

Schwinger 効果のホログラフィーによる記述

佐藤芳紀¹

京都大学大学院理学研究科

ポテンシャル解析の手法を用いて Coulomb 相と閉じ込め相における Schwinger 効果を議論する。この解析から得られる、真空崩壊が起こる臨界電場とこれまで分かっていた結果 [1] と無矛盾であることを確かめた。閉じ込め相の場合では、新たな臨界電場があることを示した。

なお、このポスター発表は吉田健太郎氏 (京大理) との共同研究である [2, 3] に基づく。

1 はじめに

外電場中の電子・陽電子の対生成を Schwinger という。もっと広く、外場中の粒子・反粒子の対生成のことも Schwinger 効果という。Schwinger 効果が起こるためには、電子・陽電子の対がその静止質量以上のエネルギーを外電場から得ればよいので、直観的には、 $V(x) = 2m - eEx - \alpha_s/x$ (α_s は微細構造定数) というポテンシャル障壁 (図 1) のトンネル過程で記述できる。図 1 に示しているように、電場が十分小さいと ($E < E_c$)、ポテンシャル障壁があるが、電場を大きくしていくと、徐々にポテンシャル障壁は下がってくる。そして、ある電場 E_c になるとポテンシャル障壁がなくなることが分かる。しかしながら、このポテンシャル障壁の消失は量子電磁気学では確かめられていない²。

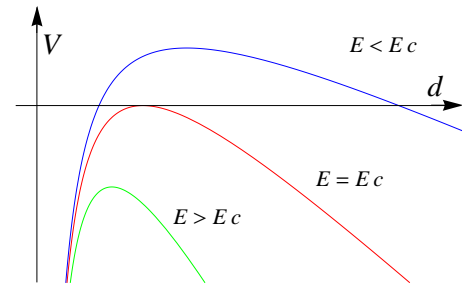


図 1: 量子電磁気学でのポテンシャル障壁。

本ポスターでは、AdS/CFT 対応 (ホログラフィー) を用いて、Schwinger 効果をポテンシャル障壁の観点から考察して得られた結果について述べる。具体的に考えたいモデルは、クォークと反クォーク間には $SU(N)$ のゲージ場による力が働いており、外電場によってクォークと反クォークが逆方向に引っ張られているものである。

2 ポテンシャル解析

2.1 Coulomb 相

Coulomb 相にある理論として、ラーゼ N 、ラーゼ $\lambda := g_{\text{YM}}^2 N$ の $\mathcal{N} = 4$ 超対称ゲージ理論を考える。ゲージ群は Higgs 機構により $SU(N+1)$ から $SU(N) \times U(1)$ へと自発的に破れているとする。このとき、 $SU(N)$ の基本表現に属し、 $U(1)$ 電荷 g_{YM} を持つ基本粒子 (クォークと呼ぶ) が現れる。

AdS/CFT 対応を用いると、クォーク・反クォークポテンシャルと静止質量の和 V 、及び仮想粒子間の距離 x はそれぞれ

$$V = 2T_{\text{F}} r_c \int_1^{r_0/r_c} dy \frac{y^2}{\sqrt{y^4 - 1}}, \quad x = \frac{2L^2}{r_c} \int_1^{r_0/r_c} \frac{dy}{y^2 \sqrt{y^4 - 1}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、AdS 時空の動径方向を r とし、 r_0 はプローブの位置、 r_c はプローブに端を持つ開弦の先端の位置である。積分は r から $y = r/r_c$ へ変数変換している。

¹e-mail address: yoshiki@gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp

²Schwinger などによる計算では、 $eE \ll m^2$ という弱電場という条件が必要であり、その範囲内ではポテンシャル障壁の消失はない。

2.2 閉じ込め相

クォークと反クォークの距離が十分に離れたときに、それらの間に線型型ポテンシャルが生じる理論を考えたい。そのような理論に双対なものとして AdS soliton 時空が知られている。具体的な計量は省略する。ここでは、2 + 1 次元の閉じ込め相におけるゲージ理論を記述するものに限って説明する。先ほどと同様にクォーク・反クォークポテンシャルと静止質量の和 V 及び距離 x はそれぞれ

$$V = 2T_{\text{F}}r_0a \int_1^{1/a} dy \frac{y^4}{\sqrt{(y^4-1)(y^4-(b/a)^4)}}, \quad x = \frac{2L^2}{r_0a} \int_1^{1/a} \frac{dy}{\sqrt{(y^4-1)(y^4-(b/a)^4)}} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $b = r_t/r_0$ であり、 r_t は物理的には理論の cutoff スケールを表している。

3 結果

3.1 Coulomb 相

(1) 式のポテンシャルに外電場からの寄与 $E x^3$ を加えた全ポテンシャル障壁を x の関数としてプロットすると、図 2 となる。ここで、 $\alpha = E/E_{\text{DBI}}$ として無次元量を導入した。 E_{DBI} はプローブ D3-ブレーン⁴が well-defined であるような電場の上限であり、 $2\pi m^2/\sqrt{\lambda}$ で与えられる。

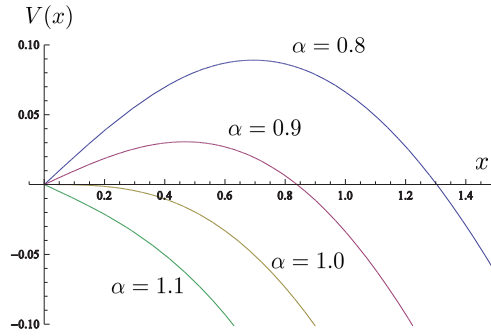


図 2: Coulomb 相のポテンシャル障壁。 $T_{\text{F}}r_0 = L^2/r_0 = 1$ としている。

この図を見ると、電場が $2\pi m^2/\sqrt{\lambda}$ ($\alpha = 1.0$) になると、ポテンシャル障壁が消失していることが分かる。この結果は、[1] の結果と consistent である。ここでは、数値的に $\alpha = 1.0$ でポテンシャル障壁の消失を確認したが、解析的にも示すことができる。

3.2 閉じ込め相

Coulomb 相の場合と同様に、(2) 式に外電場の寄与を加えた全ポテンシャル障壁を x の関数としてプロットすると、図 3 が得られる。ただし、 $b = 0.5$ とした。

この図を見ると、図 2 と同様に、 $E = E_{\text{DBI}}$ でポテンシャル障壁がなくなっていることが分かる。つまり、 $E = E_{\text{DBI}}$ で真空崩壊が起きている。閉じ込め相の場合には、もう一つ臨界的な電場が現れる (図 3 の赤線)。この電場より小さい値では、ポテンシャル障壁の面積が無限大なので、Schwinger 効果は起きない。しかし、少しでもこの電場より大きい値であれば、トンネル過程になるので Schwinger 効果が起こる。

³弦理論では、NS-NS 2-form B_2 に対応する

⁴D-ブレーンの低エネルギー有効理論は Dirac-Born-Infeld (DBI) 作用で与えられる。

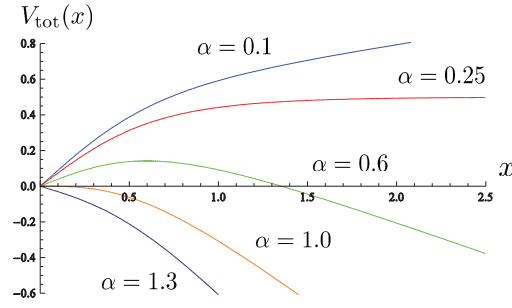


図 3: 閉じ込め相のポテンシャル障壁。 $T_{F}r_0 = L^2/r_0 = 1$ としている。

4 まとめと展望

本ポスター発表では、ポテンシャル解析から得られることとして、電場の上限があり、それは DBI 作用が well-defined であるような電場の上限に等しいことを述べた。さらに、理論が閉じ込め相にある場合は、Schwinger 効果が起こるか起きないかという臨界的な電場があることを述べた。

今後の展望として QCD への応用が挙げられる。RHIC の重イオン衝突実験では、重イオンの衝突により強電磁場が発生することが分かっている。そのため、これらのモデルをより QCD に近いモデルである D3/D7 系や酒井・杉本模型 [4, 5] に適用することで興味深い結果が得られると期待される。

参考文献

- [1] G. W. Semenoff and K. Zarembo, “Holographic Schwinger Effect,” Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 171601 [arXiv:1109.2920 [hep-th]].
- [2] Y. Sato and K. Yoshida, “Potential Analysis in Holographic Schwinger Effect,” JHEP **1308** 2013 002 [arXiv:1304.7917 [hep-th]].
- [3] Y. Sato and K. Yoshida, “Holographic Schwinger effect in confining phase,” arXiv:1306.5512 [hep-th].
- [4] T. Sakai and S. Sugimoto, “Low energy hadron physics in holographic QCD,” Prog. Theor. Phys. **113** (2005) 843 [hep-th/0412141].
- [5] T. Sakai and S. Sugimoto, “More on a holographic dual of QCD,” Prog. Theor. Phys. **114** (2005) 1083 [hep-th/0507073].