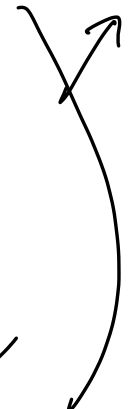


Schwinger 機構の基礎と発展

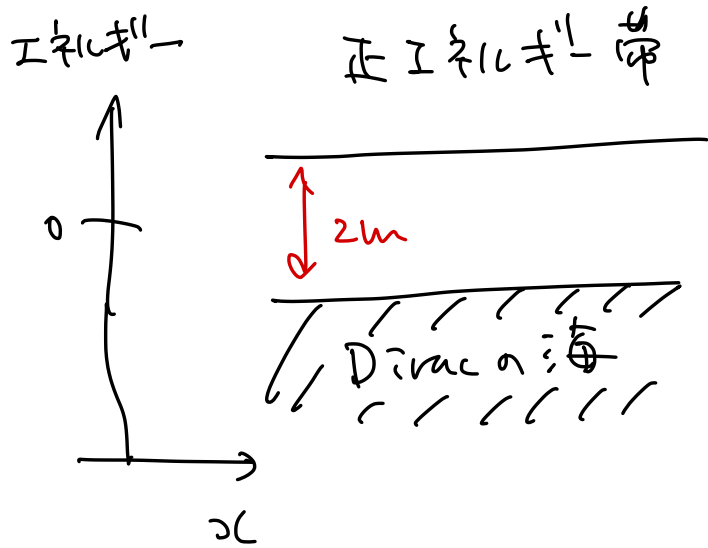
11

2022年 8月 2日 田屋英俊 (理研:THEMS)

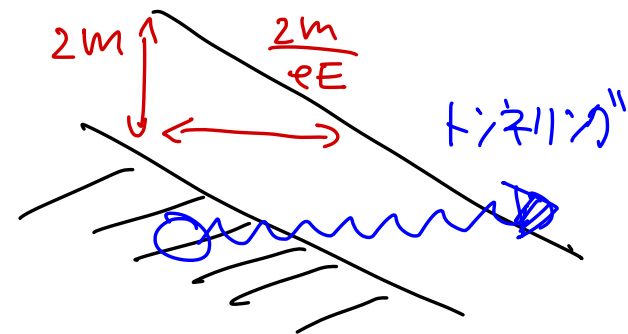
- 内容 :
- §1 概論 (手書きスライド) 板書
 - §2 外場中の場の量子論
 - §3 半古典近似
 - §4 実時間発展とバックリアクション
- 

Schwinger 機構とは？

- 強い電場があるとき、電子・陽電子のペアが生成されて真空から粒子



電場 $V(x) = -eEx$



● 粒子生成率 : $N \sim \exp\left[-\left(\frac{m}{\hbar c}\right)^2 \frac{\hbar^2 c^2}{eE}\right] \times (\text{エネルギーの幅})$
 $\sim \exp\left[-\frac{m^2}{eE}\right]$

これは真空の揺らぎ

たまたま楽しいから

基礎物理とこれ楽しい → 場の理論の非摂動的性質を知りたいファン

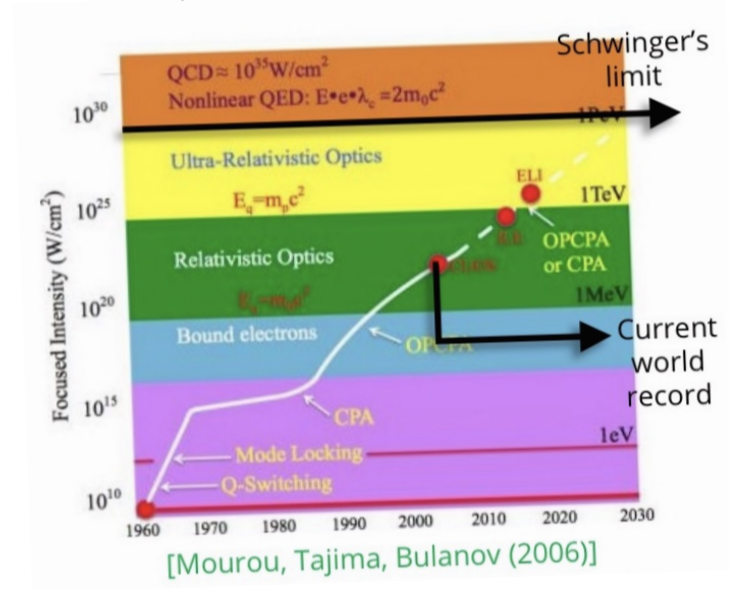
真空の物理好きの、最も基本的

実験から現象味を帯びてきた →

色々な極限状況に出くさる。

ex.) 重イオン衝突, 初期宇宙, 物性あたり

レーザーの強度の発展



歷史



1931年 Santer に よる 予言.

(9

1936年 Heisenberg & Euler に よる 定常電磁場中の
有粒子の真空期待値の計算

1951年 Schwinger に よる QFT の計算

$$|\langle 0; in | 0; out \rangle|^2 = e^{-2 \text{Im} \int d^4x \mathcal{L}_{HE}} = 1 - \underbrace{2VT \text{Im} \mathcal{L}_{HE}}_{\text{真空崩壊確率 } VTW} + \dots$$

○ with $\dots = \dots$

$+ \text{diagrams} + \dots$

$$W = 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n\pi \frac{m^2}{eE}}$$

1969年 Nikishov 光子生成粒子数計算

LS

$$\frac{1}{V} \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-\pi \frac{m^2 + p_\perp^2}{eE}} \Rightarrow \frac{N}{VT} = 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} e^{-\pi \frac{m^2}{eE}}$$

$$\left(\neq W = 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n\pi \frac{m^2}{eE}} \right)$$

• 粒子生成率 $\frac{N}{VT}$ は真空崩壊率 $W = 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n\pi \frac{m^2}{eE}}$

と一致 (cf. Cohen-McGady, 2008)

$$\left(\begin{aligned} \therefore N &\sim \sum_n \langle n; \text{out} | 0; \text{in} \rangle^2 \\ W &\sim \sum_n |\langle n; \text{out} | 0; \text{in} \rangle|^2 \end{aligned} \right)$$

1972年 Marinov-Popov の任意の加速による一般化 L6

- (一様定常) 電場 t_1 と t_2 と加速の縮重度が異なる t_1 に対して $\frac{d^3N}{d^3p}$ は変化する。

- 加速場 λ とランダム量子化

$$m^2 + p_{\perp}^2 \rightarrow m^2 + (2n+1)eB - 2s_{\parallel}eB$$

$l = \pm 2$ 、

$$\frac{(2\pi)^3 d^3N}{V d^3p} = e^{-\pi \frac{m^2 + p_{\perp}^2}{eE}} \rightarrow e^{-\pi \frac{m^2 + (2n+1)eB - 2s_{\parallel}eB}{eE}}$$

- $n=0$ のとき $s_{\parallel} \geq 1$ t_1 と $e^{+\#}$ になる。 ← NO 不安定性の定義
- さらに $s_{\parallel} = 0$ t_1 と粒子生成は抑制

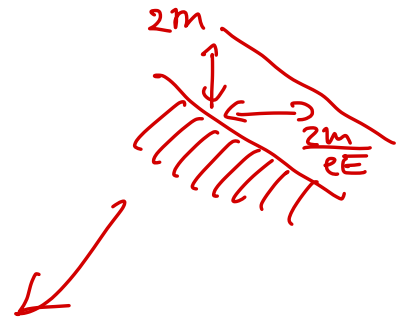
1970年 Brezin-Izykson, Popov による

17

非定常電場 $E = E(t)$ での粒子生成の計算

• 半古典近似の範囲で

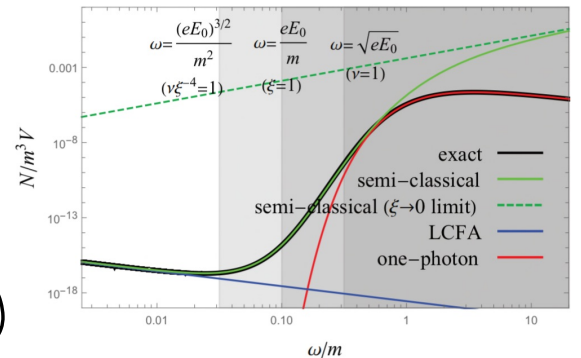
$$N \propto \begin{cases} e^{-\pi \frac{m^2}{eE}} & (\gamma \ll 1) \\ |(eE)^{2m/\omega}|^2 & (\gamma \gg 1) \end{cases}$$



$$\gamma \equiv \frac{m\omega}{eE} = \frac{(\text{トンネルの時間} \sim \frac{m}{eE})}{(\text{電場の周期的時間} \sim 1/\omega)}$$

しかし、 $\gamma \gg 1$ には必ずしも
半古典近似は正当化できない。

少し注意した方がよい。(cf. Taya et al 2021)



1975年 Ritus-Lebetov の 2-loop 計算 L8

1981年 Fradkin-Gitman の

真空崩壊 a bg. のあるときの摂動論の整備

$\frac{eE}{m} \ll 1$ とき

• $2 \operatorname{Im} \mathcal{L}_{2\text{loop}} \stackrel{\text{NEW !!}}{=} 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} \left(1 + \frac{e^2}{4} + \mathcal{O}(e^4) \right) e^{-\pi \frac{m^2}{eE}}$



(cf. Affleck-Alvarez-Martinez 1982)

• 高次ループ \rightarrow $\int \exp 2i \pi \int \mathcal{H} \sim 2i \pi \int \mathcal{H}$ (Ritus conjecture)

$2 \operatorname{Im} \mathcal{L}_{\text{all loop}} \stackrel{\text{conjecture}}{=} 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} e^{-\pi \frac{m_{\text{eff}}^2}{eE}}$



7-0 力の解釈?

with $m_{\text{eff}} = m - \frac{e^2}{4\pi} \frac{eE}{2m} \leftarrow \frac{-e^2}{4\pi r} \sim r = \frac{2m}{eE}$

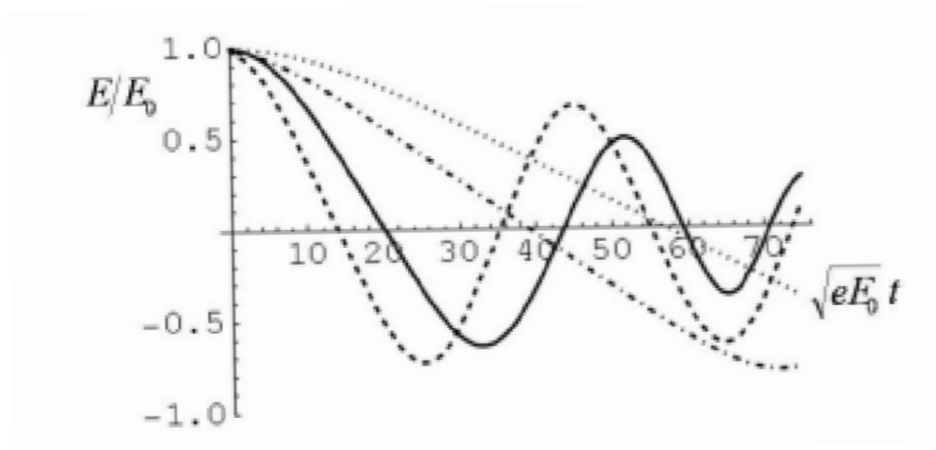
1983年 (重イオン衝突の文脈で) バックリアクション
 問題が現象論的に議論.

1987年 Cooper-Mottola による QFT の正規化

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \overset{\text{classical}}{\downarrow} [i\partial - e\not{A} - m] \overset{\uparrow}{\psi} = 0 \\
 \partial_\mu F^{\mu\nu} = \langle e \frac{1}{4} \gamma^\nu \psi \psi \rangle
 \end{array} \right. \quad \text{ε 解 C.}$$

↖ 数値正則化を用いた UV を処理.

電場は 1/n du 振動力.



Σ 中 以 降 の 進 展

(本質的 な 記 号 は 何 を 表 示 する ？) .

色LQ解析的手法の歴史

(10)

(LCFA)

- 2004年 Locally-constant-field approximation

$$N \stackrel{E=\text{const.}}{=} V \times 2 \frac{(eE)^2}{(2\pi)^3} e^{-\pi \frac{m^2}{eE}}$$

$$\rightarrow N \sim \int d^3x \ 2 \frac{(eE(t, \mathbf{x}))^2}{(2\pi^3)} e^{-\pi \frac{m^2}{|eE(t, \mathbf{x})|}}$$

- 2005年 Worldline instanton method

~~色LQ~~ ~~色LQ~~ ~~色LQ~~ ~~色LQ~~ ~~色LQ~~

- 2017年 Furry-picture perturbation theory

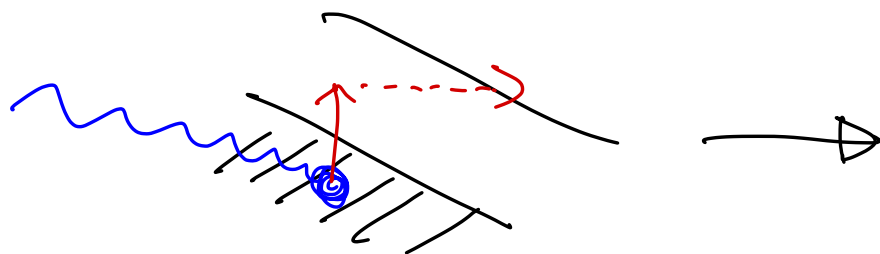
$$A_{\text{tot}} = A_{\text{strong}} + A_{\text{weak}} \ll 2 \ A_{\text{weak}} \text{ (1+1次元の12次元)}$$

新 $\mu(?)$ 現象の発見

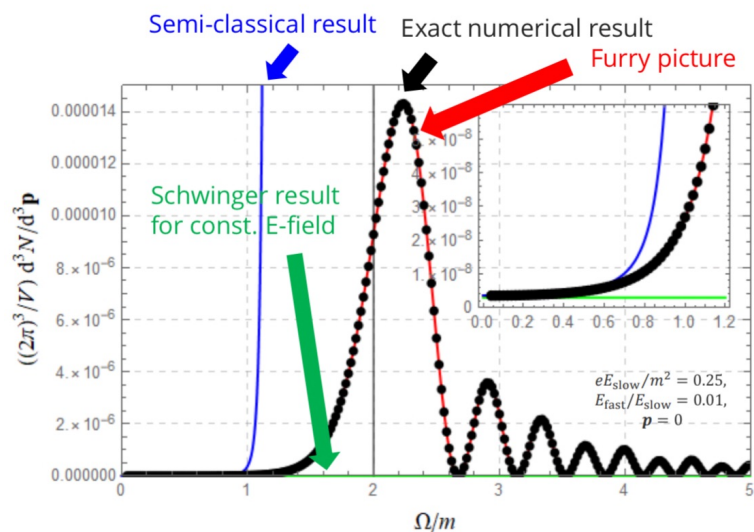
(11)

• 2008年 ~ Dynamically assisted Schwinger mechanism

* 遅い電場と速い電場を足ると N 増

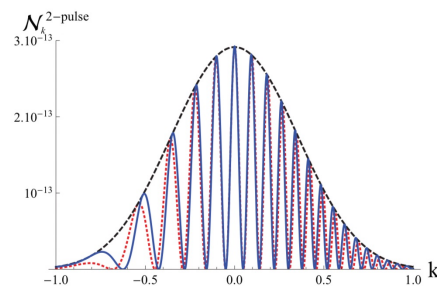
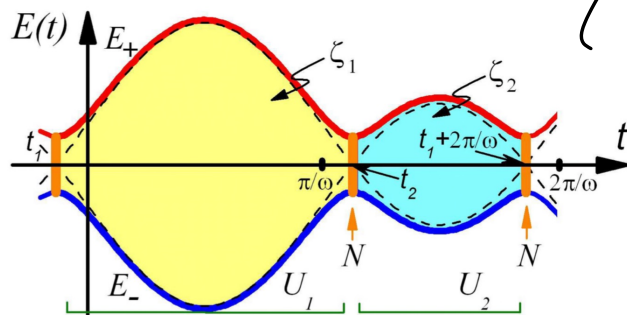


* 物性の Franz-Keldysh effect (1950s)



• 2009年 ~ 量子干渉効果

* 粒子生成が何回も起こると干渉する

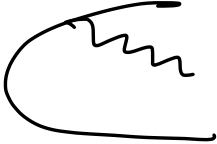


* 物性の Stückelberg phase effect (1930s)

中角位と broad resonance と同じ議論 (cf. Hofman-Linde-Starobinski \times) (1997)

radiative correction 12階まで進展(?) 12

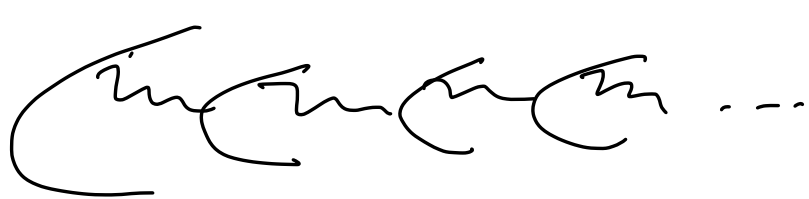
2008年〜光子生成

*  $\mu\tau\mu\tau$ の $\mathcal{O}(\alpha^2)$ の訂正

* 混迷 (243 ex) IF 光散除去に注意が必要. $N_\gamma \propto \frac{1}{k^3}$
光散がある、soft photon 1つ減るとか...

* 高次高調波光散 (cf. Taya-Hongo-Ikeda (2021))
(2010年 CERN の物理生でもホートトエール)

2008年〜QED cascade



急速に増え続ける.

(物理生の avalanche breakdown)

今後の課題

今後の課題

13

かんたんな計算はけっこうおこなったが、いまだに
残された問題はあり、

- 半古典近似を超える
- 空間に非一様性があるとき
- radiative correction
- バックリレーション
- 他の観測量
- 他分野から学ぶこと