

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

2019, Oct. 30th 1

目次



導入

- 原子核とは？ハドロンとは？
- 自然界の力と強い相互作用



原子核物理

- ニホニウム — 核子はいくつまで結合できるか？



ハドロン物理

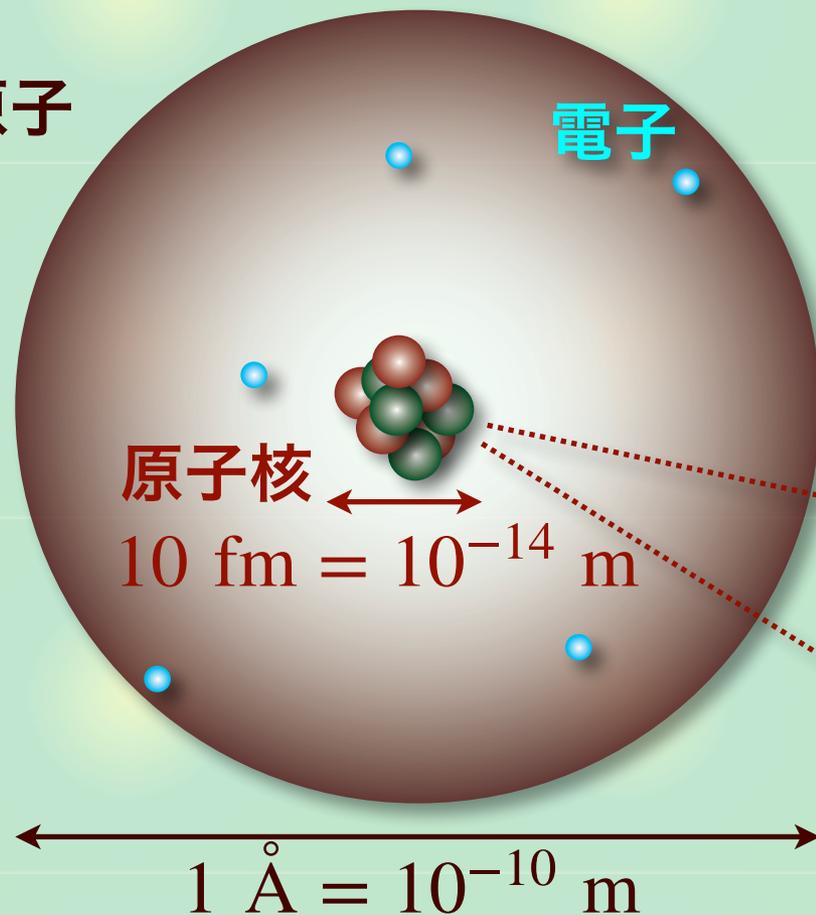
- 現代の未解決問題



まとめ

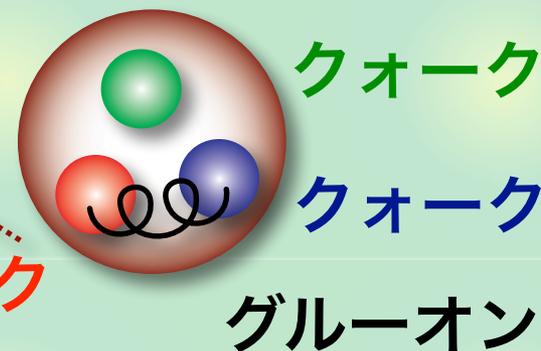
原子、原子核、ハドロン

原子



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



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

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

Baryons		Mesons		Charmed Baryons		Charmed Mesons	
J^P	State	J^P	State	J^P	State	J^P	State
$1/2^+$	$\Delta(1232)$	0^-	π	$1/2^+$	Λ_c^+	0^-	π_c^+
$1/2^+$	$\Delta(1600)$	0^-	η	$1/2^+$	Λ_c^0	0^-	η_c^0
$1/2^+$	$\Delta(1620)$	0^-	η'	$1/2^+$	Σ_c^+	0^-	$\eta_c(1S)$
$3/2^-$	$\Delta(1700)$	0^-	ω	$3/2^-$	Σ_c^0	0^-	$\eta_c(2S)$
$1/2^-$	$\Delta(1750)$	0^-	ϕ	$3/2^-$	Σ_c^-	0^-	$\eta_c(3S)$
$1/2^-$	$\Delta(1900)$	0^-	ρ	$3/2^-$	Ξ_c^+	0^-	$\eta_c(4S)$
$5/2^-$	$\Delta(1905)$	0^-	$\omega(782)$	$3/2^-$	Ξ_c^0	0^-	$\eta_c(5S)$
$5/2^+$	$\Delta(1910)$	0^-	$\omega(1370)$	$3/2^-$	Ξ_c^-	0^-	$\eta_c(6S)$
*	$\Delta(1920)$	0^-	$\omega(1700)$	$3/2^-$	Ω_c^0	0^-	$\eta_c(7S)$
$3/2^-$	$\Delta(1930)$	0^-	$\omega(1715)$	$3/2^-$	Ω_c^-	0^-	$\eta_c(8S)$
$1/2^+$	$\Delta(1940)$	0^-	$\omega(1720)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(9S)$
$3/2^+$	$\Delta(1950)$	0^-	$\omega(1730)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(10S)$
$1/2^+$	$\Delta(1970)$	0^-	$\omega(1740)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(11S)$
$1/2^+$	$\Delta(1980)$	0^-	$\omega(1750)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(12S)$
$1/2^+$	$\Delta(1990)$	0^-	$\omega(1760)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(13S)$
$3/2^+$	$\Delta(2000)$	0^-	$\omega(1770)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(14S)$
$5/2^+$	$\Delta(2010)$	0^-	$\omega(1780)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(15S)$
$5/2^+$	$\Delta(2020)$	0^-	$\omega(1790)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(16S)$
$5/2^+$	$\Delta(2030)$	0^-	$\omega(1800)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(17S)$
$5/2^+$	$\Delta(2040)$	0^-	$\omega(1810)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(18S)$
$5/2^+$	$\Delta(2050)$	0^-	$\omega(1820)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(19S)$
$5/2^+$	$\Delta(2060)$	0^-	$\omega(1830)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(20S)$
$5/2^+$	$\Delta(2070)$	0^-	$\omega(1840)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(21S)$
$5/2^+$	$\Delta(2080)$	0^-	$\omega(1850)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(22S)$
$5/2^+$	$\Delta(2090)$	0^-	$\omega(1860)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(23S)$
$5/2^+$	$\Delta(2100)$	0^-	$\omega(1870)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(24S)$
$5/2^+$	$\Delta(2110)$	0^-	$\omega(1880)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(25S)$
$5/2^+$	$\Delta(2120)$	0^-	$\omega(1890)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(26S)$
$5/2^+$	$\Delta(2130)$	0^-	$\omega(1900)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(27S)$
$5/2^+$	$\Delta(2140)$	0^-	$\omega(1910)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(28S)$
$5/2^+$	$\Delta(2150)$	0^-	$\omega(1920)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(29S)$
$5/2^+$	$\Delta(2160)$	0^-	$\omega(1930)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(30S)$
$5/2^+$	$\Delta(2170)$	0^-	$\omega(1940)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(31S)$
$5/2^+$	$\Delta(2180)$	0^-	$\omega(1950)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(32S)$
$5/2^+$	$\Delta(2190)$	0^-	$\omega(1960)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(33S)$
$5/2^+$	$\Delta(2200)$	0^-	$\omega(1970)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(34S)$
$5/2^+$	$\Delta(2210)$	0^-	$\omega(1980)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(35S)$
$5/2^+$	$\Delta(2220)$	0^-	$\omega(1990)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(36S)$
$5/2^+$	$\Delta(2230)$	0^-	$\omega(2000)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(37S)$
$5/2^+$	$\Delta(2240)$	0^-	$\omega(2010)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(38S)$
$5/2^+$	$\Delta(2250)$	0^-	$\omega(2020)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(39S)$
$5/2^+$	$\Delta(2260)$	0^-	$\omega(2030)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(40S)$
$5/2^+$	$\Delta(2270)$	0^-	$\omega(2040)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(41S)$
$5/2^+$	$\Delta(2280)$	0^-	$\omega(2050)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(42S)$
$5/2^+$	$\Delta(2290)$	0^-	$\omega(2060)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(43S)$
$5/2^+$	$\Delta(2300)$	0^-	$\omega(2070)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(44S)$
$5/2^+$	$\Delta(2310)$	0^-	$\omega(2080)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(45S)$
$5/2^+$	$\Delta(2320)$	0^-	$\omega(2090)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(46S)$
$5/2^+$	$\Delta(2330)$	0^-	$\omega(2100)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(47S)$
$5/2^+$	$\Delta(2340)$	0^-	$\omega(2110)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(48S)$
$5/2^+$	$\Delta(2350)$	0^-	$\omega(2120)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(49S)$
$5/2^+$	$\Delta(2360)$	0^-	$\omega(2130)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(50S)$
$5/2^+$	$\Delta(2370)$	0^-	$\omega(2140)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(51S)$
$5/2^+$	$\Delta(2380)$	0^-	$\omega(2150)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(52S)$
$5/2^+$	$\Delta(2390)$	0^-	$\omega(2160)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(53S)$
$5/2^+$	$\Delta(2400)$	0^-	$\omega(2170)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(54S)$
$5/2^+$	$\Delta(2410)$	0^-	$\omega(2180)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(55S)$
$5/2^+$	$\Delta(2420)$	0^-	$\omega(2190)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(56S)$
$5/2^+$	$\Delta(2430)$	0^-	$\omega(2200)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(57S)$
$5/2^+$	$\Delta(2440)$	0^-	$\omega(2210)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(58S)$
$5/2^+$	$\Delta(2450)$	0^-	$\omega(2220)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(59S)$
$5/2^+$	$\Delta(2460)$	0^-	$\omega(2230)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(60S)$
$5/2^+$	$\Delta(2470)$	0^-	$\omega(2240)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(61S)$
$5/2^+$	$\Delta(2480)$	0^-	$\omega(2250)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(62S)$
$5/2^+$	$\Delta(2490)$	0^-	$\omega(2260)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(63S)$
$5/2^+$	$\Delta(2500)$	0^-	$\omega(2270)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(64S)$
$5/2^+$	$\Delta(2510)$	0^-	$\omega(2280)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(65S)$
$5/2^+$	$\Delta(2520)$	0^-	$\omega(2290)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(66S)$
$5/2^+$	$\Delta(2530)$	0^-	$\omega(2300)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(67S)$
$5/2^+$	$\Delta(2540)$	0^-	$\omega(2310)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(68S)$
$5/2^+$	$\Delta(2550)$	0^-	$\omega(2320)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(69S)$
$5/2^+$	$\Delta(2560)$	0^-	$\omega(2330)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(70S)$
$5/2^+$	$\Delta(2570)$	0^-	$\omega(2340)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(71S)$
$5/2^+$	$\Delta(2580)$	0^-	$\omega(2350)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(72S)$
$5/2^+$	$\Delta(2590)$	0^-	$\omega(2360)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(73S)$
$5/2^+$	$\Delta(2600)$	0^-	$\omega(2370)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(74S)$
$5/2^+$	$\Delta(2610)$	0^-	$\omega(2380)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(75S)$
$5/2^+$	$\Delta(2620)$	0^-	$\omega(2390)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(76S)$
$5/2^+$	$\Delta(2630)$	0^-	$\omega(2400)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(77S)$
$5/2^+$	$\Delta(2640)$	0^-	$\omega(2410)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(78S)$
$5/2^+$	$\Delta(2650)$	0^-	$\omega(2420)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(79S)$
$5/2^+$	$\Delta(2660)$	0^-	$\omega(2430)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(80S)$
$5/2^+$	$\Delta(2670)$	0^-	$\omega(2440)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(81S)$
$5/2^+$	$\Delta(2680)$	0^-	$\omega(2450)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(82S)$
$5/2^+$	$\Delta(2690)$	0^-	$\omega(2460)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(83S)$
$5/2^+$	$\Delta(2700)$	0^-	$\omega(2470)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(84S)$
$5/2^+$	$\Delta(2710)$	0^-	$\omega(2480)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(85S)$
$5/2^+$	$\Delta(2720)$	0^-	$\omega(2490)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(86S)$
$5/2^+$	$\Delta(2730)$	0^-	$\omega(2500)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(87S)$
$5/2^+$	$\Delta(2740)$	0^-	$\omega(2510)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(88S)$
$5/2^+$	$\Delta(2750)$	0^-	$\omega(2520)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(89S)$
$5/2^+$	$\Delta(2760)$	0^-	$\omega(2530)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(90S)$
$5/2^+$	$\Delta(2770)$	0^-	$\omega(2540)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(91S)$
$5/2^+$	$\Delta(2780)$	0^-	$\omega(2550)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(92S)$
$5/2^+$	$\Delta(2790)$	0^-	$\omega(2560)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(93S)$
$5/2^+$	$\Delta(2800)$	0^-	$\omega(2570)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(94S)$
$5/2^+$	$\Delta(2810)$	0^-	$\omega(2580)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(95S)$
$5/2^+$	$\Delta(2820)$	0^-	$\omega(2590)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(96S)$
$5/2^+$	$\Delta(2830)$	0^-	$\omega(2600)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(97S)$
$5/2^+$	$\Delta(2840)$	0^-	$\omega(2610)$	$3/2^-$	Ω_c^+	0^-	$\eta_c(98S)$
$5/2^+$	$\Delta(2850)$	0^-	$\omega(2620)$				

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。

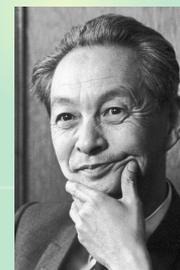
- 重力：ニュートン力学 → 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 → 量子電磁力学 (QED)



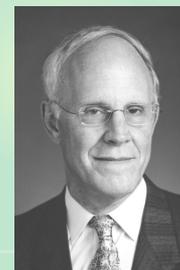
(1965年)



- 強い相互作用：量子色力学 (QCD)



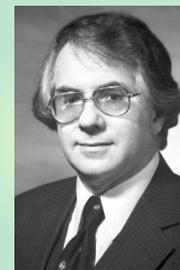
(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論



(1979年)

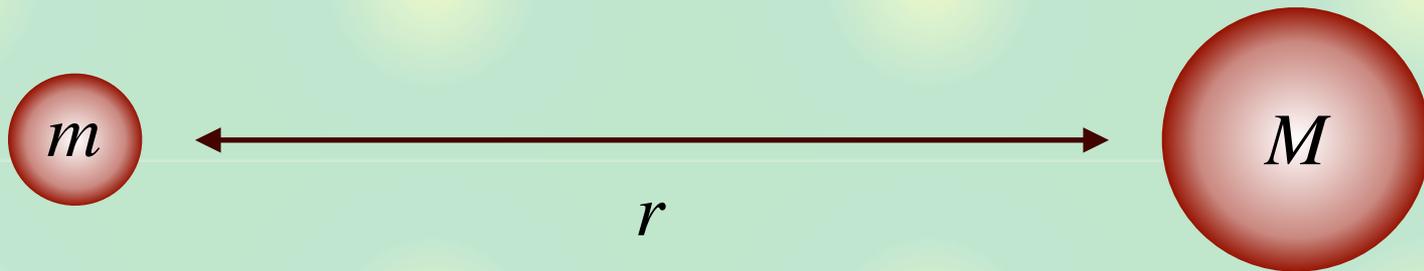


<https://www.nobelprize.org>

重力

質量 m と M の粒子を距離 r 離して置く

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

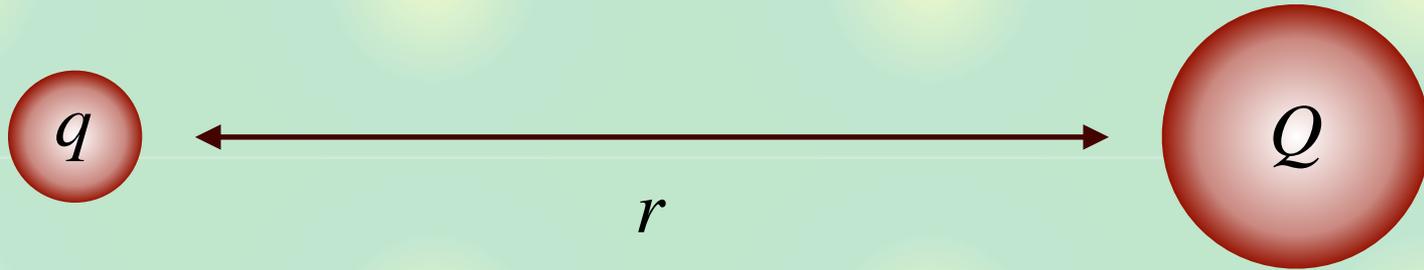


- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- G :万有引力定数
- 重力は常に引力

電磁気力

電荷 q と Q の粒子を距離 r 離して置く

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$



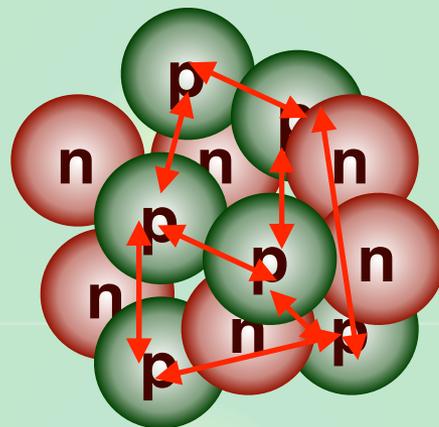
- 力は距離の2乗に反比例
- **電荷**が力の強さを決める
- $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$:クーロン結合定数
- 電磁気力は引力でも**斥力**でもある

} 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}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**

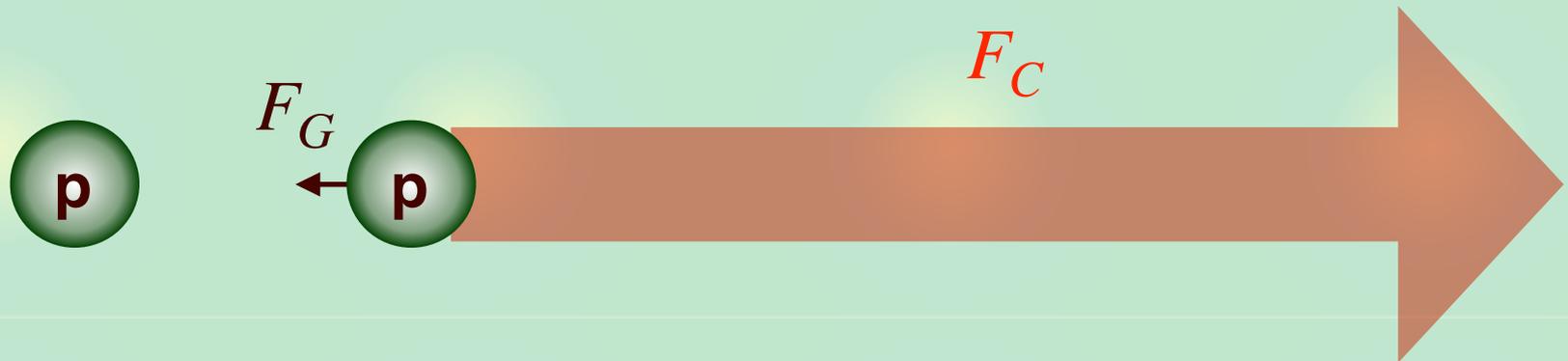
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

強さの比較

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

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

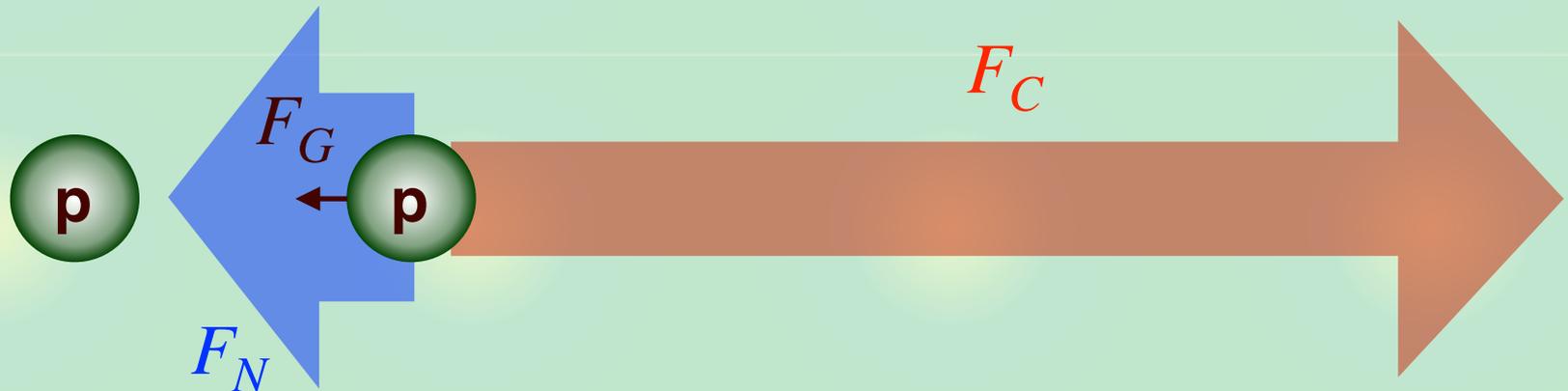
$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \simeq 5.7 \times 10^1 \text{ [N]}$$



- 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

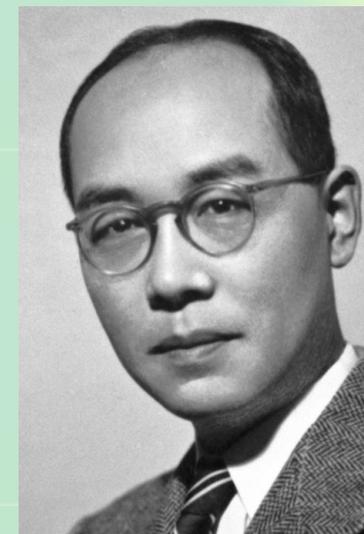
$$\sim 8.6 \times 10^{12} \text{ J} \sim 2.1 \times 10^9 \text{ kcal}$$

核力のメカニズム

核力は π 中間子の交換で媒介される

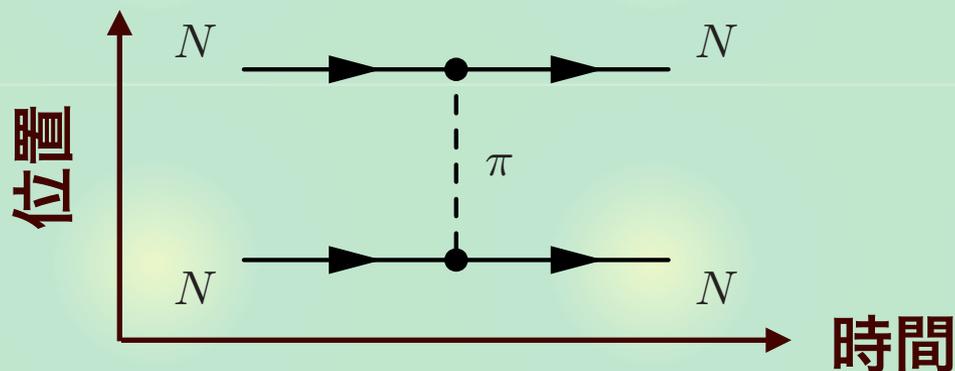


(1949年)



<https://www.nobelprize.org>

- ファインマン図による表現



- **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

目次



導入

- 原子核とは？ハドロンとは？
- 自然界の力と強い相互作用



原子核物理

- ニホニウム — 核子はいくつまで結合できるか？



ハドロン物理

- 現代のハドロン物理の話題



まとめ

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

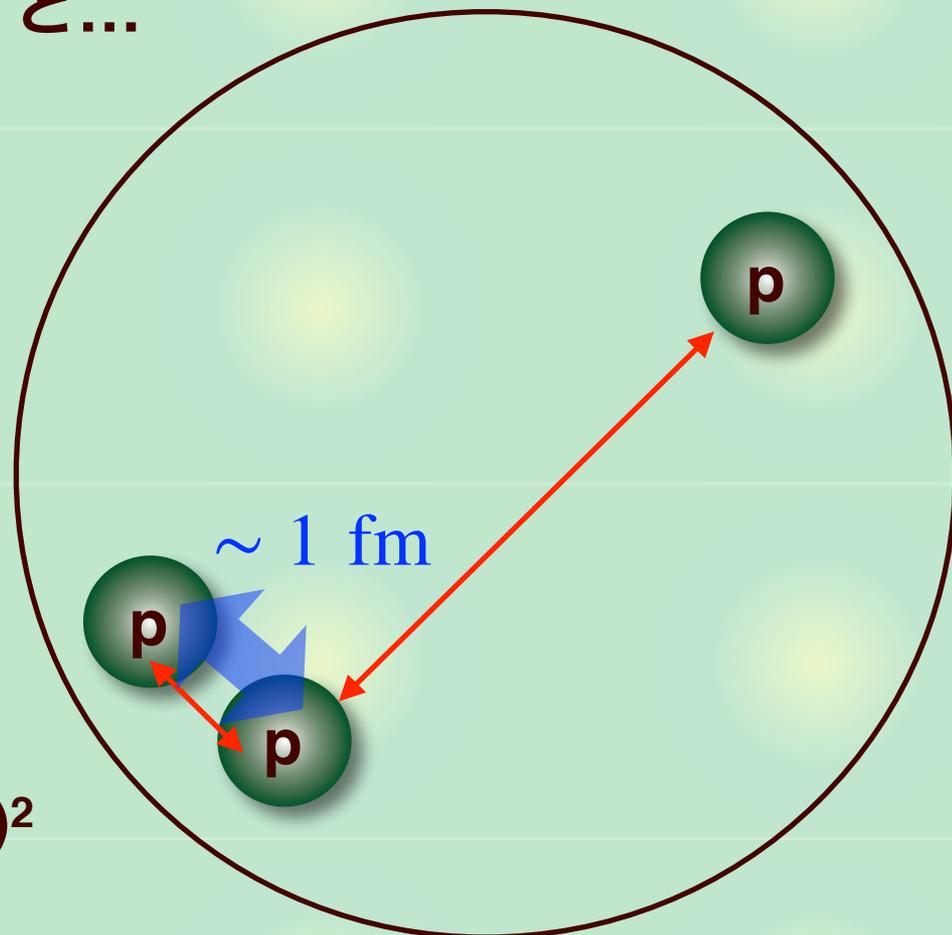
近くの核子とのみ引力

相互作用ペアの数 \propto 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 \propto (陽子数)²



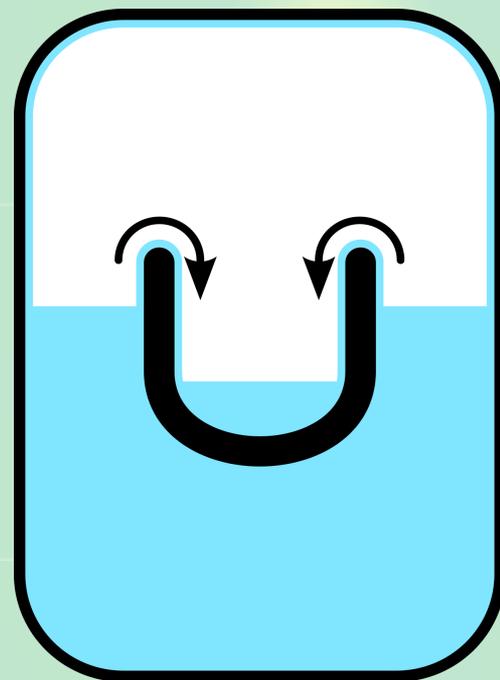
陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

→ 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、 ^4He 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： ^4He 超流動



<https://ja.wikipedia.org/wiki/超流動>

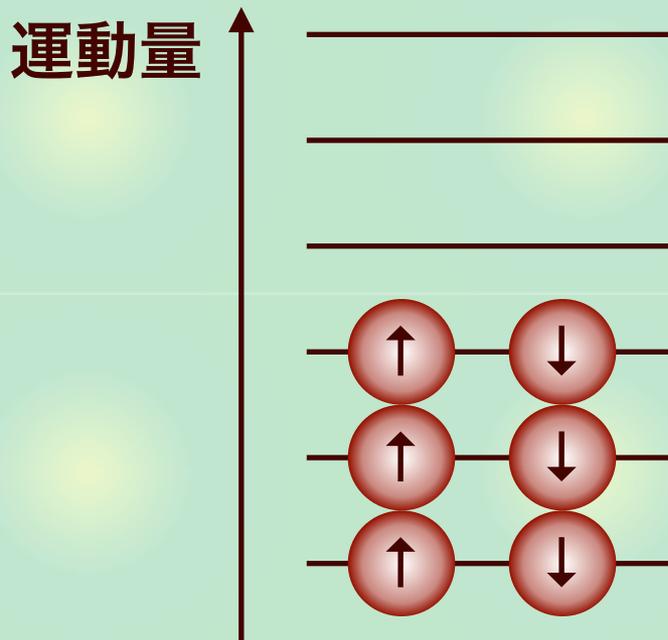
フェルミ粒子 (フェルミオン)

- スピンが半整数 ($1/2, 3/2, \dots$)
- **核子**、クォーク、電子、ニュートリノ、 ^3He 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 ($\uparrow \downarrow$) と運動量 (離散的な値)

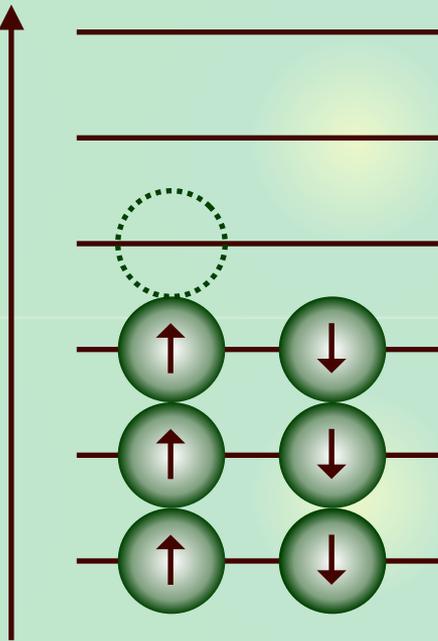


- 運動量 (エネルギー) の低い状態に粒子を追加したい
- 既に他の粒子がいる状態には入れない
- 運動量の低い状態から順番に占有される

原子核の場合

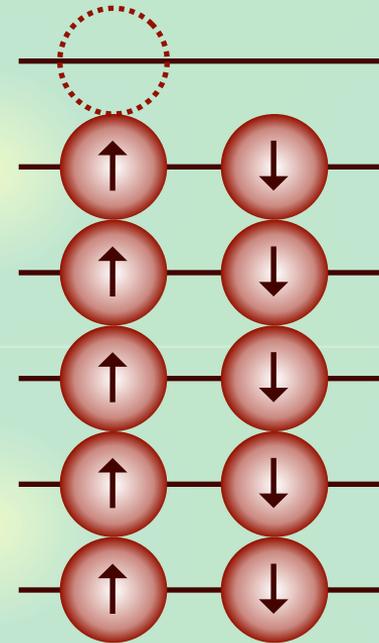
原子核中に中性子ばかりを増やしていくと...

運動量



陽子

運動量



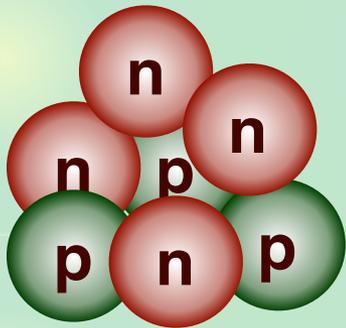
中性子

- 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**

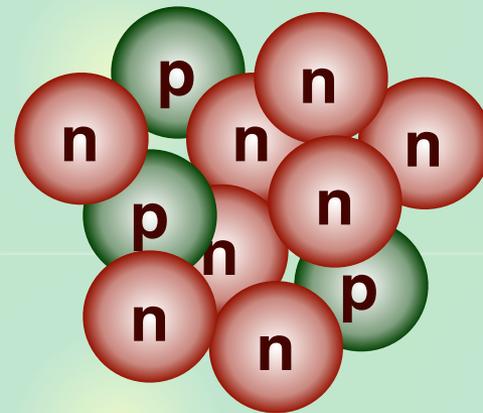
エキゾチックな原子核

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 ${}^7\text{Li}$



中性子過剰なリチウム ${}^{11}\text{Li}$

- 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

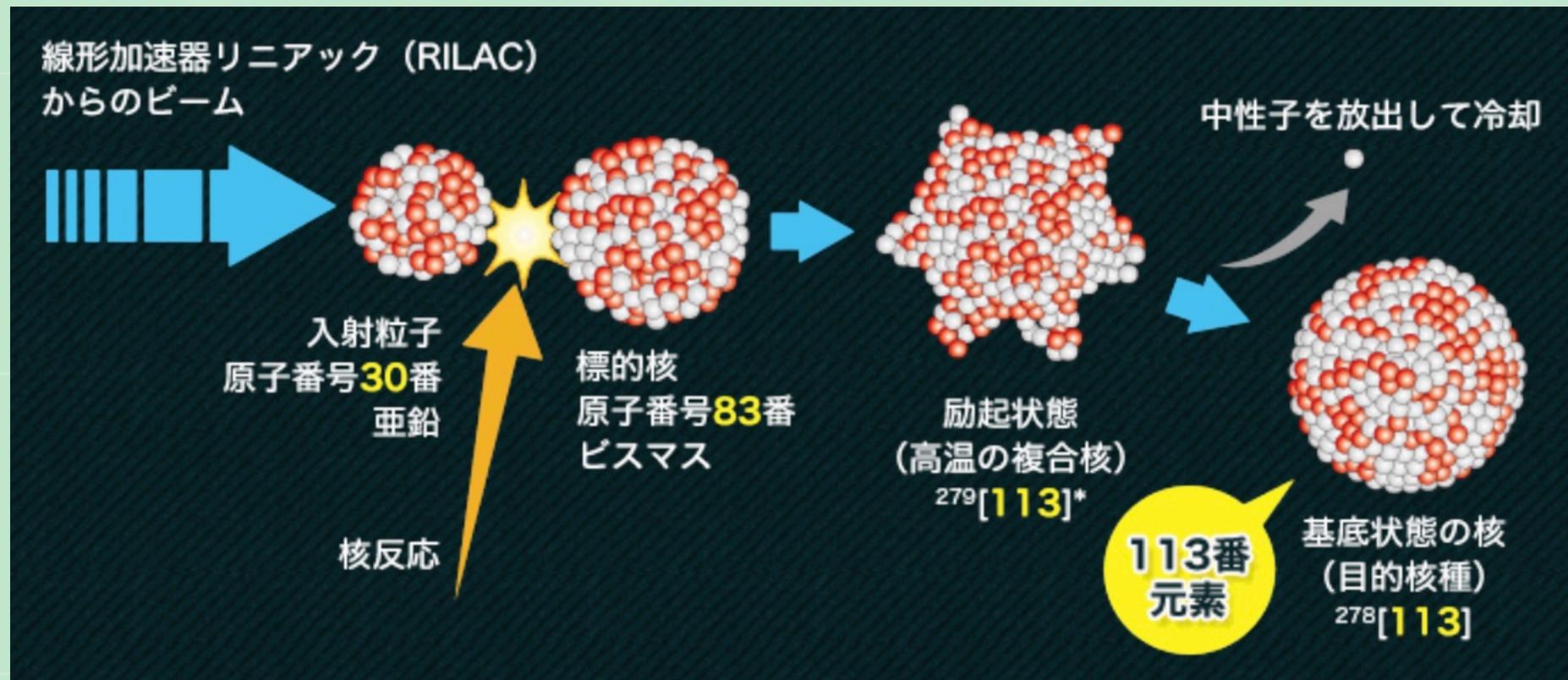
113番元素Nh（ニホニウム）

- 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



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



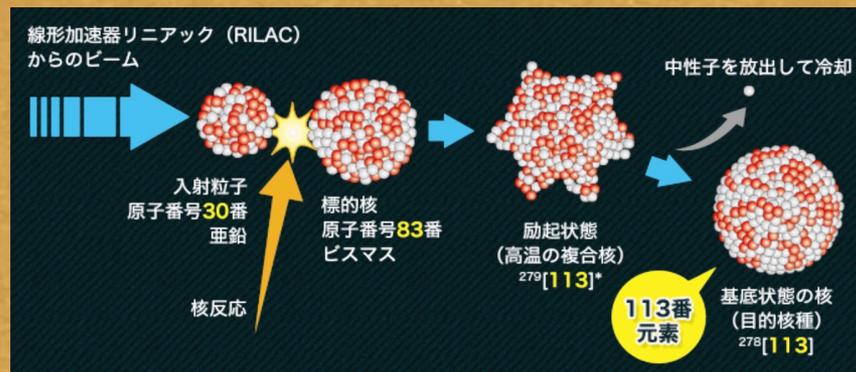
原子核の性質

- 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 β 崩壊で不安定



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



導入

- 原子核とは？ハドロンとは？
- 自然界の力と強い相互作用



原子核物理

- ニホニウム — 核子はいくつまで結合できるか？



ハドロン物理

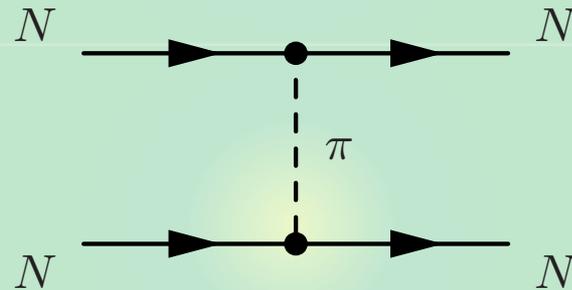
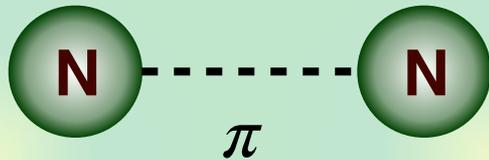
- 現代の未解決問題



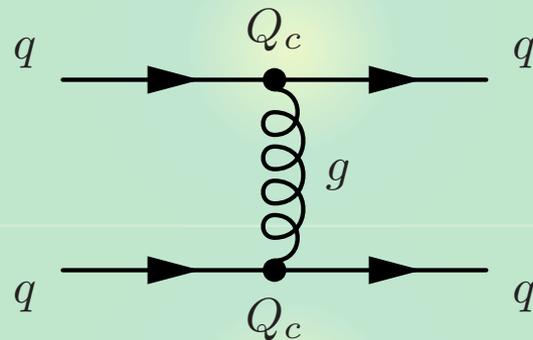
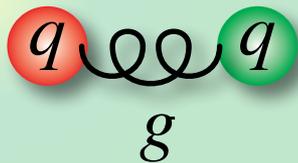
まとめ

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

強い相互作用の基礎理論

量子電磁力学 Quantum Electrodynamics, QED

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

- 電子と光子の理論
- 量子効果を含めて電磁相互作用の全てを記述

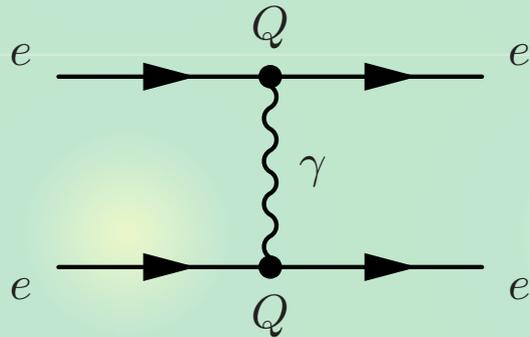
量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}_\alpha (i\gamma^\mu D_\mu^{\alpha\beta} - m\delta^{\alpha\beta})q_\beta$$

- クォークとグルーオンの理論
- 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

QEDとQCDの違い

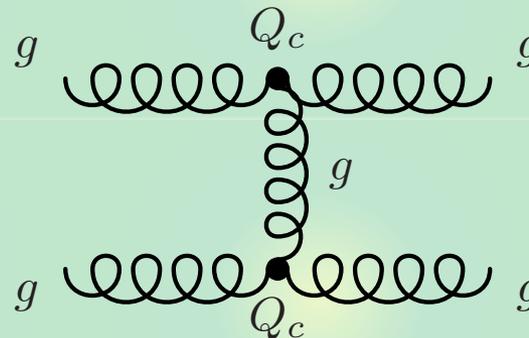
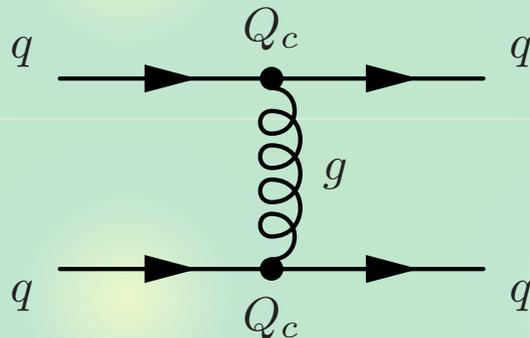
電磁相互作用：電荷を持つ電子間で光子を交換



$$\Rightarrow F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}$$

- 光子は電荷を持たない：光子間は相互作用しない

強い相互作用：カラー電荷を持つクォーク間でグルーオンを交換

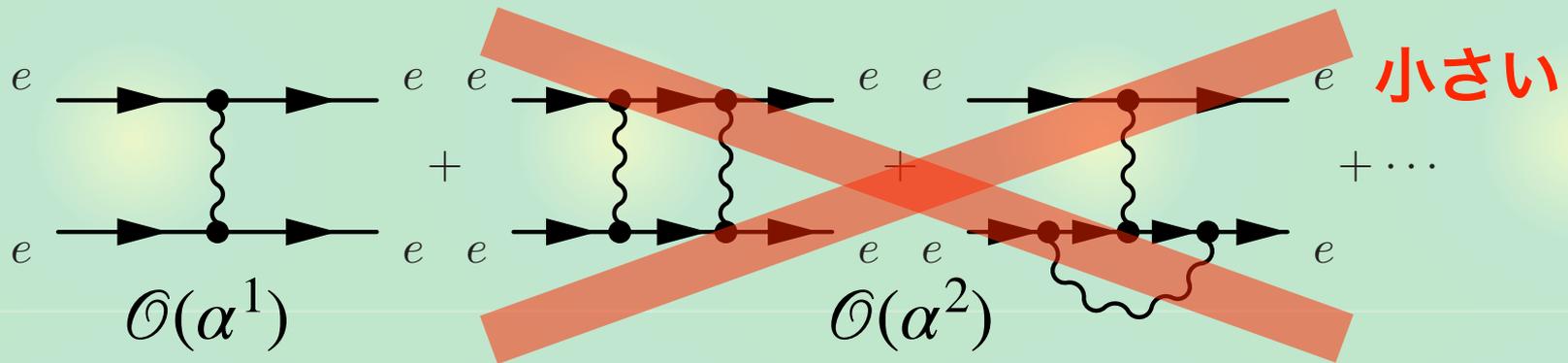


- グルーオンもカラー電荷を持つ：グルーオン間も相互作用

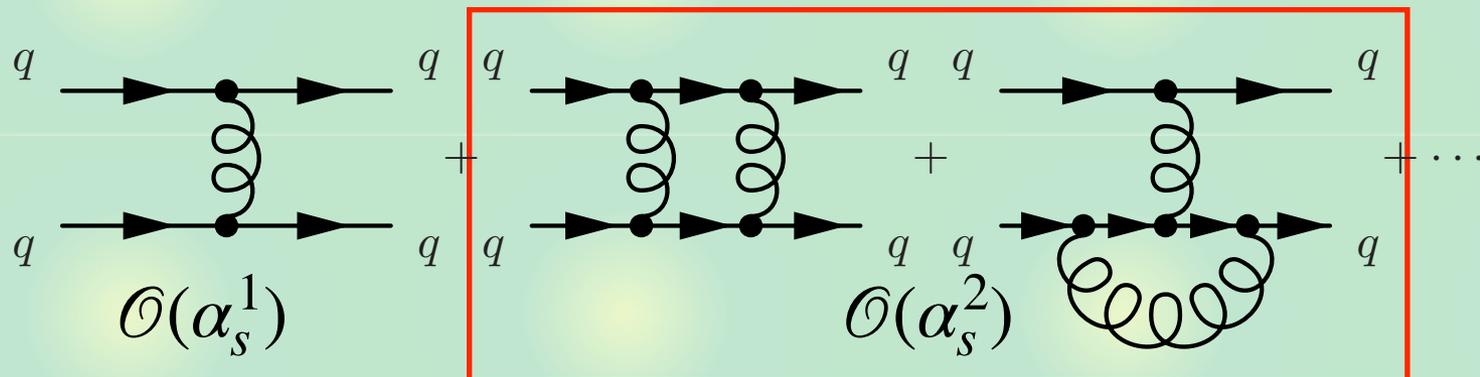
摂動展開

ファインマン図は実は無限個ある

- 電磁相互作用 $\alpha \sim 1/137$: 摂動展開可能 (有限個でOK)



- 強い相互作用 $\alpha_s \sim 1$: 摂動展開不可能 **無視できない!**

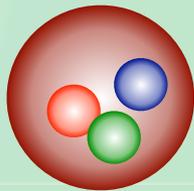


- 理論が分かっているのに**解けない** (標準理論でQCDだけ)

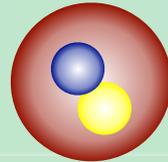
未解決の問題

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（電磁氣的）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

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 ⁺	***

LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)		STRANGE (S = ±1, C = B = 0)		CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)		$c\bar{c}$ $F(J^{PC})$	
$F(J^{PC})$		$F(J^{PC})$		$F(J^{PC})$		$F(J^{PC})$	
• π^\pm	1 ⁻ (0 ⁻)	• $\omega(1680)$	0 ⁻ (1 ⁻ -)	• K^\pm	1/2(0 ⁻)	• D_s^\pm	0(0 ⁻)
• π^0	1 ⁻ (0 ⁻ +)	• $\rho_3(1690)$	1 ⁺ (3 ⁻ -)	• K^0	1/2(0 ⁻)	• D_s^\pm	0(?) [?]
• η	0 ⁺ (0 ⁻ +)	• $\rho(1700)$	1 ⁺ (1 ⁻ -)	• K_S^0	1/2(0 ⁻)	• $D_{s0}(2317)^\pm$	0(0 ⁺)
• $f_0(500)$	0 ⁺ (0 ⁺ +)	• $a_2(1700)$	1 ⁻ (2 ⁺ +)	• K_L^0	1/2(0 ⁻)	• $D_{s1}(2460)^\pm$	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 $qqq/q\bar{q}$ で記述できるものがほとんど

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

→ エキゾチックハドロンの問題

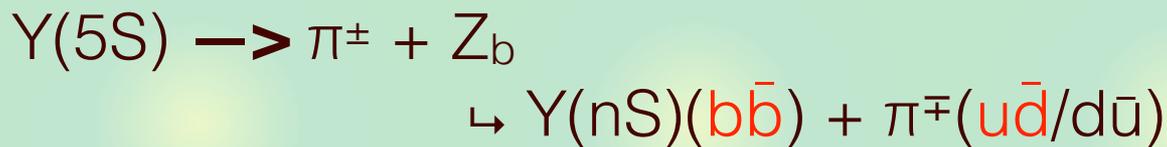
$\Lambda(1890)$	3/2 ⁺	****	$\Xi_b(5955)^-$	3/2 ⁺	***
$\Lambda(2000)$	*	*	Ω_b^-	1/2 ⁺	***
$\Lambda(2020)$	7/2 ⁺	*			
$\Lambda(2050)$	3/2 ⁻	*			
$\Lambda(2100)$	7/2 ⁻	****			
$\Lambda(2110)$	5/2 ⁺	***			
$\Lambda(2325)$	3/2 ⁻	*			
$\Lambda(2350)$	9/2 ⁺	***			
$\Lambda(2585)$	**	**			

• $D_s(2460)^+$	1/2(2 ⁺)	• $\chi_{c0}(2P)$	0 ⁺ (1 ⁺ +)
$D(2550)^0$	1/2(0 ⁻)	$h_2(2P)$? [?] (1 ⁺ +)
$D(2600)$	1/2(? [?])	$\chi_{c2}(2P)$	0 ⁺ (2 ⁺ +)
$D(2640)^\pm$	1/2(? [?])	• $\Upsilon(3S)$	0 ⁻ (1 ⁻ -)
$D(2750)$	1/2(? [?])	• $\Upsilon(3P)$	0 ⁺ (1 ⁺ +)
		• $\Upsilon(4S)$	0 ⁻ (1 ⁻ -)
		$\chi(10610)^\pm$	1 ⁺ (1 ⁺ +)
		$\chi(10610)^0$	1 ⁺ (1 ⁺ +)
		$\chi(10650)^\pm$? [?] (1 ⁺ +)
		• $\Upsilon(10860)$	0 ⁻ (1 ⁻ -)
		• $\Upsilon(11020)$	0 ⁻ (1 ⁻ -)

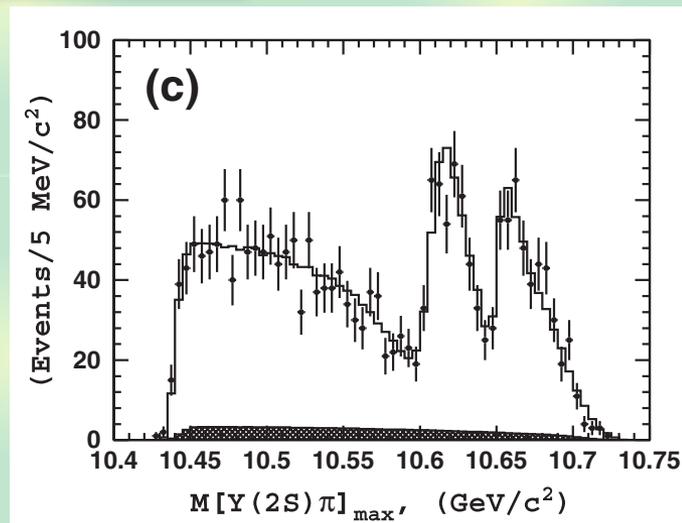
エキゾチックハドロンの候補

テトラクォーク (Belle)

: $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$

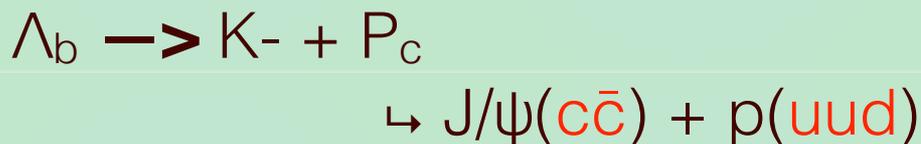


A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)



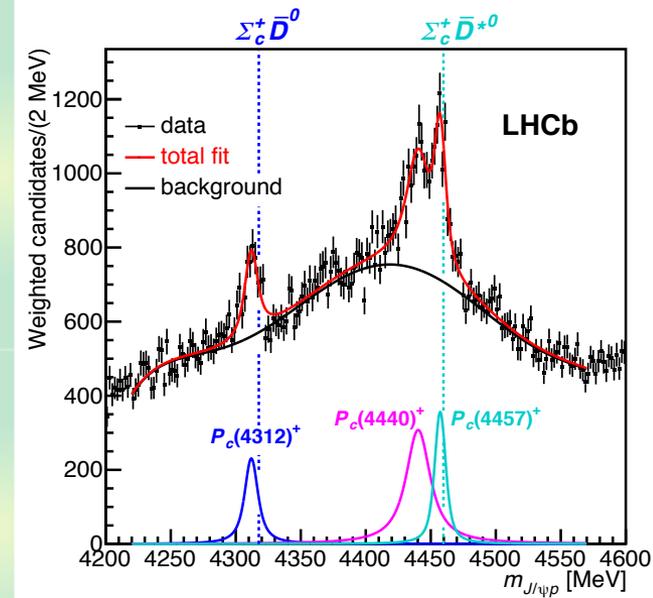
ペンタクォーク (LHCb)

: $P_c(4450)$, $P_c(4380)$



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

R. Aaij, *et al.*, arXiv:1904.03947[hep-ex]



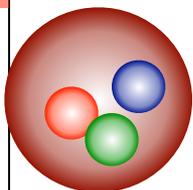
ごく少数しか観測されていない。なぜ少ないのかは未解明。

強い相互作用で不安定なハドロン

ハドロンの共鳴状態

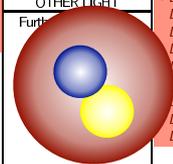
PDG2018 : <http://pdg.lbl.gov/>

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^-	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ ****
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	***	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1480)$	*	$\Xi(1690)$	***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ **	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_c(2940)^+$	***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Xi(1950)$	***	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$ ***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ****
$N(1685)$	*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(2120)$	*	$\Sigma_c(2800)$	***
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ **	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	**	Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1710)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1690)$	***	$\Xi(2370)$	**	Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2500)$	*	Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***			Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$ *	Ω^-	$3/2^+$ ****	Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ **	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ *	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Omega(2250)$	***	Ξ_c	$3/2^+$ ****
$N(1895)$	$1/2^-$ **	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$ **	$\Omega(2380)$	**	Ξ_c	$1/2^-$ ****
$N(1900)$	$3/2^+$ ***	$\Delta(2350)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Omega(2470)$	**	Ξ_c	$3/2^-$ ****
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ *			Ξ_c	***
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****			Ξ_c	***
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ *			Ξ_c	***
$N(2060)$	$5/2^-$ **	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$ ***			Ξ_c	***
$N(2100)$	$1/2^+$ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$ *			Ξ_c	*
$N(2120)$	$3/2^-$ **			$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****			Ω_c^0	$1/2^+$ ***
$N(2190)$	$7/2^-$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ **			$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$ ***
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ **			Ξ_{cc}^+	*
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *			Λ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ **	$\Sigma(2250)$	***			$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2455)$	**			$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**			Σ_b	$1/2^+$ ***
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(3000)$	*			Σ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(3170)$	*			Ξ_b^-	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***					Ξ_b^-	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****					Ξ_b^0	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2000)$	*					Ω_b^-	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$ *						
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****						
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***						
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***						
		$\Lambda(2585)$	**						



バリオン ~ 150種

LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)		STRANGE (S = ±1, C = B = 0)		CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)		$c\bar{c}$ $F_1(F_2)$	
$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$	$F_1(F_2)$
π^+	$1(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	K^*	$1/2(0^-)$	D_s^+	$0(0^-)$
π^0	$1(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	D_s^0	$0(2^+)$
η	$0^+(0^{++})$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2317)^+$	$0(0^+)$
$\eta(500)$	$0^+(0^{++})$	$\rho(1700)$	$1^-(2^{++})$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^+$	$0(1^+)$
$\omega(782)$	$0(1^-)$	$\rho(1710)$	$0^+(0^{++})$	$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^+$	$0(1^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}(2573)$	$0(2^+)$
$\omega(958)$	$0^+(0^{++})$	$\eta(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}(2700)^+$	$0(1^-)$
$\eta(958)$	$0^+(0^{++})$	$\eta(1810)$	$0^+(2^{++})$	$K_1^*(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}(2860)^+$	$0(2^+)$
$\omega(980)$	$0^+(0^{++})$	$X(1835)$	$?^?(2^-)$	$K_1^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}(3040)^+$	$0(2^+)$
$\omega(1020)$	$0(1^-)$	$X(1840)$	$?^?(2^?)$	$K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$		
$h_1(1170)$	$0(1^+)$	$\omega_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$		
$h_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$		
$a_1(1260)$	$1^+(1^+)$	$K_2^*(1880)$	$1^-(2^+)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$		
$f_1(1270)$	$0^+(2^+)$						
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_0^*(1580)$	$1/2(2^-)$		
$\pi(1300)$	$1(0^-)$	$\rho(1910)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^-)$		
$\eta(1395)$	$0^+(0^+)$	$f_0(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1650)$	$1/2(1^+)$		
$\pi(1395)$	$1(0^-)$	$\rho_3(1990)$	$0^+(3^-)$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$		
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$f_0(2010)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1770)$	$1/2(2^-)$		
$f_0(1370)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1780)$	$1/2(3^-)$		
$h_1(1380)$	$?^+(1^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(1820)$	$1/2(2^-)$		
$h_1(1400)$	$1(1^-)$	$a_1(2040)$	$1^-(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$		
$\eta(1405)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$		
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$\rho_2(2100)$	$1^-(2^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$		
$\omega(1420)$	$0(1^-)$	$f_0(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(2045)$	$1/2(4^+)$		
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_2^*(2250)$	$1/2(2^+)$		
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$\rho(2170)$	$0(1^-)$	$K_0^*(2320)$	$1/2(3^-)$		
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(2380)$	$1/2(5^-)$		
$\eta(1475)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2220)$	$0^+(2^+)$	$K_0^*(2500)$	$1/2(4^-)$		
$f_0(1500)$	$0^+(0^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^+)$	$K(3100)$	$?^?(2^?)$		
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^-)$				
$f_2^*(1525)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(2^+)$				
$f_2^*(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(4^+)$				
$h_1(1570)$	$1^+(1^+)$	$f_0(2330)$	$0^+(0^+)$				
$h_1(1595)$	$0(1^+)$	$f_0(2340)$	$0^+(2^+)$				
$\pi_1(1600)$	$1(1^-)$	$\rho_3(2350)$	$1^+(5^-)$				
$a_1(1640)$	$1(1^+)$	$a_1(2450)$	$1^-(6^+)$				
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2510)$	$0^+(6^+)$				
$\rho_2(1645)$	$0^+(2^+)$						
$\omega(1650)$	$0(1^-)$						
$\omega_3(1670)$	$0(3^-)$						
$\rho_2(1670)$	$1^-(2^+)$						



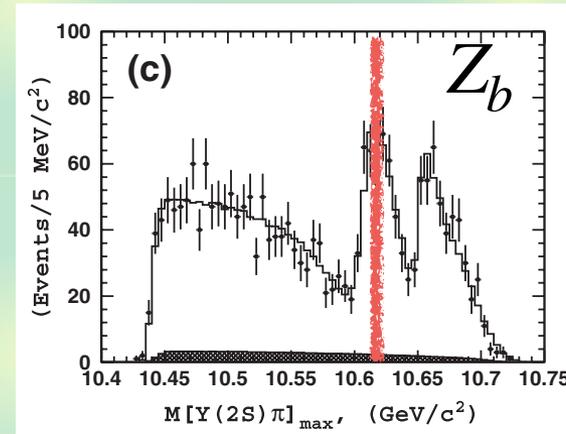
メソン ~ 210種

- 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



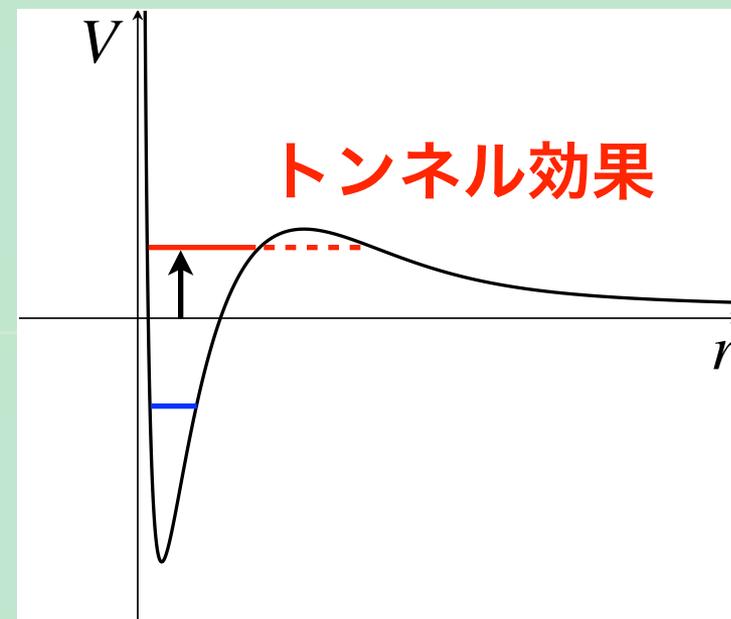
安定な状態

- 束縛状態： $E < 0$

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

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

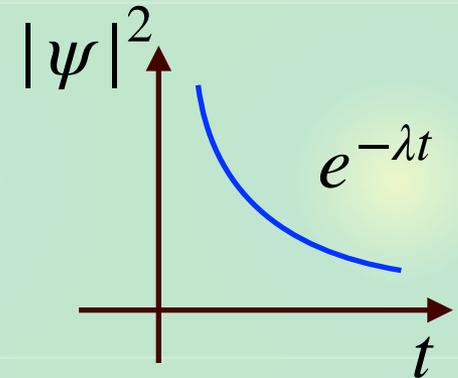
G. Gamow, Z. Phys. 51, 204 (1928)

- 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:

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

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

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

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？

まとめ1



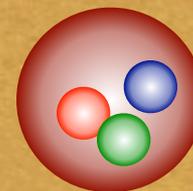
原子核ハドロン物理

- 強い相互作用が生む多くの未解決問題を研究



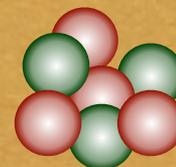
ハドロン

- 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

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}_\alpha (i\gamma^\mu D_\mu^{\alpha\beta} - m\delta^{\alpha\beta})q_\beta$$



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

研究について

理論物理の研究

- 世界で誰も知らないことを計算によって明らかにする
- 論文を書く（成果の公表）
- 発表をする（研究会、国際会議）
- 議論をする（新しい研究の種）

ハドロン物理の主な研究手法

- 場の量子論（特殊相対論＋量子力学）
- 数値計算（実験のようなもの）
- ただしテーマによってはこの限りではない

研究テーマは自由

量子物性理論

素粒子

カラー超伝導
フェッシュバッハ共鳴

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

非平衡動力学

超新星、重力波

統計物理・ダイナミクス

宇宙

グループB

グループA

卒検について

卒検の目的

- ハドロン物理を通じて研究の雰囲気を感じる

卒検の流れ

- 前期：基礎知識の習得（ゼミ）

鷲見義雄 著「原子核物理入門」裳華房

B. ポッフ他 著「素粒子原子核物理入門」丸善
など

- 後期：テーマを設定し研究を開始

- 卒研発表会：成果を人に伝える

- ゼミのテキスト、研究テーマは興味（と能力）に応じて設定

