非摂動繰り込み群に基づく Yang-Mills 理論の閉じ込め弦表示*

千葉大自然　今井崇人

Yang-Mills 理論は非摂動論的な効果が支配的な低エネルギー領域においてクォークの閉じ込めが起こる一方で、ゲージ粒子が質量を持つものと考えられている。最近、ゲージ粒子の質量と深いつながりがある質量次元 2 の複合演算子で BRST-不変な線形結合

$$\mathcal{O} := \int d^4x \left[\frac{1}{2}\mathcal{A}_\mu \cdot \mathcal{A}_\mu + i\lambda\bar{\mathcal{C}} \cdot \mathcal{C}\right]$$

の存在が提唱され [1]、それが繰り込み操作の後でも意味あることが示された [2]。

これを受けて我々は、特に、Landau gauge $\lambda = 0$ の場合は真空凝縮 $\langle \mathcal{A}_\mu \cdot \mathcal{A}_\mu \rangle \neq 0$ の帰結として、Yang-Mills 理論における Wilson loop 期待値の閉じ込め弦表示 [3] が構成できることを議論した [4]。Wilson-loop 期待値は、non-Abelian ストークスの定理を用いて面積分に書き換えられるが、その面要素に結合する object は複雑なものである。そこで 2 階反対称テンソル場 $h_{\mu\nu}$ を補助場として面要素に結合するように導入する。補助場 $h_{\mu\nu}$ は古典的には運動項を持たないが、質量次元 2 の真空凝縮が量子効果として運動項を生成する。具体的には Yang-Mills 理論の cumulant で展開を行ったときに $\langle \mathcal{A}_\mu \cdot \mathcal{A}_\mu \rangle$ が補助場 $h_{\mu\nu}$ の運動項の係数になる。生成した補助場 $h_{\mu\nu}$ の運動項は閉じ込め弦表示の構成において重要な役割を果たし、その結果 Wilson loop 期待値の面積則が従う。すなわち Yang-Mills 理論の mass gap がクォークの閉じ込めを引き起こすことを示唆している。また、運動項のある 2 階反対称テンソル場 $h_{\mu\nu}$ の理論は Abelian Higgs 理論と双対な理論になっていることが示され、クォーク閉じ込めの双対超伝導描像を裏付ける結果である。特に Diakonov-Petrov 版の non-Abelian ストークスの定理を使うことで可換射影をすることなく双対 Ginzburg-Landau 理論を導出できた。

この議論において質量次元 2 の真空凝縮 $\langle \mathcal{A}_\mu \cdot \mathcal{A}_\mu \rangle$ の存在と補助場 $h_{\mu\nu}$ の運動項の生成は重要な役割を果たしているが、上記の両者を必ずしも対等に扱っていない。量子効果によって生成する非摂動論的な真空凝縮と有効作用を対等な立場から理解するには非摂動繰り込み群が有効である。そこで今回は非摂動繰り込み群に基づく解析の第一歩として、Yang-Mills 理論において flow 方程式を書き下し質量次元 2 の真空凝縮 $\langle \mathcal{A}_\mu \cdot \mathcal{A}_\mu \rangle$ の数値計算を行い零でない値を持つことを確認した。補助場 $h_{\mu\nu}$ の運動項生成を見ることは今後の課題である。

References

[1] K.-I. Kondo, Phys. Lett. B 514 335 (2001).

[2] K.-I. Kondo, T. Murakami, T. Shinohara and T. Imai, hep-th/0111256, Phys. Rev. D **65** (2002) 085034

[3] A. M. Polyakov, Phys. Lett.B59,82(1975). Nucl. Phys. B120,429(1977) .

[4] K.-I. Kondo. and T. Imai, hep-th/0206173.

* この研究は近藤慶一氏 (千葉大理) との共同研究 [4]、および近藤慶一氏 (千葉大理)、加藤浩氏 (千葉大理)、村上武晴氏 (千葉大自然)、篠原徹氏 (千葉大自然) との共同研究に基づいている。