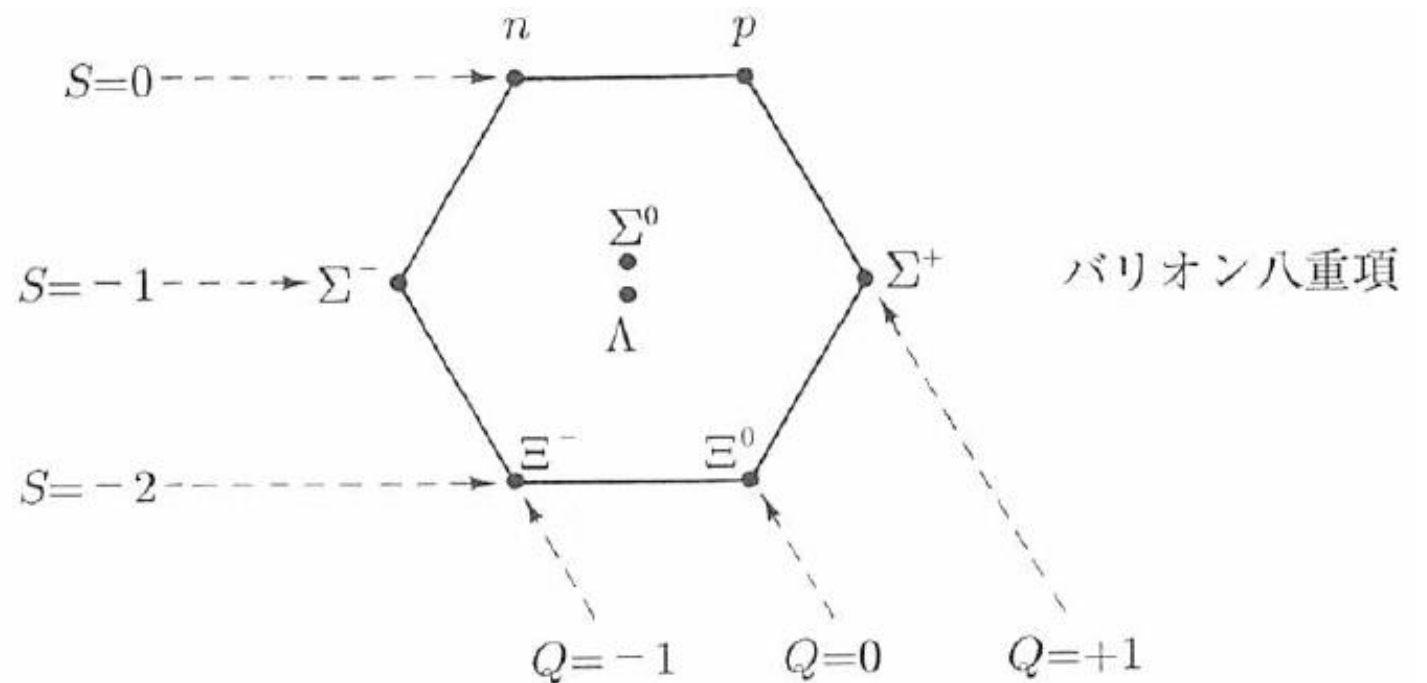
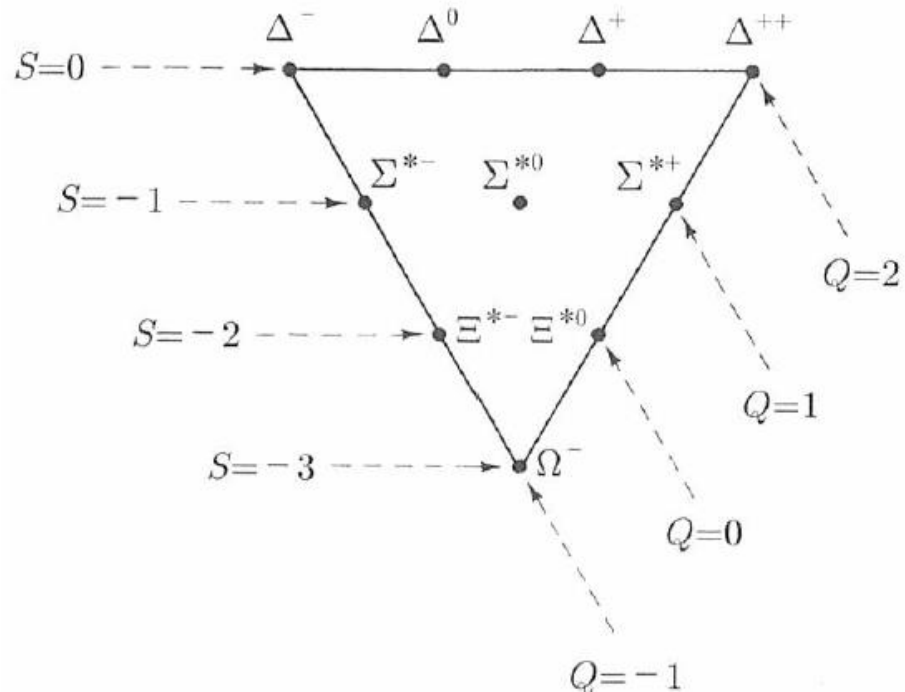


# バリオン八重項はどう説明するのか？

(実際、すっきりとした方法だが、  
スピンを取り扱う必要があり、詳細は5章で)

ここでは、十重項の三つの角をなくしたものが、バリオン八重項の8個の状態を正確に表したものとして理解する。  
つまり、クォークの同じ組み合わせが八重項を説明する。



実際、八道説のすべての多重項がクォーク模型では自然にでてくる。例えば、正電荷をもつ $\Delta^+$ と陽子は両方とも二つの  $u$  と一つの  $d$  からできているなど、クォークの組み合わせが同じでも違う粒子になることが多くある。

これは水素原子がさまざまなエネルギー準位をもつように、クォークの組み合わせが一つ与えられると、さまざまな方法で束縛するからである。

原子の静止質量はほぼ $10^9$  eV に対し、エネルギー準位の間隔は典型的には数 eV しかないため、すべて同じ「水素」と考えるのが自然。

それに対し、クォークの束縛状態では違うエネルギー準位間の間隔が非常に大きいため、別の粒子とみなす。そのため、原理的に無限個のハドロンを作れる。

しかし、クォーク模型では許されないものがあり、  
例えば、 $S = 1$  あるいは  $Q = -2$  のバリオン。（反バリオンなら可能）  
電荷  $+2$  あるいはストレンジネス  $-3$  をもつ中間子  
など。

このような、いわゆる「エキゾチックな」粒子が発見された場合、  
クォーク模型を壊滅させることになるが、まだ見つかっていない。

# クォーク模型の大きな問題

陽子を強くたたけば、飛び出してくるだろう。

クォークは分数の電荷→普通のミリカンの油滴実験で確認できるだろう。

クォークのうち少なくとも一つは安定なものがあるはず。

(より軽い分数電荷をもった粒子は存在せず、どんな崩壊もしないため。)



クォーク発見は簡単そうなのに

誰もクォークを発見できない！

- 1960年代後半から1970年代初頭にかけて  
クォーク模型に対する懐疑的な見方。

それに対し、

- 何らかのまだわかっていない理由で  
クォークはバリオンと中間子の中に完全に閉じ込められており、  
どんなに頑張ってもクォークを取り出すことができないという、  
「クォークの閉じ込め」という概念を提案。
- どんな仕組みでクォークが閉じ込められるのかの  
理論的問題の引き金となる。

## どうにか実験的な研究でクォークの手がかりを得られないか？

- ・ラザフォードが原子の中を調べたのと非常に似た手法で陽子の中を探查することができる。

そのような実験は、

- ・1960年代後半にスタンフォード線形加速器センター(SLAC)の高エネルギー電子を使って行われた。
- ・1970年代初頭にはCERNでニュートリノビームを使って同じ実験がくり返され、そしてその後、また陽子を使って行われた。

これらの「深非弾性散乱」実験の結果は、図1.11である。

ほとんどの入射粒子は通り抜けてしま  
う一方で、わずかの数の粒子は鋭く跳  
ね返される。

これが意味するのは、  
陽子の中の電荷が小さな塊に集中している  
こと。

陽子の場合、一つではなく、  
三つの塊の存在を示唆していた。

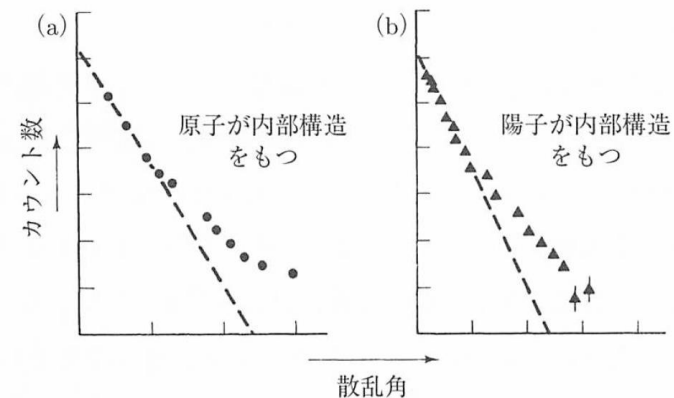


図 1.11 (a) ラザフォード散乱では、たくさんの数の粒子が大角度で散乱されることから、原子が内部構造（原子核）をもっていることを示している。(b) 深非弾性散乱では、たくさんの数の粒子が大角度で散乱されることから、陽子が内部構造（クォーク）をもっていることを示している。点線は、正電荷が、(a) 原子中に (b) 陽子中に、一様に分布しているときの予想を表している（出典：Halzen, F. and Martin, A. D.: Quarks and Leptons (John Wiley & Sons, 1984). John Wiley & Sons, Inc. の許可を得て再掲)

あきらかに、クォーク模型を支持する強い裏づけであったが、それでもまだ確定的ではなかった。

## もう一つ、クォーク模型に対する理論的な反論があった。

それは、クォーク模型がパウリの排他律を破っているかに見えること。

パウリの排他律とは、二つの電子が同じ状態を占めることはできない。

後に、同じルールがスピン半整数をもつすべての粒子に当てはまることがわかった。

スピン $1/2$ をもつクォークにも当てはまらないといけない。

例えば、 $\Delta^{++}$ は三つの同じ  $u$  クォークからなっていると考えられ、パウリの原理に矛盾しているように思える。



1964年に、O・W・グリーンベルグが、この矛盾を解決する方法を次のように提案した。

クォークは  
三つのフレーバー（香り： $u, d, s$ ）からなっているだけでなく、  
それぞれに三つの「色（カラー）」（「赤： $r$ 」 「緑： $g$ 」 「青： $b$ 」）  
がある。

これによって、パウリの原理の矛盾は解決する。

この「色」の導入で、  
自然界に見出されるクォークの組み合わせについて  
単純で面白い性質を表現できた。



## 自然界に存在するすべての粒子は無色である

この「無色」とは、それぞれの色の量がゼロか、3色すべてが同じ量で存在するかのどちらかであることを意味する。

このルールは、なぜ二つあるいは四つのクォークから粒子をつくれないのか、また、なぜ自然界に個々のクォークが現れてこないのか説明できる。

無色になるクォークの組み合わせは、 $q\bar{q}$ (中間子)、 $qqq$ (バリオン)、そして $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ (反バリオン) だけである。

# 1.9 11月革命とその余波 (1974～1983年, 1995年)

1964年から1974年までの10年間は  
素粒子物理学にとって不毛の時代であった。

クォーク模型は当時それなりに説得力をもっていたが、ほとんどの素粒子物理学者はクォーク模型について半信半疑であり、陽子内部の塊のことはパートンとよばれ、明示的にクォークだとしなかった。

---

ここでクォーク模型を救ったのは、自由クォークの発見でも、クォークの閉じ込めの説明でも、色仮説の検証でもなく、全く別の、プサイ ( $\psi$ ) の発見によってであった。

1974年の夏に、 $\psi$ はブルックヘブンのC・C・ティンのグループで最初に観測された。

また、11月10日から11日の週末にSLACのバートン・リヒター率いるグループが独立に新粒子を発見した。

その二つのチームは同時に論文を発表し、新粒子をティンはJ、リヒターは $\psi$ と名付けた。

このJ/ $\psi$ は電氣的に中性で、とてつもなく重い中間子だった。  
(陽子の3倍以上)

さらに、普通でなかったのは、とてつもなく長い寿命であった。

$\psi$ は崩壊するまでに $10^{-20}$ 秒も生き続けた。

(これくらいの質量のハドロンの典型的な寿命は $10^{-23}$ 秒のオーダー)

その  $\psi$  の寿命の長さを理解している者にとっては、根源的に新しい物理学が表出していた。そのため、 $\psi$  の発見によって突然起こった出来事は11 月革命として知られるようになった。

それから数カ月は、 $\psi$  中間子の性質について議論され、その説明に成功したのがクォーク模型であった。

$\psi$  は、新たなクォークである  $c$  (チャーム) とその反クォークの束縛状態  $\psi = (c\bar{c})$  である。

実際のところ、4 番目のフレーバーというアイデアとその名前は、かなり前にブヨルケンとグランショーによって導入されたものであった。

レプトンとクォークの間には興味深い並行性があった。

レプトン： $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu$

クォーク： $d, u, s$

レプトンが4種類なのに対し、クォークは3種類しかないため、それぞれ4種類の方がよいのでは？

グラシヨウ、イリオポロスとマイアニは4番目のクォークの必要性について専門的な理由を示していた。

4番目のクォークが存在したことで、さまざまな量のチャームをもつ新たなバリオンと中性子が存在する。そのいくつかを図1.12に示した。

( $c$ にはチャーム価+1、 $\bar{c}$ は-1をもつ。)

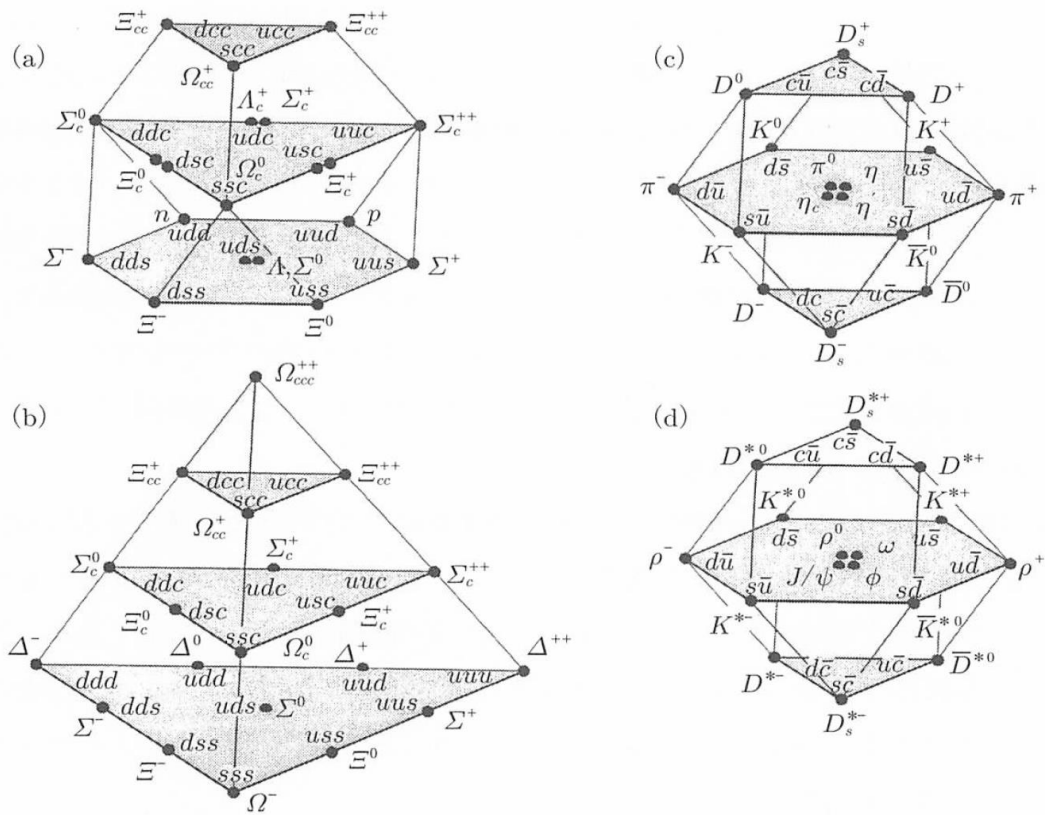


図 1.12 四つのクォークのフレーバーで構成された多重項：バリオン (a と b) と中間子 (c と d) (出典：Review of Particle Physics (2006))

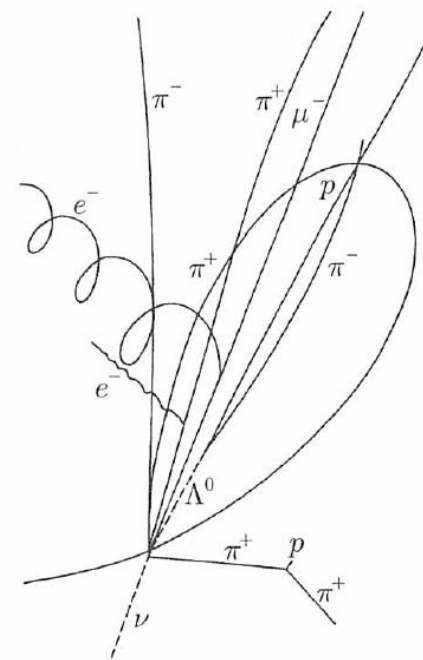
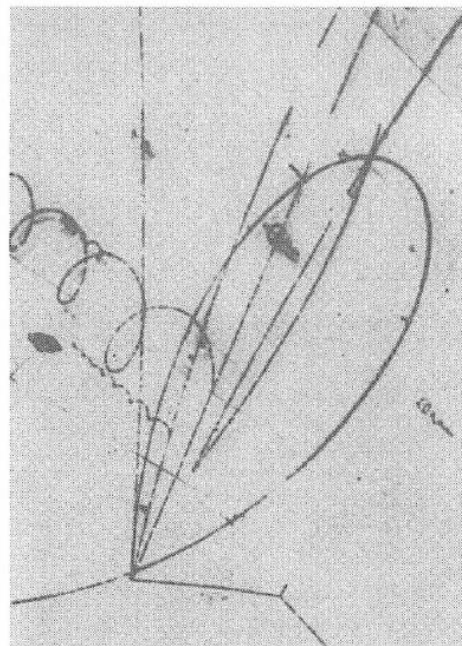


図 1.13 チャームをもったバリオン. この事象の最も可能性の高い解釈は  $\nu_\mu + p \rightarrow \Lambda_c^+ + \mu^- + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$  である. チャームをもったバリオンの崩壊 ( $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda + \pi^+$ ) は, 飛跡を残すには寿命が短すぎるが, その後の  $\Lambda$  の崩壊ははっきりと見てとれる (写真提供: ブルックヘブン国立研究所の N. P. Samios)



実際にチャーム価をもったバリオン ( $\Lambda_c^+ = udc$  と  $\Sigma_c^{++} = uuc$ )の最初の証拠はすでに1975年に現れて (図1.13)、その後、 $\Xi_c = usc$  と  $\Omega_c = ssc$  が続いた。

チャーム価をもった最初の中間子 ( $D^0 = c\bar{u}$  と  $D^+ = c\bar{d}$ ) は1976年に発見され、1977年にチャームとストレンジからなる中間子 ( $D_s^+ = c\bar{s}$ ) が発見された。

これらの発見によって、 $\psi$  を  $c\bar{c}$  とする解釈が確立され、**クォーク模型**がよみがえった。

しかし、1975年には新しいレプトンが発見され、グラシヨウの対称性をぐらつかせた。

この新しい粒子（タウ）は自身に対応するニュートリノをもち、レプトンは6種類までである中で、クォークは4種類だけだった。

しかし、それから2年後には新たに重い中間子（ウプシロン）が発見。これは、5番目の  $b$  クォークをもつ  $\Upsilon = b\bar{b}$  である。

ボトム価をもつ最初のバリオン  $\Lambda_b^0 = udb$  は1980年代に、  
2番目は  $(\Sigma_b^+ = uub)$  は2006年に、  
3世代すべてのクォークを含む最初のバリオン  $(\Xi_b^- = dsb)$  は2007年に観測。  
ボトム価をもつ最初の中間子  $(\bar{B}^0 = b\bar{d}$  と  $B^- = b\bar{u})$  は1983年に発見。

$B^0/\bar{B}^0$  系はとりわけ実り多い研究対象であることが示されている。

この時点で、6番目のクォーク ( $t$ ) が発見されることは予言でき、グラシヨアの対称性を回復。

しかし、トップクォークはとても重く、なかなか捕まえられなかった。

(174 GeV で、ボトムクォークの 40 倍の重さ)

電子-陽電子衝突型加速器では十分なエネルギーに達せず、トップクォークは束縛状態を形成するのには短寿命すぎた。

しかし、1994 年にテバトロンが強い証拠となり得る十分なデータを得た。

基本的な反応  $u + \bar{u}$  (あるいは  $d + \bar{d}$ )  $\rightarrow t + \bar{t}$

トップと反トップは生成直後崩壊。

崩壊粒子の解析で、トップクォークの生成を推測。

(LHC稼働まで、テバトロンは世界で唯一トップクォークを生成できる加速器。)