

# 新たなハドロン物質 エキゾチックハドロンの理論的解析

名古屋大学D1 清水勇希  
クォーク・ハドロン理論研究室(H研)

共同研究者: 原田正康

# 三者若手夏の学校

原子核・素粒子・高エネルギー



2016年度夏の学校@黒姫高原(長野県)

梶田隆章氏  
(2015年ノーベル物理学賞受賞)

## 参加者減少により高エネルギーパートが休止中...

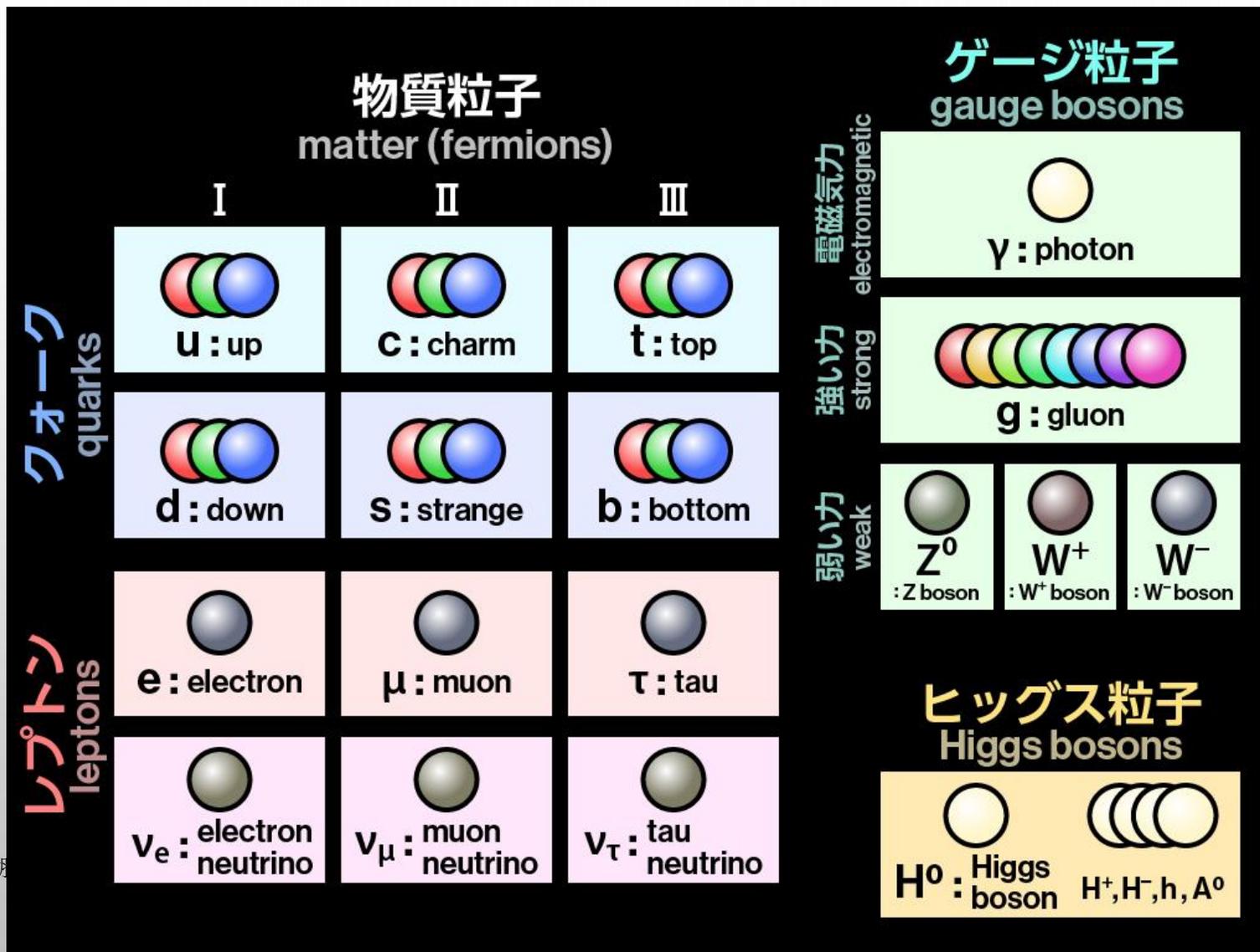


# 1. イントロダクション

2. ペンタクォーク $P_c^+$ (4380)と $P_c^+$ (4450)の発見

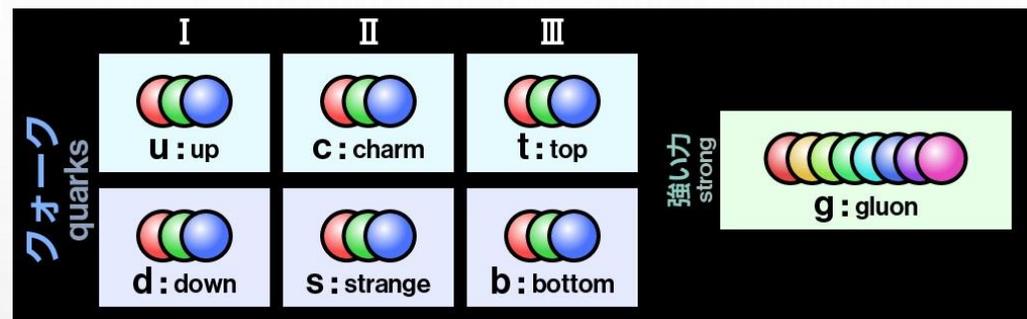
3.  $P_c^+$ (4380)の解析とその結果

# 標準模型



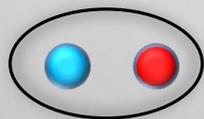
# ハドロンとは？

**ハドロン**: 複数のクォーク(とグルーオン)からなる複合粒子



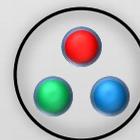
## 典型的な分類

メソン: クォークと反クォーク



例:  
 $\pi$  中間子  
 $\rho$  中間子

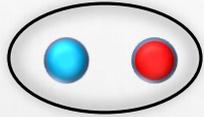
バリオン: クォーク3個



例:  
陽子  
中性子

# 新たなハドロンの分類

メソン



バリオン

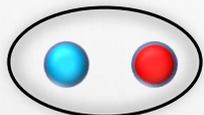


このクォークモデル的な分類は非常によく成功している

**しかし、本当にこれだけで良いか？**

# 新たなハドロンの分類

メソン



バリオン

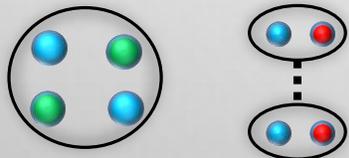


このクォークモデル的な分類は非常によく成功している

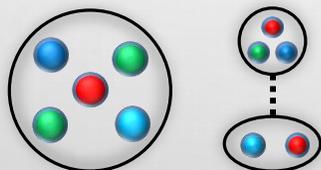
しかし、本当にこれだけで良いか？

## エキゾチックハドロン

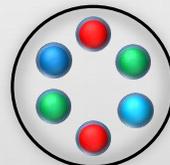
テトラクォーク



ペンタクォーク

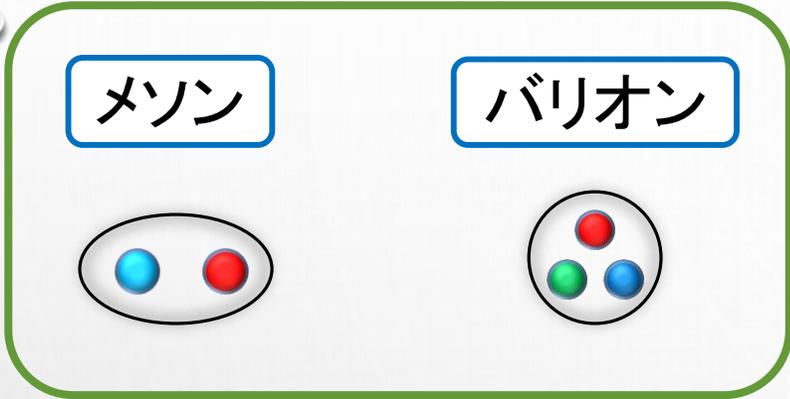


ダイバリオン



グルーボール  
 $q\bar{q}g$ ハイブリッド

# 新たなハドロンの分類



Phys. Lett. 8, 214 (1964)

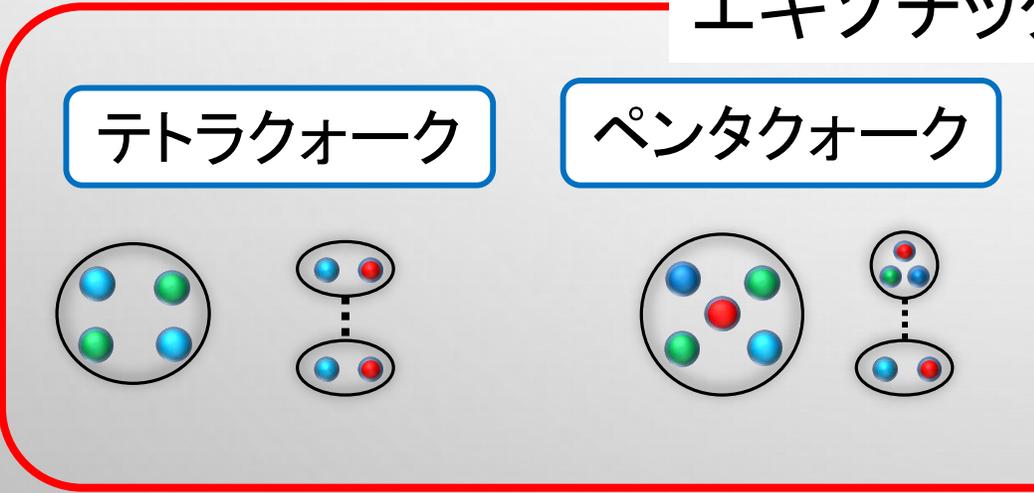
A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS \*

M. GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

エキゾチック



A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon  $b$  if we assign to the triplet  $t$  the following properties: spin  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{3}$ , and baryon number  $\frac{1}{3}$ . We then refer to the members  $u^{\frac{2}{3}}$ ,  $d^{-\frac{1}{3}}$ , and  $s^{-\frac{1}{3}}$  of the triplet as "quarks"  $q$  and the members of the anti-triplet as anti-quarks  $\bar{q}$ . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(qq\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assuming that the lowest baryon configuration  $(qqq)$  gives just the representations 1, 8, and 10 that have been observed, while the lowest meson configuration  $(q\bar{q})$  similarly gives just 1 and 8.

# エキゾチックハドロン

## テトラクォーク

$X(3872)$ , Belle 2003  
 $Y(3940)$ , Belle 2004  
 $Y(4260)$ , BaBar 2005  
 $Z_c(4430)$ , Belle 2007  
 $Z_b(4051)$ , Belle 2008  
 $Y(3940)$ , CDF 2009  
 $Z_b(10610)$ , Belle 2011  
 $Z_c(4200)$ , Belle 2014  
 $X(5568)$ , D0 2016  
等...

## ペンタクォーク

$\Theta^+$ , LEPS 2003  
 $P_c^+(4380)$ , LHCb 2015  
 $P_c^+(4450)$ , LHCb 2015

2000年代以降、様々な  
エキゾチックハドロンが発見

1. イントロダクション

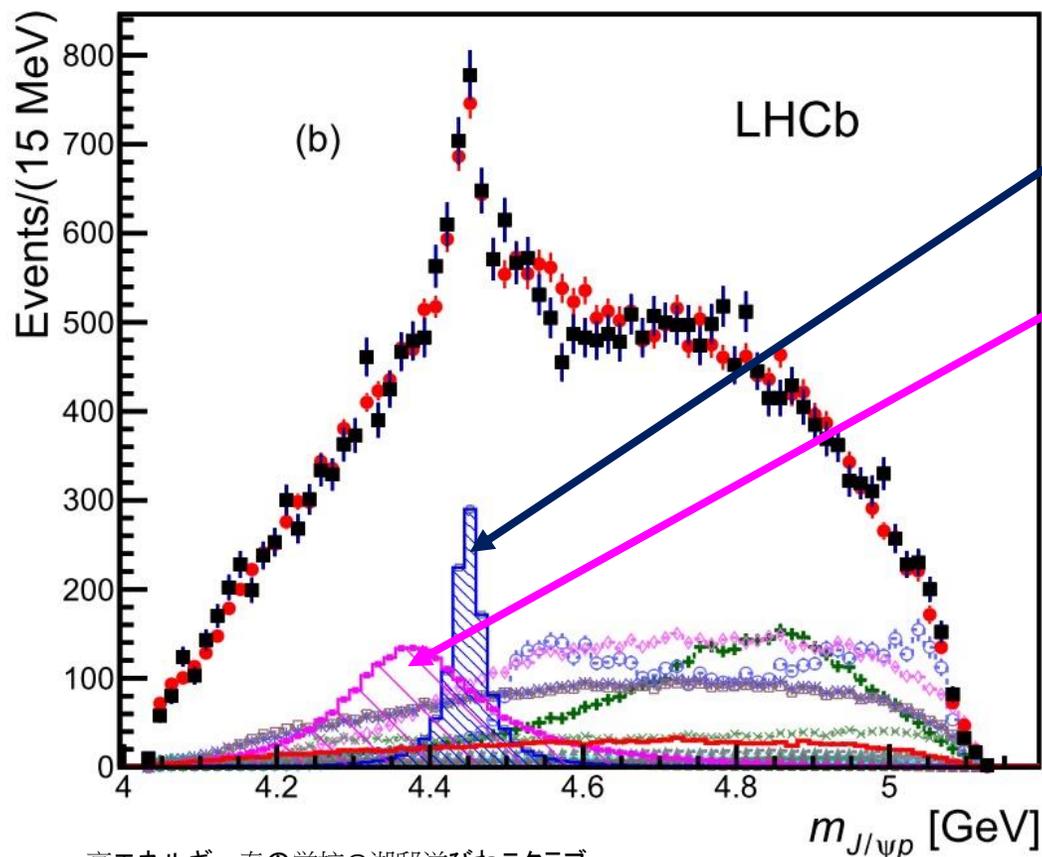
2. **ペンタクォーク $P_c^+$ (4380)と $P_c^+$ (4450)の発見**

3.  $P_c^+$ (4380)の解析とその結果

## 2.ペンタクォーク $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$ の発見

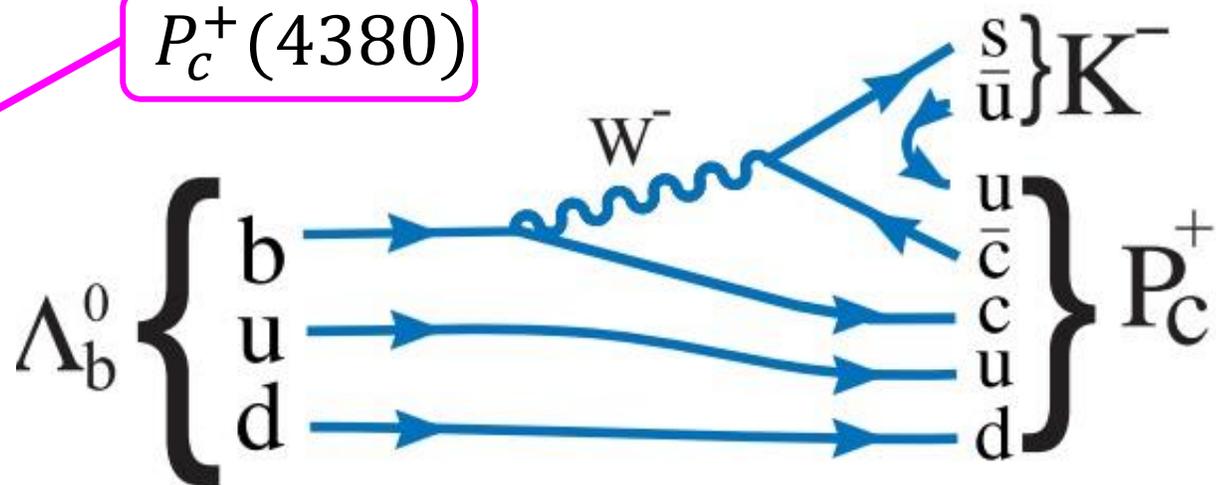
# ペンタクォーク $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$

2015年にLHCb実験(CERN)で $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ の崩壊から  
チャームクォークを含む2つのペンタクォーク $P_c^+$ が発見された



$P_c^+(4450)$

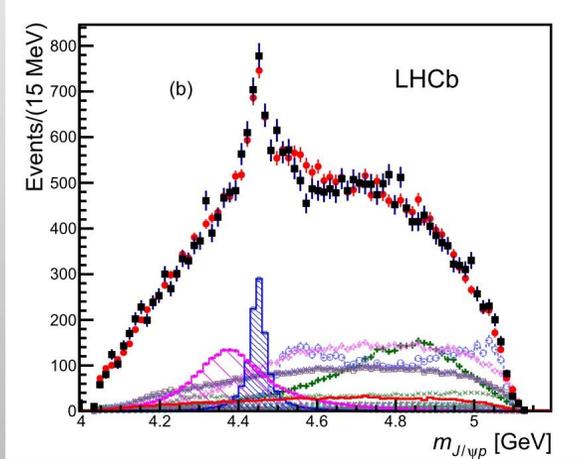
$P_c^+(4380)$



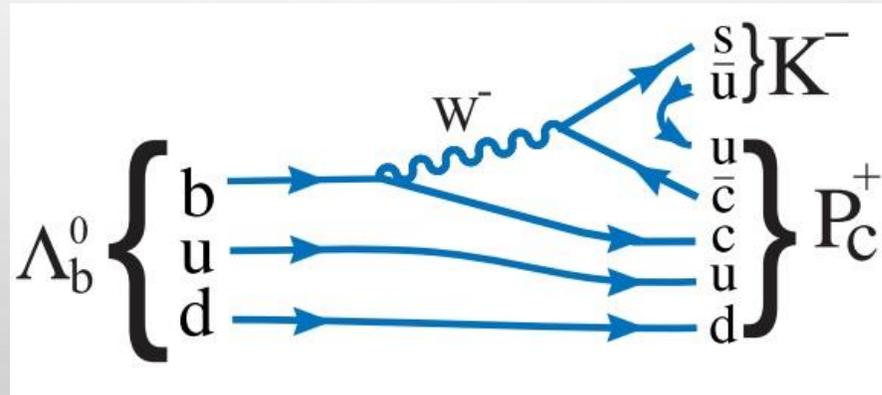
2.ペンタクォーク $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$ の発見

# ペンタクォーク $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$

	質量[MeV]	崩壊幅[MeV]	アイソスピン	スピン・パリティ
$P_c^+(4380)$	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3^-}{2}$ or $\frac{3^+}{2}$ or $\frac{5^+}{2}$
$P_c^+(4450)$	$4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$	$39 \pm 5 \pm 19$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5^+}{2}$ or $\frac{5^-}{2}$ or $\frac{3^-}{2}$

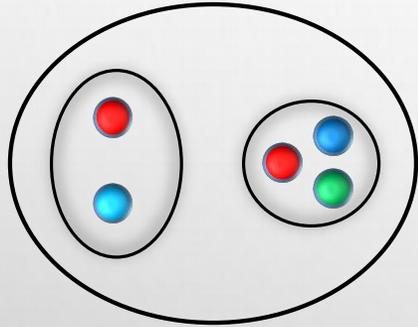


LHCb Collaboration (Roel Aaij (CERN) et al.) Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 072001

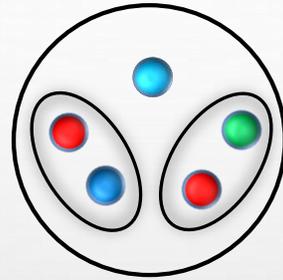


# 理論モデル

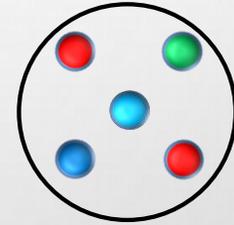
○ハドロン分子



○diquark-diquark-antiquark  
(diquark-triquark)



○ペンタクォーク



等...

本研究ではハドロン分子モデルを用いて $P_c^+$ (4380)について解析

1. イントロダクション

2. ペンタクォーク $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$ の発見

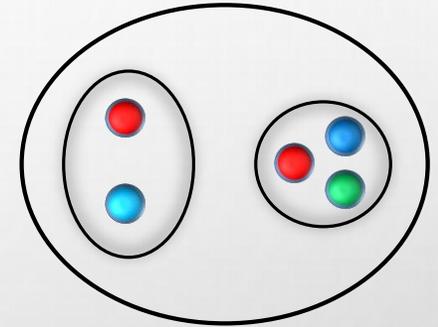
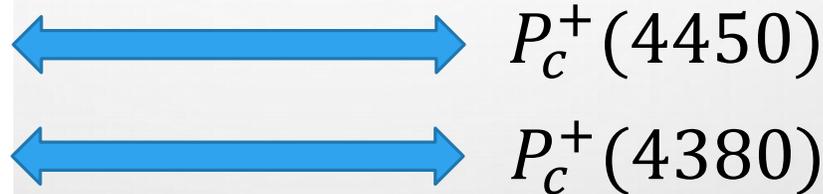
**3.  $P_c^+(4380)$ の解析とその結果**

# どのようなハドロン分子か

ペンタクォーク  $P_c^+$  の質量と近い threshold の  
チャームドバリオン・チャームドメソンのチャンネルがある

threshold (MeV)	
4526.7	$\Sigma_c^* \bar{D}^*$
4462.2	$\Sigma_c \bar{D}^*$
4385.3	$\Sigma_c^* \bar{D}$
4320.7	$\Sigma_c \bar{D}$
4295.1	$\Lambda_c \bar{D}^*$
4153.6	$\Lambda_c \bar{D}$

緩く束縛した  
ハドロン分子状態？



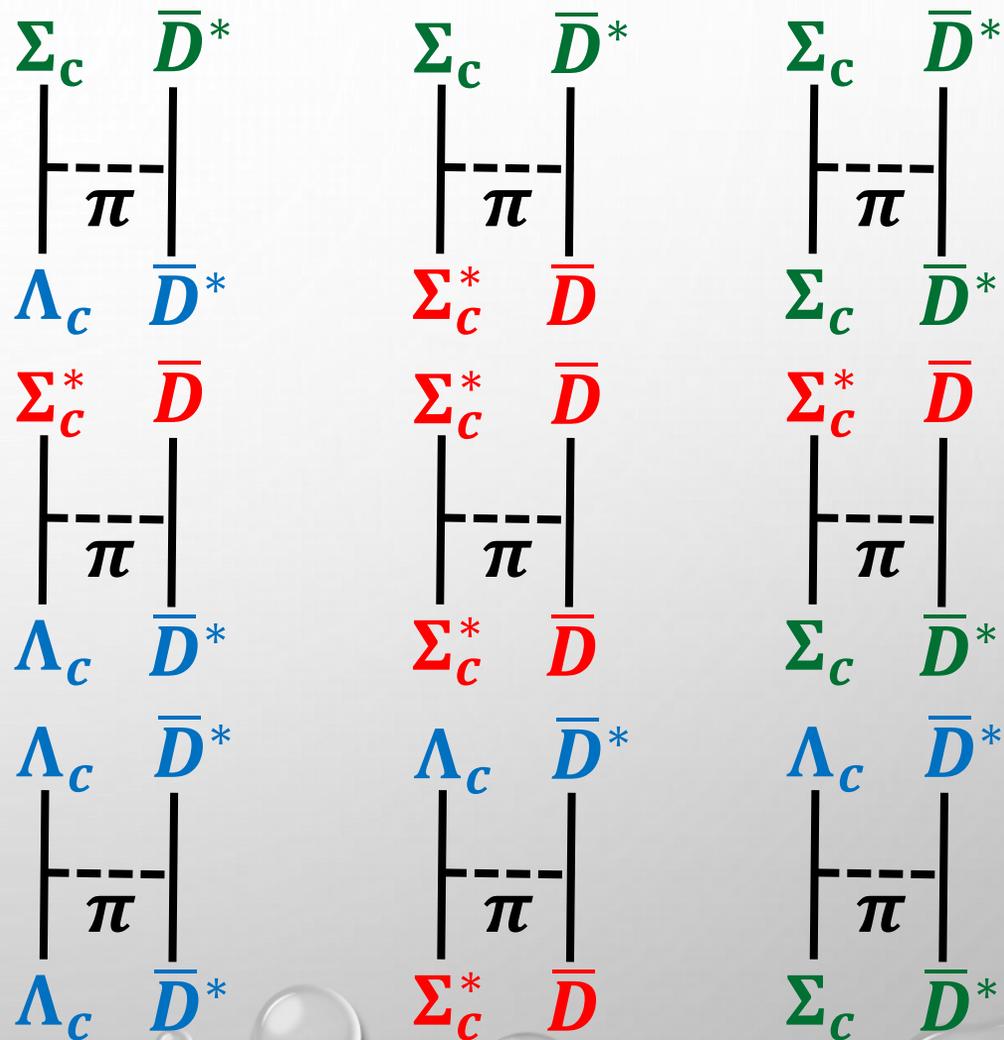
他のチャンネルも threshold は近いので  
混合状態の可能性が高い

# $\Lambda_c \bar{D}^*$ - $\Sigma_c^* \bar{D}$ - $\Sigma_c \bar{D}^*$ (S波) 結合チャネルの解析

threshold (MeV)	
4526.7	$\Sigma_c^* \bar{D}^*$
4462.2	$\Sigma_c \bar{D}^*$
4385.3	$\Sigma_c^* \bar{D}$
4320.7	$\Sigma_c \bar{D}$
4295.1	$\Lambda_c \bar{D}^*$
4153.6	$\Lambda_c \bar{D}$

$P_c^+$  (4380) に  
threshold が近く  
軌道角運動量 S 波で  
結合するチャネル  
の混合状態を解析

$\pi$  中間子交換ポテンシャルを用いる



# $\Lambda_c \bar{D}^*$ – $\Sigma_c^* \bar{D}$ – $\Sigma_c \bar{D}^*$ (S波) 結合チャネルの解析

連立シュレディンガー方程式

$$\left[ -\frac{1}{2m} \vec{\nabla}^2 + V(r) \right] \Psi(\vec{r}) = E \Psi(\vec{r})$$

$$\Psi(\vec{r}) = \begin{pmatrix} \psi_{\Lambda_c \bar{D}^*}(\vec{r}) \\ \psi_{\Sigma_c^* \bar{D}}(\vec{r}) \\ \psi_{\Sigma_c \bar{D}^*}(\vec{r}) \end{pmatrix}$$

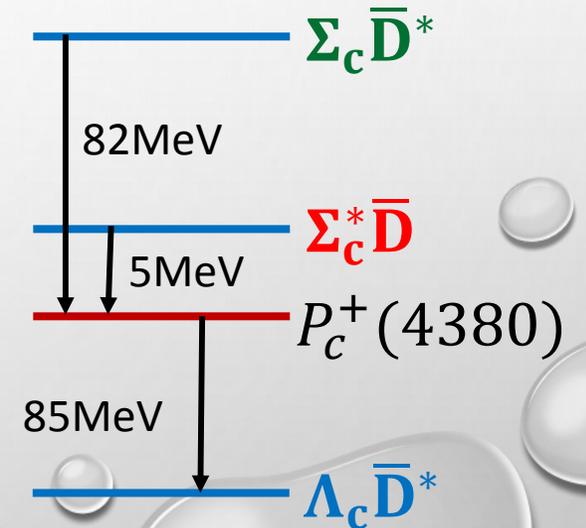
$$V(r) = \begin{pmatrix} V_{\Lambda_c \bar{D}^* - \Lambda_c \bar{D}^*}(r) & V_{\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c^* \bar{D}}(r) & V_{\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c \bar{D}^*}(r) \\ V_{\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c^* \bar{D}}(r) & V_{\Sigma_c^* \bar{D} - \Sigma_c^* \bar{D}}(r) & V_{\Sigma_c \bar{D}^* - \Sigma_c^* \bar{D}}(r) \\ V_{\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c \bar{D}^*}(r) & V_{\Sigma_c^* \bar{D} - \Sigma_c \bar{D}^*}(r) & V_{\Sigma_c \bar{D}^* - \Sigma_c \bar{D}^*}(r) \end{pmatrix}$$

$$V_{ij} = C_{ij} Y_1(m_\pi, \Lambda, r) + \dots$$

$$Y_1(m, \Lambda, r) = Y(mr) - \frac{\Lambda}{m} Y(\Lambda r) - \frac{\Lambda^2 - m^2}{2m\Lambda} e^{-\Lambda r}$$

$$Y(x) = \frac{e^{-x}}{x}$$

湯川型ポテンシャル



# $\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c^* \bar{D} - \Sigma_c \bar{D}^*$ (S波)結合チャンネルの解析

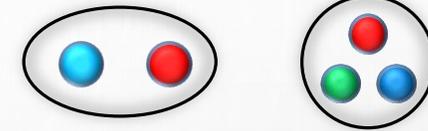
	質量[MeV]	崩壊幅[MeV]	チャンネル数	軌道角運動量	モデル
実験値	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$			
本研究の結果	<b>4369.7</b>	<b>73.0</b>	<b>3チャンネル</b>	<b>S波</b>	$\pi$ 中間子交換

S波チャンネルのみでも質量は説明できる、崩壊幅は実験値の30%程度  
 →S波による $\Lambda_c \bar{D}^*$ チャンネルへの崩壊が30%を占める可能性を示唆

D波の崩壊チャンネルが多数あるのでそれらを含めることで幅が広まるのでは？

# まとめ

○ハドロンは複数のクォークが束縛した複合粒子である



○通常のハドロンよりクォーク数が多い**エキゾチックハドロン**が見つまっている



○ペンタクォーク $P_c^+$  (4380)についてハドロン分子モデルを用いて解析した

- $\Lambda_c \bar{D}^* - \Sigma_c^* \bar{D} - \Sigma_c \bar{D}^*$  (S波) の結合チャンネルを解析して質量と崩壊幅を調べた  
S波 $\Lambda_c \bar{D}^*$ チャンネルへの崩壊だけで実験値の30%を占める可能性がある



以上で発表を終わります

# バックアップスライド

なぜ  $P_c^+(4380)$  と  $P_c^+(4450)$  をペンタクォークとみなすのか？

$P_c^+$  のクォーク組成は  $\underline{c\bar{c}uud}$

チャーム量子数が消えているので  
全体のフレーバーは陽子 ( $uud$ ) と同じ  
……陽子の励起状態ではないのか？

発見されている陽子の励起状態

スピン  $3/2$ : 2115 MeV

スピン  $5/2$ : 2570 MeV



発見されたペンタクォーク  $P_c^+$

$P_c^+(4380)$ : 4380 MeV

$P_c^+(4450)$ : 4449 MeV

ペンタクォーク  $P_c^+$  が陽子の励起状態だと  
考えるにはあまりに質量が大きい

観測された崩壊モードである  $J/\psi$  メソン ( $c\bar{c}$ ) + 陽子 ( $uud$ ) の  
クォーク組成と同じだと考えるほうが自然である

# $P_c^+$ ペンタクォークと結合可能なチャネル

Table 1 Channels of the  $\eta_c N$ ,  $J/\Psi N$ ,  $\Lambda_c \bar{D}^{(*)}$  and  $\Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$  molecular states for each isospin  $I$ , total angular momentum  $J$  and parity  $P$ . The total spin  $s$  and relative orbital angular momentum  $L$  are indicated as  $^{2s+1}L$ .

threshold (MeV)		$I(J^P)=1/2(3/2^-)$	$1/2(3/2^+)$	$1/2(5/2^-)$	$1/2(5/2^+)$
4035.8	$J/\Psi N$	$^4S, ^2D, ^4D$	$^2P, ^4P, ^4F$	$^2D, ^4D$	$^4P, ^2F, ^4F$
4153.6	$\Lambda_c \bar{D}$	$^2D$	$^2P$	$^2D$	$^2F$
4295.1	$\Lambda_c \bar{D}^*$	$^4S, ^2D, ^4D$	$^2P, ^4P, ^4F$	$^2D, ^4D, ^4G$	$^4P, ^2F, ^4F$
4320.7	$\Sigma_c \bar{D}$	$^2D$	$^2P$	$^2D$	$^2F$
4385.3	$\Sigma_c^* \bar{D}$	$^4S, ^2D$	$^4P, ^4F$	$^4D, ^4G$	$^4P, ^4F$
4462.2	$\Sigma_c \bar{D}^*$	$^4S, ^2D, ^4D$	$^2P, ^4P, ^4F$	$^2D, ^4D, ^4G$	$^4P, ^2F, ^4F$
4526.7	$\Sigma_c^* \bar{D}^*$	$^4S, ^2D, ^4D, ^6D, ^6G$	$^2P, ^4P, ^6P, ^4F, ^6F$	$^6S, ^2D, ^4D, ^6D, ^4G, ^6G$	$^4P, ^6P, ^2F, ^4F, ^6F, ^6H$

$J/\Psi - N$ チャネル

3チャネル

3チャネル

2チャネル

3チャネル

$\Lambda_c \left( \Sigma_c^{(*)} \right) - \bar{D}^{(*)}$ チャネル

15チャネル

15チャネル

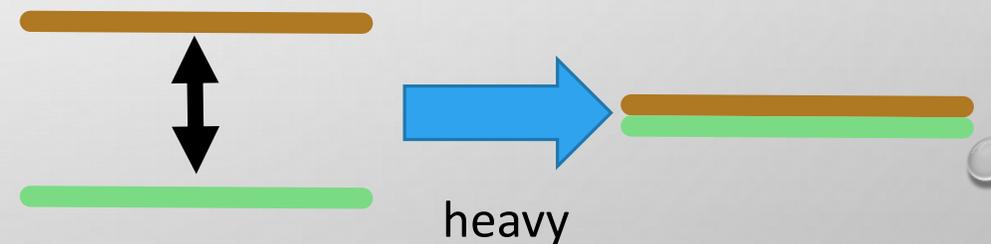
16チャネル

16チャネル

# Most of the exotic hadrons have charm or bottom quarks

- The kinetic energy is suppressed by the heavy quark mass. It is easy to make bound states.
- Degeneracy of the heavy quark doublets

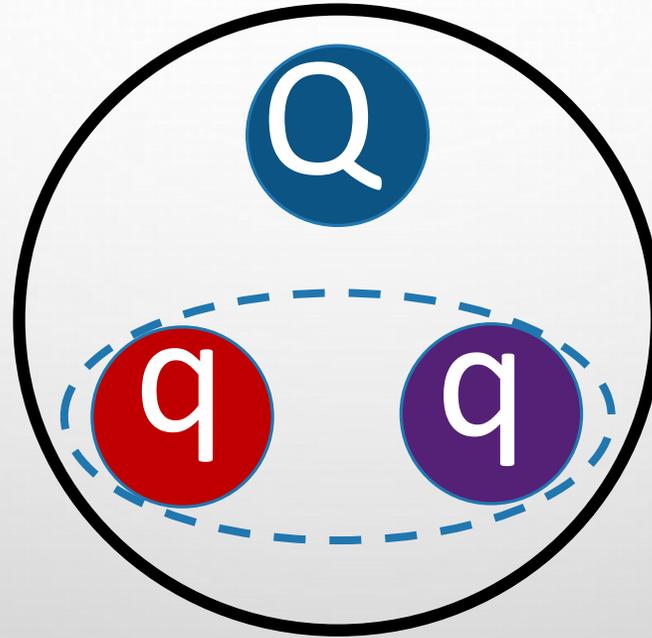
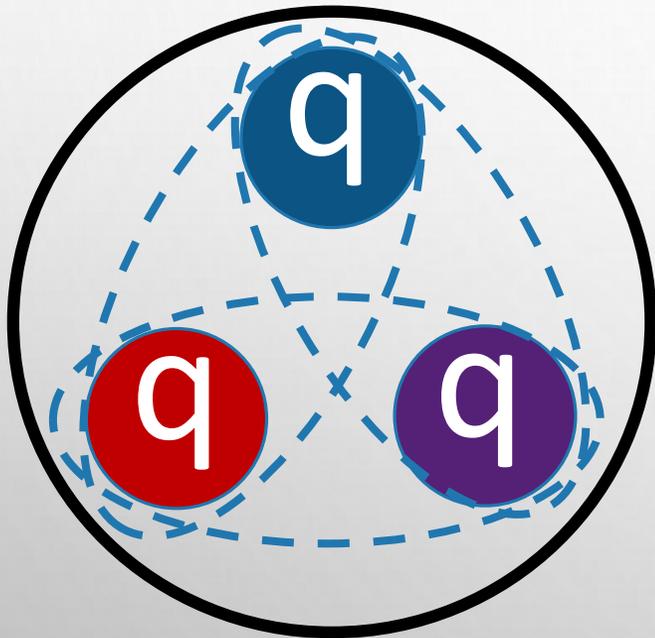
## Heavy Quark Symmetry



# Heavy Quark Symmetry (HQS)

ヘビークォークスピンに依存した相互作用は $1/m_Q$ で抑制される

(チャーム・ボトム)



$m_Q \rightarrow \infty$ の極限で  
ヘビークォークスピン  
が分離されるため、  
系はヘビークォークの  
スピンの向きに依存しない

**Heavy Quark Symmetry**

# Heavy Quark Symmetry (HQS)

ヘビークォークスピンの依存した相互作用は $1/m_Q$ で抑制される

(チャーム・ボトム)

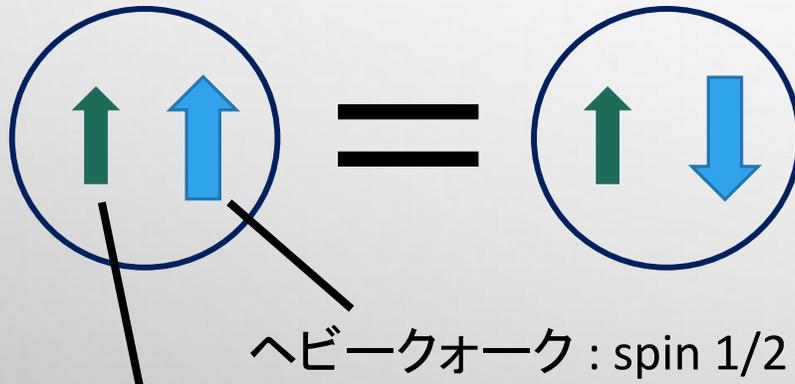
HQS **doublet** ( $j \neq 0$ )

HQS **singlet** ( $j = 0$ )

$$J = j + 1/2$$

$$J = j - 1/2$$

$$J = 1/2$$



ヘビークォーク : spin 1/2

Brown muck : spin  $j$

(軽いクォークのスピンや軌道角運動量を合わせた全スピン)

# HQS doublet

ヘビークォークスピンに依存した相互作用は $1/m_Q$ で抑制される  
(チャーム・ボトム)

## メソン

	スピン 0	スピン 1	質量差
ストレンジ	$K$	$K^*$	398MeV
チャーム	$D$	$D^*$	140MeV
ボトム	$B$	$B^*$	46MeV

## バリオン

	スピン 1/2	スピン 3/2	質量差
	$\Sigma$	$\Sigma^*$	194MeV
	$\Sigma_c$	$\Sigma_c^*$	65MeV
	$\Sigma_b$	$\Sigma_b^*$	21MeV

クォーク質量が大きいほどスピン二重項の質量差が小さくなる。

# One Pion Exchange Potential (OPEP)

湯川結合による $\pi$ 中間子交換ポテンシャルを用いる

$$V_{ij} = C_{ij} Y_1(m_\pi, \Lambda, r) + \dots$$

$i(j)$  : 始(終)状態のチャネルの添字

$C_{ij}$  : チャネルごとに決まる係数(結合定数など)

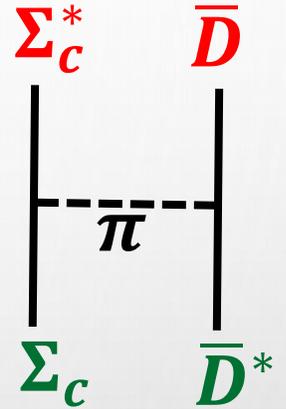
$$Y_1(m, \Lambda, r) = Y(mr) - \frac{\Lambda}{m} Y(\Lambda r) - \frac{\Lambda^2 - m^2}{2m\Lambda} e^{-\Lambda r}$$

$$Y(x) = \frac{e^{-x}}{x}$$

湯川型ポテンシャル

$\Lambda$  : カットオフパラメータ(deuteronの研究では1000MeV前後とされている)

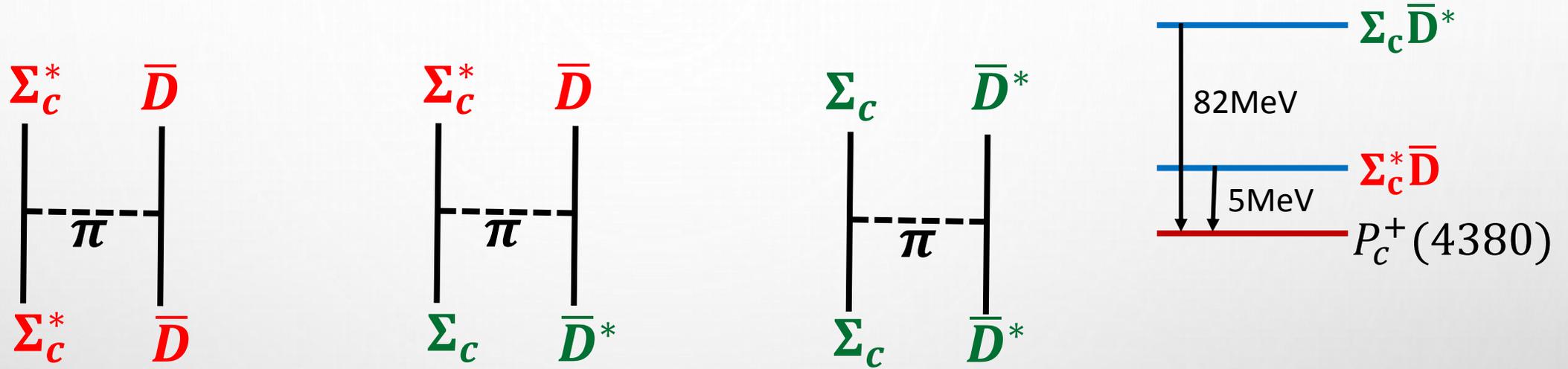
形状因子に起因する



各バーテックスに  
形状因子を付与

$$F(\vec{q}) = \frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + |\vec{q}|^2}$$

# $\Sigma_c^* \bar{D} - \Sigma_c \bar{D}^*$ 結合チャネルの解析



$P_c^+ (4380)$ の質量に最もthresholdに近い $\Sigma_c^* \bar{D}$ チャネルと  
次にthresholdに近い $\Sigma_c \bar{D}^*$ チャネルの結合を考える  
(軌道角運動量S波の状態のみ)

# パラメータ

## シュレディンガー方程式

- ・ヘビーバリオンと $\pi$ 中間子の結合定数  $g_1$

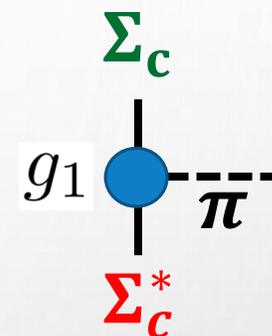
モデルによる評価:  $g_1 = 0.94$

[Y.R.Liu and M.Oka, Phys.Rev.D85, 014015(2012)]

ここでは 0.75, 0.95, 1.95 の場合を調べて  $g_1$  依存性を見る  
(先行研究では0.94)

- ・カットオフパラメータ  $\Lambda$

$\pi$ 中間子交換によるdeuteronの解析から約1000MeVとされる  
ここでは800-2500MeVの範囲で調べる(50MeV刻み)  
(先行研究では2350MeV)

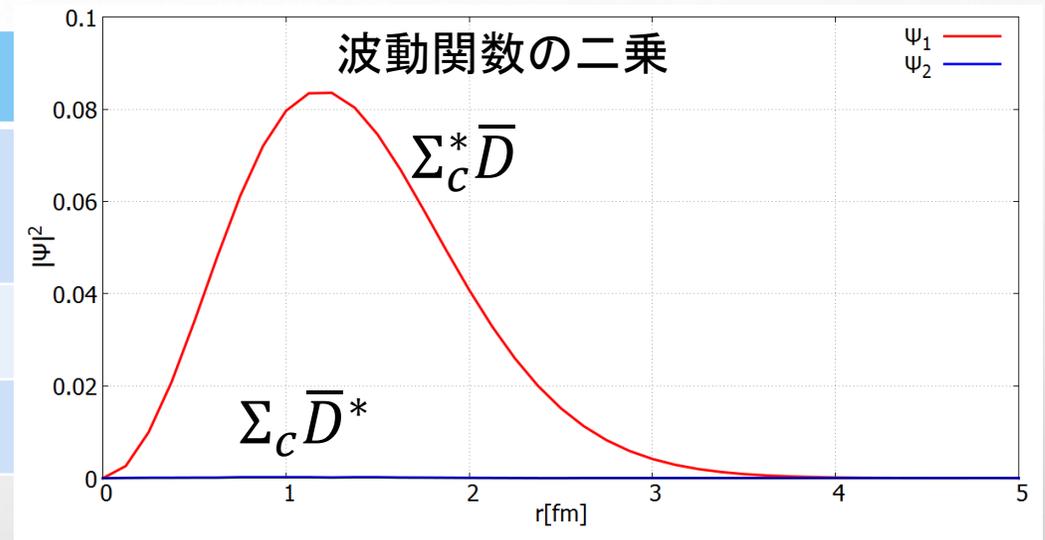


固有値として束縛エネルギーを得る

# $\Sigma_c^* \bar{D}$ – $\Sigma_c \bar{D}^*$ 結合チャネルの解析結果

$$g_1 = 0.95, \Lambda = 1600 \text{ MeV}$$

質量	4383.0 MeV
束縛エネルギー ( $\Sigma_c^* \bar{D}$ の threshold を基準)	2.1 MeV
成分比	$\Sigma_c^* \bar{D}$ : 99%
平均二乗半径	1.5 fm



$P_c^+$  (4380) の質量を  $\Sigma_c^* \bar{D}$  チャネルがメインチャネルのハドロン分子として数 MeV の束縛エネルギーで説明できる