

原子核ハドロン物理の世界



兵藤 哲雄

大阪大学核物理研究センター

2025, Nov. 21st 1



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：核子はいくつまで結合できるか？

- ニホニウム



ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

- エキゾチックハドロン



まとめ

原子、原子核、ハドロン

原子

電子

原子核

$10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$

$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

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

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

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

- 安定核約300種、不安定核約2000種、未発見約4000種



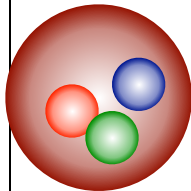
ハドロンとは

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

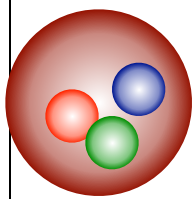
p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$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

バリオン：陽子、中性子など



3クォーク qqq

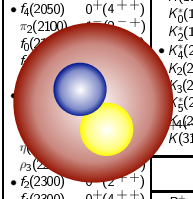
バリオン：陽子、中性子など



3クォーク qqq

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)		$c\bar{c}$ $f_1(f_0)$	
$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$	$F(F^C)$
$\pi^\pm$ $1^-(0^-)$ π^0 $1^-(0^-)$ η $0^+(0^-)$ $\eta(500)$ $0^+(0^-)$ $\eta(770)$ $1^+(1^-)$ $\omega(782)$ $0^-(1^-)$ $\eta(958)$ $0^+(0^-)$ $\eta(980)$ $0^+(0^-)$ $a_0(980)$ $1^-(0^-)$ $\eta(1020)$ $0^-(1^-)$ $h_1(1170)$ $0^-(1^-)$ $h_1(1235)$ $1^+(1^-)$ $a_1(1260)$ $1^-(1^-)$ $f_2(1270)$ $0^+(2^-)$ f_1 η π ρ f_1	$\phi(1680)$ $0^-(1^-)$ $\rho(1690)$ $1^+(3^-)$ $\rho(1700)$ $1^+(1^-)$ $\omega(1700)$ $1^-(2^-)$ $f_0(1710)$ $0^+(0^-)$ $\eta(1760)$ $0^-(0^-)$ $\pi(1800)$ $1^-(0^-)$ $f_2(1810)$ $0^+(2^-)$ $X(1835)$ $2^?(2^-)$ $X(1840)$ $0^-(3^-)$ $\phi_3(1850)$ $0^-(3^-)$ $\eta_2(1870)$ $0^+(2^-)$ $\eta_2(1880)$ $1^-(2^-)$ $\eta(1900)$ $1^+(1^-)$	$K^\pm$ $1/2(0^-)$ K^0 $1/2(0^-)$ K_S^0 $1/2(0^-)$ K_L^0 $1/2(0^-)$ $K^*(892)$ $1/2(1^-)$ $K_1(1270)$ $1/2(1^-)$ $K_1(1400)$ $1/2(1^-)$ $K^*(1410)$ $1/2(1^-)$ $K_0^*(1430)$ $1/2(0^-)$ $K_0^*(1430)$ $1/2(0^-)$ $K(1460)$ $1/2(0^-)$ $K_0^*(1580)$ $1/2(2^-)$	$D_s^\pm$ $0(0^-)$ D_s^* $0(2^-)$ $D_{s0}^*(2317)^\pm$ $0(0^+)$ $D_{s1}(2460)^\pm$ $0(1^+)$ $D_{s1}(2536)^\pm$ $0(1^+)$ $D_{s2}(2573)$ $0(2^-)$ $D_{s1}^*(2700)$ $0(1^-)$ $D_{s1}^*(2860)^\pm$ $0(2^-)$ $D_{s1}^*(3040)^\pm$ $0(2^-)$	$\eta_c(1S)$ $0^-(0^-)$ $J/\psi(1S)$ $0^-(1^-)$ $\chi_{c0}(1P)$ $0^+(0^-)$ $\chi_{c1}(1P)$ $0^+(1^-)$ $h_c(1P)$ $2^-(1^-)$ $\chi_{c2}(1P)$ $0^+(2^-)$ $\eta_c(2S)$ $0^-(0^-)$ $\psi(2S)$ $0^-(1^-)$ $\psi(3770)$ $0^-(1^-)$ $X(3823)$ $0^-(1^-)$ $X(3872)$ $0^-(1^-)$ $X(3900)^\pm$ $2^+(1^-)$ $X(3900)^0$ $2^?(2^-)$ $\psi_c(3915)$ $0^-(0^-)$ $\psi_c(4020)$ $0^-(2^-)$ $\psi_c(4040)$ $0^-(1^-)$ $X(4160)$ $2^?(2^-)$ $X(4230)$ $2^-(1^-)$ $X(4240)^\pm$ $2^?(0^-)$ $X(4250)^\pm$ $2^?(2^-)$ $X(4260)$ $2^?(1^-)$ $X(4350)$ $0^-(2^-)$ $X(4360)$ $2^-(1^-)$ $\psi(4415)$ $0^-(1^-)$ $X(4430)^\pm$ $2^+(1^-)$ $X(4660)$ $2^-(1^-)$			
				BOTTOM ($B = \pm 1$)		$b\bar{b}$	
				$B^\pm$ $1/2(0^-)$	B^0 $1/2(0^-)$	$\eta_b(1S)$ $0^-(0^-)$	$\eta_b(1S)$ $0^-(0^-)$
				CHARMED ($C = \pm 1$)			
				$D^\pm$ $1/2(0^-)$	D^0 $1/2(0^-)$	$\gamma(2S)$ $0^-(1^-)$	$\gamma(2S)$ $0^-(1^-)$
				$D_s^\pm$ $0(0^-)$	D_s^0 $0(0^-)$	$\gamma(1D)$ $0^-(2^-)$	$\gamma(1D)$ $0^-(2^-)$
				$D_{s1}^*(2460)^\pm$ $1/2(2^+)$	$D_{s1}^*(2460)^\pm$ $1/2(2^+)$	$\chi_{b0}(2P)$ $0^+(0^-)$	$\chi_{b0}(2P)$ $0^+(0^-)$
				$D_{s2}^*(2650)^\pm$ $1/2(2^+)$	$D_{s2}^*(2650)^\pm$ $1/2(2^+)$	$h_b(2P)$ $2^-(1^-)$	$h_b(2P)$ $2^-(1^-)$
				$D^*(2600)$ $1/2(2^+)$	$D^*(2600)$ $1/2(2^+)$	$\chi_{b2}(2P)$ $0^+(2^-)$	$\chi_{b2}(2P)$ $0^+(2^-)$
				$D^*(2640)^\pm$ $1/2(2^+)$	$D^*(2640)^\pm$ $1/2(2^+)$	$\gamma(3S)$ $0^-(1^-)$	$\gamma(3S)$ $0^-(1^-)$
				$D^*(2750)$ $1/2(2^+)$	$D^*(2750)$ $1/2(2^+)$	$\chi_{b1}(3P)$ $0^+(1^-)$	$\chi_{b1}(3P)$ $0^+(1^-)$
						$\gamma(4S)$ $0^-(1^-)$	$\gamma(4S)$ $0^-(1^-)$
						$X(10610)^\pm$ $1^+(1^+)$	$X(10610)^\pm$ $1^+(1^+)$
						$X(10650)^\pm$ $2^+(1^+)$	$X(10650)^\pm$ $2^+(1^+)$
						$\gamma(11060)$ $0^-(1^-)$	$\gamma(11060)$ $0^-(1^-)$
						$\gamma(11020)$ $0^-(1^-)$	$\gamma(11020)$ $0^-(1^-)$

メソン： π 中間子など

クォーク反クォーク $q\bar{q}$

物理学の目標

ニュートンの運動方程式

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$$

- 単振動

$$x(t) = A \sin(\omega t + \theta_0)$$

- 回転の運動方程式

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{N}$$

- 仕事とエネルギーの関係

$$\frac{1}{2} m \vec{v}_B^2 - \frac{1}{2} m \vec{v}_A^2 = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

少数の「法則」が多くの現象を説明する

日常的な力の源

日常的な力は根源的には2種の相互作用を源としている

- 重力：りんごが木から落ちる、月が地球のまわりを回る...

$$\vec{F}_{A \leftarrow B} = G \frac{m_A m_B}{|\vec{r}_B - \vec{r}_A|^2} \frac{\vec{r}_B - \vec{r}_A}{|\vec{r}_B - \vec{r}_A|}$$

- 電磁気力：電流が流れる、磁石が引き寄せ合う...

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho, \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}$$

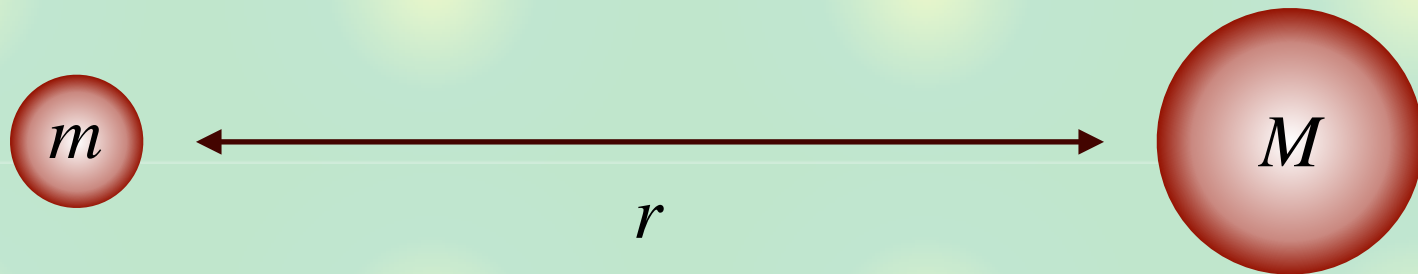
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0}$$

これら以外に力（相互作用）はないのか？

重力

質量 m と M の粒子を距離 r 離して置く

$$F_G = -G \frac{mM}{r^2} \quad (\text{粒子が離れる向きが正})$$

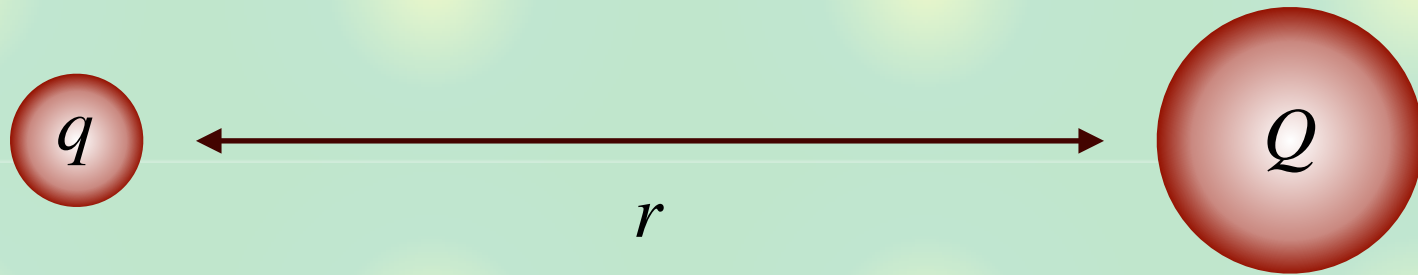


- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- G :万有引力定数
- 重力は常に引力

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

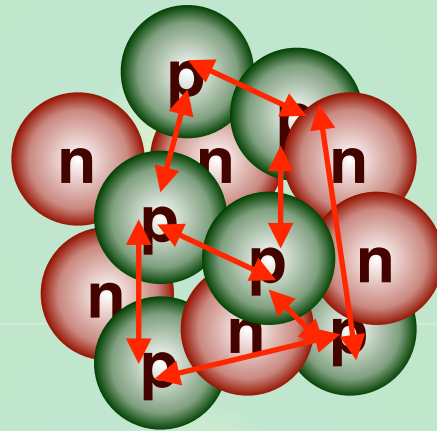


重力とは**別の力**

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**

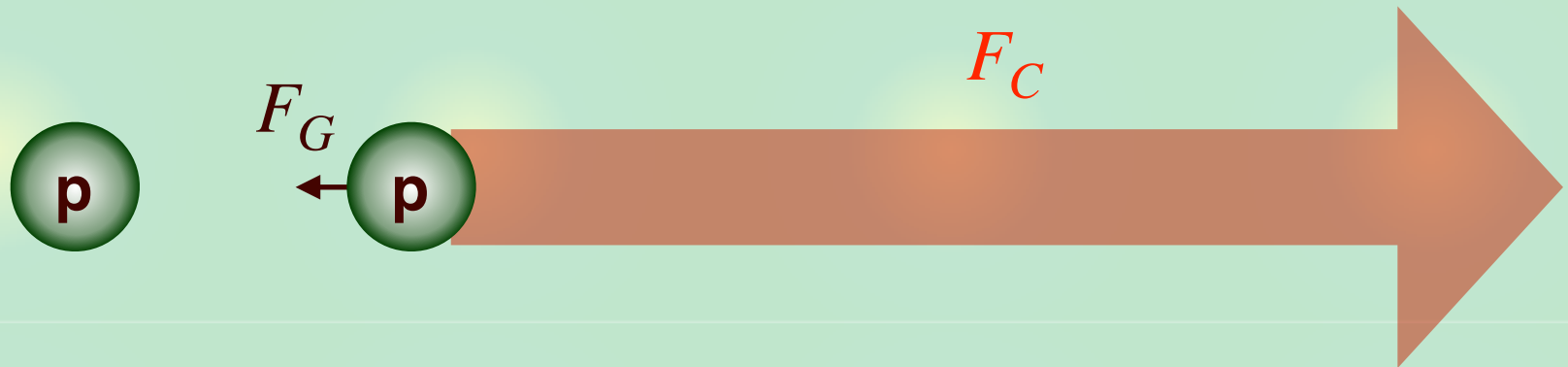
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

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

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

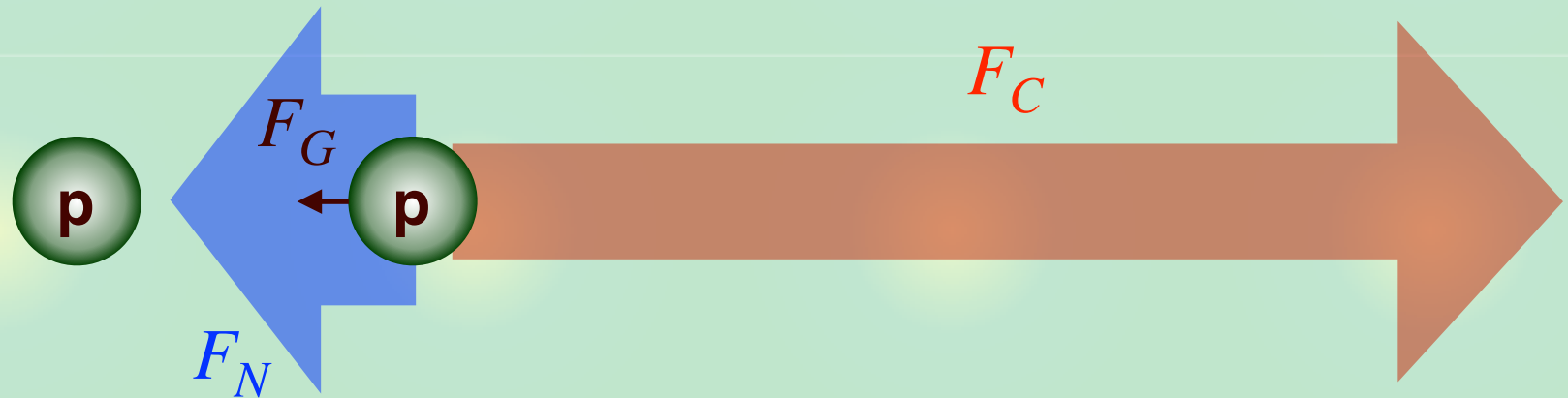
$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \simeq 5.7 \times 10^1 \text{ [N]}$$



- 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

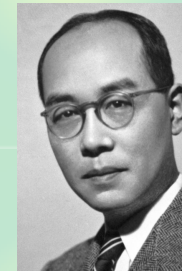
$$\sim 8.6 \times 10^{12} \text{ J} \sim 2.1 \times 10^9 \text{ kcal}$$

核力のメカニズム

核力は π 中間子の交換で媒介される

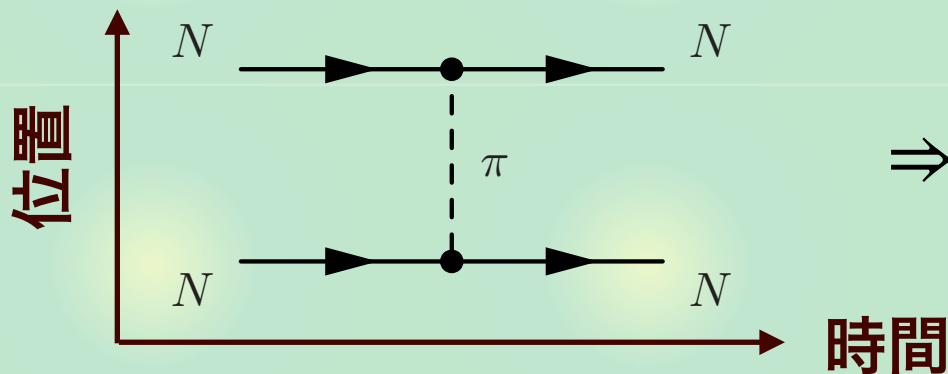


(1949年)



<https://www.nobelprize.org>

- ファインマン図による表現



$\Rightarrow$

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

- **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

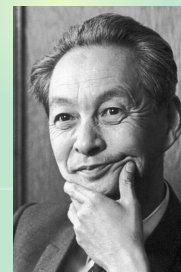
- 重力：ニュートン力学 → 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 → 量子電磁力学 (QED)



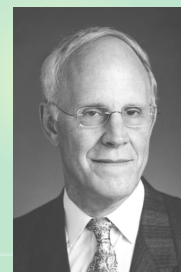
(1965年)



- 強い相互作用：量子色力学 (QCD)



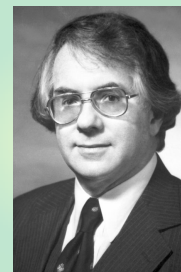
(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論



(1979年)



ここまでのまとめ



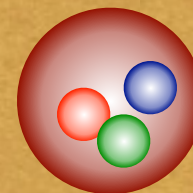
原子核ハドロン物理

- 強い相互作用が生む多くの物理を研究



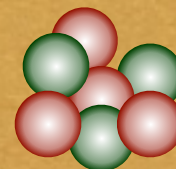
ハドロン

- 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





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：核子はいくつまで結合できるか？

- ニホニウム



ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

- エキゾチックハドロン



まとめ

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

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

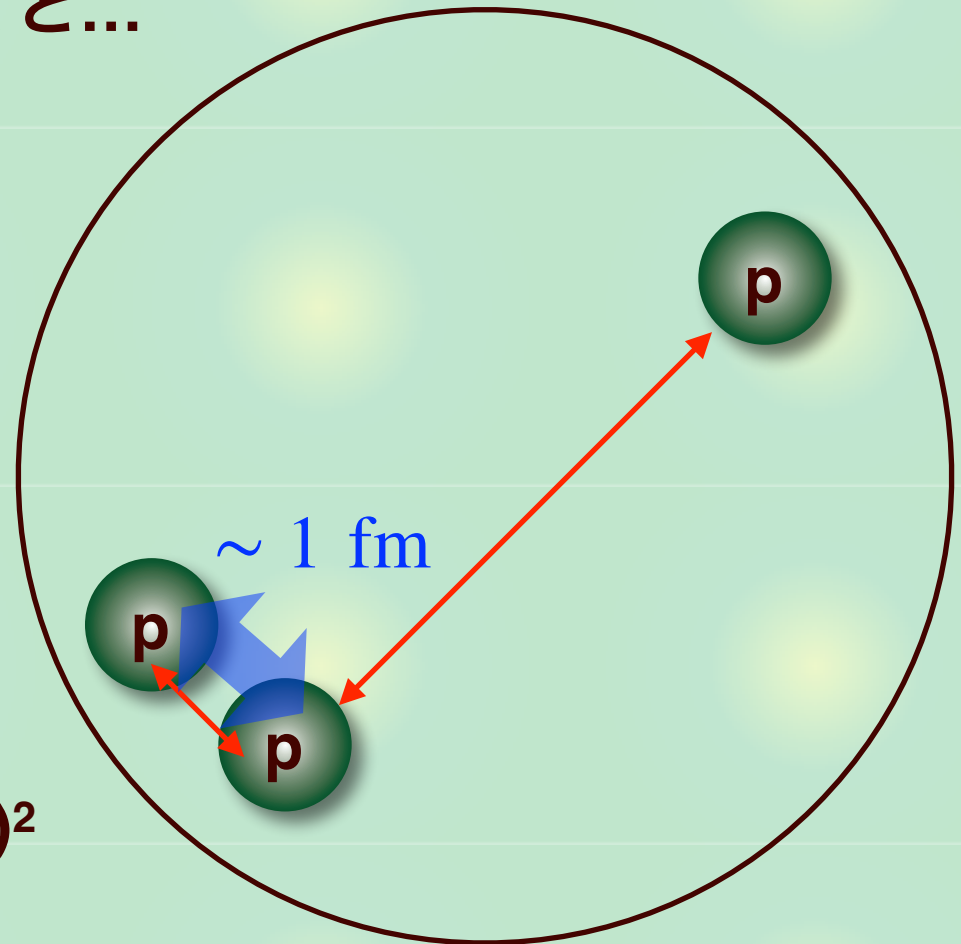
近くの核子とのみ引力

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



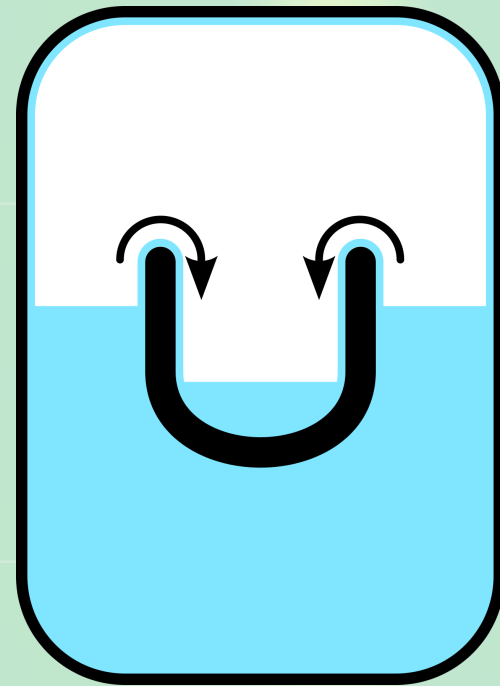
陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

→ 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>

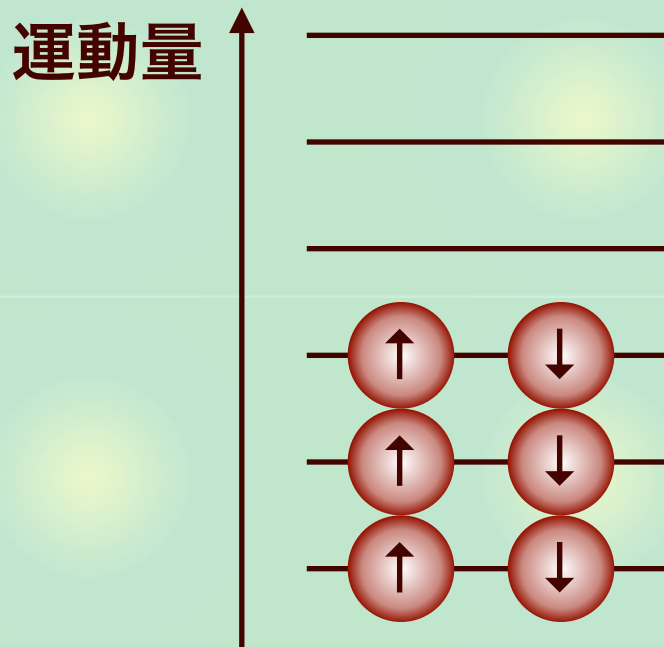
フェルミ粒子（フェルミオン）

- スピンが半整数（ $1/2$, $3/2$, ...）
- **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）



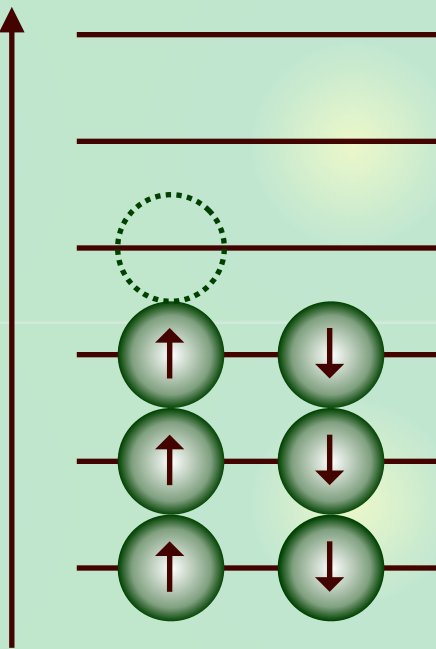
- 運動量（エネルギー）の低い状態に粒子を追加したい
 - 既に他の粒子がいる状態には入れない
- 運動量の低い状態から順番に占有される

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

原子核の場合

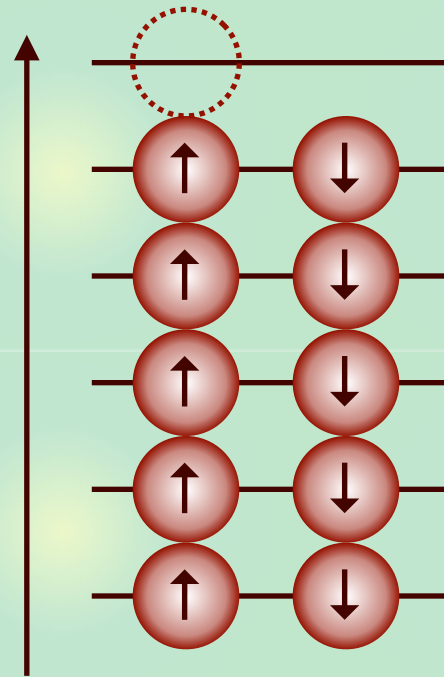
原子核中に中性子ばかりを増やしていくと...

運動量



陽子

運動量



中性子

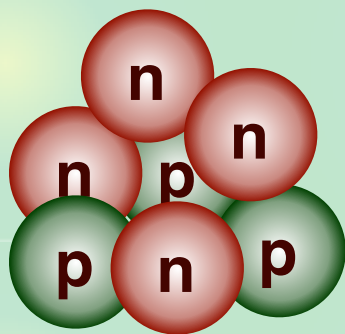
- 陽子を追加する方が低いエネルギーで済む
- β 崩壊（中性子が陽子に変わる）などで**不安定**

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

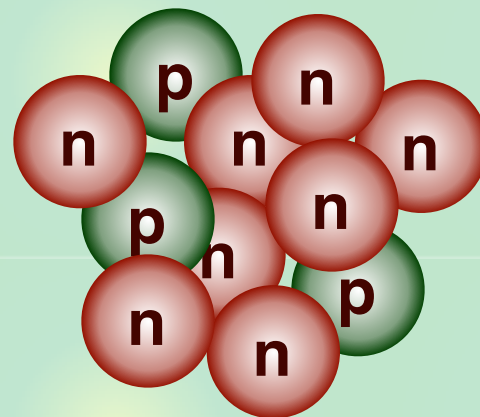
エキゾチックな原子核

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？

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

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

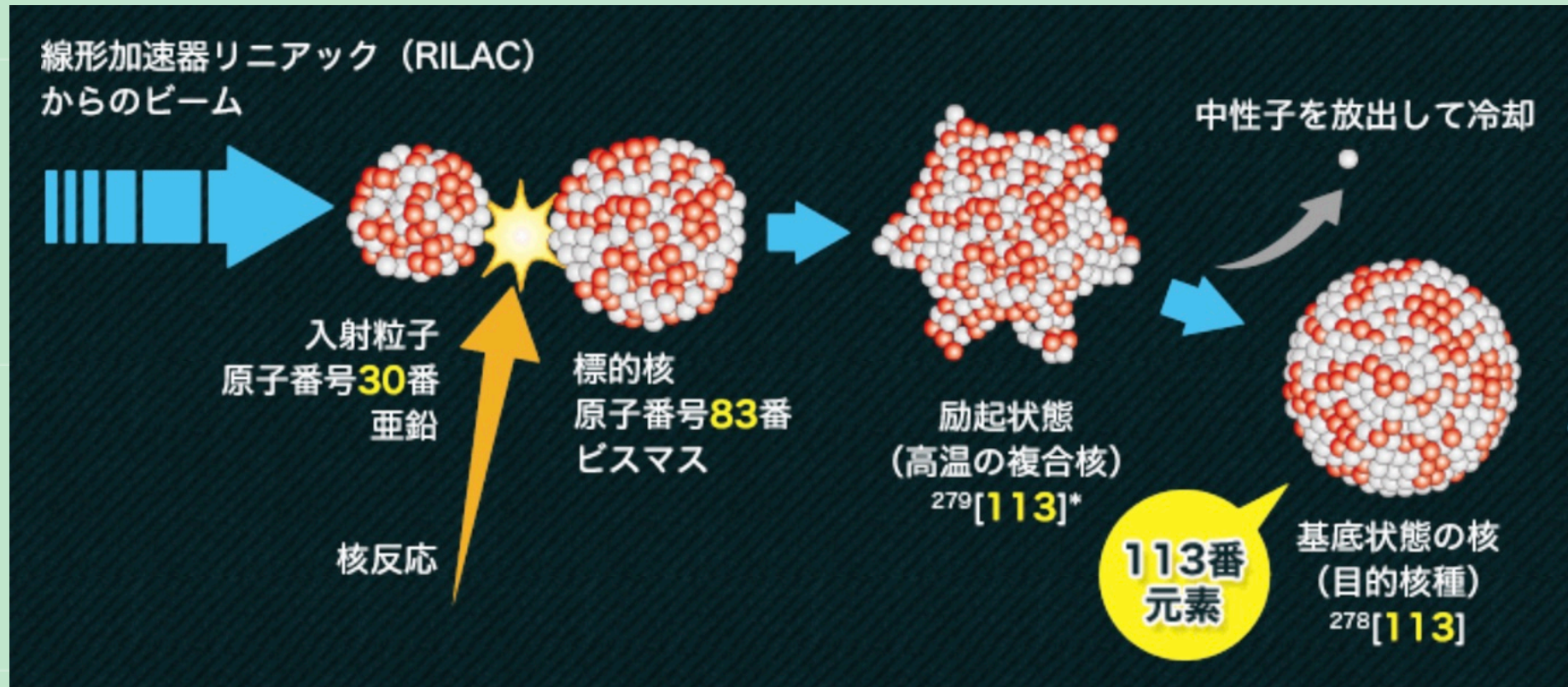


<https://www.riken.jp/pr/fun/nh/>

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

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预言されている

ここまでのまとめ



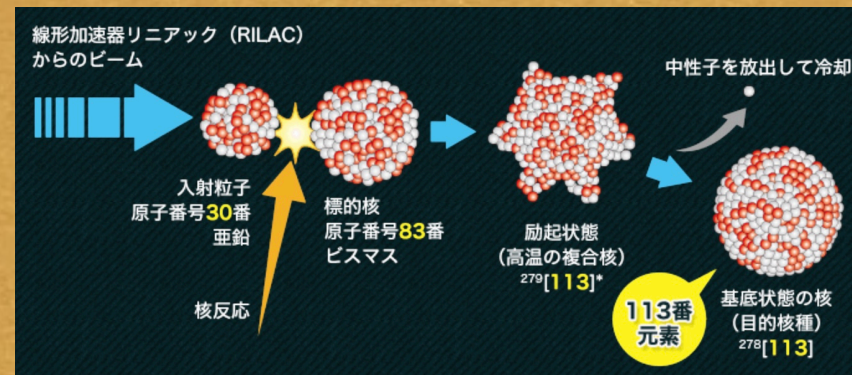
原子核の性質

- 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 崩壊などで不安定



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>



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：核子はいくつまで結合できるか？

- ニホニウム



ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

- エキゾチックハドロン

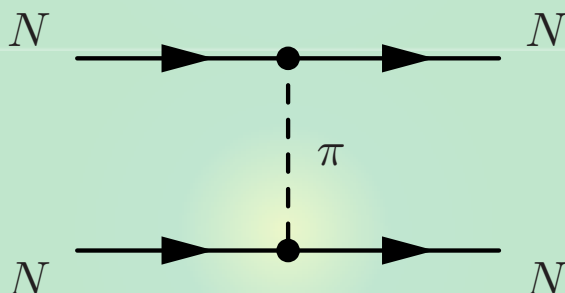
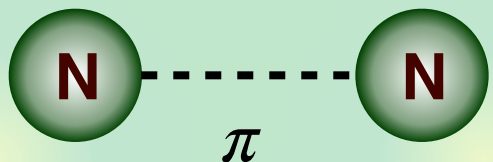


まとめ

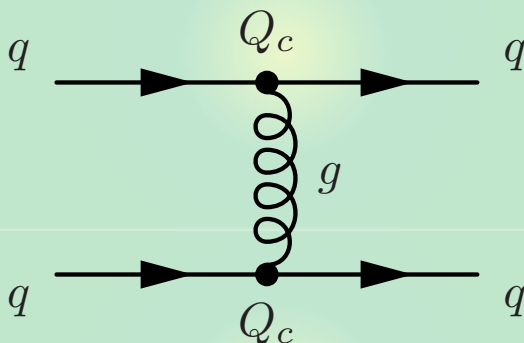
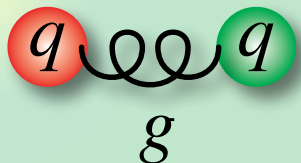
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

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

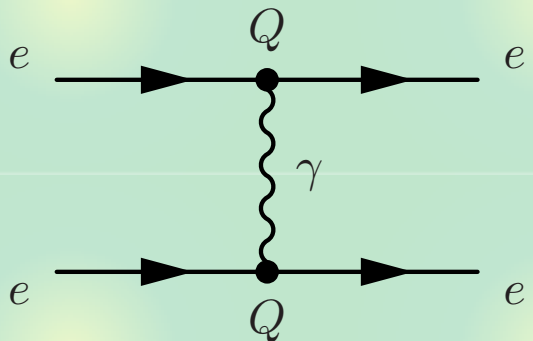
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

電磁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 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



The diagram shows two horizontal lines representing electrons, each with an arrow pointing to the right and labeled 'e'. A vertical wavy line, representing a photon and labeled 'γ', connects two vertices on these lines. Each vertex is marked with a black dot and labeled 'Q'. To the right of the diagram is an arrow pointing to the equation for the Coulomb force.

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

- 電子間の相互作用：クーロン力（+量子効果）

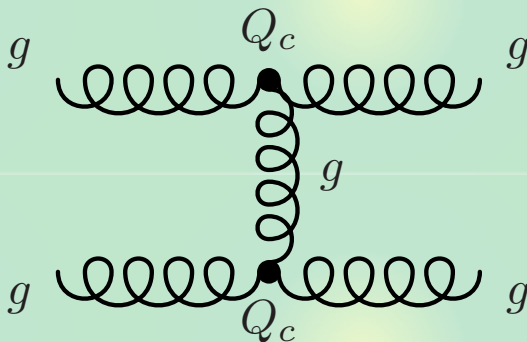
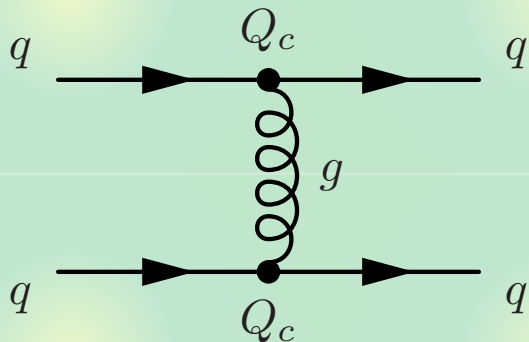
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

強い相互作用の基礎理論

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

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

- 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



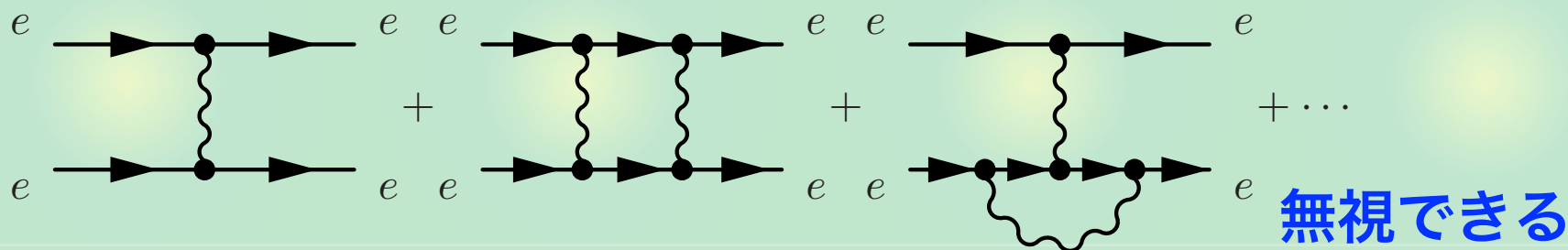
- グルーオン間も相互作用する

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

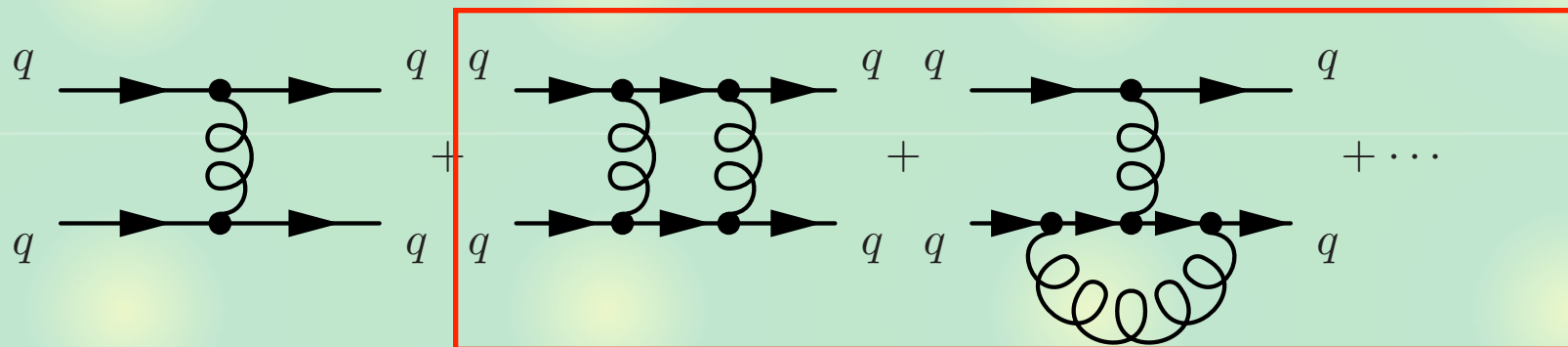
量子効果の計算

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！



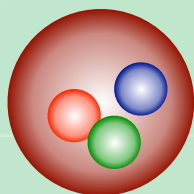
- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

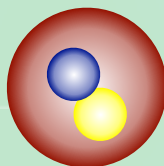
未解決の問題

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

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>

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

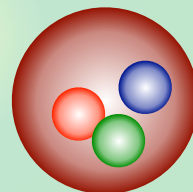
観測されているハドロンとクォーク構成

ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系

- 現在までに全部で約360種が観測されている

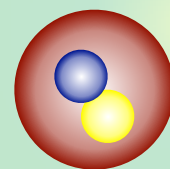
バリオン：陽子、中性子など

- クォーク3つで構成される（**3粒子系**）



メソン： π 中間子など

- クォークと反クォークで構成される（**2粒子系**）



クォーク+クォークの2粒子系は？

クォーク4粒子系、5粒子系、6粒子系...は？

カラーの閉じ込めからの要請

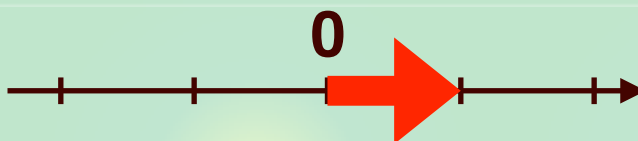
カラー閉じ込め（カラー電荷中性条件）で許される状態は？

準備：電磁気の電荷の中性条件

- 電荷は電気素量の整数倍
- 数直線上の長さが整数の（1成分）ベクトル

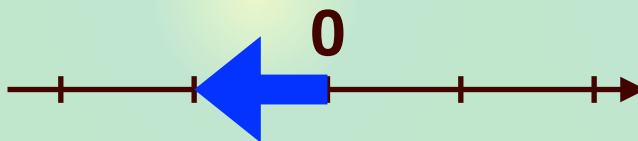
陽子

$$Q_p = +1$$



電子

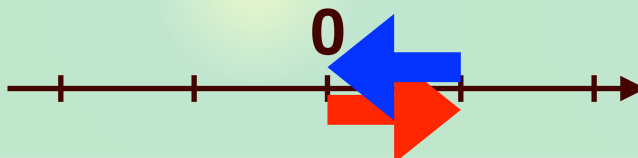
$$Q_e = -1$$



- 電荷中性条件：ベクトルの和が零ベクトルになる

陽子+電子

$$Q_p + Q_e = 0$$



ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

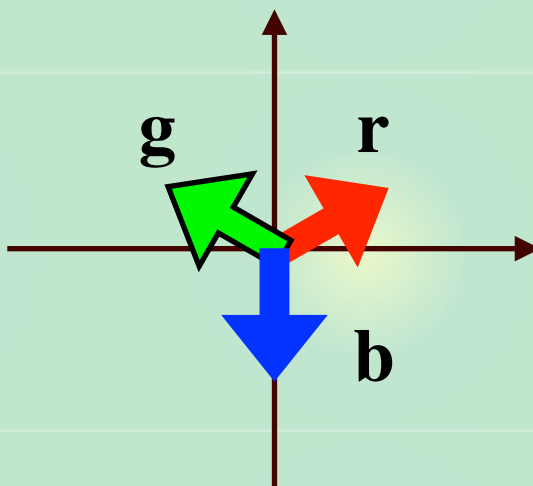
クォークのカラー電荷の表現

クォーク q のカラー電荷は2次元平面のベクトルで表現できる

$$\mathbf{r} = (1/2, 1/3)$$

$$\mathbf{g} = (-1/2, 1/3)$$

$$\mathbf{b} = (0, -2/3)$$

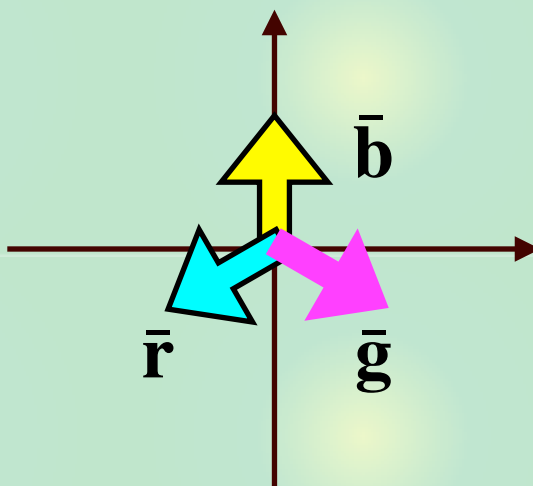


反クォーク $\bar{q}$ のカラー電荷

$$\bar{\mathbf{r}} = (-1/2, -1/3)$$

$$\bar{\mathbf{g}} = (1/2, -1/3)$$

$$\bar{\mathbf{b}} = (0, 2/3)$$



- $\bar{q}$ は q の反粒子なので逆符号の電荷を持つ

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

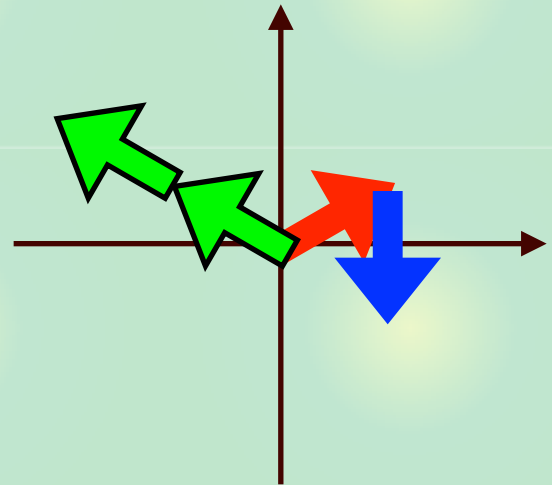
2粒子状態

1. $q + q$

$$\mathbf{r} + \mathbf{b} = (1/2, -1/3)$$

$$\mathbf{g} + \mathbf{g} = (-1, 2/3), \dots$$

- どのように組み合わせても中性にならない

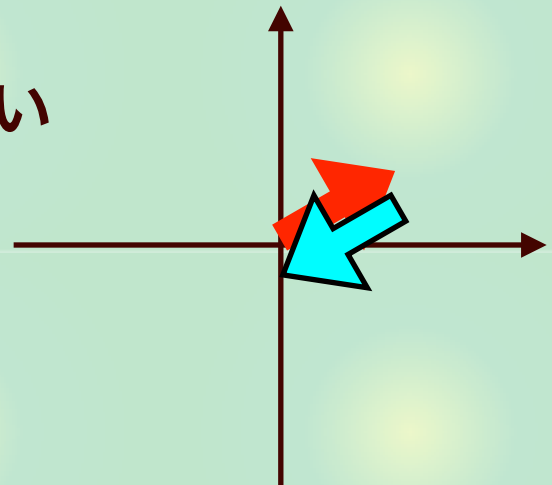


2. $\bar{q} + \bar{q}$

- 1.の符号を変えたもののなので中性にならない

3. $q + \bar{q}$ (メソン)

$$\mathbf{r} + \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{g} + \bar{\mathbf{g}} = \mathbf{b} + \bar{\mathbf{b}} = (0, 0) \text{ 中性!}$$



粒子数2でカラー中性になるのは**メソンのみ**

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

3 粒子状態

1. $q + q + q$ (バリオン)

$$\mathbf{r} + \mathbf{b} + \mathbf{g} = (0,0) \quad \text{中性！}$$

2. $q + q + \bar{q}, \quad q + \bar{q} + \bar{q}$

$$\mathbf{r} + \mathbf{b} + \bar{\mathbf{r}} = (0, -2/3), \dots$$

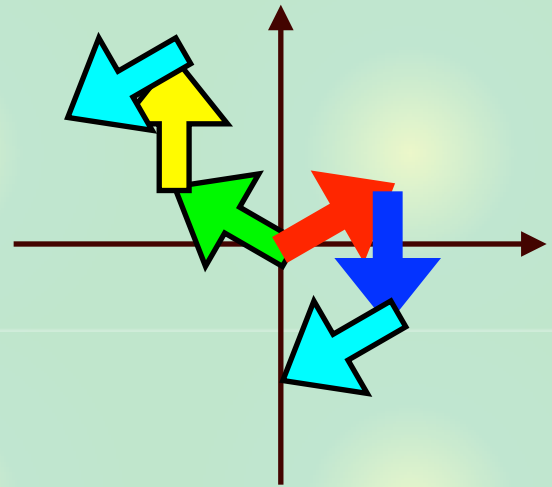
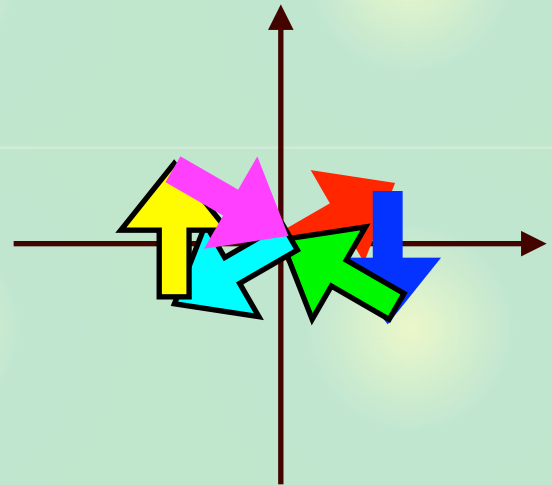
$$\mathbf{g} + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\mathbf{r}} = (-1, 2/3), \dots$$

- どのように組み合わせても中性にならない

3. $\bar{q} + \bar{q} + \bar{q}$ (反バリオン)

$$\bar{\mathbf{r}} + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\mathbf{g}} = (0,0) \quad \text{中性！}$$

粒子数3でカラー中性になるのは**バリオン**（と反バリオン）のみ



ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

4 粒子以上の状態

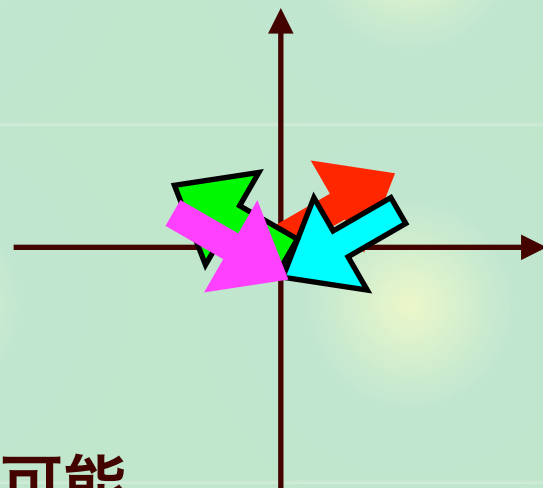
全ての可能性を試しても良いが効率が悪い

- 既に中性のものを組み合わせれば中性

4 粒子 = 2 粒子 + 2 粒子

$$\mathbf{r} + \bar{\mathbf{r}} + \mathbf{g} + \bar{\mathbf{g}} = (0,0)$$

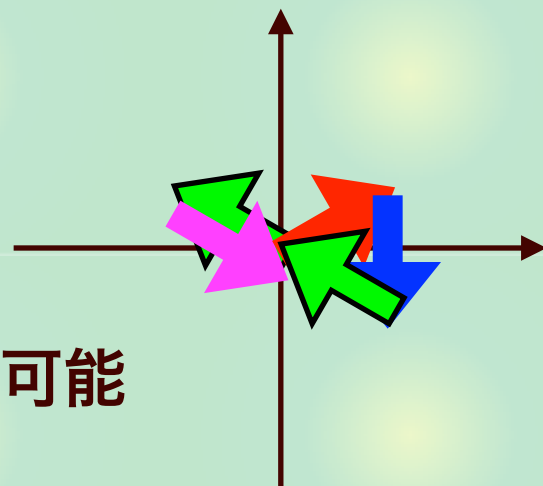
- 4 粒子はクォーク 2 つ + 反クォーク 2 つが可能



5 粒子 = 3 粒子 + 2 粒子

$$\mathbf{r} + \mathbf{g} + \mathbf{b} + \mathbf{g} + \bar{\mathbf{g}} = (0,0)$$

- 5 粒子はクォーク 4 つ + 反クォーク 1 つが可能



6 粒子 = 3 粒子 + 3 粒子 = 2 粒子 + 2 粒子 + 2 粒子...

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

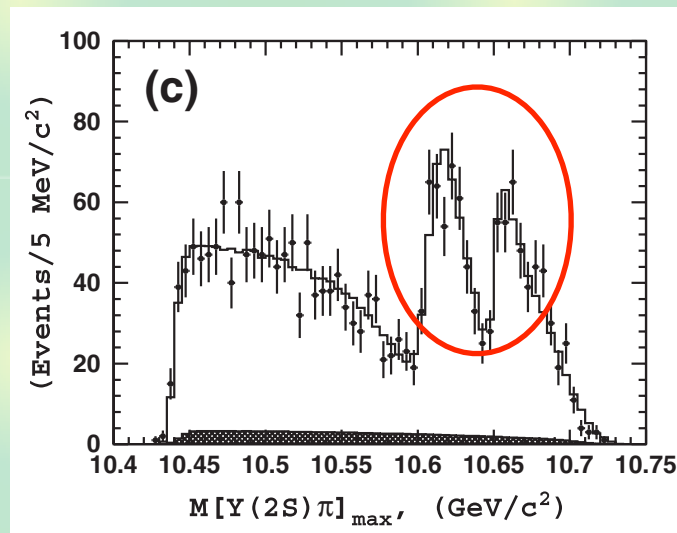
エキゾチックハドロンの観測

4 粒子状態 (テトラクォーク, 2012年)

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

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

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

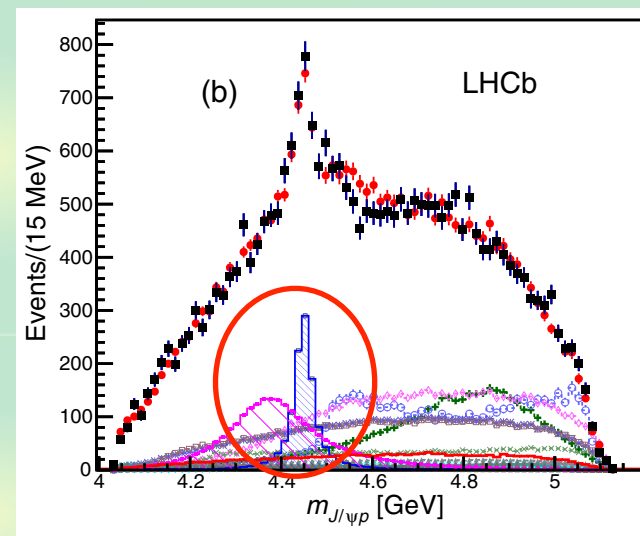


5 粒子状態 (ペンタクォーク, 2015年)

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

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

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

ここまでのまとめ



ハドロンのクォーク構成

- カラー中性の状態のみ観測される（閉じ込め）
- 粒子数2、3ではメソンとバリオンのみが可能



より粒子数の多いハドロン

- 4クォーク以上の状態も存在可能
- 発見されているがメソン、バリオンに比べて圧倒的に少ない
- なぜ少ないのかは未解明

全体のまとめ



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

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



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
- 1つの方向性：複合粒子数の限界を探る