

# 電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程 における協調現象に関する基礎研究

(≡ 時間変動する強い電場でのSchwinger機構の研究)

**田屋 英俊**

理研iTHEMS (4月から慶應大)

# 原子核物理的な動機: 極限物質の理解

Q: めちゃくちゃ**強い光**の極限では何が起こるのだろうか？

- 物理学 = 「モノ」の「コトワリ」を理解 ⇒ 「モノ」に「XXX」したとき、何が起こるか理解
- とても極端な「XXX」を加えたら？ ⇒ 原子核物理の問題
- XXX = 温度 ⇒ クォークグルーオンプラズマ、高エネルギー重イオン衝突、初期宇宙、 ...  
密度 ⇒ カラー超伝導、中間エネルギー重イオン衝突、中性子星、 ...  
光 (=電磁場) ⇒ ??? (そもそもQCD以前に、QEDレベルでも十分にわかってない！)

# QEDですらよくわかっていない



真空

弱い電磁場 ( $eE/m^2 \ll 1$ )

強い電磁場 ( $eE/m^2 \gg 1$ )



# QEDですらよくわかっていない



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

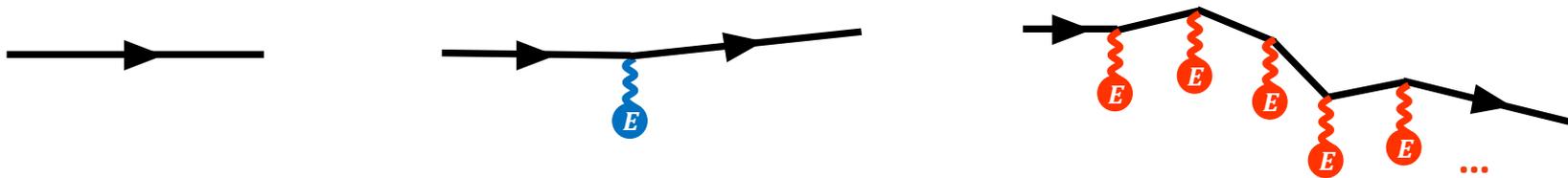
e.g., 電子の異常磁気モーメント

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

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

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2017)]

# QEDですらよくわかっていない



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

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

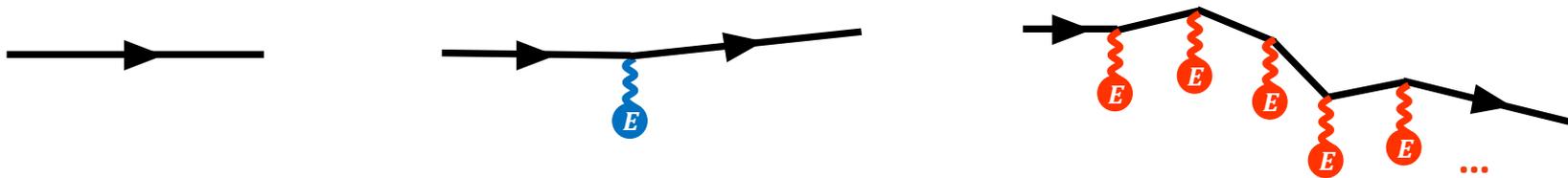
$$\alpha^{-1}(\text{exp.}) = 137.03599899 \dots$$

[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

# QEDですらよくわかっていない



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

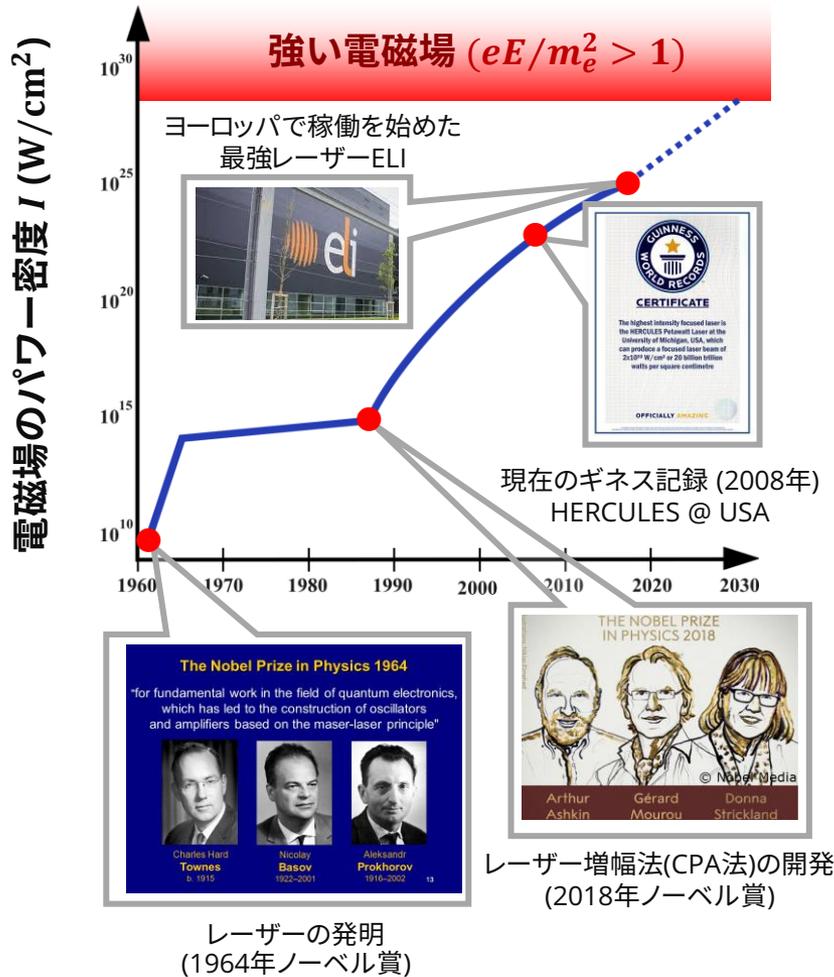
Q: そんなに強い電磁場を考えることは現実的なのか / 意味あるのか？

A: Yes! 今まさに強い電磁場の実験・観測が可能に

∴ 強い電磁場の物理の研究は今がまさにタイムリー

# A: Yes! 今まさに強い電磁場の実験・観測が可能に

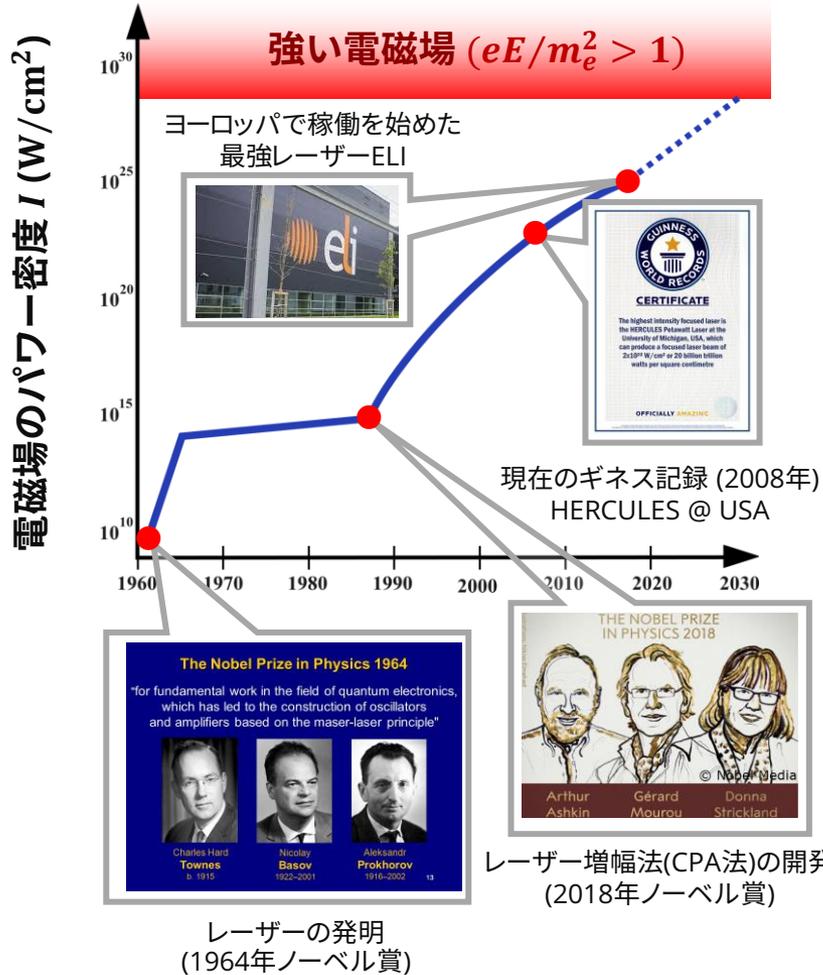
## 高強度レーザー



∴ 強い電磁場の物理の研究は今がまさにタイムリー

# A: Yes! 今まさに強い電磁場の実験・観測が可能に

## 高強度レーザー



## 素核宇の極限系

### • 重イオン衝突

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

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

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

中間エネルギーでの推定:  
[HT, Nishimura, Ohnishi (2024)]

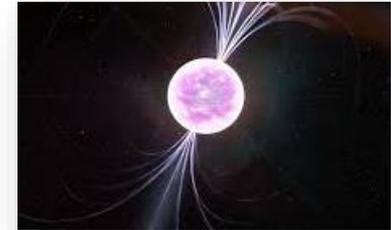


### • コンパクト星: マグネター

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) QED: 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: 新しい相図、異常輸送現象、クォークグルーオンプラズマの生成・熱化(強いカラー電磁場)、...

# 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) QED: 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、...

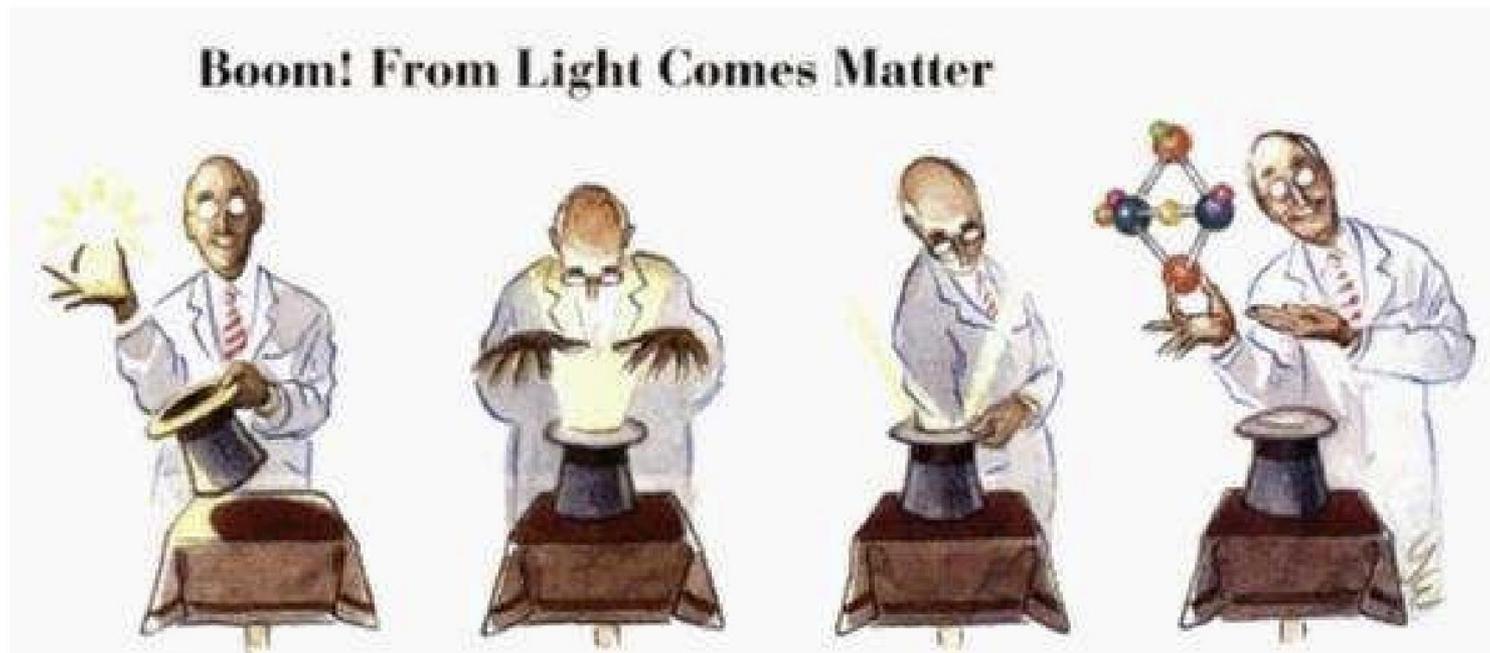
QCD: 新しい相図、異常輸送現象、クォークグルーオンプラズマの生成・熱化(強いカラー電磁場)、...

- 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) QED: 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: 新しい相図、異常輸送現象、クォークグルーオンプラズマの生成・熱化(強いカラー電磁場)、...

## • 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) QED: 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: 新しい相図、異常輸送現象、クォークグルーオンプラズマの生成・熱化(強いカラー電磁場)、...

## • 最もおもしろい予想の1つが、Schwinger機構

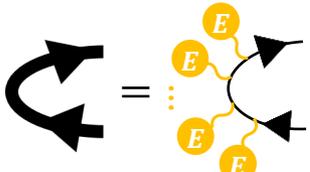
[Sauter (1932)] [Heisenberg, Euler (1936)]

[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、 =  $\dots$  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)]

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

# 電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程 における協調現象に関する基礎研究

(≡ 時間変動する強い電場でのSchwinger機構の研究)

**田屋 英俊**

理研iTHEMS (4月から慶應大)

# 電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)] [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)] [[HT](#), Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)] [[HT](#), Fujiii, Itakura (2014)]

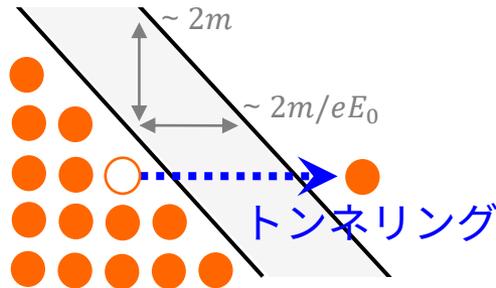
強さ  $eE_0$ 、寿命  $\tau$  を持った時間依存電場

# 電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)] [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)] [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)] [HT, Fujiii, Itakura (2014)]

## 強さ $eE_0$ 、寿命 $\tau$ 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  $\Delta t$  よりも十分遅くないといけない

$\Rightarrow \tau \gtrsim \Delta t$

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

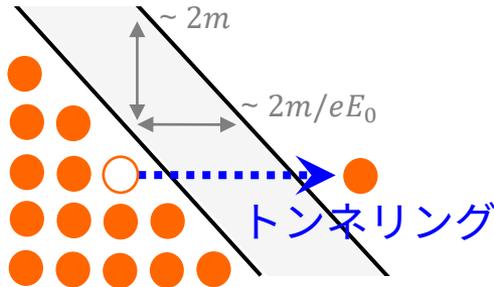
[Keldysh (1965)]

# 電場の時間依存性はSchwinger機構の描像を大きく変える

[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)] [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)] [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)] [HT, Fujiii, Itakura (2014)]

## 強さ $eE_0$ 、寿命 $\tau$ を持った時間依存電場

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



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

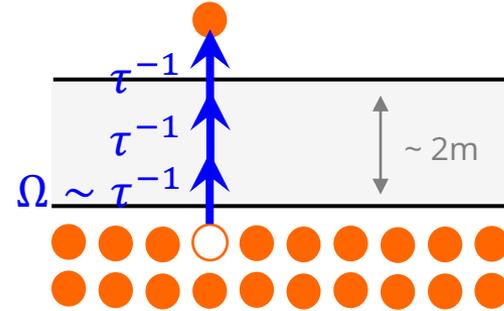
$\Rightarrow$  電場は  $\Delta t$  よりも十分遅くないといけない

$$\Rightarrow \tau \gtrsim \Delta t$$

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

[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)

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

# 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

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

• 抑制具合がぜんぜん違う

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

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

# 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

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

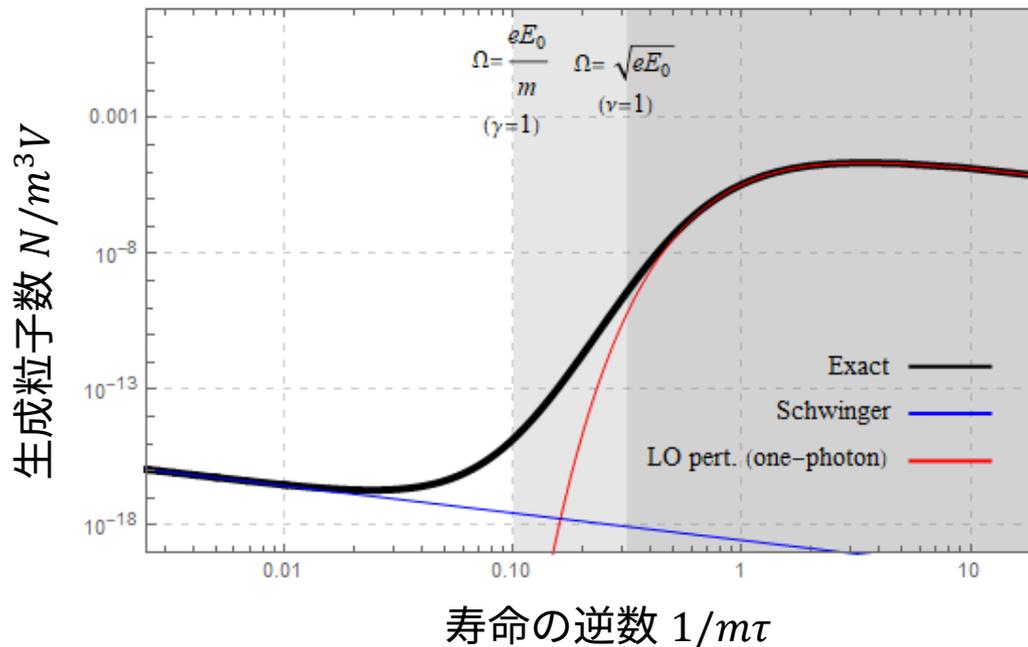
• 抑制具合がぜんぜん違う

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

速い (摂動的) ⇒ 弱い冪的な抑制  $N \sim (eE_0/m^2)^2 \Rightarrow N$  **大**

• 具体例: パルス電場での粒子生成

Sauter電場  $eE(t) = \frac{eE_0}{\cosh^2(t/\tau)}$  with  $eE_0/m^2 = 0.1$



[HT, Fujiii, Itakura (2014)]

[HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)]

# 今回の若手賞 = 摂動的な粒子生成の利用

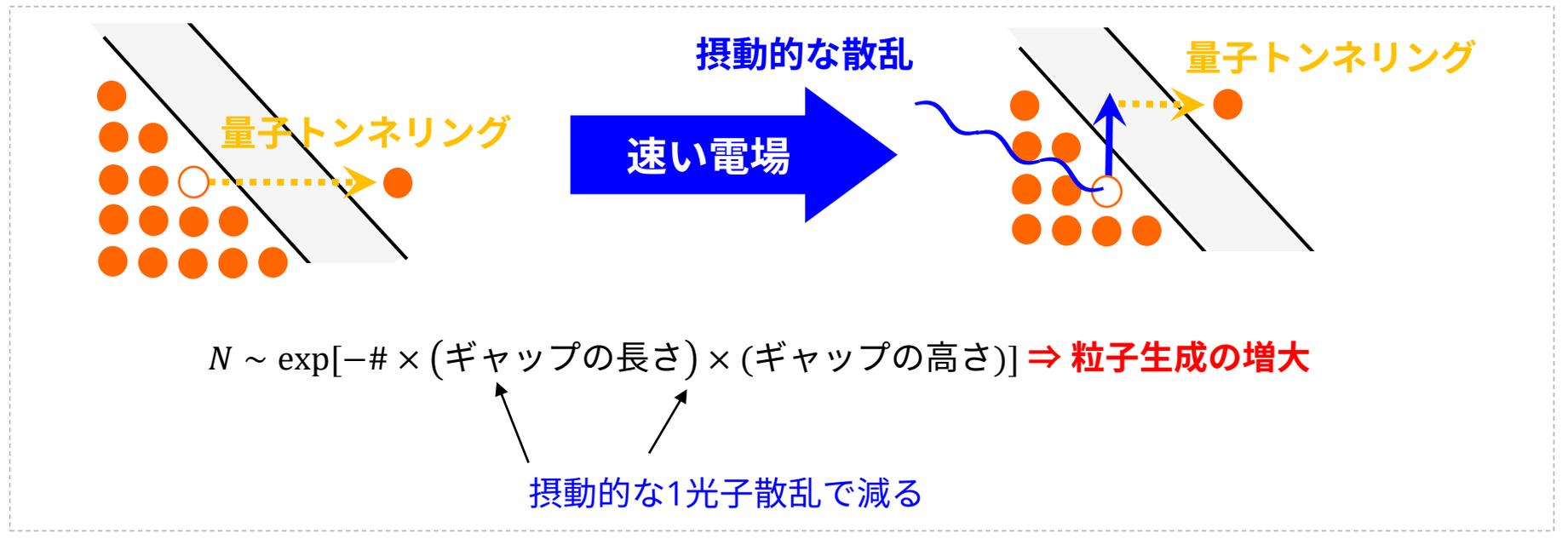
## アイデア

[Dunne, Gies, Schutzhold (2008), (2009)]  
[HI (2019), (2020)] [Huang, HI (2019)]

速い電場の摂動的な機構が粒子生成的には有利

⇒ 速い電場を利用すれば、弱く遅い電場 (例: レーザー) でも粒子生成できるのでは？

⇒ 「電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程における協調現象」  
= 「Dynamically assisted Schwinger 機構」



# 今回の若手賞 = 摂動的な粒子生成の利用

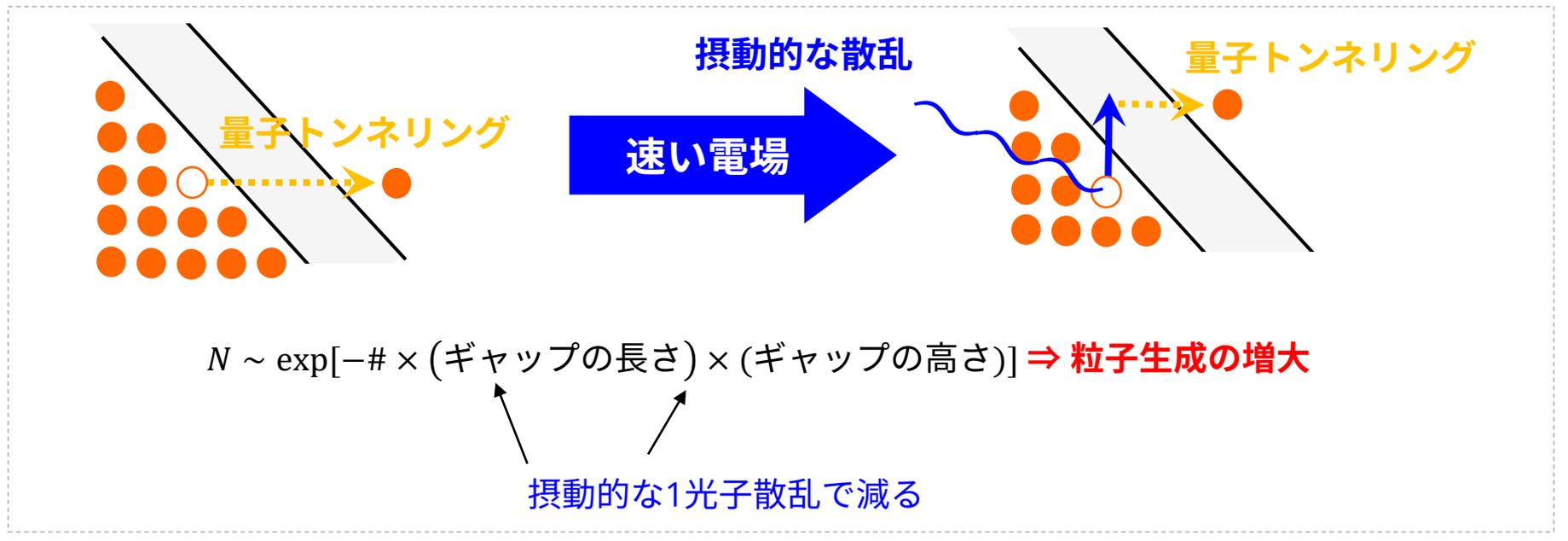
## アイデア

[Dunne, Gies, Schutzhold (2008), (2009)]  
[HI (2019), (2020)] [Huang, HI (2019)]

速い電場の摂動的な機構が粒子生成的には有利

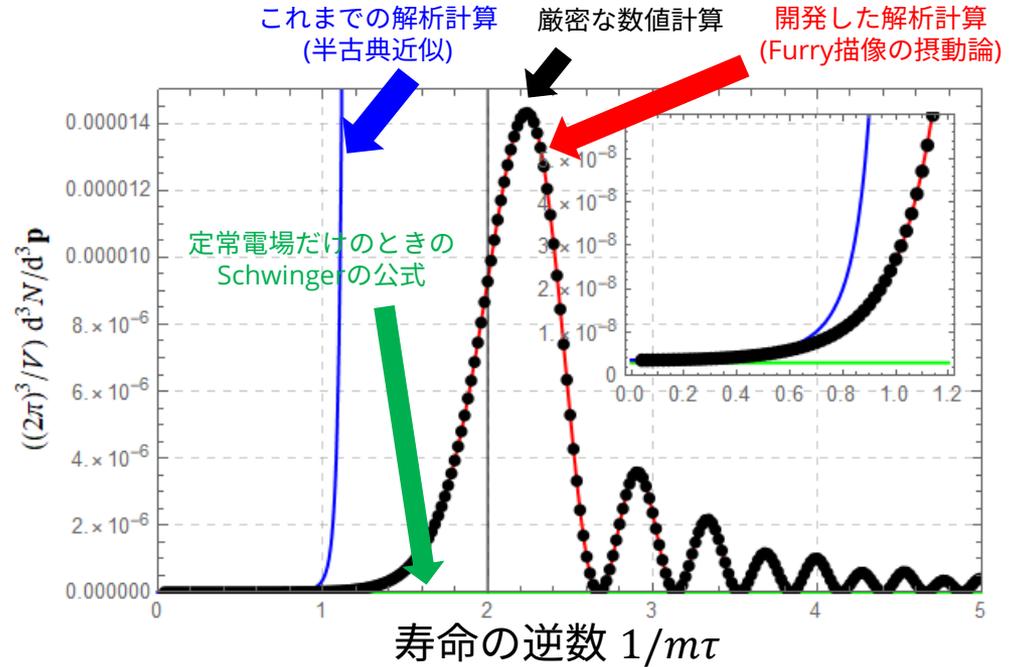
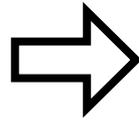
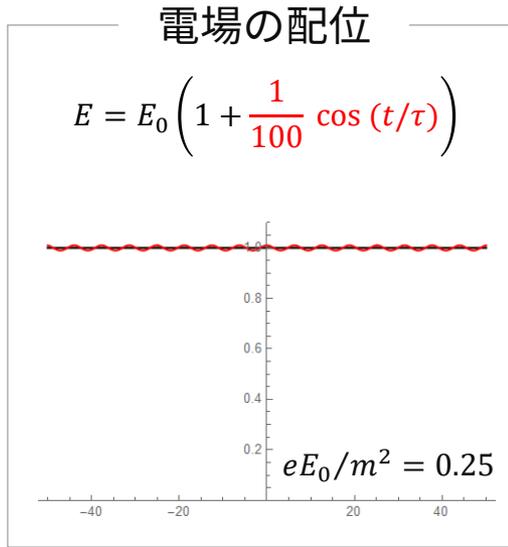
⇒ 速い電場を利用すれば、弱く遅い電場 (例: レーザー) でも粒子生成できるのでは？

⇒ 「電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程における協調現象」  
= 「Dynamically assisted Schwinger 機構」



**成果: Dynamically assisted Schwinger機構の基礎理論の開発を通じて、その物理の理解や応用を進めた**

# 成果(1/3): すさまじい増大が起こることを確かめた



## • 技術的な進展

- 不安定な真空中の散乱理論の整備 (Furry描像の摂動論)
- これまでカバーできない領域も解析的な議論が可能に

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

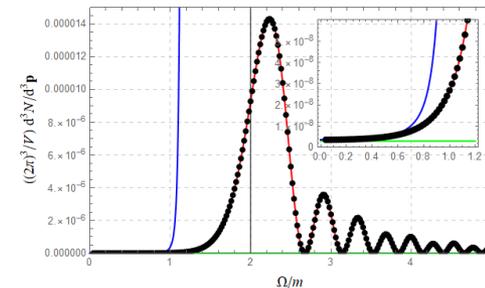
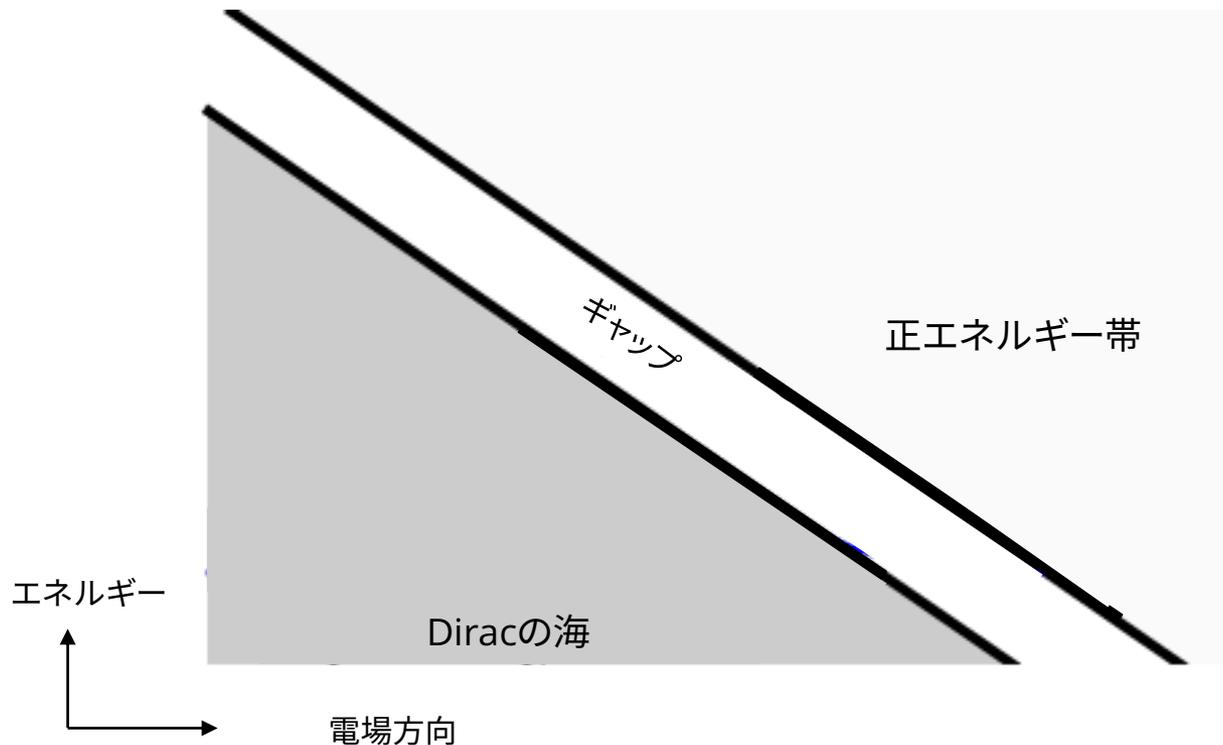
[HI (2019), (2020)] [Huang, HI (2019)]

## • 物理的な進展

- 速い電場がとても弱くても、たしかにとっても増大する
- 新発見: 高周波領域に行くと、振動する  $\leftarrow$  強い電場中の Dirac sea の構造と関係 (次のスライド)

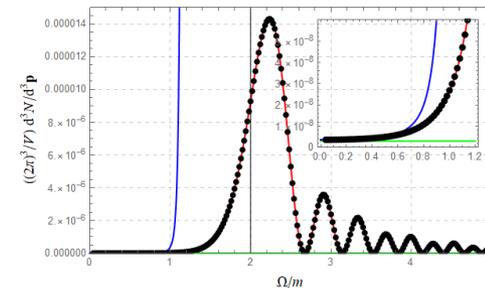
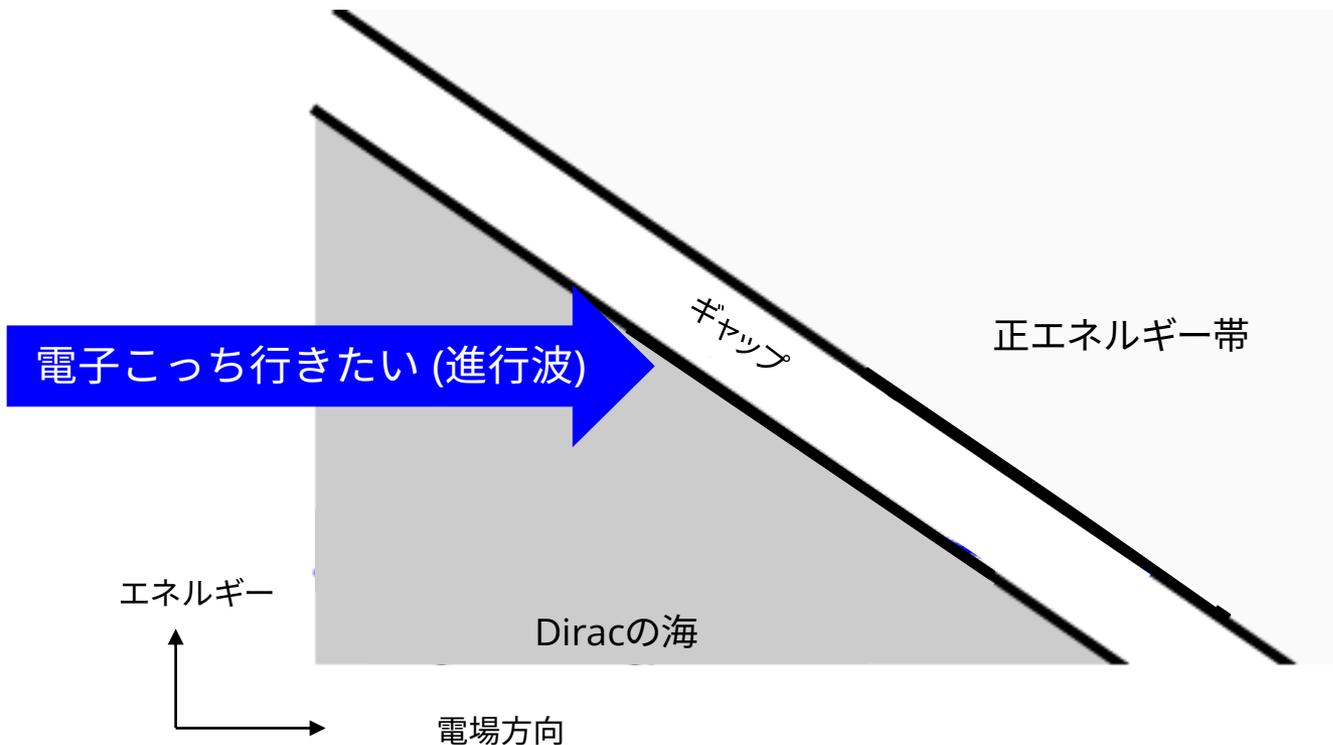
# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



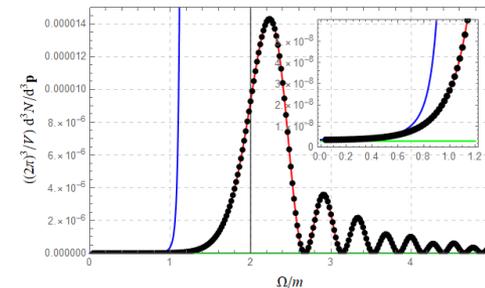
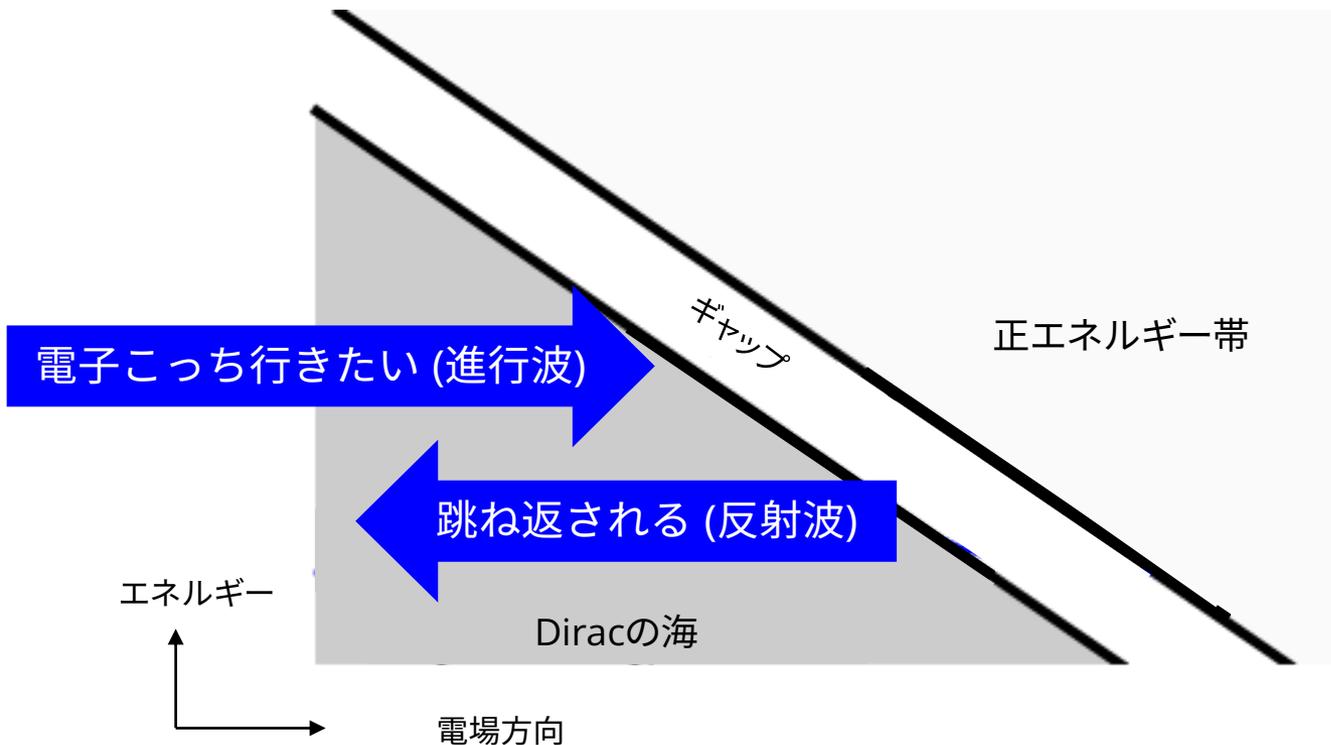
# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



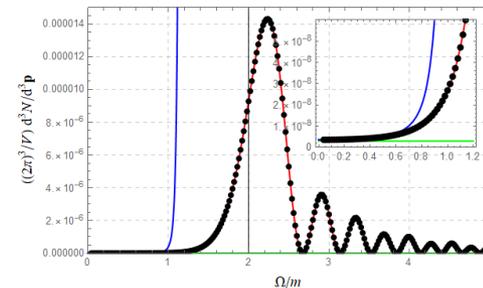
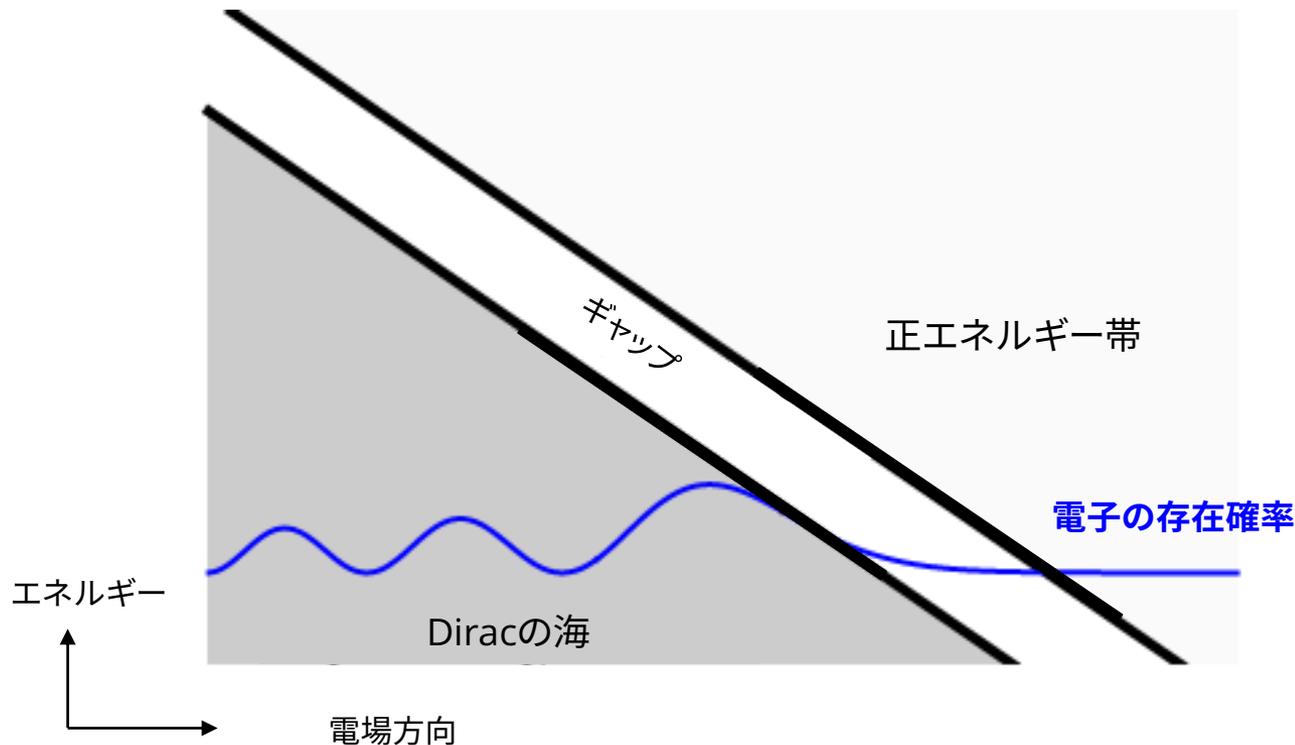
# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



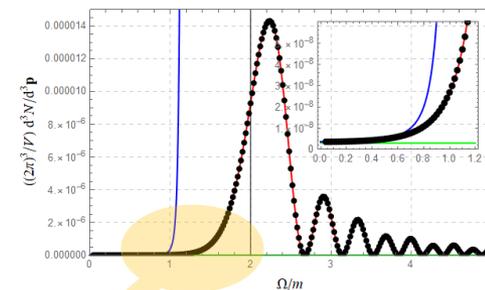
# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

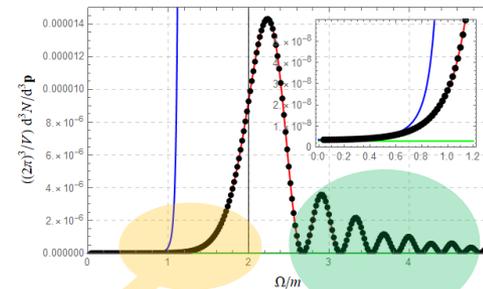
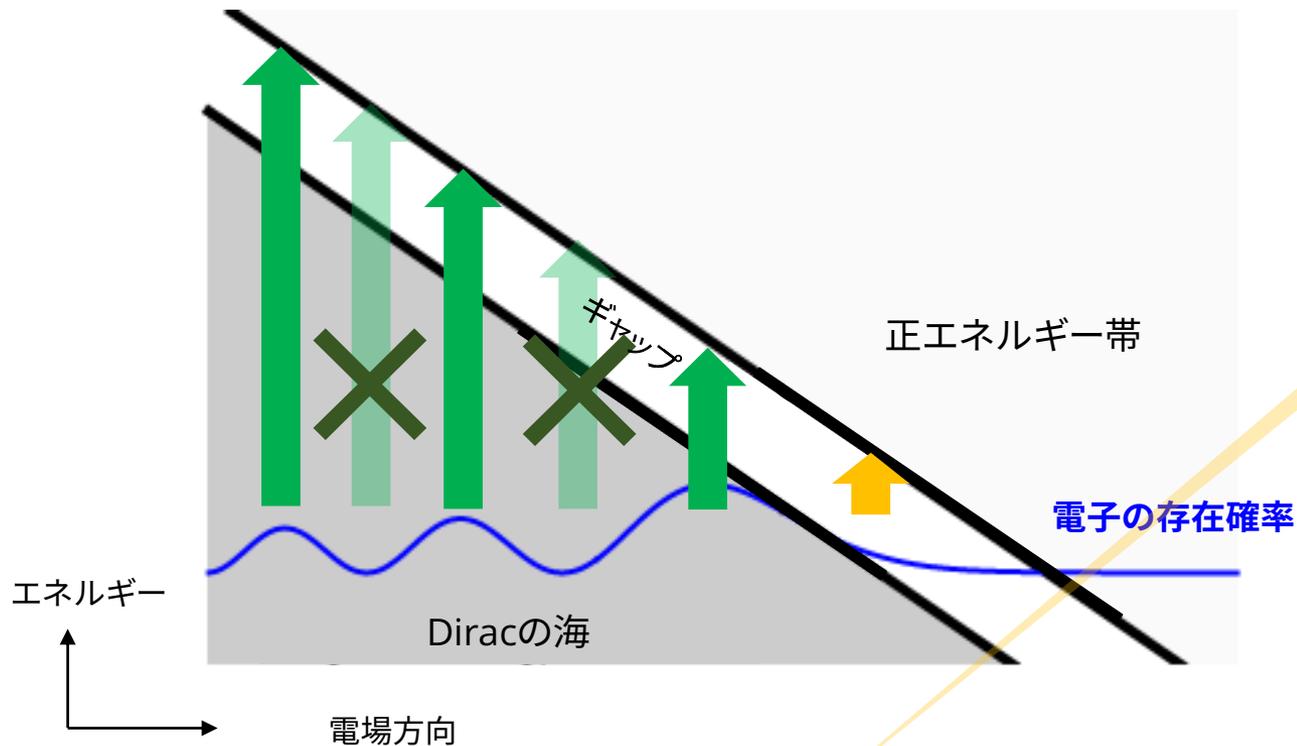
粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



- 量子トンネリング ⇒ 粒子生成の増大

# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

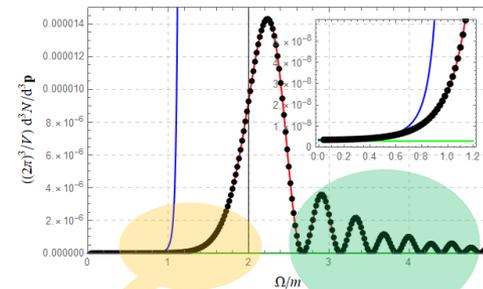
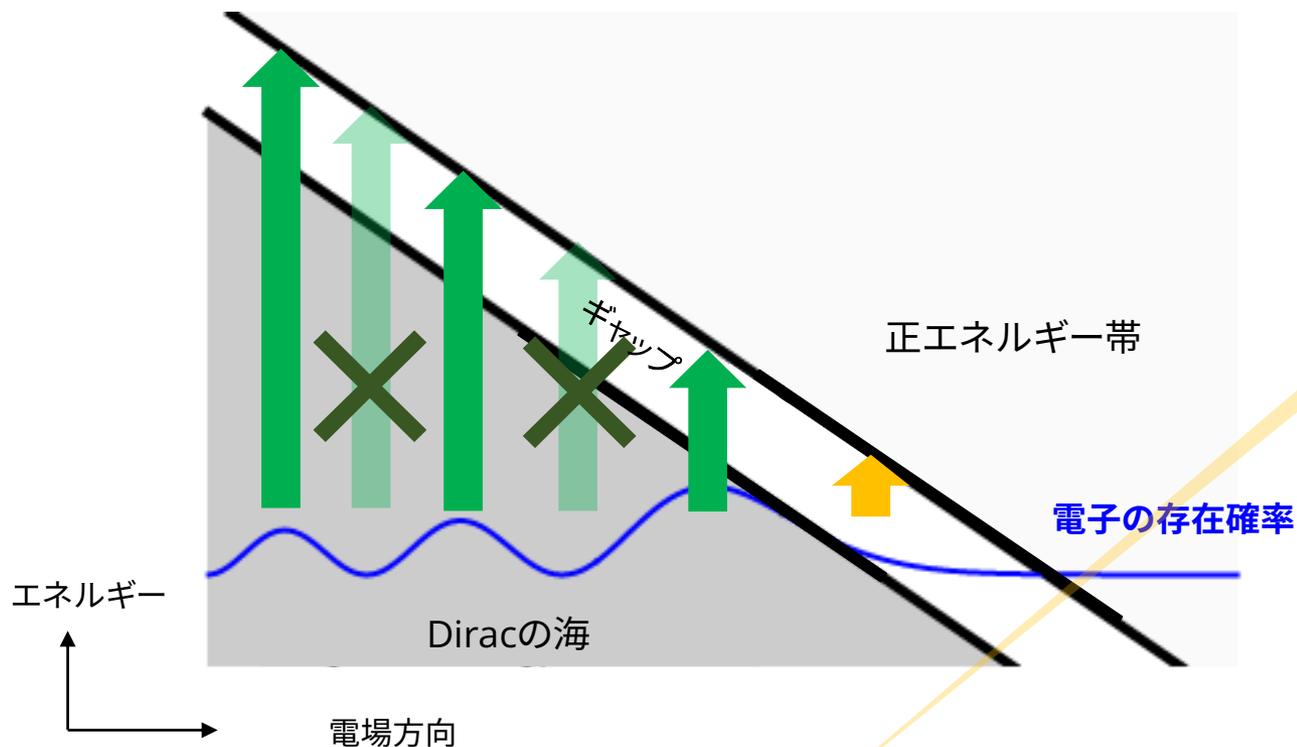
粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



- 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

# 成果(2/3): 電場中の真空構造への新しい理解

粒子スペクトルはQEDの「ゆがんだ」真空構造を直接反映



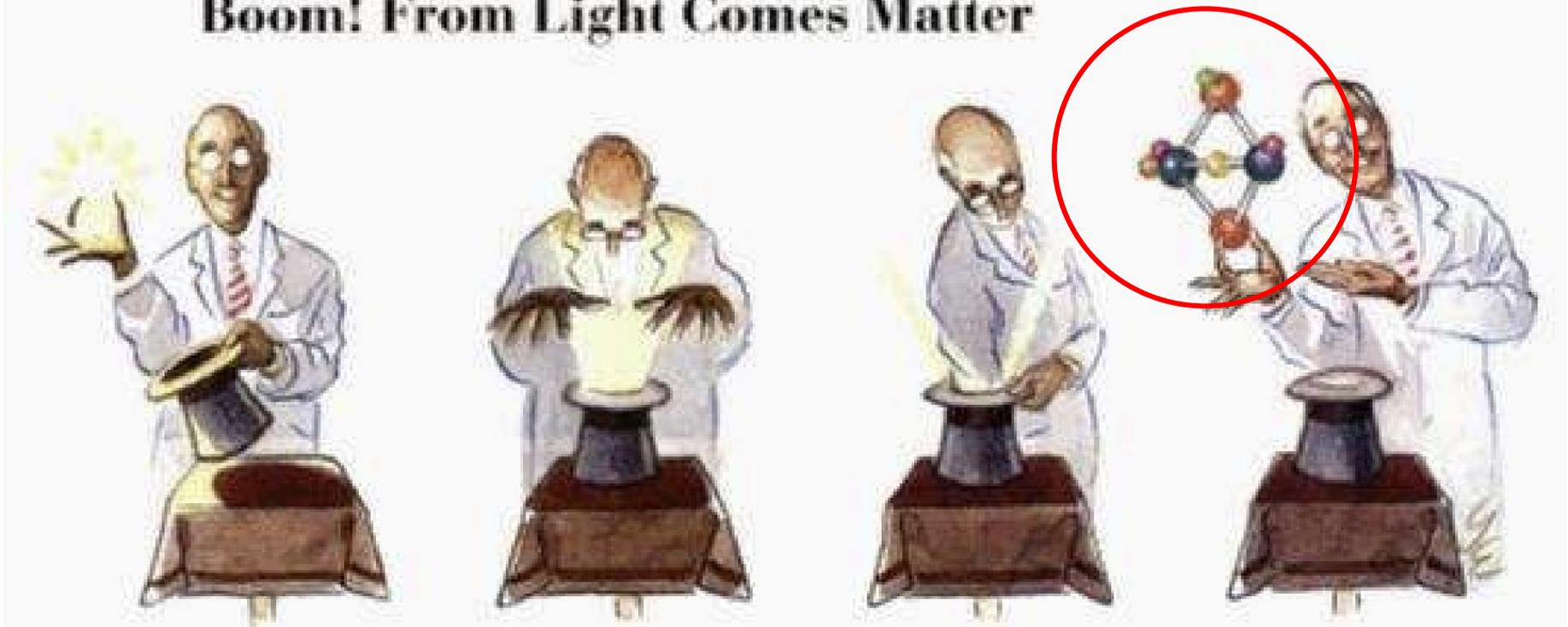
- 量子トンネリング ⇒ 粒子生成の増大      量子反射 ⇒ 粒子生成の振動
- 物理過程はすべて真空の上で起こる  
⇒ Schwinger機構だけでなく、他の過程にも「ゆがみ」は影響する  
例) 真空複屈折 [HT, Ironside (2023)]

# 成果(3/3): 真空から「XXX」を作る応用

Dynamically assisted Schwinger 機構で粒子がたくさん作れる、振動で操作できる  
⇒ 電磁場をデザインすれば、スピンなどのいろいろな物理量を真空から生み出せる  
(≡ 真空を「デバイス」として活用する)

XXX = 物 (粒子・反粒子対)

**Boom! From Light Comes Matter**



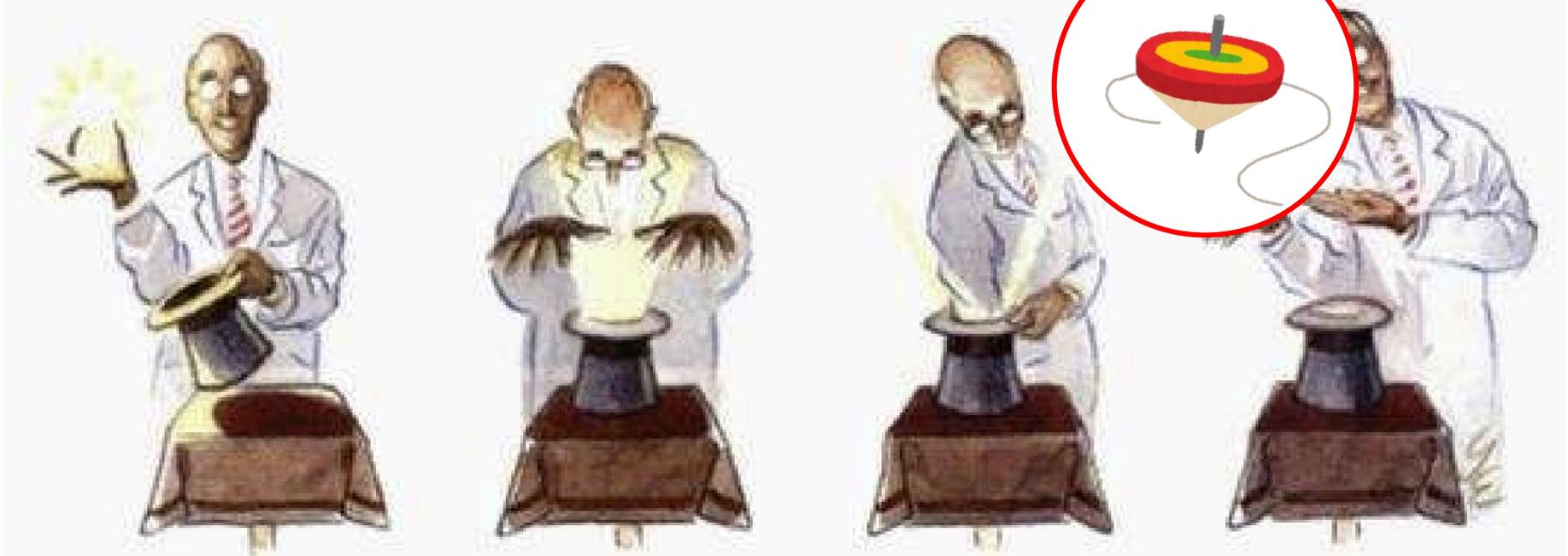
# 成果(3/3): 真空から「XXX」を作る応用

Dynamically assisted Schwinger 機構で粒子がたくさん作れる、振動で操作できる  
⇒ 電磁場をデザインすれば、スピンなどのいろいろな物理量を真空から生み出せる  
(≡ 真空を「デバイス」として活用する)

[Huang, Matsuo, **HI** (2019)]  
[Huang, **HI** (2020)]

XXX = スピン / スピン流

## Boom! From Light Comes Matter

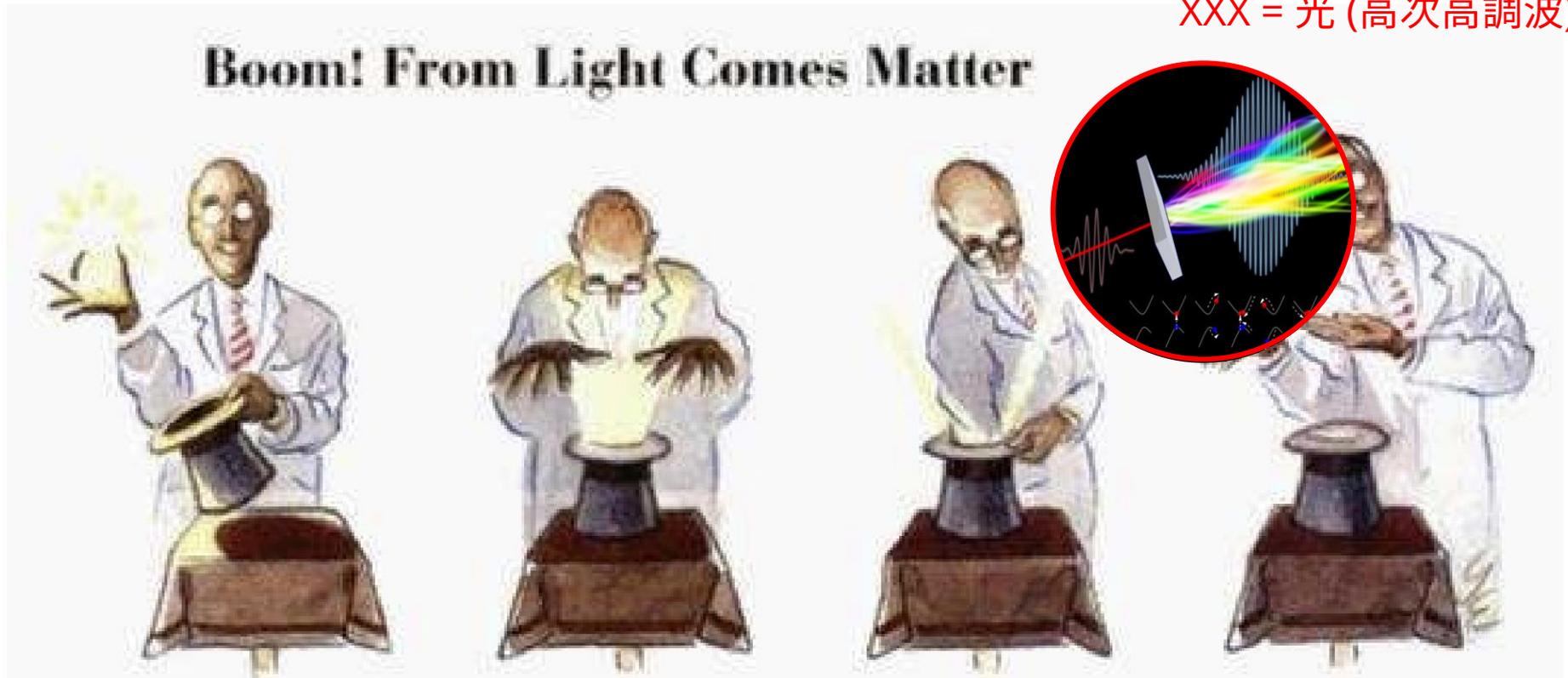


# 成果(3/3): 真空から「XXX」を作る応用

Dynamically assisted Schwinger 機構で粒子がたくさん作れる、振動で操作できる  
⇒ 電磁場をデザインすれば、スピンなどのいろいろな物理量を真空から生み出せる  
(≡ 真空を「デバイス」として活用する)

[HT, Hongo, Ikeda (2021)]

XXX = 光 (高次高調波)



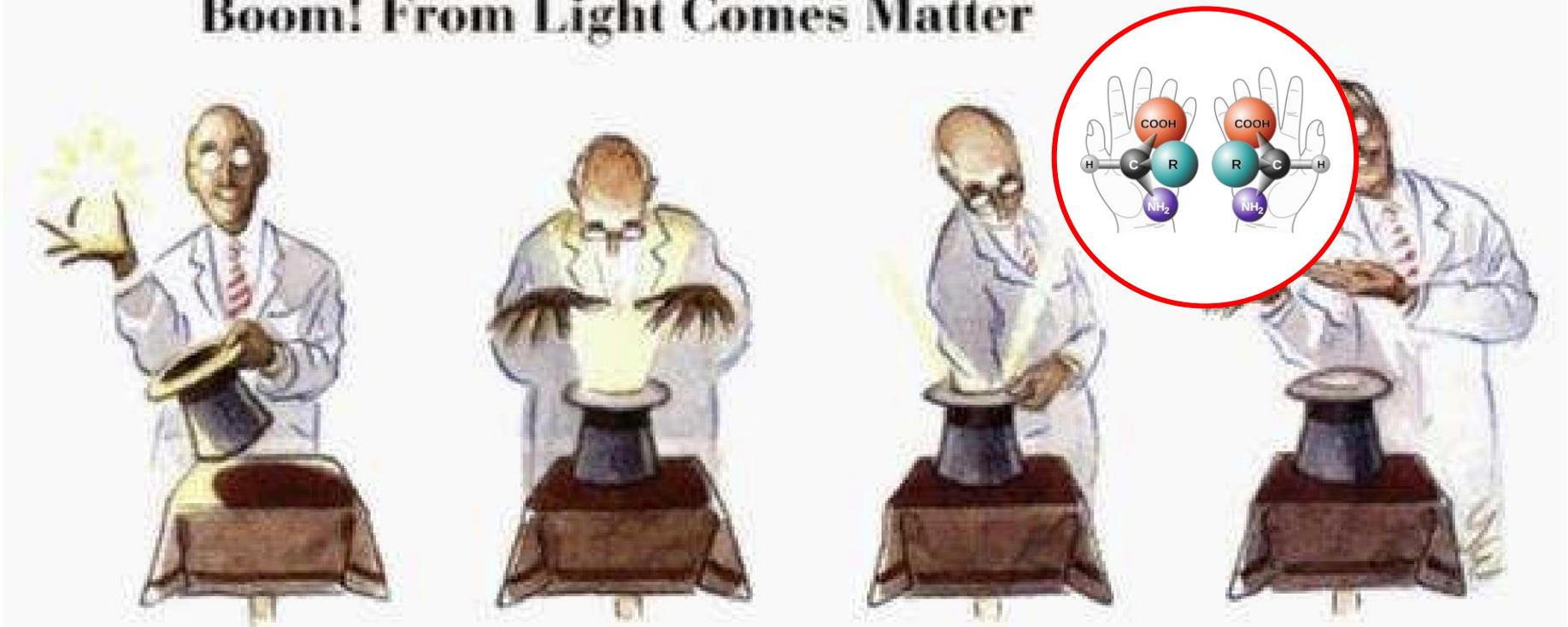
# 成果(3/3): 真空から「XXX」を作る応用

Dynamically assisted Schwinger 機構で粒子がたくさん作れる、振動で操作できる  
⇒ 電磁場をデザインすれば、スピンなどのいろいろな物理量を真空から生み出せる  
(≡ 真空を「デバイス」として活用する)

[HT (2020)]

XXX = カイラリティ

## Boom! From Light Comes Matter



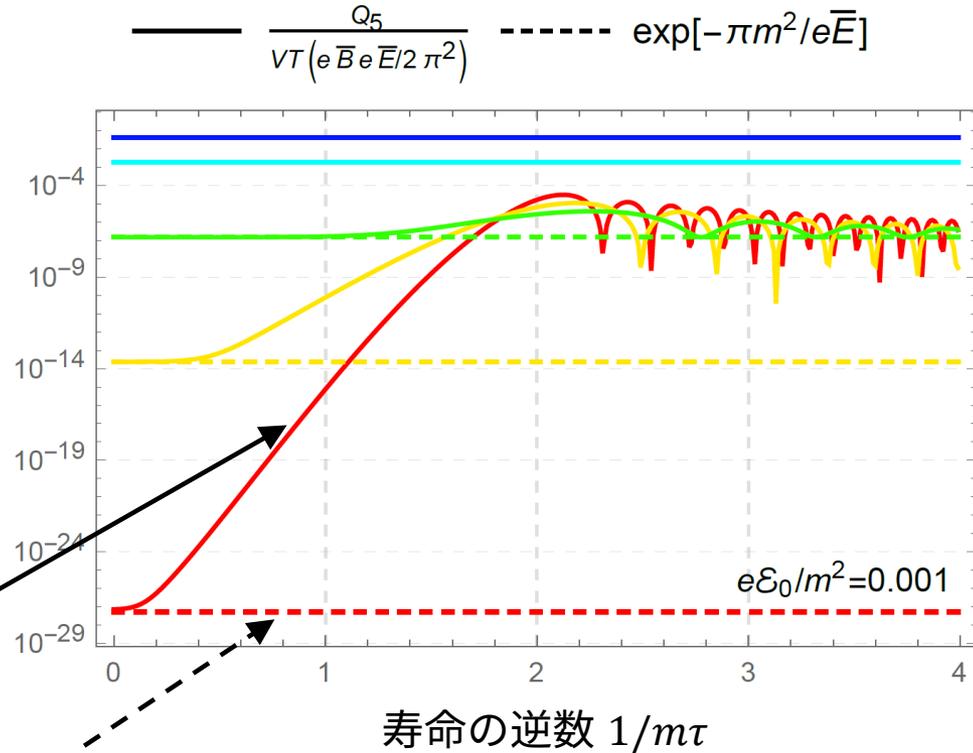
# 成果(3/3): 例) 真空から「カイラリティ」を作る応用

E.B  $\neq$  0 下のカイラリティ生成量は、dynamically assisted Schwinger 機構で、たしかにすさまじく増大できる！

[HT (2020)]

$$\frac{eE(t)}{m^2} = \frac{e\bar{E}}{m^2} + 0.001 \cos(t/\tau)$$

$$\frac{eB(t)}{m^2} = \frac{e\bar{B}}{m^2}$$



アシスト有

アシスト無 (素朴な結果)

**Schwinger機構の物理・基礎理論を使い『真空から「XXX」を作る』みたいな応用をすることが可能になってきた**

# まとめ

## 電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程 における協調現象に関する基礎研究

(≡ 時間変動する強い電場でのSchwinger機構の研究)

### 大きな問題意識:

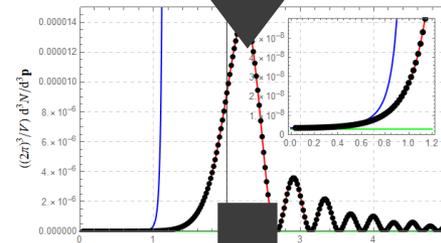
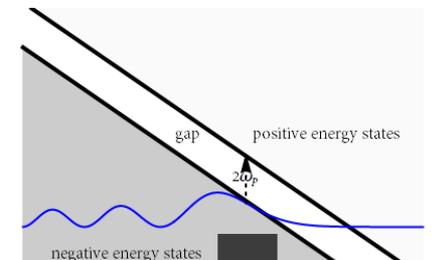
強い光という極限状況ではなにが起こるのか？

- 実験的にタイムリー (重イオン、レーザー、マグネター、...)
- まずはQEDで、Schwinger機構

### 今回の若手賞:

時間変動する電場によるSchwinger機構、  
特にdynamically assisted Schwinger機構の研究

- 基礎理論の開発
- 真空構造のゆがみ
- その応用 (例: カイラリティ生成)





# 非摂動 ↔ 摂動 の移り変わり

## 先行研究: 粒子生成の“相図”

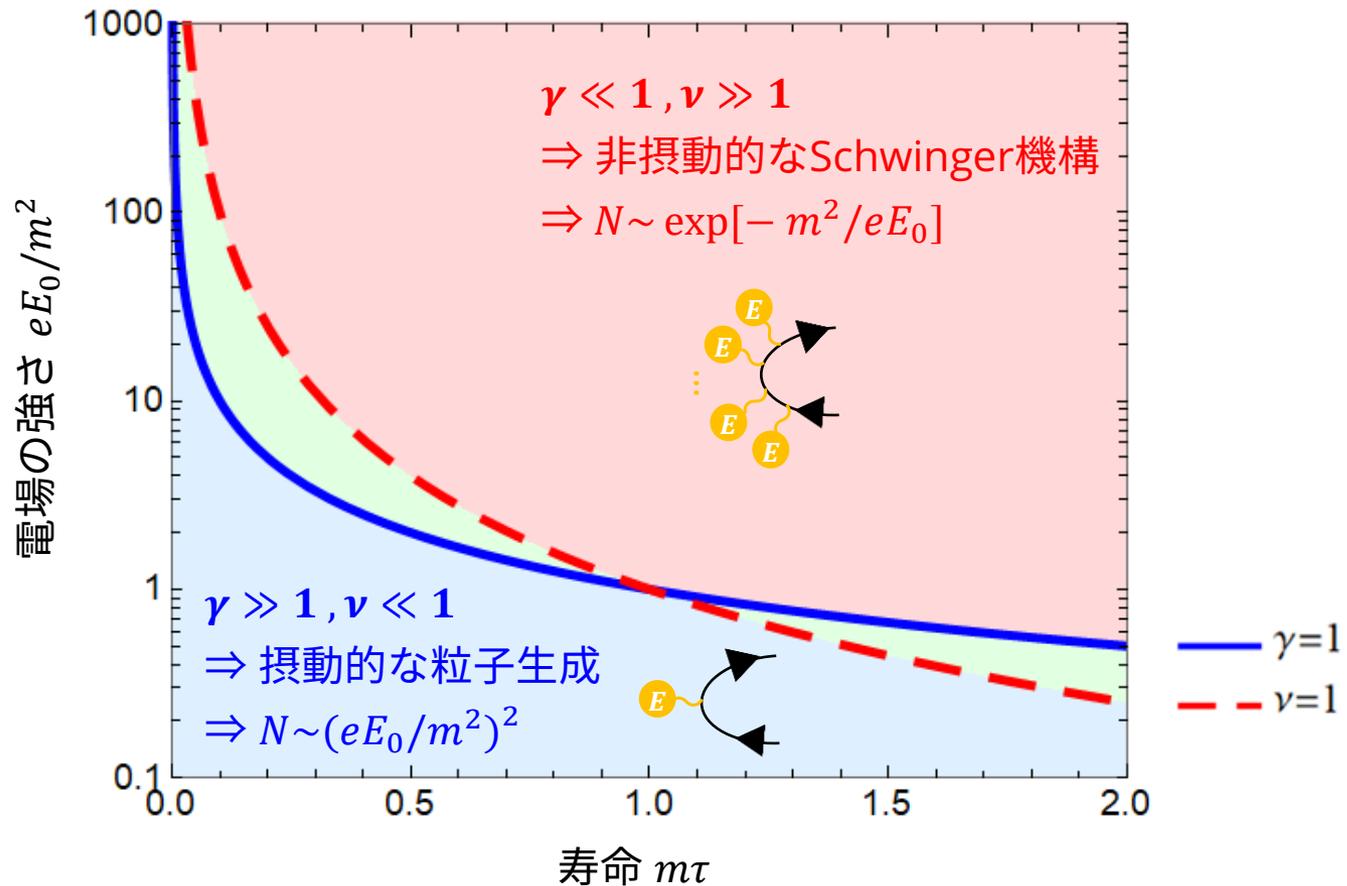
[Brezin, Itzykson (1970)] [Popov (1972)] [Berry (1989)] [Dunne, Shubert (2005)]  
 [HT, Fujimori, Misumi, Nitta, Sakai (2020)] [HT, Fujii, Itakura (2014)]

2つの無次元量が効く

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

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

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



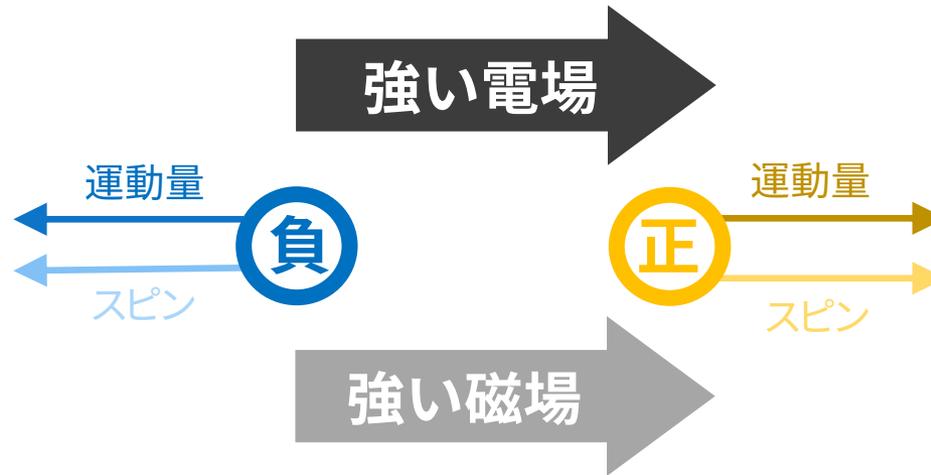
# 真空から「カイラリティ」を作る応用

[HT (2020)]

**動機:**  $E \cdot B \neq 0$ だと、カイラリティ  $n_5$  (右/左巻き粒子の数の差) が生まれる

⇒ 微視的には「Schwinger機構による粒子生成」と「ランダウ量子化によるスピン偏極」の協奏

[Nielsen, Nonomiya (1983)]  
[Fukushima, Kharzeev, Warringa (2010)]  
[Copinger, Fukushima, Pu (2018)]



⇒ ヘリシティ =  $+2 \times N_{\text{pair in LLL}} \approx$  カイラリティ =  $+2 \times N_{\text{pair in LLL}}$

**問題:** 質量で指数関数的抑制 ( $\because n_5 \propto N \propto \exp[-\# m^2/eE]$ )

⇒ ・レーザーとかの弱い電磁場の実験では見えない

・重イオン衝突では、重いクォークのカイラリティ生成(やCME)は厳しい

**アイデア:** Dynamically assisted Schwinger 機構を使えば  $N \uparrow$  なので、 $n_5$  も  $\uparrow$