

中間子における QCD インスタントン効果

首都大学東京大学院理工学研究科博士後期課程 3 年 ○酒井 裕企 (Yuki SAKAI)
首都大学東京理工学研究科素粒子理論研究室助教 北澤敬章 (Noriaki KITAZAWA)

概要

素粒子理論物理学の目的は物質やそれらにはたらく力が従う基本的な自然法則を追求することである。現在、素粒子はレプトンとクォークとよばれる物質を構成する粒子とゲージ粒子とよばれる相互作用を媒介する粒子があると知られている。量子色力学 (Quantum chromodynamics: QCD) はクォークとゲージ粒子のグルーオンの強い相互作用を記述する模型である。QCD の真空は無数個の基底状態が量子力学的に重ねあわされたような非自明な真空構造をしていると信じられている。QCD のもつ非自明な真空構造からあらわれる現象を、クォークの束縛状態であるハドロン、特に中間子を扱う模型をもちいて探る。

1 序論

素粒子理論物理学の目的は物質やそれらに働く力（相互作用）が従う基本的な自然法則を追求することである。より基本的な自然法則は、より軽微な世界に顕れると信じられ、そのため素粒子とよばれる最小単位の粒子に注目する。

現在、素粒子はレプトンとクォークとよばれる物質を構成する粒子とゲージ粒子とよばれる相互作用を媒介する粒子があると知られている。量子色力学 (Quantum chromodynamics: QCD) はクォークとゲージ粒子のグルーオンの強い相互作用を記述する模型である。

QCD の真空はインスタントン配位とよばれる非自明な真空であることが信じられている [1]。この非自明な真空は無数個の基底状態が量子力学的に重ね合わされた構造をもち、そのため、いくつもある基底状態間を遷移するトンネル効果が起こりえると考えられる。このトンネル効果はインスタントンによって記述されるため、QCD インスタントンとよばれる。先述のように、QCD の真空が非自明な真空構造をもつことは信じられているが、実際に実験的に検証されて確立されたものではなく、いまだ議論が決着していない。本講演ではクォークの束縛状態を記述するハドロン、その中でも特に中間子を記述する模型を用いて議論する。

もしも QCD の真空が非自明であれば QCD のもつ対称性を破る効果があらわれるという「強い CP 問題」が起こる。一方でクォークの質量に影響を与える効果もあらわれる [2] が、これが十分大きいと先の問題を回避できる可能性がある。この効果はクォークの束縛状態であるハドロンの質量にも影響を与え、これを調べるためにクォークの束縛状態

であるハドロンを記述する模型を用いる。ハドロンの中でも軽い中間子に関する実験データからこの影響の大きさを見積もる先行研究 [3] がある。これによってクォークの質量に影響を与える効果が問題を避けられるほど大きな効果でないことが示唆された。様々な観点から相補的に解析をするために、今回新たに軽いクォークと重いクォークによって構成される重い中間子を記述する模型と重い中間子の実験データを用いて初めて解析を行い、先行研究と矛盾のない結果が得られた。

重い中間子に関するデータの精密測定の一つは将来予定されている実験によって行われるが、その結果によってより強い主張をする結果が得られると期待される。

2 本論

QCD のもつ近似的な対称性を基に構築される低エネルギー有効理論のうち、軽い中間子を取り扱う軽中間子有効理論と、重い中間子を取り扱う重中間子有効理論とよばれる 2 つの模型を用いる。

よく知られている強い CP 問題を回避する状況として 2 つあり、1 つは Peccei-Quinn 機構 [4] とよばれる機構を自然が採用している状況である。これによって新たな粒子が予言されるが、その粒子の発見はまだされていない。もう 1 つは、今回注目する状況で、クォークの質量への影響が知られているクォークの質量の大きさを説明できるほど十分大きい状況である。この状況を達成できるかどうかを 2 つの有効理論を用いてクォークの質量の影響の大きさを見積もることができ、それによって非自明な真空が引き起こす「強い CP 問題」を回避できるかどうかを議論する。

3 結論

本研究では重中間子有効理論を用いた QCD の真空が非自明な構造であることから生じるクォークの質量への影響の見積もりを初めて行い、その影響が「強い CP 問題」を回避できるほど、大きくないことがわかった [5]。QCD の非自明な真空構造の存在はよく信じられているが、それは必ずしも必要とされているわけではなく、その必然性の有無の議論と検証はいまだに重要な課題である。

参考文献

- [1] A. A. Belavin, A. M. Polyakov, A. S. Schwartz and Y. S. Tyupkin, Phys. Lett. **59B** (1975) 85.
- [2] H. Georgi and I. N. McArthur, HUTP-81/A011.

- [3] H. Leutwyler, Nucl. Phys. B **337** (1990) 108.
- [4] R. D. Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38** (1977) 1440.
- [5] N. Kitazawa and Y. Sakai, Int. J. Mod. Phys. A **33** (2018) no.02, 1850017

酒井裕企

1990 年生まれ。2018 年 3 月首都大学東京大学院博士後期課程修了。専門は素粒子理論物理学。同年 4 月、都内某社にてデータサイエンティスト見習い。