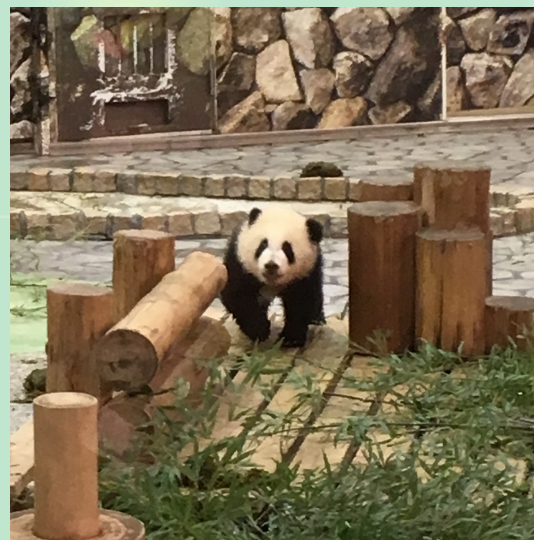



# 強い相互作用の世界



兵藤 哲雄

原子核ハドロン物理研究室

2020, Aug 12th 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？

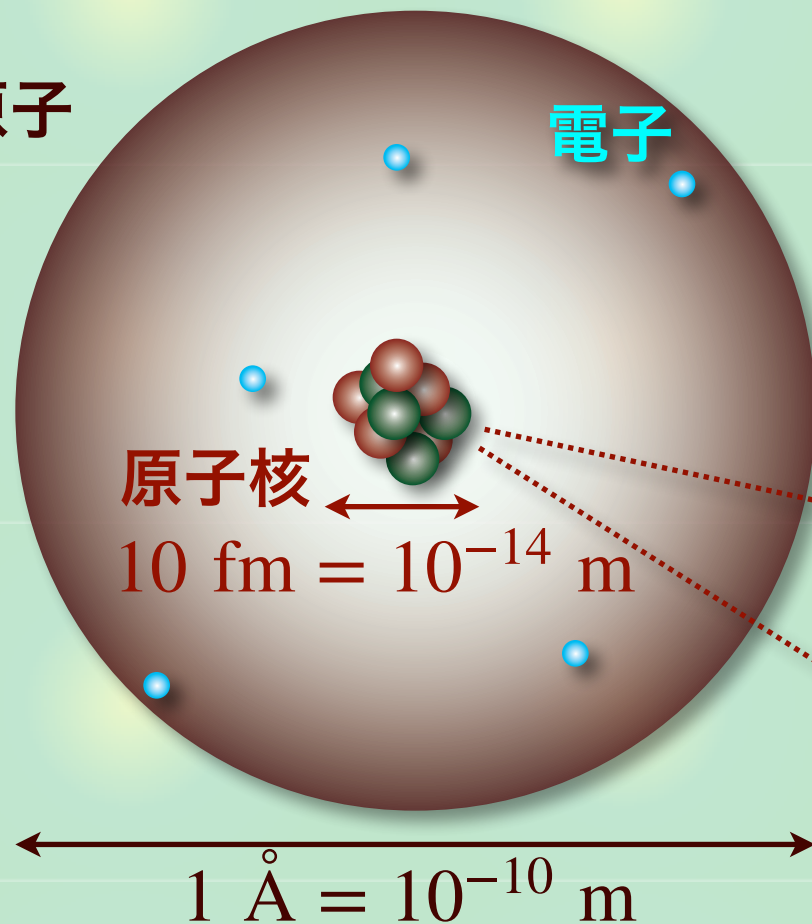
- エキゾチックハドロン



## まとめ

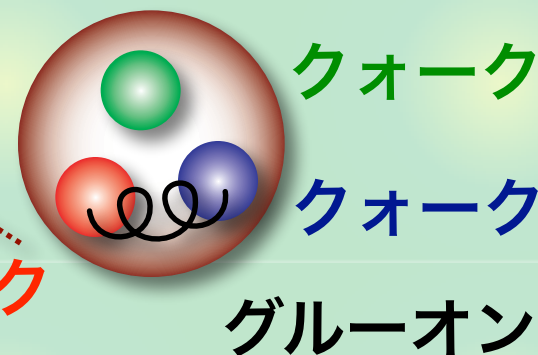
# 原子、原子核、ハドロン

原子



## 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





# 力学の基本原則

## 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

$$\frac{d^2 \vec{L}}{dt^2} = \vec{N}$$

- 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「法則」の起源はニュートンの運動方程式にある

# 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...

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

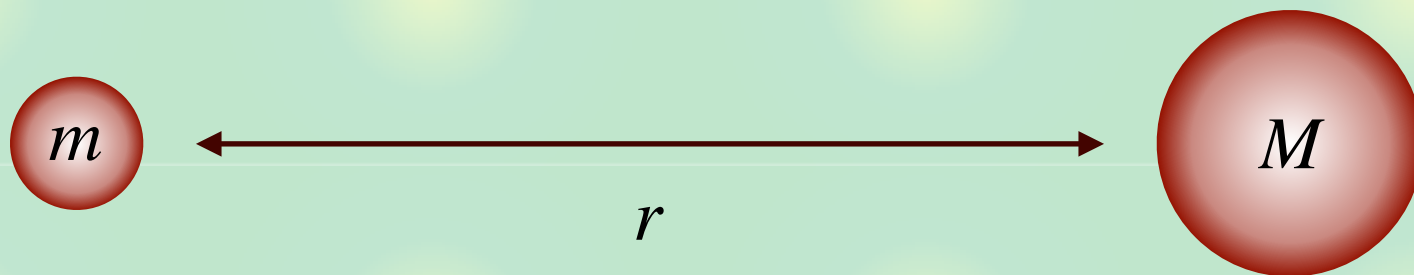
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0}$$

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

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



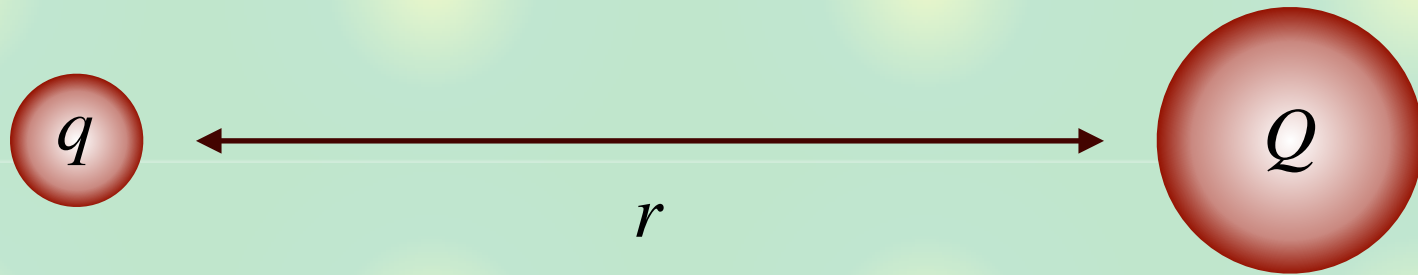
- 力は距離の2乗に反比例
- 質量が力の強さを決める
- $G$ :万有引力定数
- 重力は常に引力



## 電磁気力

電荷  $q$  と  $Q$  の粒子を距離  $r$  離して置く

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



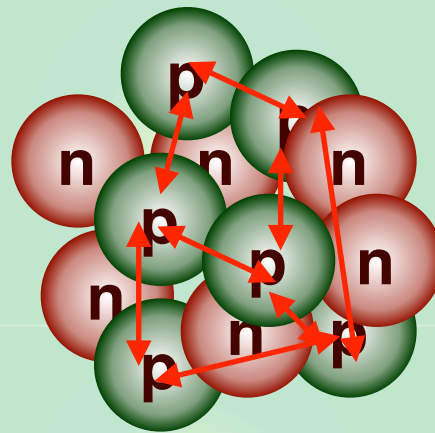
- 力は距離の2乗に反比例
- **電荷**が力の強さを決める
- $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$ :クーロン結合定数
- 電磁気力は引力でも**斥力**でもある

} 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)  $^{12}\text{C}$  (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**

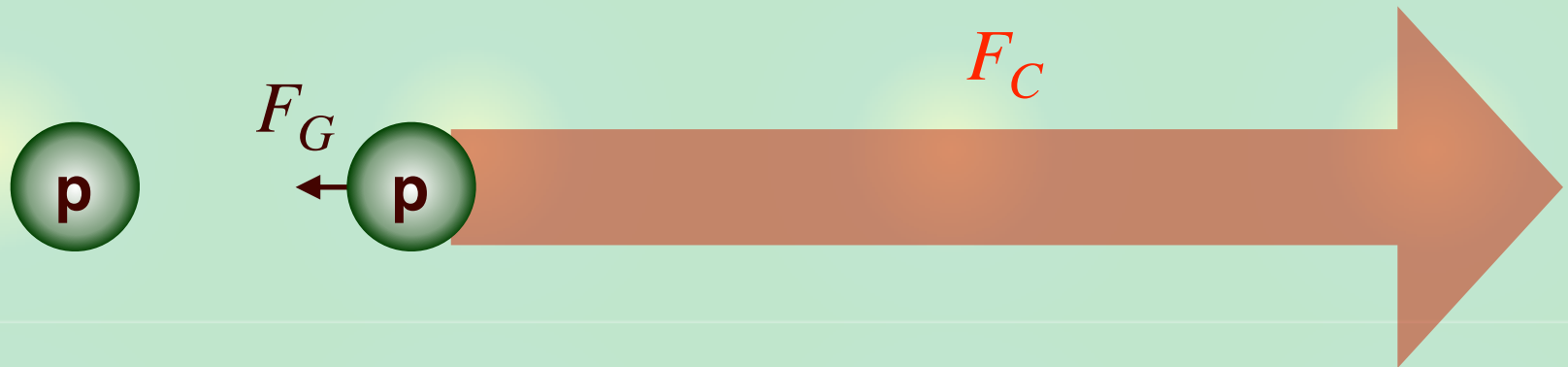
- 重力の引力で原子核を束縛できるか？

## 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

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

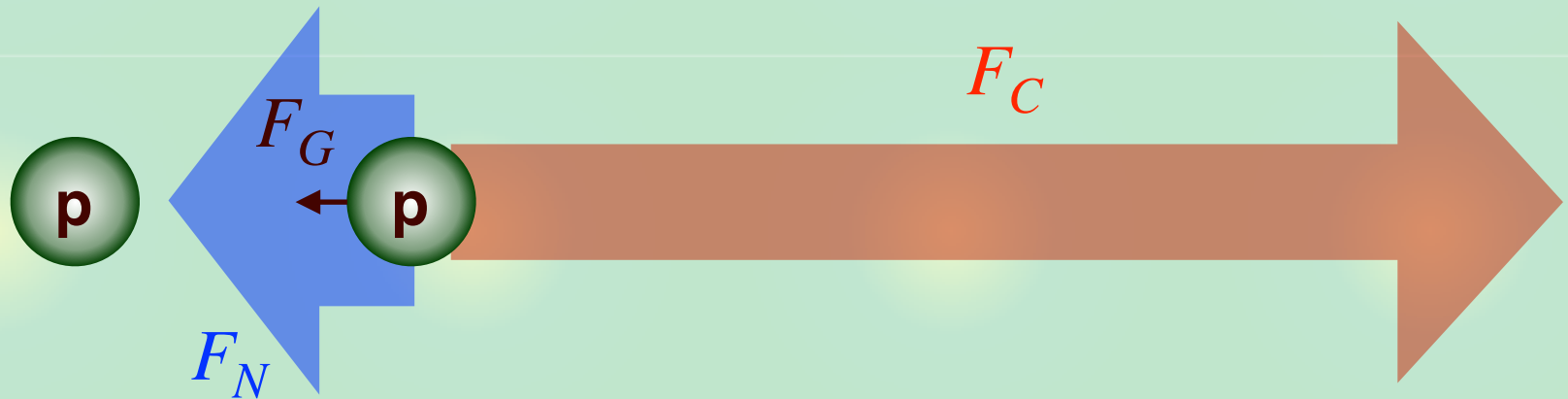
$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \simeq 5.7 \times 10^1 \text{ [N]}$$



- 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  $^{12}\text{C}$  を核子に分解するのに必要なエネルギー

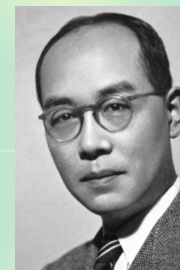
$$\sim 8.6 \times 10^{12} \text{ J} \sim 2.1 \times 10^9 \text{ kcal}$$

# 核力のメカニズム

核力は $\pi$ 中間子の交換で媒介される

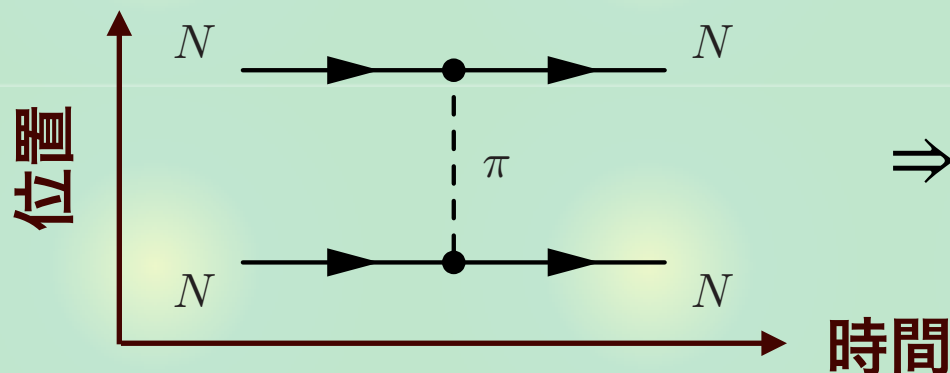


(1949年)



<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  $\sim 1$  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

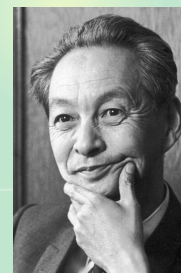
- 重力：ニュートン力学 → 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 → 量子電磁力学 (QED)



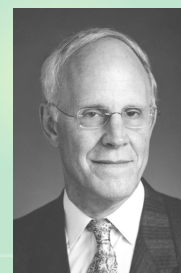
(1965年)



- 強い相互作用：量子色力学 (QCD)



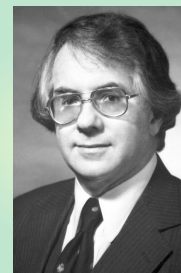
(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論



(1979年)



## ここまでのまとめ



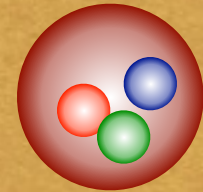
### 原子核ハドロン物理

- 強い相互作用が生む多くの物理を研究



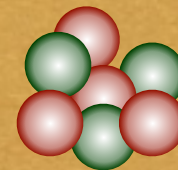
### ハドロン

- 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

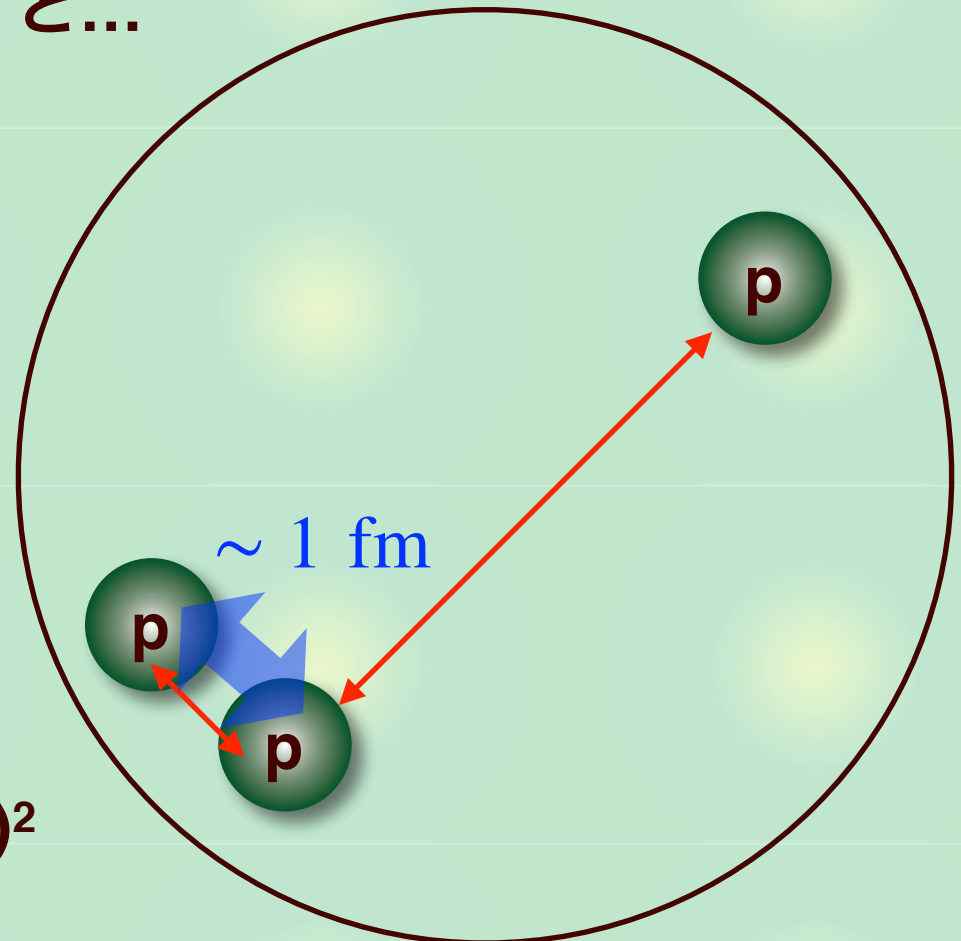
近くの核子とのみ引力

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)<sup>2</sup>



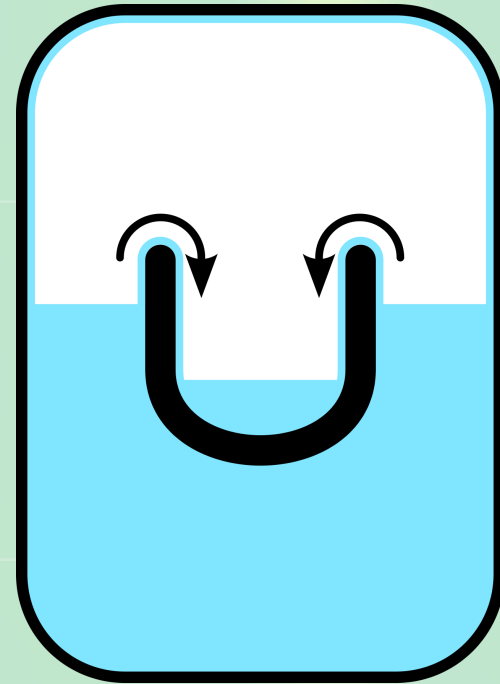
陽子を増やしすぎると電磁気力による斥力に打ち勝てなくなる

→ 原子核が束縛しなくなる

## 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、 $^4\text{He}$ 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： $^4\text{He}$ 超流動



<https://ja.wikipedia.org/wiki/超流動>

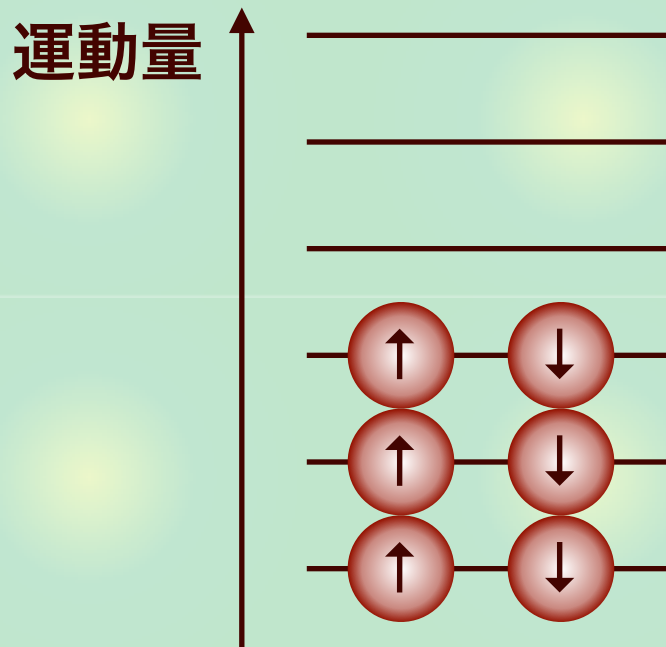
### フェルミ粒子（フェルミオン）

- スピンが半整数（ $1/2, 3/2, \dots$ ）
- **核子**、クォーク、電子、ニュートリノ、 $^3\text{He}$ 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)



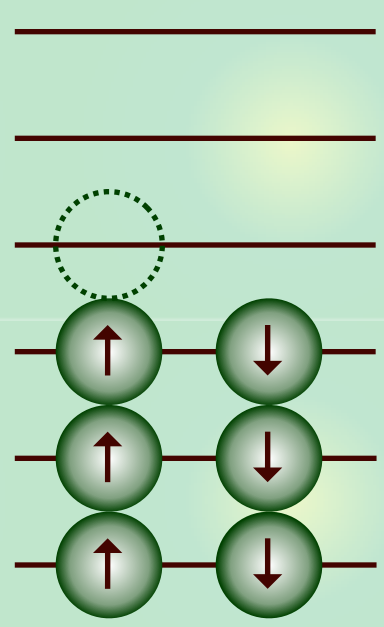
- 運動量 (エネルギー) の低い状態に粒子を追加したい
- 既に他の粒子がいる状態には入れない
- > 運動量の低い状態から順番に占有される

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

# 原子核の場合

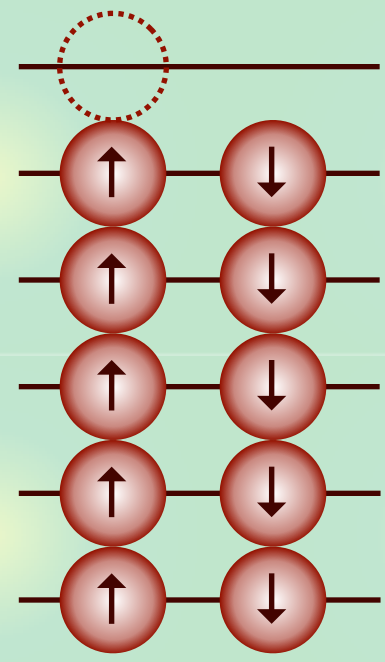
原子核中に中性子ばかりを増やしていくと...

運動量 ↑



陽子

運動量 ↑



中性子

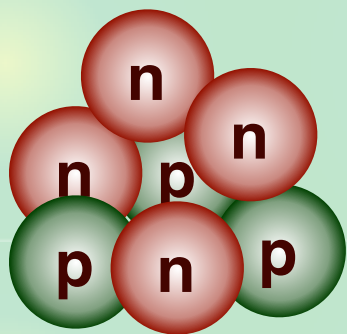
- 陽子を追加する方が低いエネルギーで済む
- $\beta$ 崩壊（中性子が陽子に変わる）で不安定

原子核：核子はいくつまで結合できるか？

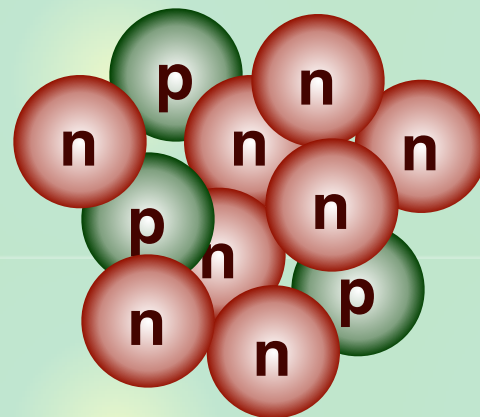
## エキゾチックな原子核

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

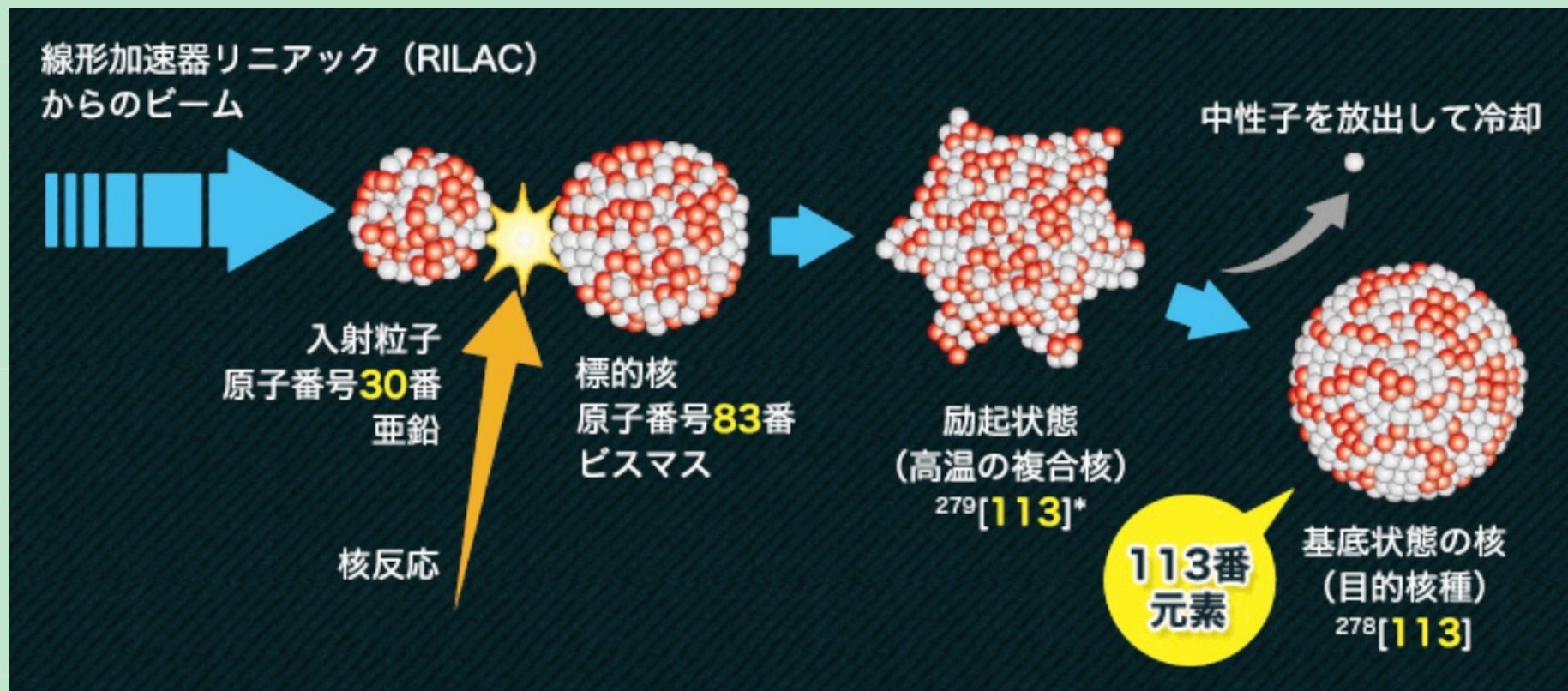


<https://www.riken.jp/pr/fun/nh/>

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



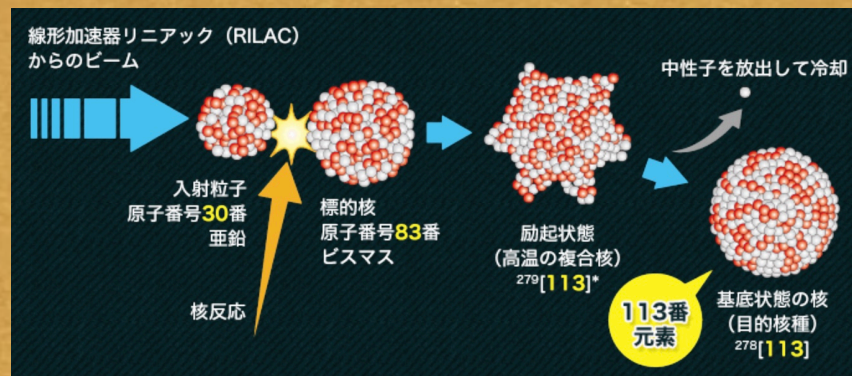
### 原子核の性質

- 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 $\beta$ 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>





## 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

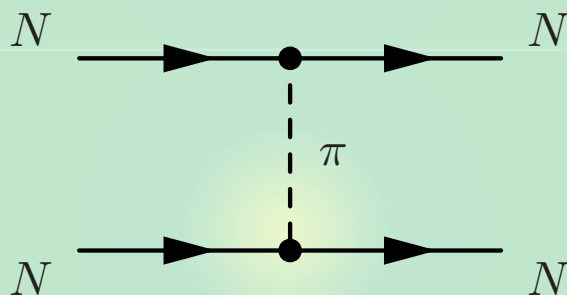
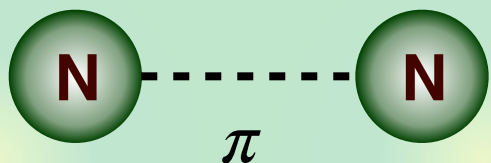


## まとめ

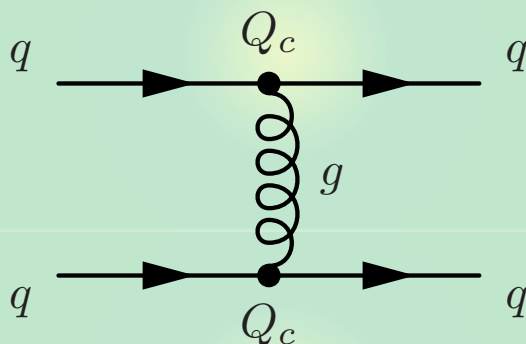
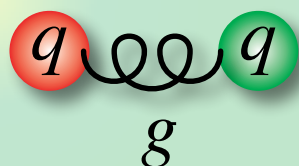
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

# 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

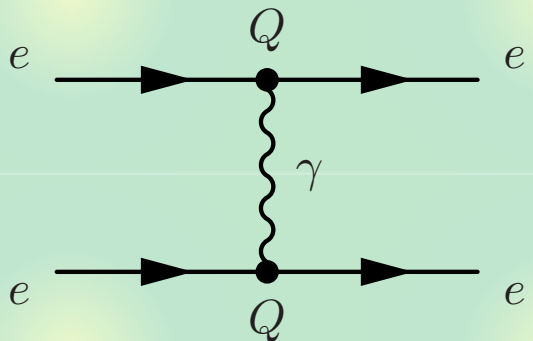
ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

## 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 $\gamma$ 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 ( $e$ ) moving from left to right. Each line has an arrow pointing right. The top line has a vertex labeled  $Q$  where a vertical wavy line representing a photon ( $\gamma$ ) is emitted. The bottom line has a vertex labeled  $Q$  where the photon is absorbed. The photon line connects the two vertices. To the right of the diagram is the equation  $\Rightarrow F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}$ .

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

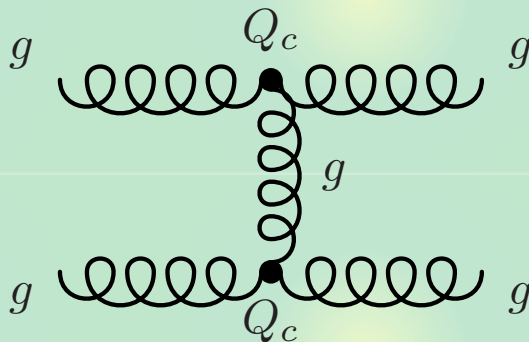
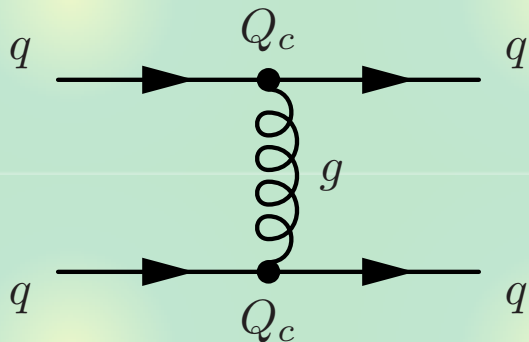
- 電子間の相互作用：クーロン力 (+量子効果)

# 強い相互作用の基礎理論

## 量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

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

- 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  $(a, \alpha, \beta)$  を持つ



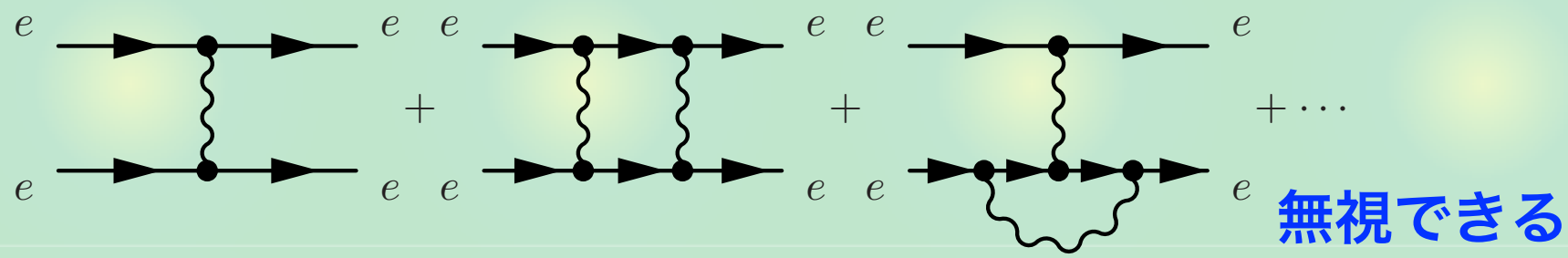
- グルーオン間も相互作用する

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

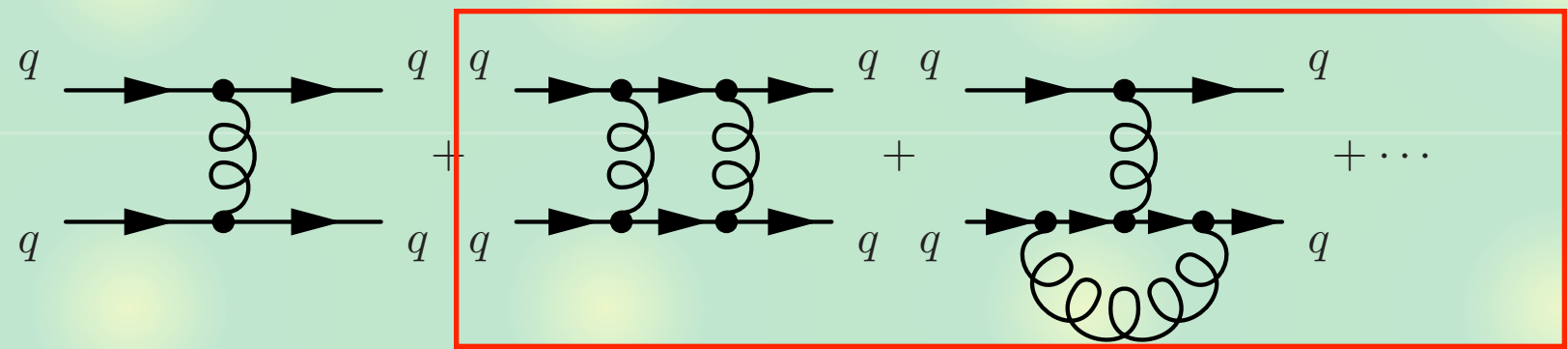
# 量子効果の計算

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！



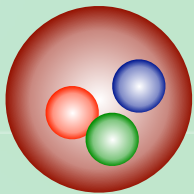
- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

ハドロン：クォークはいくつまで結合できるか？

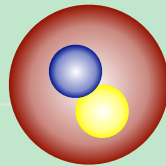
## 未解決の問題

### 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？

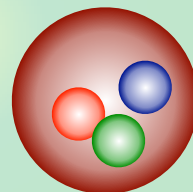
## 観測されているハドロンとクォーク構成

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

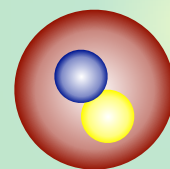
バリオン：陽子、中性子など

- クォーク3つで構成される（**3粒子系**）



メソン： $\pi$ 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

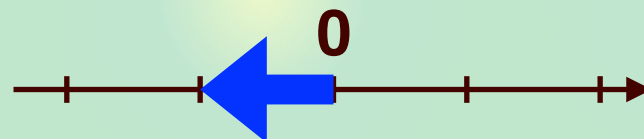
陽子

$$Q_p = +1$$



電子

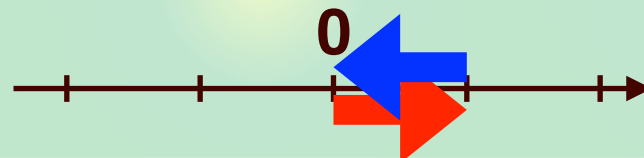
$$Q_e = -1$$



- 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

$$Q_p + Q_e = 0$$





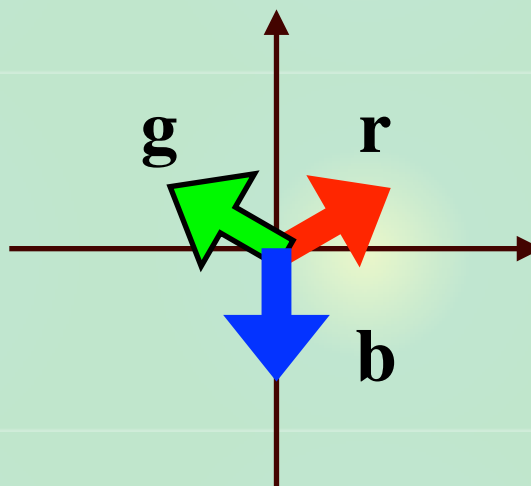
## クォークのカラー電荷の表現

クォーク $q$ のカラー電荷は2次元平面のベクトルで表現できる

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

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

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

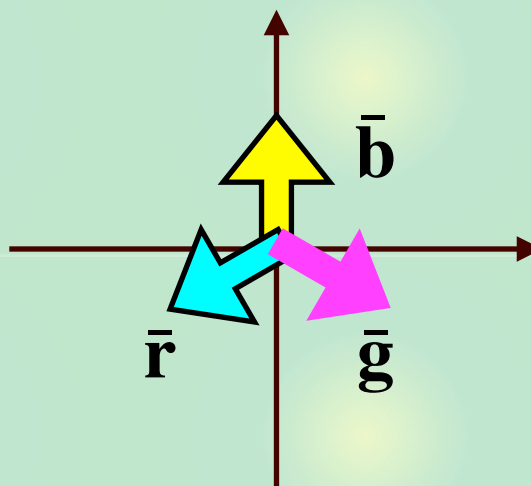


反クォーク $\bar{q}$ のカラー電荷

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

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

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



-  $\bar{q}$ は $q$ の反粒子なので逆符号の電荷を持つ

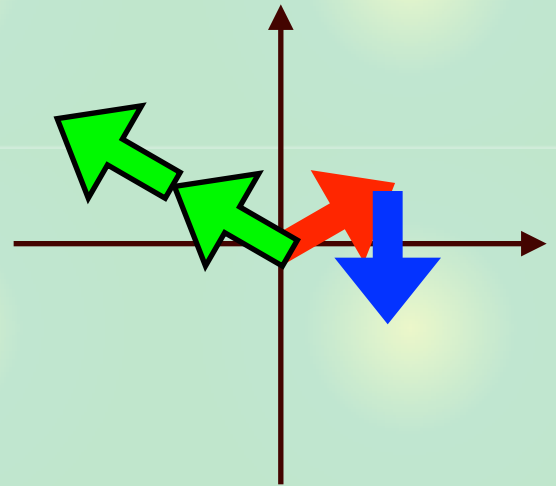
## 2粒子状態

### 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

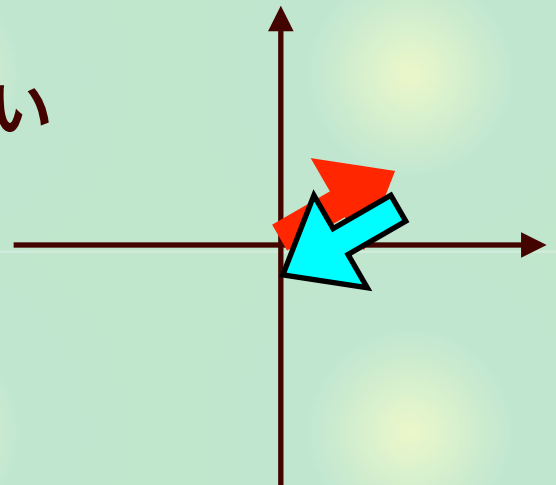


### 2. $\bar{q} + \bar{q}$

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

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

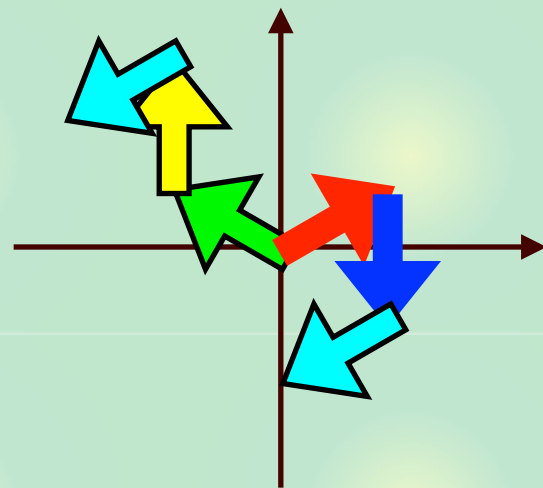
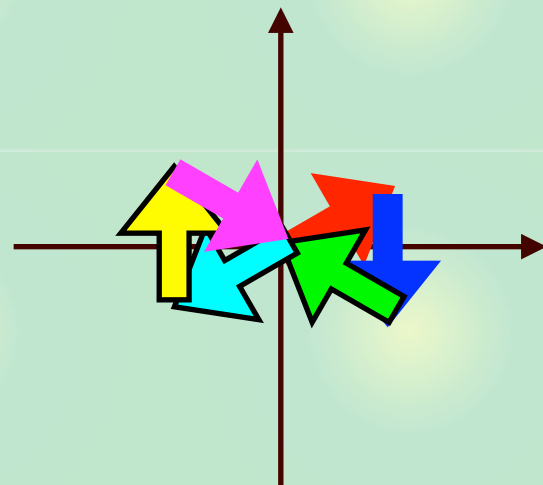
$$\mathbf{g} + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\mathbf{r}} = (-1, 2/3), \dots$$

- 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

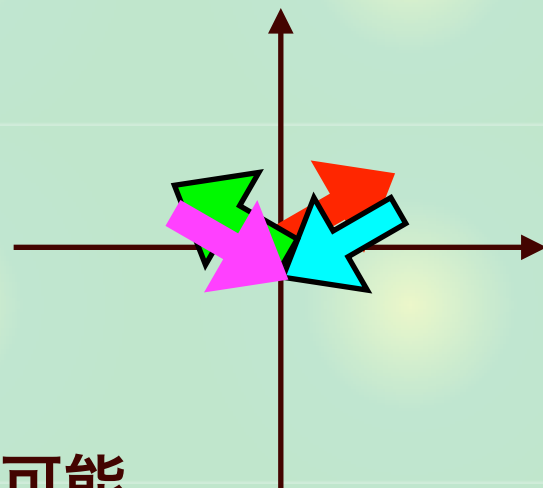
全ての可能性を試しても良いが効率が悪い

- 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

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

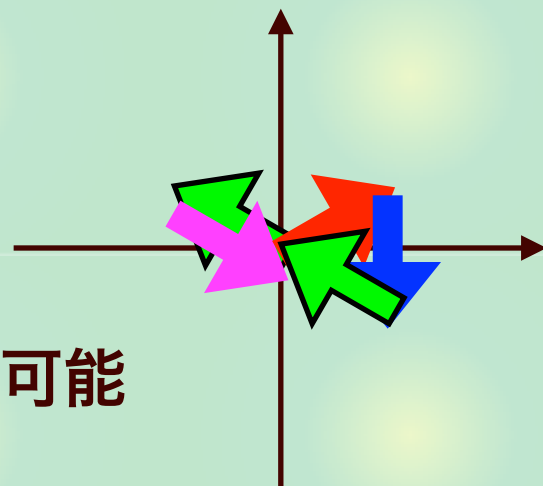
- 4粒子はクォーク2つ + 反クォーク2つが可能



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？

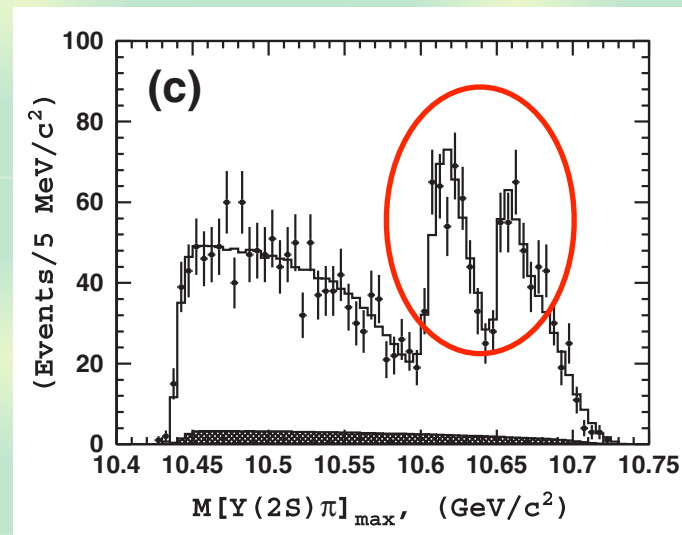
## エキゾチックハドロンの観測

### 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)

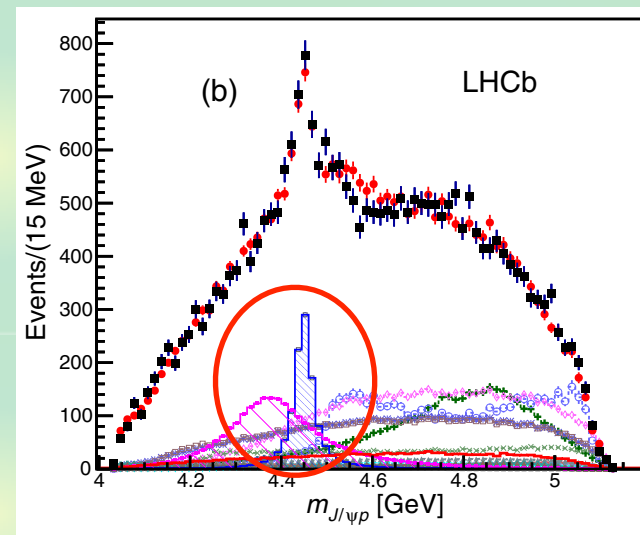


### 5粒子状態 (ペンタクォーク, 2015年)

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

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

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

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

 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.36あたりに...