

# マルチハドロン系との結合を 考慮したエキゾチック状態

昭和薬科大学 瀧澤 誠

特定領域研究「ストレンジネスを含むクォーク  
多体系分野の理論的将来を考える」研究会

2009年2月28日 KKRホテル熱海（熱海市）

# 目次

- X(3872)について
- C C-bar coreと $D^0 D^{*0\text{-bar}}$ の結合について
- $D^0 D^{*0\text{-bar}}$ 分子描像について
- X(3872)のまとめとX(3872)から学んだこと
- $Z^+(4430)$ についての紹介
- エキゾチックハドロンに関する考察

# X(3872)について

- 2003年にBelleによって初めて発見される。  
 $B^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- J/\psi$  崩壊中の $\pi^+ \pi^- J/\psi$ のinvariant mass distributionにおける鋭いピークとして。
- 質量  $(3871.4 \pm 0.6)$  MeV
- 幅 2.3 MeV 未満
- 量子数  $J^{PC} = 1^{++}$
- 他の崩壊モード  
 $X(3872) \rightarrow \gamma J/\psi$ 、  $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 J/\psi$

## X(3872)をcc-barと考えたときの問題点

- Quark modelで計算したcc-barの $^3P_1$ 状態の基底状態のエネルギーは3950 MeVで80 MeVほど大きすぎる。
- $\pi^+ \pi^- J/\psi$  は $\rho^0 J/\psi$ 、 $\pi^+ \pi^- \pi^0 J/\psi$  は  $\omega J/\psi$  と考えられる。  $X(3872) \rightarrow \rho^0 J/\psi$  は大きなIsospinの破れを意味する。  
X(3872)はIsospinの混合状態？

# $D^0 \bar{D}^{*0}$ -bar Molecule

- $m_D + m_{D^*} = (3871.81 \pm 0.36) \text{ MeV}$   
X(3872)は $D^0 \bar{D}^{*0}$ -barの非常に浅い束縛状態  
束縛エネルギー  $E = 0.41 \text{ MeV}$

## $D^0 \bar{D}^{*0}$ -bar Molecule

- B-decayでmolecule状態が作られる割合は十分大きいのか？
- Cuspの可能性は？
- $m_\rho + m_{J/\psi} = 775 + 3097 = 3872 \text{ MeV}$
- $m_\omega + m_{J/\psi} = 783 + 3097 = 3880 \text{ MeV}$

# Tetra quark

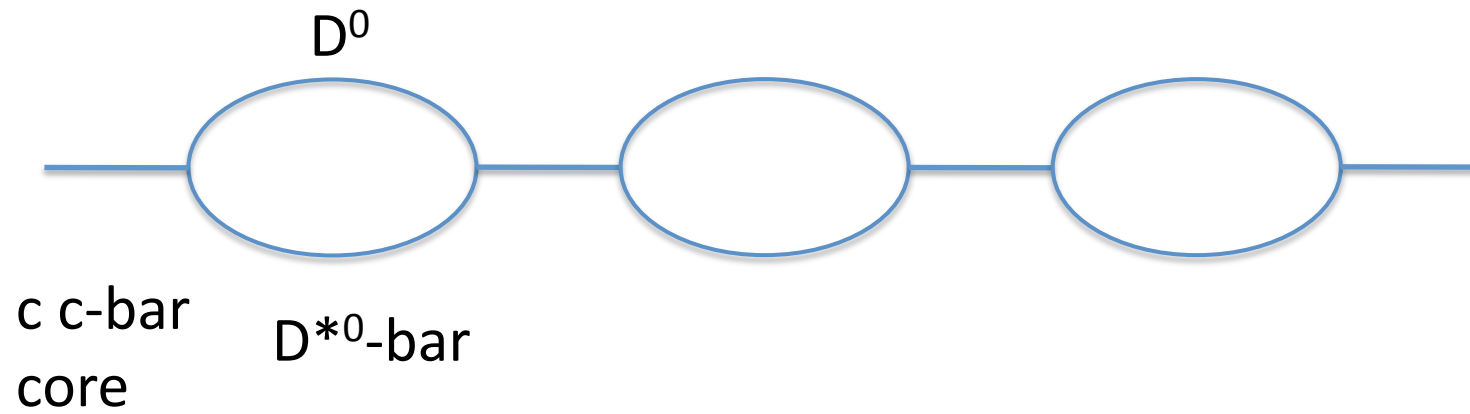
- Color triplet scalar Diquark vector antidiquark structure
- Compact object → 生成されやすい。崩壊率等も矛盾なく説明出来そう。

**問題点** u、dを入れ替えた電荷をもった状態等、多重項を形成するはず。しかし、見つからない。

# 我々のアプローチ

- C C-bar core状態に対して $D^0 D^{*0}$ -barの中間状態が結合した場合の効果をみる。(ハドロンループ効果)
- $D^0 D^{*0}$ -barの分子描像の状態を作ってみて、比較する。
- Green functionを解析的に求めることが出来る簡単な結合を考え、定性的な振る舞いを調べることにする。

# C C-bar coreと $D^0$ $D^{*0}$ -barの結合





# C C-bar coreとD<sup>0</sup> D<sup>\*0</sup>-barの結合

- cc-bar core 状態を  $|X\rangle$  で表す。

$$S(E) = \frac{-1}{\pi} \text{Im} \langle X | G(E) | X \rangle$$

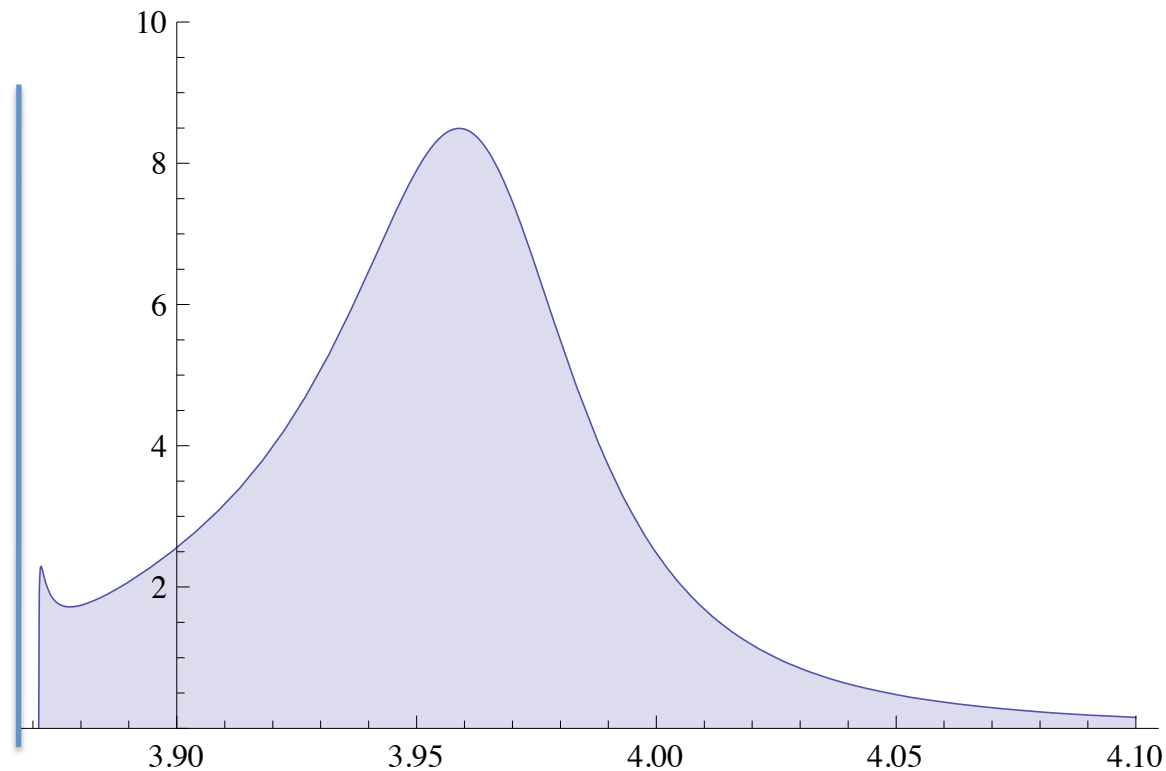
$$G(E) = \frac{1}{E - \hat{H} - i\varepsilon}$$

$$G(E) = G_X^0(E) + G_X^0(E) V_{XDD^*} G_{DD^*}^0(E) V_{XDD^*} G_X^0(E) + \dots$$

$$\langle \overline{D^0 D^{*0}}(\vec{q}) | V_{XDD^*} | X \rangle = \frac{g}{\vec{q}^2 + \Lambda^2}$$

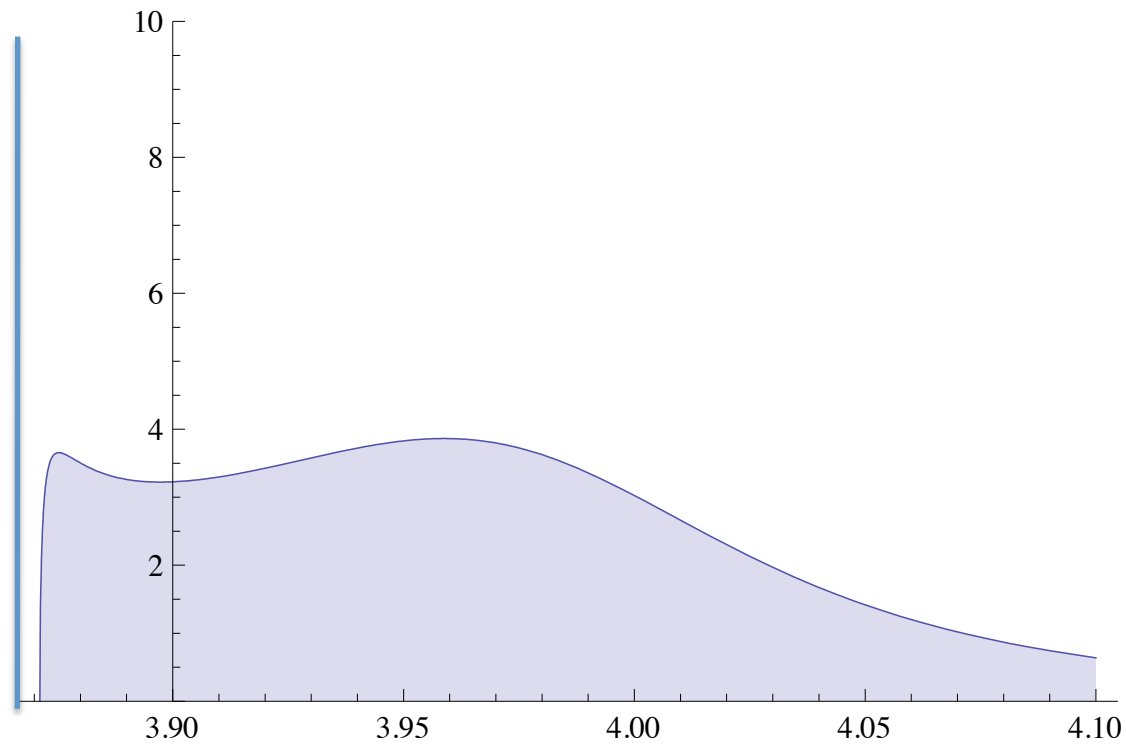
# C C-bar coreとD<sup>0</sup> D<sup>\*0</sup>-barの結合

- $\Lambda = 200\text{MeV}$ 、  $g = 0.01$ 、 cc-bar core mass = 3950 MeV  
束縛状態: 3862 MeV

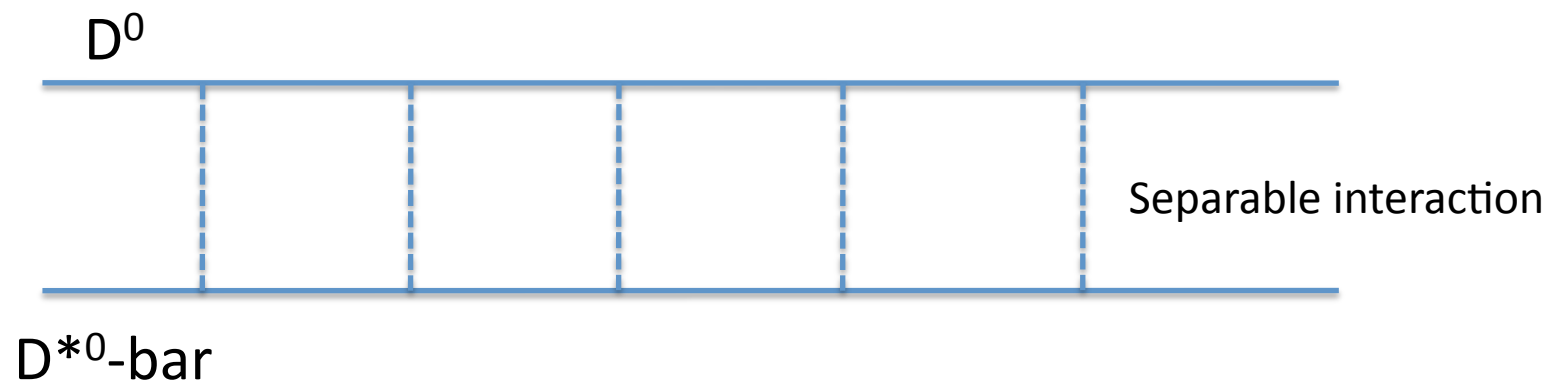


# C C-bar coreとD<sup>0</sup> D<sup>\*0</sup>-barの結合

- $\Lambda = 500\text{MeV}$ 、  $g = 0.03$ 、 cc-bar core mass = 3950 MeV  
束縛状態: 3863 MeV



# $D^0$ $\bar{D}^{*0}$ 分子描像について



# $D^0 \bar{D}^{*0}$ -bar分子描像について

$$\left| D^0 \bar{D}^{*0} \right\rangle = \frac{\sqrt{\Lambda}}{\pi} \int d^3 \vec{q} \frac{1}{\vec{q}^2 + \Lambda^2} \left| D^0 \bar{D}^{*0}(\vec{q}) \right\rangle$$

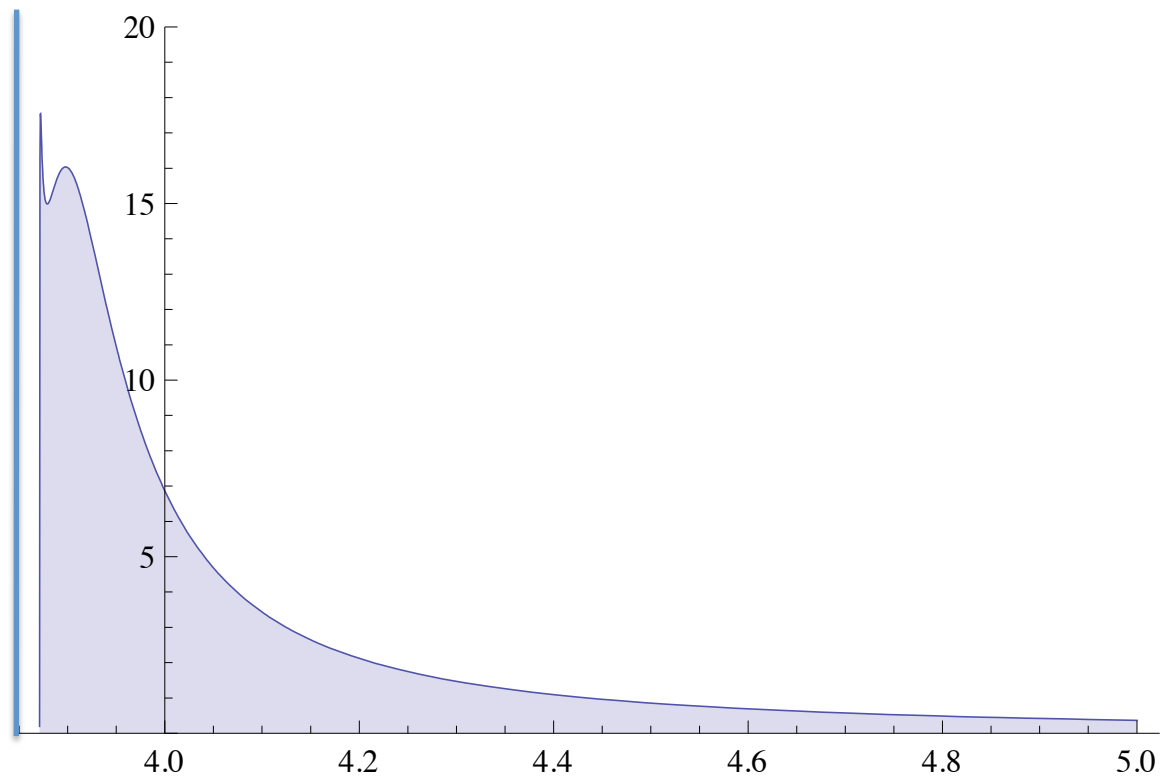
$$S(E) = \frac{-1}{\pi} \left\langle D^0 \bar{D}^{*0} \left| G(E) \right| D^0 \bar{D}^{*0} \right\rangle$$

$$G(E) = G_{DD^*}^0(E) + G_{DD^*}^0(E) V G_{DD^*}^0(E) + \dots$$

$$\left\langle D^0 \bar{D}^{*0}(\vec{q}') \left| V \right| D^0 \bar{D}^{*0}(\vec{q}) \right\rangle = g \left( \frac{1}{\vec{q}'^2 + \Lambda^2} \right) \left( \frac{1}{\vec{q}^2 + \Lambda^2} \right)$$

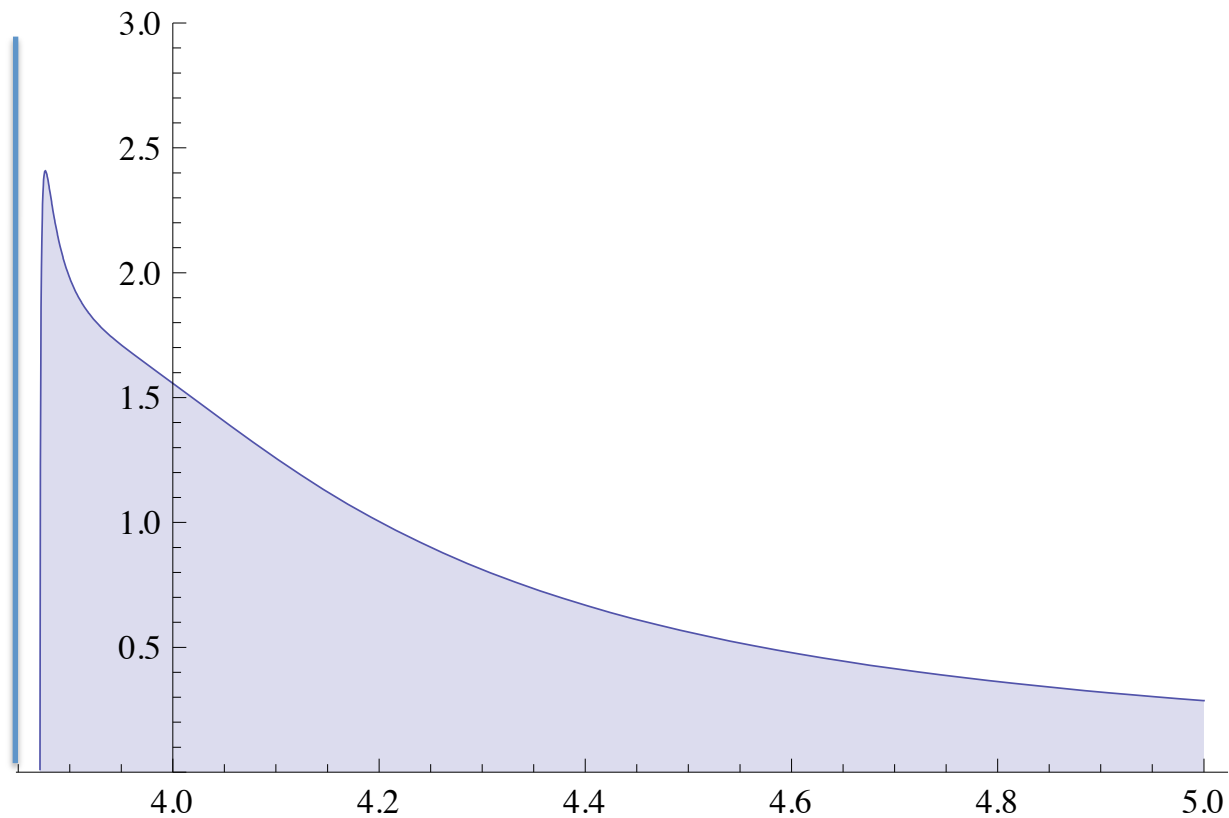
# $D^0 \bar{D}^{*0}$ 分子描像について

- $\Lambda = 200\text{MeV}$ 、  $g = -0.001$ 、  
束縛状態:  $3865\text{ MeV}$



# $D^0 \bar{D}^{*0}$ 分子描像について

- $\Lambda = 500\text{MeV}$ 、  $g = -0.01$ 、  
束縛状態:  $3864\text{ MeV}$



# 分子状態の束縛状態について

$$\frac{A^2}{2m_\mu} = E$$

$$\psi(\vec{r}) = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{N}{\Lambda^2 - A^2} \frac{e^{-Ar} - e^{-\Lambda r}}{r}$$

$$\langle r^2 \rangle = \frac{A\Lambda(A + \Lambda)}{(\Lambda - A)^2} \left\{ \frac{1}{2A^3} + \frac{1}{2\Lambda^3} - \frac{8}{(A + \Lambda)^3} \right\}$$



# 分子状態の束縛状態について

- $E = 0.41 \text{ MeV}$ 、 $\Lambda = 500 \text{ MeV}$  を代入すると

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle} = 5.39 \text{ fm}$$

- $E = 1.0 \text{ MeV}$ 、 $\Lambda = 500 \text{ MeV}$  を代入すると

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle} = 3.62 \text{ fm}$$

# C C-bar coreとD<sup>0</sup> D<sup>\*0</sup>-barの結合状態の束縛状態について

- 波動関数の広がりや束縛エネルギーと相互作用のレンジで来まる。
- CC-bar core状態は重いので、この状態の交換による相互作用のレンジは非常に短い。そのため、C C-bar coreとD<sup>0</sup> D<sup>\*0</sup>-barの結合のフォームファクターのサイズで、相互作用のレンジは来まる。
- レンジは分子描像とあまり変わらないと考えられる。
- 束縛状態の波動関数はどちらの描像でもあまり変わらないのではないか。 → 検証が必要

# X(3872)に関するまとめ

- 3950 MeVという大きな質量をもったcc-barのcore状態があったとしても、 $D^0\bar{D}^{*0}$ 状態との結合により、3872 MeVの束縛状態を容易に作る事が可能。
- 3950 MeVの状態は $DD^*$ との結合により押し上げられ、3950 MeVより高いところでレゾナンスとなる。実験ではこの状態は見えていないので、結合が強く、幅が大きくなければならない。今回の簡単な模型の計算でも、そのような状況は可能。

# X(3872)に関するまとめ

- 3950 MeVの状態が見えなくなるような強い  $DD^*$ との結合があっても、束縛状態が深くなり過ぎない状況がリーズナブルなパラメータで可能である。
- QCDがそのような状況になっているかはクォーク模型等による検証が必要。

# X(3872)に関するまとめ

- $D^0 \bar{D}^{*0}$ 分子描像については、 $D \bar{D}^*$ 間に弱い引力をいれて束縛状態を作ると、スペクトルに閾値から増加する構造ができて、実験と一致していないように見える。
- 今回の計算では $D \bar{D}^*$ 状態の重心系での運動量分布にラフな仮定をおいているので、更なる検討が必要。

## X(3872)に関するまとめ

- いずれの描像にしても、X(3872)はDD\*の束縛状態の成分が多く含まれていると考えられるので、**エキゾチックな状態**であると考えられる。

# エキゾチックハドロンに関する考察

- X(3872)の例からわかるように、エキゾチックハドロンの状況を理解するためには束縛状態を調べるだけでなく、マルチハドロン状態との結合を入れた上で、スペクトル等幅広く調べることが重要。
- X(3872)やZ<sup>+</sup>(4430)のように、2つのD Mesonのthresholdぎりぎりに状態が存在する。Bのdecayスペクトルに大きなストレンジスがあるので、明らかな、エキゾチックな状態であると考えられる。

# エキゾチックハドロンに関する考察

- どうして、チャーム系にこのようなエキゾチックな状態が現れるか、何らかの理由があるように思われる。
- チャームクォークの質量がQCDのスケールと比べて、適度に大きく、結合の強さも、手頃だからか？
- 対応するストレンジおよびボトムセクターについては一度確認しておく必要があるのではないか。



# エキゾチックハドロンに関する考察

- どのようなチャンネルにエキゾチックハドロンが存在するか？ チャームクォークの質量という要素以外に、何か理由が存在するか？

1/Nc展開による解析？

トポロジカルソリトンの状態？

NGボゾンと直接結合しない状態？