

# 素粒子物理学の歴史

本章は、素粒子物理学の「伝え語り」である。その目的は、さまざまな粒子がどのように発見され、またどのように世界に組み込まれていったのかを紹介することである。その道すがら、素粒子物理学理論の土台となったいくつかの根源的な考え方を紹介する。この章は、本書の残りを読むうえでの背景でしかないので、ここで扱う題材はさっと読み流してほしい（歴史としては、ここで描く内容は正しくない。素粒子物理学発展の本流を追いかけて、科学の発展にはつきものの間違いや袋小路を無視しているからだ。それゆえ、この章は素粒子物理学者の好む（鋭い洞察の積み重ねと、馬鹿な失敗や勘違い、あるいはフラストレーションによって台無しにされることなく済んだ輝かしい成功の数々の）「伝え語り」なのだ。実際には、まさに紆余曲折があった）。

## 1.1 古典時代（1897～1932年）

やや強引ではあるが、1897年のJ・J・トムソンによる電子の発見が素粒子物理学の誕生だと私は考えている（はるか昔、デモクラテスとギリシャ時代の原子論にまでさかのぼることがよくあるが、いくつかの含蓄のある言葉以外、彼らの哲学的な思索は現代の科学と共通するものはない。好古趣味の観点からは多少興味深くても、科学本来の観点からは無視してよい）[1]。熱したフィラメントから飛び出す陰極線が磁石によって曲がることをトムソンは知っていた。これが意味するところは、陰極線は電荷をもっているということである。実際に、曲がる方向を考えると電荷は負でなければならなかった。それゆえ、陰極線は光線などではなく、粒子の流れであるように思えた。交差する電場と磁場の中にビームを通し、かつ、電場から受ける力と磁場から受ける力の合計がゼロになるように調整し、トムソンは粒子の速度（光速の約1/10）と電荷質量比を測ることに成功した（問題1.1）。この電荷質量比は、すでに知られていたいかなるイオンよりもはるかに大きいことがわかり、電荷が異常に大きいか、質量が非常に小さいかのどちらかであることを示唆した。間接的な証拠によると後者が正しかった。トムソンはその粒子を小体（コーパスル）とよんだ。1891年、ジョージ・

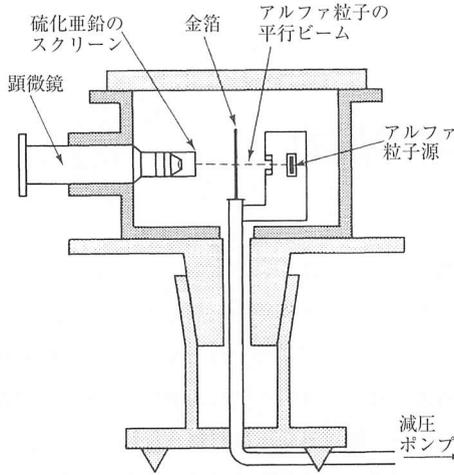


図 1.1 ラザフォード散乱実験に使われた装置の模式図。金箔で散乱されたアルファ粒子が蛍光板に当たり発光する。その光を顕微鏡で目視した

ジョンストン・ストーニーは、電荷の最小単位として「電子」という言葉を初めて使った。後に、その粒子そのものが電子とよばれるようになった。

これら電子が原子の重要な構成物であると、トムソンは正しく推測していた。しかし、原子は全体で電氣的に中性であり、また電子よりも非常に重いので、正の電荷をどのように補い、原子の大部分を占める質量がどのように分布しているのか、という疑問がすぐに生じた。トムソンは、(彼の言葉を借りると)プディングの中のプラムのように、重く、電氣的に正に帯電したペーストの中に電子が埋まっていると想像した。このトムソンの模型は、ラザフォードの有名な散乱実験によってきっぱりと否定された。その実験は、正の電荷と質量のほとんどは、原子の中心部分にあるちっぽけな核、つまり原子核に集中していることを示した。アルファ線(イオン化したヘリウム原子)のビームを金の薄膜に入射することにより、ラザフォードは上記の事実を証明した(図 1.1)。トムソンの仮定のように、金原子が拡散した小球からなっている構造ならば、すべてのアルファ線がわずかにそれるはずである。しかし、おがくずの入ったバッグを弾丸が貫通するかのように、それていくものはほとんどなかった。実際には、ほとんどのアルファ線は金にまったく邪魔されずに突き抜け、ほんのわずかのアルファ線が大角度で散乱された。ラザフォードの結論は、アルファ線は、非常に小さく、非常に硬く、非常に重い何かにあつかったというものであった。あきらかに、正の電荷とほぼすべての質量が、原子の体積のほんの一部分にすぎない中央部分に集中

していた(電子は散乱に寄与するには軽すぎる、はるかに重いアルファ線により蹴散らされてしまう)。

最も軽い原子(水素)の原子核は、ラザフォードにより陽子と名づけられた。1914年、太陽の周りを惑星が回っているような、反対の電荷による引力で陽子の周りの軌道上に電子がいるという水素模型をニールス・ボーアは提案した。完成途上の量子力学により、ボーアは水素のスペクトルを計算することができ、その計算結果は実験結果とよく一致した。そこで、より重い原子は、複数の電子軌道に囲まれた2個以上の陽子の塊と考えるのが自然であった。ここで不運なのは、次に重い原子(ヘリウム)は、確かに2個の電子をもっているが、重さは水素の4倍であり、リチウム(3個の電子をもつ)は水素の重さの7倍、というようになっていることである。1932年にチャドウィックが中性子(電氣的に中性な陽子の双子)を発見することで、この矛盾は解決した。ヘリウム原子核は2個の陽子に加えて2個の中性子を、リチウムは4個の中性子をもつことが、そして、一般に、重い原子核は陽子と同数の中性子をもっていることがわかっている(中性子の数には不定性がある。化学的に同じ性質をもつ原子は同じ陽子数だが、中性子の数の違う同位体がある)。

中性子の発見が、われわれのいうところの素粒子物理学古典時代にけりをつけた。それ以前には決して「物質は何からできているのか」というきわめて素朴な疑問に満々な答えを与えることができなかつた(このようにいうことを許してほしい)。1932年には、陽子と中性子と電子がすべてであった。しかし、素粒子物理学の中世(1930~1960年)を支配する三つの偉大な発想の種(湯川の間接子、ディラックの陽電子、そしてパウリのニュートリノ)はすでにまかれていた。が、これらについて語る前に、光子を紹介するために少しだけ時代をさかのほらなければならない。

## 1.2 光子 (1900~1924 年)

光子は、 $W$  や  $Z$  (これらは1983年まで発見されなかつた) と多くの共通点をもつことを考えると、電子、陽子、中性子に比べるとずいぶんと近代的な粒子である。また、発見に至る過程の本質は非常にはっきりとしているが、正確に、光子がいつ誰によって発見されたのかをいい当てるのは難しい。1900年、プランクが光子発見に最初の貢献をした。プランクは黒体輻射とよばれる、高温の物体が発する電磁波の説明をしようとしていた。熱的過程を説明するのに大成功を取めた統計力学を電磁波に応用しようとする、ナンセンスな結果しか得られなかつた。とりわけ、輻射エネルギー

が無限大になってしまうという「無限大問題」は大きな問題だった。プランクは、電磁波の輻射エネルギーを量子化し、

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

というエネルギーをもった塊であると仮定すると、無限大問題を回避し実験値を理論的に再現できることを見つけた。ここで、 $\nu$ は電磁波の振動数、 $h$ は実験値を再現するようにプランクが調整した定数で、現在知られているプランク定数の値は

$$h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg s} \quad (1.2)$$

である。輻射がなぜ量子化されているのかをプランクは明言しなかった。彼はたんに放射過程の特異性だと仮定していた。何らかの理由で、高温の物体の表面ではわずかな塊としてしか光\*1が飛び出さないと。

1905年に、アインシュタインははるかに過激な説を打ち出した。量子化は電磁場自体の特性であり、輻射の仕組みとは何ら関係ないと彼は論じた。この新案を加えつつ、プランクのアイデアを採用して、アインシュタインは、光電効果、つまり電磁波が金属の表面に入射すると電子が飛び出す現象を説明した。アインシュタインの説では、入射した光の量子は金属中の電子に当たり、エネルギー  $h\nu$  を渡す。そして励起された電子は金属の表面から飛び出すが、その際にエネルギー  $w$  (いわゆる金属の仕事関数、各金属に固有の経験的な定数値) を失う。それゆえ金属から飛び出してきた電子のエネルギーは

$$E \leq h\nu - w \quad (1.3)$$

となる (電子は金属表面に到達するまでにエネルギーを失う。それゆえ  $=$ ではなく  $\leq$  を使った)。アインシュタインの式 (1.3) は、導き出すのは簡単だが、驚くほどの含蓄を含んでいる。電子のエネルギーの最大値は光の強度には無関係で、色 (波長) のみ依存しているといっているのだ。念のために付け加えると、より高い強度のビームはより多くの電子をたたき出すが、たたき出された電子のエネルギーは同じなのだ。

プランクの理論と違って、アインシュタインの理論は敵意に満ちた評価を受け、その後の20年間、アインシュタインは光量子説のために孤独な戦いを強いられた [2]。輻射の仕組みにかかわらず電磁波が本質的に量子化しているということで、信用を失っていた光量子説の復活に、危うくもアインシュタインは近づいてしまったのだ。もち

\*1 本書では、「光」という言葉は、可視光領域であるかどうかにかかわらず電磁波を意味する。

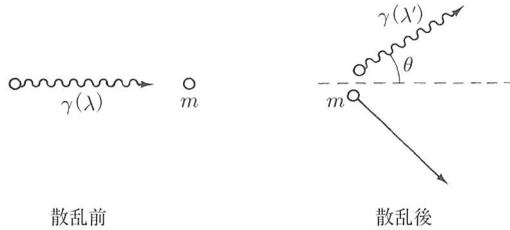


図 1.2 コンプトン散乱. 波長  $\lambda$  の光子が、質量  $m$  の静止した粒子を散乱させる. 散乱された光子は、式 (1.4) で与えられるような波長  $\lambda'$  をもつ

ろんニュートンはそのような小球モデルを導入していたが、19 世紀物理学最大の成功は、ニュートンのもう一つのアイデアである波の理論だと信じられていた。実験結果がアインシュタインの説に近づいても、先の成功に疑いを挟む者はいなかった。1916 年にミリカンは光電効果に関する膨大な実験を終え、「アインシュタインの光電効果の式は……あらゆる場合に、得られた実験結果を正確に予言する……がしかし、アインシュタインが到達した小球理論もどきを現時点で支持することはまったくできそうにない」と報告せざるを得なかった [3]。

問題に終止符を打ったのは、1923 年のコンプトンによる実験だった。コンプトンは、静止している粒子によって散乱された光の波長が以下の式に従って変化していることを見つけた。

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad (1.4)$$

ここで  $\lambda$  は入射波長を、 $\lambda'$  は散乱波長を、 $\theta$  は散乱角を、そして

$$\lambda_c = h/mc \quad (1.5)$$

は、標的粒子 (質量  $m$ ) の、いわゆるコンプトン波長を表す。これは、光を静止質量ゼロの、プランクの式で与えられるエネルギーをもつ粒子とみなして (相対論的) エネルギーと運動量の保存を使えば、古典的なたんなる弾性散乱のときのように (図 1.2)、正確に求めることができる式である (問題 3.27)。この事実が議論を終わらせた。光が原子の大きさ以下のスケールでは粒子として振る舞うことに対する、直接的であり、反対することのできない実験的な証拠となったのだ。この粒子は光子 (1926 年に化学者のギルバート・ルイスに名づけられた) とよばれ、その記号は (ガンマ線から)  $\gamma$  である。微視的なレベルにおける光子の粒子としての性質は、すでに確立された巨視的

なスケールでの波の性質（干渉や回折現象として表れる）と調和しなければならないが、この話については量子力学の教科書に任せることにする。

当初、光子は物理学者の間では受け入れがたい存在であったが、徐々に場の量子論に自然に見出されることとなり、また、電磁相互作用全体に新しい考え方をもたらした。古典電磁気学では、たとえば、二つの電子の反発力は互いの周りの電場によるものだと考える。それぞれの電子が電場に寄与し、それぞれが電場に反応する。しかし場の量子論では、電場は（光子のかたちで）量子化されていて、相互作用は二つの電荷の間を行ったり来たりする光子の流れで、それぞれの電子は断続的に光子を放出すると同時に断続的に光子を吸収するという描像になる。そして、同じことがあらゆる非接触型の相互作用について適用される。古典的には「距離を隔てた相互作用」は場によって「媒介された」と解釈したが、いまは、粒子（場に付随した量子）の交換によって媒介されたという。電磁気力では光子が、重力では重力子とよばれる粒子が媒介粒子である（しかしながら、重力を正しく記述する量子理論ははまだ開発されていないし、実験的に重力子を検出するには数世紀以上かかるだろう）。

これら媒介という考え方が実際にどう取り入れられているかをこれから見ていくことになるが、いまここでは一つよくある勘違いを解いておきたい。あらゆる相互作用が粒子の交換によって引き起こされているという場合、たんに運動学的な現象についていっているわけではない。2人のアイススケート選手が雪玉を投げ合うと、彼らの間には反動による斥力が働くと考えなければそう考えてもよい。しかし、そのようなことをここでいっているわけではない。たとえば、その仕組みだと引力を説明することが難しい。むしろ、媒介粒子のことを「少しだけこっちに来て」あるいは「向こうへ行って」と伝えるメッセンジャーと考えた方がよいかもしれない。

「古典的な」描像では、物は原子からできている、原子の中では逆符号の電荷による引力によって電子が陽子と中性子の周りの軌道に閉じ込められているということを先に説明した。今度はこの考え方に、その束縛力は電子と原子核中の陽子の間での光子の交換によるものだという、より洗練された定式化を与えることができる。しかしながら、原子物理にとってはこれはやりすぎである。というのは、原子物理のレベルでは電場の量子化による効果はほんのわずかだからだ（ラムシフトと電子の異常磁気モーメント）。精度の高い近似で、相互作用はクーロンの法則で与えられる振りをして大丈夫なのだ（さまざまな磁気双極子とともに）。重要なのは、基底状態では莫大な数の光子が絶え間なく飛び交っているので、結果として実効的には場の「凹凸」が滑らかになり、古典的な電磁気学が真実を近似するのに適しているという点である。しか

し、光電効果やコンプトン散乱のような素粒子反応のほとんどでは、個々の光子が反応に寄与していて、量子化を無視できなくなるのだ。

### 1.3 中間子 (1934~1947年)

さて、古典的な模型には、「何が原子核の構造を保持しているのか」という際立った問題が一つある。何にせよ、非常に狭い空間に固まっている正の電荷をもった陽子は激しく反発し合うべきである。陽子（と中性子）をつなぎ止めている、電磁気力による反発力よりも強い何らかの力があるのは明白だ。その力のことを、創造力の乏しい当時の物理学者はたんに強い力とよんだ。しかし、もしそのようなポテンシャル力が存在するなら、なぜわれわれは日々の生活でその力を感じないのだろうか。事実、筋肉の収縮からダイナマイトの爆発に至るまで、われわれが直接感じるほぼあらゆる力の源は電磁気力であり、原子核反応あるいは原子爆弾を除く唯一の例外は重力である。われわれがその力を感じない理由は、力は大きいものの、強い力は非常に短距離力だからである（力の到達距離はボクサーのリーチのようなものだ。つまりその距離の外では影響力は急速にゼロに近づく。重力と電磁気力の到達距離は無限大だが、強い力では核子の大きさ程度である）\*2。

強い力に関する最初の重要な理論は、湯川によって1934年に提唱された[4]。湯川は、電磁場によって電子が原子核に、重力によって月が地球に引っ張られているように、何らかの場により陽子と中性子が引っ張り合っていると仮定した。その場は適切に量子化されているはずで、湯川は、（光子のような）粒子の交換で、すでに知られていた強い力の特徴を与える粒子の性質とは何なのか、という疑問をもった。たとえば、相互作用の到達距離が短いことはその媒介粒子が比較的重いことを示唆している。湯川は、その粒子の質量が電子の約300倍、あるいは陽子の約1/6であると計算した（問題1.2）。その質量が電子と陽子の間なので、湯川の提案した粒子は中間子（「中くらいの重さ」を意味する）とよばれるようになった。同様の発想から、電子はレプトン（「軽量」を意味する）と、一方で、陽子と中性子はバリオン（「重量」を意味する）とよばれた。だが、湯川はそのような粒子が実験室で観測されていないことを知っていたので、彼の理論は間違っていると考えた。しかしその時代、宇宙線に関する非常

\*2 これは少し単純化しすぎている。相互作用は通常  $e^{-(r/a)}/r^2$  のように変化して、 $a$  を力の「到達距離」と考える。クーロンの法則とニュートンの万有引力の法則では  $a = \infty$  で、強い相互作用では  $a$  は約  $10^{-13}$  cm (1 fm) である。

に多くの系統立った研究がなされていて、1937年までに二つの独立したグループ（西海岸のアンダーソンとネッダーマイヤー、そして東海岸のストリートとスティーブソン）が、湯川が描いた描像に一致する粒子を見つけ出していた\*3。実際、本書を読んでいるいまこの瞬間に2, 3秒に1回の割合で降り注いでいる宇宙線はそのような中途半端な質量をもった粒子たちである。

しばらくの間、すべてがうまくいっているように思えた。しかし、宇宙線中の粒子のより詳細な研究が進むにつれて、さまざまな矛盾が現れた。湯川が予言したよりも、その粒子の寿命は長く、そしてはるかに軽かった。さらに悪いことには、二つのグループの質量測定値が一致しなかった。1946年（物理学者がつまらない研究にしばらく従事した後）、決定的な実験がローマで行われて、宇宙線中の粒子は原子中の原子核と非常に弱くしか相互作用していないことが示された [5]。もしこれが本当に湯川の予言した中間子ならば、つまり、強い相互作用を伝えるものならば、その相互作用は劇的な

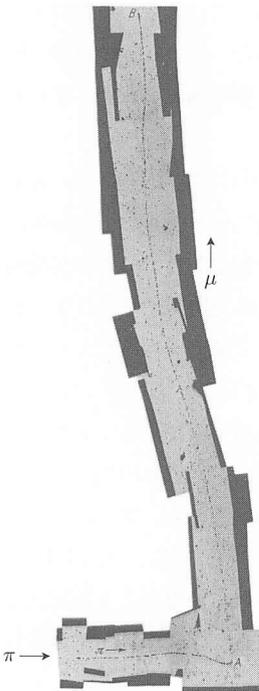


図 1.3 当時パウエルが撮影した写真の一つで、標高の高い地点で宇宙線にさらされた写真乳剤中にパイ中間子による飛跡が見える。左から入射したパイ中間子がミュー粒子とニュートリノに崩壊している（後者は電氣的に中性のため飛跡を残さない）（出典：Powell, C. F., Fowler, P. H. and Perkins, D. H.: *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (Pergamon, 1959). 1947年に *Nature*, **159**, 694 に初めて掲載された)

\*3 実際にこれら宇宙線中に見出された粒子と湯川の提案した中間子を結びつけたのは、オープンハイマーであった。

強さのはずである。その謎は1947年によく解けた。パウエルと彼のブリストルでの共同研究者らは、宇宙線中に本当に二つの中間子が存在することを発見して [6]、その一つを  $\pi$  (「パイ中間子」)、そしてもう一つを  $\mu$  (「ミュー粒子」) とよんだ (同時期にマーシャクも理論サイドから同じ結論に達していた [7])。湯川の提案した中間子は、本当は  $\pi$  で、それは大気上層でおびただしく生成されるが、通常は地上に到達する前に崩壊してしまう (問題 3.4)。パウエルらのグループは写真乳剤を山の頂上に設置した (図 1.3)。その崩壊物の一つはより軽く (より長寿命)、そして海拔 0 m でもにも観測される  $\mu$  である。湯川の予言する中間子の探索においては、ミュー粒子は強い相互作用とは何ら関係のない偽物だった。事実、あらゆる点でミュー粒子は重い電子のように振る舞い、レプトンの仲間としてきっちりと取まった (当時は習慣により、それを「ミュー中間子」とよぶ人もいたが)。

## 1.4 反粒子 (1930~1956年)

非相対論的量子力学は、1923年から1926年という驚くほど短い期間で完成したが、相対論的な拡張ははるかに難しい問題であった。最初の重要な仕事は、1927年のディラックによる彼の名前を冠した方程式の発見であった。ディラック方程式は、相対論的な式  $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$  のエネルギーをもつ自由電子を記述すると考えられた。しかし、非常に厄介な問題をはらんでいた。すべての正のエネルギー解 ( $E = +\sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$ ) に対して、それに対応する負のエネルギー解 ( $E = -\sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$ ) がつきまとったのだ。これが意味するのは、あらゆる状態がエネルギーの低い状態に向かって進むことを考えると、電子は負の状態にどんどん逃げていき、その過程で無限大のエネルギーを放出することになってしまう。ディラックはその方程式を救うため、もっともらしさには欠けるが、うまい具合につくり上げた解決法を提案した。彼は、負のエネルギー状態は無限の電子からなる海に囲まれていると仮定した。この海はあらゆるところにつねに存在し、完璧に均一なので、何者にも実質的な力を与えず、それゆえわれわれは通常感知しない。その次にディラックは、観測される電子がなぜ負のエネルギー状態の中に閉じ込められているのかを「説明する」ために、パウリの排他原理 (それによると、二つの電子は同じ状態を取ることができない) をもち出した。しかし、もしそれが本当なら、「海」の中にいる電子に、正のエネルギー状態に飛び上がるのに足るエネルギーを与えるとどうなるのか。海の中に「いるべき」電子がないということは、その場所では正味プラスの電荷があることを意味してしまい、また、本来なら存在すべき負のエネル

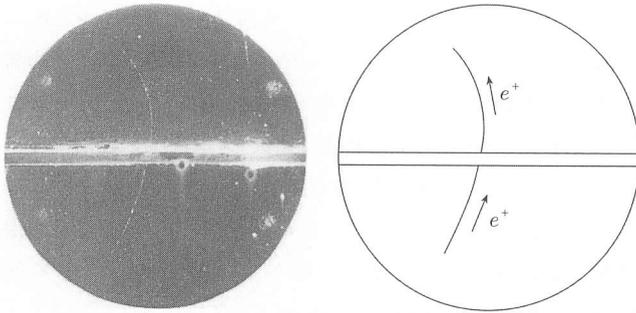


図 1.4 陽電子. 宇宙線中の粒子が霧箱に残した飛跡の写真を 1932 年にアンダーソンが撮影した. 霧箱は磁場中に置かれていたので (磁場の向きは紙面に入射する方向), 粒子の飛跡は曲線を描く. しかし, それは下向きに飛ぶ負電荷の粒子なのか, それとも上向きに飛ぶ正電荷の粒子なのだろうか. それを区別するために, アンダーソンは霧箱の真ん中に鉛の板を置いた (写真中の濃い横線). 板を通過する粒子は減速するので, その後の曲率が小さくなる. その曲率を見ることで, その粒子が上向きに進んでいること, それゆえ, 粒子の電荷は正であることがはっきりとわかる. アンダーソンは, その飛跡の曲率と点の粗さから粒子の質量が電子に近いことを示した

ギーがないということは, 正味で正のエネルギーとして見えてしまう. それゆえ, 「海の中のホール」は正のエネルギーと正の電荷をもつ普通の粒子の役割を果たしてしまう. デイラックは当初これらのホールが陽子であると期待したが, すぐにそれらは電子と同じ質量をもつことがあきらかになった. 2000 倍も陽子よりも軽いのだ. 当時そのような粒子の存在は知られておらず, デイラックの理論は間違っているように見えた. ところが, 1930 年には致命的な欠陥に見えたことが 1931 年の終わり頃には, アンダーソンの陽電子による発見のおかげで華々しい成功へと変わった (図 1.4). その陽電子は正の電荷をもつ電子の双子で, デイラックが要求した性質をきっちりともっていた [8].

それでもなお, 見えない電子によってつくられた無限の海にわれわれが満たされているという概念には多くの物理学者が満足しておらず, 1940 年代になるとシュテュッケルベルグとファインマンが, 負のエネルギー状態を説明するはるかに単純でより説得力のある解釈に成功した. ファインマンとシュテュッケルベルグの定式化では, 負のエネルギー解は別の粒子 (陽電子) の正のエネルギー状態だと再解釈される. 電子と陽電子は対等な立場として取り扱われ, デイラックの「電子の海」や不可思議な「ホール」は必要ない. この現代的な解釈がどういうものかは 7 章で見ることとするが, 一方で, デイラック方程式の二重性は, 場の量子論において, 深遠であり, かつ普遍的な特徴であることがわかっている. すべての種類の粒子には, 対応する同じ質量と反対の電荷をもつ反粒子が存在するのだ. つまり, 陽電子は反電子なのだ (実際のとこ

る、どちらを「粒子」と、もう一方を「反粒子」とよぶかは原理的にはまったくもって任意である。電子のことを反陽電子とよんでもまったく問題はない。しかし、身の回りには多くの電子が存在し、陽電子はそれほど存在しないので、われわれは電子を「物質」、陽電子を「反物質」と考えてしまう傾向がある。(負の電荷をもつ)反陽子は1955年にカリフォルニア大学バークレー校のベバトロンで実験的に初めて観測され、翌年には同施設で(電氣的に中性の)反中性子が発見された[9]。

反粒子の標準的な表記は、粒子名の上に線をつける。たとえば、 $p$ は陽子を $\bar{p}$ は反陽子を、そして $n$ は中性子を $\bar{n}$ は反中性子を表す。しかし、慣習としてたんに電荷を書くだけのこともある。なので、たいていの人は陽電子を $e^+$ と( $\bar{e}$ ではなく)、そして反ミュー粒子を $\mu^+$ ( $\bar{\mu}$ ではなく)と書く\*4。いくつかの中性粒子の中には反粒子と自分自身が等しいものがある。たとえば、 $\bar{\gamma} \equiv \gamma$ だ。実際、物理的に反中性子と中性子はどのように違うのか不思議に思うかもしれない。というのも、どちらも電氣的に中性なので。その答えは、中性子は電荷以外に別の「量子数」(バリオン数)をもつということである(反粒子では量子数の符号が反対になる)。さらに、電荷も全体ではゼロであるが、中性子は電荷構造をもち(中心と表面が正で、その間が負)、磁気双極子モーメントをもつ。これらも、 $\bar{n}$ だと反対の符号になる。

素粒子物理学には交差対称性とよばれる一般的な原理がある。

$$A + B \rightarrow C + D$$

という反応が起こることが知られていると仮定しよう。これらのどの粒子も「交差」して移項することができる。移項すると粒子は反粒子になり、その結果として得られる反応が許される。たとえばこうだ。

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D$$

$$A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$$

$$\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$$

さらに、逆過程 $C + D \rightarrow A + B$ も存在するが、専門的にはこれは交差対称ではなく詳細平衡の原理から導き出される。これから見ていくように、確かに、これらのさまざまな反応を含む計算は実際問題としては同一である。根源的には同じ過程が違った形態として表れているとみなしてもほとんど問題ない。しかし、一つだけ重要な注意

\*4 しかし、表記を混同してはならない。 $e^+$ では二重否定のように不定になってしまう。つまり、読み手にとっては陽電子なのか、反陽電子(これでは電子になってしまう)なのかわからない。

がある。エネルギー保存により、存在してもよさそうな反応が禁止されることがある。たとえば、 $A$ の質量が $B$ 、 $C$ そして $D$ の合計よりも軽いと、 $A \rightarrow \bar{B} + C + D$ という崩壊は起きない。同様に、 $A$ と $C$ が軽くて、 $B$ と $D$ が重いときは、初期状態の運動エネルギーがある「しきい値」を超えないと $A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$ という反応は起きない。なのでたぶん、交差（あるいは逆）反応は力学的には許されるが、運動学的には許されるかどうかわからないというべきなのであろう。交差対称性の威力と美しさが誇張されすぎるということはない。たとえば、実験室ではコンプトン散乱と対消滅はまったく違った現象であるが、コンプトン散乱

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

と、対消滅

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

が、「本当は」同じ過程であることを交差対称性は教えてくれる。

特殊相対論と量子力学の統合が、素晴らしい粒子-反粒子対称性を導き出した。しかし、これは、なぜわれわれの世界は、反陽子、反中性子、陽電子の代わりに、陽子、中性子、電子で満たされているのかという悩ましい問題を提起した。粒子と反粒子は同時に長い時間存在することができない。もし粒子が反粒子に出会うと対消滅してしまう。ということは、われわれが住む宇宙の片隅ではたまたま反粒子よりも粒子が多くて、対消滅は全部終わってしまい、粒子という残留物が残っているという歴史的な偶発事象が起こっているだけなのかもしれない。しかしこれが本当なら、宇宙空間の別の領域には反粒子優勢の場所が存在しなければならない。不運なことに、天文学上の証拠によると、観測できる宇宙のすべてが粒子からなっていることが強く示唆されている。12章で、「粒子-反粒子対称性」の現代的なアイデアのいくつかを見ていくことにする。

## 1.5 ニュートリノ（1930～1962年）

歴史上3番目の行き詰まりを議論するために、1930年に話を戻す[10]。原子核のベータ崩壊の研究において、問題が生じていた。ベータ崩壊では、放射性原子核の $A$ が電子の放出を伴って少しだけ軽い原子核 $B$ に遷移する。

$$A \rightarrow B + e^- \tag{1.6}$$

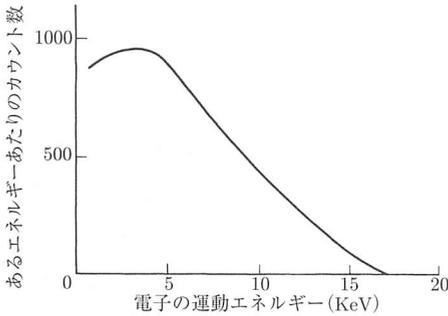


図 1.5 トリチウムのベータ崩壊 ( ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$ ) におけるエネルギー分布 (出典: Lewis, G. M.: Neutrinos (Wykeham, 1970) 30)

電荷の保存のために、 $B$  の電荷は  $A$  よりも素電荷一つ分だけ正でなければならない (現代に生きるわれわれは、この過程は  $A$  の中の中性子が  $B$  の中の陽子に変換していることを知っているが、1930 年には中性子がまだ発見されていなかったことに留意してほしい)。よって、その「娘」核 ( $B$ ) は、周期表中で 1 個だけ先に進んだところに位置する。ベータ崩壊には、カリウムのカルシウムへの変換 ( ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca}$ )、銅の亜鉛への変換 ( ${}^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow {}^{64}_{30}\text{Zn}$ )、トリチウムのヘリウムへの変換 ( ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$ ) など、さまざまな例がある\*5。

さて、重心系なら二体崩壊 ( $A \rightarrow B + C$ ) 中の崩壊後の粒子のエネルギーを運動学的に決められるという特性がある。とくに、「親」原子核 ( $A$ ) が静止しているときは、 $B$  と  $e$  は反対向きで大きさの等しい運動量をもって背中合わせに飛び出し、エネルギー保存により電子のエネルギーは以下となる (問題 3.19)。

$$E = \left( \frac{m_A^2 - m_B^2 - m_e^2}{2m_A} \right) c^2 \quad (1.7)$$

ここで重要なのは、三つの粒子の質量が決まると、 $E$  が一つの値に決まることである。ところが実験をやってみると、放出される電子のエネルギーの幅はかなり広く、式 (1.7) は、あるベータ崩壊における電子のエネルギーの最大値を与えているのみだった (図 1.5)。

これが最も厄介な問題であった。ニールス・ボーアは、エネルギー保存則を諦めようとした (それは一度目のことではなかった)\*6。幸運にもパウリはもっと地味な視点

\*5 上付きの数字は原子量 (中性子と陽子の数の合計) で、下付きの数字は原子番号 (陽子の数) である。

\*6 ボーアは、アインシュタインの光子説への (1924 年までは) 辛口の批評家であり、シュレーディンガー方程式に情け容赦のない非難をし、ディラックの相対論的電子の理論に関する研究に水を差し (クラインとゴールドンがすでに成功したと間違っただけを教えた)、パウリが中性子を導入したことに反対し、湯川の中間子に関する理論を馬鹿にして、ファインマンの量子電磁気学に対するアプローチを軽んじたことを思い出すのは興味深い。優れた科学者が、とくに他人の研究に関してはつねに正しい判断をするわけではないが、ボーアは空前の記録をもっている。

をもち、別の粒子が電子とともに放出され、その静かな共犯者が「失われた」エネルギーをもち逃げしているという説を提示した。その粒子は電荷保存のために電氣的に中性でなければならなかった（同時に、飛跡を残さないことを説明するためにも）。パウリはその粒子を中性子とよぶことを提案した。このアイデア全体が信用されたわけではなかったが、1932年にはチャドウィックがその名前を先に使ってしまった。しかし、翌年にフェルミがパウリの提案した粒子を取り入れたベータ崩壊に関する理論を発表し、パウリの提示を真剣に受け取らねばならないと見事に説明した。式 (1.7) で与えられるエネルギーにまで電子のエネルギーが到達しているという事実から、その新しい粒子が極度に軽いことがわかる。フェルミはそれをニュートリノ（「小さくて中性のもの」）とよんだ。この後すぐに見るが、われわれはいまではその粒子のことを反ニュートリノとよぶ。現代の用語では、ベータ崩壊の本質的な過程は

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \quad (1.8)$$

である（中性子が陽子と電子と反ニュートリノになる）。

さて、読者は、パイ中間子崩壊のパウエルの写真（図 1.3）について、何か不可解な点に気づくのではないだろうか。ミュー粒子が、パイ中間子の元々の方向に対して  $90^\circ$  の方向に飛び出している（これは衝突の結果ではない。乳剤中の原子との衝突により飛跡はふらふらするが、衝突により突然左に大きく曲がることはない）。この折れ曲がりの意味するのは、乳剤中に足跡を残さない、つまり電氣的に中性な、何か別の粒子がパイ中間子崩壊により生成されたということだ。自然（あるいは最も経済的）なのは、これもパウリのニュートリノだという仮定である。

$$\pi \rightarrow \mu + \nu \quad (1.9)$$

最初の論文の 2, 3 か月後に、パウエルたちは、パイ中間子崩壊に続くミュー粒子崩壊まで見えるというさらに驚くべき写真を公表した（図 1.6）。その頃にはすでに長い間ミュー粒子崩壊の研究がされていて、電荷をもった二次粒子が電子であることはよくわかっていた。この図からは、中性の崩壊物が存在することもあきらかで、その粒子をニュートリノだと推論できるだろう。ただし、今度は本当に二つのニュートリノだ。

$$\mu \rightarrow e + 2\nu \quad (1.10)$$

なぜニュートリノが二つだとわかるのか。前と同じように、実験を何度もくり返し、そのたびに電子のエネルギーを測定する。もしその値がいつも同じなら、終状態には二

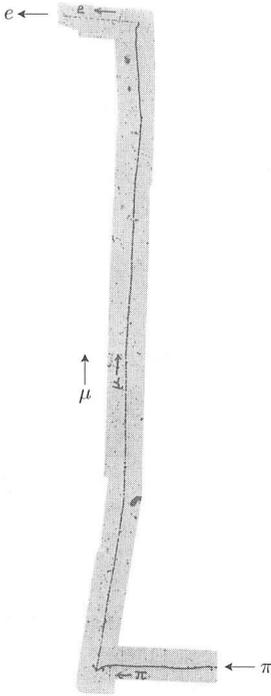


図 1.6 ここでは、パイ中間子がミュオン粒子(とニュートリノ)に崩壊し、そのミュオン粒子がさらに電子(と二つのニュートリノ)に崩壊している (出典: Powell, C. F., Fowler, P.H. and Perkins, D. H.: The Study of Elementary Particles by the Photographic Method Pergamon, New York (1959). 初めて掲載されたのは Nature, **163**, 82 (1949))

つの粒子だけが存在するということがわかる。しかし、もし変化すれば、少なくとも三体だ\*7。1949年までには、ミュオン粒子崩壊からの電子のエネルギーが一定ではないことがあきらかになり、二つのニュートリノが放出されているという説明も受け入れられるものとなっていた (一方で、パイ中間子崩壊におけるミュオン粒子のエネルギーは、実験の不定性の範囲内で完全に一定であり、純粋に二体崩壊であることが確認されていた)。

そして、1950年までには、理論的にニュートリノの存在を強いる確証があったが、相変わらず実験的な確認は得られていなかった。懐疑的な人たちは、ニュートリノはエネルギー保存を満たすための純粋に仮想的な粒子以外の何者でもないという議論をしていた。ニュートリノは、飛跡を残さず、崩壊もしない。実際、誰もニュートリノが何かしたのを見たことがなかった。なぜなら、ニュートリノと物質との相互作用

\*7 ここでも、そして元々のベータ崩壊の問題でも、角運動量保存により、エネルギー保存とはまったく独立に、3番目の放出粒子の存在が要求される。しかし、当時はスピンの割り振りがそれほど明白ではなく、たいいていの人々にとってエネルギー保存が議論的だった。話を簡潔にするため、本書でも4章までは角運動量について取り上げない。

用が極度に弱く、適当なエネルギーのニュートリノは1000光年(!)分の鉛を通過してしまうからだ\*8。ニュートリノを検出する機会を得るには、非常に強力なニュートリノ源が必要である。議論に終止符を打つ実験が、1950年代半ばに、サウスカロライナのサバンナ・リバー原子炉で行われた。カワンとライネスは、巨大な水タンクを設置し、「逆」ベータ崩壊が起きるのを見守った。

$$\bar{\nu} + p^+ \rightarrow n + e^+ \quad (1.11)$$

彼らの検出器におけるニュートリノフラックスは、毎秒1平方センチあたり  $5 \times 10^{13}$  と計算されていたが、その素晴らしい強度をもってしても、毎時間2、3事象しか期待できなかった。一方で、彼らは放出される陽電子を同定するための独創的な方法を開発していた。彼らの結果により、ニュートリノの存在は疑いなく確認された[11]。

先に言及したように、通常のベータ崩壊で生成されるのは、ニュートリノではなく反ニュートリノである。もちろん電気的に中性なので、ニュートリノと反ニュートリノに違いがあるのか読者は疑問に思うかもしれない。実際多くの人がそのような質問をしてきた。これから見ていくように、電気的に中性のパイ中間子は、反粒子との区別がない。また、光子にも区別がない。その一方で、反中性子は、はっきりと中性子とは異なる。それゆえ、われわれは少し困惑してしまうのだ。ニュートリノは反ニュートリノと同じなのだろうか、もし違いがあるなら、何が違うのだろうか。1950年代後半、デービスとハマーは、この疑問を実験で解決しようとした[12]。コーワンとライネスの結果から、交差反応である

$$\nu + n \rightarrow p^+ + e^- \quad (1.12)$$

が、ほぼ同じ頻度で起こらなければならないことをわれわれは知っている。デービスは反ニュートリノを使って同様の反応を探した。

$$\bar{\nu} + n \rightarrow p^+ + e^- \quad (1.13)$$

彼はこの反応が起こらないことを突き止め、ニュートリノと反ニュートリノが別物で

\*8 1平方インチあたり1000億個のニュートリノが太陽からやって来て、昼も夜も(夜は地球を通り抜けてきたニュートリノが下からやって来る)われわれの体を通り抜けているということを知ったときの慰めになるだろう。

あるという結論に達した\*9。

デービスの結果は、想定外ではなかった。実際、1953年には、コノピンスキーとマハムッドが、(式(1.12)に示すように)どのような反応が起こり、(式(1.13)に示すように)どういう反応が起こらないかを定める簡潔なルールを導入した。実効的には\*10、彼らは、電子、ミュー粒子、そしてニュートリノにはレプトン数  $L = +1$  を、陽電子、正電荷のミュー粒子、反ニュートリノには  $L = -1$  を割り振った(その他すべての粒子のレプトン数はゼロとした)。そして、彼らは(電荷の保存則との類推で)あらゆる物理過程で、反応前のレプトン数の合計が反応後のレプトン数と同じであるというレプトン数保存則を提案した。それゆえ、コーワン-ライネス反応(1.11)は許されるが(反応の前も後も  $L = -1$ )、デービス反応(1.13)は禁止される(左辺は  $L = -1$  で右辺は  $L = +1$ )。ベータ崩壊で出てくる粒子(式(1.8))を反ニュートリノとよんだのは、このルールによる予測であった。同様に、荷電パイ中間子の崩壊(式(1.9))は、本当は

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \quad (1.14)$$

と書くべきだし、ミュー粒子崩壊(式(1.10))は実際には

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \quad (1.15)$$

である。

何がニュートリノと反ニュートリノを区別しているのか不思議に思うかもしれない。最も簡単な答えは、ニュートリノには  $+1$ 、反ニュートリノには  $-1$  が割り振られるレプトン数だ。これらの数は、電荷がそうであるように、調べたい粒子が他の粒子とどのように反応するかを見ることで、実験的に決めることができる(後にわかるが、ニュートリノと反ニュートリノはヘリシティも違う。ニュートリノは「左巻き」で反ニュートリノは「右巻き」だ。しかしこれは技術的な細かい話で、後に議論するのが適切だ)。

ニュートリノの話に関しては、そのすぐ後に、興味深い寄り道がある。実験的に、

\*9 実際にはこの結論は、そのとき考えられたほど確固たるものではない。反応(1.13)を禁止したのは、 $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の違いではなく、 $\bar{\nu}$  のスピン状態のせいかもしれない。実際、今日では、反粒子との違いのあるディラック・ニュートリノと、 $\nu$  と  $\bar{\nu}$  が同じ粒子であるとするマヨラナ・ニュートリノ、という有力な二つの模型が存在する。本書の大部分では、ディラック・ニュートリノを扱っていると仮定するが、この問題については11章でまた議論する。

\*10 コノピンスキーとマハムッドは、ここで使う用語を使わず、またミュー粒子に対する割り振り方を間違えていた[13]。だが、それは気にするようなことではなく、本質的なアイデアは彼らのものである。

ミュー粒子の電子と光子への崩壊は決して観測されない。

$$\mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma \quad (1.16)$$

だが、この過程は、電荷保存則、レプトン数保存則をとともに満たしている。今日の素粒子物理学の有名な経験則によると（一般的にはリチャード・ファインマンによる）明示的に禁止されていないことは何であれ生じるはずである。 $\mu \rightarrow e + \gamma$ がないことは、「ミューらしさ」保存の法則を示唆するが、そうだとすると、観測されている $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$ 崩壊をどのように説明するのか。1950年代後半から1960年代初頭にかけて、多くの人がある答えとなるものを提示した[14]。電子に付随するもの( $\nu_e$ )と、ミュー粒子に付随するもの( $\nu_\mu$ )の2種類のニュートリノの存在を仮定しよう。ミュー粒子数 $L_\mu = +1$ を $\mu^-$ と $\nu_\mu$ に、 $L_\mu = -1$ を $\mu^+$ と $\bar{\nu}_\mu$ に、そして同時に、電子数 $L_e = +1$ を $e^-$ と $\nu_e$ に、 $L_e = -1$ を $e^+$ と $\bar{\nu}_e$ に割り振り、レプトン数保存則を電子数保存とミュー粒子数保存という二つの別々の法則に仕立て直すと、すべての許容、および禁止過程をうまく説明することができる。中性子のベータ崩壊は

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.17)$$

になり、パイ中間子の崩壊は

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.18)$$

であり、ミュー粒子崩壊は以下のかたちになる。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.19)$$

先にパイ中間子崩壊のことを初めて説明したとき、放出される中性粒子がベータ崩壊のときと同じだと仮定するのは「自然」で「経済的」だといった。確かに、自然で、経済的ではあった。しかしながら、それは間違っていた。

ニュートリノが二つだという仮説（と、電子数とミュー粒子数それぞれに対する独立した保存則）を試験するための最初の実験は、1962年にブルックヘブンでなされた[15]。 $\pi^-$ 崩壊により生成される約 $10^{14}$ 個の反ニュートリノを使い、レーダーマン、シュワルツ、スタインバーガー、そして共同研究者らは、予想される29個の

$$\bar{\nu}_\mu + p^+ \rightarrow \mu^+ + n \quad (1.20)$$

という事象を同定し、禁止される過程である

表 1.1 1962~1976年のレプトンの仲間

	レプトン数	電子数	ミュー粒子数
レプトン			
$e^-$	1	1	0
$\nu_e$	1	1	0
$\mu^-$	1	0	1
$\nu_\mu$	1	0	1
反レプトン			
$e^+$	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
$\mu^+$	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

$$\bar{\nu}_\mu + p^+ \rightarrow e^+ + n \quad (1.21)$$

は観測されなかった。ニュートリノが1種類だけなら、2番目の反応も最初の反応と共通のはずである(ちなみに、この実験は真に大量の遮蔽物を要する記念碑的実験となった。間違いなくニュートリノだけが標的に入射するようにするために、分解した戦艦から取り出した鉄を44フィートの厚さに積み上げた)。

先に、ニュートリノは極度に軽いといった。実際、つい最近まで(特別な理由があるわけではないが)質量はゼロであると広く仮定されてきた。これによって多くの計算が簡略化されたが、いまやそれが厳密には正しくないことが知られている。ニュートリノは質量をもっているのだ。だが、電子と比べてさえも非常に軽いということを取り返していう以外、その質量がどれだけなのかはまだわかっていない。さらに、長距離飛行すると、ニュートリノは別のタイプのニュートリノに変換し(たとえば、電子ニュートリノがミューニュートリノに)、さらにその後また元に戻ってしまう、ニュートリノ振動という現象が知られている。しかし、この話ははるかに後の話題であり、より詳しい取り扱いを必要とする。そこで、これについては11章まで取っておく。

そして1962年までには、レプトンの仲間は、電子、ミュー粒子、それぞれに付随するニュートリノ、そしてそれぞれの反粒子たち、と8種類にまで増えた(表1.1)。レプトンの特性は、強い相互作用に寄与しないという事実で特徴づけられる。その後の14年間は、少なくともレプトンに関しては静かな時代だった。そこで、レプトンについてはここで休止して、中間子やバリオン、総称してハドロンとよばれる、強い相互作用をする粒子たちのことについて追いかけてみることにする。

## 1.6 ストレンジ粒子 (1947~1960年)

1947年のわずかの間、素粒子物理学上の大きな問題は解決できたと信じられる時期があった。ミュー粒子を追求するという長い回り道の後で、湯川の間中子 ( $\pi$ ) をとうとう捕らえた。ディラックの予言する陽電子が見つかり、まだ見つかっていないものの (そして、これまで見てきたように、まだ問題点はあったが) パウリの予言するニュートリノも広く受け入れられるようになっていた。ミュー粒子の役割は謎で (「誰がそんなものを注文したんだ?」とラビ<sup>\*11</sup>は尋ねた)、全体の枠組みの中に必要とは思われなかった。しかし、素粒子物理学全体として見ると、1947年にはすべての研究が終わったかのようにであった。

だが、この快適な期間は長続きしなかった [16]。その年の12月、ロチェスターとバトラーは、図 1.7 に示される霧箱の写真を発表した [17]。宇宙線が左上方から入射し、鉛の板に当たり、中性粒子を生成している。中性粒子の崩壊物である二つの荷電粒子が右下に上下ひっくり返った「V」の飛跡を残していることから中性粒子の存在がわ

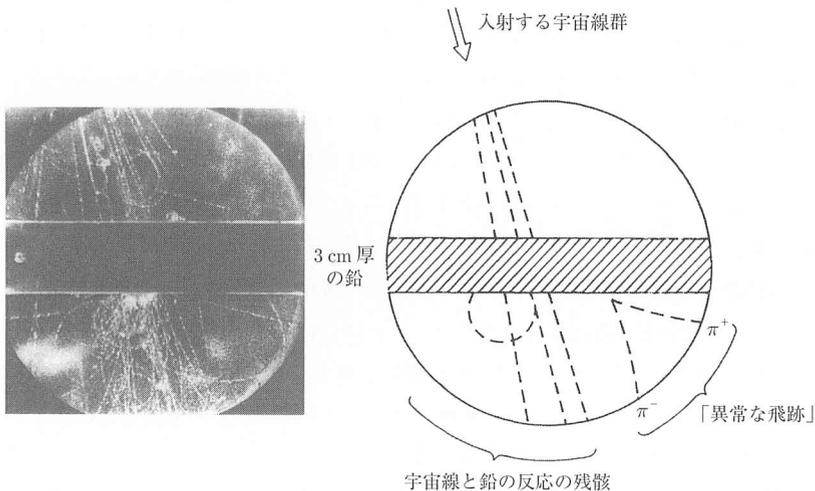


図 1.7 最初のスレンジ粒子。宇宙線が鉛の板に当たり、 $K^0$  が生成され、その  $K^0$  は荷電パイ中間子対に崩壊している (写真著作権: Prof. Rochester, G. D.: Nature, 160, 855 (1947). 版權: Macmillan Journals)

<sup>\*11</sup> 訳注: コロンビア大学のイジドール・イザーク・ラビ教授。原子核の磁気モーメント測定方法の考案によりノーベル物理学賞 (1944年) を受賞。

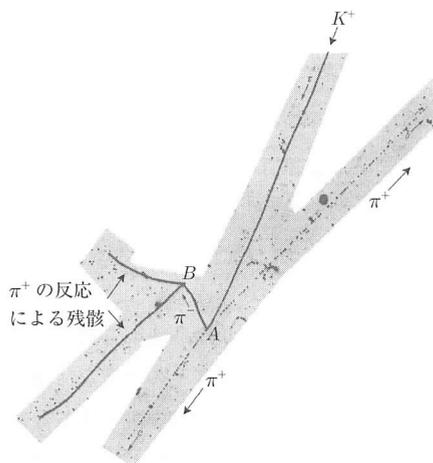


図 1.8 上から来た  $K^+$  が A で  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$  に崩壊している (その後、この  $\pi^-$  は地点 B で崩壊している) (出典: Powell, C. F., Fowler, P.H. and Perkins, D.H.: The Study of Elementary Particles by the Photographic Method (Pergamon, 1959). 初めて掲載されたのは Nature, **163**, 82 (1949))

かる。詳細な解析によると、これらの荷電粒子は  $\pi^+$  と  $\pi^-$  であった。ということは、少なくともパイ中間子の 2 倍の質量をもつ新しい中性粒子が存在することになる。それを  $K^0$  (「 $K$  中間子」) とよぶ。



1949 年、ブラウンと共同研究者らは、図 1.8 に掲載した荷電  $K$  中間子の崩壊を示す写真を公表した



( $K^0$  は初め  $V^0$  として知られ、その後  $\theta^0$  とよばれた。  $K^+$  は当初  $\tau^+$  とよばれた。それらが、基本的には電荷が異なるだけの同じ粒子であるということが認識されるのは 1956 年になるのを待たなければならなかった。しかし、それは、4 章で説明するまた別の話である)。  $K$  中間子は、いくつかの点において重いパイ中間子のように振る舞うので、中間子という家族は  $K$  中間子を含むように拡張された。やがて、 $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\rho$  など、多くの中間子が発見された。

その一方で 1950 年には、カルテックのアンダーソンらのグループにより別の「 $V$ 」粒子が見つかった。写真はロチェスターらのもの (図 1.7) に似ているが、今度の崩壊生成物は  $p^+$  と  $\pi^-$  であった。この粒子はあきらかに陽子よりも重く、 $\Lambda$  (ラムダ) とよばれた。

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^- \quad (1.24)$$

ラムダは、陽子や中性子とともにバリオンの仲間に属している。これを理解するためには、いったん1938年に戻らなければならない。その頃、「なぜ陽子は安定なのか」という疑問が生じていた。たとえば、陽電子と光子になぜ崩壊しないのか。

$$p^+ \rightarrow e^+ + \gamma \quad (1.25)$$

いうまでもなく、こんな反応が高い頻度で起こったらわれわれは困ってしまうが（すべての原子が崩壊してしまう）、1938年当時に知られていたいかなる法則も破ってはいなかった（レプトン数保存則は破っているが、1953年になるまでそのような法則の存在は知られていなかった）。シュテュッケルベルグは、陽子の安定性を説明するために、すべてのバリオン（1938年当時は陽子と中性子）に「バリオン数」 $A = +1$ を、反バリオン（ $\bar{p}$  と  $\bar{n}$ ）に  $A = -1$ を割り当て、反応の前後でバリオン数の総和が保存するはずだというバリオン数保存則を強く主張した [18]。それゆえ、中性子のベータ崩壊（ $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ ）は許され（反応の前後で  $A = 1$ ）、また反陽子を初めて観測した反応も許される（以下の両辺ともに  $A = 2$ ）。

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p} \quad (1.26)$$

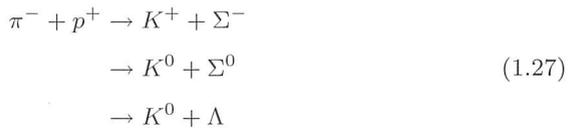
しかし、陽子は最も軽いバリオンなので崩壊先がなく、バリオン数保存によりその絶対的な安定性が保証される\*12。もし、反応(1.24)にバリオン数保存を適用しようとすると、ラムダにもバリオン数を与えねばならない。その後の何年間かで、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 、 $\Delta$ などさらにたくさんの重いバリオンが発見された。ところで、レプトンやバリオンと違って、中間子には保存則がない。パイ中間子崩壊（ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ ）では中間子が消失し、ラムダの崩壊（ $\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$ ）では中間子が生成される。

これら新しく発見された重いバリオンと中間子すべてが「ストレンジ」粒子であったことは驚きに値する。最初の近代的な加速器（ブルックヘブンのコスモトロン）が1952年に稼働を開始すると、すぐに実験室でストレンジ粒子を生成することが可能になり（唯一それまでに生成可能だったのは宇宙線である）、生成速度が増大した。ウィルス・ラムは、1955年のノーベル賞受賞記念演説を以下の言葉で始めた [19]。

\*12 大統一理論（GUT）では、わずかなバリオン数の破れは許されていて、陽子が絶対的に安定というわけではない（2.6節と12.2節を参照）。2007年現在、陽子崩壊は観測されておらず、その寿命は $10^{29}$ 年以上であることがわかっている。宇宙の年齢が約 $10^{10}$ 年であることを考えると、 $10^{29}$ 年というのはとてつもなく安定である。

1901年にノーベル賞が初めて与えられたとき、今日では「素粒子」とよばれる二つの物体、すなわち、電子と陽子についてしか物理学者は知らなかった。1930年を過ぎると、中性子、ニュートリノ、ミュー中間子、パイ中間子、もっと重い中間子、そしてハイペロンという、さまざまな「素」粒子が洪水となって押し寄せた。「新たな素粒子を発見したらノーベル賞をもらえたものだが、いまやそのような発見は10,000ドルの罰金に値する」といわれているのを聞いた。

新たな粒子が予期されていなかっただけでなく、もっと専門的見地から、それらが「奇妙に」見える点があった。それらは瞬時に(約 $10^{-23}$ 秒という時間スケールで)生成されるのに、崩壊は比較的ゆっくりだった(典型的には約 $10^{-10}$ 秒)。この事実から、パイスや他の人たちは、生成に寄与する機構と崩壊を支配する機構はまったくの別物であると指摘した[20]。現代の言葉でいうと、ストレンジ粒子は強い相互作用(原子核を保持しているのと同じ力)で生成され、弱い相互作用(ベータ崩壊やすべてのニュートリノ反応を支配している力)で崩壊する。パイスの提案した枠組みでは、ストレンジ粒子は対で生成(いわゆる随伴生成)されなければならなかった。実験的にはまったくあきらかではなかったが、1953年にゲルマン[21]と西島[22]は、発展させてみると、素晴らしくすっきりとして驚くほどうまくパイスの考えを取り入れた改善方法を見つけた。彼らはそれぞれの粒子に、強い相互作用では(電荷やレプトン数、バリオン数のように)保存するが、弱い相互作用では(それら以外が保存しないように)保存しないという、新しい特性(ゲルマンはそれを「ストレンジネス」とよんだ)を割り振った。たとえば、パイ中間子と陽子との衝突では、二つのストレンジ粒子を生成し得る。



ここで、 $K$ はストレンジネス $S = +1$ を、 $\Sigma$ と $\Lambda$ は $S = -1$ をもち、 $\pi$ や $p$ や $n$ という「普通の」粒子は $S = 0$ をもつ。しかし、ストレンジ粒子を一つだけ生成することは決してない。

$$\begin{aligned}
 \pi^- + p^+ &\rightarrow \pi^+ + \Sigma^- \\
 &\rightarrow \pi^0 + \Lambda \\
 &\rightarrow K^0 + n
 \end{aligned}
 \tag{1.28}$$

一方で、これらの粒子が崩壊するときは、ストレンジネスは保存しない。

$$\begin{aligned}
 \Lambda &\rightarrow p^+ + \pi^- \\
 \Sigma^+ &\rightarrow p^+ + \pi^0 \\
 &\rightarrow n + \pi^+
 \end{aligned}
 \tag{1.29}$$

これらはストレンジネスを保存しない弱い相互作用による過程なのだ。

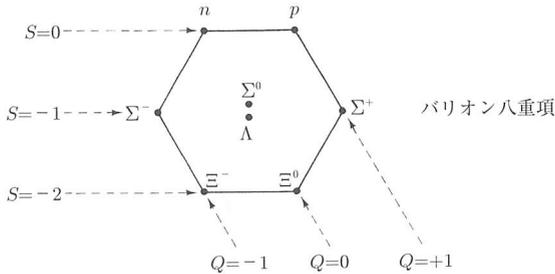
あきらかに、ストレンジ数の割り振り方には不定性がある。ΣとΛに  $S = +1$  を、 $K^+$ と  $K^0$ に  $S = -1$  を割り振ることも可能である。実際のところ振り返ってみると、そのようにした方がよかったかもしれない（まったく同様の観点から、ベンジャミン・フランクリンの電荷の正負の定義は当時完全に任意だったが、振り返ってみると、電流に寄与する粒子である電子を負にしてしまったのは不運であった）。ここで重要なのは、観測されている強い相互作用を説明し、かつ他の過程がなぜ存在しないのかを説明できる、すべてのハドロン（バリオンと中間子）に無矛盾なストレンジ数の割り振り方が存在するということである（レプトンと光子は強い相互作用をまったく受けないので、それらにはストレンジネスは適用しない）。

1947年にはこざっぱりしていた庭が、1960年にはジャングルになっており、ハドロン物理学は混沌としか形容できなかつた。強い相互作用をするあまりにも多すぎる粒子たちは、バリオンと中間子との二つのグループに大別され、それぞれのグループの中の粒子は電荷、ストレンジネス、そして質量によって分別された。しかしそこには、韻も、韻を踏む理由もなかつた。この苦境により、物理学者は100年前の周期表のない時代の化学を思い出していた。当時は、元素を特定しても、それらに共通のルールやシステムがまったくなかつた。1960年、素粒子たちは彼らの「周期表」を待っていた。

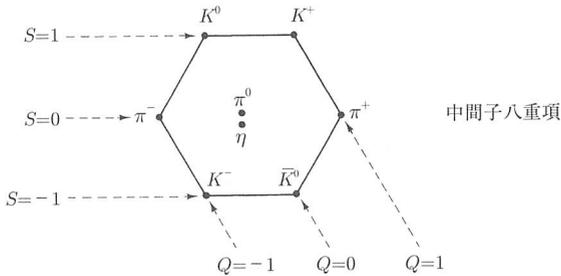
## 1.7 八道説 (1961~1964年)

素粒子物理学におけるメンデレーエフは、1961年にいわゆる八道説を導入したマレー・ゲルマンであった（本質的にまったく同じ説がニーマンによって独立に提案された）[23]。八道説は、電荷とストレンジネスに基づいて、バリオンと中間子を風変わ

りな幾何学的パターンに配置した。最も軽い8個のバリオンは、そのうちの二つを中心に配置して、六角形に押し込められた\*13。このグループは、バリオン八重項として知られている。ここで注意すべきは、下に伸びる斜線上に同じ電荷をもつ粒子がそろうことである。陽子と $\Sigma^+$ が $Q = +1$  (陽子の電荷を単位として)、中性子、 $\Lambda$ 、 $\Sigma^0$ 、 $\Xi^0$ が $Q = 0$ 、そして $\Sigma^-$ と $\Xi^-$ が $Q = -1$ である。水平な線は同じストレンジネスをもつ粒子たちをつないでいる。陽子と中性子が $S = 0$ 、真ん中の線が $S = -1$ 、そして二つの $\Xi$ が $S = -2$ となる。



最も軽い8個の中間子も同様の六角形のパターンにはまり、(擬スカラー) 中間子八重項を形づくる。

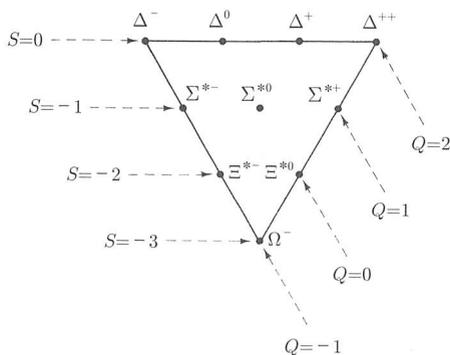


くり返しになるが、斜線が電荷を、そして水平線がストレンジネスを決める。しかし、今度は、上の線は $S = 1$ 、真ん中が $S = 0$ 、そして下の線が $S = -1$ になる (この違いもまた歴史上のたんなる偶然である。ゲルマンは、陽子と中性子に $S = 1$ を、 $\Sigma$ と $\Lambda$ に $S = 0$ を、 $\Xi$ に $S = -1$ を割り振ってもよかった。1953年、彼にはそのような

\*13 中心にいる粒子の位置関係は任意であるが、本書ではいつも三重項の中性メンバー (ここでは $\Sigma^0$ ) を一重項 (ここでは $\Lambda$ ) の上に置くことにする。

選択をする特別の理由もなく、よく知っている粒子である陽子や中性子のストレンジネスをゼロにするのが自然に思えた。1961年以降、ハイパー荷という新しい用語が導入された。それは、中間子に対しては $S$ と等しく、バリオンに対しては $S+1$ となるようになっていた。しかし、後の発展で結局のところストレンジネスの方がよい量子数であることがわかり、いまでは「ハイパー荷」という言葉はまったく異なる目的のために使われている。

六角形だけが八道説で許されている図形ではない。たとえば、より重い10個のバリオンからなるバリオン十重項を取り込むための三角形の配置もある\*14。



さて、ゲルマンがこれらの粒子を十重項に入れようとしたことで、確かに一つ素晴らしいことが起きた。当時それらの粒子のうち9個までは実験的に知られていたが、10個目（三角形の最も下にいて、電荷 $-1$ 、ストレンジネス $-3$ をもつ）は欠けていた。研究施設でこれらの特性をもつ粒子は検出されていなかった[24]。ゲルマンはそのような粒子が見つかることを大胆にも予言し、実験家にどのように生成すればよいかを詳細に伝えた。さらに、彼はその質量（問題1.6で読者自身も計算することになる）と寿命（問題1.8）を計算した。そして、案の定、ゲルマンが予言した通りに、1964年に有名なオメガ・マイナス粒子が発見された[25]（図1.9）\*15。

\*14 本書では簡単のために、十重項に入っている粒子を指定するのに $\Sigma^*$ と $\Xi^*$ を使う古い流儀の表記を使い続ける。現代の表記では\*を落として $\Sigma(1385)$ や $\Xi(1530)$ のように括弧内に質量を入れる。

\*15 同様のことが周期表のときにも起こった。メンデレーエフの図表には三つの穴（欠けている元素）があり、その穴を埋めるべく新しい元素が発見されるはずだとメンデレーエフは予言した。ゲルマンが未発見の粒子を予言したのと同様、メンデレーエフは未知の三つの元素の性質を確信をもって記述し、そしてその後20年以内に、三つすべて（ガリウム、スカンジウム、ゲルマニウム）が発見された。

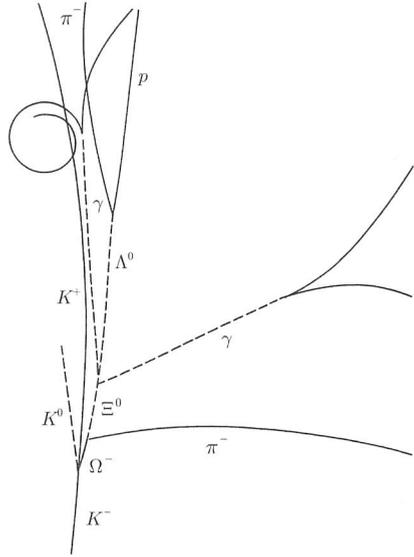
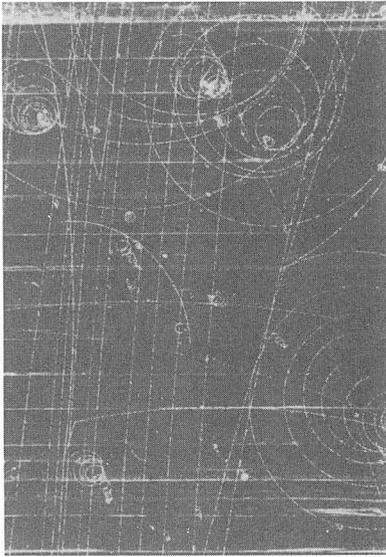


図 1.9  $\Omega^-$  の発見. 左は, 実際の泡箱の写真, 右は, 関連のある粒子の飛跡を線で示した図 (写真提供: ブルクヘブン国立研究所)

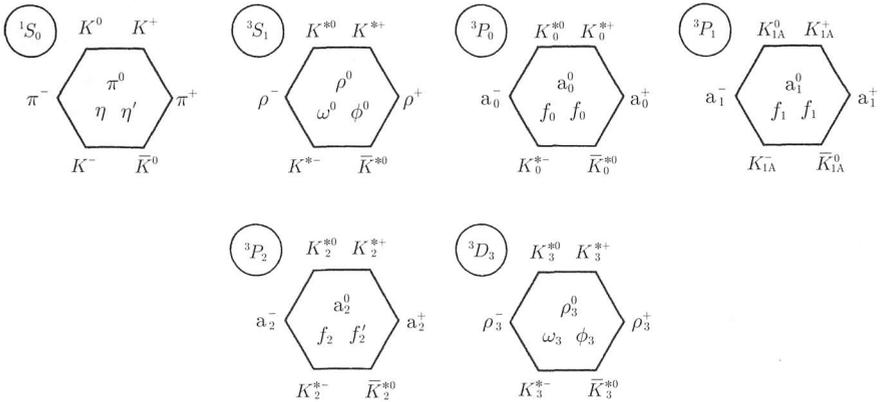


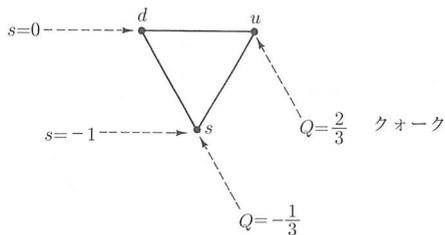
図 1.10 質量分析で使われる表記を使った中間子九重項 (5 章を参照). 現在では, 最低でも 15 個の確立された九重項がある (しかしながら, そのうちのいくつかではすべての粒子が発見されているわけではない). バリオンの場合, (スピン  $1/2, 3/2, 5/2$  をもつ) 粒子で満たされた完璧な八重項が三つあり, すべての粒子が見つかっていない八重項が 10 個ある. 完璧な十重項は 1 個だけだが, そうでないものはさらに 6 個あり, すでに知られている一重項は 3 個ある.

負電荷をもつオメガ ( $\Omega^-$ ) の発見以来、八道説の正当性を真剣に疑うものはいなかった。その後の10年間、新たに発見されたすべてのハドロンは八道説の多重項として収まった。これらのうちのいくつかを図1.10に示す\*16。バリオン八重項、十重項などに加えて、反対の電荷とストレンジネスをもつ反バリオンの八重項や十重項などももちろん存在する。しかし中間子の場合、反粒子は同じ多重項の中、つまり六角形の反対側の対応する場所に位置する。よって、正のパイ中間子の反粒子は負のパイ中間子で、負のKの反粒子は正のKなどになる（中性のパイ中間子とイータの反粒子はそれ自身である）。

分類は、いかなる科学でも発展の第一歩である。八道説はハドロンをたんに分類するだけでなく、その重要性は、分類するための構成にあった。八道説が素粒子物理学の近代の幕を開けたといっても過言ではないと思う。

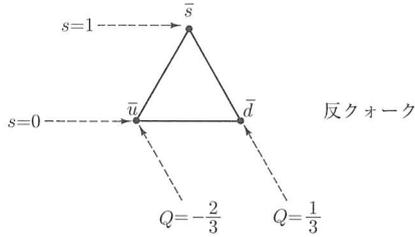
## 1.8 クォーク模型（1964年）

しかし、大きな成功を取めた八道説には、なぜハドロンはそんな変なかたちに納まるのかという疑問があった。周期表は多くの年月をかけた後、量子力学とパウリの排他律によって説明されたが、八道説はすでに1964年に理解に近づいた。パウリとツヴェイクはそれぞれ独自に、すべてのハドロンは実際のところ、さらなる基本構成要素からなっているという説を唱え、ゲルマンはその構成要素のことをクォークとよんだ[26]。クォークには三つの種類（あるいは「フレーバー」）があり、八道説の三角形を形成する。



\*16 確かに、ときどきは間違った実験結果もあった。ゲルマンの枠組みに入らないように見える粒子もあったが、それらすべては後に実験結果の間違いでであるとわかった。素粒子物理学の道は現れたり、消えたりしていた。1963年当時にもリストアップされていた26個の中間子のうち、19個は後に偽物であることがわかった！

(「アップ」を意味する)  $u$  クォークは電荷  $2/3$ ,  $S=0$  を,  $d$  (「ダウン」) クォークは, 電荷  $-1/3$ ,  $S=0$  を,  $s$  (元々は「脇道 (sideway)」であったが, いまは広く「ストレンジネス」とよばれている) クォークは電荷  $-1/3$ ,  $S=-1$  をもつ. クォーク ( $q$ ) それぞれに対応して, 反対の電荷とストレンジネスをもつ反クォーク ( $\bar{q}$ ) が存在する.



そして, バリオンをつくるには二つのルールがある.

- (1) すべてのバリオンは三つのクォークからできている (すべての反バリオンは三つの反クォークからできている).
- (2) すべての中間子は, クォークと反クォークからできている.

これがあれば, 簡単な算数でバリオン十重項と中間子八重項をつくることができる. 三つのクォーク (あるいはクォーク-反クォーク対) の組み合わせを全部書き出し, 電荷とストレンジネスを足し上げるだけでよい.

バリオン十重項			
クォークの組み合わせ	電荷	ストレンジネス	バリオン
$uuu$	2	0	$\Delta^{++}$
$uud$	1	0	$\Delta^+$
$udd$	0	0	$\Delta^0$
$ddd$	-1	0	$\Delta^-$
$uus$	1	-1	$\Sigma^{*+}$
$uds$	0	-1	$\Sigma^{*0}$
$dds$	-1	-1	$\Sigma^{*-}$
$uss$	0	-2	$\Xi^{*0}$
$dss$	-1	-2	$\Xi^{*-}$
$sss$	-1	-3	$\Omega^-$

注意すべきは三つのクォークから 10 の組み合わせができることだ. たとえば, 三つの  $u$  だと, それぞれが電荷  $Q = 2/3$  なので全電荷は  $+2$  に, そしてストレンジネスはゼロになる. これは  $\Delta^{++}$  という粒子である. 表を下に見ていくと, 十重項のメンバー

中間子九重項			
クォーク-反クォーク	電荷	ストレンジネス	中間子
$u\bar{u}$	0	0	$\pi^0$
$u\bar{d}$	1	0	$\pi^+$
$d\bar{u}$	-1	0	$\pi^-$
$d\bar{d}$	0	0	$\eta$
$u\bar{s}$	1	1	$K^+$
$d\bar{s}$	0	1	$K^0$
$s\bar{u}$	-1	-1	$K^-$
$s\bar{d}$	0	-1	$\bar{K}^0$
$s\bar{s}$	0	0	??

がすべて入っていて、最後が三つの  $s$  クォークからなっている  $\Omega^-$  になる。

クォーク-反クォークの組み合わせを同じように列挙すれば、中間子の表がで上がる。だが、少し立ち止まってみよう。ここには九つの組み合わせがあるが、中間子九重項には八つの粒子しかない。クォーク模型を信じると、 $Q=0$ ,  $S=0$  の ( $\pi^0$  と  $\eta$  に加えて) 3番目の中間子が必要になる。その後あきらかになるように、そのような粒子、 $\eta'$  はじつは実験的にすでに発見されていた。八道説では、 $\eta'$  はそれだけでもって一重項に分類されていた。クォーク模型によると、 $\eta'$  は、中間子九重項をつくるために他の八つの中間子の仲間に入っていた (実際のところ、 $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ ,  $s\bar{s}$  すべてが  $Q=0$  かつ  $S=0$  なので、われわれがこれまでにやってきたことだけでは、どれが  $\pi^0$  で、どれが  $\eta$  で、どれが  $\eta'$  が区別することは不可能である。でもそれは問題ではない。大事なのは、 $Q=S=0$  をもつ中間子が三つ存在するということである)。ところで、反中間子は自動的に中間子と同じ多重項に入る。 $u\bar{d}$  の反粒子は  $d\bar{u}$  だし、その反対も真である。

読者は、私がバリオン八重項について話すのを避けていることに気づいているかもしれない。三つのクォークを組み合わせると8個のバリオンをつくるのはまったくもってあきらかではない。実際、非常にすっきりとした方法ではあるが、スピンを取り扱う必要があり、詳細は5章に回すことにする。ここでは、十重項を取り出して、三つの角 (そこでは、 $uuu$ ,  $ddd$ ,  $sss$  のようにクォークが同じである) をなくすと (そこでは、 $uds$  のように三つのクォークが違う)、バリオン八重項の8個の状態を正確に得られるという不思議な事実を示して、みなさんをじらすにとどめる。つまり、クォークの同じ組み合わせが八重項を説明しているのだ。いくつかの組み合わせはまったく現れず、そして一つの組み合わせが二度現れる。

本当のところ、八道説のすべての多重項がクォーク模型では自然に出てくる。正電

荷をもつ  $\Delta^+$  と陽子は両方とも二つの  $u$  と一つの  $d$  からできているし、正電荷をもつ  $\pi$  と正電荷をもつ  $\rho$  の両方が  $u\bar{d}$  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った粒子になることが多くある。ちょうど水素原子（電子と陽子）がさまざまな違った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、さまざまの異なった方法で束縛する。しかし、電子-陽子系のさまざまなエネルギー準位は相対的に非常に近いために（原子の静止質量はほぼ  $10^9$  eV のところ、エネルギー準位の間隔は典型的には数 eV しかない）エネルギー準位が違ってそれらすべてを同じ「水素」と考えるのが自然であるが、その一方で、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ので、われわれはそれらの違うエネルギー準位を別の粒子とみなす。それゆえ、原理的には、たった三つのクォークで無限個のハドロンをつくり上げることができる。だが、クォーク模型では絶対に否定されることがいくつかある。たとえば、 $S = 1$  あるいは  $Q = -2$  のバリオンだ。三つのクォークからではどうしてもそういった量子数を実現できない（反バリオンであれば可能だが）。他にも、電荷  $+2$  ( $\Delta^{++}$  バリオンのように) あるいはストレンジネス  $-3$  ( $\Omega^-$  のように) をもつ中間子をつくることはできない。これらいわゆる「エキゾチックな」粒子を探すがかりな実験が長い間なされてきた。その発見はクォーク模型を壊滅させることになるが、そのような証拠はいまだかつて見つかったことがない（問題 1.11）。

だが、クォーク模型は一つ大きな問題を抱えていた。非常に真剣に探索が行われたにもかかわらず、誰も個々のクォークを見ることがなかった。もし陽子が本当に三つのクォークからできているのなら、十分強く陽子をたたけば、クォークが飛び出してくるはずだと考えるだろう。また、それらを識別するのは難しくはないはずだ。というのも、それらは分数の電荷という間違いようなない指紋をもっているので、普通のミリカンの油滴実験で同定することができるだろう。さらに、クォークのうち少なくとも 1 種類は絶対に安定でなければならない。より軽い分数電荷をもった粒子は存在しないので、どんな崩壊もできないのだ。つまり、クォークを生成するのは簡単はずだし、同定するのも簡単、保持するのも簡単であるにもかかわらず、誰もクォークを発見することができなかった。

実験的に単一のクォークを生成できないことから、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が広く巻き起こった。クォーク模型にしがみついた人たちは、たぶん、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」という概念を導入して、クォークを

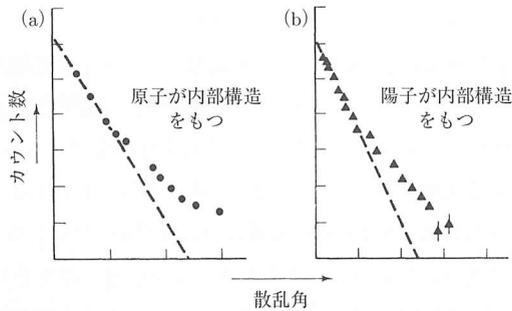


図 1.11 (a) ラザフォード散乱では、たくさんの数の粒子が大角度で散乱されることから、原子が内部構造（原子核）をもっていることを示している。(b) 深非弾性散乱では、たくさんの数の粒子が大角度で散乱されることから、陽子が内部構造（クォーク）をもっていることを示している。点線は、正電荷が、(a) 原子中に (b) 陽子中に、一様に分布しているときの予想を表している（出典：Halzen, F. and Martin, A. D.: Quarks and Leptons (John Wiley & Sons, 1984). John Wiley & Sons, Inc. の許可を得て再掲)

見つけられないという落胆を隠そうとした。もちろん、これは何にも説明しておらず、われわれのフラストレーションに名前をつけたにすぎない。そしてこれが、全然答えられていない、厳しい批判的な理論的問題の引き金となった。つまり、どんな仕組みによってクォークが閉じ込められているのかという問いだ [27]。

すべてのクォークがハドロンの中に張りついているとしても、だからといって、実験的な研究で手が届かないということを意味しているわけではない。何かを対象物に発射するという、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索することができる。そのような実験が、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。

これらのいわゆる「深非弾性散乱」実験の結果は [28]、驚くほどラザフォードの結果を連想させた (図 1.11)。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、ラザフォードの結果が原子中の正の電荷が原子核に集中していることを示していたように、陽子の中の電荷が小さな塊に集中していることであった [29]。しかし、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。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。

それでもう一つ、クォーク模型に対する理論的な反論があった。クォーク模型は、パウリの排他律を破っているかのように見えた。パウリの元々の定式では、排他律によって二つの電子が同じ状態を占めることはできない。しかし後に、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（この証明は、場の量子論の最も重要な成功の一つである）。これから見ていくが、この排他律は、スピン  $1/2$  をもつクォークにも当てはまらなければならない。たとえば、 $\Delta^{++}$  は同じ状態にいる三つの同じ  $u$  クォークからなっていると考えられており、これは（加えて、 $\Delta^-$  と  $\Omega^-$  も）パウリの原理に矛盾しているように思われた。

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提案した [30]。彼は、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： $b$ 」）があるのだといい出した。排他律は同種の粒子に対してのみ適用されるので、問題は消し飛ぶ。

色という仮説は手品のように思えて、多くの人は当初クォーク模型の最後の悪あがきだと考えた。ところが後になってみると、色の導入はとてつもなく実り多かった [31]。あえていう必要はないが、ここでいう「色」という用語は、日常生活で使う言葉の意味との関係はまったくない。赤さ、青さ、緑さというのは、電荷とストレンジネスに加えてクォークがもつ3種類の新しい特性を示すためのラベルにすぎない。赤のクォークは、赤さを1個、青さを0個、緑さを0個もっている。そして、その反クォークは赤さ-1個などをもっている。これらの量をたんに  $X$  っぽさ、 $Y$  っぽさ、 $Z$  っぽさといひ換えてもよい。ところが、色という用語は一つ特別にうまい特徴をもっている。色によって、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。

「無色」という言葉が意味するのは、それぞれの色の量がゼロであるか、3色すべてが同じ量で存在するかのどちらかである（後者は、光の3原色を組み合わせると白になるという事実を真似ている）。この賢いルールは、なぜ二つあるいは四つのクォークから粒子をつくれぬのか、そして、自然界に個々のクォークが現れてこないのかという問題を「説明」している（それがここで使う正しい言葉だとしたら）。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\*17.

## 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。当初うまくいくと期待されていたクォーク模型は、最終的には忘れ去られるという居心地の悪い状態に陥っていた。クォーク模型にはいくつかの特筆すべき成功があった。八道説をうまく説明したし、陽子が内部に塊をもつことも正しく予言した。しかし、二つの致命的な欠陥 (クォークを実験的に観測していないこととパウリの排他律と矛盾していること) があった。クォーク模型の支持者たちは、クォークの閉じ込めと色仮説という、当時それなりに説得力をもった正当化で、二つの欠点を取り繕った。しかし、1974年まではほとんどの素粒子物理学者がクォーク模型を気持ち悪く感じていたといえるだろう。陽子内部の塊のことはパートンとよばれ、それらを明示的にクォークだと同定しようとはしなくなっていた。

興味深いことに、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、まったく別の、そして (ほとんど) まったく予期されていなかった、プサイ ( $\psi$ ) の発見によってであった [34]。その  $\psi$  は、1974年の夏に、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。しかし、ティンは観測したことを公表する前に実験結果の確認をしたかったため、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するまで、ティンたちの結果は驚くほど秘密にされていた。その二つのチームは同時に論文を発表し [35]、ティンは新粒子を  $J$  とよび、リヒターは  $\psi$  と名づけた。発見された  $J/\psi$  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倍以上の重さであった (元々の、中間子は「中くらいの重さ」、バリオンは「重量級」という使い方は長いこと続いていたが、やがて消え去った)。しかし、この粒子が普通でなかったのは、その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

\*17 もちろん、これらをまとめて一塊にすることもできる。たとえば、重陽子は六つのクォーク (三つの  $u$  と三つの  $d$ ) からなる状態である。2003年には、四つのクォークからなる「中間子」(実際には  $qq\bar{q}\bar{q}$ ) と五つのクォークからなるバリオン ( $qqqq\bar{q}$ ) の観測という突発的な興奮すべき出来事があった。いまでは後者は統計的なゆらぎであったとわかったが [32]、少なくとも一つの中間子 (高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で発見された、いわゆる  $X(3872)$ ) の場合については、四つのクォークでできているという解釈がいまでも正しいと考えられている。が、いまもなお、 $D\bar{D}^*$  分子と解釈すべきか、それ自体を中間子と解釈するのがよいのかははっきりしていない [33]。

き続けた。いまでは、 $10^{-20}$ 秒と言っても驚くほど長い時間ではないかもしれないが、これくらいの質量のハドロンの典型的な寿命は $10^{-23}$ 秒のオーダーだということを理解しておかなければならない。つまり、 $\psi$ は他の同じような粒子に比べ、1000倍も長い寿命をもっているのだ。それはまるで、ペルーかコーカサスにある70000年前の生活を営んでいる村に誰かが来てしまったようなものだ。それはたんなる数理的な異常ではなく、根本的に新たな生物学の兆候を見ているようなものだ。 $\psi$ も同様で、そ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。そういう正当な理由のために、 $\psi$ の発見によって突然巻き起こった出来事は11月革命として知られるようになった[36]。

それに続く数か月間は、 $\psi$ 中間子の本当の性質について活発な議論がなされたが、その説明に成功したのはクォーク模型であった。 $\psi$ は、新たな(4番目の)クォークである $c$ (charmを意味する)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に加え、その滑稽な名前は、かなり前にブヨルケンとグラシヨーによって導入されたものである[37]。レプトンとクォークと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： $d, u, s$

もしすべての中間子とバリオンがクォークからできているなら、これら二つのグループは真に根源的な粒子となる。しかし、なぜレプトンが4種類なのにクォークは3種類だけなのか。それぞれが4種類の方がよいのではないだろうか。後に、グラシヨー、イリオボロスとマイアニは、4番目のクォークが必要とされる、もっと説得力のある専門的な理由を示すが、クォークとレプトンとの間の並行性という単純なアイデアはこじつけ的憶測であったにもかかわらず、アイデアの主たちが想像した以上に深遠であるとわかることになる。

このように、 $\psi$ が発見されたときには、クォーク模型は説明を携えて準備万端であった。さらにいうと、示唆に富んだ説明ともいえた。なぜなら、4番目のクォークが存在すれば、さまざまな量のチャームをもつ新たなバリオンと中間子があるはずだからだ。これらのうちのいくつかを図1.12に示す。可能な組み合わせは読者自身で探せるはずだ(問題1.14と1.15)。ただし、 $\psi$ 自身は正味のチャーム価がゼロであることに注意せよ。つまり、 $c$ にはチャーム価+1が割り振られていて、 $\bar{c}$ は-1をもつだろうから、 $\psi$ のチャーム価は「消えて」しまう。チャーム価という仮説を確認するために



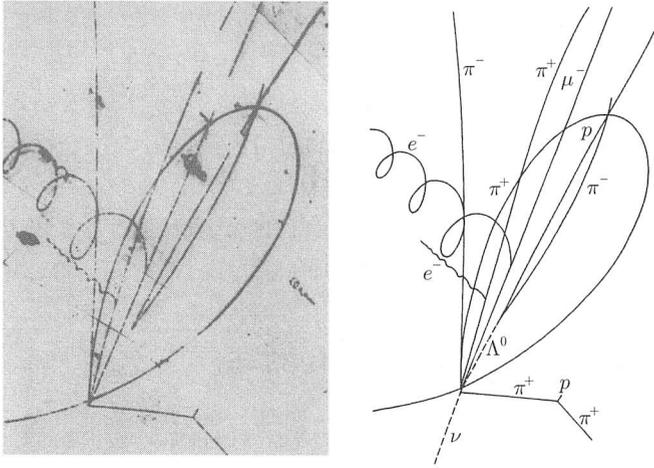


図 1.13 チャームをもったバリオン。この事象の最も可能性の高い解釈は  $\nu_\mu + p \rightarrow \Lambda_c^+ + \mu^- + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$  である。チャームをもったバリオンの崩壊 ( $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda + \pi^+$ ) は、飛跡を残すには寿命が短すぎるが、その後の  $\Lambda$  の崩壊ははっきりと見てとれる (写真提供：ブルックヘブン国立研究所の N. P. Samios)

(申し訳ないが、この用語を開発したのは私ではない。ある意味、この馬鹿げた名付け方は、当時の人々が真面目にクォーク模型について話をするときとどれだけ慎重であったかの名残なのだ) をもつハドロンの探索が始まった。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 ( $\Sigma_b^+ = uub$ ) は 2006 年に、そして 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 年に観測された。ボトム価をもった最初の中間子 ( $\bar{B}^0 = b\bar{d}$  と  $B^- = b\bar{u}$ ) は 1983 年に発見された [45]。  $B^0/\bar{B}^0$  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て、いわゆる「B ファクトリー」が現在 SLAC (「BaBar」) と KEK (「Belle」) で稼働している\*18。 Particle Physics Booklet には、  $B_s^0 = s\bar{b}$  と  $B_c^+ = c\bar{b}$  も載っている。

この時点では、天才でなくても 6 番目のクォーク (truth あるいは top を意味する  $t$ ) がまもなく発見されることを予言でき、6 個のクォークと 6 個のレプトンというグラシヨウの対称性を回復することができた。しかしトップクォークは極度に重いことがわかり ( $174 \text{ GeV}/c^2$  で、ボトムクォークの 40 倍の重さ)、なかなか捕まえることができず人々はいらついた。当初のトップニウム ( $\psi$  と  $\Upsilon$  のような  $t\bar{t}$  中間子) 探索は失敗に終わった。電子-陽電子衝突型加速器では十分なエネルギーに到達できず、

\*18 訳注：2019 年現在、BaBar も Belle も運転を終えているが、KEK ではルミノシティを増強した Belle2 が実験を開始した。また、CERN でも LHCb 実験が行われている。

トップクォークは束縛状態を形成するにはたんに短寿命すぎた。あきらかに、トップを含んだバリオンや中間子は存在しない。トップクォークの存在は1995年に決定的となった。テバトロンがようやくその前年に強い証拠となり得る十分なデータを取得したのだ（基本的な反応は  $u + \bar{u}$ （あるいは  $d + \bar{d}$ ）  $\rightarrow t + \bar{t}$  で、トップと反トップは生成直後に崩壊する。そして、崩壊粒子の解析により、トップクォークがはかなく生成されたことを推測することができる）[46]。LHCが稼働開始するまで、テバトロンが世界で唯一トップクォークを生成できる加速器である。

## 1.10 仲介役ベクトルボソン（1983年）

フェルミのベータ崩壊に関する元々の理論では（1933年）、反応を1点での接触型相互作用として取り扱っていたので、力を媒介するための粒子を必要としていなかった。（ベータ崩壊を引き起こしている）弱い力は、非常に短距離力なので、フェルミの構築した模型は真実からかけ離れておらず、低エネルギーでのとてもよい近似となる結果を生み出す。しかし、このやり方では高いエネルギーでの結果を再現できないことが広く知られており、だんだんと、相互作用とは何らかの粒子の交換によって誘起されるのだという理論に取って代わられていった。その仲介役は、「仲介役ベクトルボソン」というつまらない名前でも知られることとなった。理論家にとっての挑戦は、その仲介役ベクトルボソンの性質を予言することであり、実験家にとっての挑戦は、それを実験室で生成することであった。読者は、湯川が強い力における同様の問題に直面したときに、力の到達距離は原子核の大きさとだいたい同じだとしてパイ中間子の質量を見積もったことを思い出すかもしれない。しかし、弱い力の到達距離を測る同じような指標がない。大きさがわかるような「弱い束縛状態」というものは存在しないのだ。弱い力は、弱すぎて粒子を一塊に集めておくことができないのだ。何年もの間、仲介役ベクトルボソンの質量の予言は、経験（粒子を検出するために徐々にエネルギーを上げていったが実験的に観測できないという「経験」）に基づく予想でしかなかった。1962年までには、その質量は少なくとも陽子の半分以上であることが知られ、さらにその10年後には、実験による下限値は陽子質量の2.5倍にまでなっていた。

しかし、グラシヨー-ワインバーグ-サラムによる電弱理論の出現によって、本当に確固たる質量の予言が可能になった。この理論では、実際には3種類の仲介役ベクトルボソンがあり、そのうちの二つが電荷をもち ( $W^\pm$ )、一つが中性である ( $Z$ )。それらの質量は

$$M_W = 82 \pm 2 \text{ GeV}/c^2, \quad M_Z = 92 \pm 2 \text{ GeV}/c^2 \quad (\text{予言値}) \quad (1.30)$$

と計算された [47].

1970年代後半, CERNは, これらの尋常ではなく重い粒子たちを生成するために特別に設計した陽子-反陽子衝突型加速器の建設を開始した (陽子の質量は  $0.94 \text{ GeV}/c^2$  であり, いま話しているのはそのほぼ100倍もの重さだということを念頭に置いてほしい). 1983年の1月に  $W$  の発見がカルロ・ルビアのグループによって報告され [48], その5か月後には同じチームが  $Z$  の発見を公表した [49]. その質量は

$$M_W = 82.403 \pm 0.029 \text{ GeV}/c^2, \quad M_Z = 91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}/c^2 \quad (\text{測定値}) \quad (1.31)$$

であった.

これらの実験は技術的な観点におけるとてつもない成功を収めると同時に [50], 当時の物理学界が強く情熱を注いでいた, 標準模型の本質的な点を検証するという根源的重要性を担っていた (そのために, ノーベル賞がすでに与えられていた). しかし, スtrenジ粒子や  $\psi$  と違って (しかしながら, 10年後のトップクォークのときは似ている), 仲介役ベクトルボソンは世界中から待ち望まれた存在だったので, 一般的な反応は, 動揺や驚きではなく, 安堵であった.

## 1.11 標準模型 (1978年～?)

その後, 現在の観点では, あらゆるものはレプトン, クォーク, 力の媒介役という3種類の素粒子からできている. レプトンは6種類あり, それらの電荷 ( $Q$ ), 電子数 ( $L_e$ ), ミュー粒子数 ( $L_\mu$ ), そしてタウ数 ( $L_\tau$ ) によって分類され, 3世代に分かれている. さらに, すべての符号をひっくり返した6種類の反レプトンも存在する. たとえば, 陽電子は電荷  $+1$  と電子数  $-1$  をもつ. ということで, すべてのをひっくりめると, 本当は12種類のレプトンが存在することになる.

レプトンの分類

	レプトン	$Q$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
第1世代	$e$	-1	1	0	0
	$\nu_e$	0	1	0	0
第2世代	$\mu$	-1	0	1	0
	$\nu_\mu$	0	0	1	0
第3世代	$\tau$	-1	0	0	1
	$\nu_\tau$	0	0	0	1

同様に、クォークには、電荷、ストレンジネス ( $S$ )、チャーム ( $C$ )、ビューティ ( $B$ )、そしてトップ ( $T$ ) によって分類される6個の「フレーバー」が存在する (首尾一貫性のためには、めったに使われることはないが、「アップ」の  $U$  と「ダウン」の  $D$  を加えておくべきだと思う。だけれども、それらは余分である。たとえば、 $S = C = B = T = 0$  かつ  $Q = 2/3$  をもつ唯一のクォークはアップクォークなので  $U = 1$  かつ  $D = 0$  と指定する必要はないのだ)。クォークも3世代に分かれている。そしてまた、反クォークの表ではすべての符号を反転させる。その一方で、クォークと反クォークのそれぞれは三つのカラーをもつので、合計で36種類のクォークが存在する。

クォークの分類

	クォーク	$Q$	$D$	$U$	$S$	$C$	$B$	$T$
第1世代	$d$	-1/3	-1	0	0	0	0	0
	$u$	2/3	0	1	0	0	0	0
第2世代	$s$	-1/3	0	0	-1	0	0	0
	$c$	2/3	0	0	0	1	0	0
第3世代	$b$	-1/3	0	0	0	0	-1	0
	$t$	2/3	0	0	0	0	0	1

そして最後に、あらゆる相互作用には仲介役がいる。電磁気力には光子、弱い力には二つの  $W$  と  $Z$ 、そして重力には (おそらく) グラビトンだ。しかし、強い力についてはどうなっているのだろうか。湯川の元々の理論では、強い力の担い手はパイ中間子であったが、より重い中間子の発見によりこの単純な描像は成り立たなくなった。いまでは、陽子や中性子は、 $\rho$  や  $\eta$  や  $K$  や  $\phi$  やその他すべての中間子を交換することになってしまう。クォーク模型はもっと説得力のある改訂版をもたらした。つまり、もし陽子、中性子あるいは中間子が複雑な構造体だとしたら、それらの間の相互作用が単純だと信じる理由がなくなる。根源的なレベルで強い力を研究するには、むしろ個々のクォーク間の相互作用を見るべきだ。そこで、疑問は、強い相互作用反応では、二つのクォーク間でどのような粒子が交換されるのか、ということになる。この媒介

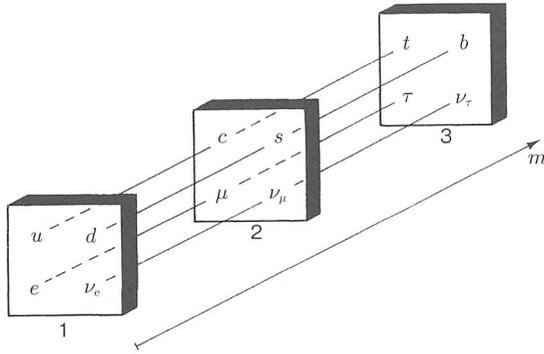


図 1.14 質量が増えるように並べられた、クォークとレプトンの3世代

役のことをグルーオンとよび、標準模型ではそれらが8種類存在する。これから見ていくが、グルーオンは(クォークのように)カラーをもつため、単独の粒子として存在できない。グルーオンを検出する可能性があるのは、ハドロンの内部か、無色となるグルーオンの組み合わせ(グルーボール)のみである。だがしかし、グルーオンの存在を示す間接的だが確固たる実験の確証がある。深非弾性散乱実験では、陽子の運動量の約半分を電氣的に中性の構成物、おそらくはグルーオンが担っていることが示されている。高エネルギーでの非弾性散乱によるジェットの構造の性質はクォークとグルーオンの飛行中の崩壊だとして説明される[51]。そして、ひょっとするとグルーボールは発見されているのかもしれない[52]。

以上すべてを足し上げると、たぶん「素である」粒子の数はあきれるほど大きな数になってしまう。12のレプトン、36のクォーク、そして12の媒介粒子だ(標準模型には含まれていないので、グラビトンは数えない)。そして後で見るが、グラシローワインバーグ-サラム理論では最低一つのヒッグス粒子が必要になり、取り扱うべき粒子は最低でも61になる。最初は原子、そして後にはハドロンの経験から、多くの人はいはこれら61の粒子のうちの少なくとも何種類かはより素である粒子による複合物に違いないと提案している(問題1.18)[53]。そのような憶測は標準模型の先であり、本書の狙いからは外れている。私個人としては、標準模型に莫大な数の「素」粒子が含まれていること自体を心配する必要はないと考えている。というのも、それらは互いに強い関連をもっているからだ。たとえば、8種類のグルーオンは色を除けば同一だし、2世代目と3世代目は第1世代のくり返しになっている(図1.14)。

それでもなお、クォークとレプトンに世代が三つあるべきというのは奇妙に見える。

クォークとレプトンの質量 (単位は MeV/c<sup>2</sup>)

レプトン	質量	クォーク	質量
$\nu_e$	$< 2 \times 10^{-6}$	$u$	2
$\nu_\mu$	$< 0.2$	$d$	5
$\nu_\tau$	$< 18$	$s$	100
$e$	0.511	$c$	1200
$\mu$	106	$b$	4200
$\tau$	1777	$t$	174000

結局のところ、普通の物質は（陽子と中性子というかたちで）アップとダウンクォークとそして電子からできていて、すべてが第1世代から選ばれている。なぜ「余分な」世代が二つあるのか、誰がそれらを必要とするのか、創造主の目的や効率に思いを巡らせても理解することはできない。奇妙な謎であり、証拠の類いはほとんどない。しかし、どうしてもなぜかを考えたくなる。実際には驚くべき答えがあるのだ。反物質に比べて圧倒的に物質が多いことを標準模型でもっともらしく説明できるのだが、それは（最低でも）3世代存在するときに限る。

もちろんこれは逆の質問をもたらす。なぜ世代は三つしかないのか。本当に、まだ発見されていないだけで（おそらく非常に重すぎて現存する加速器では生成することができないという理由で）別の世代が存在することはないのだろうか。1988年近くになるまでは[54]、4世代目、あるいはもしかすると5世代目すらをも予測するに足る理由があった。だが1年のうちにその可能性はSLACとCERNの実験によって打ち消された[55]。 $Z^0$ は、どんなクォーク-反クォーク対、あるいはレプトン-反レプトン対（ $e^- + e^+$ ,  $u + \bar{u}$ ,  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  など）にも崩壊できるという点から、（サダムがいうであろう）「すべての粒子の母」である。ただし、新たに生成される粒子は $Z^0$ 質量の半分以下でなければならない（さもないと、粒子対をつくるためのエネルギーが足りない）。そこで、 $Z^0$ の寿命を測定することによって、45 GeV/c<sup>2</sup>以下の粒子の数を実際数えることができるのだ。多くの粒子がいれば、 $Z^0$ の寿命は短くなる。ちょうど、多くの致命的な病気が存在すれば、われわれの寿命が短くなることが予想されるように。実験結果は、 $Z^0$ の寿命が3世代のときの予想と正確に一致していることを示した。もちろん、仮想上の第4世代に属するクォーク（と、ことによっては荷電レプトンも）が重すぎて、 $Z^0$ の寿命に影響を与えていないのかもしれない。だが、第4世代のニュートリノが突然45 GeV/c<sup>2</sup>を超えることは想像しがたい。いずれにせよ、実験が明白に示したのは「軽い」ニュートリノの数が $2.99 \pm 0.06$ ということである。

標準模型は30年間無傷で生き残っているが、当然、それで話が終わるわけではな

い、いくつもの未解決の重要な問題がある。たとえば、標準模型ではクォークやレプトンの質量をどのように計算予言するのかわからない\*19。標準模型にあるのは実験からの経験則に基づく数字だけだが、おそらく、完全にできあがった理論であれば、周期表上の原子のように、それらを説明できるはずだ\*20。後で見ていくように、標準模型は、小林-益川行列における三つの角度と一つの位相、レプトンのための同様のパラメーター、そして電弱混合の度合いを表すワインバーグ角を経験則的な入力パラメーターとしている。他にもすべてを数え上げると、標準模型には20以上の任意のパラメーターがあり、どう考えても「最終」理論であるとは受け入れがたい [56]。

実験の方に目を向けると、ニュートリノ振動 (11章) と  $CP$  対称性の破れ (12章) には測定すべき量が多いが、中でも最も目立って欠落しているのはヒッグス粒子だ。標準模型ではヒッグス粒子によって  $W$  と  $Z$  (そしておそらくは他の粒子) の質量が説明される。トップクォークのように、新たな実験が発見に失敗し、時間が経つにつれてヒッグスの質量予測値は増加してきた。現段階では、SSC 計画が中止されたため、現存する加速器ではおそらく到達不可能で、この厄介な粒子を見つけるのはLHCが最も有望である\*21。

一方で、理論的には標準模型を超えた憶測が数多くある (実験による直接的な確証はないが)。強い相互作用、電磁相互作用、そして弱い相互作用を結びつける大統一理論 (GUT) がある (12章)。これらは、少なくともあるかたちでは、実際上正統的であると広く受け入れられている。さらに理論家にとって非常に魅力的なのは「超対称性」(SUSY) というアイデアである。SUSYでは、あらゆるフェルミオンをボソンに、またあらゆるボソンをフェルミオンと対応づけることで粒子の数を倍増させる。それゆえ、「スレプトン」(「selectron」「sneutrino」など) がレプトンに合流し、「スクォーク」がクォークに合流し、力の媒介粒子たちは双子を獲得する (「photino」「gluino」「wino」「zino」)。クォークを構成する粒子、あるいは超対称性粒子が発見されれば、素粒子物理学が次の時代にやるべきメニューをすべて塗り替えてしまうほどの重大なニュースだ。しかし、いくつかのじれったい間違っただけの知らせを除いては [57]、どちらもいまのところまだ発見されていない。

そして、1984年以來、あらゆる世代の素粒子物理学の理論家の心をわしづかみにし

\*19 軽いクォーク質量には大きな不定性がある。ここでは、簡略化のために四捨五入している。

\*20 しかし、電子ニュートリノとトップクォークとの間の少なくとも  $10^{11}$  も離れた範囲をカバーしなければならぬということから、クォークとレプトンの質量の定式化が非常に奇妙であるということには留意せよ。

\*21 訳注：2012年に予想通り、あるいは期待通りに、LHCでヒッグス粒子が発見された。

ている超弦理論がある。超弦理論は、量子力学と一般相対性理論を統合し、場の量子論における発散という疫病を取り除くだけでなく、統一的な「万物の理論」をも与える。万物の理論では、(重力も含めて)あらゆる素粒子物理学が避けがたい結果として勝手に現れてくる。超弦理論は、確かに、光り輝き冒険に満ちた青年時代を楽しんだ。だが、それが贅<sup>ぜい</sup>沢な希望を満たしてくれるかどうかは未知数である。

## 参 考 書

- [1] 素粒子物理学の歴史については多くのよい議論がある。私のお気に入りには C. N. Yang の楽しい小さな本, *Elementary Particles* (Princeton University Press, 1961). より新しいものでは, (a) J. S. Trefil's: *From Atoms to Quarks* (Scribners, 1980); (b) F. E. Close's: *The Cosmic Onion* (Heinemann Educational Books, 1983). 初期についてよく書かれているのは, (c) A. Keller's: *The Infancy of Atomic Physics* (Oxford University Press, 1983); (d) S. Weinberg's: *Subatomic Particles* (Scientific American Library, 1983). 魅力的で巧みな説明については, (e) A. Pais: *Inward Bound* (Clarendon Press, 1986) を参照。包括的な参考文献は, (f) R. C. Hovis and H. Kragh: *American Journal of Physics*, **59**, 779 (1991).
- [2] この物語は, アインシュタインの伝記で A. Pais によって美しく語られている。Subtle is the Lord (Clarendon Press, 1982).
- [3] R. A. Millikan: *Physical Review*, **7**, 18 (1916). (a) A. Pais によるアインシュタインの伝記で引用されている。Subtle is the Lord (Clarendon Press, 1982).
- [4] ハイゼンベルクは, 水素分子イオン ( $H_2^+$ ) の類推で, 重水素は電子の交換によって互いに結びついていると, 初めに提案していた。湯川は, 電磁力やベータ崩壊の原因となる弱い力とは別の新しい力が関与することをあきらかに初めから理解していた。A. Pais: *Inward Bound* (Clarendon Press, 1986); (a) L. M. Brown and H. Rechenberg: *American Journal of Physics*, **56**, 982 (1988) を参照。
- [5] M. Conversi, E. Pancini and O. Piccioni: *Physical Review*, **71**, 209 (1947).
- [6] C. M. G. Lattes *et al.*: *Nature*, **159**, 694 (1947); *Nature*, **160**, 453, 486 (1947).
- [7] R. E. Marshak and H. A. Bethe: *Physical Review*, **72**, 506 (1947). 実際, 日本の物理学者も戦争中に同様の結論に至っていた。(a) A. Pais: *Inward Bound* (Clarendon Press, 1986) 453 を参照。
- [8] この発見の非公式の歴史については, C. D. Anderson: *American Journal of Physics*, **29**, 825 (1961) を参照。
- [9] O. Chamberlain *et al.*: *Physical Review*, **100**, 947 (1955); (a) B. Cork *et al.*: *Physical Review*, **104**, 1193 (1956). 以下の文献も参照せよ。(b) E. Segrè and C. E. Wiegand: *Scientific American*, 37 (June 1956). (c) G. Burbidge and F. Hoyle: 34 (April 1958). (d) H. Kragh: *American Journal of Physics*, **57**, 1034 (1989).
- [10] ニュートリノの歴史は魅力的な話である。たとえば, J. Bernstein: *The Elusive Neutrino* (University Press of the Pacific, 2004); (a) L. M. Brown: *Physics Today*, 23 (September 1978); (b) P. Morrison: *Scientific American*, 58 (January 1956). ニュートリノに関する広範かつ有用な参考文献は, (c) L. M. Lederman: *American Journal of Physics*, **38**, 129 (1970).
- [11] F. Reines and C. L. Cowan Jr.: *Physical Review*, **92**, 8301 (1953); (a) C. L. Cowan

- Jr. *et al.*: Science, **124**, 103 (1956). レイネは1995年にこの仕事でついにノーベル賞を受賞した(コーワンはすでに亡くなっていた).
- [12] R. Davis and D. S. Harmer: Bulletin of the American Physiological Society, **4**, 217 (1959). 以下も参照. (a) C. L. Cowan Jr. and F. Reines: Physical Review, **106**, 825 (1957).
- [13] E. J. Konopinski and H. M. Mahmoud: Physical Review, **92**, 1045 (1953).
- [14] B. Pontecorvo: Soviet Physics JETP, **37**, 1236 (1960); 以下より英訳された. Soviet Physics JETP, **37**, 1751 (1959); (a) T. D. Lee: Rochester Conference, New York (1960) p. 567.
- [15] G. Danby *et al.*: Physical Review Letters, **9**, 36 (1962). 以下も参照. (a) L. Lederman: Scientific American, 60 (March 1963).
- [16] L. M. Brown, M. Dresden and L. Hoddeson: Physics Today, 56 (November 1988).
- [17] G. D. Rochester and C. C. Butler: Nature, **160**, 855 (1947). 以下の G. D. Rochester の伝記も参照. (a) Y. Sekido and H. Elliot (eds): Early History of Cosmic Ray Studies (Reidel, 1985) 299.
- [18] シュテュッケルベルグ自身は「バリオン」という言葉は使わず, A. Pais: Progress in Theoretical Physics, **10**, 457 (1953) で導入された.
- [19] Les Prix Nobel 1955, The Nobel Foundation, Stockholm.
- [20] A. Pais: Physical Review, **86**, 663 (1952). 同じこと(多くの生成, ゆっくりとした崩壊)は, パイ中間子(そして, 中性子)にもいえるかもしれない. しかし, それらの崩壊はニュートリノをつくり出し, 人々はニュートリノの相互作用が弱いという考えに慣れていた. 新しかったことは, ニュートリノを含む反応を特徴づける純粋なハドロン崩壊であった. 歴史の詳細は下記を参照. (a) A. Pais: Inward Bound (Clarendon Press, 1986) 517; (b) L. M. Brown, M. Dresden and L. Hoddeson: Physics Today, 60 (November 1988).
- [21] M. Gell-Mann: Physical Review, **92**, 883 (1953); (a) Nuovo Cimento, **4** (Suppl. 2), 848 (1956) .
- [22] T. Nakano and K. Nishijima: Progress in Theoretical Physics, **10**, 581 (1953).
- [23] 元の論文は, M. Gell-Mann and Y. Ne'eman: The Eightfold Way (Benjamin, 1964).
- [24] 実際に, 1954年に宇宙線実験で観測された可能性がある. Y. Eisenberg: Physical Review, **96**, 541 (1954). しかし, 識別はあいまいである.
- [25] V. E. Barnes *et al.*: Physical Review Letters, **12**, 204 (1964); (a) M. Gell-Mann: Physical Review, **92**, 883 (1953). 以下も参照. (b) W. B. Fowler and N. P. Samios: Scientific American, 36 (October 1964).
- [26] クォークモデルに関する豊富な参考文献, および有用な解説は, O. W. Greenberg: American Journal of Physics, **50**, 1074 (1982). (ツヴァイクの未発表のものを含む) 古典的な論文の多くは, (a) D. B. Lichtenberg and S. P. Rosen (eds): Developments in the Quark Theory of Hadrons (Hadronic Press, 1980).
- [27] Y. Nambu: Scientific American, 48 (November 1976); (a) K. Johnson: Scientific American, 112 (July 1979); (b) C. Rebbi: Scientific American, 54 (February 1983).
- [28] H. W. Kendall and W. K. H. Panofsky: Scientific American, 61 (June 1971).
- [29] M. Jacob and P. Landshoff: Scientific American, 66 (March 1980).
- [30] O. W. Greenberg: Physical Review Letters, **13**, 598 (1964). グリーンベルグはこの言葉を使用しなかった. 用語を導入したのは (a) D. B. Lichtenberg: Unitary Symmetry and Elementary Particles (Academic Press, 1970). 以下も参照. (b) S. L. Glashow: Scientific American, 38 (October 1975).
- [31] 以下を参照. A. Pais: Inward Bound (Clarendon Press, 1986) 562, 602.

- [32] G. Trilling: Review of Particle Physics, 1019 (2006).
- [33] 現在の状況報告については以下を参照. G. Bauer: International Journal of Modern Physics, A **21**, 959 (2006); (a) E. S. Swanson: Physics Reports, **429**, 243 (2006).
- [34] 例外は J. Iliopoulos (1974) 1974 年夏にロンドンで開催された素粒子物理学国際会議で, イリオポロスは次のように語った: 「私は, 次の会議全体がチャーム粒子の発見によって占められることにすべてのワインを賭けてよい」.
- [35] J. J. Aubert *et al.*: Physical Review Letters, **33**, 1404 (1974); (a) J.-E. Augustin *et al.*: Physical Review Letters, **33**, 1406 (1974).
- [36] この資料の有用な参考文献, 主要な記事の再版は以下で与えられている. J. Rosner (ed): *New Physics* (the American Association of Physics Teachers, 1981). 11 月革命の興奮は, SLAC の出版物に書かれている. (a) Beam Line, **7** (11) (1976). 以下も参照. (b) S. D. Drell: Scientific American, 50 (June 1975), (c) S. L. Glashow and G. Trilling: RPP 2006, 1019 (2006).
- [37] B. J. Bjorken and S. L. Glashow: Physics Letters, **11**, 255 (1964). 1963 年と 1964 年には, 可能な 4 番目のクォークに関する多くの推測がなされた (A. Pais: Inward Bound (Clarendon Press, 1986) 601 を参照).
- [38] S. L. Glashow, J. Iliopoulos and L. Maiani: Physical Review, D **2**, 1285 (1970).
- [39] R. F. Schwitters: Scientific American, 56 (October 1977).
- [40] E. G. Cazzoli *et al.*: Physical Review Letters, **34**, 1125 (1975).
- [41] G. Goldhaber *et al.*: Physical Review Letters, **37**, 255 (1976); (a) I. Peruzzi: Physical Review Letters, **37**, 569 (1976).
- [42] R. Brandelik *et al.*: Physics Letters, B **70**, 132 (1977).
- [43] M. Perl *et al.*: Physical Review Letters, **35**, 1489 (1975). 以下も参照. (a) M. Perl and W. Kirk: Scientific American, 50 (March 1978); (b) M. Perl: Physics Today, 34 (October 1997). パールは  $\tau$  の発見で 1995 年にノーベル賞を受賞している.
- [44] S. W. Herb *et al.*: Physical Review Letters, **39**, 252 (1977). 以下も参照. (a) L. M. Lederman: Scientific American, 72 (October 1978). 5 番目のクォークの発見がいかに熱望されていたのかを示していて, ウプシロン発見のフライングにつながった. (b) (D. C. Hom *et al.*: Physical Review Letters, **36**, 1236 (1976) では, 実験グループの責任者であるレオン・レーダーマンの名前にちなんで) 「oops-Leon」としてよく知られる偽の粒子を発表してしまった.
- [45] S. Behrends *et al.*: Physical Review Letters, **50**, 881 (1983).
- [46] F. Abe *et al.*: Physical Review Letters, **74**, 2626 (1995); (a) S. Abachi *et al.*: Physical Review Letters, **74**, 2632 (1995). 以下も参照. (b) T. M. Liss and P. L. Tipton: Scientific American, 54 (September 1997).
- [47]  $W$  と  $Z$  の質量の式は, 初めに, S. Weinberg: Physical Review Letters, **19**, 1264 (1967) で与えられた. そのときには値がわからなかったパラメーター  $\theta_W$  を含み, ワインバーグは  $M_W \geq 37 \text{ GeV}/c^2$ ,  $M_Z \geq 75 \text{ GeV}/c^2$  であると確信していた. それから 15 年で,  $\theta_W$  はさまざまな実験で測定され, 1982 年までに式 (1.30) に示すように精密になった.
- [48] G. Arnison *et al.*: Physics Letters, B **122**, 103 (1983).
- [49] G. Arnison *et al.*: Physics Letters, B **126**, 398 (1983).
- [50] D. B. Cline and C. Rubbia: Physics Today, 44 (August 1980); (a) D. B. Cline, C. Rubbia and S. van der Meer: Scientific American, 48 (March 1982). 1984 年にルビアとファンデルメールはこの業績でノーベル賞を受賞した. 以下も参照. (b) C. Sutton: The Particle Connection (Simon & Schuster, 1984); (c) P. Watkins: Story of the  $W$  and  $Z$  (Cambridge University Press, 1986).
- [51] M. Jacob and P. Landshoff: Scientific American, 66 (March 1980).

- [52] K. Ishikawa: Scientific American, 142 (November 1982); (a) J. Sexton, A. Vaccarino and D. Weingarten: Physical Review Letters, **75**, 4563 (1995).
- [53] たとえば, 以下のレビューを参照. H. Terezawa: XXII International Conference on High-Energy Physics, vol. **I**, Leipzig, 63 (1984); (a) H. Harari: Scientific American, 56 (April 1983).
- [54] D. B. Cline: Scientific American, 60 (August 1988).
- [55] G. S. Abrams *et al.*: Physical Review Letters, **63**, 2173 (1989). 以下も参照. (a) G. J. Feldman and J. Steinberger: Scientific American, 70 (February 1991).
- [56] 楽しい議論のために参照すべきは R. N. Cahn: Reviews of Modern Physics, **68**, 951 (1996).
- [57] サブクォークの検索については, 以下を参照. F. Abe *et al.*: Physical Review Letters, **77**, 5336 (1996). ミュー粒子の異常磁気モーメントの測定で消えてしまった超対称性については, (a) B. Schwarzschild: Physics Today, 18 (February 2002).
- [58] 明るいセミポピュラーな読み物については B. Greene: The Elegant Universe (W. W. Norton, 1999). 理論の入門書については, (a) B. Zwiebach: A First Course in String Theory (Cambridge University Press, 2004). 厳しい批判に対しては, (b) L. Smolin: The Trouble with Physics (Houghton Mifflin, 2006); (c) P. Woit: Not Even Wrong (Perseus, 2006).

## 問題

- 1.1 交差する電場  $\mathbf{E}$  と磁場  $\mathbf{B}$  の中を, 荷電粒子がまっすぐ通過する場合の速度を求めよ (なお, 電場・磁場・速度はそれぞれ直交している). また, 電場をなくした場合に, 粒子が半径  $R$  の軌道を動くとき, 電荷と質量の比を求めよ.
- 1.2 湯川中間子の質量は次のように類推することができる. 原子核内の二つの陽子が中間子 (質量  $m$ ) を交換するとき, 一時的に  $mc^2$  (中間子の静止エネルギー) 分だけエネルギー保存則を破る. ハイゼンベルクの不確定性原理  $\Delta E \Delta t = \hbar/2$  ( $\hbar \equiv h/2\pi$ ) から, 時間  $\Delta t$  の間にエネルギー  $\Delta E$  だけを借りることができる. この場合, 中間子が一つの陽子からもう一つの陽子に到達できるだけの時間  $\Delta E = mc^2$  を借りる必要がある. その距離は核の大きさ  $r_0$  であり, 実質光の速さで交換されるとすると交換に必要な時間はだいたい  $\Delta t = r_0/c$  となる. まとめると質量は

$$m = \frac{\hbar}{2r_0c}$$

である. 一般的な核の大きさ  $r_0 = 10^{-13}$  cm を用いて湯川中間子の質量を計算せよ. この答えを  $\text{MeV}/c^2$  を単位として示し, パイ中間子の質量と比較せよ. [コメント: もし, この議論を魅力的であると思ったら, あなたは少しだまされやすいといわざるを得ない. 原子でこれを試した場合, 光子の質量がおおよそ  $7 \times 10^{-13}$  g となるが, これはナンセンスだ. それにもかかわらず, これは大雑把な計算として有効な道具であり, パイ中間子にとてもよく当てはまる. 残念ながら, 多くの本でこれがあたかも厳密な導出であるかのように示されているが, それはあくらかに違う. 不確定性原理は, エネルギー保存の破れを認可しているのではない (このような破れは, この過程では起こらない. これがどのように起こるかは後々見ていくことになる). さらに, 不等式  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$  は, せいぜい  $m$  の下限を与えることしかできない. おおむね, 力の到達範囲は, 仲介粒子の質量に反比例するが, 束縛状態の大きさは, 必ずしもその到達範囲ではない (これが光子についての議論が失敗する理由である. つまり, 電磁気力の範囲は無限だが, 原子のサイズは無限大ではない). 一般に, 物理学者が不確定性原理を引き合いに出す場合, だまされないように注意が必要だ.]

- 1.3 中性子発見以前は、多くの人が原子核は陽子と電子によって構成されていると考え、原子番号は過剰な陽子の数に等しいとされていた。ベータ崩壊は核の内部に、電子が存在していることをほめかし、このアイデアを支持しているようだった。もしそうだとした場合、位置と運動量の不確定性関係  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$  を用いて、核（半径  $10^{-13}$  cm）の中に閉じ込められた電子の運動量の下限を推定せよ。相対論的なエネルギーと運動量の関係  $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$  から対応するエネルギーを決定し、図 1.5 のトリチウムのベータ崩壊による電子放出と比較せよ（この結果によって、ベータ崩壊の電子は、核中にずっととどまるわけではなく、ベータ崩壊によってつくられることを確信できる）。
- 1.4 ゲルマン-大久保の質量公式は、バリオン八重項の質量の関係である（ただし  $p$  と  $n$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$  と  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^0$  と  $\Xi^-$  の小さい質量差を無視する）。式

$$2(m_N + m_\Xi) = 3m_\Lambda + m_\Sigma$$

と既知の核子  $N$  ( $N$  の質量は  $p$  と  $n$  の平均を用いる)、 $\Sigma$  (同様に平均)、 $\Xi$  (同様に平均) の質量から  $\Lambda$  の質量を予言することができる。どれほど観測値と近いだろうか。

- 1.5 同じ式を中間子にも適応できる ( $\Sigma \rightarrow \pi$ ,  $\Lambda \rightarrow \eta$  など)、しかしこの場合は、謎の理由のために、質量の 2 乗を用いることになる。ここから  $\eta$  の質量を予想せよ。また、これは、どれほど観測値と近いだろうか。
- 1.6 十重項の質量式はずっと簡単である。つまり、並びが等間隔になる。

$$m_\Delta - m_\Sigma^* = m_\Sigma^* - m_\Xi^* = m_\Xi^* - m_\Omega$$

ゲルマンがしたように、この公式を用いることで、 $\Omega^-$  の質量を予言できる。（最初の二つの間隔の平均を用いて 3 番目を推定する）この予想は、どれだけ観測値に近いだろうか。

- 1.7 (a) バリオン十重項の粒子は、一般的に  $10^{-23}$  秒後に、より軽いバリオン（バリオン八重項の粒子）と中間子（擬スカラー中間子八重項）に崩壊する。たとえば  $\Delta^{++} \rightarrow p^+ + \pi^+$  である。 $\Delta^-$ ,  $\Sigma^{*+}$ ,  $\Xi^{*-}$  の崩壊モードを列挙せよ。ただし、電荷とストレンジネスが保存されることに気をつけること（それらは強い相互作用である）。
- (b) いずれの崩壊も、崩壊生成物の質量に足るだけの十分な質量が崩壊元の粒子に存在しなければならない（余分な質量は生成粒子の運動エネルギーとして使われる）。(a) での各崩壊を確認して、どの崩壊モードがこの基準を満たしているか確認すること。他は運動学的に禁じられている。
- 1.8 (a)  $\Omega^-$  の可能な崩壊モードについて、問題 1.7 の  $\Delta$ ,  $\Sigma^*$ ,  $\Xi^*$  と同様に解析すること。ゲルマンはこの解析から  $\Omega^-$  を準安定（他のバリオン十重項の粒子と比べてとても寿命が長い）と予想した（実際には  $\Omega^-$  はストレンジネスを保存しないはるかにゆっくりとした弱い相互作用によって崩壊する）。
- (b) 泡箱写真（図 1.9）から  $\Omega^-$  の軌跡の長さを測り、 $\Omega^-$  の寿命を推定せよ（もちろん、 $\Omega^-$  の速度はわからないが、光の速度よりは遅いとはできる。ここでは仮に  $0.1c$  とおく。また、複製がスケールを拡大または縮小しているのかどうかはわからないが気にしない。これは、2, 5, 10 倍の係数にこだわっているだけだ。重要な点は、十重項の他のすべてのメンバーを特徴づける  $10^{-23}$  秒の寿命よりも桁違いに長寿命なことである）。
- 1.9 コールマン-グラシヨウの関係式 [Phys. Rev. B **134**, 671 (1964)] を確認せよ

$$\Sigma^+ - \Sigma^- = p - n + \Xi^0 - \Xi^-$$

（粒子の名前はそれぞれの質量を示す）。

- 1.10 Modern Physics, **35**, 314 のレビュー, M. Roos (1963) の「既知の」中間子としてまとめられた表を見て、現在の Particle Physics Booklet と比較して、1963 年の中間子のどれが長年の

試験に耐えたのかを調べよ（一部の名前は変更されているため、質量、電荷、ストレンジネスなどの他の特徴から調べる必要がある）。

- 1.11 問題 1.10 で特定した偽の粒子の中で、エキゾチック（クォーク模型と一致しないもの）はどれか。また、生き残った中間子のうち何個がエキゾチックであるか。
- 1.12 1, 2, 3, 4, 5, 6 個の異なるクォークフレーバーを用いてどれだけの中間子の組をつくることができるだろうか。また、 $n$  種類のフレーバーを使う一般的な場合どうなるか。
- 1.13 1, 2, 3, 4, 5, 6 個の異なるクォークフレーバーを用いてどれだけのバリオンの組をつくることができるだろうか。また、 $n$  フレーバーの一般的な場合はどうか。
- 1.14 四つのクォーク（アップ  $u$ 、ダウン  $d$ 、ストレンジ  $s$ 、チャーム  $c$ ）でつくられるバリオンの種類をすべて示せ。また、チャームが +1 の組み合わせ、+2, +3 の組み合わせはいくつ存在するだろうか。
- 1.15 問題 1.14 を今度は中間子の場合で考えること。
- 1.16 トップクォークが十分に寿命が短く、「本当の」中間子やバリオンとしての結合状態をつくらなると仮定する。15 の中間子の組み合わせ  $q\bar{q}$ （ただし、反粒子は数えない）、そして、35 のバリオンの組み合わせ  $qqq$  を列挙せよ。また、Particle Physics Booklet や、その他の資料等を用いて、列挙した粒子のどれが実験的に発見されているか示せ。たとえば、一つのバリオンは

$$sss : \Omega^-, \quad 1672 \text{ MeV}/c^2, \quad 1964.$$

となる。すべてのハドロンはおそらく、列挙した 50 種のクォークの組み合わせのさまざまな励起状態から構成される。

- 1.17 A. De Rujula, H. Georgi, and S. L. Glashow [Physical Review, D **12**, 147 (1975)] は構成クォーク質量\*22とよばれるものを推定した。  $m_u = m_d = 336 \text{ MeV}/c^2$ ,  $m_s = 540 \text{ MeV}/c^2$ ,  $m_c = 1500 \text{ MeV}/c^2$ （ボトムクォークはおよそ  $4500 \text{ MeV}/c^2$ ）。もしこれが正しければバリオン八重項の平均的な結合エネルギーは  $-62 \text{ MeV}$  である、仮にこれが正しかったとしたら、バリオン八重項の質量はどうなるか。実際の数値と比較し、相対誤差 (%) を求めよ。（しかし、これを他の多重項で試してはいけない。結合エネルギーが多重項に属するすべての粒子にとって同じであると仮定する根拠がない。ハドロン質量の問題は厄介な問題であり、5 章でそれを取り上げる）。
- 1.18 M. Shupe [Physics Letters, B **86**, 87 (1979)] は、すべてのクォークとレプトンはより根源的な二つの成分  $c$ （電荷  $-1/3$ ）と  $n$ （電荷 0）、そして、それらの反粒子  $\bar{c}$  と  $\bar{n}$  でつくられていると提案した。（たとえば、 $ccn$ ,  $\bar{n}\bar{n}\bar{n}$  のように）三つの粒子、もしくは三つの反粒子を組み合わせてよい。このようにして、第 1 世代の八つのクォークとレプトンを組み立てよ（他の世代は励起状態であるとみなす）。また、クォークには三つの状態が許されることがわかる（たとえば、 $ccn$ ,  $cnc$ ,  $ncc$  の 3 通り）。これは三つの色に対応している。仲介する粒子は、三つの粒子と三つの反粒子から構成される。  $W^\pm$ ,  $Z^0$  と  $\gamma$  は三つの粒子と三つの反粒子を含む（たとえば、 $W^- = cc\bar{n}\bar{n}\bar{n}$ ）。  $W^+$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  についても、同様に組み立てよ。グルーオンは混じった状態（たとえば、 $cc\bar{n}\bar{c}\bar{n}$ ）である。全部で何種類の可能性があるだろうか。これをどのようにしたら 8 種類に減らすことができるだろうか。
- 1.19 あなたのルームメイトは化学を専攻している。彼女は、陽子、中性子、電子のすべてについて知っていて、毎日それらの振る舞いを研究室で見ている。しかし、陽電子、ミュー粒子、ニュートリノ、パイ中間子、クォーク、そして仲介役ベクトルボソンについて話をしたら、彼女は懐疑的だ。なぜこれらが化学では直接的な役割が一切ないのか説明せよ（たとえば、ミュー粒子の場合、合理的な答えは「不安定で 100 万分の 1 秒も経たずに崩壊するから」かもしれない）。

\*22 当然のことながら、ハドロン内部に結合されたクォークの有効質量は、「自由な」クォークの「裸の」質量と同じではない。