

強い相互作用の世界



兵藤 哲雄

東京都立大学原子核ハドロン物理研究室

2021, Jul. 14th 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：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？

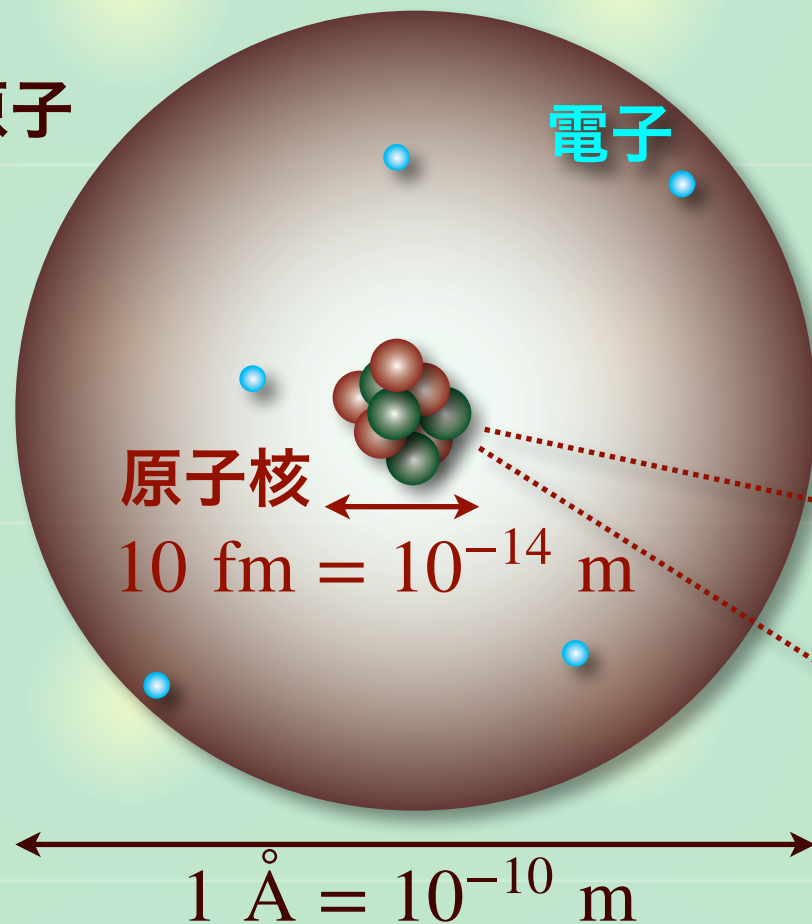
- エキゾチックハドロン



まとめ

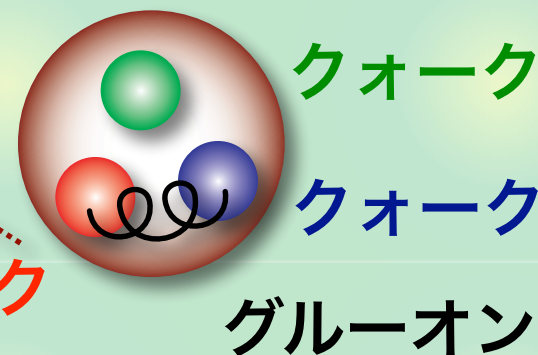
原子、原子核、ハドロン

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



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

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

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

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...

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

- 電磁気力：電流が流れる、磁石が引き寄せ合う...

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

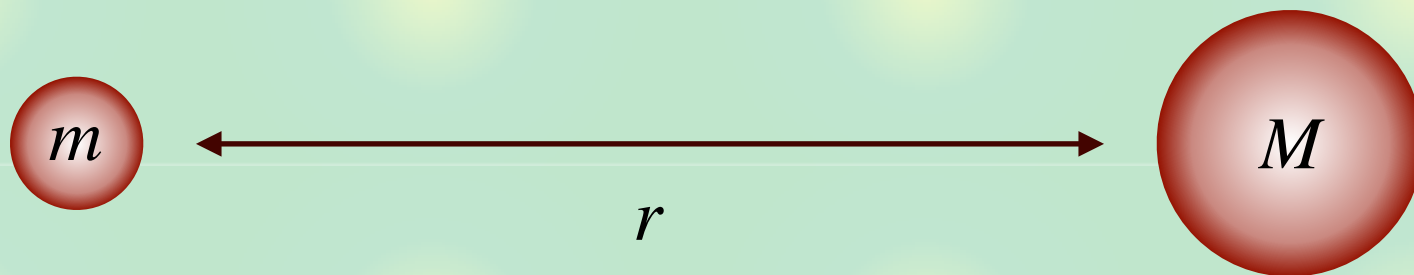
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0}$$

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

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

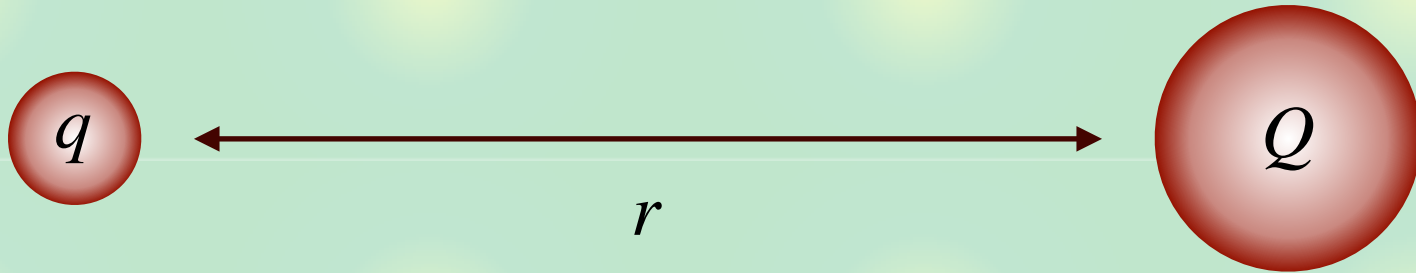


- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- G :万有引力定数
- 重力は常に引力

電磁気力

電荷 q と Q の粒子を距離 r 離して置く

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



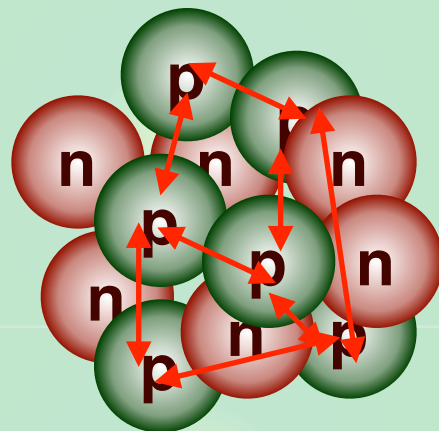
- 力は距離の2乗に反比例
- **電荷**が力の強さを決める
- $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$:クーロン結合定数
- 電磁気力は引力でも**斥力**でもある

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**

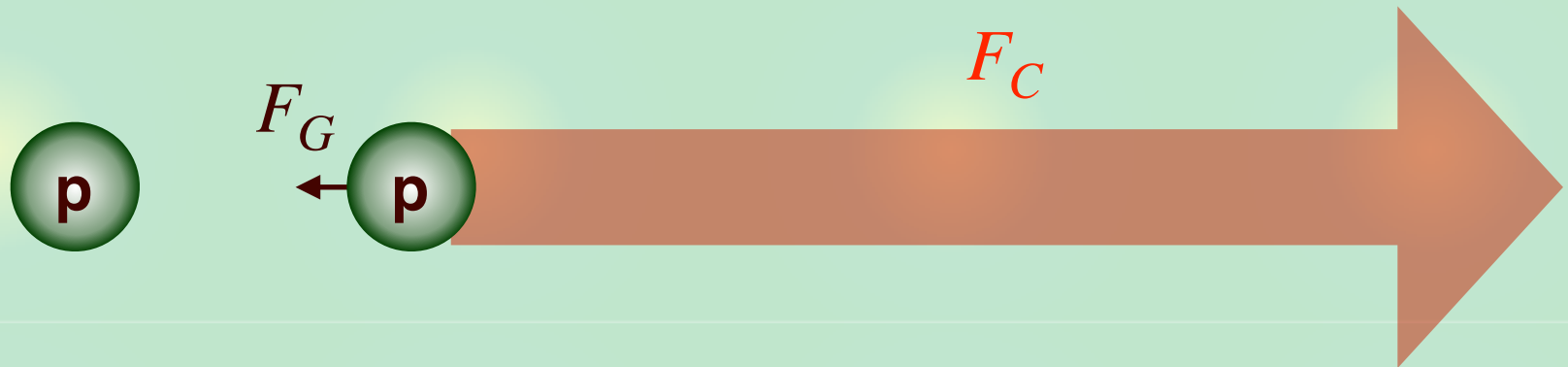
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

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

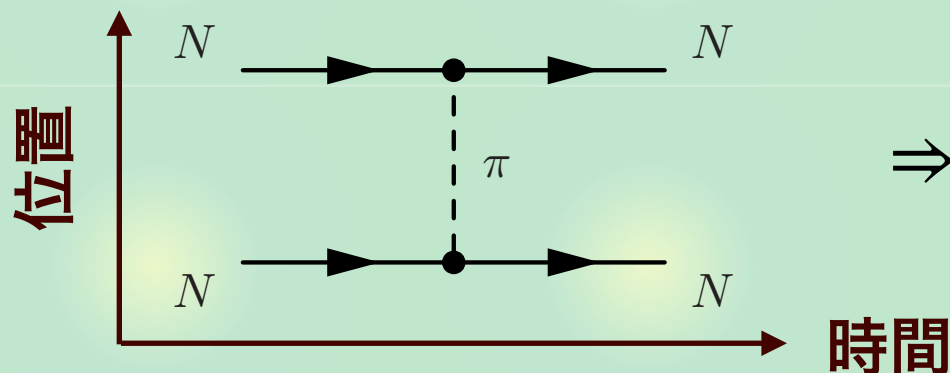


(1949年)



<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



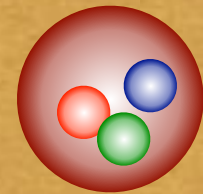
原子核ハドロン物理

- 強い相互作用が生む多くの物理を研究



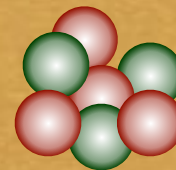
ハドロン

- 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

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

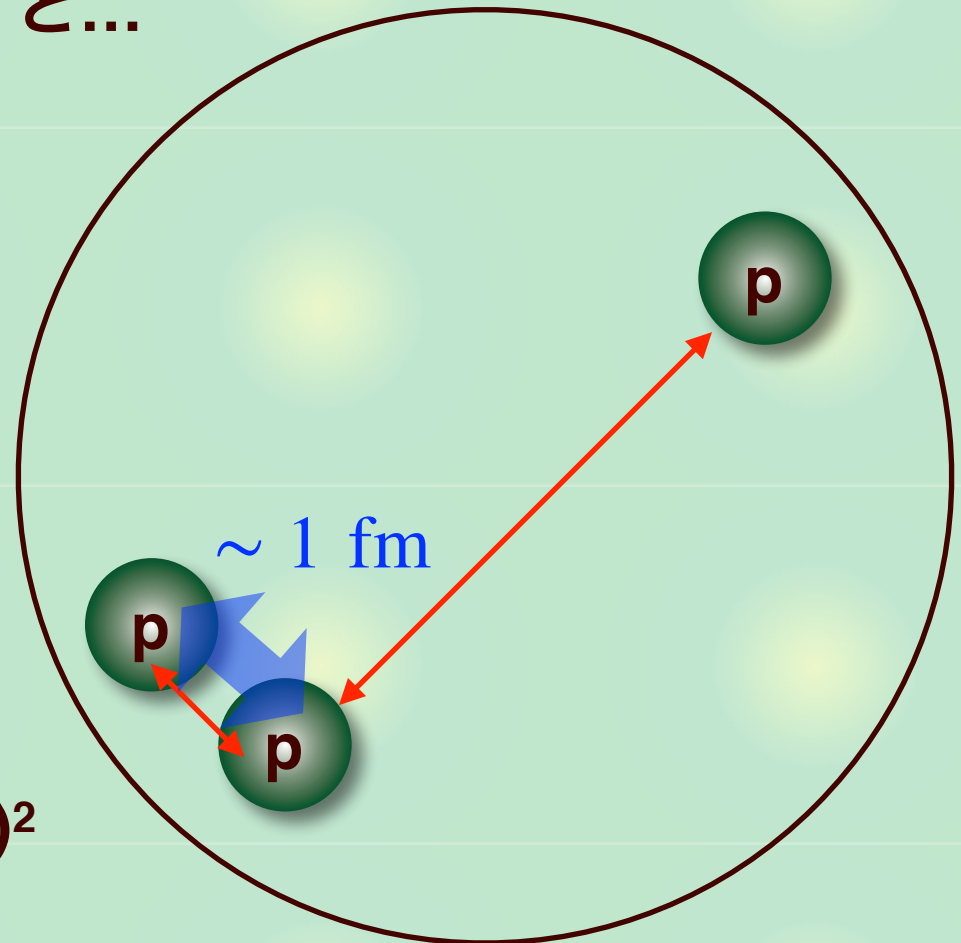
近くの核子とのみ引力

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



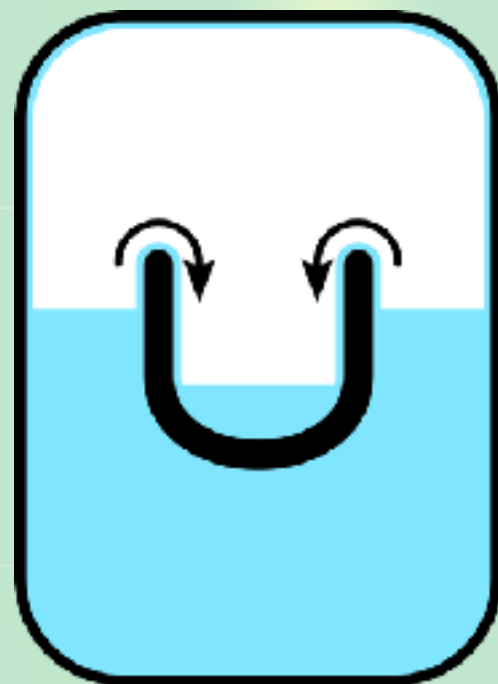
陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

→ 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>

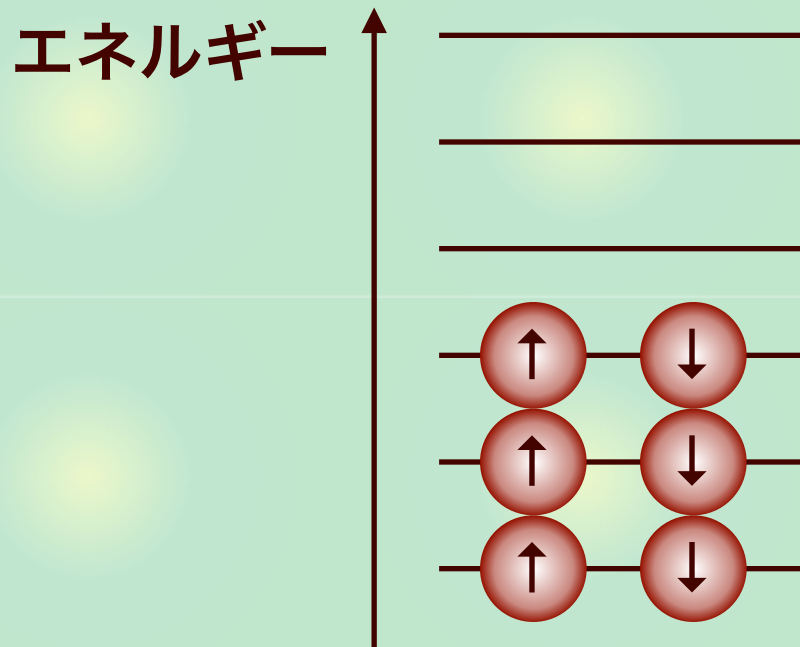
フェルミ粒子（フェルミオン）

- 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)



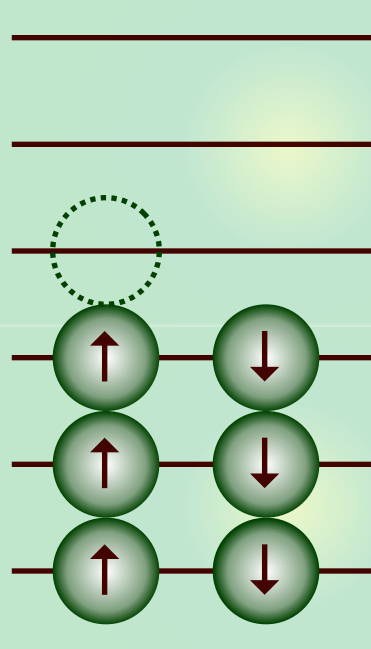
- エネルギーの低い状態に粒子を追加したい
- 既に他の粒子がいる状態には入れない
- > エネルギーの低い状態から順番に占有される

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

原子核の場合

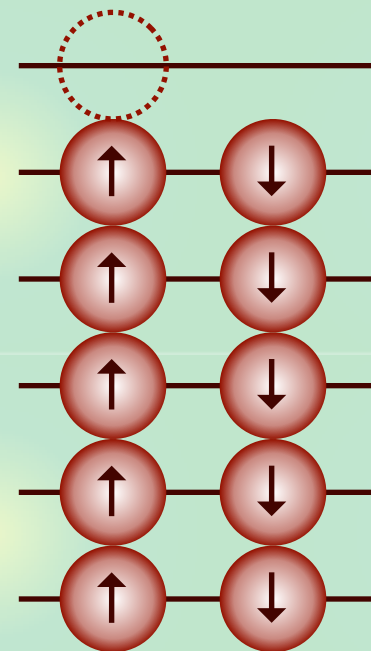
原子核中に中性子ばかりを増やしていくと...

エネルギー↑



陽子

エネルギー↑



中性子

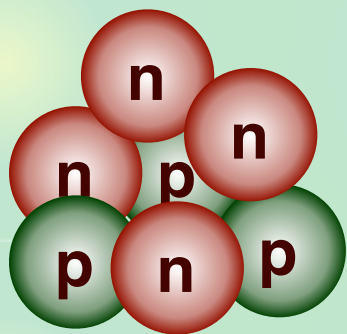
- 陽子を追加する方が低いエネルギーで済む
- β 崩壊（中性子が陽子に変わる）などで**不安定**

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

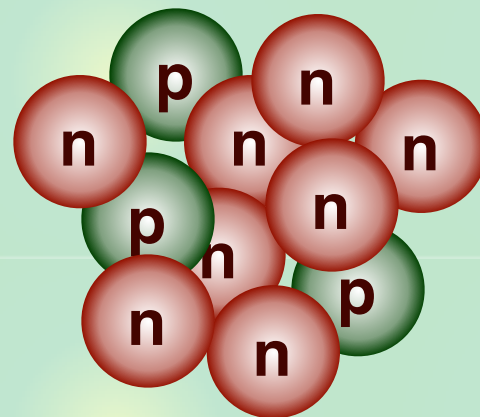
エキゾチックな原子核

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

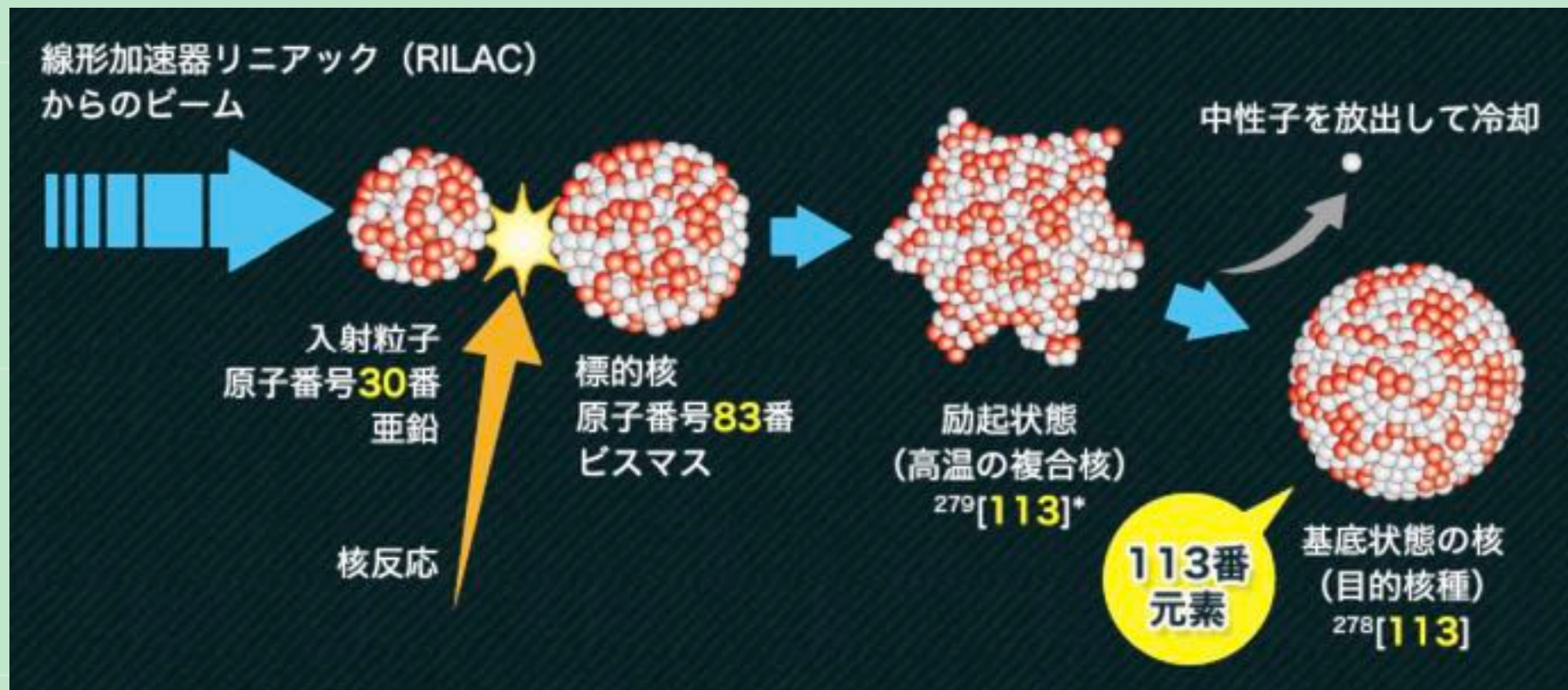


<https://www.riken.jp/pr/fun/nh/>

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



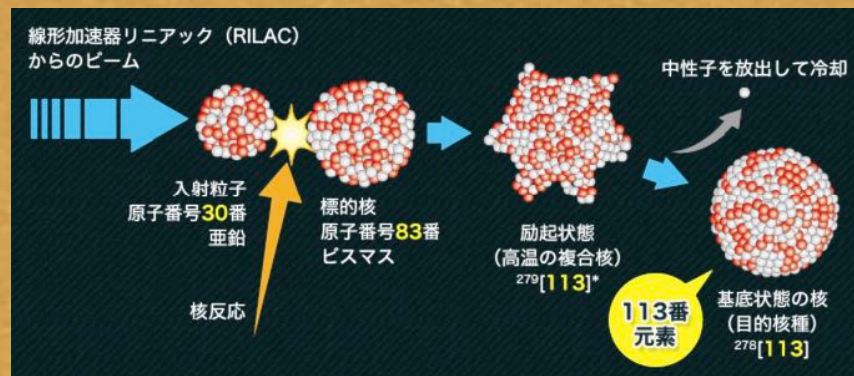
原子核の性質

- 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

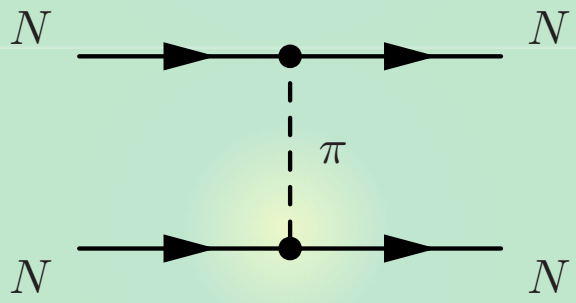
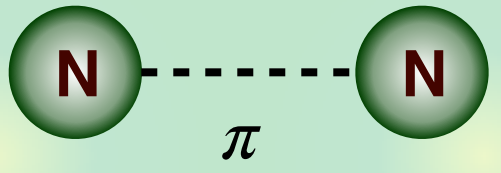


まとめ

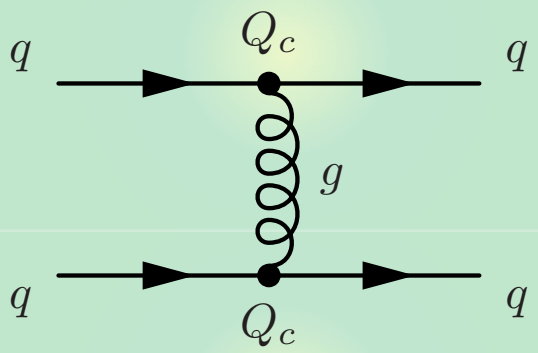
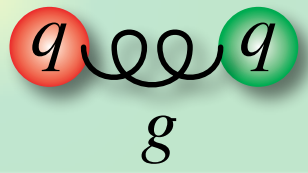
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

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



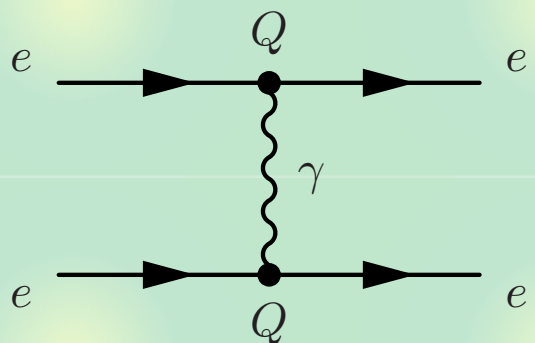
- 核子や中間子もクォーク・グルーオンからできている
- 強い核力の起源もQCDの相互作用

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 fermion lines representing electrons (e). The top line has an incoming electron on the left and an outgoing electron on the right. The bottom line also has an incoming electron on the left and an outgoing electron on the right. A vertical wavy line representing a photon (γ) connects the two lines. At each vertex, there is a black dot and the label Q . To the right of the diagram, an arrow points to the equation for the Coulomb force:

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

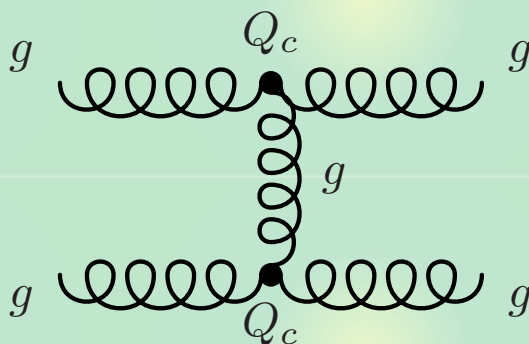
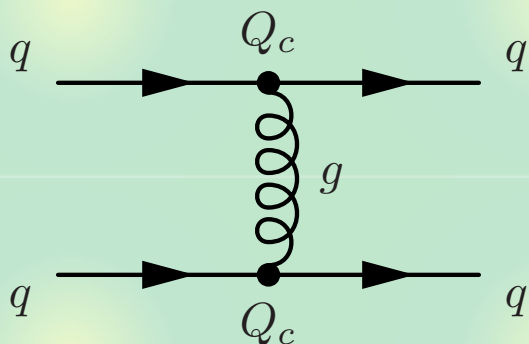
- 電子間の相互作用：クーロン力 (+量子効果)

強い相互作用の基礎理論

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f} (i\gamma^\mu (D_\mu)_{ij} - m_f \delta_{ij}) q_{j,f}$$

- 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



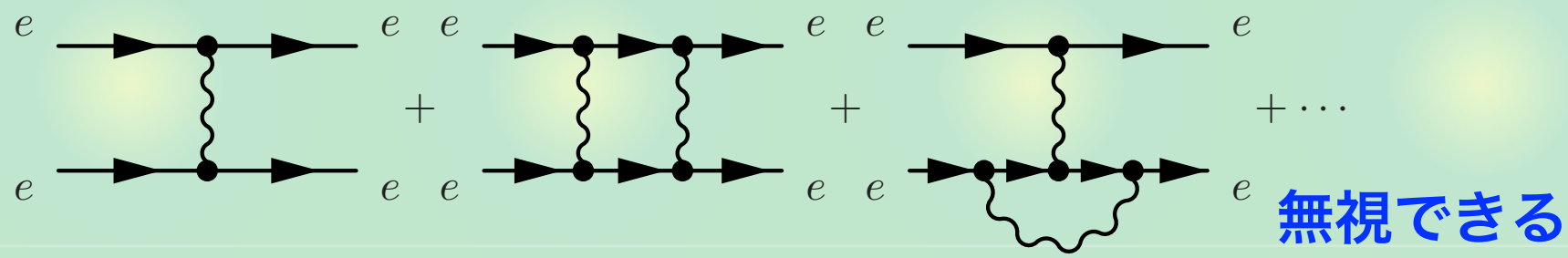
- グルーオン間も相互作用する

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

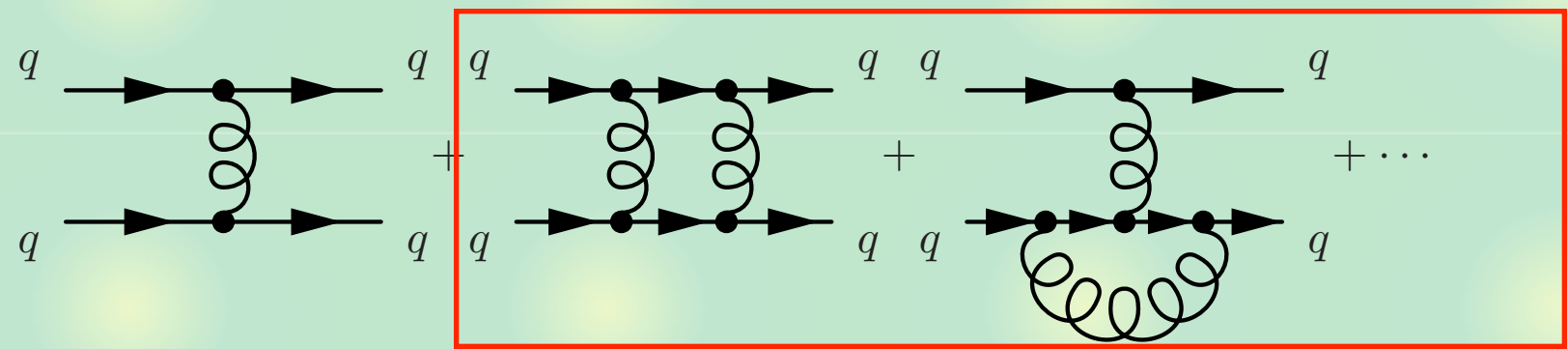
量子効果の計算

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！



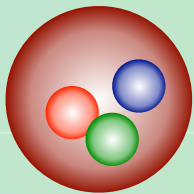
- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

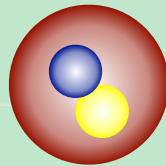
未解決の問題

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？

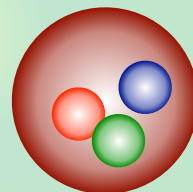
観測されているハドロンとクォーク構成

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

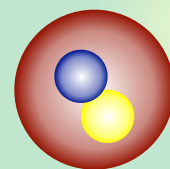
バリオン：陽子、中性子など

- 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

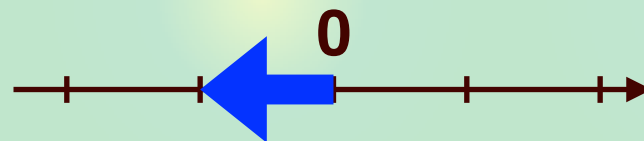
陽子

$$Q_p = +1$$



電子

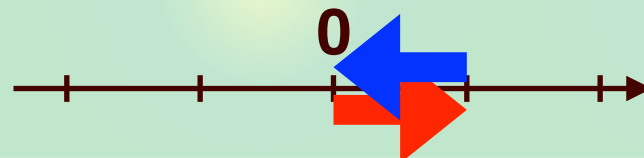
$$Q_e = -1$$



- 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

$$Q_p + Q_e = 0$$



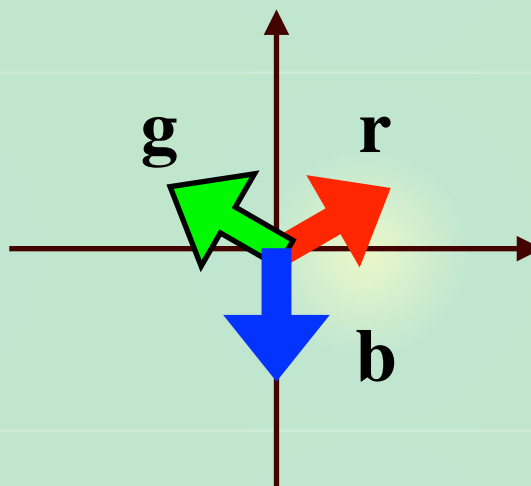
クォークのカラー電荷の表現

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

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

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

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

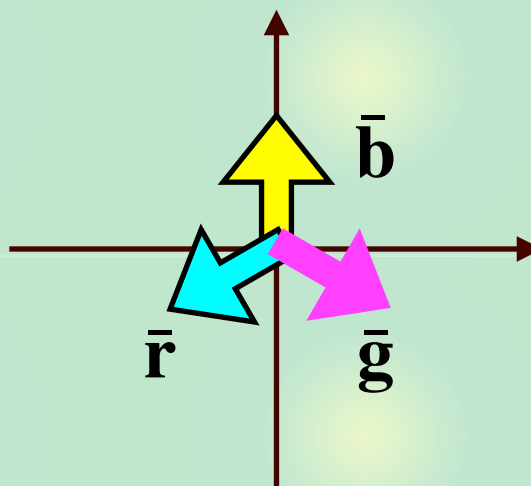


反クォーク \bar{q} のカラー電荷

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

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

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



- \bar{q} は q の反粒子なので逆符号の電荷を持つ

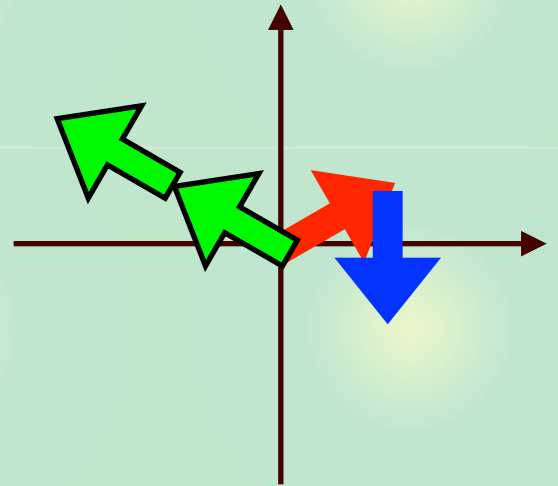
2粒子状態

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

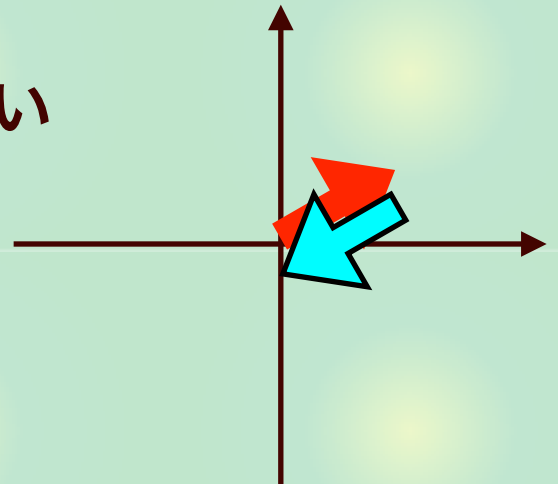


2. $\bar{q} + \bar{q}$

- 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**

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

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

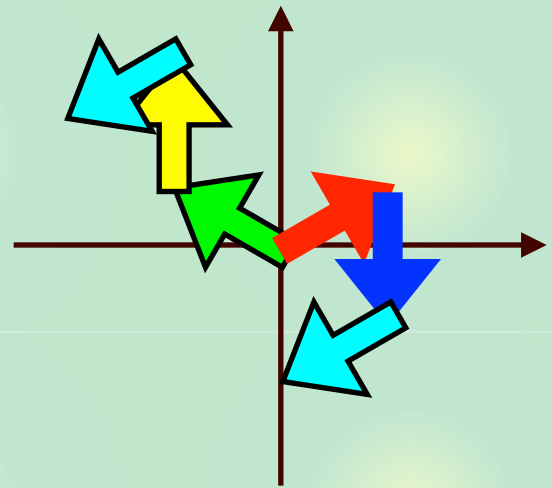
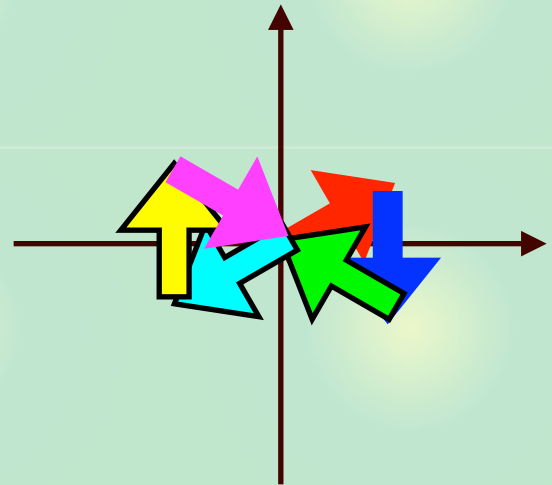
$$\mathbf{g} + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\mathbf{r}} = (-1, 2/3), \dots$$

- 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

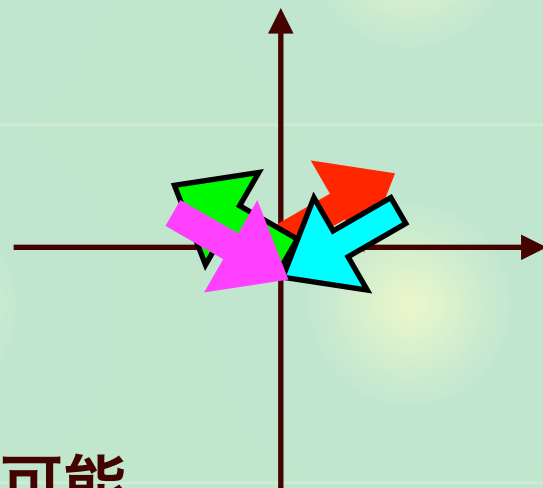
全ての可能性を試しても良いが効率が悪い

- 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

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

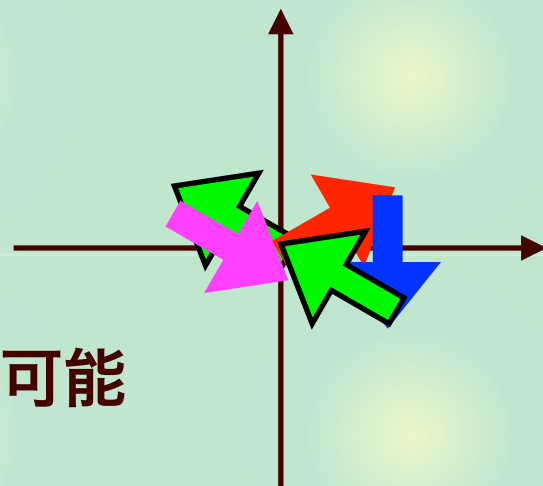
- 4粒子はクォーク2つ + 反クォーク2つが可能



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？

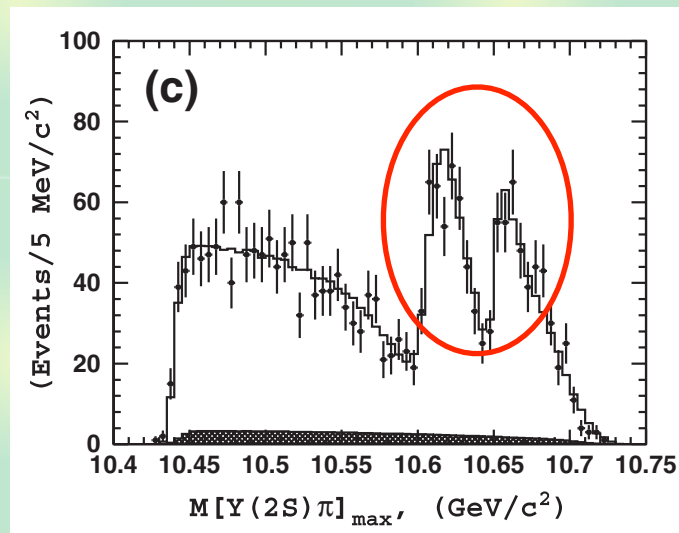
エキゾチックハドロンの観測

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)

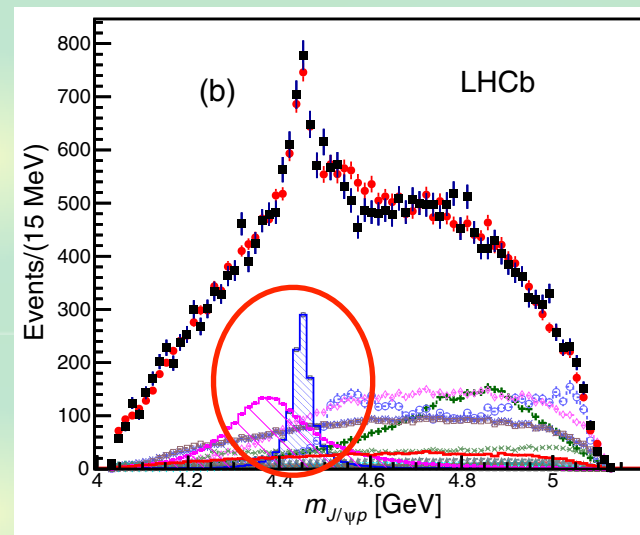


5粒子状態 (ペンタクォーク, 2015年)

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

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

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

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f}(i\gamma^\mu(D_\mu)_{ij} - m_f\delta_{ij})q_{j,f}$$



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...