

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: 理研iTHEMS

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か？

LED



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

$$\text{or } eE \sim 10^{-1} \text{ eV/cm} \\ \sim (10^{-3} \text{ eV})^2$$

虫眼鏡



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

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

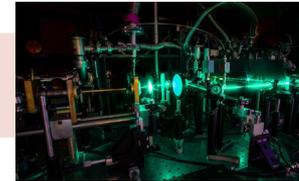
溶接



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

$$10^4 \text{ eV/cm} \sim (10^{-1} \text{ eV})^2$$

物性のTHzレーザー



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

$$10^6 \text{ eV/cm} \sim (1 \text{ eV})^2$$

???



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？

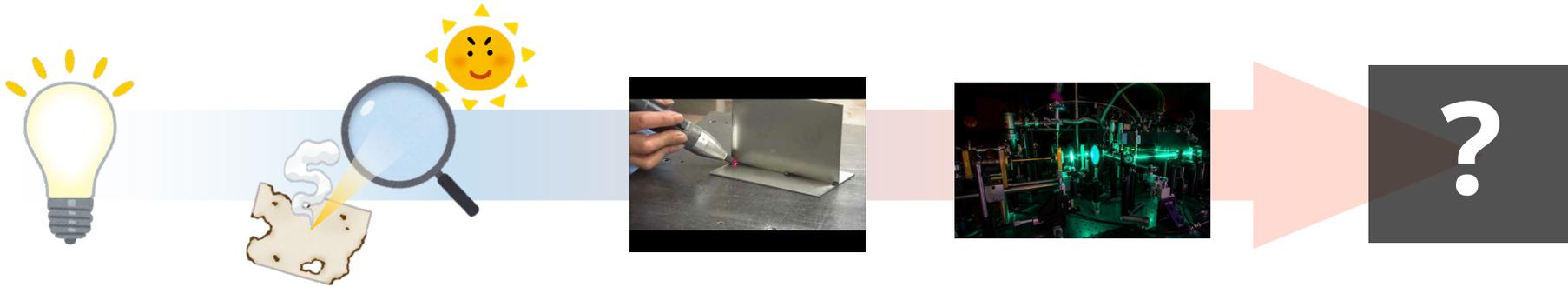
LED

虫眼鏡

溶接

物性のTHzレーザー

???



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

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

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

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

$$\text{or } eE \sim 10^{-1} \text{ eV/cm} \\ \sim (10^{-3} \text{ eV})^2$$

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

$$10^4 \text{ eV/cm} \sim (10^{-1} \text{ eV})^2$$

$$10^6 \text{ eV/cm} \sim (1 \text{ eV})^2$$

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

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

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？



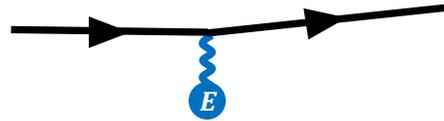
真空

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

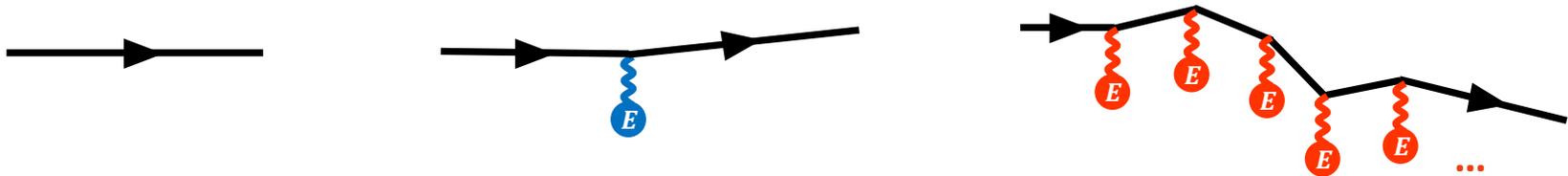
e.g., 電子の異常磁気モーメント

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

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

[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

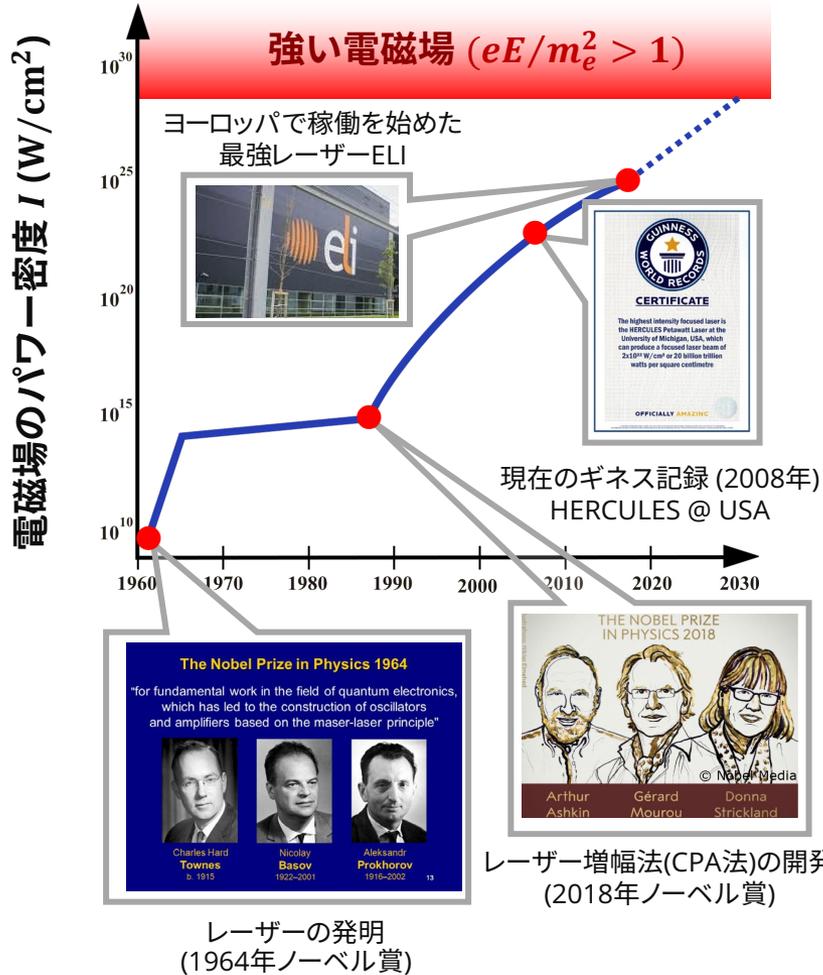
(注: 今日は話さないが、電磁場じゃなくて、一般の強い「場」でも上の/これからの議論は本質的に同じ)

今まさに強い電磁場の実験・観測が可能になりつつある

∴ 強い電磁場の物理の研究は今がまさにタイムリー

今まさに強い電磁場の実験・観測が可能になりつつある

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~)

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

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

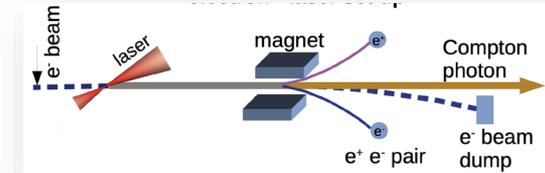


• 電子加速器 + レーザー

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

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

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

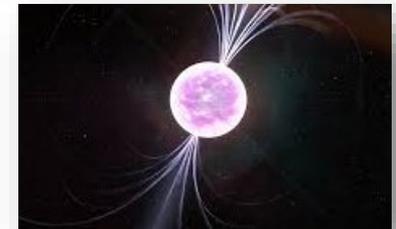


• コンパクト星: マグネター

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

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

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



∴ 強い電磁場の物理の研究は今がまさにタイムリー

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、...

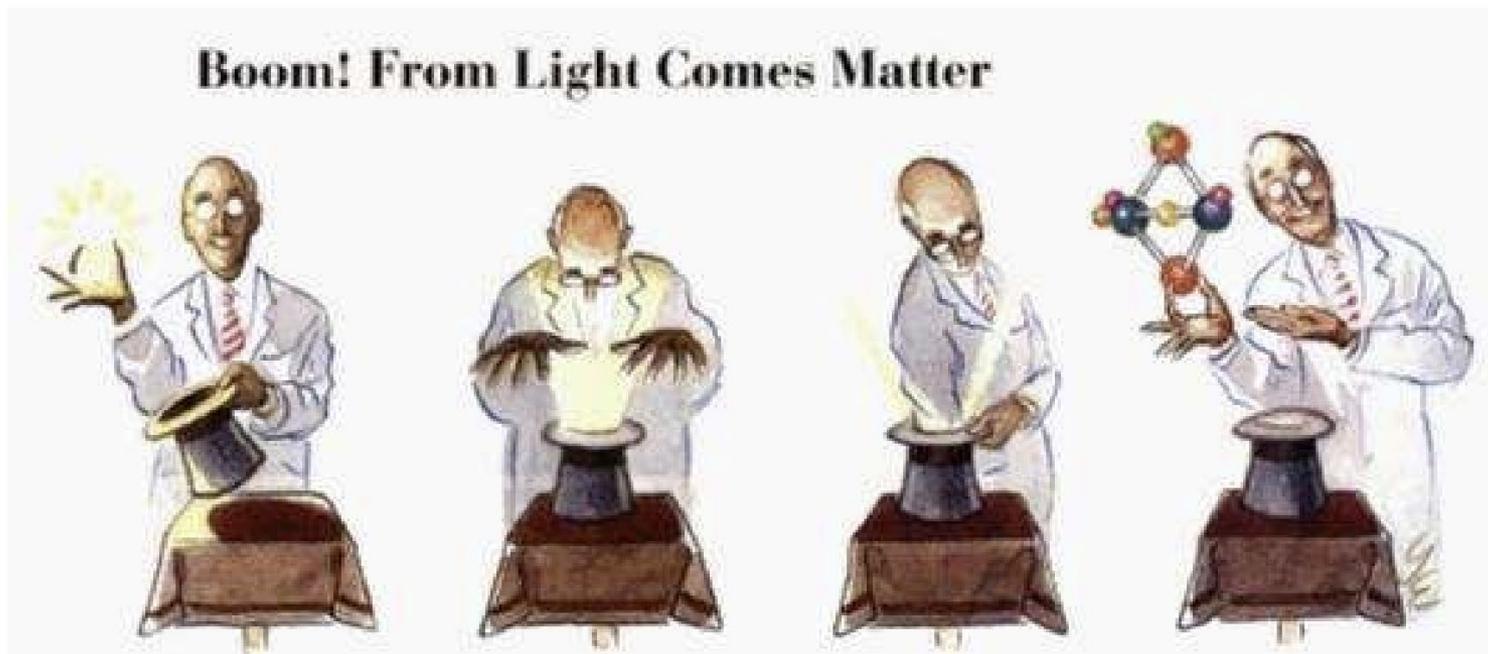
QCD相図の変更、異常輸送(カイラル磁気効果)、標準理論を超えた物理のプロブ、...

- 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

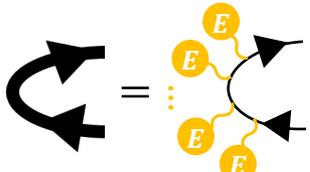
[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)]

[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 $|0; \text{in}\rangle \rightarrow |e^- e^+; \text{out}\rangle$ 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, 真空からのスピンの生成, 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, [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, 真空からのスピンの生成, 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

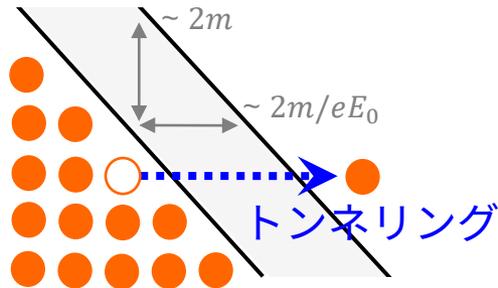
電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

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

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

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

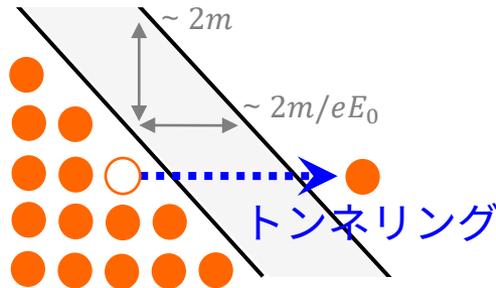
[Keldysh (1965)]

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 $N \sim \exp[\# / eE_0]$



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

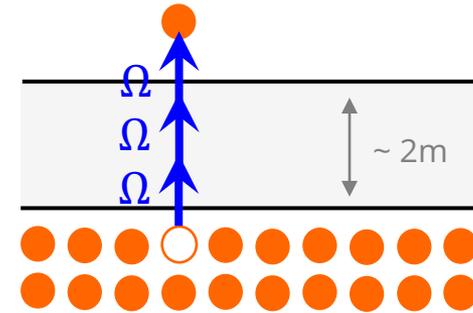
\Rightarrow 電場は Δt よりも十分遅くないといけない

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

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

[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: 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: 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: 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)]

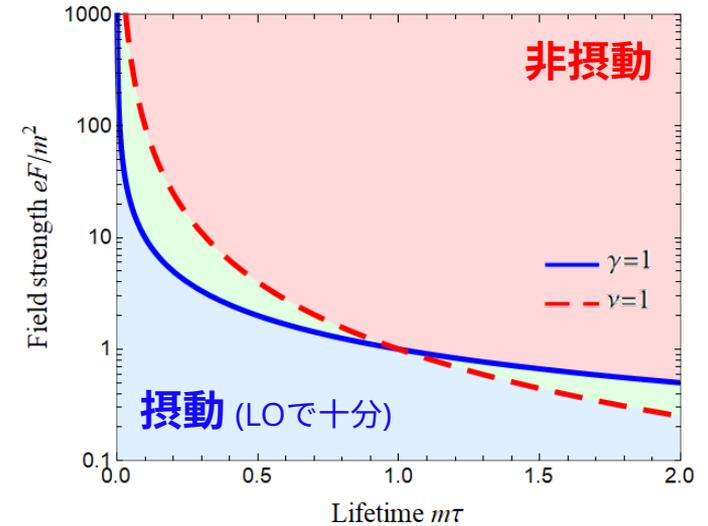
(2) 解ける場合と直接比べる [HT, Fujiii, Itakura (2014)]

- 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

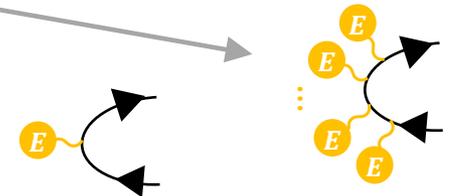
$$\gamma = \frac{m\Omega}{eE} : \text{Keldysh パラメータ}$$

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



- $\gamma \ll 1, \nu \gg 1 \Rightarrow$ 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: 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

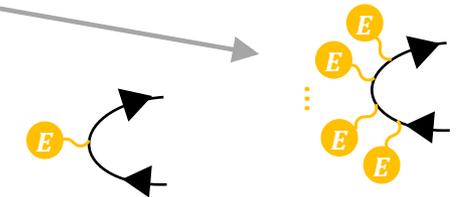
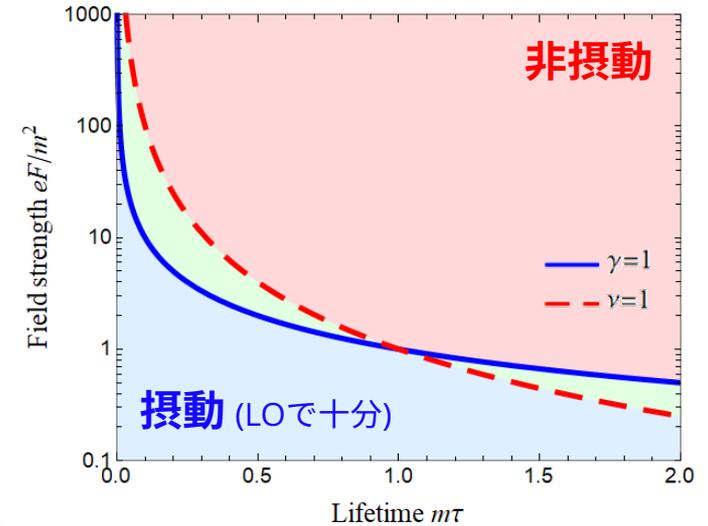
← もともと3つの次元量 ($eE, \tau := 1/\Omega, m$) があるので

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

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

• $\gamma \ll 1, \nu \gg 1 \Rightarrow$ 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 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$



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、強い場の物理はキツそう (実際、NLOのQED過程は最近見えたが、それ以上の非線形/非摂動効果は見えていない)

最近の進展2: 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: 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)] [HI, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

最近の進展2: 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 $N \sim \exp[-m^2/eE_0]$

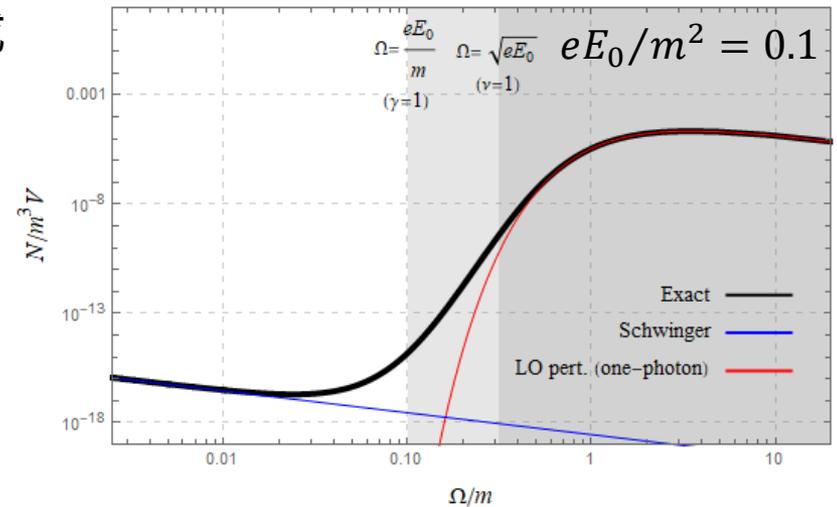
速い (摂動的) \Rightarrow 弱い冪的な抑制 $N \sim (eE_0/m^2)^{2n}$

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: Dynamically assisted Schwinger 機構 (1/2)

[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



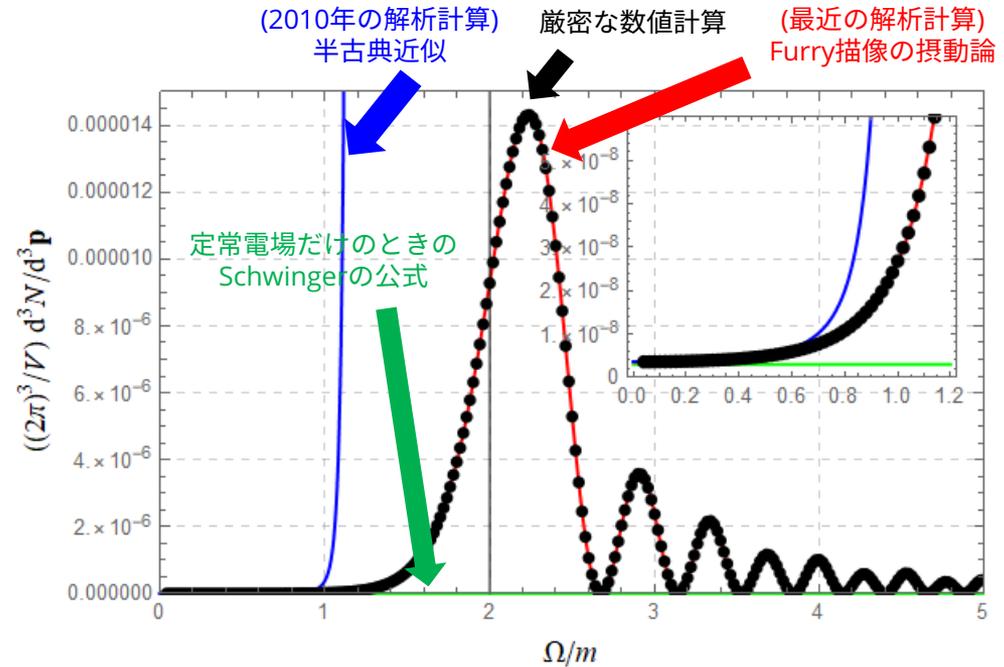
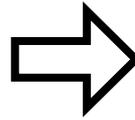
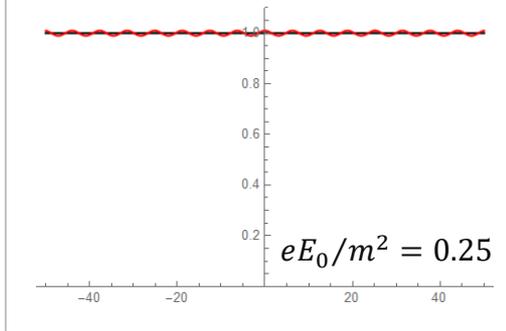
$N \sim \exp[-\# \times (\text{ギャップの長さ}) \times (\text{ギャップの高さ})] \Rightarrow \text{粒子生成の増大}$

摂動的な1光子散乱で減る

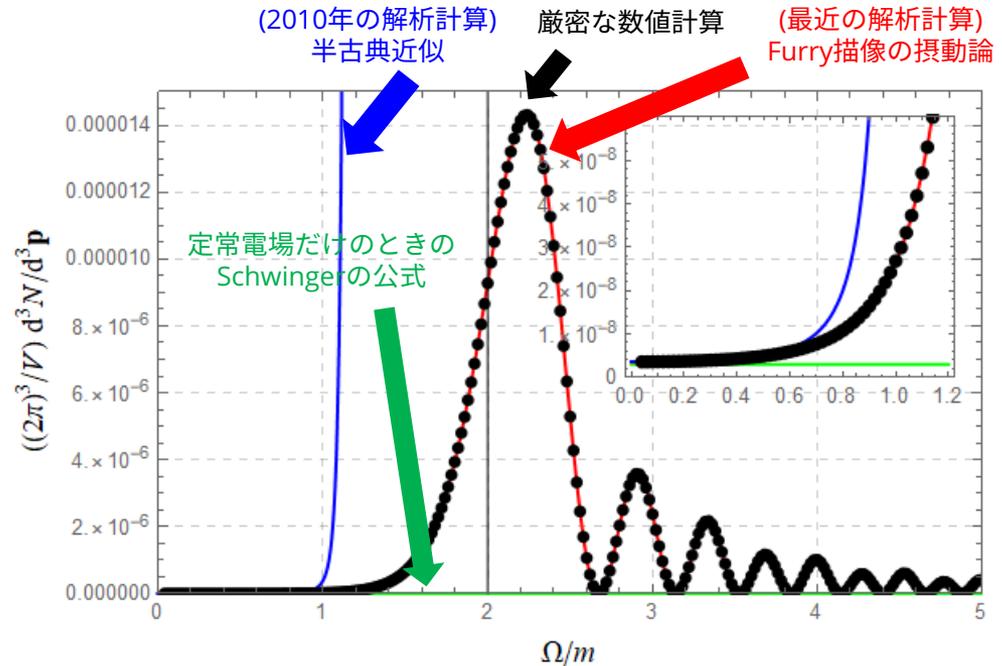
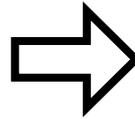
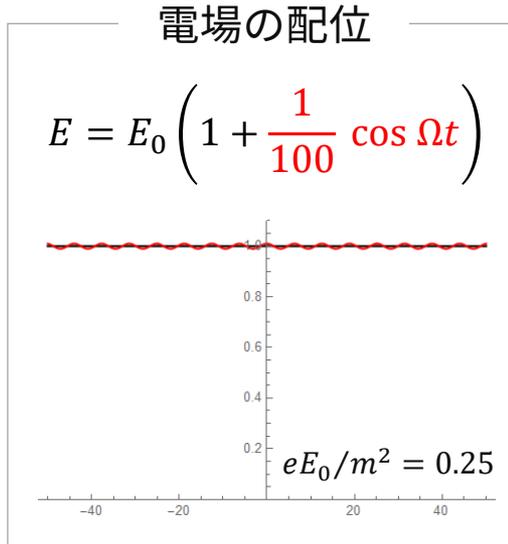
最近の進展3: Dynamically assisted Schwinger 機構 (2/2)

電場の配位

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



最近の進展3: Dynamically assisted Schwinger 機構 (2/2)



• 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

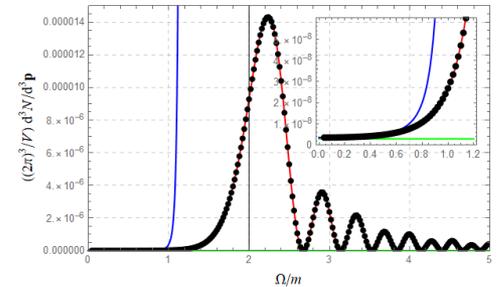
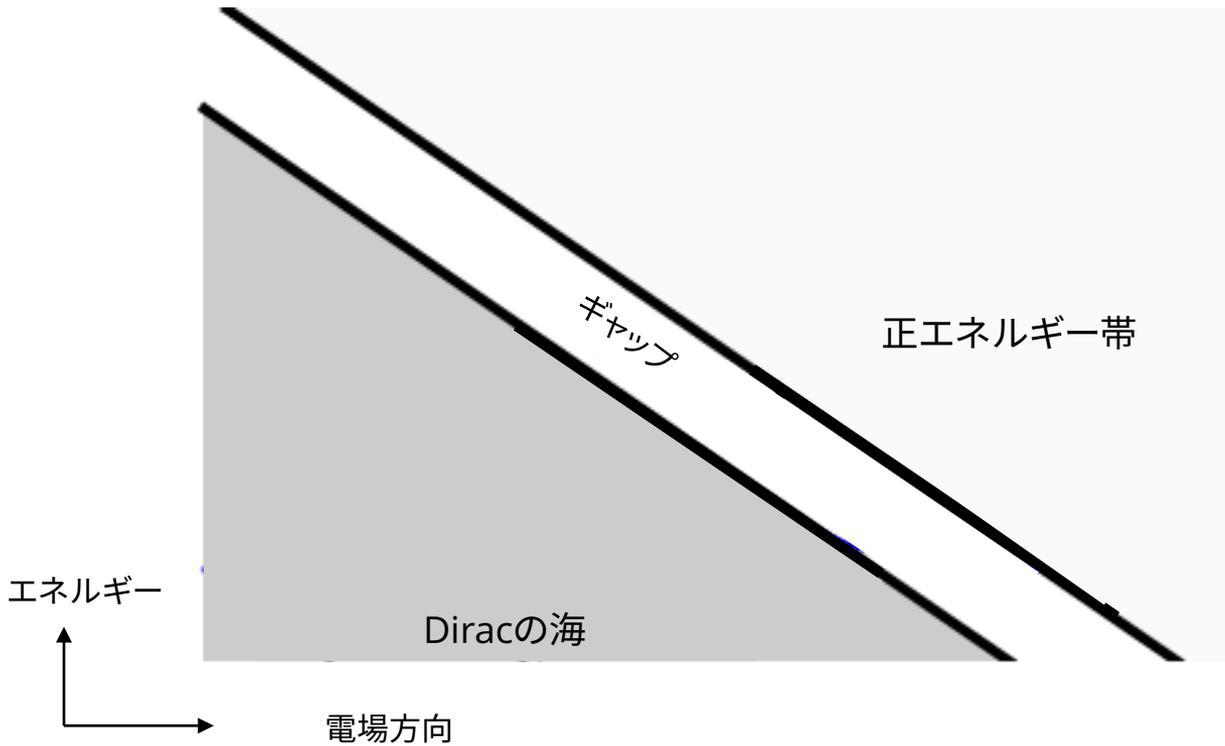
- 不安定な真空中の散乱理論の整備 (Furry描像の摂動論)

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

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

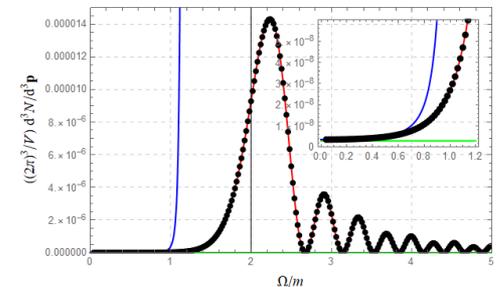
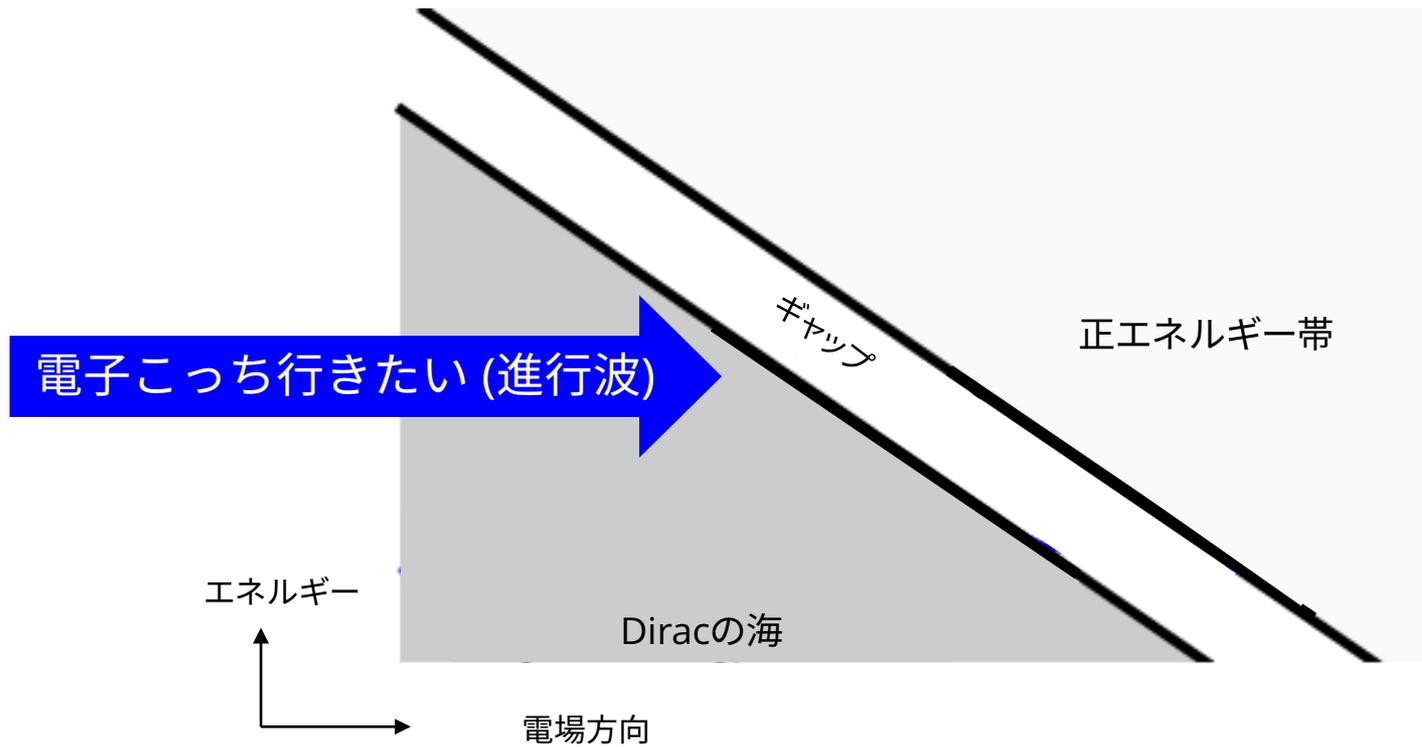
教訓: 電磁場の時間依存性をうまくデザインすれば、弱い電場でも粒子生成が実験的に近いうちに見えるかも

最近の進展4: 強い電場中のQED真空



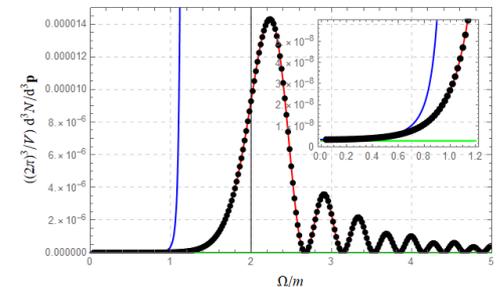
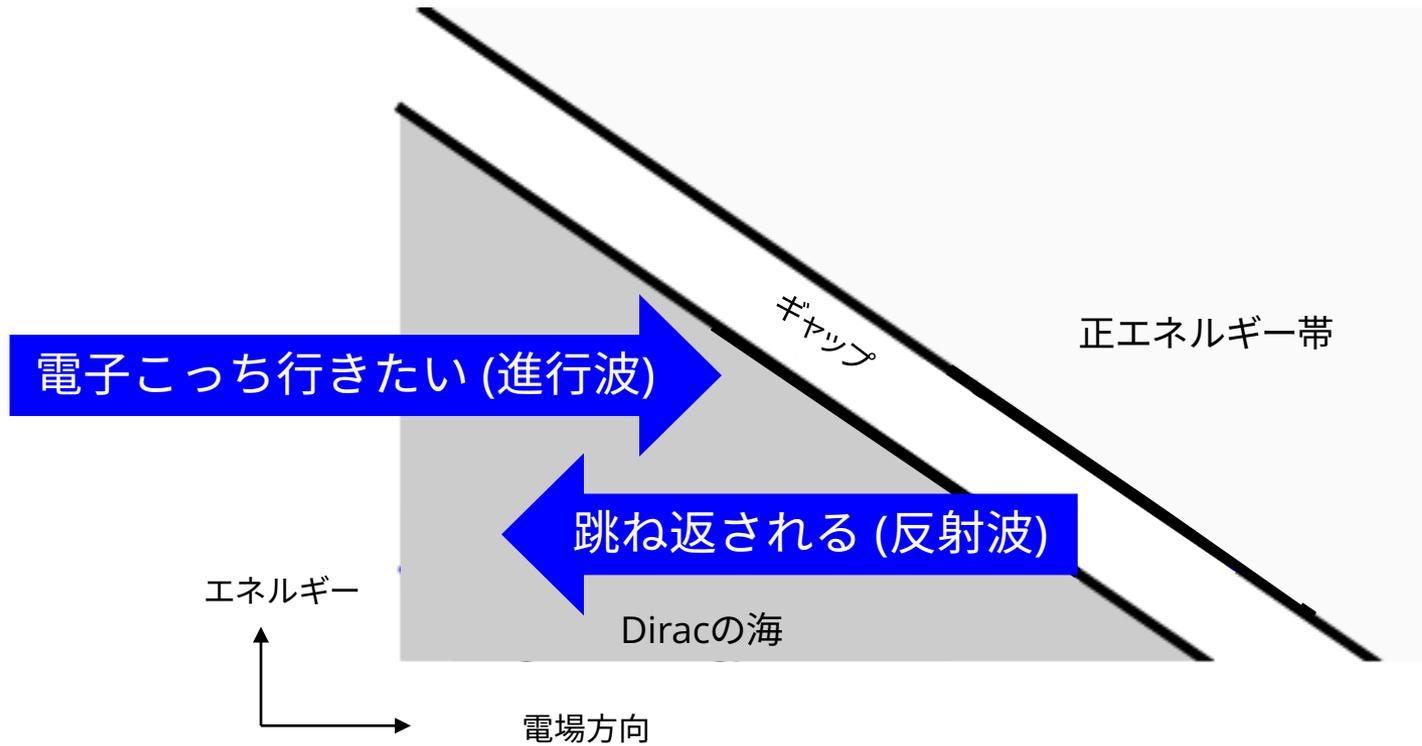
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展4: 強い電場中のQED真空



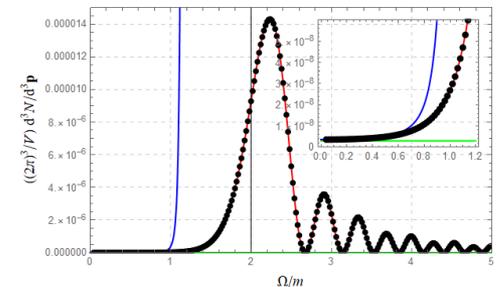
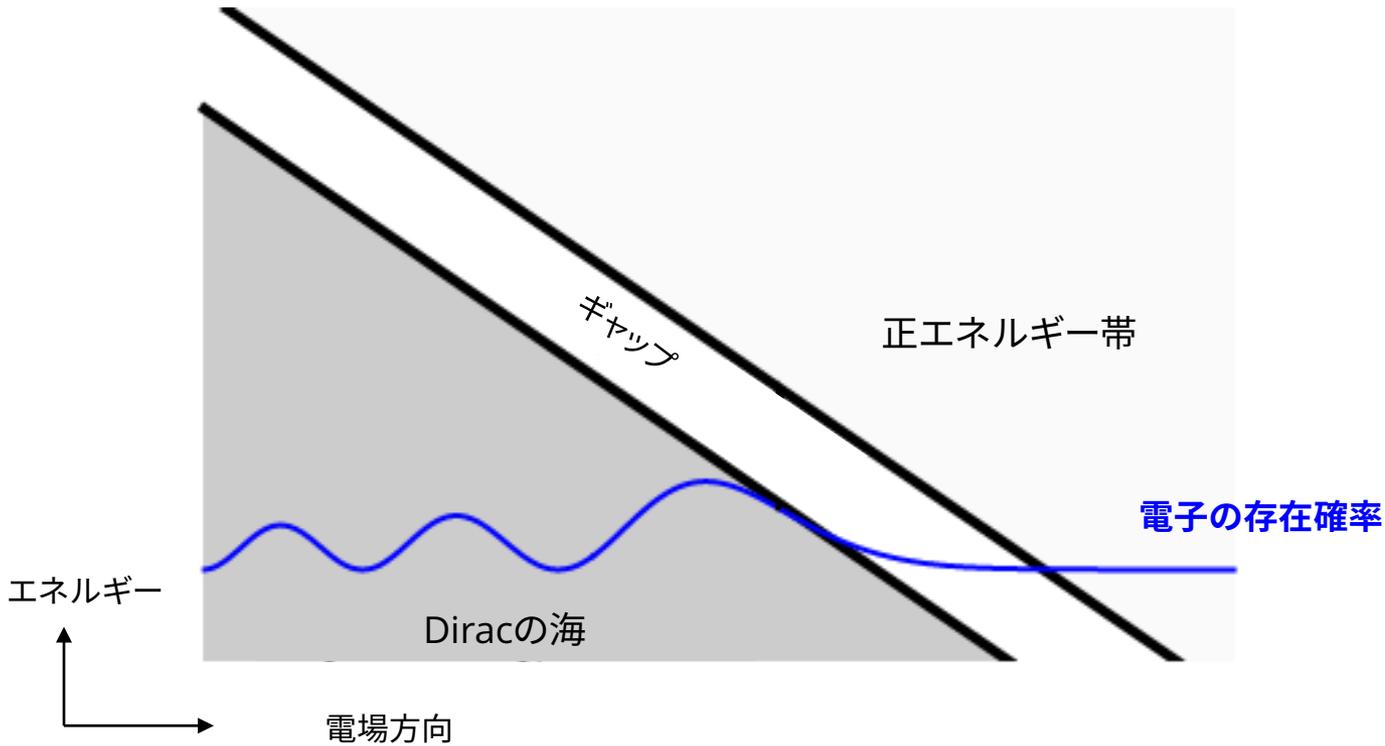
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展4: 強い電場中のQED真空



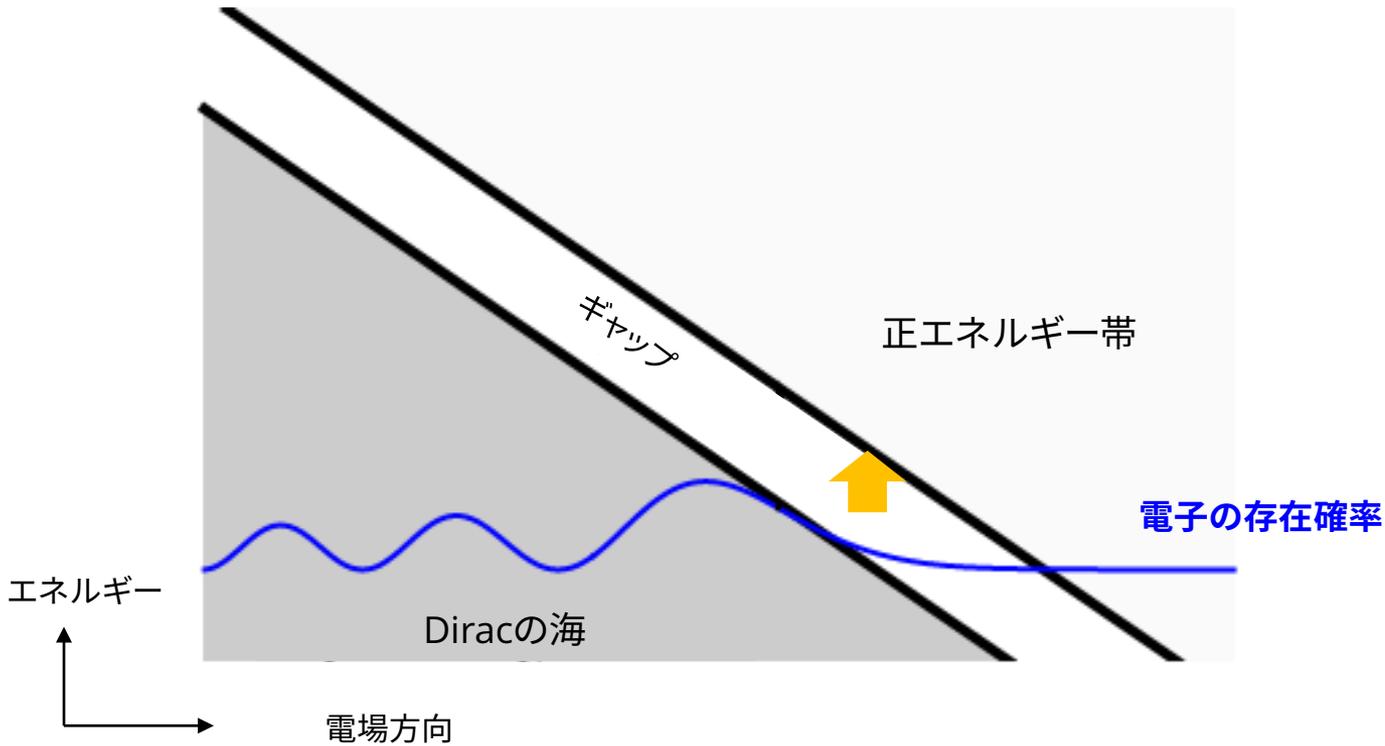
教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展4: 強い電場中のQED真空

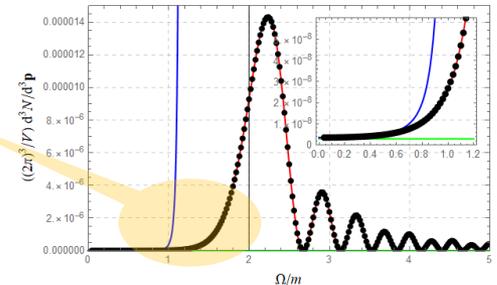


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展4: 強い電場中のQED真空

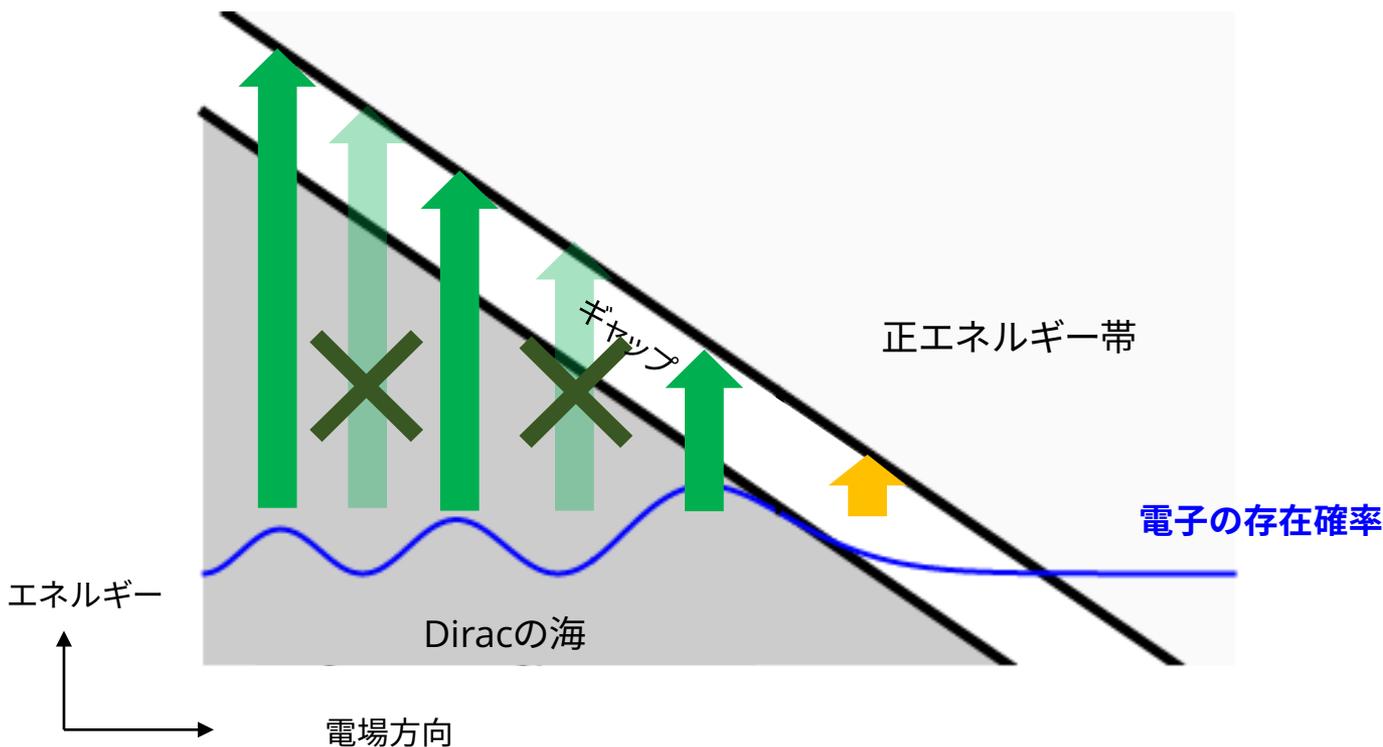


- 量子トンネリング ⇒ 粒子生成の増大

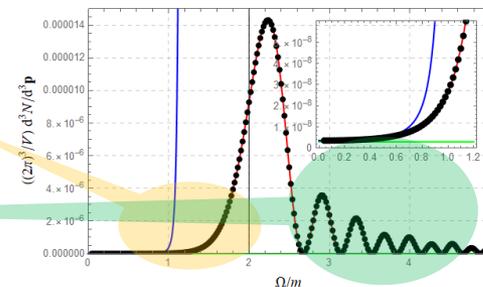


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展4: 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

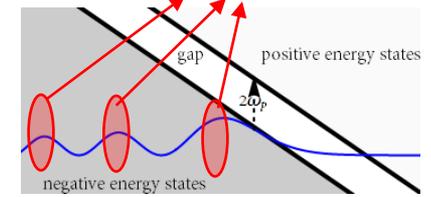


教訓: Dynamically assisted Schwinger 機構のスペクトルは QEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映している

最近の進展5: QED真空のゆがみと真空複屈折 (1/2)

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

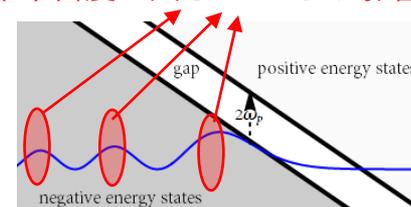
確率密度が大きい \Rightarrow より影響



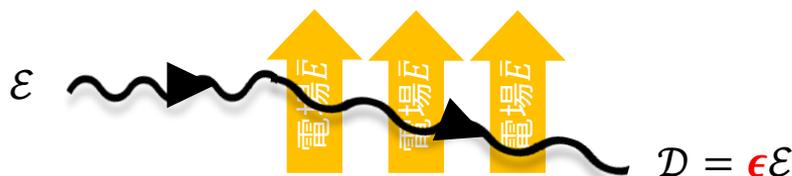
最近の進展5: QED真空のゆがみと真空複屈折 (1/2)

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



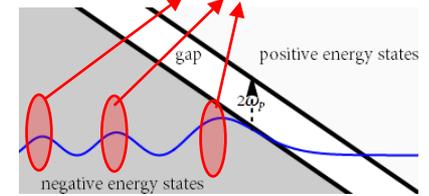
[HT, Ironside (2023)]

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

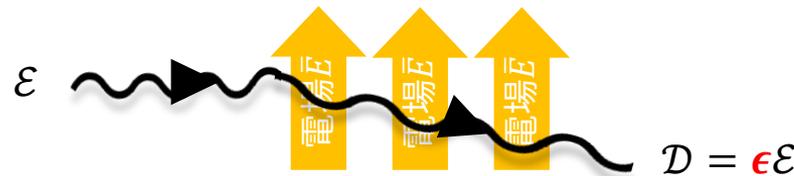
最近の進展5: QED真空のゆがみと真空複屈折 (1/2)

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: $\left| \text{Im} \sim \text{loop} \right| \approx \left| \sim \text{arc} \right|^2 \approx N$
- 実部: 因果律 \Rightarrow Kramers-Kronigの関係式を使えば虚部から構築可

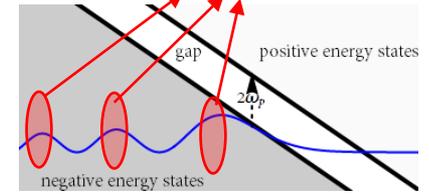
$$\text{Re } \epsilon(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' \frac{1}{\omega' - \omega} \text{Im } \epsilon(\omega')$$

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

最近の進展5: QED真空のゆがみと真空複屈折 (1/2)

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

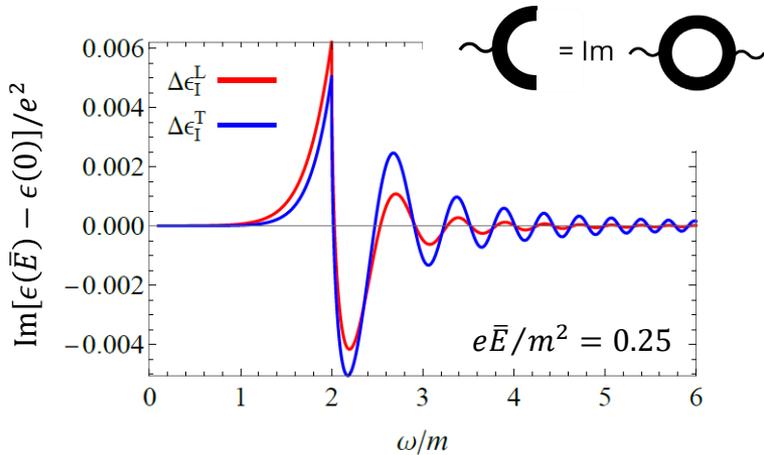
確率密度が大きい \Rightarrow より影響



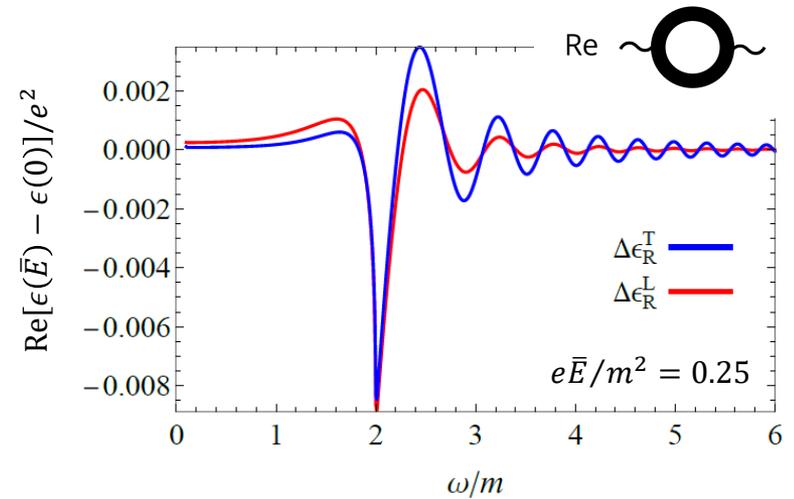
結果:

誘電率の虚部

(dynamically assisted SchwingerのNに対応)



誘電率の実部



Kramers-Kronig
関係式

- 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？

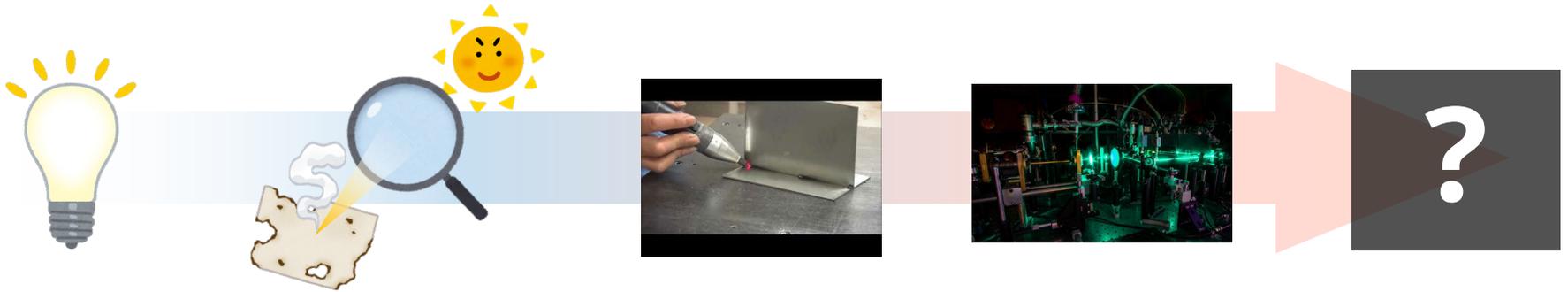
LED

虫眼鏡

溶接

物性のTHzレーザー

???



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

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

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

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

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

$$\text{or } eE \sim 10^{-1} \text{ eV/cm} \\ \sim (10^{-3} \text{ eV})^2$$

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

$$10^4 \text{ eV/cm} \sim (10^{-1} \text{ eV})^2$$

$$10^6 \text{ eV/cm} \sim (1 \text{ eV})^2$$

$$10^{18} \text{ eV/cm} \sim (10^6 \text{ eV})^2$$

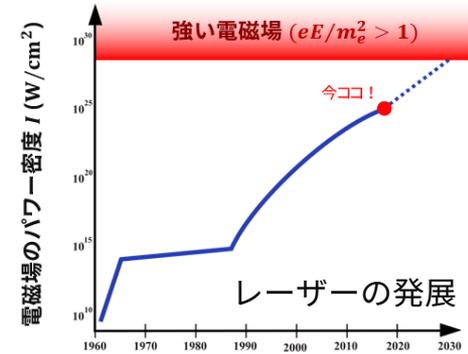
A: 真空 (=物質がない「無」の空間) が、

強い電磁場でゆがんで/壊れてしまっ、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

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 \Rightarrow 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 \Rightarrow 例) 強い電場中の誘電率

