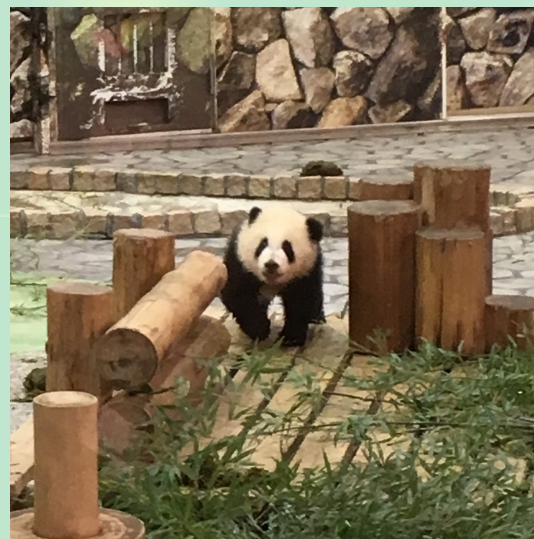


強い相互作用の世界



兵藤 哲雄

原子核ハドロン物理研究室

2019, May 8th



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？

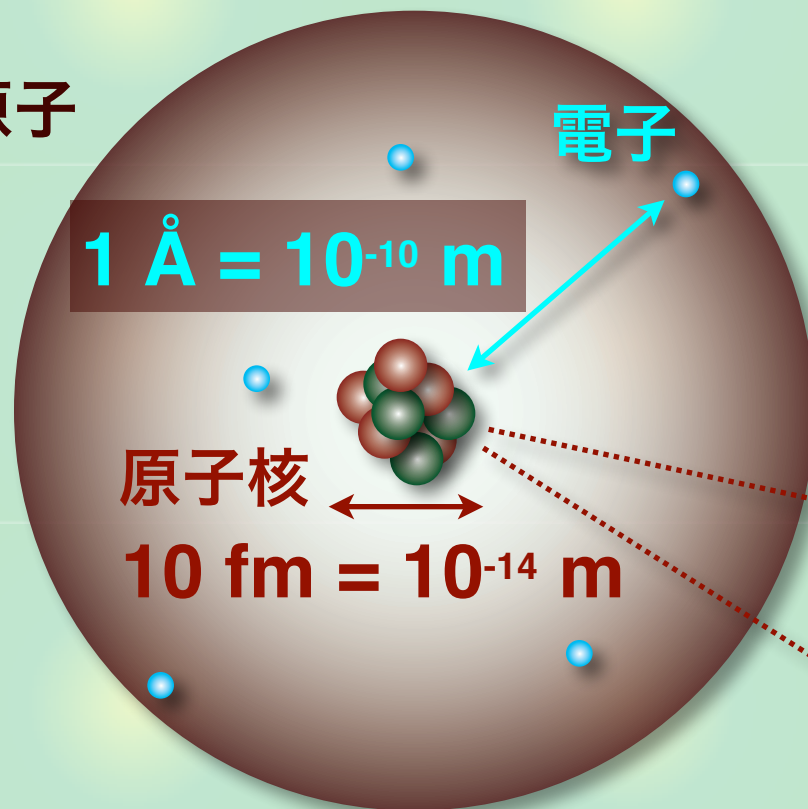
- エキゾチックハドロン



まとめ

原子、原子核、ハドロン

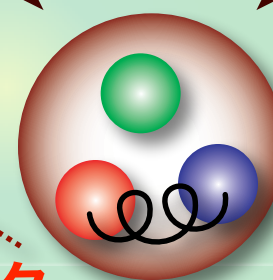
原子



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

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



クォーク

クォーク

グルーオン

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

- 安定核約300種、不安定核約2000種、未発見約4000種



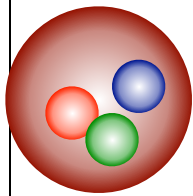
ハドロンとは

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

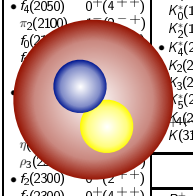
p	1/2 ⁺ ****	$\Delta(1232)$	3/2 ⁺ ****	Σ^+	1/2 ⁺ ****	Ξ^0	1/2 ⁺ ****	Λ_c^+	1/2 ⁺ ****
n	1/2 ⁺ ****	$\Delta(1600)$	3/2 ⁺ ***	Σ^0	1/2 ⁺ ****	Ξ^-	1/2 ⁺ ****	$\Lambda_c(2595)^+$	1/2 ⁻ ***
$N(1440)$	1/2 ⁺ ****	$\Delta(1620)$	1/2 ⁻ ****	Σ^-	1/2 ⁺ ****	$\Xi(1530)$	3/2 ⁺ ****	$\Lambda_c(2625)^+$	3/2 ⁻ ***
$N(1520)$	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 ⁻ *	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2$ ***	$\Sigma_c(2520)$	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 ⁺ *	$\Xi(2500)$	*	Ξ_c^{++}	1/2 ⁺ ***
$N(1860)$	5/2 ⁺ **	$\Delta(2000)$	1/2 ⁻ **	$\Sigma(1770)$	1/2 ⁻ ***			Ξ_c^+	
$N(1875)$									
$N(1880)$									
$N(1895)$									
$N(1900)$	3/2 ⁻ ***	$\Delta(2350)$	5/2 ⁻ *	$\Sigma(1880)$	1/2 ⁺ **	$\Xi(2470)^-$	**	$\Xi_c(2930)$	*
$N(1990)$	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 ⁺ ****			$\Omega_c(2770)^0$	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_c^+	*
$N(2250)$	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 ⁻ **	$\Lambda(1670)$	1/2 ⁻ ****	$\Sigma(2455)$	**			$\Lambda_b(5912)^0$	1/2 ⁻ ***
$N(2600)$	11/2 ⁻ ***	$\Lambda(1690)$	3/2 ⁻ ****	$\Sigma(2620)$	**			$\Lambda_b(5920)^0$	3/2 ⁻ ***
$N(2700)$	13/2 ⁺ **	$\Lambda(1710)$	1/2 ⁺ *	$\Sigma(3000)$	*			Σ_b	1/2 ⁺ ***
		$\Lambda(1800)$	1/2 ⁻ ***	$\Sigma(3170)$	*			Σ_b^+	3/2 ⁺ ***
		$\Lambda(1810)$	1/2 ⁺ ***					Ξ_b^0	1/2 ⁺ ***
		$\Lambda(1820)$	5/2 ⁺ ****					Ξ_b^+	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



LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)		STRANGE (S = ±1, C = B = 0)	CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)	$c\bar{c}$ $F(C)$
$F(F)$	$F(F)$	$F(F)$	$F(F)$	$F(F)$
$\pi^\pm$ 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⁺) $\phi(1020)$ 0⁺(1⁻) $h(1170)$ 0⁺(1⁺) $h(1235)$ 1⁺(1⁺) $b_1(1260)$ 1⁺(1⁺) $f_2(1270)$ 0⁺(2⁺)	$\rho(1680)$ 0⁻(1⁻) $\rho_3(1690)$ 1⁺(3⁻) $\rho(1700)$ 1⁺(1⁻) $a_2(1700)$ 1⁺(2⁺) $a_2(1710)$ 0⁺(0⁺) $\eta(1760)$ 0⁺(0⁺) $\eta(1800)$ 1⁻(0⁺) $f_2(1810)$ 0⁺(2⁺) $X(1835)$?(???) $\phi_3(1850)$ 0⁻(3⁻) $\eta_2(1870)$ 0⁺(2⁺) $\eta_2(1880)$ 1⁻(2⁻) $\rho(1900)$ 1⁺(1⁻)	$K^\pm$ 1/2(0⁻) K^0 1/2(0⁻) K_S^0 1/2(0⁻) K_L^0 1/2(0⁻) $K_S^*(800)$ 1/2(0⁺) $K^*(892)$ 1/2(1⁻) $K_1(1270)$ 1/2(1⁺) $K_1(1400)$ 1/2(1⁺) $K^*(1410)$ 1/2(0⁺) $K_2^*(1430)$ 1/2(2⁺) $K_2(1460)$ 1/2(0⁻) $K_2^*(1580)$ 1/2(2⁺)	$D_s^\pm$ 0(0⁻) $D_s^\pm$ 0(2⁺) $D_{s1}(2317)^\pm$ 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(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⁺) $h_c(1P)$?(1⁺) $\chi_{c2}(1P)$ 0⁺(2⁺) $\eta_c(2S)$ 0⁺(0⁺) $\psi(2S)$ 0⁺(1⁺) $\psi(3770)$ 0⁺(1⁺) $X(3823)$?(2⁺) $X(3872)$ 0⁺(1⁺) $X(3900)^\pm$?(1⁺) $X(3900)^\pm$?(2⁺) $\chi_{c0}(3915)$ 0⁺(0⁺) $\chi_{c0}(4040)$ 0⁺(2⁺) $\psi(4160)$ 0⁺(1⁺) $X(4160)$?(2⁺) $X(4230)$?(1⁻) $X(4240)^\pm$?(0⁺) $X(4250)^\pm$?(2⁺) $X(4260)$?(1⁻) $X(4350)$ 0⁺(2⁺) $X(4360)$?(1⁻) $\psi(4415)$ 0⁺(1⁻) $X(4430)^\pm$?(1⁺) $X(4660)$?(1⁻)
			BOTTOM (B = ±1)	
			$B^\pm$ 1/2(0 ⁻)	
			B^0 1/2(0 ⁻)	
			$B_s^\pm$ 0(0 ⁻)	
			B_s^0 0(1 ⁻)	
			$B_{s1}(5630)^0$ 0(1 ⁺)	
			$B_{s1}^*(5840)^0$ 0(2 ⁺)	
			$B_{s1}^*(5890)$?(2 ⁺)	
			BOTTOM, CHARMED (B = C = ±1)	
			$B_c^\pm$ 0(0 ⁻)	
			$B_c(2S)^\pm$?(2 ⁺)	
			OTHER LIGHT	
			Further States	
			$D^\pm$ 1/2(0 ⁻)	
			D^0 1/2(0 ⁻)	
			$D^*(2007)^0$ 1/2(1 ⁻)	
			$D^*(2010)^\pm$ 1/2(1 ⁻)	
			$D_s^*(2400)^\pm$ 1/2(0 ⁺)	
			$D_s^*(2400)^\pm$ 1/2(0 ⁺)	
			$D_1(2420)^\pm$ 1/2(1 ⁺)	
			$D_1(2420)^\pm$ 1/2(2 ⁺)	
			$D_1(2430)^\pm$ 1/2(1 ⁺)	
			$D_2^*(2460)^\pm$ 1/2(2 ⁺)	
			$D_2^*(2460)^\pm$ 1/2(2 ⁺)	
			$D(2580)^0$ 1/2(0 ⁻)	
			$D(2600)$ 1/2(2 ⁺)	
			$D^*(2640)^\pm$ 1/2(2 ⁺)	
			$D(2750)$ 1/2(2 ⁺)	

メソン： π 中間子など



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。

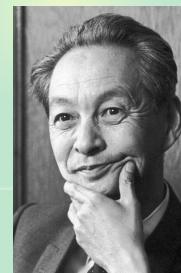
- 重力：ニュートン力学 → 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 → 量子電磁力学 (QED)



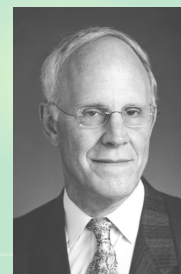
(1965年)



- 強い相互作用：量子色力学 (QCD)



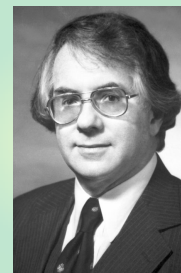
(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論



(1979年)

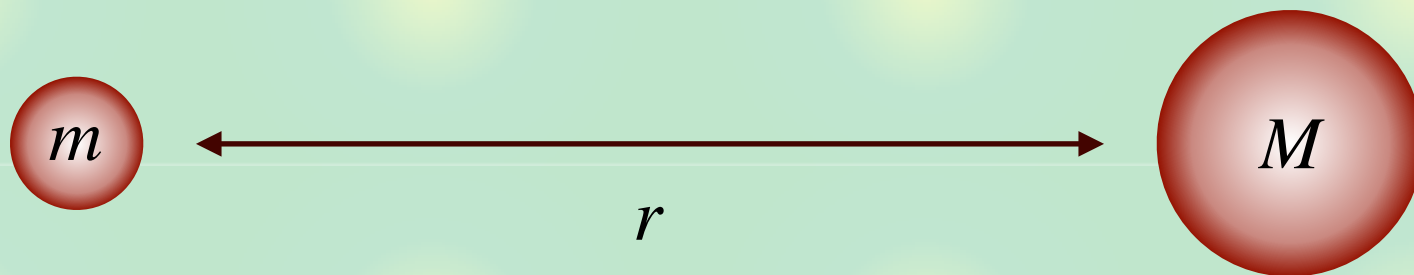


<https://www.nobelprize.org>

重力

質量 m と M の粒子を距離 r 離して置く

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

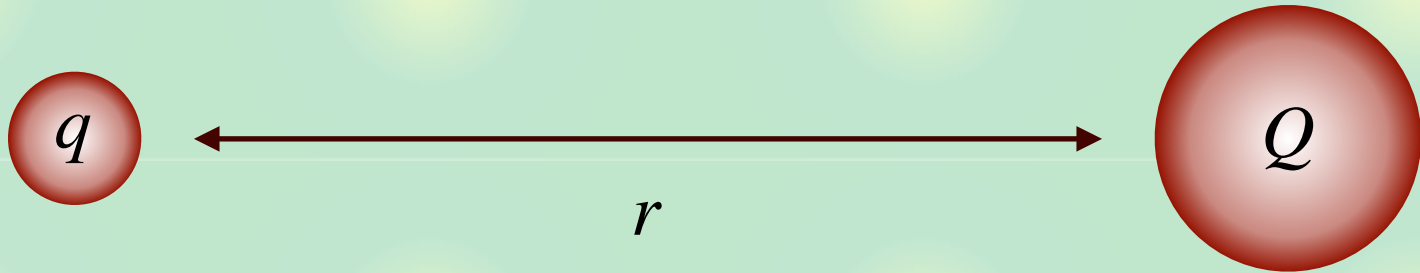


- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- G :万有引力定数
- 重力は常に引力

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

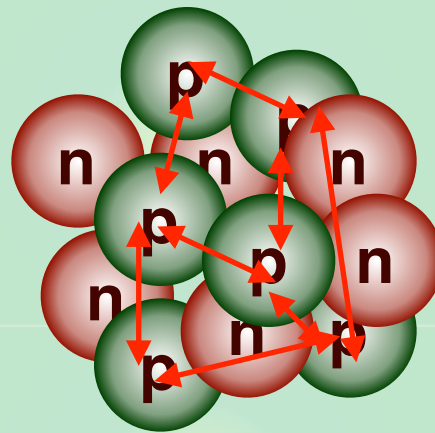


重力とは**別の力**

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+1
- 中性子 (neutron) : 電荷0

陽子間の電磁気力は斥力

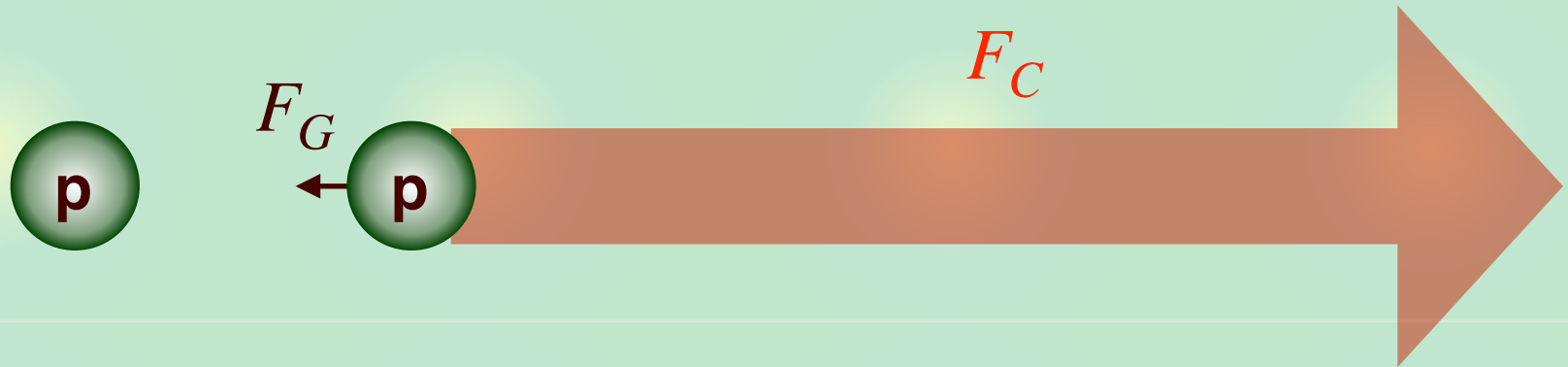
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

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

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

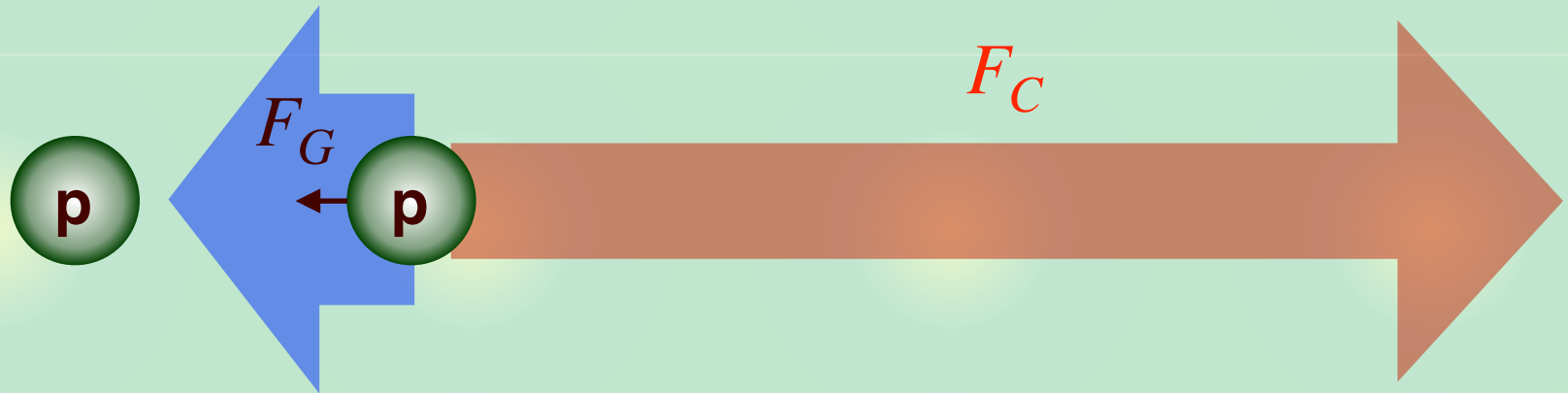
$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \simeq 5.7 \times 10^1 \text{ [N]}$$



- 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

12g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

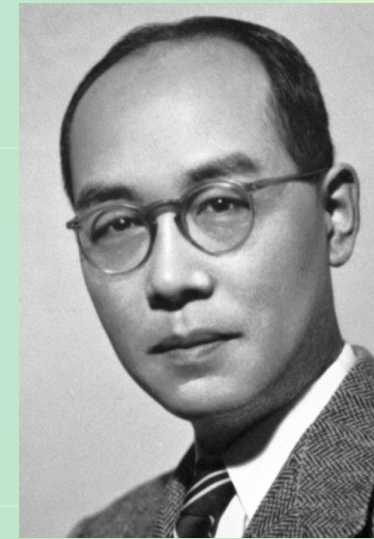
$$\sim 8.6 \times 10^{12} \text{ J} \sim 2.1 \times 10^9 \text{ kcal}$$

核力のメカニズム

核力は π 中間子の交換で媒介される

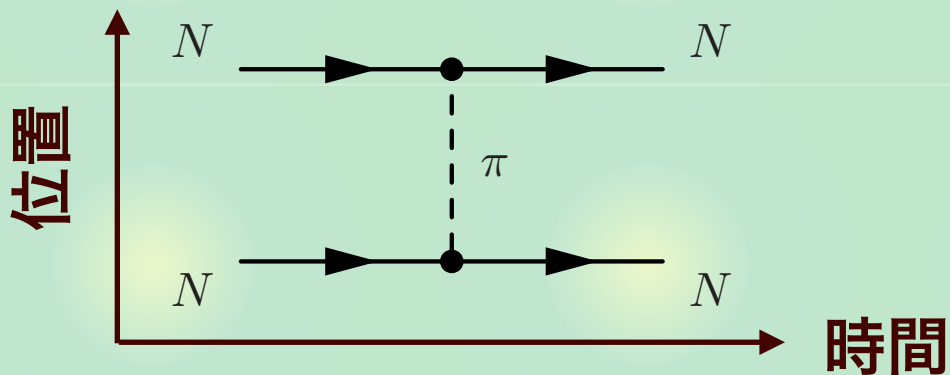


(1949年)



<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
- **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

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

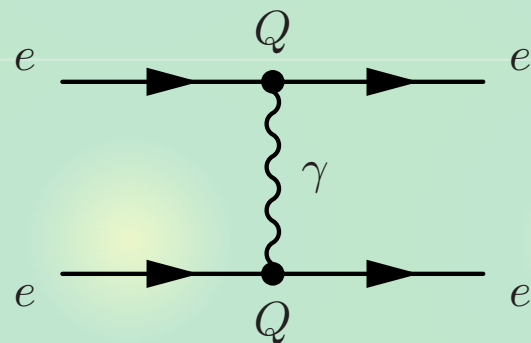
量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

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

- クォークとのグルーオンの理論
- 量子効果を含めて強い相互作用の全てを記述
- 式の形はQEDに似ているがカラー自由度(a, α, β)を持つ

強い相互作用の基礎理論

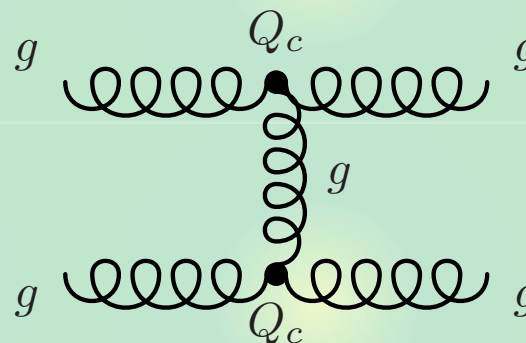
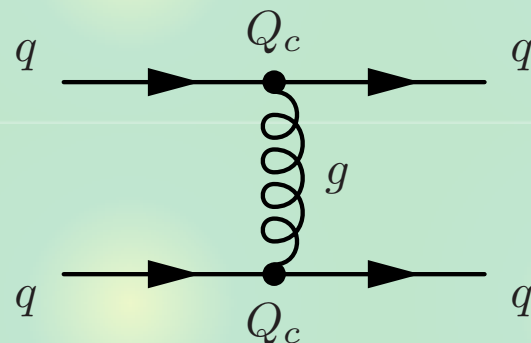
電磁相互作用：電荷を持つ電子間で光子を交換



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

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

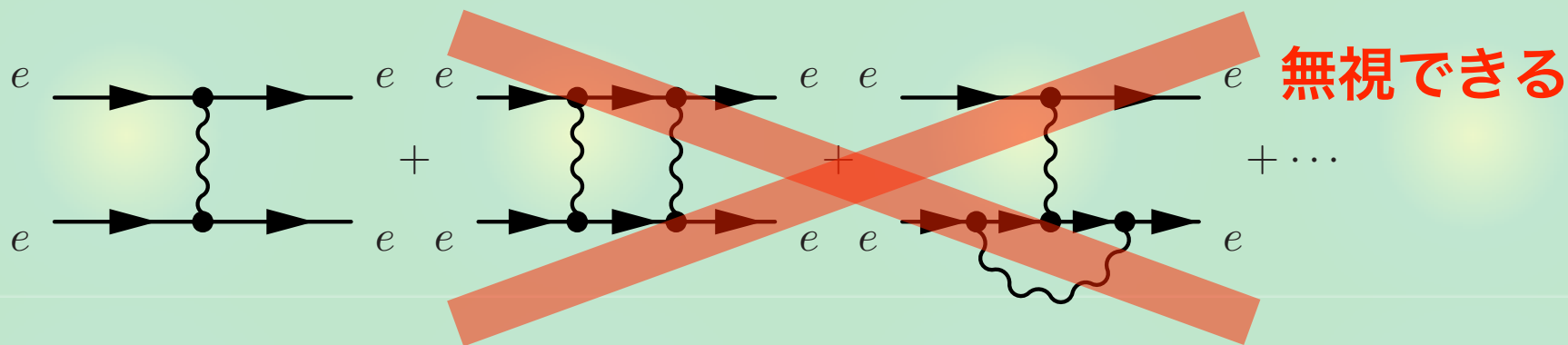


グルーオンも色電荷を持つ：グルーオン間も相互作用する

摂動展開

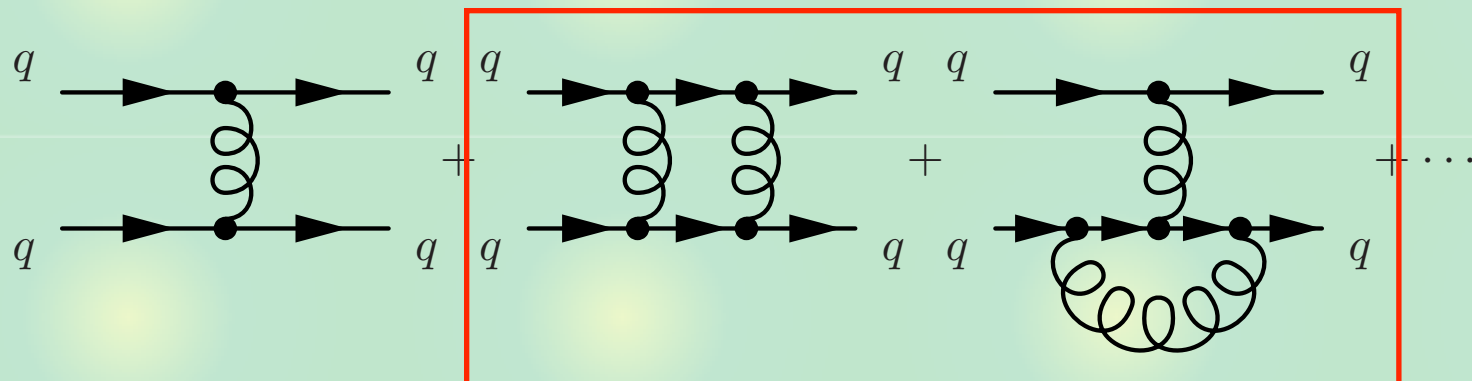
ファインマン図は実は無限個ある

- 電磁相互作用：摂動展開可能（有限個の計算でOK）



- 強い相互作用：摂動展開不可能

“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）

未解決の現象

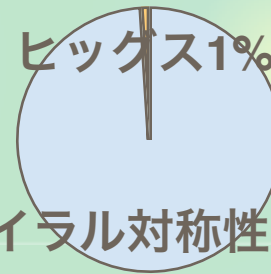
カラー閉じ込め

- 観測されるハドロンはカラー白色（中性）のみ

カイラル対称性の自発的破れ

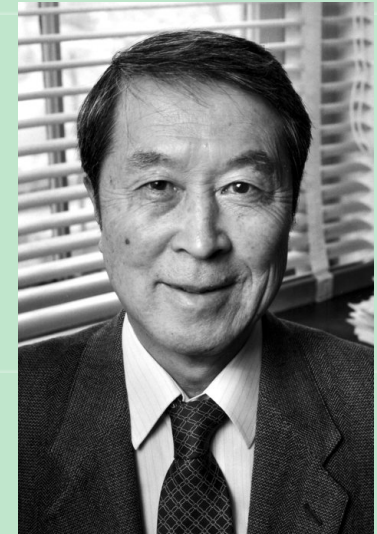


(2008年)



カイラル対称性99%

- 真空の構造が変化して質量が生まれる



<https://www.nobelprize.org>

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>

ここまでのまとめ



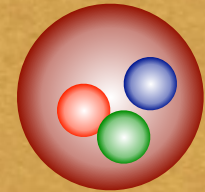
原子核ハドロン物理

- 強い相互作用が生む多くの未解決問題を研究



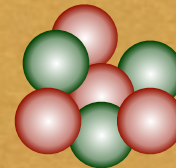
ハドロン

- 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





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

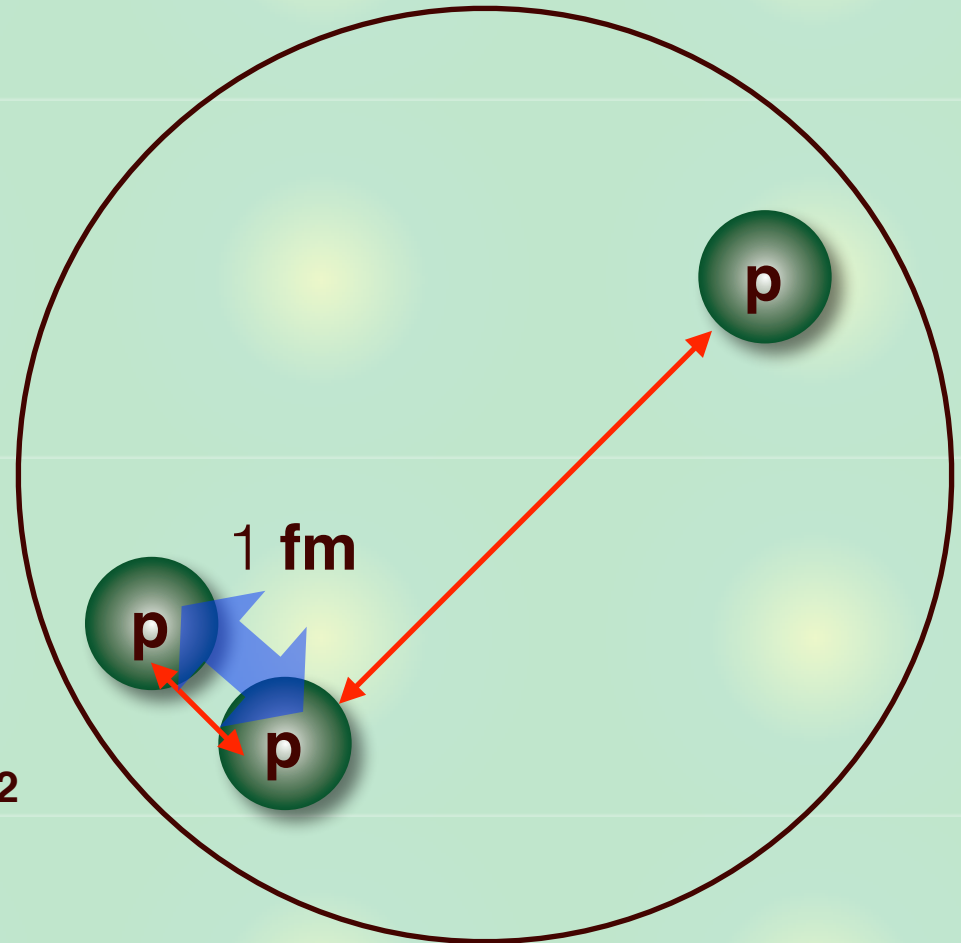
近くの核子とのみ引力

相互作用ペアの数 $\sim$ 粒子数

- **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 $\sim$ (粒子数)²



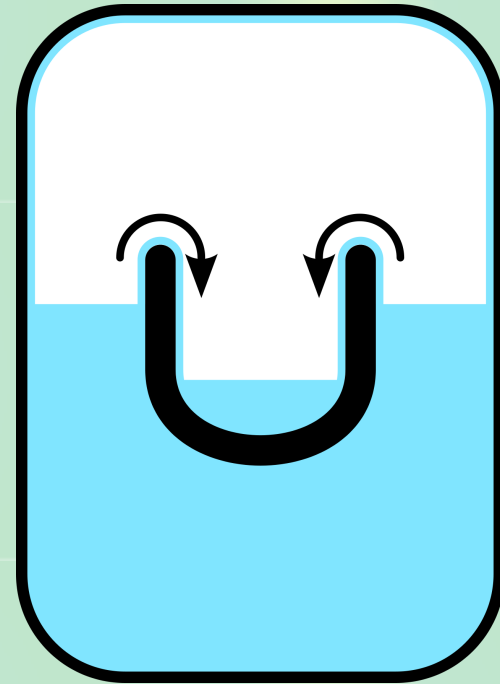
陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

→ 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

- スピンが整数 ($0, 1, 2, \dots$)
- 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>

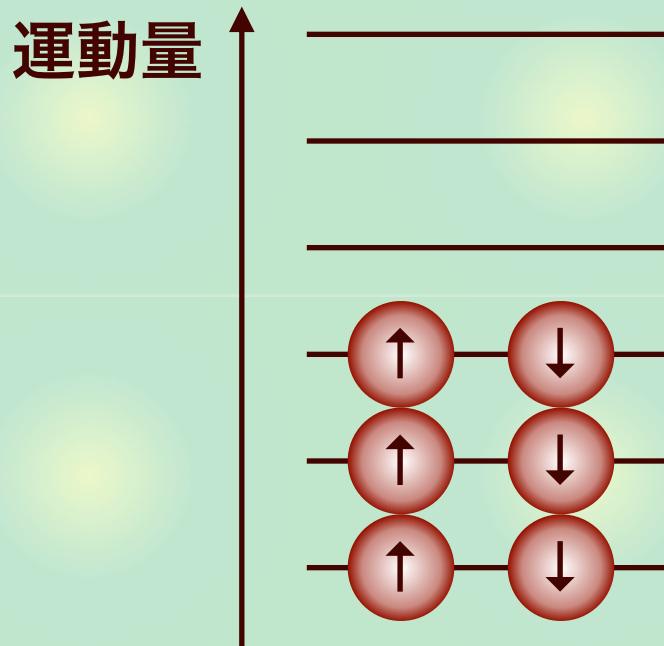
フェルミ粒子

- 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

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）

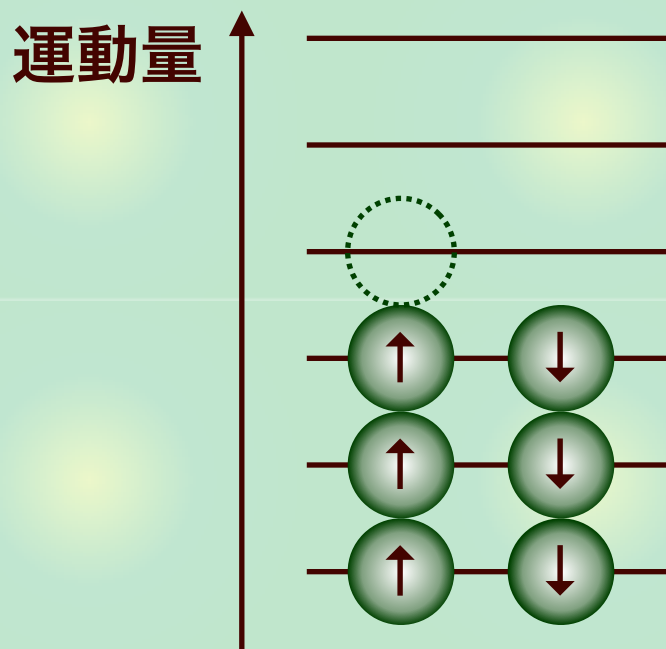


- 運動量（エネルギー）の低い状態に粒子を追加したい
 - 既に他の粒子がいる状態には入れない
- 運動量の低い状態から順番に占有される

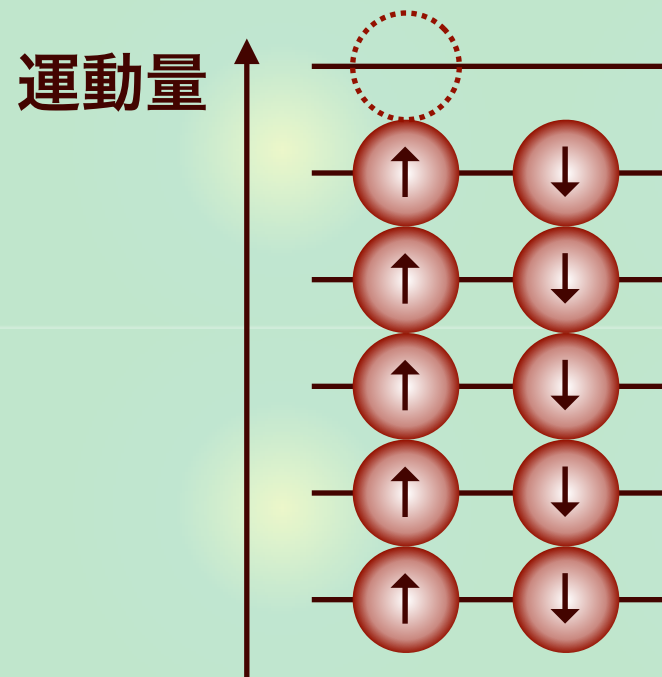
原子核：核子はいくつまで結合できるか？

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...



陽子



中性子

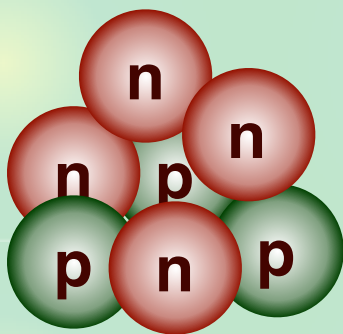
- 陽子を追加する方が低いエネルギーで済む
- β 崩壊（中性子が陽子に変わる）で不安定

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

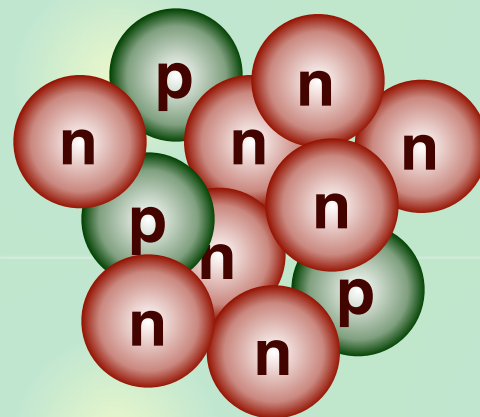
エキゾチックな原子核

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

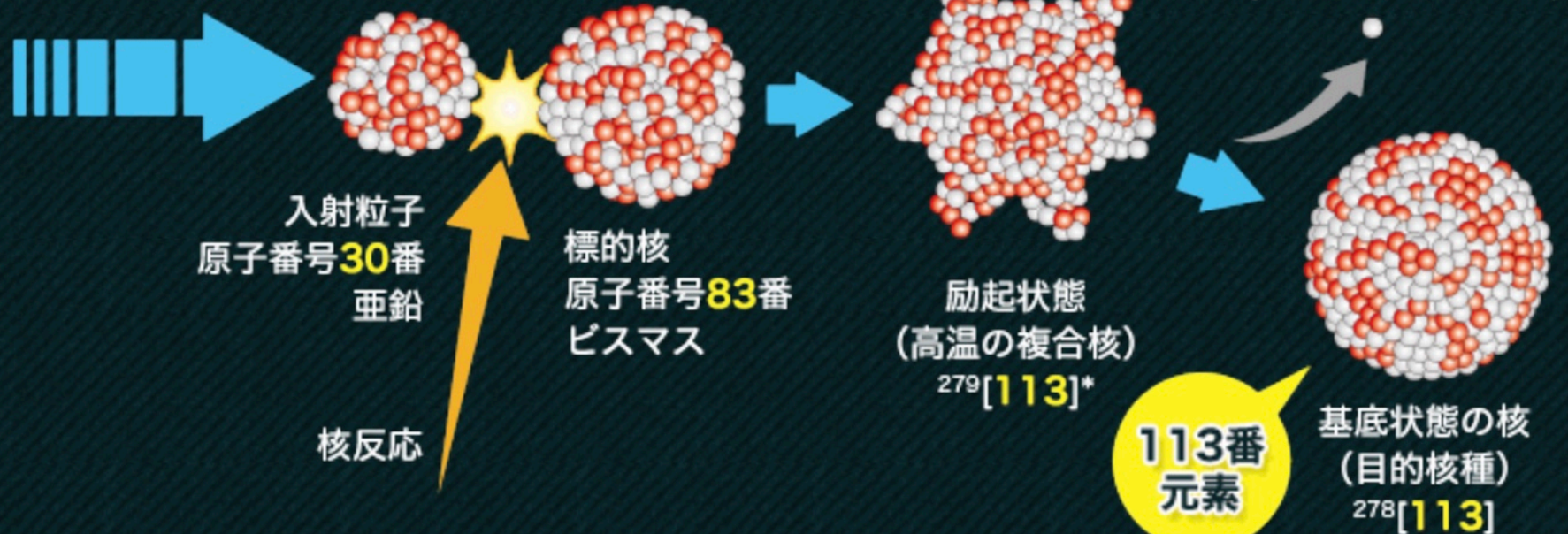


原子核：核子はいくつまで結合できるか？

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

線形加速器リニアック (RILAC)
からのビーム



<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



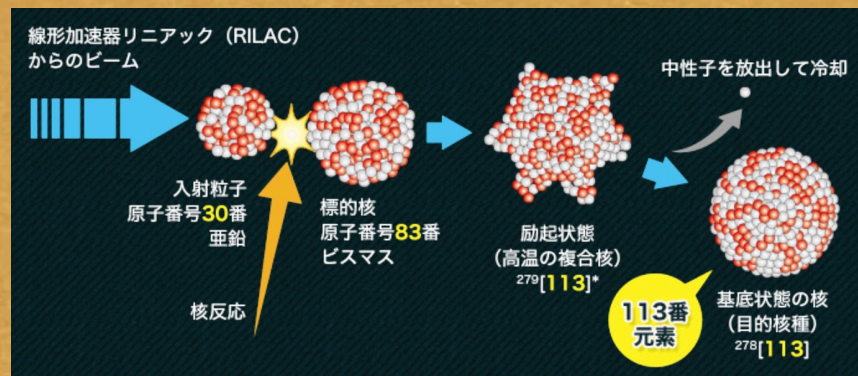
原子核の性質

- 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 崩壊で不安定



超重核の探索

- 粒子数最大の原子核は何か？



<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？

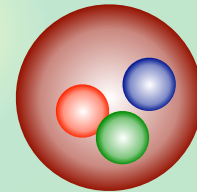
観測されているハドロンとクォーク構成

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350種が観測されている

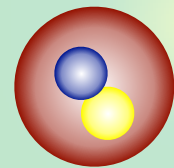
バリオン：陽子、中性子など

- 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

- 電荷は素電荷の整数倍
- 数直線上の長さが整数の（1成分）ベクトル

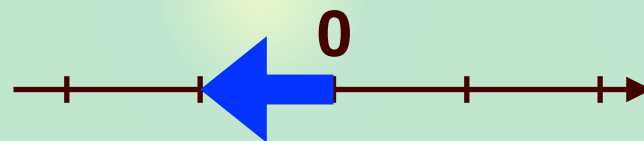
陽子

$$Q_p = +1$$



電子

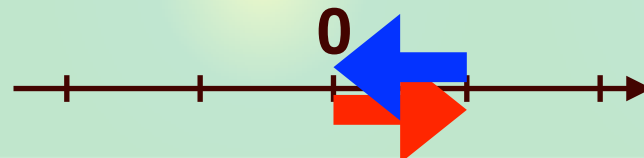
$$Q_e = -1$$



- 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

$$Q_p + Q_e = 0$$



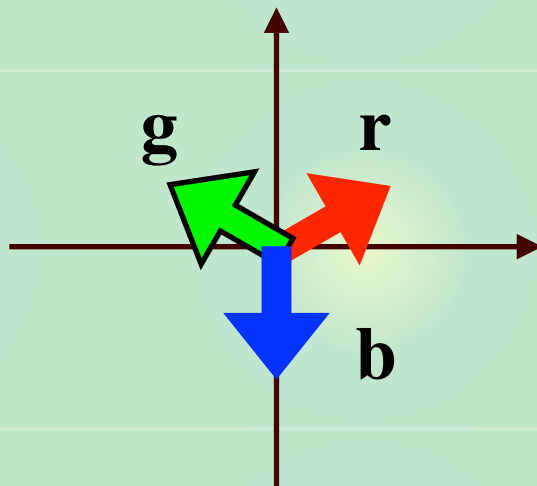
クォークのカラー電荷の表現

クォークのカラー電荷は2次元平面のベクトルで表現できる

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

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

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

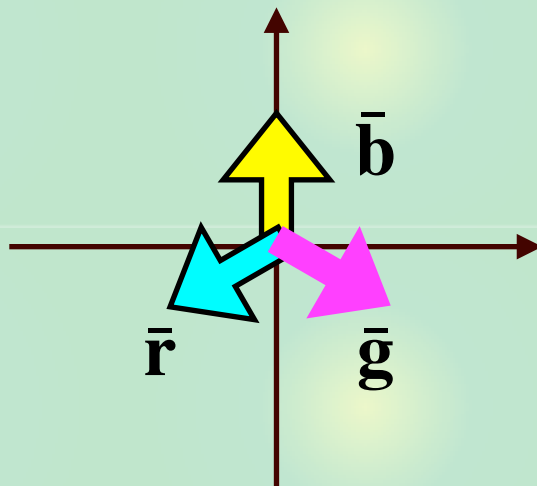


反クォークのカラー電荷

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

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

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



- 反クォークはクォークの反粒子なので逆符号の電荷を持つ

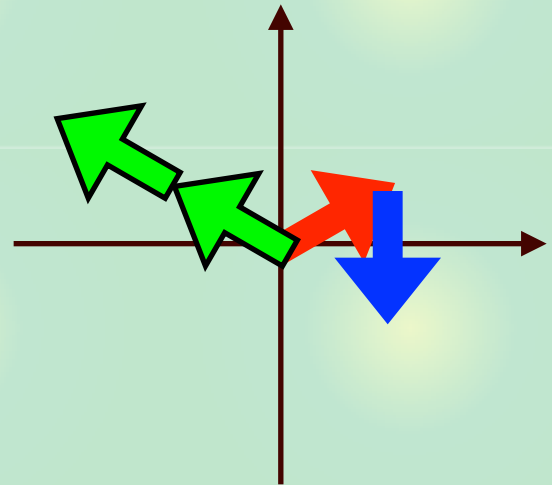
2粒子状態

1. クォーク+クォーク

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

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

- どの組み合わせを取っても中性にならない

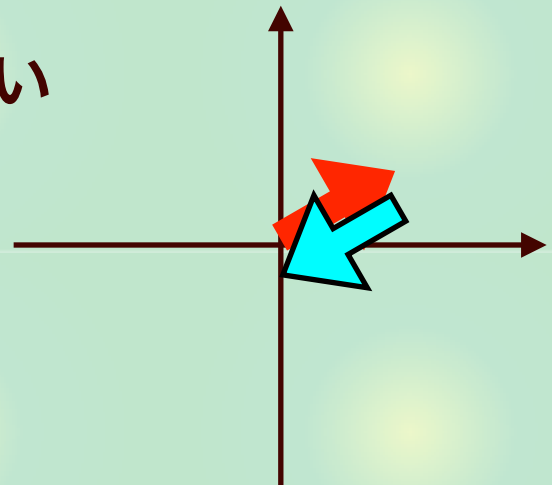


2. 反クォーク+反クォーク

- 1.の符号を変えたもののなので中性にならない

3. クォーク+反クォーク (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. クォーク+クォーク+クォーク

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

2. クォーク+クォーク+反クォーク

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

- どの組み合わせを取っても中性にならない

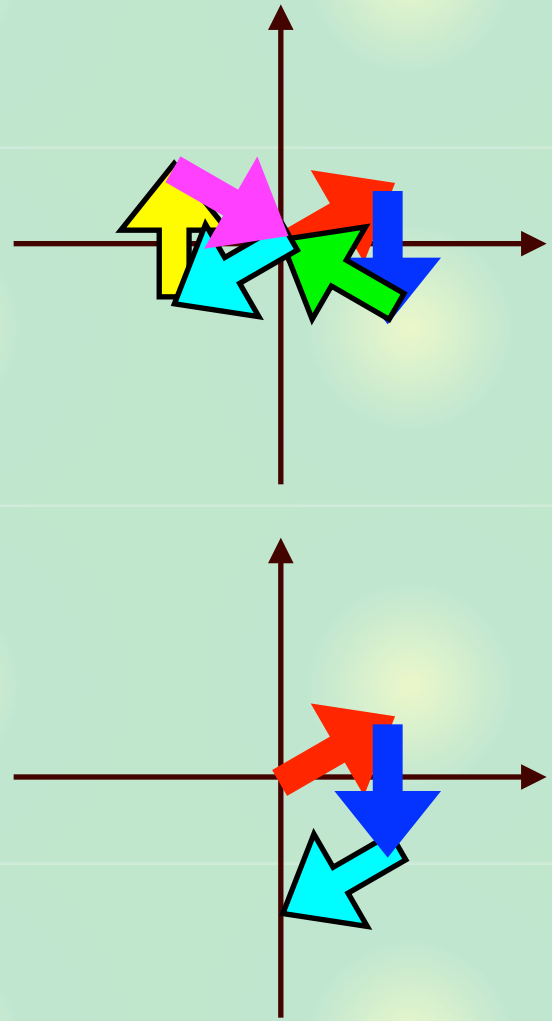
3. クォーク+反クォーク+反クォーク

- どの組み合わせを取っても中性にならない

4. 反クォーク+反クォーク+反クォーク

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

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

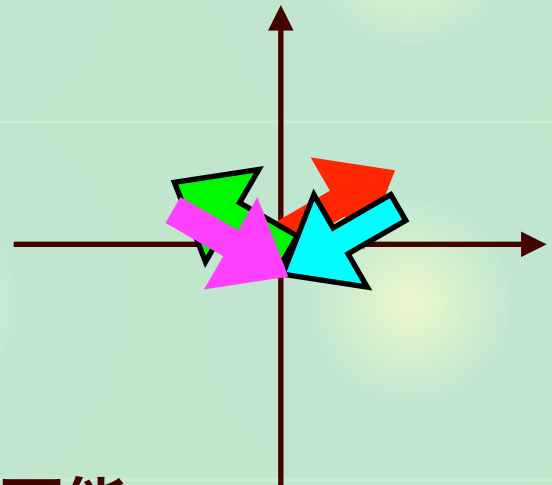
全ての可能性を試しても良いが効率が悪い

- 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

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

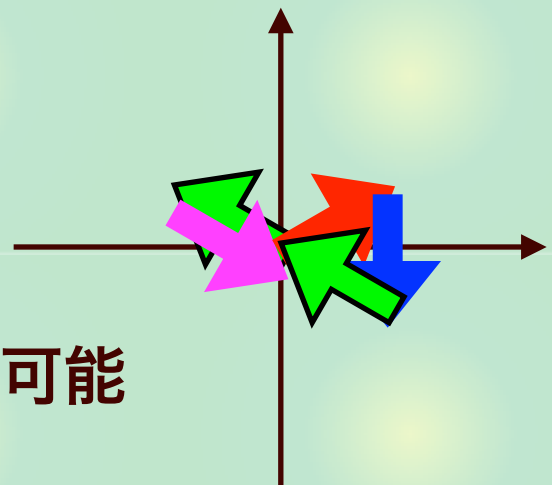
- 4 粒子はクォーク 2 つ + 反クォーク 2 つが可能



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...

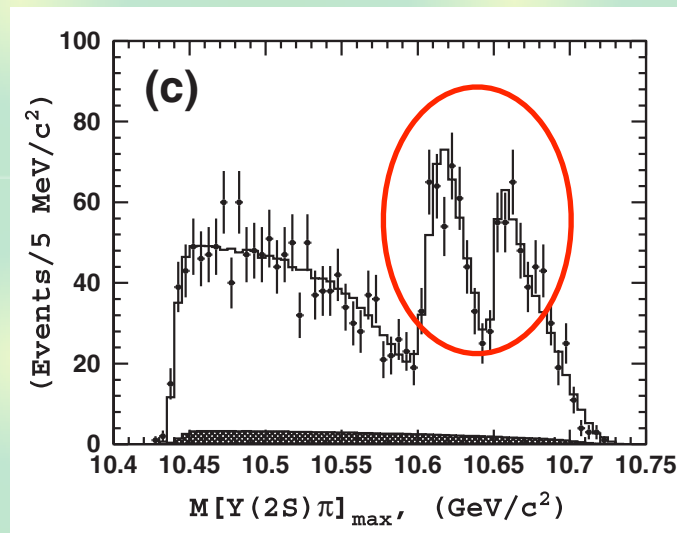
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

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)

$$Y(5S) \rightarrow \pi^\pm + Z_b$$
$$\hookrightarrow Y(nS)(b\bar{b}) + \pi^\mp(u\bar{d}/d\bar{u})$$

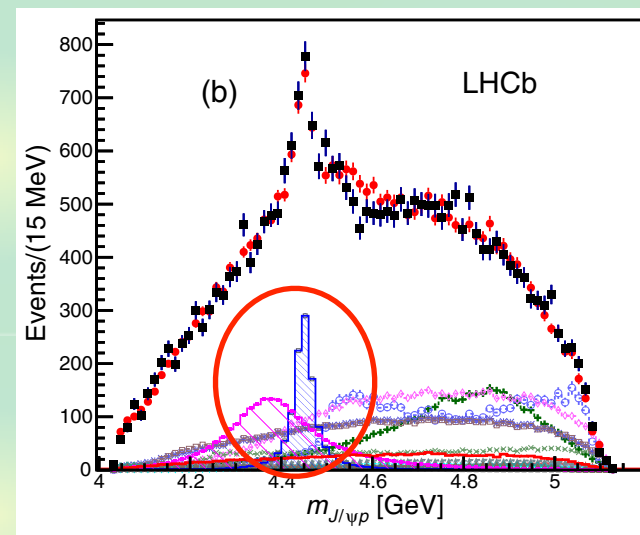
A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)



5 粒子状態 (ペンタクォーク, 2015年)

$$\Lambda_b \rightarrow K^- + P_c$$
$$\hookrightarrow J/\psi(c\bar{c}) + p(uud)$$

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

- カラー中性条件で可能な状態が制限される
- 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



レポート問題1.のヒントはp.33あたりに...