





## 兵藤 哲雄

東京都立大学原子核ハドロン物理研究室





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 バドロン: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





- 原子核:陽子p、中性子n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

р	1/2+ ****	<i>∆</i> (1232)	3/2+ ****	$\Sigma^+$	1/2+ ****	<u>=</u> 0	1/2+ ****	$\Lambda_c^+$	1/2+ ***	****		LIGHT UN (S = C)	-LAVORED = $B = 0$ )		STRANGE $(S = \pm 1, C = B = 0)$		CHARMED, STRANGE $(C = S = \pm 1)$		$^{CC} F(P^{C})$	
'n	1/2+ ****	$\Delta(1600)$	3/2+ ***	$\Sigma^0$	1/2+ ****	Ξ-	1/2+ ****	$\Lambda_{c}^{'}(2595)^{+}$	1/2-	***		$F(f^{C})$		$P(f^{\mathcal{C}})$		(P)		1(P)	• η <sub>c</sub> (15)	0+(0-+)
N(1440)	1/2+ ****	$\Delta(1620)$	1/2 ****	$\Sigma^{-}$	1/2+ ****	$\Xi(1530)$	3/2+ ****	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	• π <sup>±</sup> • π <sup>0</sup>	$1^{-}(0^{-})$ $1^{-}(0^{-}+)$	<ul> <li>φ(1680)</li> <li>ρ<sub>3</sub>(1690)</li> </ul>	$0^{-}(1^{-})$ $1^{+}(3^{-})$	• K <sup>±</sup> • K <sup>0</sup>	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	• D <sub>s</sub> <sup>±</sup> • D <sub>s</sub> <sup>±±</sup>	$0(0^{-})$ $0(?^{?})$	• $J/\psi(1S)$ • $\chi_{c0}(1P)$	0(1) $0^+(0^++)$
N(1520)	3/2 ****	$\Delta(1700)$	3/2 ****	$\Sigma(1385)$ $\Sigma(1490)$	3/2 ****	=(1620)	*	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$	- г /о+	***	• η	$0^{+}(0^{-}+)$	<ul> <li>         ρ(1700)         </li> </ul>	1+(1)	• K§	1/2(0-)	• D <sup>*</sup> <sub>50</sub> (2317) <sup>±</sup>	0(0+)	• $\chi_{C1}(1P)$	$0^+(1^{++})$ $2^7(1^{+-})$
N(1555)	1/2 ****	$\Delta(1750)$ $\Delta(1900)$	1/2 **	$\Sigma(1400)$	**	$\Xi(1030)$ $\Xi(1820)$	3/2- ***	$\Lambda_{c}(2000)^{+}$	5/2 .	***	<ul> <li>ρ(500)</li> <li>ρ(770)</li> </ul>	$1^{+}(1^{-})$	• $f_0(1700)$	1(2++) $0^+(0++)$	• K <sup>o</sup> K <sup>*</sup> <sub>0</sub> (800)	$\frac{1}{2(0^{+})}$	<ul> <li>D<sub>s1</sub>(2460)<sup>±</sup></li> <li>D<sub>s1</sub>(2536)<sup>±</sup></li> </ul>	$0(1^+)$ $0(1^+)$	• $\eta_c(1P)$ • $\chi_{c2}(1P)$	$0^{+}(2^{+})$
N(1675)	5/2 ****	$\Delta(1905)$	5/2+ ****	$\Sigma(1580)$	3/2 *	$\Xi(1950)$	***	$\Sigma_{c}(2455)$	$1/2^{+}$	****	• ω(782)	$0^{-}(1^{-})$	η(1760)	$0^{+}(0^{-}+)$	• K*(892)	$1/2(1^{-})$	• D <sub>52</sub> (2573)	0(??)	• η <sub>c</sub> (25)	$0^{+}(0^{-+})$
N(1680)	5/2+ ****	<i>∆</i> (1910)	1/2+ ****	Σ(1620)	1/2 *	Ξ(2030)	$\geq \frac{5}{2}$ ***	$\Sigma_c(2520)$	3/2+	***	<ul> <li>η (958)</li> <li>f<sub>0</sub>(980)</li> </ul>	$0^{+}(0^{+})$	• $\pi(1800)$ $f_2(1810)$	$0^{+}(2^{++})$	• $K_1(12/0)$ • $K_1(1400)$	$\frac{1}{2(1^+)}$ $\frac{1}{2(1^+)}$	• $D_{S1}^*(2700)^{\pm}$ $D_{S1}^*(2860)^{\pm}$	$0(1^{-})$ $0(?^{?})$	• ψ(23) • ψ(3770)	$0^{-}(1^{-})$
N(1685)	*	<i>∆</i> (1920)	3/2+ ***	$\Sigma(1660)$	1/2+ ***	Ξ(2120)	*	$\Sigma_c(2800)$		***	• a <sub>0</sub> (980)	$1^{-}(0^{++})$	X(1835)	$?^{?}(?^{-+})$	• K*(1410)	$1/2(1^{-})$	$D_{sJ}(3040)^{\pm}$	0(? <sup>?</sup> )	X(3823)	$?^{?}(?^{?-})$
N(1700)	3/2 ***	$\Delta(1930)$	5/2 ***	$\Sigma(1670)$	3/2 ****	$\Xi(2250)$	**	=_c	1/2+	***	<ul> <li>φ(1020)</li> <li>h<sub>1</sub>(1170)</li> </ul>	$0^{-}(1^{+})$	<ul> <li></li></ul>	0-(3)	• K <sub>0</sub> (1430) • K <sub>5</sub> (1430)	$1/2(0^+)$ $1/2(2^+)$	BOTT	OM	• X(3900) <sup>±</sup>	?(1 <sup>+</sup> )
N(1710) N(1720)	1/2 <sup>+</sup> ****	$\Delta(1940)$ $\Delta(1950)$	3/2 *** 7/2 <sup>+</sup> ****	$\Sigma(1690)$ $\Sigma(1730)$	3/2+ *	=(2370) =(2500)	*	$=_{c}^{0}$	1/2+	***	<ul> <li>b1(1235)</li> <li>31(1260)</li> </ul>	$1^{+}(1^{+-})$ $1^{-}(1^{++})$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$	K(1460)	1/2(0-)	(B = :	±1) 1/2(0 <sup></sup> )	X(3900) <sup>0</sup>	?(?')
N(1860)	5/2 F/0+ **	4(2000)	F /0+ ++	$\frac{2}{5}(1750)$	1/0- +++	_(2300)		= <u>c</u>	1/2		• f <sub>2</sub> (1200)	n+(2+1)	• #2(1000) -/1000)	1 (2 - 1) 1 + (11)	K <sub>2</sub> (1580)	1/2(2)	- 10	1/2(0 )	• v ~(2P)	$0^{+}(2^{+}+)$
N(1875)	1111			78		-		7 +~		N 6.	• f <sub>1</sub>					_ 86		<b>_</b>	11	?!(?!!) 7(? <sup>?</sup> )
N(1880)	ノヘリ	<b>/</b> /	ン.		it.	- 14-14	' '+	-/よ	C		•π	くい	ソ	, -	$\pi \mathbf{H}$	귀법	1	77	~	0-(1)
N(1895)							ل علد ا			•	• a; 🖊	· /		-				-0-		?(?;) $0^{+}(?;+)$
N(1900)	3/2 ***	$\Delta(2350)$	5/2 * 7/2 <sup>+</sup> *	$\Sigma(1880)$ $\Sigma(1900)$	1/2 **	12(2470)	ተተ	$\Xi_{c}(2930)$		*	h1(1300)	e (i e e e e	• d4(2040)	1 (4 : ; )	K(1830)	1/2(0-)	• B1(5721)+	1/2(1+)	• ¢(4100)	$0^{-}(1^{-})$
N(2000)	5/2+ **	$\Delta(2390)$ $\Delta(2400)$	9/2 **	$\Sigma(1900)$	5/2+ ****			$\Xi_{c}(2980)$		***	<ul> <li>π<sub>1</sub>(1400)</li> <li>n(1405)</li> </ul>	$1^{-}(1^{-}+)$ $0^{+}(0^{-}+)$	<ul> <li>f<sub>4</sub>(2050)</li> <li>π<sub>2</sub>(2100)</li> </ul>	$0^+(4^{++})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$	<ul> <li>B<sub>1</sub>(5721)<sup>0</sup></li> <li>B<sup>*</sup>(5722)</li> </ul>	$\frac{1}{2(1^+)}$	X(4160) X(4230)	?:(?::) ??(1)
N(2040)	3/2+ *	$\Delta(2420)$	11/2+ ****	Σ(1940)	3/2+ *			$=_{c}(3033)$		***	• f <sub>1</sub> (1420)	0+(1++)	f <sub>0</sub> (2		• K <sup>*</sup> <sub>4</sub> (2045)	$1/2(2^+)$ $1/2(4^+)$	• B <sub>2</sub> (5747) <sup>+</sup>	1/2(2 <sup>+</sup> )	X(4240) <sup>±</sup>	? <sup>?</sup> (0 <sup>-</sup> )
N(2060)	5/2 **	$\Delta(2750)$	13/2- **	Σ(1940)	3/2- ***			$\Xi_{c}(3123)$		*	• ω(1420) fs(1430)	$0^{-}(1^{-})$ $0^{+}(2^{+})$			K <sub>2</sub> (2250)	1/2(2-)	• B <sup>*</sup> <sub>2</sub> (5747) <sup>0</sup>	$1/2(2^+)$	X(4250)∸ • X(4260)	$\frac{2}{2}(2^{-1})$
N(2100)	1/2+ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+ **$	$\Sigma(2000)$	$1/2^{-} *$			$\Omega_c^0$	$1/2^{+}$	***	• a <sub>0</sub> (1450)	$1^{-}(0^{++})$			( <sub>3</sub> (2320) ( <sub>5</sub> (2380)	1/2(3+) 1/2(5-)	• B(5970) <sup>0</sup> • B(5970) <sup>0</sup>	?(??)	X(4350)	$0^{+}(?^{?+})$
N(2120)	3/2 **	Δ	1/2+ ****	$\Sigma(2030)$	7/2 **** ' 5/2 *			$\Omega_{c}(2770)^{0}$	3/2+	***	<ul> <li> <i>ρ</i>(1450)         </li> <li> <i>η</i>(1475)         </li> </ul>	$0^{+}(0^{-}+)$			44(2500)	$\frac{1}{2(4^{-})}$	BOTTOM, S	TRANGE	• ψ(4415)	$0^{-}(1^{-})$
N(2190)	9/2+ ****	A(1405)	1/2 ****	$\Sigma(2070)$ $\Sigma(2080)$	3/2+ **			-+		÷	• f <sub>0</sub> (1500)	$0^{+}(0^{+}+)$	η		K(3100)	r(r)	$(B = \pm 1, 3)$	S = ∓1)	• X(4430) <sup>±</sup>	$?(1^+)$
N(2250)	9/2 ****	<u>Л(</u> 1520)	3/2 ****	$\Sigma(2100)$	7/2 *			= cc		4.	• $f'_2(1525)$	$0^{+}(2^{++})$	<ul> <li><i>p</i><sub>3</sub>(∠)</li> <li><i>f</i><sub>2</sub>(2300)</li> </ul>	(z + +)	CHAR (C=	MED ±1)	• B <sup>o</sup> <sub>S</sub> • B <sup>*</sup> <sub>c</sub>	$0(0^{-})$ $0(1^{-})$	• \(4000)	·(I )
N(2300)	1/2+ **	A(1600)	1/2+ ***	Σ(2250)	***			$\Lambda_{b}^{0}$	$1/2^{+}$	***	$f_2(1565)$	$0^{+}(2^{++})$ $1^{+}(1^{})$	f <sub>4</sub> (2300)	$0^{+}(4^{++})$	• D±	1/2(0-)	• B <sub>51</sub> (5830) <sup>0</sup>	0(1+)	n <sub>b</sub> (15)	$\frac{b}{0^{+}(0^{-}+)}$
N(2570)	5/2 **	$\Lambda(1670)$	1 // ++++					$\Lambda_{b}(5912)^{0}$	$1/2^{-}$	***	h	1 (1 )	11123301		1.10	-	I A R° /Kazimo	11911	10()	Ţ,
N(2600)	11/2 ***	A(1710)	ニット	7			$\alpha \alpha$	$\Lambda_b(5920)^0$	3/2-	***	• 77	7		. /		5.				<b>7</b> 3
10(2100)	13/2	$\Lambda(1710)$ $\Lambda(1800)$	コンン	<b>^</b>	<u> </u>	' U	<i>UU</i>	$\Sigma_b$ $\Sigma^*$	$1/2^+$	***	 f <sub>2</sub>	ィク			IX .	/ /	1 —	- '/	' U	<b>U</b> j
		Л(1810)	1	-	-	1	11	z <sub>b</sub> =0 =-	3/2 · 1/2+	***	• η • ω	-		•			-	-	1	<b>1</b> 3
		A(1820)	5/2 <sup>+</sup> ****					$=b^{*}-b^{*}$ ='(5935)	$-\frac{1}{2}$	***	<ul> <li>ω<sub>3</sub>(1670)</li> </ul>	0-(3)	Further St	ates	$D_1(2420)^{-1}$ $D_1(2430)^{0}$	$\frac{1}{2(1^+)}$		• (• )	<ul> <li>         Υ(25) γ(1 D)         </li> </ul>	$0^{-}(1^{-})$
		A(1830)	5/2 ****					$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***	<ul> <li>π<sub>2</sub>(1670)</li> </ul>	1-(2-+)			<ul> <li>D<sup>*</sup><sub>2</sub>(2460)<sup>0</sup></li> <li>D<sup>*</sup><sub>2</sub>(2460)<sup>+</sup></li> </ul>	$1/2(2^+)$			<ul> <li> <i>τ</i>(1D)         </li> <li> <i>χ</i><sub>E0</sub>(2P)         </li> </ul>	$0^{+}(0^{+})$
		A(2000)	3/2 ****					$\Xi_{b}^{*}(5955)$	3/2+	***					• D <sub>2</sub> (2460)= D(2550) <sup>0</sup>	1/2(2 · ) 1/2(0 - )			• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
		$\Lambda(2000)$	7/2+ *					$\Omega_b^-$	$1/2^{+}$	***					D(2600)	1/2(??)			• X <sub>b2</sub> (2P)	$0^{+}(2^{+})$
		A(2050)	3/2- *												D (2040)= D(2750)	1/2(?) 1/2(?)			• 7(35) • Vm(3P)	$0^{-}(1^{})$ $0^{+}(1^{++})$
		Λ(2100)	7/2 ****																• T(4S)	0-(1)
		A(2110)	5/2+ ***																X(10610) <sup>4</sup> X(10610) <sup>0</sup>	$1^{+}(1^{+})$ $1^{+}(1^{+})$
		71(2325) A(2350)	3/2 ↑ 9/2+ ***																X(10650)	?+(1+)
		A(2585)	**																<ul> <li> <i>γ</i>(10860)         </li> <li> <i>γ</i>(11020)         </li> </ul>	0 (1 ) 0-(1)

http://pdg.lbl.gov/



#### ニュートンの運動方程式

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

- 回転の運動方程式

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

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

- 仕事とエネルギーの関係  

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

多くの現象を説明する少数の「法則」を解明する

# 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...

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

- 電磁気力:電流が流れる、磁石が引き寄せ合う...

$$\overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{E} = \rho, \quad \overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{B} - \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t} = \overrightarrow{j}$$
$$\overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{B} = 0, \quad \overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{E} + \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} = \overrightarrow{0}$$

これら以外に力(相互作用)はないのか?



質量 m と M の粒子を距離 r 離して置く



- 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



電荷 q と Q の粒子を距離 r 離して置く



- 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



# 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)<sup>12</sup>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?



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



- 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: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 <sup>12</sup>C を核子に分解するのに必要なエネルギー  $\sim 8.6 \times 10^{12}$  J  $\sim 2.1 \times 10^{9}$  kcal



**核力は**π中間子の交換で媒介される



- ファインマン図による表現



https://www.nobelprize.org



- 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
- 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)





- 弱い相互作用:電弱統一理論



https://www.nobelprize.org







標準理論















## 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 **ダ** 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 バドロン: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)<sup>2</sup>

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

~ 1 fm

p

p

原子核:核子はいくつまで結合できるか?

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、<sup>4</sup>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:<sup>4</sup>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, ...)
- <mark>核子、クォーク、電子、ニュートリノ、<sup>3</sup>He原子など</mark>
- 同種粒子は同じ量子状態を取れない(パウリ原理)

#### <sup>原子核 : 核子はいくつまで結合できるか ?</sup> <mark>箱の中のフェルミ粒子</mark>

- 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(↑↓)とエネルギー(離散的な値)



- 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
- -> エネルギー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 <sup>7</sup>Li 中性子過剰なリチウム <sup>11</sup>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予言されている

原子核:まとめ

## 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 バドロン: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? <mark>核力とQCDの相互作用</mark>

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

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

- 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



- 電子間の相互作用:クーロンカ(+量子効果)

### <sup>ハドロン : クォークはいくつまで結合できるか?</sup> <mark>強い相互作用の基礎理論</mark>

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathscr{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G^{(a)}_{\mu\nu} G^{(a)\mu\nu} + \bar{q}_{ijf} (i\gamma^{\mu} (D_{\mu})_{ijf} - m_f \delta_{ijf}) f$$

- 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*,*i*,*j*)を持つ



- グルーオン間も相互作用する



- 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? <mark>未解決の問題</mark>

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



#### 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、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?

#### <sup>ハドロン : クォークはいくつまで結合できるか?</sup> 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



- 電荷中性条件:ベクトルの和が零ベクトルになる

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



-  $\bar{q}$ 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?



- **1.** q + q**r** + **b** = (1/2, -1/3)
  - $g + g = (-1, 2/3), \cdots$
  - 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なので中性にならない

3.  $q + \bar{q}$  (メソン)

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

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) r + b + g = (0,0) 中性!

**2.**  $q + q + \bar{q}, \quad q + \bar{q} + \bar{q}$  $\mathbf{r} + \mathbf{b} + \bar{\mathbf{r}} = (0, -2/3), \cdots$ 

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

- 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)

 $\bar{\mathbf{r}} + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\mathbf{g}} = (0,0)$  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? <mark>4粒子以上の状態</mark>

- 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

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

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

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

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

ハドロン:まとめ

## ここまでのまとめ



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  $\mathscr{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G^a_{\mu\nu} G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f} (i\gamma^{\mu} (D_{\mu})_{ij} - m_f \delta_{ij}) q_{j,f}$ 🎽 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.36あたりに...