

§ 0 導入

観測されているハドロン [PDG]

$$\begin{cases} \text{バリオン } (p, n, \Lambda, \dots) \sim 150 \text{ 種} \\ \text{メソン } (\pi, K, \eta, \dots) \sim 210 \text{ 種} \end{cases}$$

全ての状態が QCD ラグランジアンから出てくる。

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} + \bar{q} (\gamma^\mu \partial_\mu - m_q) q$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 グルオン クォーク

カラー-SU(3)ゲージ理論

観測されている状態の性質

- ・ ハドロンはカラー-1重項

QCD にカラーを持った状態を禁止する明確な条件はない。
 → カラー閉じこめの問題

- ・ ハドロンはフレーバー量子数は qqq または $\bar{q}q$ で記述できる。

QCD に $q\bar{q}q\bar{q}$ などの状態を禁止する明確な条件はない。
 → エキゾチックハドロンの問題

注) 実験事実でありクォーク模型は関係ない。

注) J^{PC} エキゾチックなメソンは観測されている。

問 0 メソン(バリオン数0の状態)は

全角運動量 $J = 0, 1, 2, \dots$, パリティ $P = \pm$ 荷電共役 $C = \pm$

のよい状態なので、量子数 J^{PC} で特徴づけられる。

このうち、 $\bar{q}q$ で作れない量子数を J^{PC} エキゾチックと呼ぶ。

例として、 $J=0$ の状態では

$$J^{PC} = 0^{--}, 0^{+-}$$

が J^{PC} エキゾチックである。この理由を説明し

$J=2$ までのエキゾチック量子数を書き出せ。

エキゾチックハドロン(ヘビーフォーク系, c, bを含む)

- ペンタフォーク $P_c(4450)$, $P_c(4380)$

[LHCb 2015]

$$P_c \rightarrow \mathcal{J}/\psi(c\bar{c}) + p(\text{und})$$

- テトラフォーク $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$

[Belle 2012]

$$Z_b^\pm \rightarrow \gamma(\bar{b}b) + \pi^\pm(\bar{u}u/\bar{u}d)$$

- 360 種のうち数種(~ 8)のみ。
- 内部構造(マルチフォーク, ハドロン分子, ...)は確定していない。
- フレーバー量子数は $P_c \sim \text{und}$, $Z_b^\pm \sim \bar{u}u$ で記述できるがヘビーフォーク対なしで質量を説明するのは困難。

エキゾチックハドロン(軽い $\bar{q}q$ 系, u, d, s)

- $\Lambda(1405)$: $S=-1$, $I=0$, $J^P=1/2^-$

$\bar{q}q$ モデルによる記述の困難

負パリティ $\rightarrow$ 角運動量 $l=1$ の uds $\rightarrow$ 軽い質量を再現しない

$\Rightarrow$ $\bar{K}N$ 分子状態? ペンタ $\bar{q}q$?

- スカラーメソン $\sigma, \kappa, f_0(980), a_0(980)$: $J^{PC}=0^{++}$

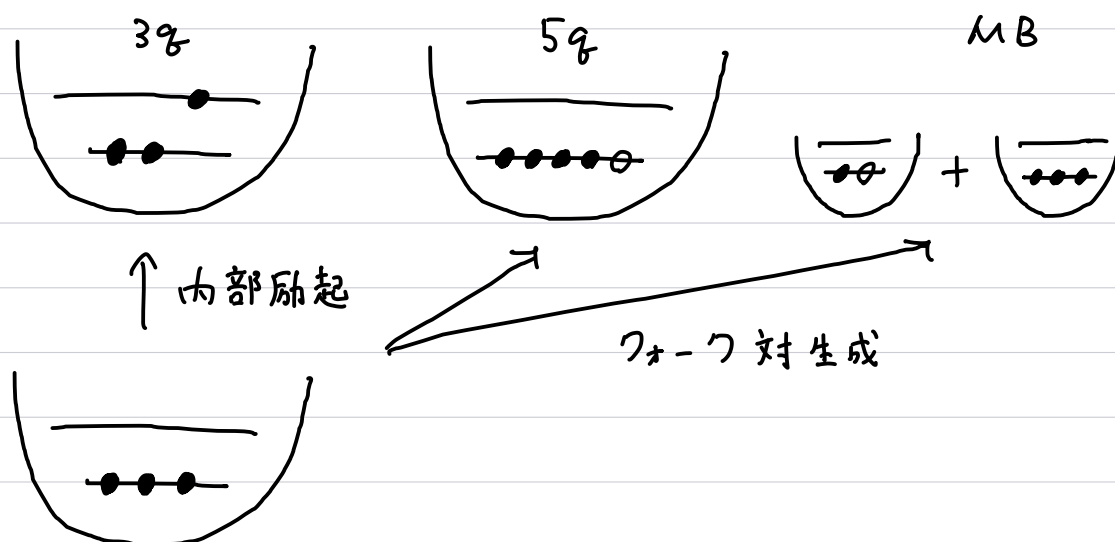
$\bar{q}q$ モデルによる記述の困難

$\bar{q}q$ 状態の質量: $\bar{n}n (I=0, I=1) < \bar{n}s, \bar{s}n < \bar{s}s (I=0)$

実験値: $\sigma (I=0) < \kappa < f_0, a_0 (I=0, I=1)$

$\Rightarrow$ メソン・メソン分子状態? テトラ $\bar{q}q$?

ハドロンの励起



同じ量子数を持つ状態は混合する。形式的に

$$|\Lambda(1405)\rangle = C_{3q} |uds\rangle + C_{5q} |uds\bar{q}q\rangle + C_{MB} |MB\rangle + \dots$$

どのようにして C_i を決定? そもそも well-defined な分解?

強い相互作用による崩壊

$$P_c \rightarrow J/\psi p, \quad Z_b^\pm \rightarrow \gamma \pi^\pm,$$

$$\Lambda(1405) \rightarrow \pi \Sigma, \quad \sigma \rightarrow \pi \pi, \quad K \rightarrow \pi K, \quad \dots$$

興味のあるハドロンは強い相互作用に対し不安定。

(そもそも安定なハドロンは $\sim 20/360$)

最新のPDGでは Pole position が Mass, Width より重視されている。

目標

① イキゾチックハドロンの構造から

QCDの非摂動動力学を明らかにしたい。 ← セミナーで

② 崩壊の効果を考慮するために、

ハドロンを散乱中の共鳴状態として記述する。 ← 講義では主にこちら

用いる手法

・ 散乱理論

(散乱振幅の持つ一般的な性質
観測量との関係
共鳴状態の記述

・ 有効場の理論

(低エネルギーで有効な自由度による記述
基礎理論の対称性を尊重
システムティックに精密化

講義の計画

§ 1 : 量子力学のポテンシャル問題での共鳴

→ 複素エネルギー固有状態

§ 2 : 散乱理論での共鳴

→ 散乱振幅の極

§ 3 : 非相対論的有効場の理論

→ 場の理論での散乱振幅

4 コマ

セミナー : ハドロン共鳴の構造と複合性

§ 4 : カイラル摂動論

→ 低エネルギー相互作用

§ 5 : カイラル動力学とハドロン散乱

→ $\bar{K}N$ 散乱と $\Lambda(1405)$

2 コマ