

強い電磁場の物理の最近の発展

(Schwinger機構の研究を中心に)

田屋 英俊

所属: 慶應大

専門: 原子核理論、特に極限状況の物理

今日の話

Q: 純粋な疑問: めちゃくちゃ強い光があると何が起こるのだろう？

LED

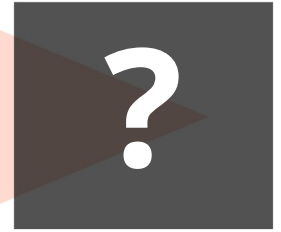
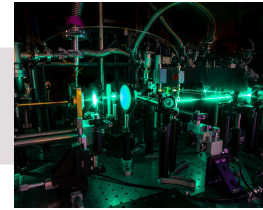
虫眼鏡

溶接

物性での
THzレーザー

ギネス記録

???



HERCULES @ USA (2008)

$$I \sim 10^{-5} \text{ W/cm}^2$$

$$10^2 \text{ W/cm}^2$$

$$10^6 \text{ W/cm}^2$$

$$10^{10} \text{ W/cm}^2$$

$$10^{22} \text{ W/cm}^2$$

$$\text{or } eE \sim 10^{-1} \text{ eV/cm}$$

$$10^2 \text{ eV/cm}$$

$$10^4 \text{ eV/cm}$$

$$10^6 \text{ eV/cm}$$

$$10^{12} \text{ eV/cm}$$

$$\sim (10^{-3} \text{ eV})^2$$

$$(10^{-2} \text{ eV})^2$$

$$(10^{-1} \text{ eV})^2$$

$$(1 \text{ eV})^2$$

$$(1 \text{ keV})^2$$

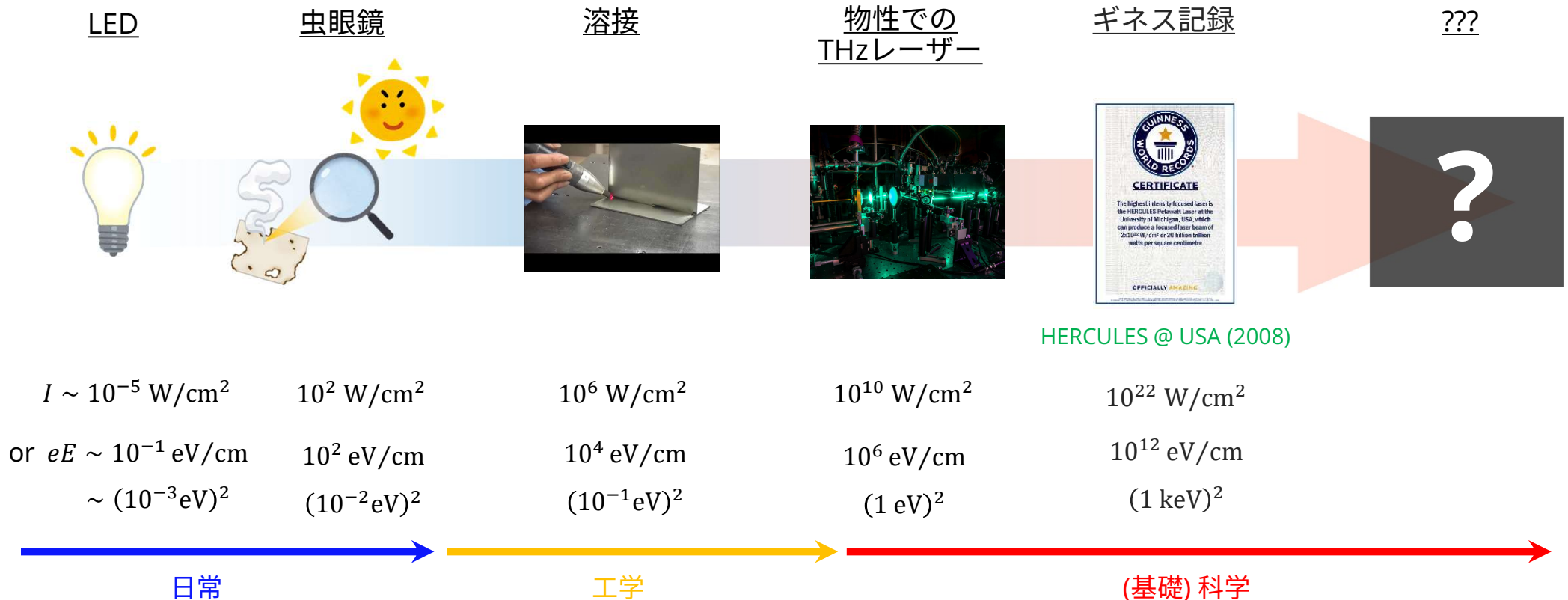
日常

工学

(基礎) 科学

今日の話

Q: 純粋な疑問: めちゃくちゃ強い光があると何が起こるのだろう？



A: 真空 (=物質がない「無」の空間) が、

強い電磁場でゆがんで/壊れてしまって、非自明な物理的応答を返す

⇒ 今日の目的: そういう「強い電磁場」による「真空の物理」をレビュー

目次

1. 強い電磁場の物理の概観

実験・観測できるようになりつつあって、にわかに活気づいている

2. Schwinger機構の最近の(田屋の)発展

時間依存電場におけるSchwinger機構

強い電場中のQEDの真空構造

3. まとめ

目次

1. 強い電磁場の物理の概観

実験・観測できるようになりつつあって、にわかに活気づいている

2. Schwinger機構の最近の(田屋の)発展

時間依存電場におけるSchwinger機構

強い電場中のQEDの真空構造

3. まとめ

強い電磁場があると何が違うか？



真空

強い電磁場があると何が違うか？



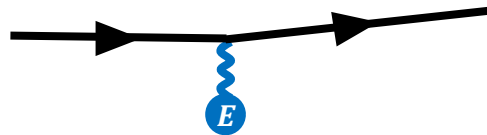
真空

弱い電磁場 ($eE/m^2 \ll 1$)

強い電磁場 ($eE/m^2 \gg 1$)



強い電磁場があると何が違うか？



真空

弱い電磁場 ($eE/m^2 \ll 1$)

強い電磁場 ($eE/m^2 \gg 1$)

摂動的な物理

⇒ 理論・実験ともに
よくわかっている

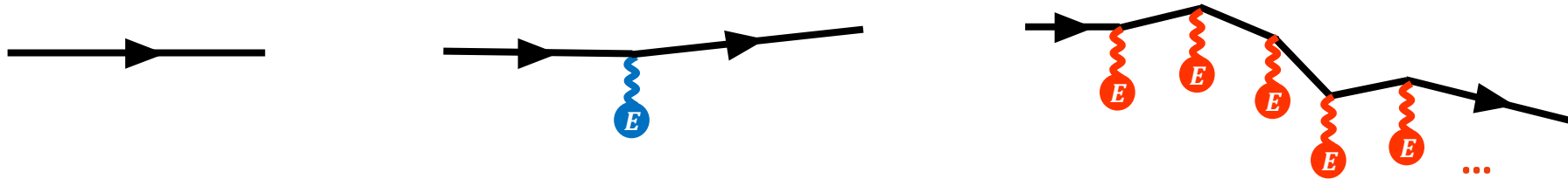
e.g., 電子の異常磁気モーメント

$$\alpha^{-1}(\text{theor.}) = 137.03599914 \dots$$

$$\alpha^{-1}(\text{exp.}) = 137.03599899 \dots$$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

強い電磁場があると何が違うか？



真空

弱い電磁場 ($eE/m^2 \ll 1$)

強い電磁場 ($eE/m^2 \gg 1$)

摂動的な物理

⇒ 理論・実験ともに
よくわかっている

e.g., 電子の異常磁気モーメント

$$\alpha^{-1}(\text{theor.}) = 137.03599914 \dots$$

$$\alpha^{-1}(\text{exp.}) = 137.03599899 \dots$$

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

非摂動的な物理

⇒ 実験的に人類未踏の領域
呼応して、理論も未成熟

(注: 今日は話さないが、電磁場じゃなくて、一般の強い「場」でも上の/これからの議論は本質的に同じ)

いつ「強い」か？

- **臨界強度: 電磁場強度が、系の典型的なエネルギースケールを超えるとき**

QEDなら、臨界強度 $eE \gtrsim m_e^2 \sim (1 \text{ MeV})^2 \sim 10^{29} \text{ W/cm}^2$

QCDなら、臨界強度 $eE \gtrsim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2 \sim 10^{36} \text{ W/cm}^2$

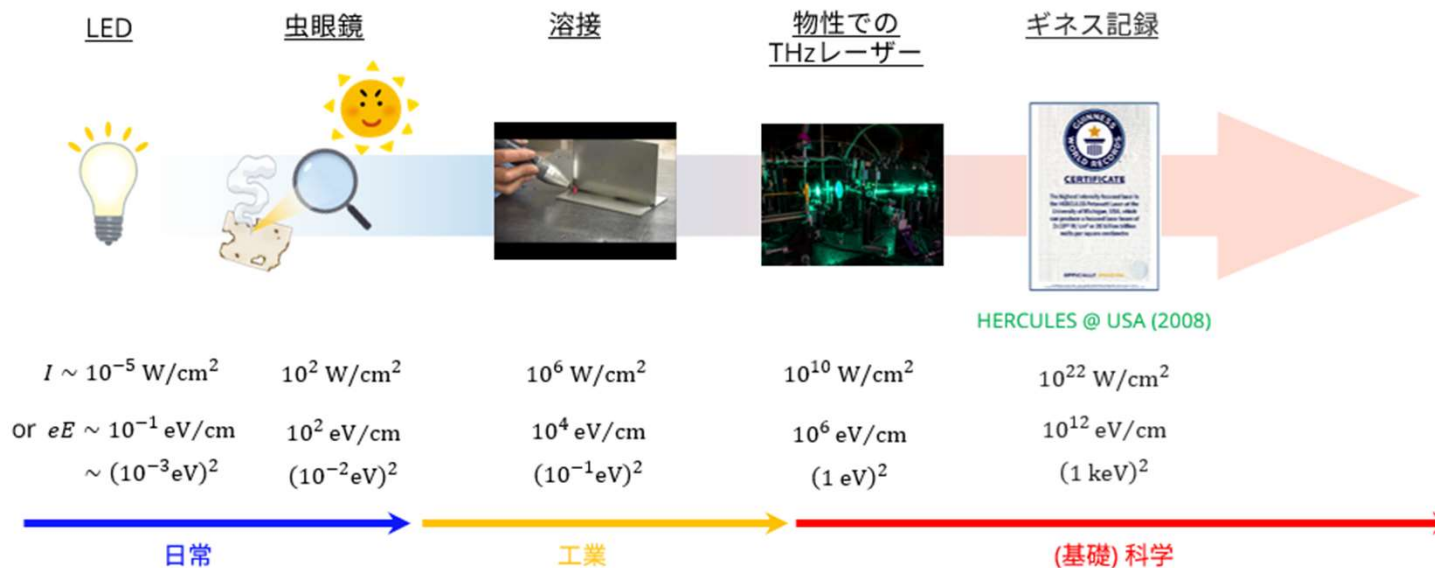
いつ「強い」か？

- **臨界強度: 電磁場強度が、系の典型的なエネルギースケールを超えるとき**

QEDなら、臨界強度 $eE \gtrsim m_e^2 \sim (1 \text{ MeV})^2 \sim 10^{29} \text{ W/cm}^2$

QCDなら、臨界強度 $eE \gtrsim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2 \sim 10^{36} \text{ W/cm}^2$

- **20世紀 (~21世紀初頭) の実験技術ではぜんぜん無理だった**



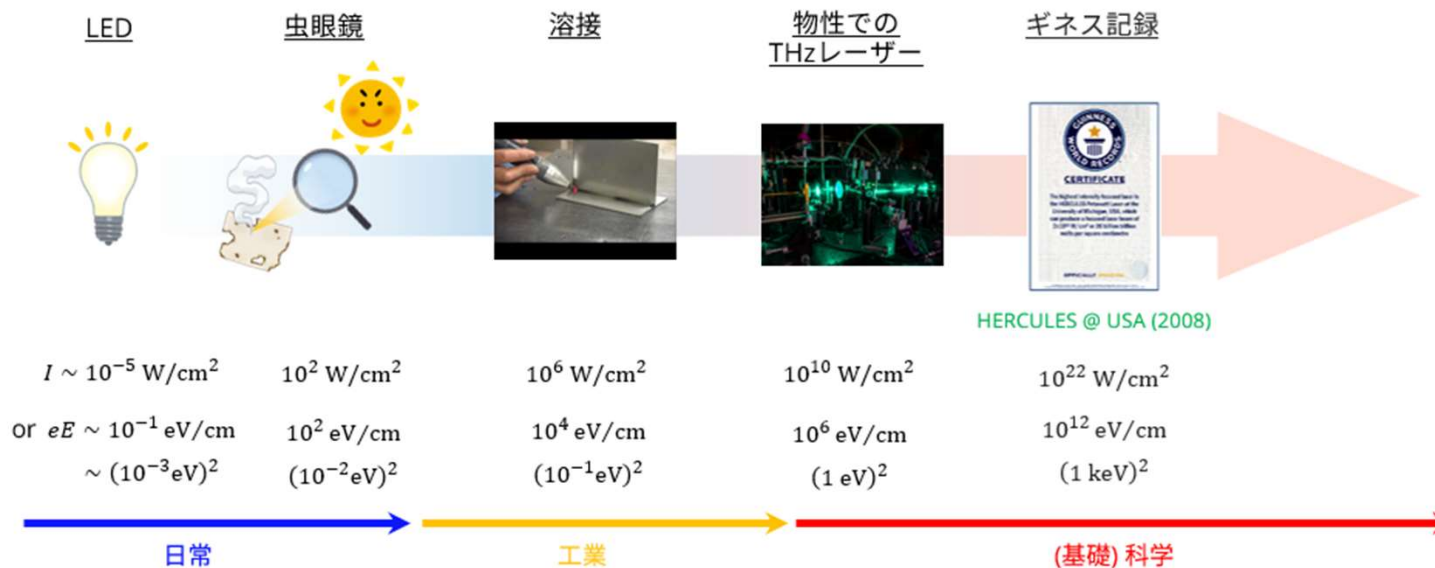
いつ「強い」か？

- **臨界強度: 電磁場強度が、系の典型的なエネルギースケールを超えるとき**

QEDなら、臨界強度 $eE \gtrsim m_e^2 \sim (1 \text{ MeV})^2 \sim 10^{29} \text{ W/cm}^2$

QCDなら、臨界強度 $eE \gtrsim \Lambda_{\text{QCD}}^2 \sim (100 \text{ MeV})^2 \sim 10^{36} \text{ W/cm}^2$

- **20世紀 (~21世紀初頭) の実験技術ではぜんぜん無理だった**

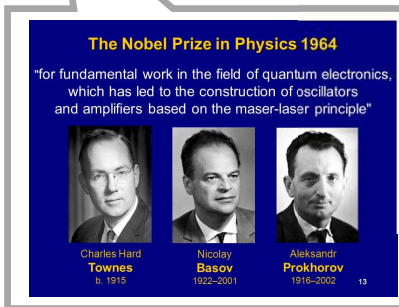
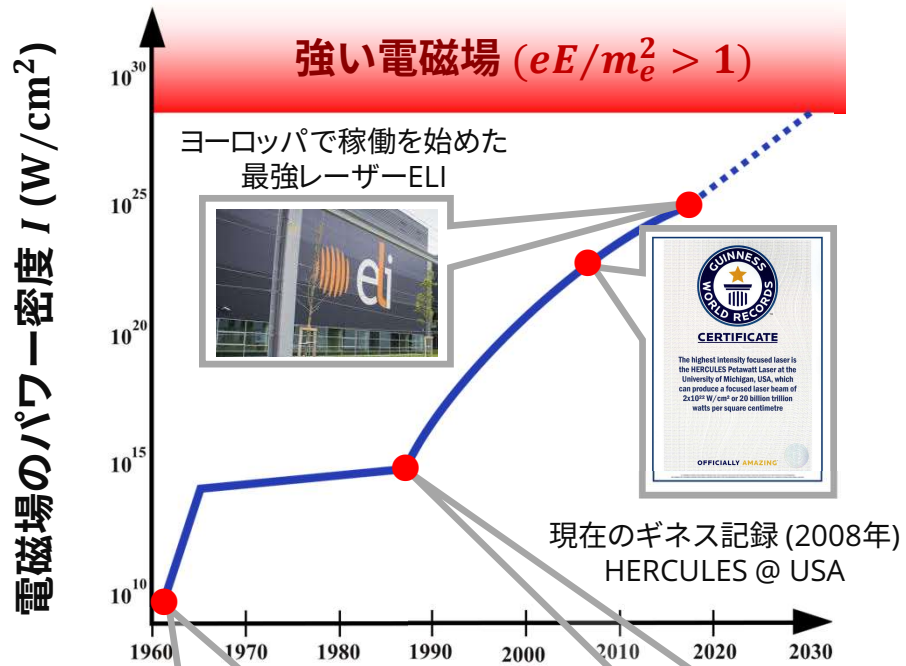


しかし、今まさに状況が変りつつある ⇒ 強い電磁場の物理は今まさにタイムリー

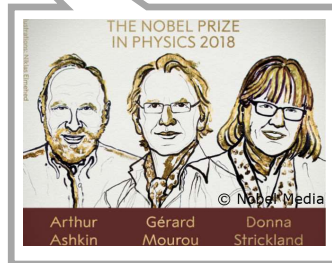
今まさに強い電磁場の実験・観測が可能になりつつある

今まさに強い電磁場の実験・観測が可能になりつつある

高強度レーザー



レーザーの発明
(1964年ノーベル賞)



レーザー増幅法(CPA法)の開発
(2018年ノーベル賞)

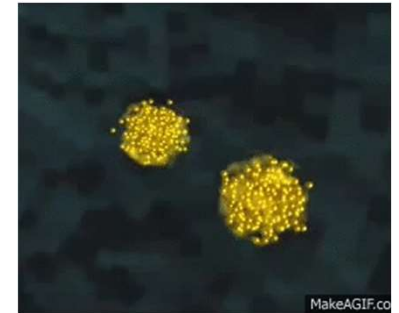
素核宇の極限系

重イオン衝突

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

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

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

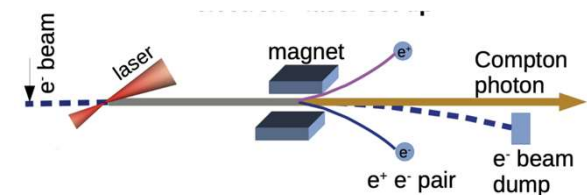


電子加速器 + レーザー

数年くらいで開始: LUXE @ DESY, FACET-II @ SLAC

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

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

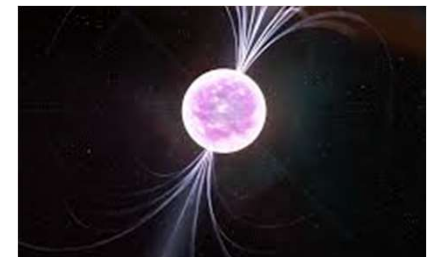


コンパクト星: マグネター

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

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

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



蛇足: 重イオン衝突の電磁場

衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 2 - 10 \text{ GeV}$ 程度の中間エネルギー帯がおもしろそう

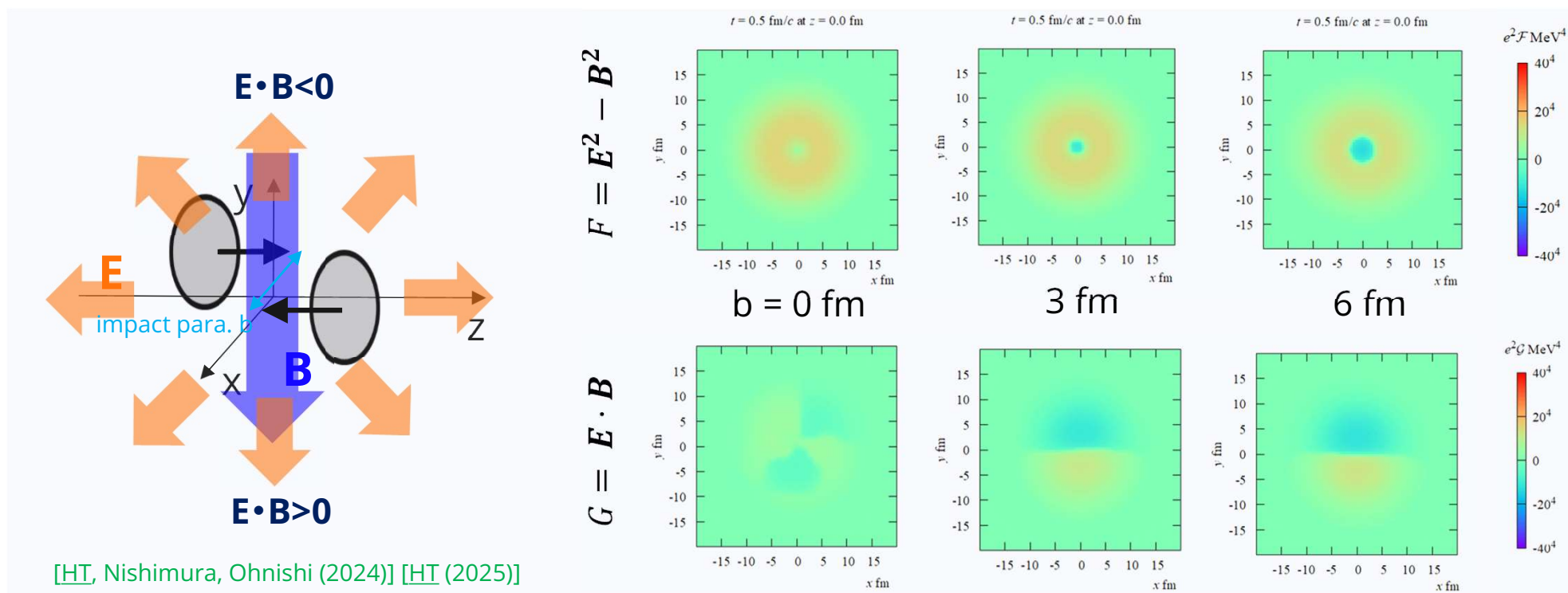
- 利点: 臨界強度を超えて、十分長生きな唯一の系

$$F := E^2 - B^2 > 0, G := E \cdot B \neq 0$$

	高強度レーザー	マグネター	高エネルギー重イオン	中間エネルギー重イオン
電磁場配位	割と自由	$F < 0, G = 0$	$F < 0, G = 0$	$F > 0, G \neq 0$
強度	subcritical	supercritical	far-supercritical	supercritical
寿命	super-long	super-long	super-short	long

- 数値計算による推定 (w/ ハドロン輸送模型JAM)

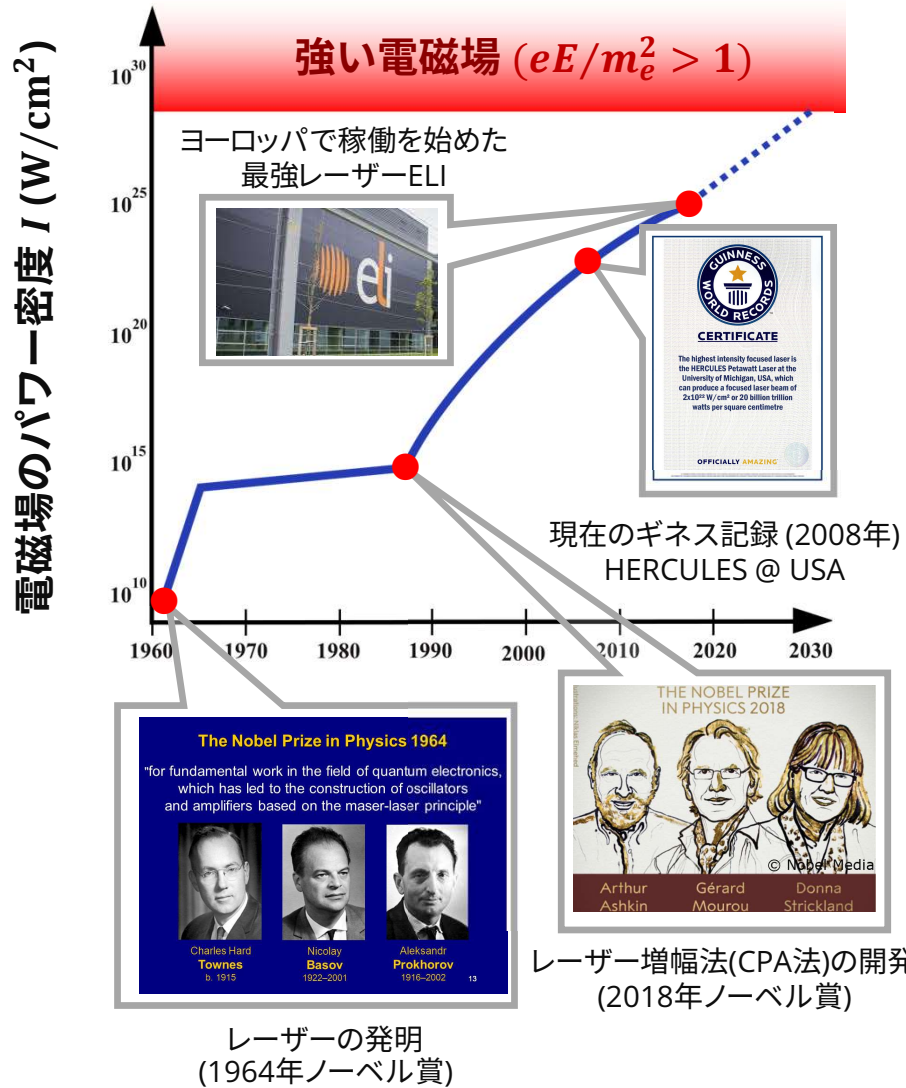
@ $\sqrt{s_{NN}} = 5.2 \text{ GeV}$



- 中間エネルギー重イオン衝突を強い電磁場の物理の新しい舞台として考えると楽しい
- 逆に、中間エネルギー重イオン衝突における高密度物理にも影響するかも

今まさに強い電磁場の実験・観測が可能になりつつある

高強度レーザー



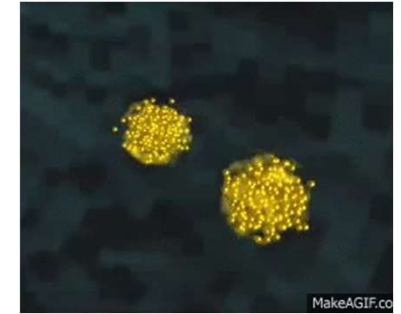
素核宇の極限系

• 重イオン衝突

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

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

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

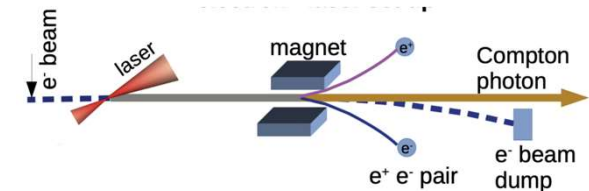


• 電子加速器 + レーザー

数年くらいで開始: LUXE @ DESY, FACET-II @ SLAC

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

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

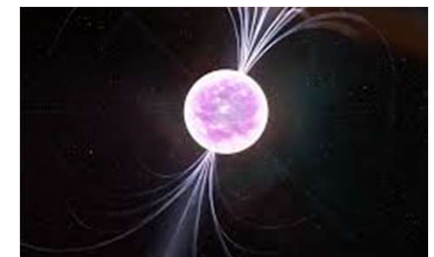


• コンパクト星: マグネター

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

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

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



強い電磁場の物理は今まさにタイムリー

何が起こるか？

- **いろいろ提案されている**

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

例) 新しい素過程(光子分裂、真空複屈折、...)、高次高調波発生、スピン流生成、...

QCD相図の変更、異常輸送(カイラル磁気効果)、標準理論を超えた物理のプローブ、...

何が起こるか？

- **いろいろ提案されている**

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

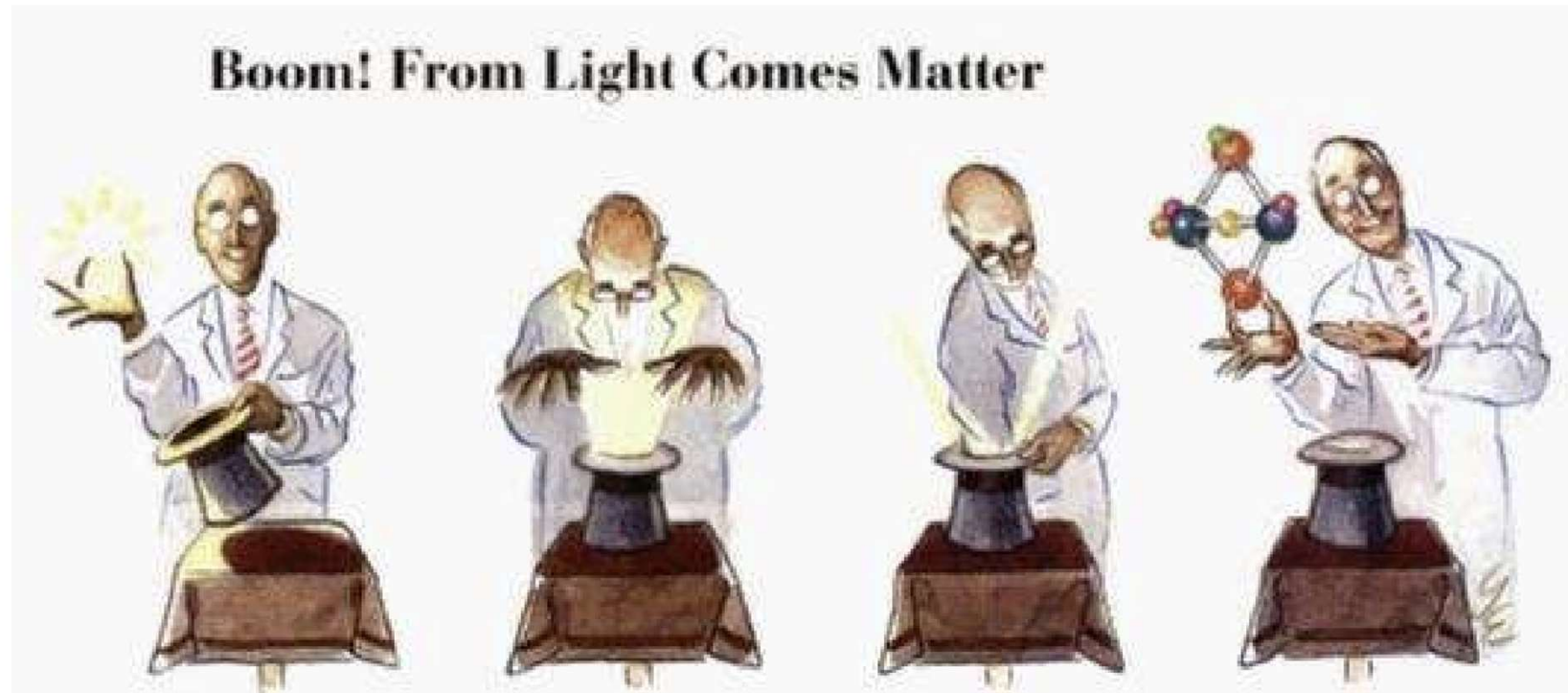
例) 新しい素過程(光子分裂、真空複屈折、...)、高次高調波発生、スピン流生成、...

QCD相図の変更、異常輸送(カイラル磁気効果)、標準理論を超えた物理のプローブ、...

- **最もおもしろい予想の1つが、Schwinger機構**

[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)]
[Schwinger (1951)]

= 強い電場があると、真空は粒子生成で壊れてしまう



何が起こるか？

• いろいろ提案されている

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

例) 新しい素過程(光子分裂、真空複屈折、...)、高次高調波発生、スピン流生成、...

QCD相図の変更、異常輸送(カイラル磁気効果)、標準理論を超えた物理のプローブ、...

• 最もおもしろい予想の1つが、Schwinger機構

[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)]
[Schwinger (1951)]

= 強い電場があると、真空は粒子生成で壊れてしまう



何が起こるか？

• いろいろ提案されている

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

例) 新しい素過程(光子分裂、真空複屈折、...)、高次高調波発生、スピン流生成、...

QCD相図の変更、異常輸送(カイラル磁気効果)、標準理論を超えた物理のプロブ、...

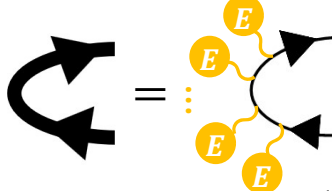
• 最もおもしろい予想の1つが、Schwinger機構

[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)]
[Schwinger (1951)]

= 強い電場があると、真空は粒子生成で壊れてしまう



理論: 定常電場のとき (+ 電場へのバックリアクションや生成粒子間相互作用は無視) のときは割とよくわかってる

• 雑に言えば、 = ... みたいな電場中の $|0; in\rangle \rightarrow |e^-e^+; out\rangle$ の散乱振幅を計算する

• 結果: Schwingerの公式
$$N = \frac{(eE)^2 VT}{(2\pi)^3} \times \exp\left[-\pi \frac{m^2}{eE}\right]$$

[Schwinger (1951)] [Nikishov (1969)]

$\sim \exp[-\# \times (\text{ギャップの長さ}) \times (\text{ギャップの高さ})]$

Schwinger機構の研究の現状

逆に、Schwingerの公式くらいしか確立しているものがない
⇒ 現状: Schwingerの公式を超える努力をしている

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

• 時空間に依存した非一様な電磁場

- レーザー場をどうデザインすれば、Schwinger機構が見えるのか? ⇒ dynamically assisted Schwinger 機構, 量子干渉効果, etc
- Schwinger機構にはどれくらいの時空間サイズの電場が要するのか? ⇒ ケルディッシュパラメータ, etc
- 電場の回転や偏光依存性は? ⇒ Twisted Schwinger effect, etc

• 実時間ダイナミクス

- 粒子はいつどうやって作られ、その後、どういう運動をするのか? ⇒ (超)断熱粒子描像, etc
- 粒子生成によって電場はどうやって遮蔽され、熱平衡化するのか? ⇒ プラズマ振動, QED cascade, 流体化, etc

• 輻射補正

- 真空が崩壊してることで新しく起こる放射はあるか? ⇒ 真空からの光子生成, 真空からの高次高調波発生, etc
- 輻射補正で臨界電場の値は変わるか? ⇒ Ritus conjecture, ([AdS/CFT](#)による) 電場強度の限界の予言, etc

• 粒子数以外の物理量

- 粒子数以外に楽しい観測量はあるか? ⇒ カイラリティ生成, 真空からのスピン流生成, etc

Schwinger機構の研究の現状

逆に、Schwingerの公式くらいしか確立しているものがない
⇒ 現状: Schwingerの公式を超える努力をしている

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

• 時空間に依存した非一様な電磁場

- レーザー場をどうデザインすれば、Schwinger機構が見えるのか? ⇒ dynamically assisted Schwinger 機構, 量子干渉効果, etc
- Schwinger機構にはどれくらいの時空間サイズの電場が要するのか? ⇒ ケルディッシュパラメータ, etc
- 電場の回転や偏光依存性は? ⇒ Twisted Schwinger effect, etc

• 実時間ダイナミクス

- 粒子はいつどうやって作られ、その後、どういう運動をするのか? ⇒ (超)断熱粒子描像, etc
- 粒子生成によって電場はどうやって遮蔽され、熱平衡化するのか? ⇒ プラズマ振動, QED cascade, 流体化, etc

• 輻射補正

- 真空が崩壊してることで新しく起こる放射はあるか? ⇒ 真空からの光子生成, 真空からの高次高調波発生, etc
- 輻射補正で臨界電場の値は変わるか? ⇒ Ritus conjecture, (AdS/CFTによる) 電場強度の限界の予言, etc

• 粒子数以外の物理量

- 粒子数以外に楽しい観測量はあるか? ⇒ カイラリティ生成, 真空からのスピン流生成, etc

目次

1. 強い電磁場の物理の概観

実験・観測できるようになりつつあって、にわかに活気づいている

2. Schwinger機構の最近の(田屋の)発展

時間依存電場におけるSchwinger機構

強い電場中のQEDの真空構造

3. まとめ

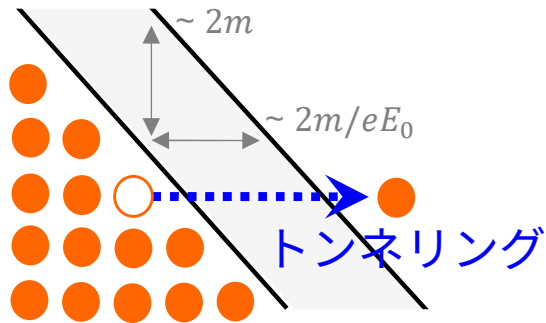
電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

強さ eE_0 、周波数 Ω を持った時間依存電場

電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

強さ eE_0 、周波数 Ω を持った時間依存電場

遅い \Rightarrow 非摂動トンネリング $N \sim \exp[\#/eE_0]$



$$\text{トンネリング時間 } \Delta t \sim \frac{2m}{eE_0}$$

\Rightarrow 電場は Δt よりも十分遅くないといけない

$$\Rightarrow \Omega^{-1} \gtrsim \Delta t$$

$$\Rightarrow 1 \gtrsim \frac{\Delta t}{\Omega^{-1}} = \frac{\Omega m}{eE_0} \equiv \gamma \text{ (Keldysh パラメータ)}$$

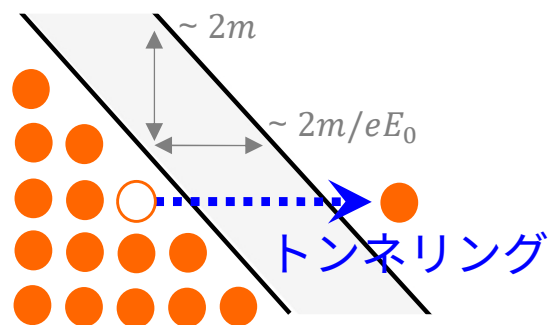
[Keldysh (1965)]

速い \Rightarrow 摂動的な光子散乱 $N \sim eE_0^{2n}$

電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

強さ eE_0 、周波数 Ω を持った時間依存電場

遅い \Rightarrow 非摂動トンネリング $N \sim \exp[\# / eE_0]$



$$\text{トンネリング時間 } \Delta t \sim \frac{2m}{eE_0}$$

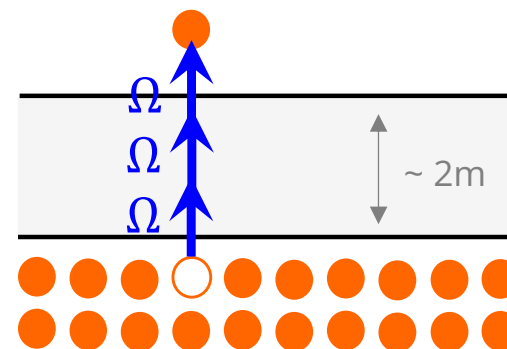
\Rightarrow 電場は Δt よりも十分遅くないといけない

$$\Rightarrow \Omega^{-1} \gtrsim \Delta t$$

$$\Rightarrow 1 \gtrsim \frac{\Delta t}{\Omega^{-1}} = \frac{\Omega m}{eE_0} \equiv \gamma \text{ (Keldysh パラメータ)}$$

[Keldysh (1965)]

速い \Rightarrow 摂動的な光子散乱 $N \sim eE_0^{2n}$



\Rightarrow 電場はインコヒーレントな光子として相互作用しだす

$\Rightarrow n\Omega > 2m$ となるときに粒子生成

(違う理解: 電場が短寿命だと、電場とDiracの海は有限回しか相互作用できない)

\Rightarrow 物質で起こる光電効果と本質的に同じ現象がQED真空でも起こる

最近の進展(1/5): 非摂動 ↔ 摂動的がまじめに調べられた

“相図”みたいなものがわかった

最近の進展(1/5): 非摂動 ↔ 摂動的がまじめに調べられた

“相図”みたいなものがわかった

• 理論: (1) 半古典近似 = \hbar 展開 (トランスシリーズ展開) $N = \sum_{n,m} N_{n,m} \hbar^n e^{-m \frac{S}{\hbar}} = (N_{0,1} + O(\hbar)) e^{-\frac{S}{\hbar}} + O(e^{-\frac{2S}{\hbar}})$

(2) 解ける場合と直接比べる [\[HT, Fujiii, Itakura \(2014\)\]](#)

[\[Brezin, Itzykson \(1970\)\]](#) [\[Popov \(1972\)\]](#)
[\[Berry \(1989\)\]](#) [\[Dunne, Shubert \(2005\)\]](#)
[\[HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai \(2020\)\]](#)

最近の進展(1/5): 非摂動 ↔ 摂動的がまじめに調べられた

“相図”みたいなものがわかった

- 理論: (1) 半古典近似 = \hbar 展開 (トランスシリーズ展開) $N = \sum_{n,m} N_{n,m} \hbar^n e^{-m \frac{S}{\hbar}} = (N_{0,1} + O(\hbar)) e^{-\frac{S}{\hbar}} + O(e^{-\frac{2S}{\hbar}})$

[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)]
 [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)]
 [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

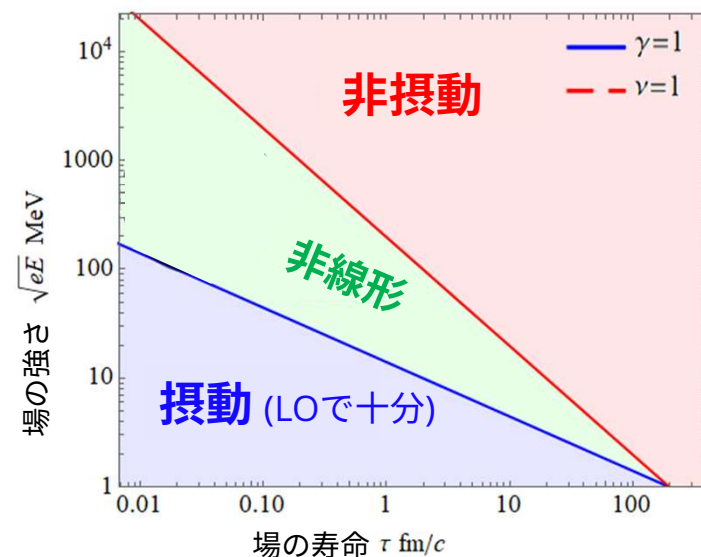
(2) 解ける場合と直接比べる [HT, Fujiii, Itakura (2014)]

- 2つの無次元量が効く

⇐ もともと3つの次元量 ($eE, \tau := 1/\Omega, m$) があるので

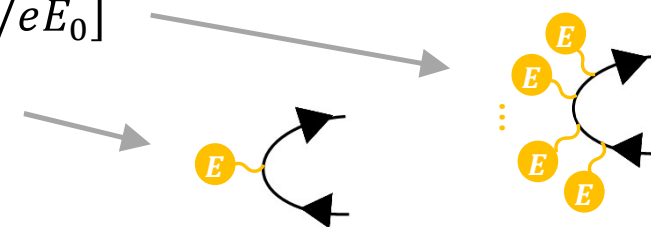
$$\gamma = \frac{m\Omega}{eE} : \text{Keldysh パラメータ}$$

$$\nu = \frac{eE\tau}{\Omega} = \frac{(\text{場がした仕事})}{(\text{1光子のエネルギー})} = (\text{過程に参与した光子数})$$



- $\gamma \ll 1, \nu \gg 1 \Rightarrow$ 非摂動的なSchwinger機構 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

- $\gamma \gg 1, \nu \ll 1 \Rightarrow$ 摂動的な多光子粒子生成 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$



最近の進展(1/5): 非摂動 ↔ 摂動的がまじめに調べられた

“相図”みたいなものがわかった

- 理論: (1) 半古典近似 = \hbar 展開 (トランスシリーズ展開) $N = \sum_{n,m} N_{n,m} \hbar^n e^{-m \frac{S}{\hbar}} = (N_{0,1} + O(\hbar)) e^{-\frac{S}{\hbar}} + O(e^{-\frac{2S}{\hbar}})$

[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)]
 [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)]
 [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

- (2) 解ける場合と直接比べる [HT, Fujiii, Itakura (2014)]

- 2つの無次元量が効く

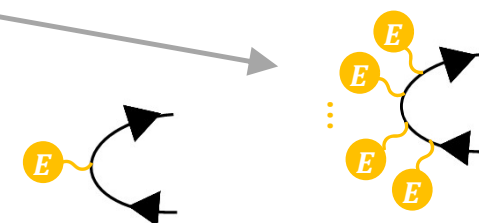
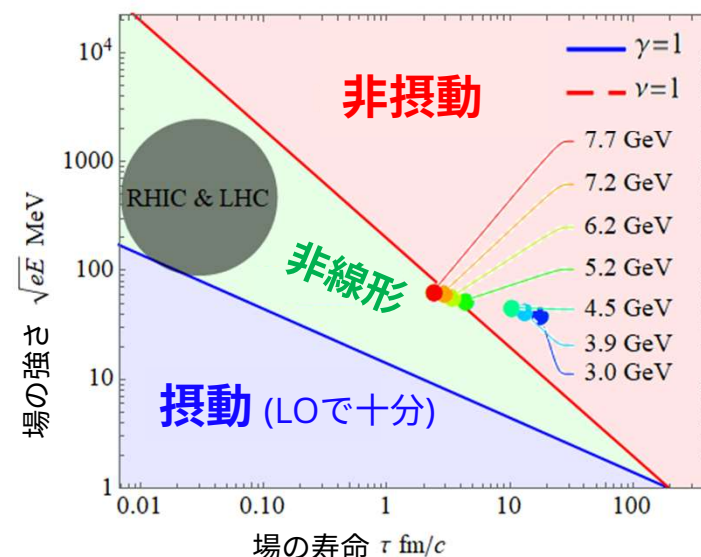
⇐ もともと3つの次元量 ($eE, \tau := 1/\Omega, m$) があるので

$$\gamma = \frac{m\Omega}{eE} : \text{Keldysh パラメータ}$$

$$\nu = \frac{eE\tau}{\Omega} = \frac{(\text{場がした仕事})}{(1\text{光子のエネルギー})} = (\text{過程に参与した光子数})$$

- $\gamma \ll 1, \nu \gg 1 \Rightarrow$ 非摂動的なSchwinger機構 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

$$\gamma \gg 1, \nu \ll 1 \Rightarrow \text{摂動的な多光子粒子生成 } N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$$



教訓: 電磁場の強さだけじゃなくて、その時空間プロファイルも大事

- 例) 高エネルギー重イオン衝突は電磁場は強いけど寿命が短すぎて、強い場の非摂動効果は見えなそう
- 中間エネルギーなら非摂動領域までいけるかも

最近の進展(2/5): 摂動的な粒子生成の重要性

電場が速くなると、素朴なSchwingerの公式からズレる

遅い (非摂動的) \Rightarrow 強い指数関数的な抑制 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

速い (摂動的) \Rightarrow 弱い冪的な抑制 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$

最近の進展(2/5): 摂動的な粒子生成の重要性

電場が速くなると、素朴なSchwingerの公式からズレル

遅い (非摂動的) \Rightarrow 強い指数関数的な抑制 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

速い (摂動的) \Rightarrow 弱い冪的な抑制 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$

教訓: (電場がそんなに強くないときは $eE_0 < m^2$) **速い電場の方がたくさん粒子を作る**

[[HT](#), Fujiii, Itakura (2014)] [[HT](#), Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

最近の進展(2/5): 摂動的な粒子生成の重要性

電場が速くなると、素朴なSchwingerの公式からズレる

遅い (非摂動的) \Rightarrow 強い指数関数的な抑制 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

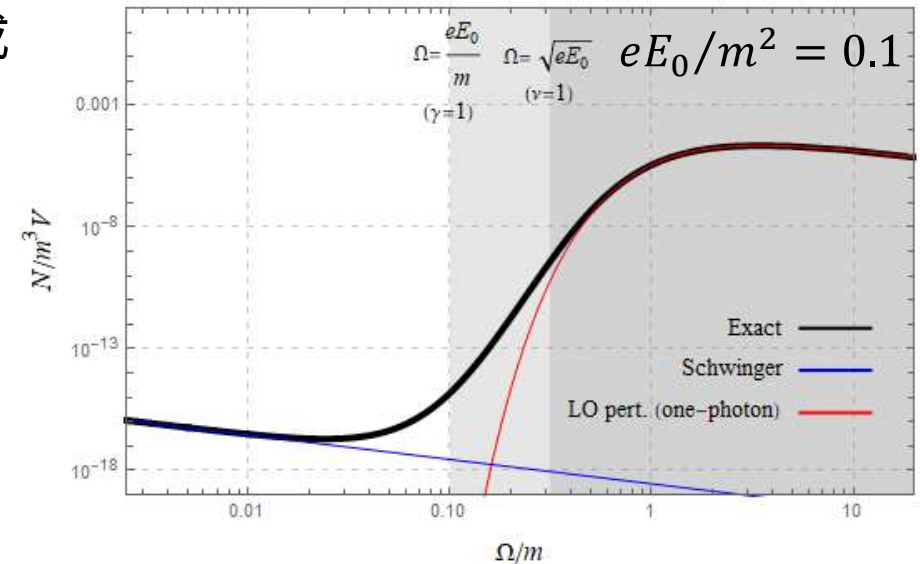
速い (摂動的) \Rightarrow 弱い冪的な抑制 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$

教訓: (電場がそんなに強くないときは $eE_0 < m^2$) **速い電場の方がたくさん粒子を作る**

[HT, Fujiii, Itakura (2014)] [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

具体例) 寿命 $\tau = 1/\Omega$ のパルス電場での粒子生成

$$\text{(Sauter電場)} \quad eE(t) = \frac{eE_0}{\cosh^2(\Omega t)}$$

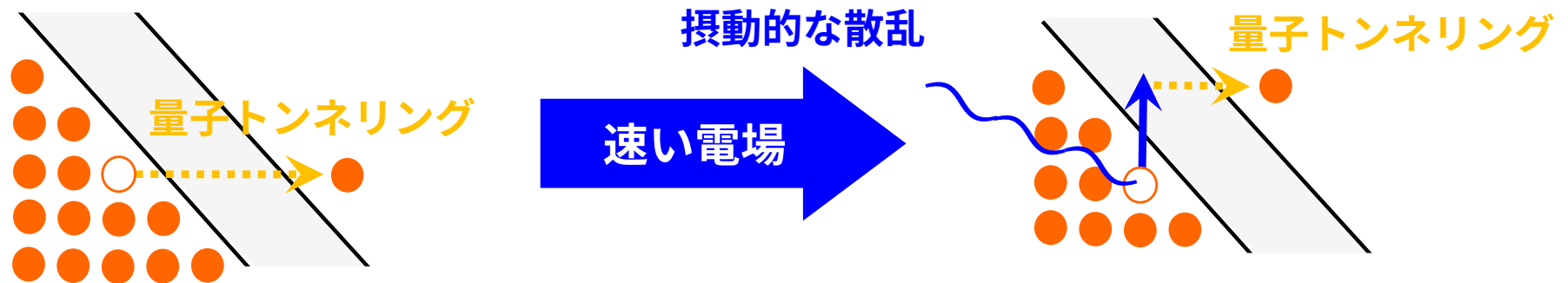


応用例) 弱い電場(例: レーザー)で粒子生成させたいなら、速い電場を利用すると良さそう
 \Rightarrow Dynamically assisted Schwinger 機構

最近の進展(3/5): Dynamically assisted Schwinger 機構

[Dunne, Gies, Schutzhold (2008), (2009)]
半導体のFranz-Keldysh効果のアナログ

速い電場を重ねれば、遅い電場が弱くても、粒子をたくさん作れる



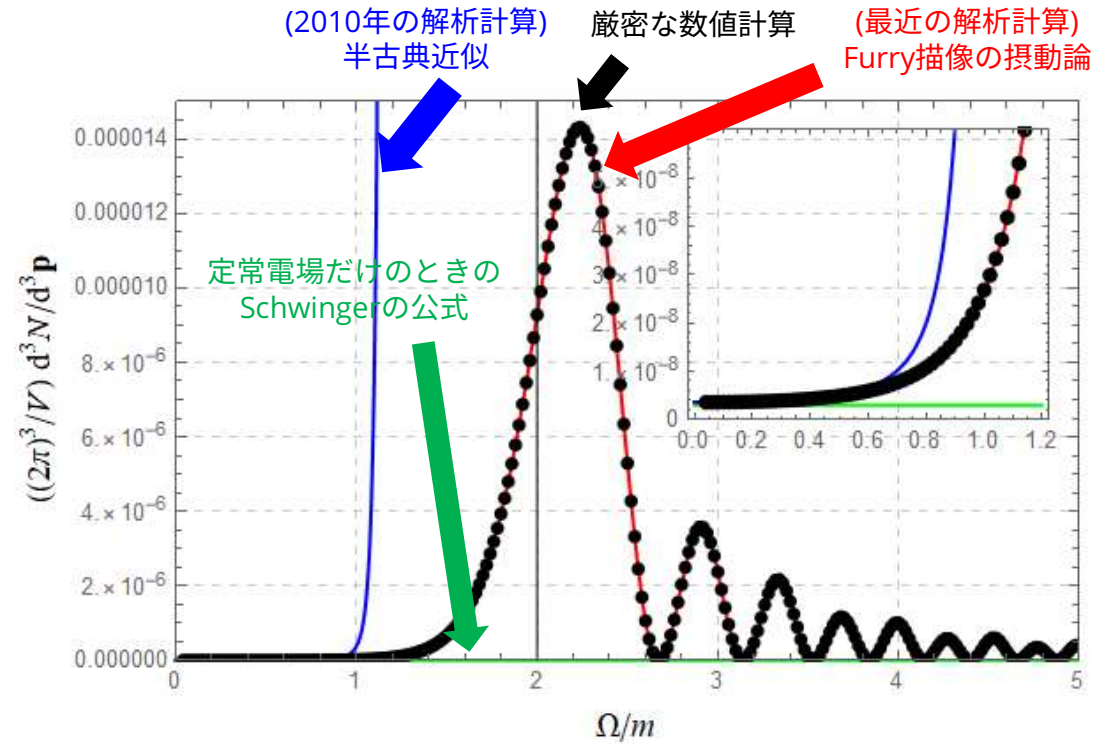
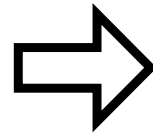
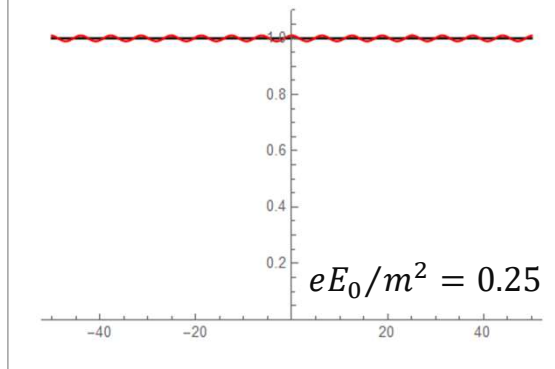
$$N \sim \exp[-\# \times (\text{ギャップの長さ}) \times (\text{ギャップの高さ})] \Rightarrow \text{粒子生成の増大}$$

摂動的な1光子散乱で減る

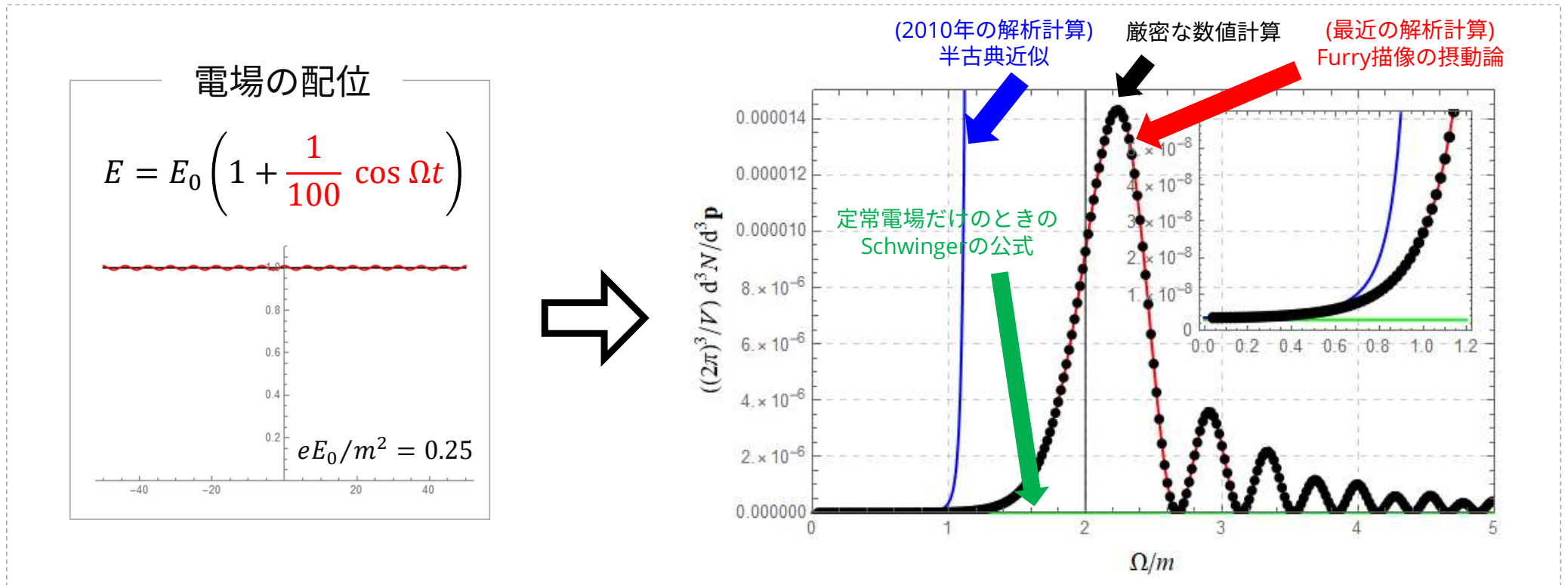
最近の進展(3/5): Dynamically assisted Schwinger 機構

電場の配位

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



最近の進展(3/5): Dynamically assisted Schwinger 機構



• 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 ← 強い電場中の Dirac sea の構造と関係 (次のスライド)

• 技術的に進展したこと

- 不安定な真空中の散乱理論の整備 (Furry描像の摂動論)

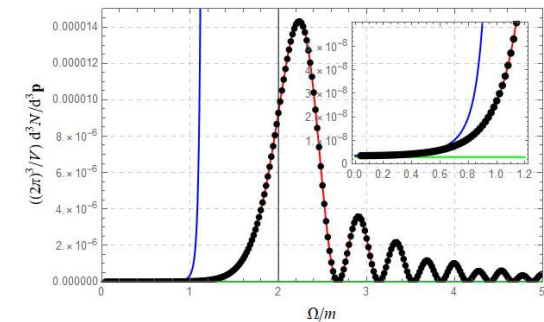
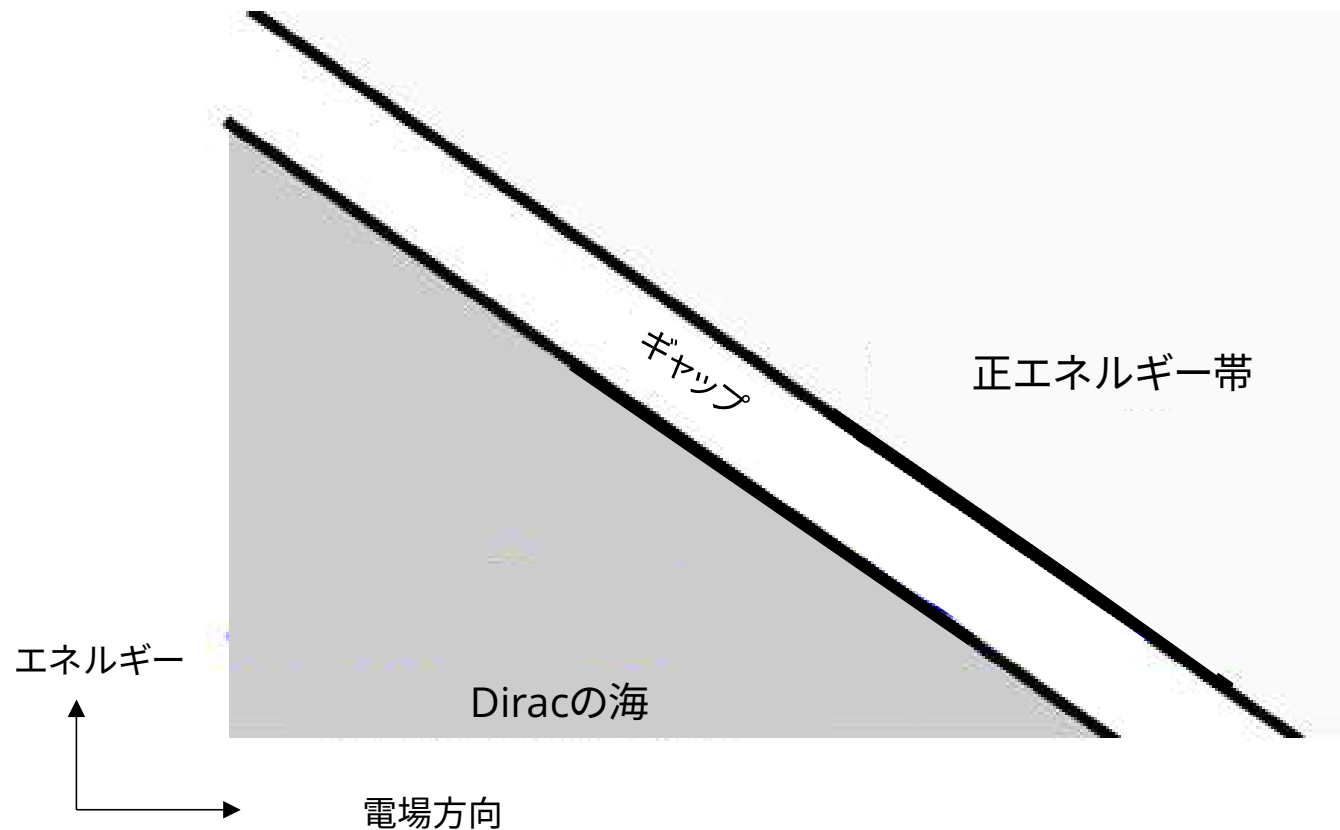
[HT, (2019)] [Huang, HT, (2019)]

$$N \simeq \left| \begin{array}{c} \text{Loop 1} + \text{Loop 2} + \dots \end{array} \right|^2$$

(Loop 2 contains a blue circle labeled '弱')

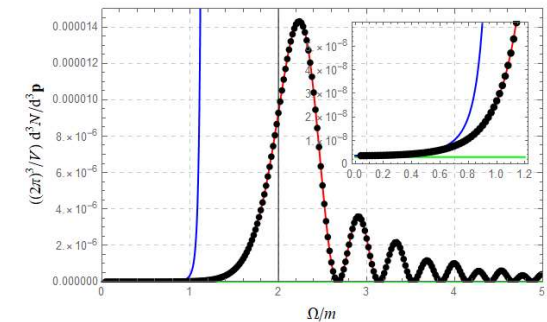
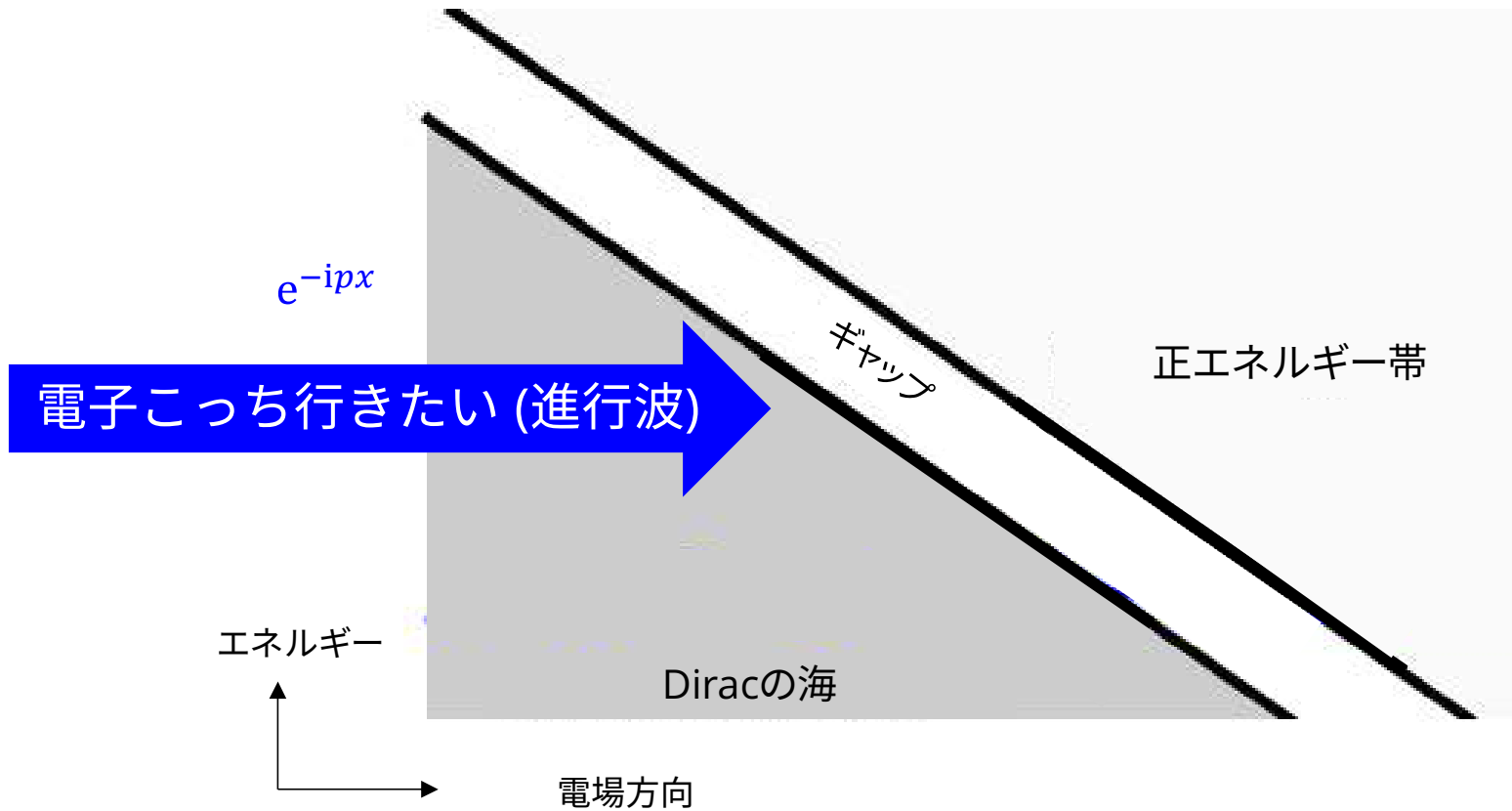
教訓: 電磁場の時間依存性をうまくデザインすれば、
弱い電場でも粒子生成が実験的に近いうちに見えるかも

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空



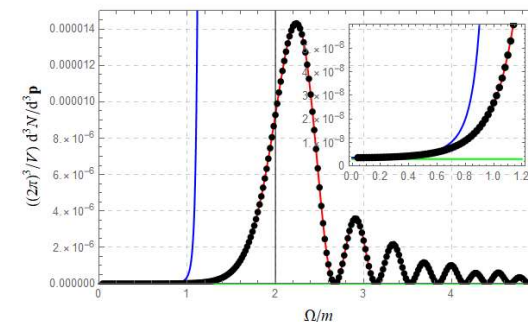
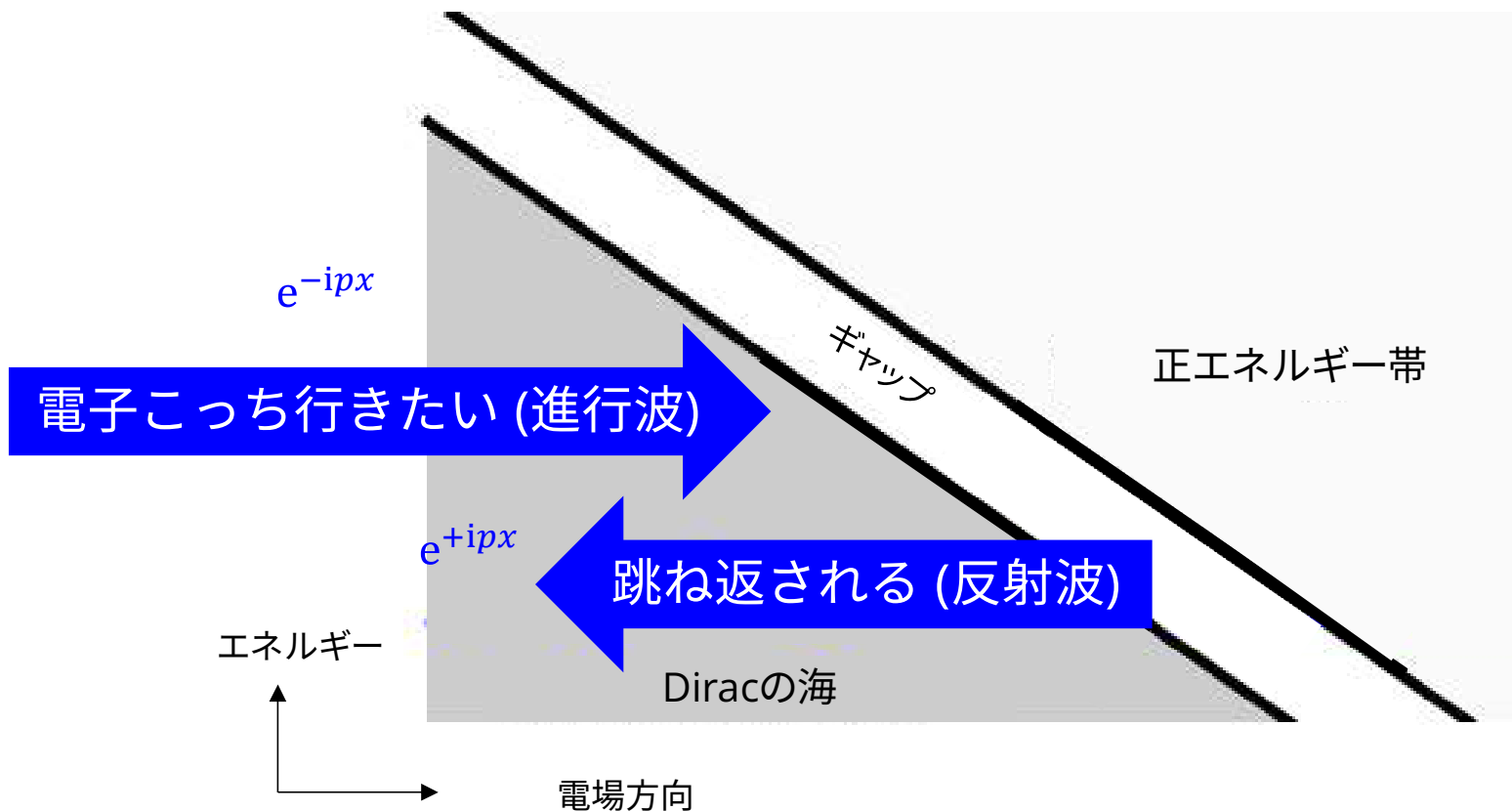
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空



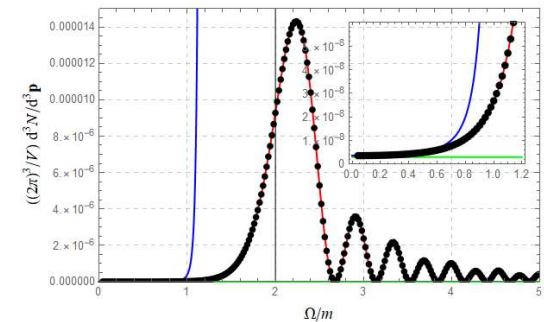
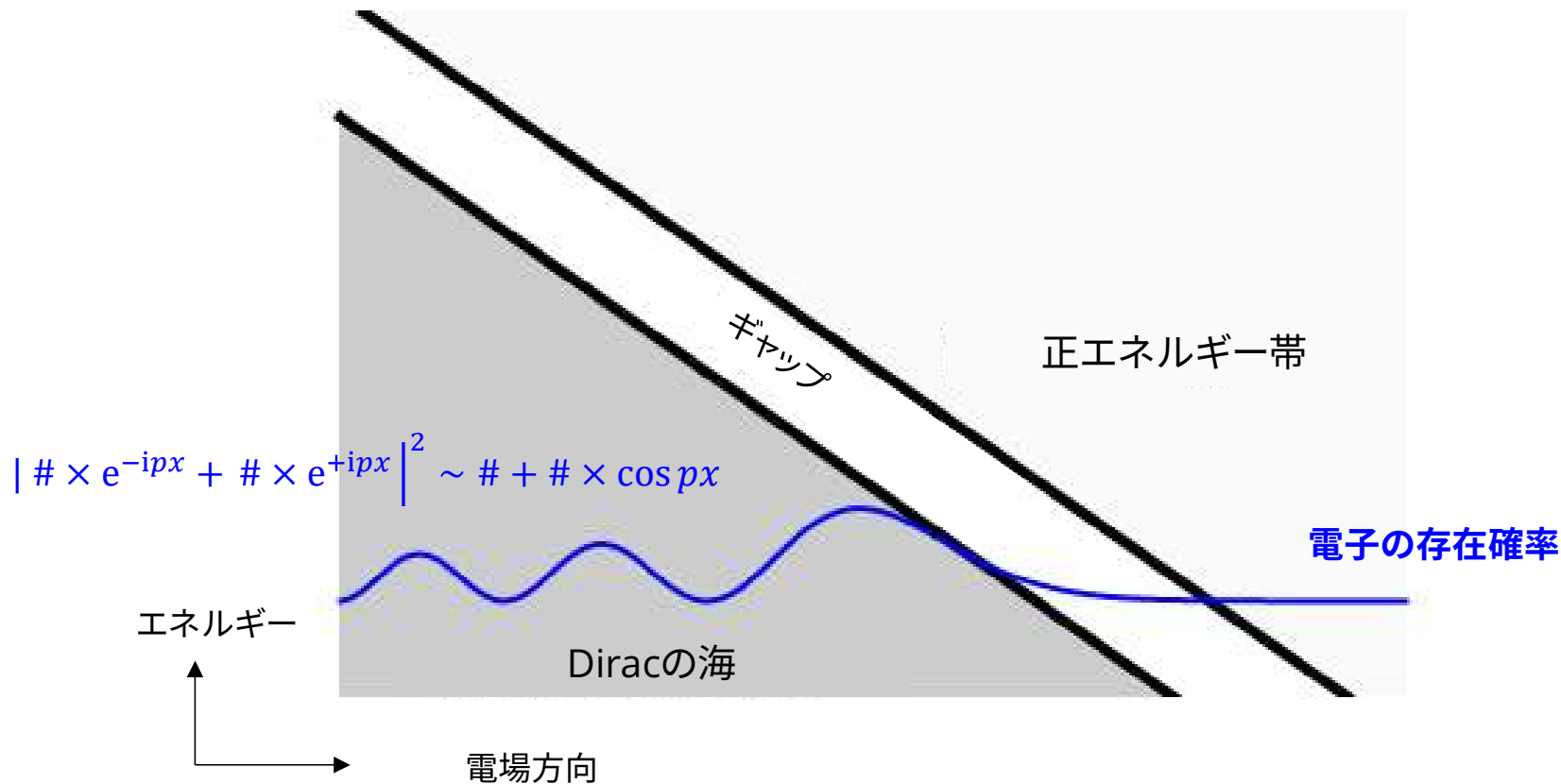
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空



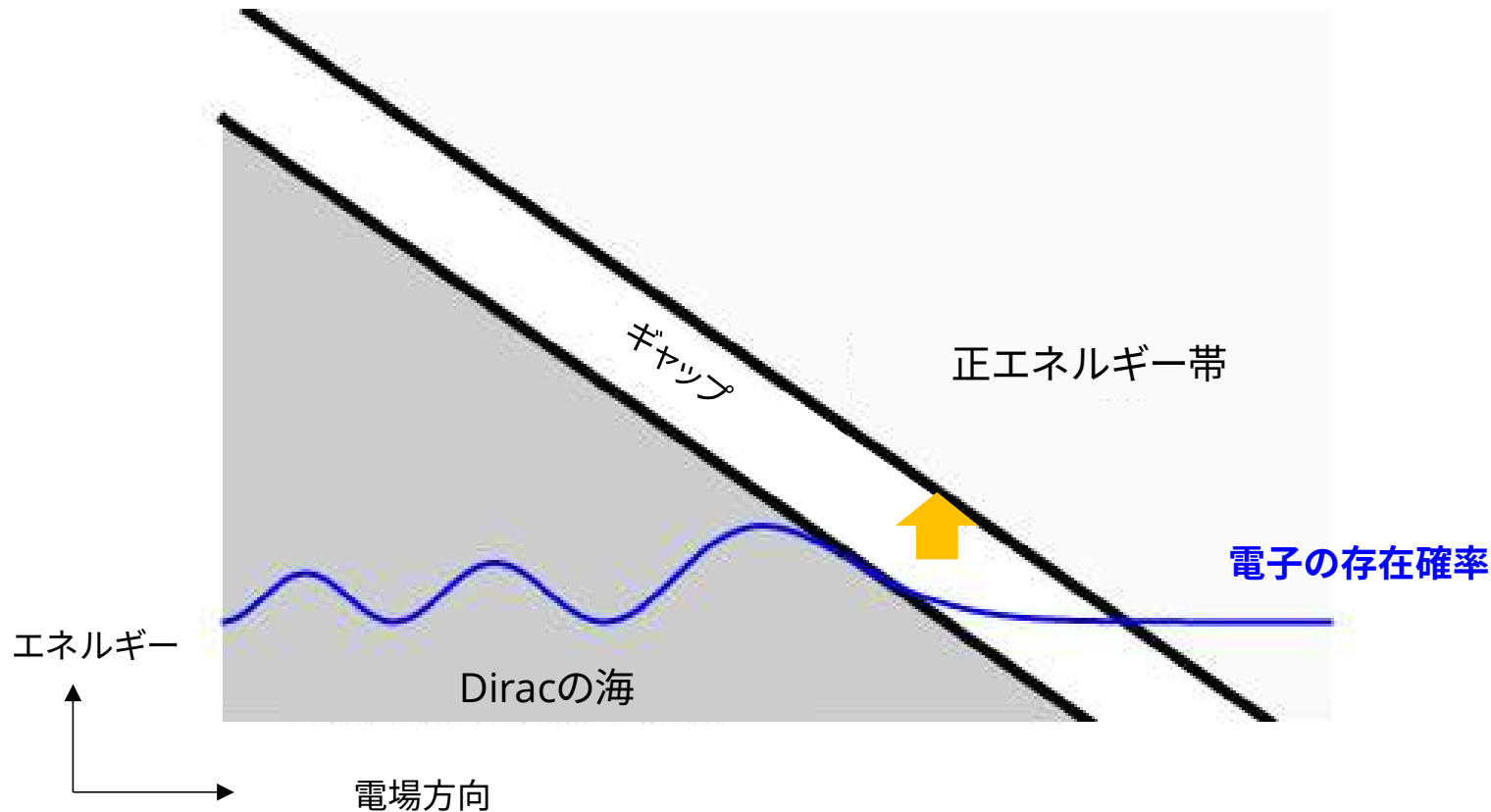
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空

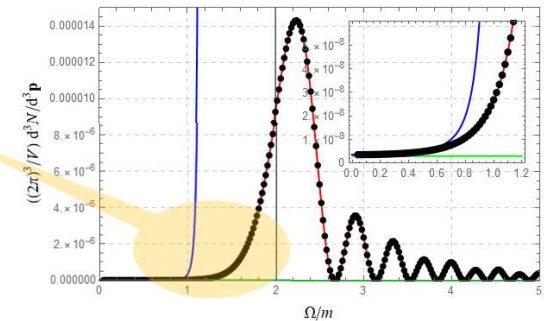


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空

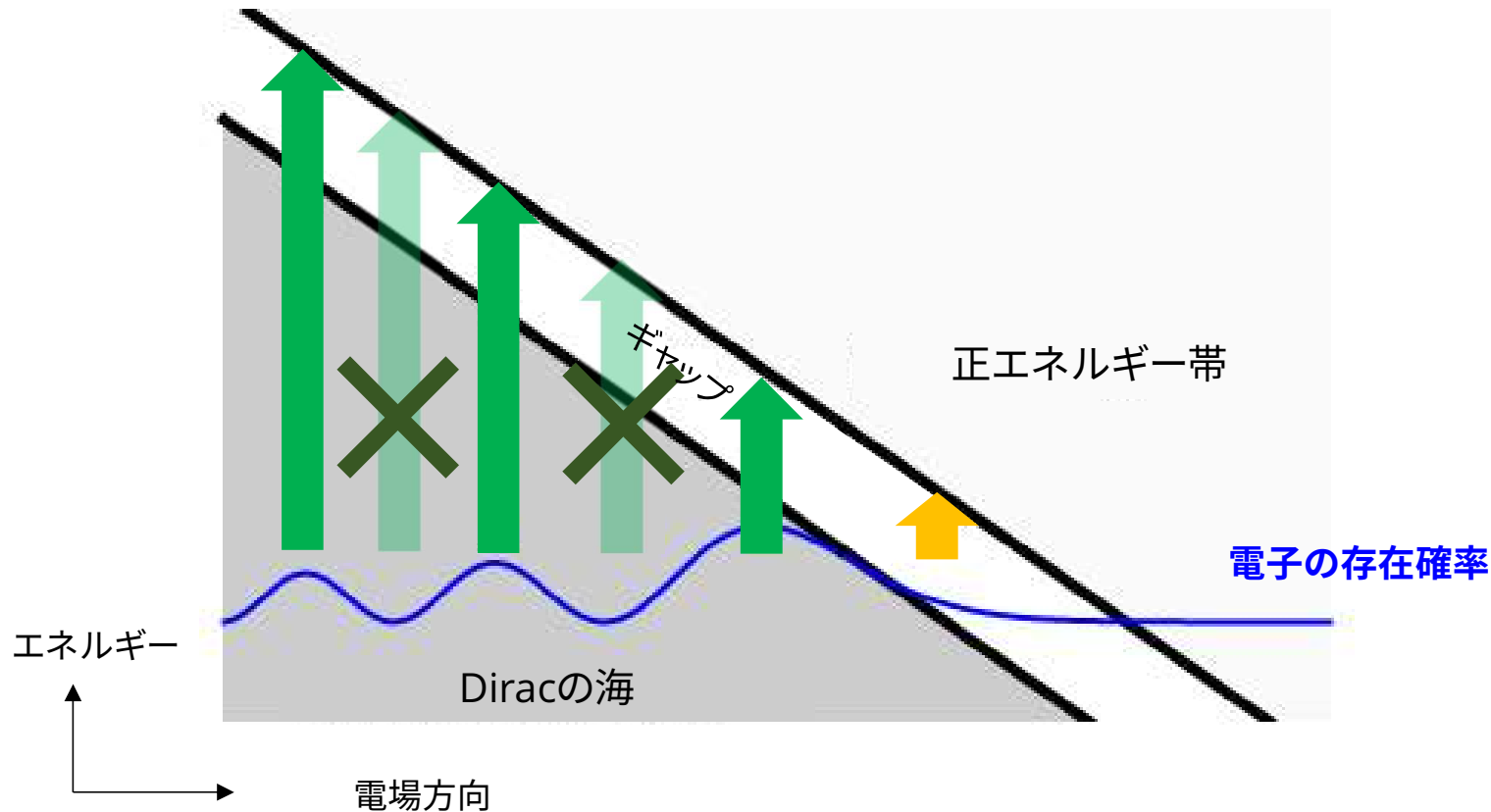


- 量子トンネリング ⇒ 粒子生成の増大

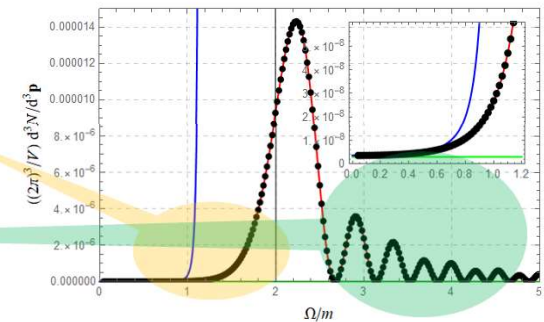


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(4/5): 強い電場中のQED真空



- 量子トンネリング ⇒ 粒子生成の増大
- 量子反射 ⇒ 粒子生成の振動

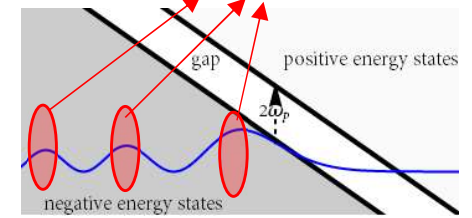


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展(5/5): QED真空のゆがみと真空複屈折

教訓: 真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、
真空の上で起こるいろんな物理過程に影響

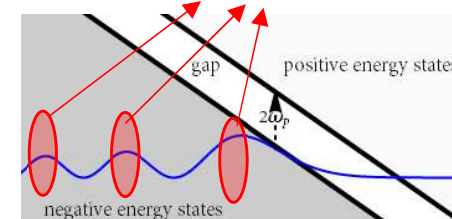
確率密度が大きい \Rightarrow より影響



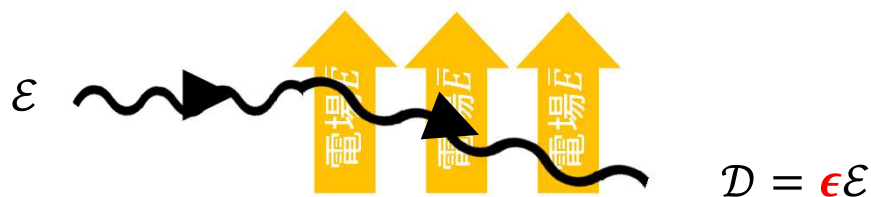
最近の進展(5/5): QED真空のゆがみと真空複屈折

教訓: 真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、真空の上で起こるいろんな物理過程に影響

確率密度が大きい \Rightarrow より影響



例) 強い電場中の誘電率 ϵ



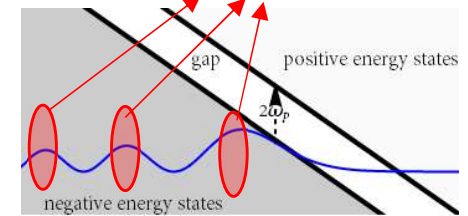
[HT, Ironside (2023)]

cf. 強い磁場中の屈折率
[Hattori, Itakura (2013)]

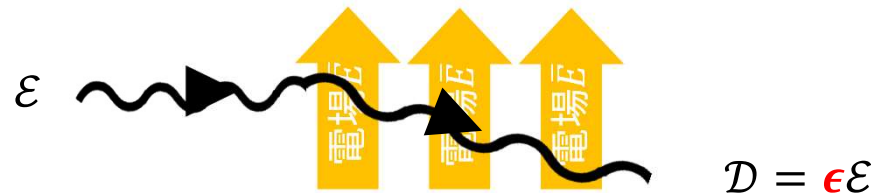
最近の進展(5/5): QED真空のゆがみと真空複屈折

教訓: 真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、真空の上で起こるいろんな物理過程に影響

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)]

cf. 強い磁場中の屈折率
[Hattori, Itakura (2013)]

理論:

- 電磁気学いわく $D = \epsilon + P$ で $\dot{P} = J$ なので電流 J を計算 \Rightarrow  の評価に帰着
- 虚部: Dynamically assisted Schwinger による粒子生成と対応:  \approx  $\approx N$
- 実部: 因果律 \Rightarrow Kramers-Kronigの関係式を使えば虚部から構築可

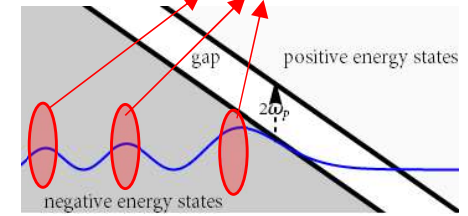
$$\text{Re } \epsilon(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' \frac{1}{\omega' - \omega} \text{Im } \epsilon(\omega')$$

Opticsで良く使う計算法
(cf. electroreflectance)

最近の進展(5/5): QED真空のゆがみと真空複屈折

教訓: 真空のゆがみは、Schwinger機構だけでなく、真空の上で起こるいろんな物理過程に影響

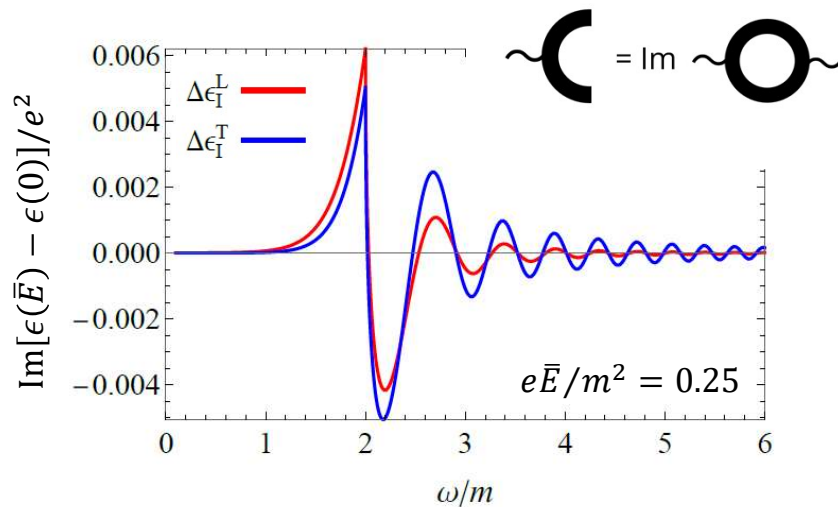
確率密度が大きい \Rightarrow より影響



結果:

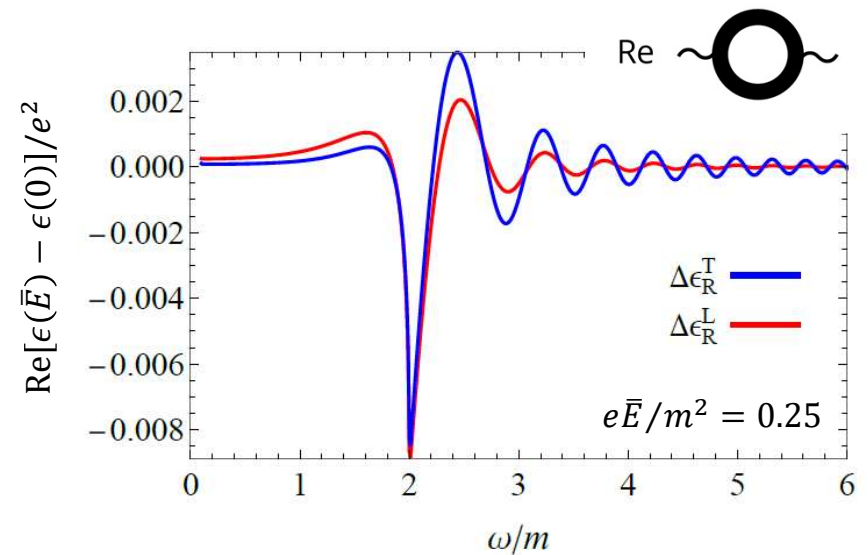
誘電率の虚部

(dynamically assisted SchwingerのNに対応)



Kramers-Kronig
関係式

誘電率の実部



- 振動する様子 \Leftarrow QED真空のゆがみ
- 電場の方向で応答が違う = 真空複屈折



- よく見ると、振動の場所は変わらない \Leftarrow 真空のゆがみはプローブの向きには依らない

目次

1. 強い電磁場の物理の概観

実験・観測できるようになりつつあって、にわかには活気づいている

2. Schwinger機構の最近の(田屋の)発展

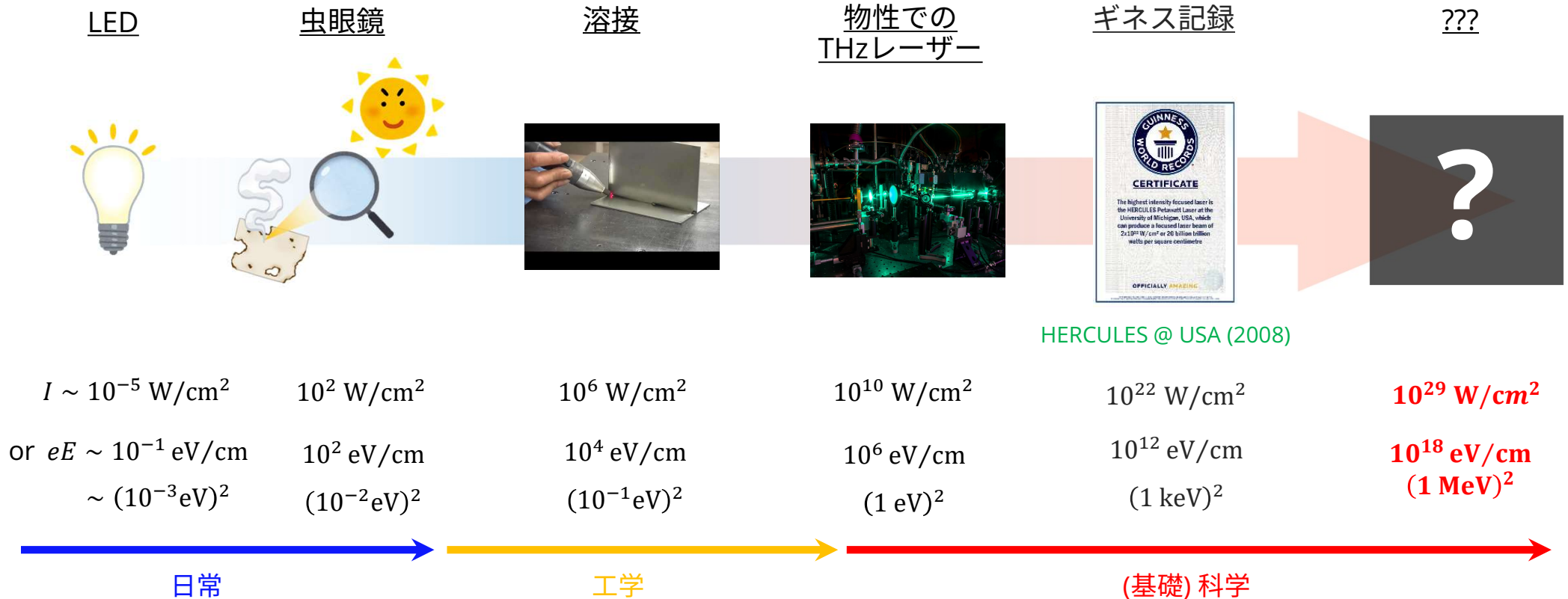
時間依存電場におけるSchwinger機構

強い電場中のQEDの真空構造

3. まとめ

まとめ (1/2)

Q: 純粋な疑問: めちゃくちゃ強い光があると何が起こるのだろう？



A: 真空 (=物質がない「無」の空間) が、

強い電磁場でゆがんで/壊れてしまって、非自明な物理的応答を返す

⇒ 今日の目的: そういう「強い電磁場」による「真空の物理」をレビュー

まとめ (2/2)

1. 強い電磁場の物理の概観

レーザーや極限物理系(重イオン, 電子加速器, コンパクト天体, ...)で実験・観測できるようになりつつあり、今まさにタイムリーな話題

2. Schwinger機構の最近の(田屋の)発展

時間依存電場による粒子生成の発展

- 電磁場の強さだけじゃなくて、その時空間プロファイルも大事
- (弱電場なら)速い電場の摂動的粒子生成の方がたくさん粒子を作れる
- 電磁場の時間依存性をうまくデザインすれば、弱電場でも粒子生成が実験的に近いうちに見えるかも ⇒ dynamically assisted Schwinger 機構
- Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは、QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映
- 真空のゆがみは、真空の上で起こるいろんな物理過程に影響
⇒ 例) 強い電場中の誘電率

