強い相互作用と
ハドロン物理

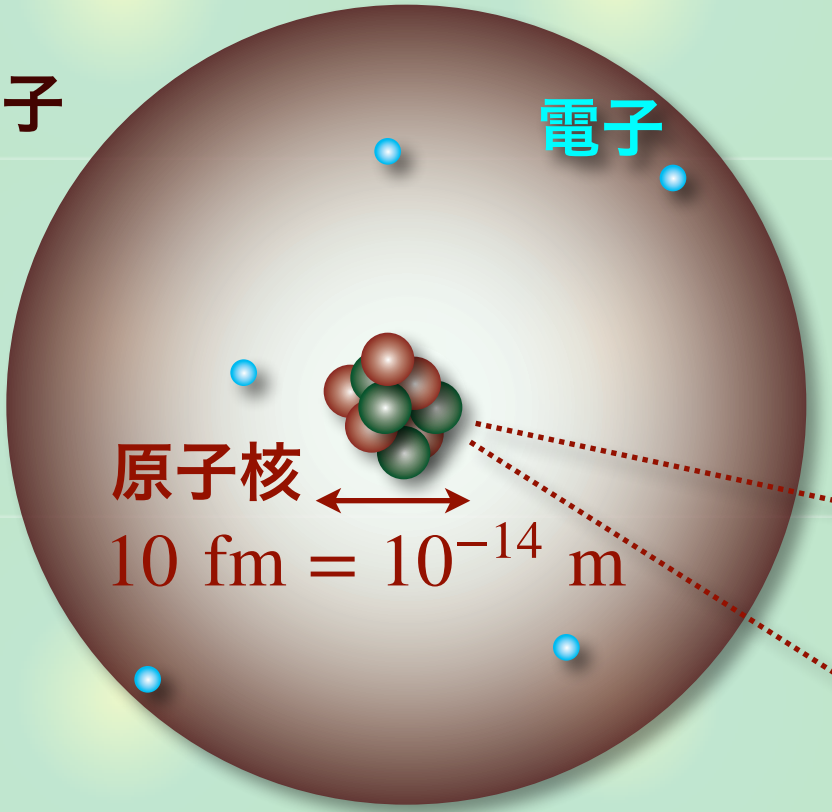
兵藤 哲雄

原子核ハドロン物理研究室

2020, Nov. 11th

目次

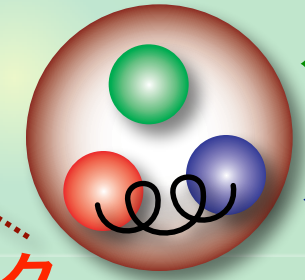
原子、原子核、ハドロン



$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m}$

ハドロン物理学

ハドロン(核子など)の性質をQCDから理解する



クォーク

クォーク

クォーク

グルーオン

$1\ \text{fm} = 10^{-15}\ \text{m}$

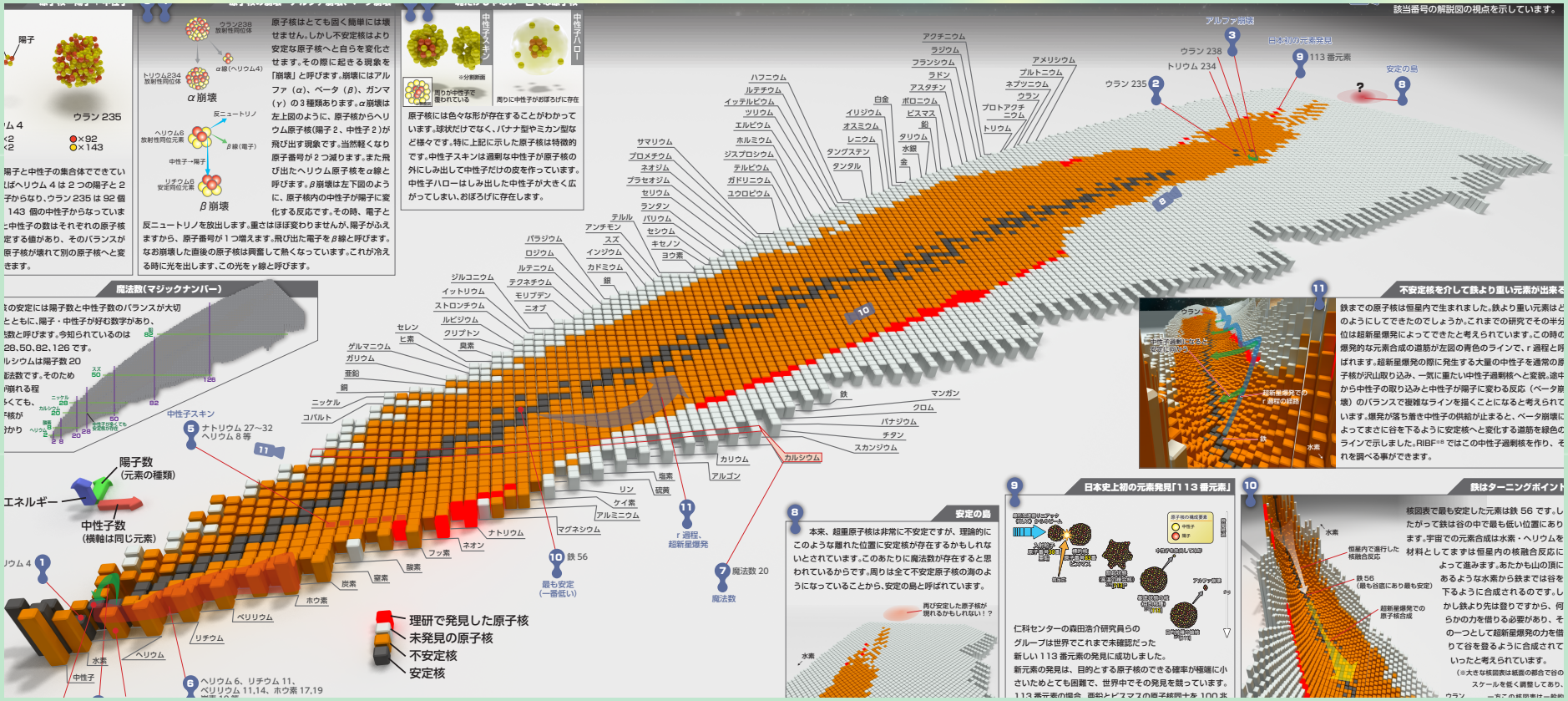
原子核物理学

原子核(多体系)の性質を核子(陽子＋中性子)間の相互作用から理解する

原子核とは

原子核：陽子、中性子の自己束縛系（勝手に分解しない）

- 水素、鉄、鉛、ニホニウム…など
- 安定核約300種、不安定核約2000種、未発見約4000種

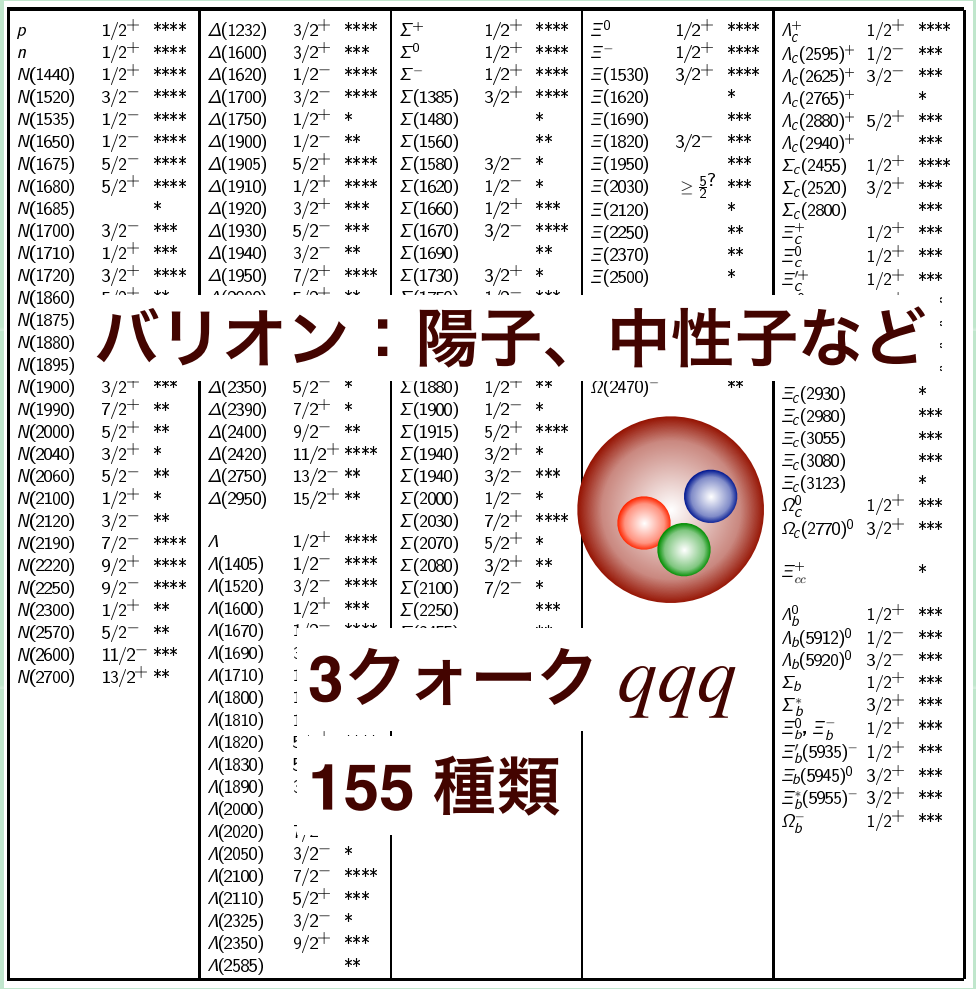


https://www.nishina.riken.jp/enjoy/kakuzu/index.html

ハドロンとは

ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系

- 現在までに約360種が観測されている



p	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****
$N(1440)$	$1/2^+$	****
$N(1520)$	$3/2^-$	****
$N(1535)$	$1/2^-$	****
$N(1650)$	$1/2^-$	****
$N(1675)$	$5/2^-$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****
$N(1685)$		*
$N(1700)$	$3/2^-$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****
$N(1860)$		**
$N(1875)$		*
$N(1880)$		*
$N(1895)$		*
$N(1900)$	$3/2^+$	***
$N(1990)$	$7/2^+$	**
$N(2000)$	$5/2^+$	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	**
$N(2100)$	$1/2^+$	*
$N(2120)$	$3/2^-$	**
$N(2190)$	$7/2^-$	****
$N(2220)$	$9/2^+$	****
$N(2250)$	$9/2^-$	****
$N(2300)$	$1/2^+$	**
$N(2570)$	$5/2^-$	**
$N(2600)$	$11/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**

$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****
$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****
$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*
$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**
$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****
$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****
$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***
$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**
$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****
$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*
$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*
$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**
$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****
$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**
$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**
Λ	$1/2^+$	****
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1690)$		
$\Lambda(1710)$		
$\Lambda(1800)$		
$\Lambda(1810)$		
$\Lambda(1820)$		
$\Lambda(1830)$		
$\Lambda(1890)$		
$\Lambda(2000)$		
$\Lambda(2020)$		
$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***
$\Lambda(2585)$		**

Σ^+	$1/2^+$	****
Σ^0	$1/2^+$	****
Σ^-	$1/2^+$	****
$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****
$\Sigma(1480)$		*
$\Sigma(1560)$		**
$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***
$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****
$\Sigma(1690)$		**
$\Sigma(1730)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**
$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****
$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***
$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****
$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*
$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**
$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*
$\Sigma(2250)$		***

Ξ^0	$1/2^+$	****
Ξ^-	$1/2^+$	****
$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*
$\Omega(2470)^-$		**

Λ_c^+	$1/2^+$	****
$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$\Lambda_c(2765)^+$		*
$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$\Lambda_c(2940)^+$		***
$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$\Sigma_c(2800)$		***
Ξ_c^+	$1/2^+$	***
Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$\Xi_c^{\prime +}$	$1/2^+$	***
$\Xi_c(2930)$		*
$\Xi_c(2980)$		***
$\Xi_c(3055)$		***
$\Xi_c(3080)$		***
$\Xi_c(3123)$		*
Ω_c^0	$1/2^+$	***
$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
Ξ_{cc}^+		*
Λ_b^0	$1/2^+$	***
$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
Σ_b	$1/2^+$	***
Σ_b^*	$3/2^+$	***
Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$\Xi_b^{\prime}(5935)^-$	$1/2^+$	***
$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Xi_b^*(5955)^-$	$3/2^+$	***
Ω_b^-	$1/2^+$	***

バリオン：陽子、中性子など

3クォーク qqq

155 種類

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)

$I^G(J^{PC})$	
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$
• π^0	$1^-(0^{-+})$
• η	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$
• f_1	
• η	
• π	
• a	
• f	
$h_1(1500)$	$?^+(1^{+-})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$
• $f_2'(1525)$	$0^+(2^{++})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$
h	
• π	
a	
f	
• η	
• ω	
• π	

$I^G(J^{PC})$	
• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$
• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
$X(1835)$	$?^?(?^{-+})$
$X(1840)$	$?^?(?^{??})$
• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$
$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
• $a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$
• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
$f_0($	
f	
$\rho_3(2$	
• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
$f_6(2330)$	$0^+(6^{++})$

STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)

$I(J^P)$	
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K^0_S	$1/2(0^-)$
• K^0_L	$1/2(0^-)$
$K^*_0(800)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K^*_0(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K^*_2(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K^*_0(1950)$	$1/2(0^+)$
$K^*_2(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K^*_4(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K^*_5(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$

CHARMED ($C = \pm1$)

• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
$D_1(2420)$	$1/2(1^+)$
$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$
• $D^*_2(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D^*_2(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D(2550)^0$	$1/2(0^-)$
$D(2600)$	$1/2(?^?)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D(2750)$	$1/2(?^?)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)

$I(J^P)$	
• $D^\pm_s$	$0(0^-)$
• $D^{*\pm}_s$	$0(?^?)$
• $D^*_{s0}(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D^*_{s2}(2573)$	$0(?^?)$
• $D^*_{s1}(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$D^*_{sJ}(2860)^\pm$	$0(?^?)$
$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?^?)$

BOTTOM ($B = \pm1$)

• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$B^*_J(5732)$	$?(?^?)$
• $B^*_2(5747)^+$	$1/2(2^+)$
• $B^*_2(5747)^0$	$1/2(2^+)$
• $B(5970)^+$	$?(?^?)$
• $B(5970)^0$	$?(?^?)$

BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)

• B^0_s	$0(0^-)$
• B^*_s	$0(1^-)$
• $B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$
• $B^*_{s2}(5840)^0$	$0(2^+)$

$c\bar{c}$

$I^G(J^{PC})$	
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_c(1P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
$X(3823)$	$?^?(?^{--})$
• $X(3872)$	$0^+(1^{++})$
• $X(3900)^\pm$	$?(1^+)$
$X(3900)^0$	$?(?^?)$
• $\chi_{c0}(3915)$	$0^+(0^{++})$
$\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
ψ	$?^?(?^{??})$
ψ	$?(?^?)$
ψ	$0^-(1^{--})$
ψ	$?(?^?)$
ψ	$0^+(?^{?+})$
ψ	$0^-(1^{--})$
$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
$X(4230)$	$?^?(1^{--})$
$X(4240)^\pm$	$?^?(0^-)$
$X(4250)^\pm$	$?(?^?)$
• $X(4260)$	$?^?(1^{--})$
$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
• $X(4360)$	$?^?(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
• $X(4430)^\pm$	$?(1^+)$
• $X(4660)$	$?^?(1^{--})$

$b\bar{b}$

$\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(1D)$	$0^-(2^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
$h_b(2P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b1}(3P)$	$0^+(1^{++})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
$X(10610)^\pm$	$1^+(1^+)$
$X(10610)^0$	$1^+(1^+)$
$X(10650)^\pm$	$?^+(1^+)$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$

メソン：π中間子など

クォーク反クォーク $q\bar{q}$

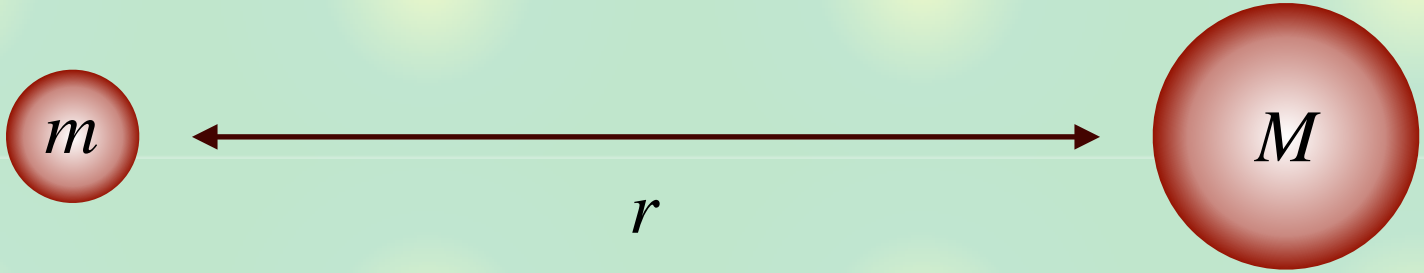
206 種類

http://pdg.lbl.gov/

重力

質量 m と M の粒子を距離 r 離して置く

$$F_G = -G\frac{mM}{r^2}$$

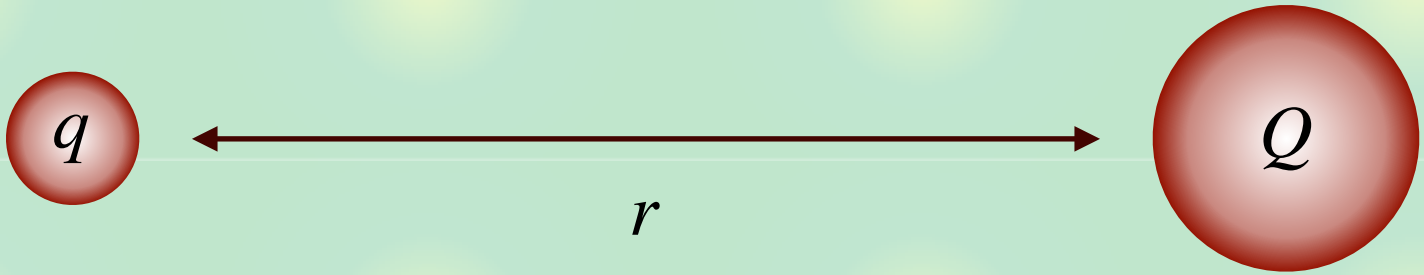


- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- G:万有引力定数
- 重力は常に引力

電磁気力

電荷 q と Q の粒子を距離 r 離して置く

$$F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2}$$



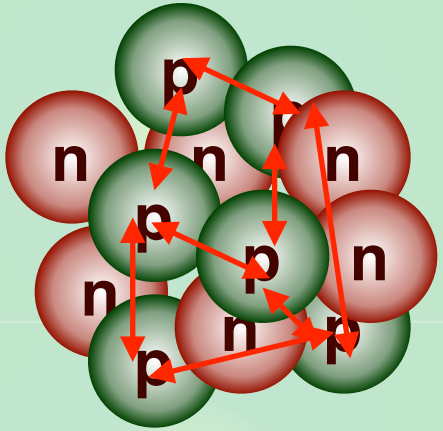
- 力は距離の2乗に反比例
- 電荷が力の強さを決める
- $(4\pi\varepsilon_0)^{-1}$:クーロン結合定数
- 電磁気力は引力でも斥力でもある

} 重力とは別の力

原子核と強い相互作用

原子核：陽子、中性子の自己束縛系（勝手に分解しない）

- 例）$^{12}\mathrm{C}$（炭素）



- 陽子（proton）：電荷 $Q = +1$
- 中性子（neutron）：電荷 $Q = 0$

陽子間の電磁気力は斥力

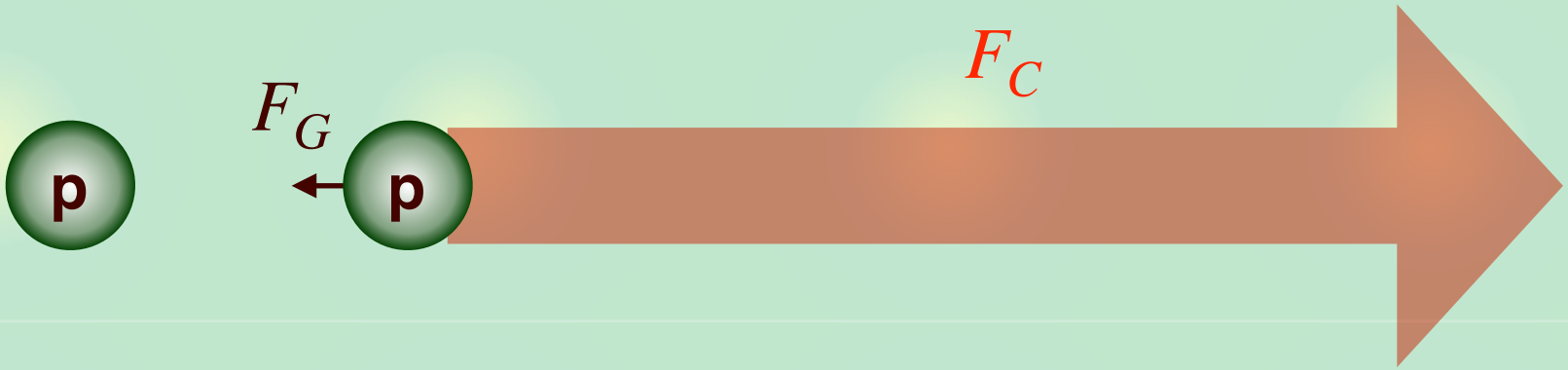
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

強さの比較

距離 $2\ \mathrm{fm} = 2 \times 10^{-15}\ \mathrm{m}$ 離れた陽子間の重力とクーロン力

$$F_G = -G\frac{mM}{r^2} \simeq -4.8 \times 10^{-35} \quad [\mathrm{N}]$$

$$F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2} \simeq 5.7 \times 10^{1} \quad [\mathrm{N}]$$



- 重力は電磁気力に比べて非常に弱い
- 原子核を作るには重力、電磁気力以外の相互作用が必要

核力の強さ

核力：核子（陽子、中性子）間の引力

- 重力、電磁気力以外の相互作用
- **強い**力：クーロン斥力に打ち勝ち原子核を束縛

12 g の炭素原子核 ^{12}C を核子に分解するのに必要なエネルギー

$$\sim 8.6 \times 10^{12}\ \mathrm{J} \sim 2.1 \times 10^{9}\ \mathrm{kcal}$$

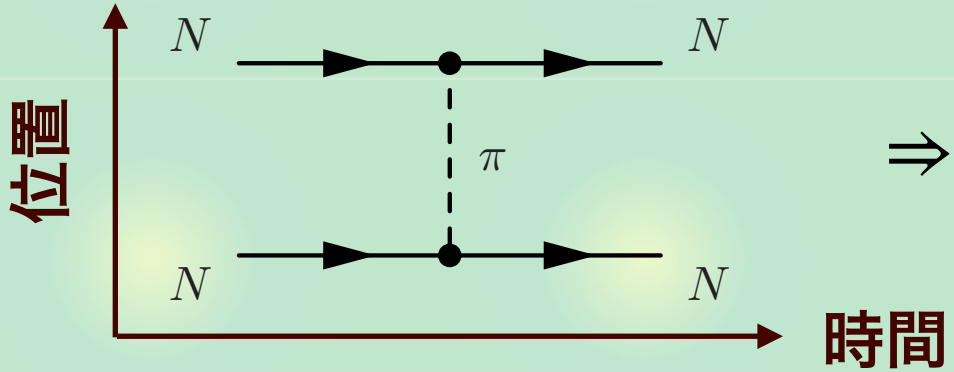
核力のメカニズム

核力はπ中間子の交換で媒介される

(1949年)

https://www.nobelprize.org

- ファインマン図による表現



$$\Rightarrow \quad F \sim \frac{g^2}{4\pi}\frac{\exp\{-\mu r\}}{r^2}$$

- **短距離力**：距離 ~ 1 fm 以上ではほとんどゼロ（指数関数的）
- 非中心力：距離 r だけでなく角度などに依存する

重力、電磁気力とは全く性質が異なる

４つの相互作用と素粒子標準理論

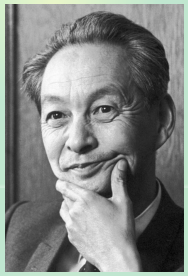
自然界には４つの基本相互作用が存在する。

- 重力：ニュートン力学 —> 一般相対性理論

標準理論

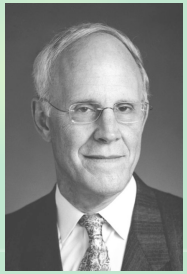
- 電磁気力：マクスウェル方程式 —> 量子電磁力学（QED）

(1965年)



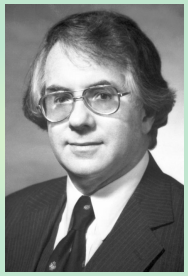
- 強い相互作用：量子色力学（QCD）

(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論

(1979年)



https://www.nobelprize.org

目次

核力と電磁気力の競合

原子核中に陽子を増やしていくと...

- 核力は短距離力

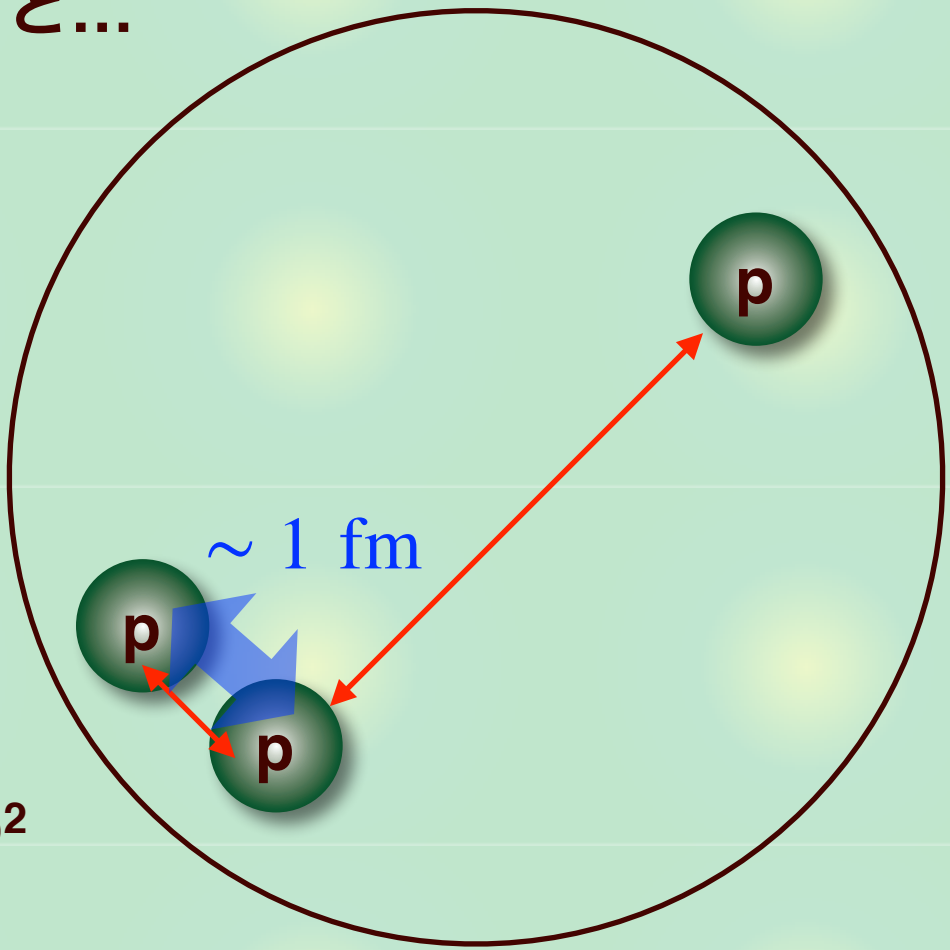
近くの核子とのみ引力

相互作用ペアの数 ∝ 陽子数

- 電磁気力は長距離力

遠くの核子とも斥力

相互作用ペアの数 ∝ (陽子数)^2



陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

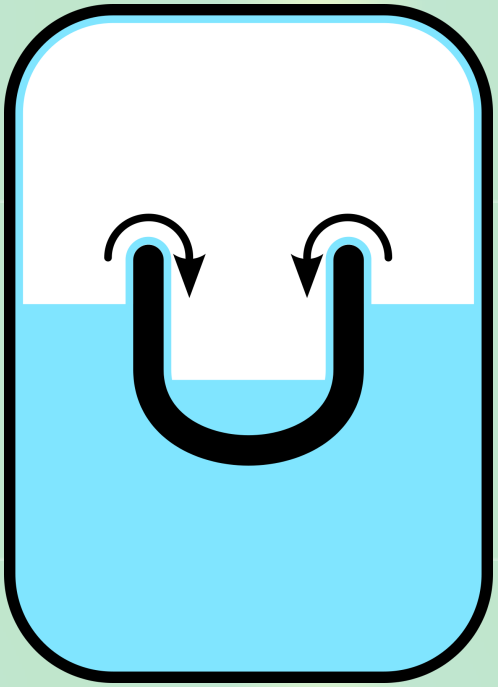
—> 原子核が束縛しなくなる

量子力学的粒子の分類

ボーズ粒子（ボソン）

- スピンが整数（0, 1, 2, ...）
- グルーオン、ヒッグス粒子、^{4}He原子など
- 同種粒子が同じ量子状態を取れる

—> ボーズアインシュタイン凝縮：^{4}He超流動



https://ja.wikipedia.org/wiki/超流動

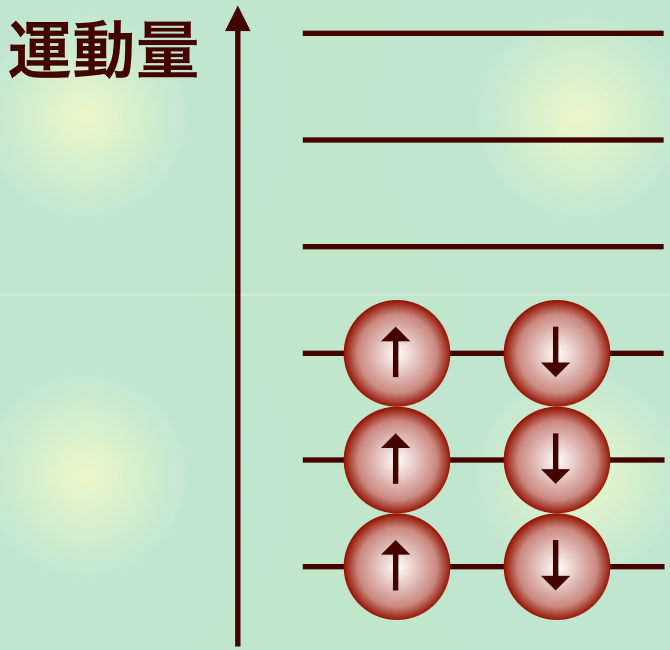
フェルミ粒子（フェルミオン）

- スピンが半整数（1/2, 3/2, ...）
- 核子、クォーク、電子、ニュートリノ、^{3}He原子など
- 同種粒子は同じ量子状態を取れない（パウリ原理）

箱の中のフェルミ粒子

スピン1/2フェルミ粒子を箱の中に詰める

- 量子状態：スピン（↑ ↓）と運動量（離散的な値）

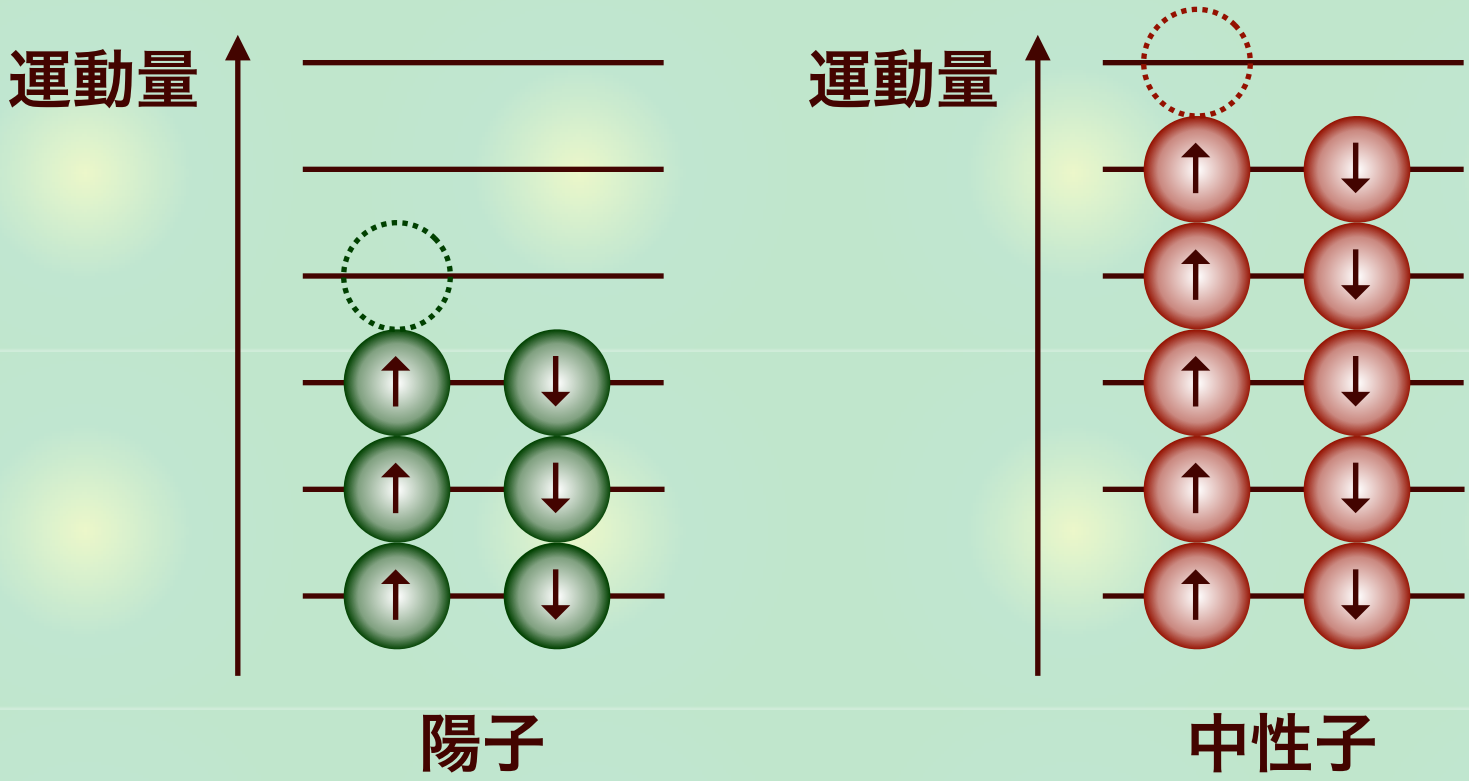


- 運動量（エネルギー）の低い状態に粒子を追加したい
- 既に他の粒子がいる状態には入れない

—> 運動量の低い状態から順番に占有される

原子核の場合

原子核中に中性子ばかりを増やしていくと…

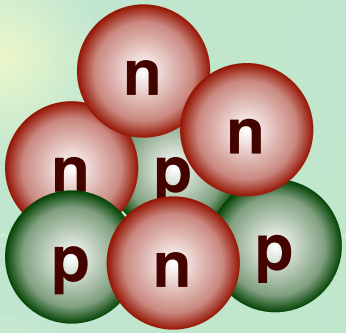


- 陽子を追加する方が低いエネルギーで済む
- β崩壊（中性子が陽子に変わる）で不安定

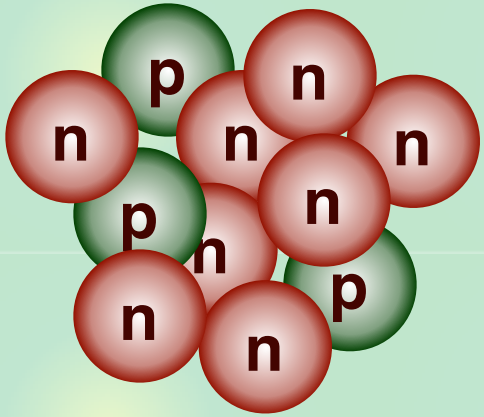
エキゾチックな原子核

原子核は陽子を増やしすぎても中性子を増やしすぎても不安定

1.中性子過剰核：原子核に中性子をいくつ追加できるか？



普通のリチウム ^{7}Li



中性子過剰なリチウム ^{11}Li

- 自然界に存在しないので加速器実験で生成する
- 通常と異なる状態の性質（サイズが大きい、など）

2. 超重元素の探索：粒子数最大の原子核は何か？

日本で発見された原子核：ニホニウム

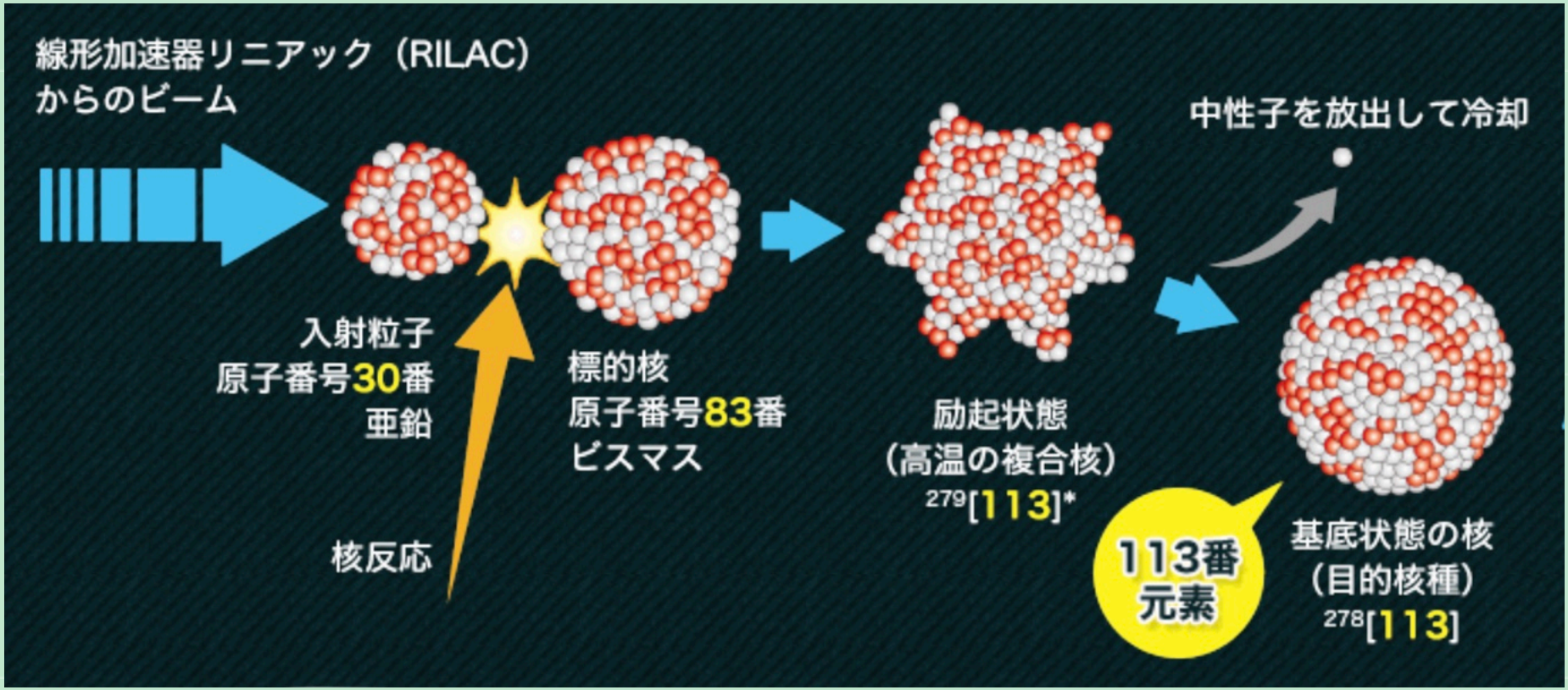
113番元素Nh（ニホニウム）

- 陽子数113、中性子数165、全核子数278
- 理研（和光市）での実験、日本が命名権を獲得

http://www.riken.jp/~/media/riken/pr/fun/113/comic2.pdf

ニホニウムの合成

原子核反応を用いて人工的に合成する



http://www.nishina.riken.jp/113/approach.html

- ロシアで118番元素（陽子数118、中性子数176）まで合成
- より粒子数が多い原子核も理論的に存在が予言されている

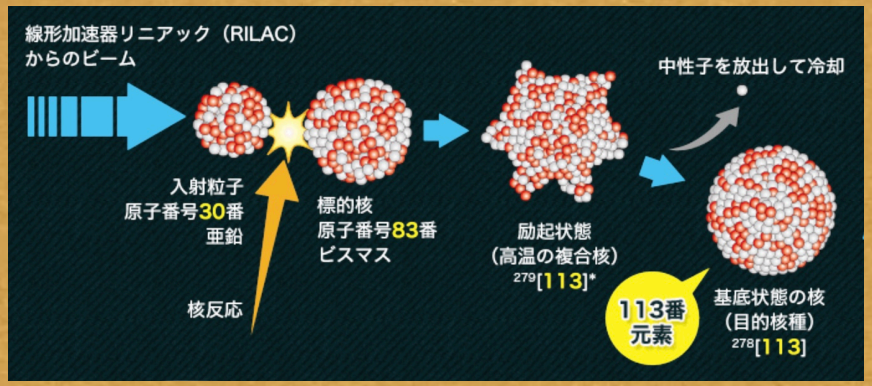
ここまでのまとめ

原子核の性質

- 陽子数を増やしすぎるとクーロン力で不安定
- 中性子数を増やしすぎるとパウリ原理で不安定

超重核の探索

- 粒子数最大の原子核への挑戦

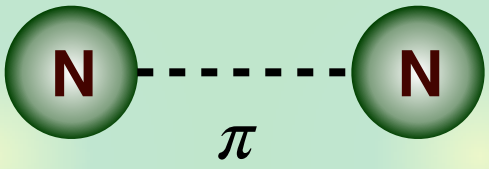


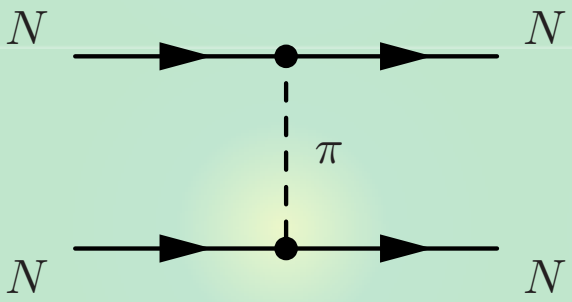
http://www.nishina.riken.jp/113/approach.html

目次

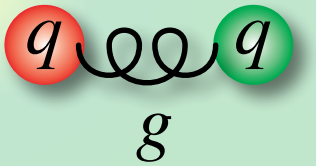
核力とQCDの相互作用

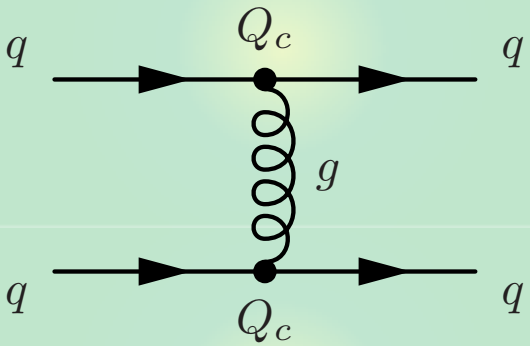
核力：核子間の強い引力





強い相互作用：クォーク・グルーオン間のQCD相互作用





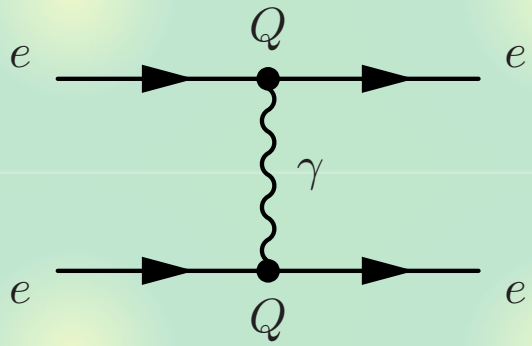
- 核子や中間子もクォーク・グルーオンからできている
- 強い核力の起源もQCDの相互作用

電磁相互作用の基礎理論

量子電磁力学 Quantum Electrodynamics, QED

$$\mathscr{L}_{\mathrm{QED}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{e}(i\gamma^{\mu}D_{\mu} - m)e$$

- 電子eと光子γの理論
- 量子効果を含めて電磁相互作用の全てを記述
- 光子は電荷を持たない：光子間は相互作用しない



$$\Rightarrow \quad F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q^2}{r^2}$$

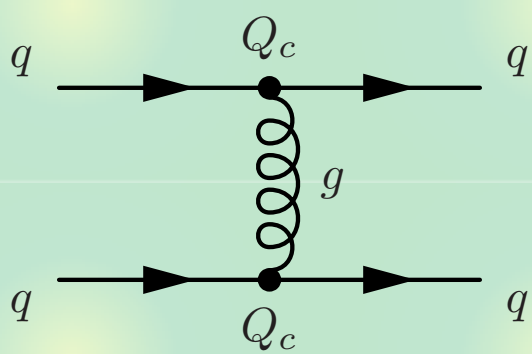
- 電子間の相互作用：クーロン力（+量子効果）

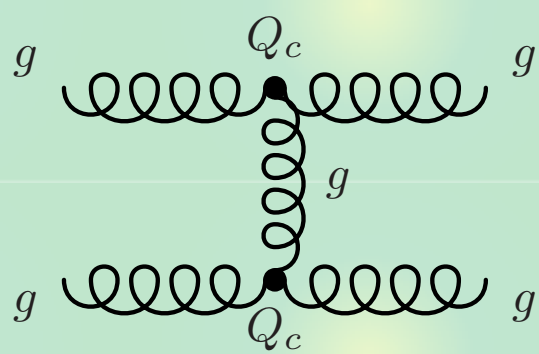
強い相互作用の基礎理論

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathscr{L}_{\mathrm{QCD}} = -\frac{1}{4} G^{a}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_{a} + \bar{q}_{\alpha}(i\gamma^{\mu} D^{\alpha\beta}_{\mu} - m\delta^{\alpha\beta}) q_{\beta}$$

- クォークqとグルーオンgの理論
- 量子効果を含めて強い相互作用の全てを記述
- クォークとグルーオンはカラー電荷(a, α, β)を持つ



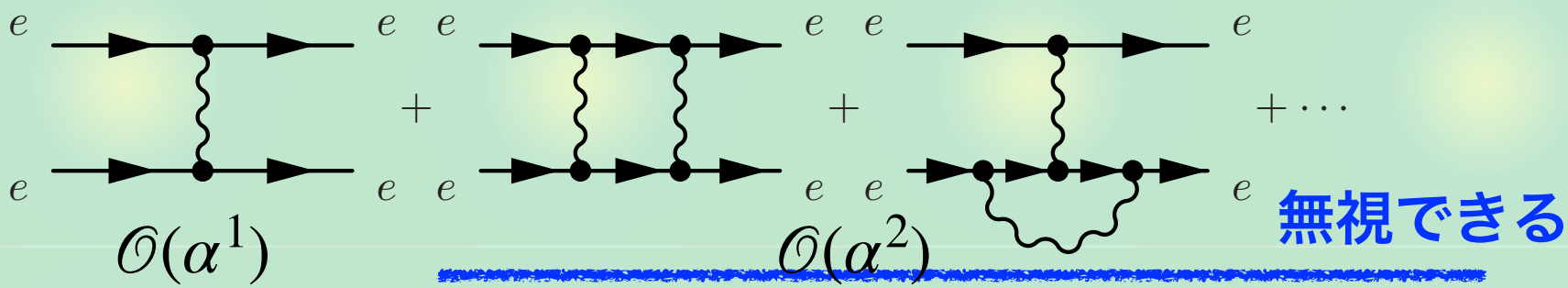


- グルーオン間も相互作用する

量子効果の計算

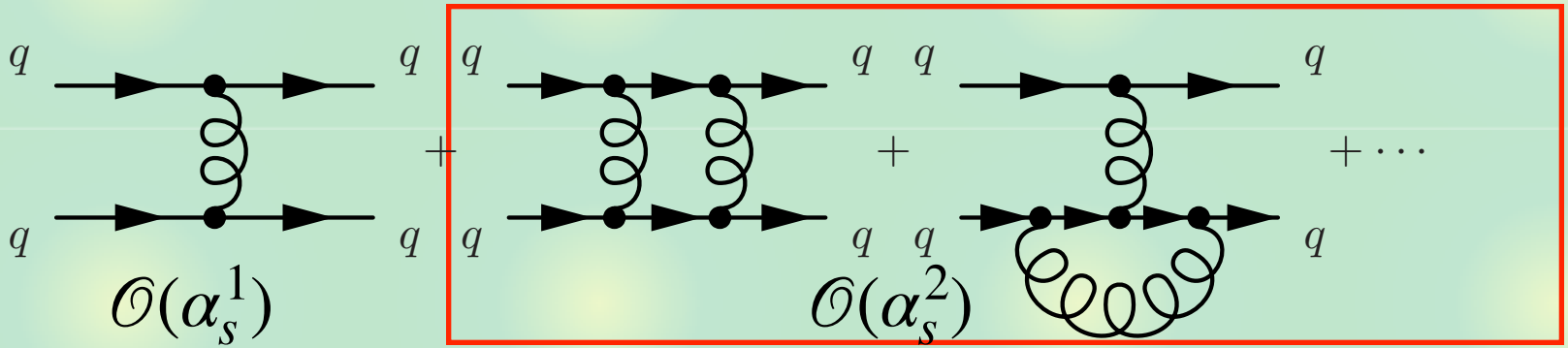
同じ始状態・終状態のファインマン図を足す（無限個）

- 電磁相互作用：量子効果が小さい（有限個の計算でOK）



- 強い相互作用：量子効果が”強い”

“強い”ので無視できない！

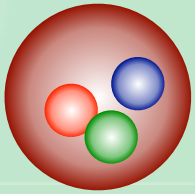


- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

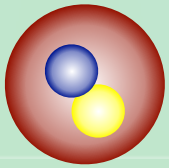
未解決の問題

カラー閉じ込め

- 基本自由度（クォーク、グルーオン）はカラーを持つ
- 観測される自由度（ハドロン）はカラー白色のみ



赤＋青＋緑=白



青＋反青(黄)=白

（正確にはカラー群SU(3)の表現で記述）

閉じ込めはミレニアム問題：解けたら100万ドルもらえる

Yang–Mills Existence and Mass Gap. *Prove that for any compact simple gauge group G, a non-trivial quantum Yang–Mills theory exists on $\mathbb{R}^4$ and has a mass gap $\Delta > 0$. Existence includes establishing axiomatic properties at least as strong as those cited in* [45, 35].

http://www.claymath.org/millennium-problems

クォーク・ハドロンのフレーバー

クォークはカラー以外にフレーバー（香り）の自由度を持つ

- u (up), d (down), s (strange), c (charm), b (bottom), t (top)
- ハドロンはフレーバー量子数 I_3, S, C, B, T を持つ

	Q	I_3	S	C	B	T	質量
u	$+2/3$	$+1/2$	0	0	0	0	$2.2^{+0.5}_{-0.4}$ MeV
d	$-1/3$	$-1/2$	0	0	0	0	$4.7^{+0.5}_{-0.3}$ MeV
s	$-1/3$	0	-1	0	0	0	95^{+9}_{-3} MeV
c	$+2/3$	0	0	$+1$	0	0	$1.275^{+0.025}_{-0.035}$ GeV
b	$-1/3$	0	0	0	-1	0	$4.18^{+0.04}_{-0.03}$ GeV
t	$+2/3$	0	0	0	0	$+1$	173.0 ± 0.4 GeV

- クォークの質量は幅広いスケール（2-173000）に渡って分布
- クォークの（電磁気的）電荷 Q は分数
- 陽子 (uud) の電荷は $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

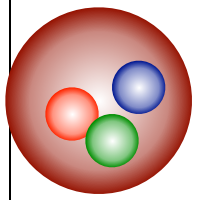
ハドロンとは

ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系

- 現在までに約360種が観測されている（2018年）

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$		*	$\Lambda_c(2765)^+$		*
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$		*	$\Xi(1690)$		***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$		**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$		***
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$		***	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$		*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$		*	$\Sigma_c(2800)$		***
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2250)$		**	Ξ_c^+	$1/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$		**	$\Xi(2370)$		**	Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$	*	$\Xi(2500)$		*	$\Xi_c^{\prime +}$	$1/2^+$	***
$N(1860)$														
$N(1875)$														
$N(1880)$														
$N(1895)$														
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2470)^-$		**	$\Xi_c(2930)$		*
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(2980)$		***
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****				$\Xi_c(3055)$		***
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*				$\Xi_c(3080)$		***
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***				$\Xi_c(3123)$		*
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*				Ω_c^0	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	**				$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*						
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**				Ξ_{cc}^+		*
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*						
$N(2300)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(2250)$		***				Λ_b^0	$1/2^+$	***
$N(2570)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1670)$	[illegible]	****	[illegible]		***				$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1690)$	[illegible]								$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1710)$	[illegible]								Σ_b	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1800)$	[illegible]								Σ_b^*	$3/2^+$	***
			$\Lambda(1810)$	[illegible]								Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1820)$	[illegible]								$\Xi_b^{\prime}(5935)^-$	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1830)$	[illegible]								$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
			$\Lambda(1890)$	[illegible]								$\Xi_b^*(5955)^-$	$3/2^+$	***
			$\Lambda(2000)$									Ω_b^-	$1/2^+$	***
			$\Lambda(2020)$	[illegible]										
			$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*									
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****									
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***									
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*									
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***									
			$\Lambda(2585)$		**									

バリオン：陽子、中性子など

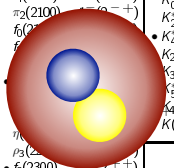


3クォーク qqq

155 種類

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)				STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)		$c\bar{c}$	
	$I^G(J^{PC})$		$I^G(J^{PC})$		$I(J^P)$		$I(J^P)$		$I^G(J^{PC})$
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$	• $K^\pm$	$1/2(0^-)$	• $D_s^\pm$	$0(0^-)$	• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• π^0	$1^-(0^{-+})$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$	• K^0	$1/2(0^-)$	• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$	• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• η	$0^+(0^{-+})$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$	• K_S^0	$1/2(0^-)$	• $D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$	$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$	• K_L^0	$1/2(0^-)$	• $D_{s1}^*(2460)^\pm$	$0(1^+)$	• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$	• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$	$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$	• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$	• $h_c(1P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$	$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$	• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$	• $D_{s2}(2573)$	$0(?^?)$	• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$	• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$	• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$	• $D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$	• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$	• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s\,J}^*(2860)^\pm$	$0(?^?)$	• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$	$X(1835)$	$?^?(?^{-+})$	• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s\,J}(3040)^\pm$	$0(?^?)$	• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$	$X(1840)$	$?^?(?^{??})$	• $K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$			$X(3823)$	$?^?(?^{??-})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$	• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$	• $K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	BOTTOM ($B = \pm1$)		• $X(3872)$	$0^+(1^{++})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$			• $X(3900)^\pm$	$?(1^+)$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$	• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$	• $B^\pm$	$1/2(0^-)$	$X(3900)^0$	$?(?^?)$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$	$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$			• B^0	$1/2(0^-)$	• $\chi_{c0}(3915)$	$0^+(0^{++})$
• f_1		• $a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$	• $K_1(1650)$	$1/2(1^+)$			• $\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• η		$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$			$X(3940)$	$?^?(?^{??})$
• π		$f_0(2$		• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$			$X(3945)$	$?(?^?)$
• a		f_2		• $K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$			• $\chi_{c0}(4P)$	$0^+(0^{++})$
• f				$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$			• $\chi_{c2}(4P)$	$0^+(2^{++})$
$h_1(1500)$	$0^-(1^{+-})$	$f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	• $B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$	$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$	• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4230)$	$?^?(1^{--})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$	$f_0(2$		$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_J^*(5732)$	$?(?^?)$	$X(4240)^\pm$	$?^?(0^{-})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$	f		• $K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$	• $B_2^*(5747)^+$	$1/2(2^+)$	$X(4250)^\pm$	$?(?^?)$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$			$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$	• $B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	• $X(4260)$	$?^?(1^{--})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$			$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$	• $B(5970)^+$	$?(?^?)$	$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$			$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$	• $B(5970)^0$	$?(?^?)$	• $X(4360)$	$?^?(1^{--})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$			$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$			• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$			$K(3100)$	$?^?(?^{??})$	BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)		• $X(4430)^\pm$	$?(1^+)$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$							• $X(4660)$	$?^?(1^{--})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$	$\rho_3(2$		CHARMED ($C = \pm1$)		• B_s^0	$0(0^-)$		
• $f_2'(1525)$	$0^+(2^{++})$	• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$			• B_s^*	$0(1^-)$	$b\bar{b}$	
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$	• $D^\pm$	$1/2(0^-)$	• $B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$	$\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$	$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$	• D^0	$1/2(0^-)$	• $B_{s2}^*(5840)^0$	$0(2^+)$		
h									
• π									
a									
f_2									
• η									
• ω									
• π									
				$D_1(2420)$	$1/2(1^+)$			• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
				$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$			• $\Upsilon(1D)$	$0^-(2^{--})$
				• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$			• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
				• $D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$			• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
				$D(2550)^0$	$1/2(0^-)$			$h_b(2P)$	$?^?(1^{+-})$
				$D(2600)$	$1/2(?^?)$			• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
				$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$			• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
				$D(2750)$	$1/2(?^?)$			• $\chi_{b1}(3P)$	$0^+(1^{++})$
								• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
								$X(10610)^\pm$	$1^+(1^+)$
								$X(10610)^0$	$1^+(1^+)$
								$X(10650)^\pm$	$?^+(1^+)$
								• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
								• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$

メソン：π中間子など



クォーク反クォーク $q\bar{q}$

206 種類

http://pdg.lbl.gov/

ハドロンとは

ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系

- 現在までに約370種が観測されている（2020年）

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Ξ_{cc}^{++}	***
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****		
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	Λ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$		*	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1690)$		***	$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$ ***

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)				STRANGE ($S = \pm1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)		$c\bar{c}$ continued
	$I^G(J^{PC})$		$I^G(J^{PC})$		$I(J^P)$		$I(J^P)$	$I^G(J^{PC})$
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^{-+})$	• $K^\pm$	$1/2(0^-)$	• $D_s^\pm$	$0(0^-)$	• $\psi(3770)$ $0^-(1^{--})$
• π^0	$1^-(0^{-+})$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$	• K^0	$1/2(0^-)$	• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$	• $\psi_2(3823)$ $0^-(2^{--})$
• η	$0^+(0^{-+})$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$	• K^0_S	$1/2(0^-)$	• $D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	• $\psi_3(3842)$ $0^-(3^{--})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$	• K^0_L	$1/2(0^-)$	• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c0}(3860)$ $0^+(0^{++})$
								• $\chi_{c1}(3872)$ $0^+(1^{++})$

観測されるハドロンはカラー白色のみ

—> カラー閉じ込めの問題

フレーバー量子数は $qqq/q\bar{q}$ で記述できるもののみ

なぜ $qq\bar{q}\bar{q}$, $qqqq\bar{q}$, … 状態が存在しないのか?

—> エキゾチックハドロンの問題

			$\Lambda(2070)$	3					(3055)		***		
			$\Lambda(2080)$	5					(3080)		***		
			$\Lambda(2085)$	7					(3123)		*		
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****				Ω_c^0	$1/2^+$	***		
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***		
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*				$\Omega_c(3000)^0$		***		
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***				$\Omega_c(3050)^0$		***		
			$\Lambda(2585)$		**				$\Omega_c(3065)^0$		***		
									$\Omega_c(3090)^0$		***		
									$\Omega_c(3120)^0$		***		

162 種類

									$D_J^*(2600)$	$1/2(?^?)$			
									$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$			
									$D(2740)^0$	$1/2(?^?)$			
									$D_3^*(2750)$	$1/2(3^{--})$			
									$D(3000)^0$	$1/2(?^?)$			

$c\bar{c}$ (+ possibly non-$q\bar{q}$ states)													
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$												• $\chi_{b1}(2P)$ $0^+(1^{++})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$												$h_b(2P)$ $0^-(1^{+-})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$												• $\chi_{b2}(2P)$ $0^+(2^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$												• $\Upsilon(3S)$ $0^-(1^{--})$
• $h_c(1P)$	$0^-(1^{+-})$												• $\chi_{b1}(3P)$ $0^+(1^{++})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$												• $\chi_{b2}(3P)$ $0^+(2^{++})$
• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$												• $\Upsilon(4S)$ $0^-(1^{--})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$												• $Z_b(10610)$ $1^+(1^{+-})$
													• $Z_b(10650)$ $1^+(1^{+-})$
													$\Upsilon(10753)$ $?^?(1^{--})$
													• $\Upsilon(10860)$ $0^-(1^{--})$
													• $\Upsilon(11020)$ $0^-(1^{--})$

209 種類

http://pdg.lbl.gov/

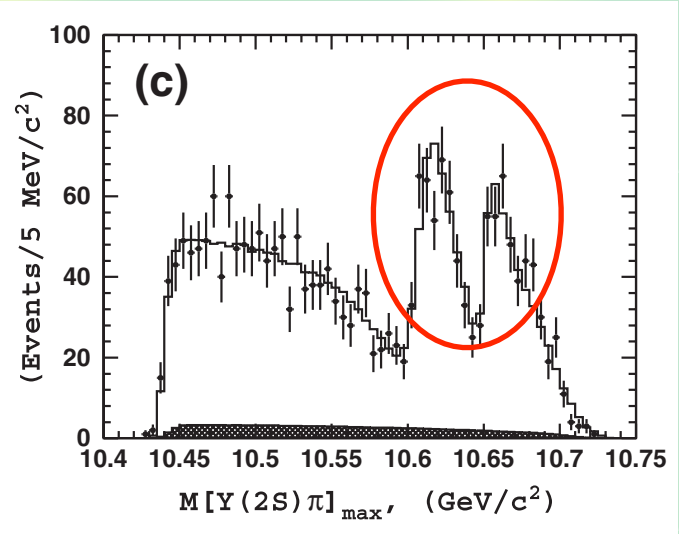
エキゾチックハドロンの観測

４粒子状態（テトラクォーク, 2012年）

$$\Upsilon(5s) \to \pi^+ + Z_b$$

$$Z_b \to \Upsilon(2s)(\bar{b}b) + \pi^-(\bar{u}d)$$

A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

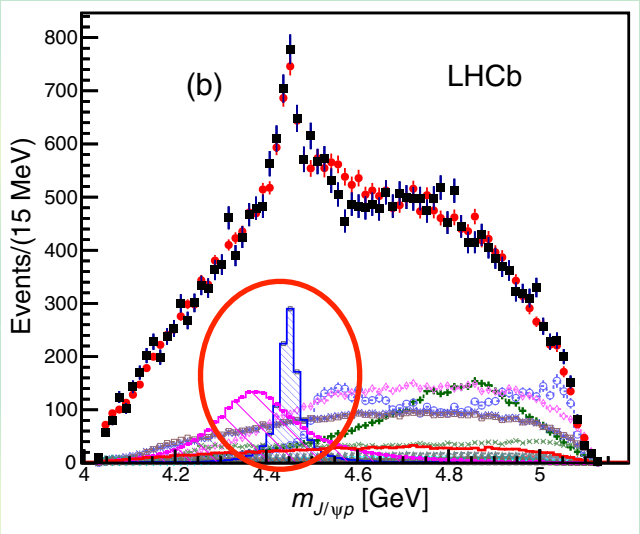


５粒子状態（ペンタクォーク, 2015年）

$$\Lambda_b \to K^- + P_c$$

$$P_c \to J/\psi(\bar{c}c) + p(uud)$$

R. Aaij, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



360種ほどの中で高々数個、なぜ少ないのかは未解明

強い相互作用で不安定なハドロン

ハドロンの共鳴状態

http://pdg.lbl.gov/

p	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****
$N(1440)$	$1/2^+$	****
$N(1520)$	$3/2^-$	****
$N(1535)$	$1/2^-$	****
$N(1650)$	$1/2^-$	****
$N(1675)$	$5/2^-$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****
$N(1700)$	$3/2^-$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	****
$N(1720)$	$3/2^+$	****
$N(1860)$	$5/2^+$	**
$N(1875)$	$3/2^-$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	****
$N(1900)$	$3/2^+$	****
$N(1990)$	$7/2^+$	**
$N(2000)$	$5/2^+$	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	***
$N(2100)$	$1/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****
$N(2220)$	$9/2^+$	****
$N(2250)$	$9/2^-$	****
$N(2300)$	$1/2^+$	**
$N(2570)$	$5/2^-$	**
$N(2600)$	$11/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**

$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****
$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****
$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*
$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***
$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****
$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****
$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***
$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**
$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****
$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**
$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*
$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***
$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**
$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*
$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*
$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**
$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****
$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**
$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**

Λ	$1/2^+$	****
Λ	$1/2^-$	**
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	****
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***
$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***
$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****
$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****
$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****
$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	*
$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	*
$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	*
$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	**
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***
$\Lambda(2585)$		**

Σ^+	$1/2^+$	****
Σ^0	$1/2^+$	****
Σ^-	$1/2^+$	****
$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****
$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***
$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****
$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***
$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****
$\Sigma(1780)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**
$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	**
$\Sigma(1910)$	$3/2^-$	***
$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****
$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2010)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****
$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*
$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*
$\Sigma(2160)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(2230)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(2250)$		***
$\Sigma(2455)$		**
$\Sigma(2620)$		**
$\Sigma(3000)$		*
$\Sigma(3170)$		*

Ξ^0	$1/2^+$	****
Ξ^-	$1/2^+$	****
$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*
Ω^-	$3/2^+$	****
$\Omega(2012)^-$	?	***
$\Omega(2250)^-$		***
$\Omega(2380)^-$		**
$\Omega(2470)^-$		**
Λ_c^+	$1/2^+$	****
$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$\Lambda_c(2765)^+$		*
$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***
$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***
$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$\Sigma_c(2800)$		***
Ξ_c^+	$1/2^+$	***
Ξ_c^0	$1/2^+$	****
$\Xi_c'^+$	$1/2^+$	***
$\Xi_c'^0$	$1/2^+$	***
$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$\Xi_c(2930)$		**
$\Xi_c(2970)$		***
$\Xi_c(3055)$		***
$\Xi_c(3080)$		***
$\Xi_c(3123)$		*
Ω_c^0	$1/2^+$	***
$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$\Omega_c(3000)^0$		***
$\Omega_c(3050)^0$		***
$\Omega_c(3065)^0$		***
$\Omega_c(3090)^0$		***
$\Omega_c(3120)^0$		***

Ξ_{cc}^{++}		***
Λ_b^0	$1/2^+$	***
$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$	***
Σ_b	$1/2^+$	***
Σ_b^*	$3/2^+$	***
$\Sigma_b(6097)^+$		***
$\Sigma_b(6097)^-$		***
Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$\Xi_b'(5935)$	$1/2^+$	***
$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$	***
$\Xi_b(6227)$		***
Ω_b^-	$1/2^+$	***
$P_c(4312)^+$		*
$P_c(4380)^+$		*
$P_c(4440)^+$		*
$P_c(4457)^+$		*

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$) $I^G(J^{PC})$	
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$
• π^0	$1^-(0^{-+})$
• η	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^{-+})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$
• $h_1(1415)$	$0^-(1^{+-})$
$a_1(1420)$	$1^-(1^{++})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$
• $f_2'(1525)$	$0^+(2^{++})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$
$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^{-+})$
• $a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$
$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^{-+})$
• $\omega(1650)$	$0^-(1^{--})$
• $\omega_3(1670)$	$0^-(3^{--})$

• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^{-+})$
• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$
• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
• $a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
$X(1835)$	$?^?(0^{-+})$
• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
• $\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$
$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$
$a_2(1950)$	$1^-(0^{++})$
• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$
• $a_4(1970)$	$1^-(4^{++})$
$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$
$\pi_2(2005)$	$1^-(2^{-+})$
• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $\phi(2170)$	$0^-(1^{--})$
$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$
$f_J(2220)$	$0^+(2^{++}$ or $4^{++})$
$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$
$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$
• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$

OTHER LIGHT
Further States

STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)	$I(J^P)$
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K^0_S	$1/2(0^-)$
• K^0_L	$1/2(0^-)$
• $K_0^*(700)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1630)$	$1/2(?^?)$
$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$
• $K_2(1820)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$
$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$

CHARMED ($C = \pm1$)	
• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
• $D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$
• $D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$
• $D_0^*(2300)^0$	$1/2(0^+)$
$D_0^*(2300)^\pm$	$1/2(0^+)$
• $D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$
$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$
• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D(2550)^0$	$1/2(?^?)$
$D_J^*(2600)$	$1/2(?^?)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D(2740)^0$	$1/2(?^?)$
$D_3^*(2750)$	$1/2(3^-)$
$D(3000)^0$	$1/2(?^?)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)	$I(J^P)$
• $D_s^\pm$	$0(0^-)$
• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$
• $D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s2}^*(2573)$	$0(2^+)$
• $D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$D_{s1}^*(2860)^\pm$	$0(1^-)$
$D_{s3}^*(2860)^\pm$	$0(3^-)$
$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?^?)$

BOTTOM ($B = \pm1$)	
• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	
• $B^\pm/B^0/B_s^0/b$-baryon ADMIXTURE	
V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
• B^*	$1/2(1^-)$
• $B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$B_J^*(5732)$	$?(?^?)$
• $B_2^*(5747)^+$	$1/2(2^+)$
• $B_2^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$
$B_J(5840)^+$	$1/2(?^?)$
$B_J(5840)^0$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^+$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^0$	$1/2(?^?)$

BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)	
• B_s^0	$0(0^-)$
• B_s^*	$0(1^-)$
$X(5568)^\pm$	$?(?^?)$
• $B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$
• $B_{s2}^*(5840)^0$	$0(2^+)$
$B_{sJ}^*(5850)$	$?(?^?)$

BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm1$)	
• $B_c^\pm$	$0(0^-)$
$B_c(2S)^\pm$	$0(0^-)$

$c\bar{c}$ (+ possibly non-$q\bar{q}$ states)	
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_c(1P)$	$0^-(1^{+-})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$

$c\bar{c}$ continued	$I^G(J^{PC})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi_2(3823)$	$0^-(2^{--})$
• $\psi_3(3842)$	$0^-(3^{--})$
$\chi_{c0}(3860)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(3872)$	$0^+(1^{++})$
$Z_c(3900)$	$1^+(1^{+-})$
• $X(3915)$	$0^+(0/2^{++})$
• $\chi_{c2}(3930)$	$0^+(2^{++})$
$X(3940)$	$?^?(?^{??})$
• $X(4020)^\pm$	$1^+(?^{?-})$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
$X(4050)^\pm$	$1^-(?^{?+})$
$X(4055)^\pm$	$1^+(?^{?-})$
$X(4100)^\pm$	$1^-(?^{??})$
• $\chi_{c1}(4140)$	$0^+(1^{++})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
$Z_c(4200)$	$1^+(1^{+-})$
• $\psi(4230)$	$0^-(1^{--})$
$R_{c0}(4240)$	$1^+(0^{--})$
$X(4250)^\pm$	$1^-(?^{?+})$
$\psi(4260)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c1}(4274)$	$0^+(1^{++})$
$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
• $\psi(4360)$	$0^-(1^{--})$
$\psi(4390)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
$Z_c(4430)$	$1^+(1^{+-})$
$\chi_{c0}(4500)$	$0^+(0^{++})$
• $\psi(4660)$	$0^-(1^{--})$
$\chi_{c0}(4700)$	$0^+(0^{++})$

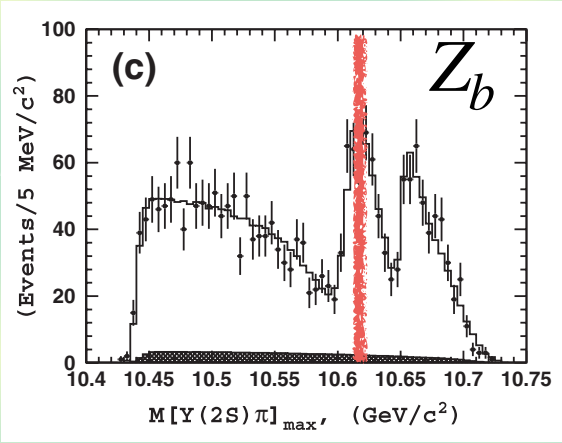
$b\bar{b}$ (+ possibly non-$q\bar{q}$ states)	
• $\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_b(1P)$	$0^-(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta_b(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon_2(1D)$	$0^-(2^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
$h_b(2P)$	$0^-(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b1}(3P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(3P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
• $Z_b(10610)$	$1^+(1^{+-})$
• $Z_b(10650)$	$1^+(1^{+-})$
$\Upsilon(10753)$	$?^?(1^{--})$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$

- 強い相互作用に対し安定/不安定
- 励起状態はほとんど不安定 —> 共鳴状態

共鳴状態とは

共鳴状態

- エネルギーの関数としてのスペクトル
- あるエネルギーでピーク：共鳴



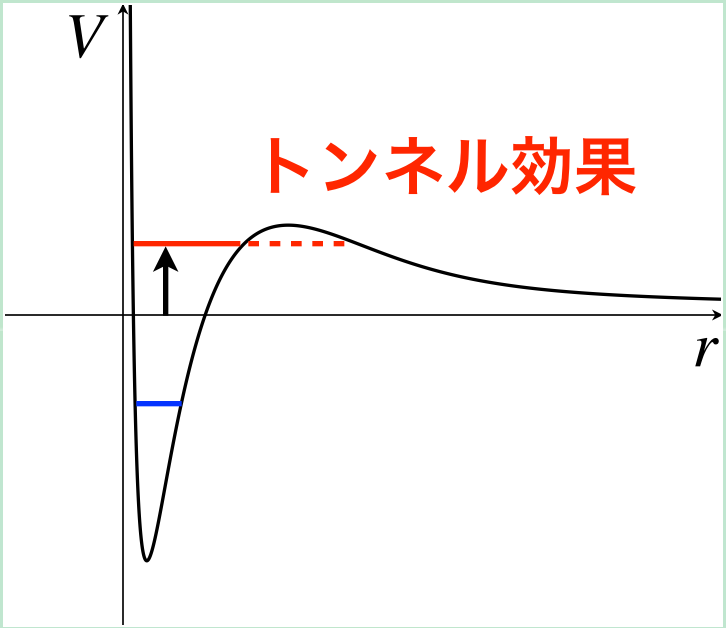
A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

安定な状態

- 束縛状態：$E < 0$

不安定な共鳴“状態”

- ポテンシャル障壁で$E > 0$
- トンネル効果で不安定
- 時間がたつと連続状態に崩壊する



共鳴状態の奇妙な性質

崩壊の性質の記述：原子核のα崩壊の理論

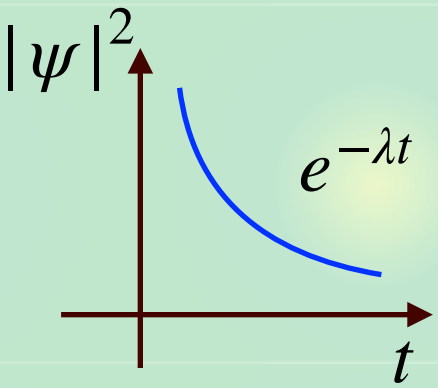
G. Gamow, Z. Phys. 51, 204 (1928)

- 固有エネルギーに虚部を手で導入

Um diese Schwierigkeit zu überwinden, müssen wir annehmen, daß die Schwingungen gedämpft sind, und E komplex setzen:

$$E = E_0 + i\frac{h\lambda}{4\pi},$$

wo E_0 die gewöhnliche Energie ist und λ das Dämpfungsdekrement (Zerfallskonstante). Dann sehen wir aber aus den Relationen (2a) und (2b),



- 時間依存性（符号に注意）：確率が時間とともに減衰する

$$\psi = \Psi(q) \cdot e^{+\frac{2\pi i E}{h}t}, \propto e^{+2\pi i E_0 t/h} e^{-(\lambda/2)t}, \quad |\psi|^2 \propto e^{-\lambda t}$$

エルミート演算子（ハミルトニアン）の固有値は実数では？

- 波動関数が２乗可積分でなければ複素エネルギー固有値がOK
- 平均２乗半径（大きさ）などが複素数に。解釈？

卒研について

卒研の目的

- ハドロン物理を通じて研究の雰囲気を感じる

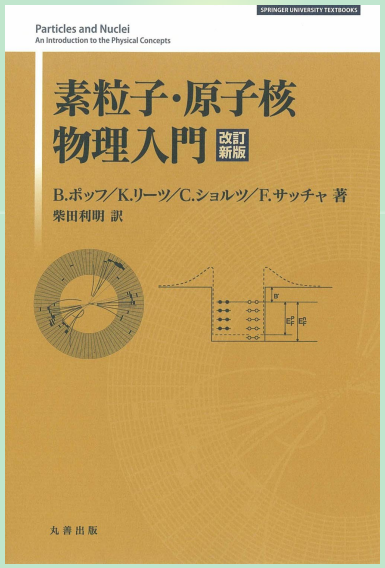
卒研の流れ（前期）

- 基礎知識の習得（ゼミ）

グリフィス 著「素粒子物理学」丸善

B. ポッフ他 著「素粒子原子核物理入門」丸善

など



- ゼミのテキストは興味（と能力）に応じて設定

- 数値計算、プレゼンテーションの練習など

卒研について

卒研の流れ（後期）

- テーマを設定し研究を開始
- 最終的に卒研発表会で成果発表

研究テーマ例

- s 波束縛状態のハドロンにおけるクラスター構造
- s 波と p 波の弱束縛状態の性質
- クォークとハドロンの自由度を含むポテンシャルの振る舞い
- Ξ_c 崩壊におけるΞ共鳴の研究

…

研究テーマは自由

量子物性理論

カラー超伝導

フェッシュバッハ共鳴

非平衡動力学

統計物理・ダイナミクス

素粒子

超弦理論

ホログラフィックQCD

原子核・ハドロン

強い相互作用(QCD)の物理

重イオン衝突

中性子星

状態方程式

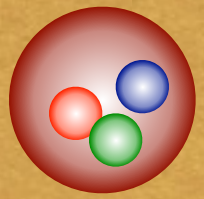
超新星、重力波

宇宙

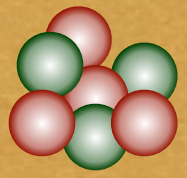
より詳細は研究室訪問で

まとめ1

- 原子核ハドロン物理
  - 強い相互作用が生む多くの未解決問題を研究
- ハドロン
  - クォーク、グルーオンの自己束縛系



  - QCDが基本相互作用
- 原子核
  - 陽子、中性子の自己束縛系



  - 核力が基本相互作用

まとめ2

- 強い相互作用
  - 重力、電磁気力と全く異なる性質の力
  - １つの式から多様な物理が生まれる

$$\mathscr{L}_{\mathrm{QCD}} = -\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_a + \bar{q}_\alpha(i\gamma^\mu D^{\alpha\beta}_\mu - m\delta^{\alpha\beta})q_\beta$$

- 現代のハドロン物理の未解決問題の例
  - カラー閉じ込め
  - エキゾチックハドロン
  - 共鳴（不安定）状態の物理