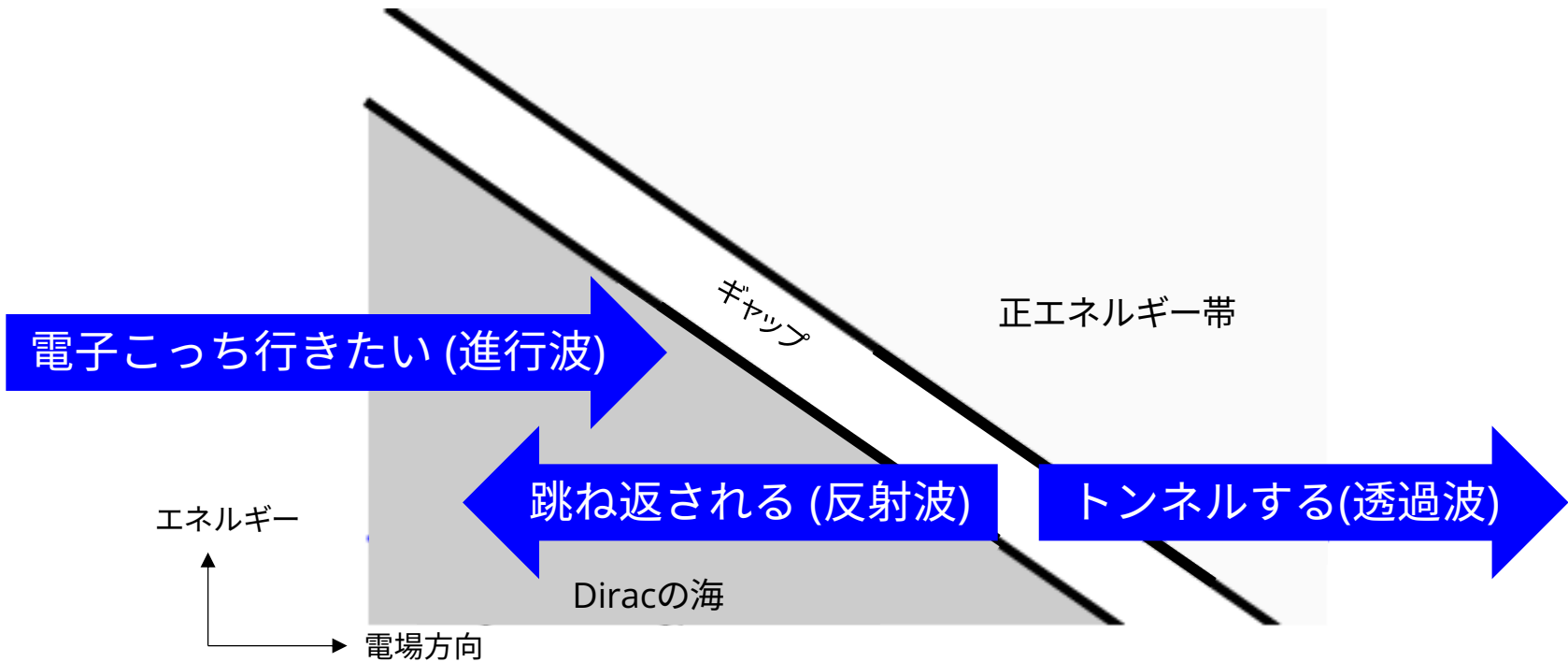
\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

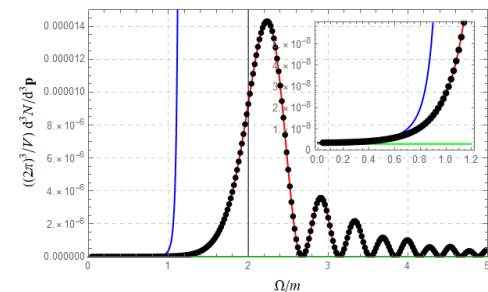
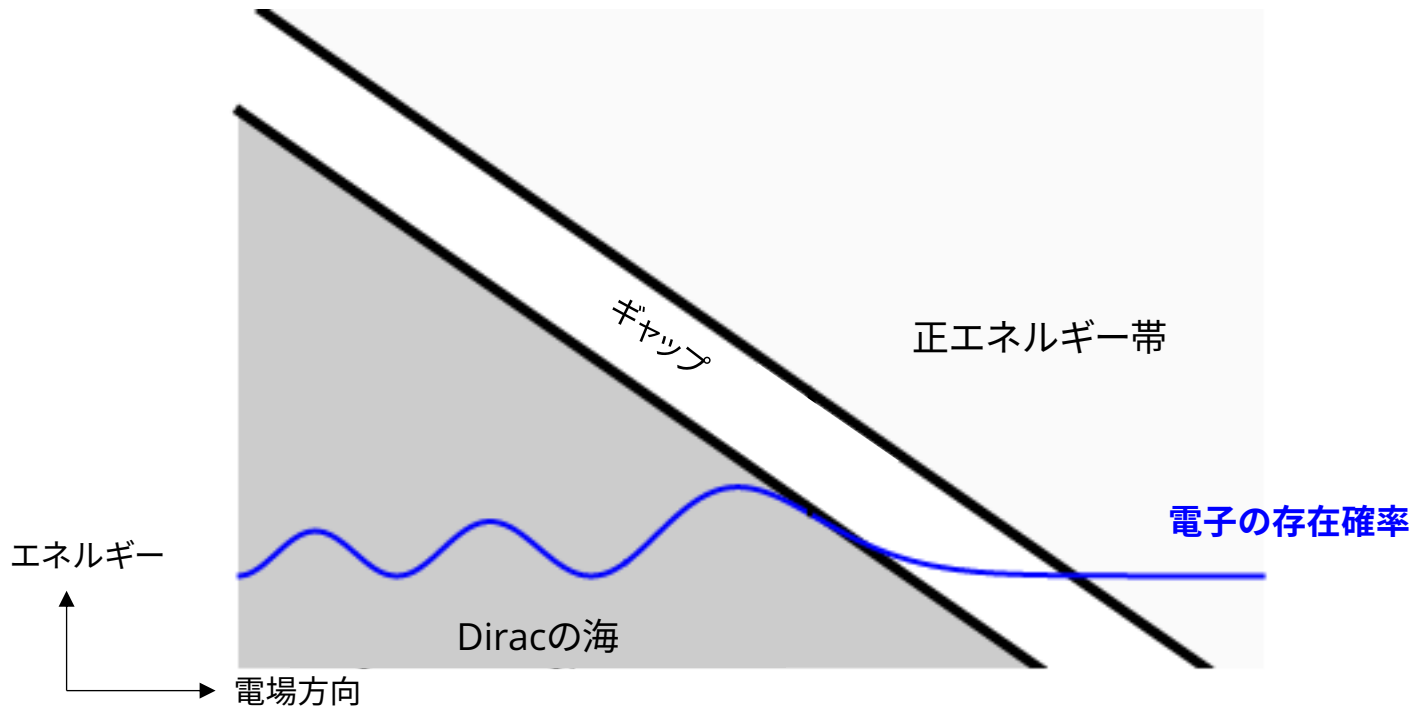
\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

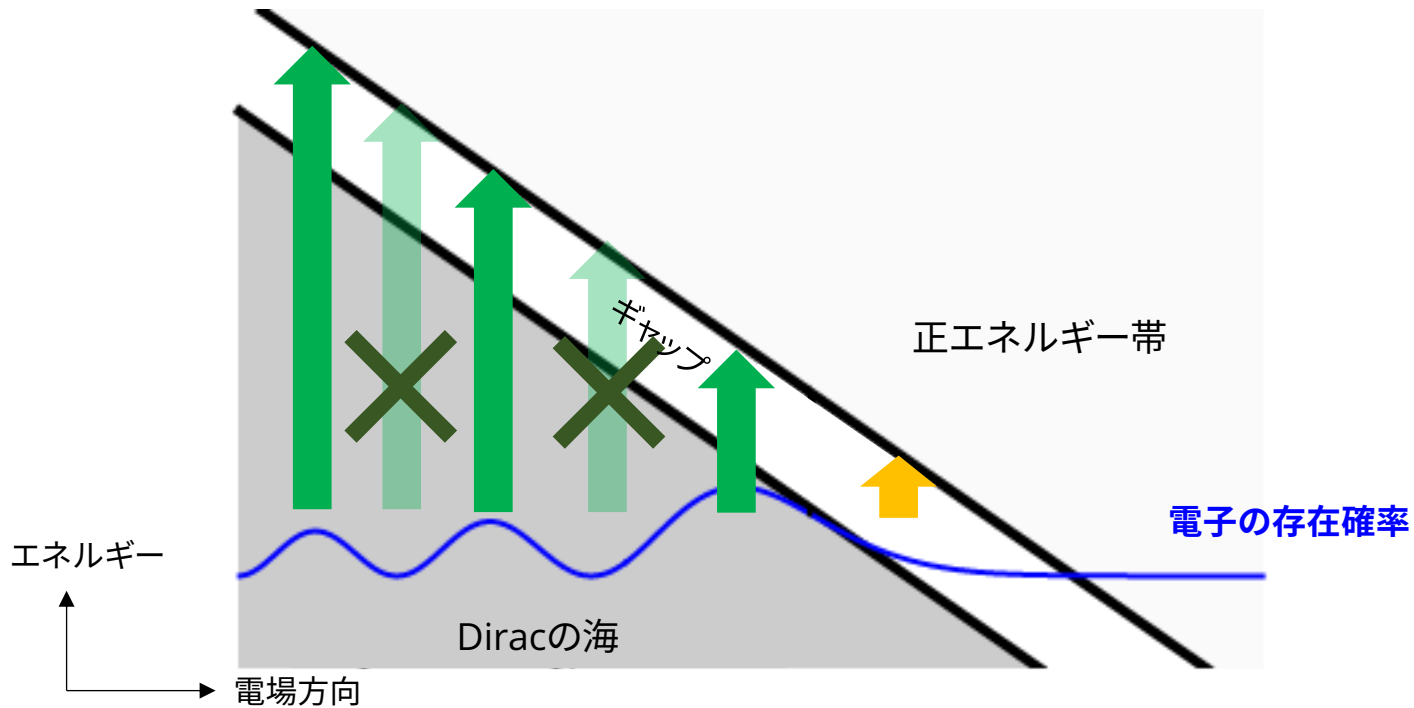
\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



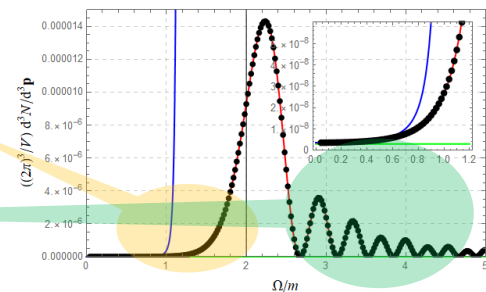
直接検証 (3/3): 真空のゆがみ

高強度場中では真空 (\approx Diracの海) はゆがむ (= 真空偏極)

\Leftarrow 動的にアシストされたSchwinger機構の粒子数スペクトルに強く反映



- 量子トンネリング \Rightarrow 粒子生成の増大
- 量子反射 \Rightarrow 粒子生成の振動

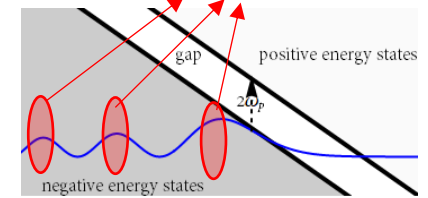


間接検証: 真空のゆがみ \Rightarrow すべての物理過程に影響

真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、真空上で起こるすべての物理過程に影響

\Rightarrow 粒子数を直接みなくても、ほかの物理量から「間接的」に Schwinger機構が調べられても良い

確率密度が大きい \Rightarrow より影響

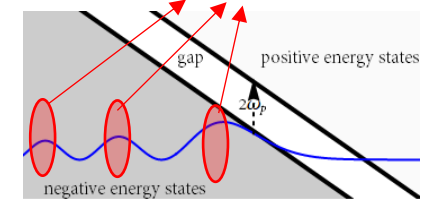


間接検証: 真空のゆがみ \Rightarrow すべての物理過程に影響

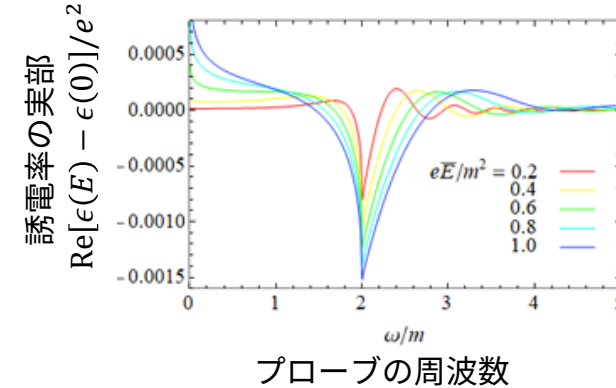
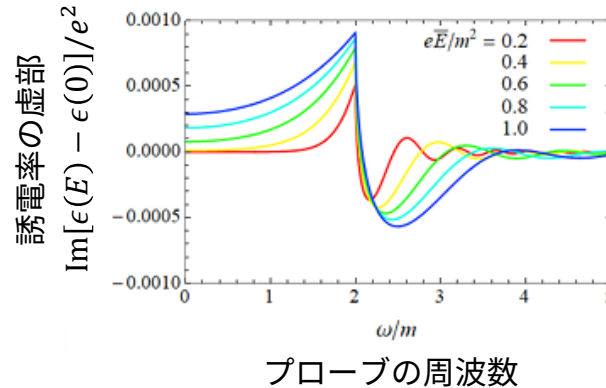
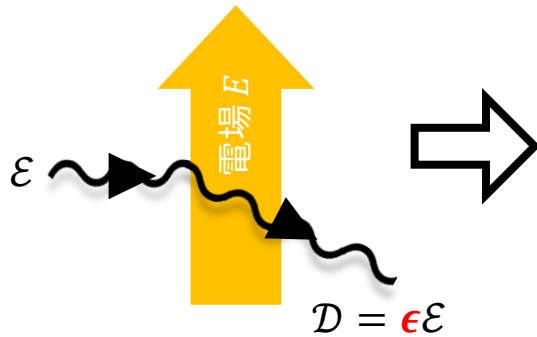
真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、真空上で起こるすべての物理過程に影響

\Rightarrow 粒子数を直接みなくても、ほかの物理量から「間接的」に Schwinger機構が調べられても良い

確率密度が大きい \Rightarrow より影響



例) 強い電場中の誘電率 ϵ [HT, Ironside (2023)]



- 真空の振動的なゆがみによって、誘電率 (\approx 光子の伝搬) も振動的にゆがむ
 \Rightarrow 誘電率の測定 \Rightarrow 真空のゆがみがわかる \Rightarrow Schwinger機構の間接的検証
 * 理論的にも、虚部が動的にアシストされたSchwinger機構による粒子数と直接対応していると証明可
- 定量的な話: $\omega \sim 2m_e \sim 1 \text{ MeV}$ の光源 (assisted Schwingerと違い、コヒーレントでなくてもよい) があれば
 $|\Delta\epsilon| \sim 10^{-2}\%$ for PWレーザー (\leftarrow 有限周波数の効果で、既存のEuler-Heisenbergの予言 $|\Delta\epsilon_{\text{EH}}| \sim 10^{-5}\%$ よりも遥かに大きい)

\Rightarrow Schwinger機構が直接検証よりも間接的検証の方が簡単な可能性はある

今日の話

(1) 導入: 「高強度場物理」と「Schwinger機構」

(2) いろいろなアイデアの紹介

(3) まとめ・議論

まとめ

現状: レーザーでの実験的検証はまだ難しそう...

しかし: ここ10年でいろんなアイデアが生まれたので、
みんな (理論・実験・他分野) で議論する良い時期

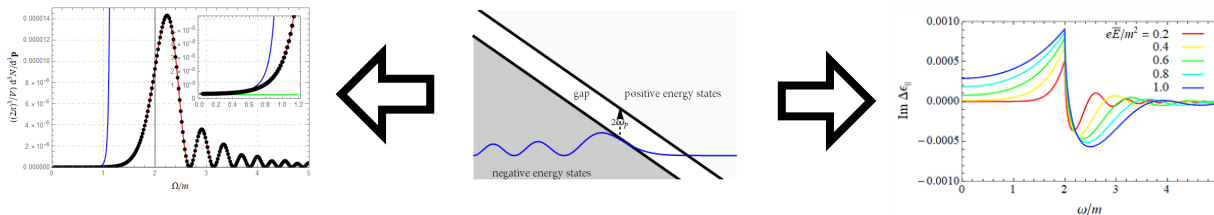
なので: 今日の目的 = 議論材料を提供する

内容: (1) 導入: 「高強度場物理」と「Schwinger機構」

- 高強度場物理は、レーザーに限らず広い物理にとって楽しく、またタイムリー
- Schwinger機構のPWレーザーでの直接検証は「素朴」には絶望的 (10^{3500} 年かかる) なので「工夫」が必須

(2) いろんなアイデアの紹介

- 直接検証のアイデア例: 動的にアシストされたSchwinger機構
- 間接検証のアイデア例: 真空の誘電率



(3) まとめ

- 決定打はなく、もう1工夫以上は要る (例: 高速光源の開発、ほかのアイデアとの統合、...)
- が、少なくともSchwinger機構の実験的検証はもはや超非現実的ではない