

## 2

# 素粒子の運動学

本章では、素粒子が相互作用するための基本的な力と、その力を記述するのに使う「ファインマン則」を紹介する。ここでの取り扱いは完全に定性的で、そこにある概念を素早く読み取ることができるはずだ。定量的な詳細は6章から9章で議論する。

### 2.1 四つの力

われわれが知り得る限り、自然界には基本的な力はたった四つしか存在しない。強い力、電磁気力、弱い力、重力である。以下の表に、それらを力の強い順にまとめる\*1。これらの力それぞれに物理の理論がある。重力の古典理論は、もちろん、ニュートンの万有引力の法則である。その相対論的一般化がアインシュタインの一般相対性理論である（「幾何力学」がもっとよい言葉であろう）。完全に満足のいく重力の量子化理論はまだできあがっていない。とりあえず現在は、たいていの人が、重力は素粒子物理に影響を与えるにはたんに弱すぎると仮定している。電磁気力を記述する物理の理論は電気力学とよばれている。それは100年以上前のマクスウェルの古典的定式化に由来している。マクスウェルの理論はすでに特殊相対論との整合性をもっている（実際には、マクスウェルの理論が特殊相対論というアイデアの源であった）。量子電気力学は、朝永、ファインマン、シュウィンガーによって1940年代に完成された。原子核のベータ崩壊（そしてまた、後に見ていくように、パイ中間子、ミュー粒子、そして

力	強さ	理論	媒介粒子
強い力	10	色力学	グルーオン
電磁気力	$10^{-2}$	電気力学	光子
弱い力	$10^{-13}$	フレーバー力学	$W$ と $Z$
重力	$10^{-42}$	幾何力学	グラビトン

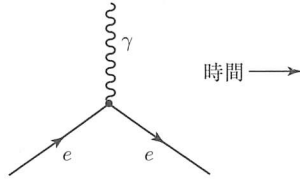
\*1 力の「強さ」というのは本来あいまいな概念である。結局のところ、力の源の性質と、どれくらい離れているかに依存する。なので、この表の数字を文字通り受け取るべきではないし、（とくに弱い力の場合には）いろいろなところでまったく違った数字が引用されている。

多くのストレンジ粒子の崩壊)をつかさどる弱い力は、古典力学にとっては未知なるものだった。それらを理論的に記述するためには、当初から、相対論的量子論による定式化が必要であった。弱い力の最初の理論は、1933年にフェルミによって発表された。それが、1950年代に、リーとヤン、ファインマンとゲルマン、そしてさらに多くの人々によって洗練され、1960年代に、グラシヨー、ワインバーグ、サラムによって現在のかたちにとまとめられた。後にあきらかになる理由によって、弱い相互作用の理論はフレーバーの力学とよばれることがある [1]。本書では、たんにグラシヨー-ワインバーグ-サラム (GWS) 理論とよぶことにする (GWS 模型は、弱い相互作用と電磁相互作用を一つの電弱力の違った現れ方として取り扱う。その意味では、四つの力が三つになった)。強い力については、1934年の湯川による先駆的な仕事の先は、1970年代に色力学が出現するまで、本当に何の理論もなかった。

これらの力それぞれは、粒子の交換によって発生する。重力はグラビトンによって、電磁気力は光子によって、強い力はグルーオンによって、そして弱い力は力を媒介するベクトルボソンである  $W$  と  $Z$  によって、誘起される。これらの力を媒介する粒子たちは、クォークあるいはレプトンと別の粒子の間に働く力を伝達する。原理的には、野球のバットとボールの衝突による力は、一方のクォークとレプトンともう一方のクォークとレプトンとの相互作用の足し合わせに他ならない。より端的にいうと、たとえば、湯川が、本質的でそれ以上簡素化することができないと考えた、二つの陽子の間に働く強い力は、6個のクォークの複雑な相互作用だとみなさなければならない。この描像ではまったくもって簡略化を目指していない。むしろ、真に素である粒子同士の力の解析から始めるべきだ。この章では、力が個々のクォークやレプトンにどのように作用するのかを定性的に示していく。後に続く章で、理論を定量化するために必要な道具立てをつくっていく。

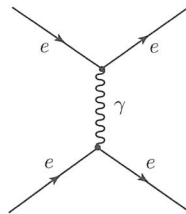
## 2.2 量子電気力学 (QED)

量子電気力学 (Quantum Electrodynamics, QED) は、最も古く、最も単純明快で、そして、最も成功した、力学に関する理論である。他の理論は、意識的に QED を真似てつくられた。そこで、まずは QED に関する記述から始める。あらゆる電磁気的現象は、究極的には次の基本過程に行き着く。



これから出てくるこのような図では、時間は水平方向に右に進む。そこで、この図は以下のように読む。荷電粒子  $e$  がやってきて、光子を放出（あるいは吸収）して、そして出ていく。説明のために、荷電粒子は電子であると仮定するが、それはクォークでもよいし、ニュートリノでなければどんなレプトンでもよい（ニュートリノは中性であるから、当然、電磁気力を受けない）。

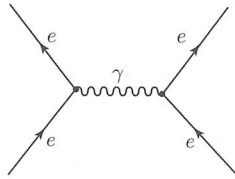
より複雑な過程を記述するためには、たんに、二つ以上のこの基本的なバーテックス\*2を組み合わせる。自由自在に組み合わせることのできる、プラスチックでできた、基本バーテックスという組み合わせブロックがいっぱいに詰まったバッグを持っていると想像してほしい。そして、光子と光子、あるいは電子と電子のように（ただし、後者の場合、電子の矢印の向きを保ったままにしなければならない）、それらをばちんとつなぎ合わせられる。たとえば、以下の図を考えてみよう。



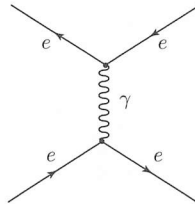
ここでは、二つの電子がやってきて、それらの間で光子を受け渡し（どちらが光子を放出し、どちらが光子を吸収しているのかをいう必要はない。というのは、この図はどちらの順番も表現しているのだから）、そして電子二つが出ていく。つまり、この図は、二つの電子間の相互作用を表している。古典論では、それを同符号電荷の斥力とよぶ。QED ではこの過程をメラー散乱とよび、いま見たように、この相互作用は「光子の交換により誘起された」という。

このような「ファインマン図」をどのような配位にひねってもよい。たとえば、前

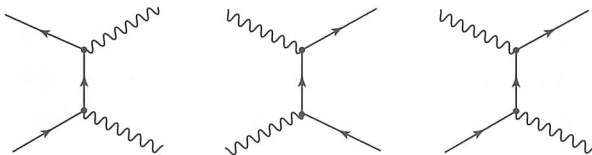
\*2 訳注：ある粒子が力を媒介する粒子によって相互作用している様子を示す図、あるいは相互作用している時空上の点をバーテックスとよぶ。



の図を横倒しにしてもよい。「時間を逆行する」向きに走っている粒子（左を向いている矢印）は、順行している粒子の反粒子だと解釈する（光子の反粒子は光子自身であるため光子の線には矢印が必要ななかった）。この過程では、電子と陽電子\*<sup>3</sup>が対消滅して光子となり、その後、新しい電子-陽電子対を生成する。電子と陽電子がやってきて、電子と陽電子が出ていく（同じ粒子ではない。だが結局のところ電子を区別することはできないので、問題にはならない）。これは、二つの異符号をもつ電荷の相互作用、つまりクーロン引力を表している。QEDでは、この過程はバーバー散乱とよばれている。実際には、バーバー散乱を記述するまったく異なる図もある。後にわかるが、どちらの図も計算に含めなければならない。



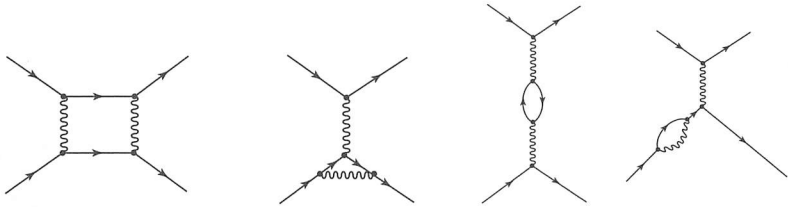
二つのバーテックスを使うだけで、以下のように、それぞれ対消滅  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ 、対生成  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$ 、コンプトン散乱  $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$  を表す図を組み立てることができる。ここに示した三つの過程と同様に、バーバーとメラエ散乱は、交差対



\*<sup>3</sup> この図の左上と右下の線に、反粒子であることを喚起するために  $\bar{e}$  と書く人もいる。それは危険な慣習だと思う。矢印がすでに反粒子であることを示していて、ルール通りに解釈すると、時間を逆行する反粒子、つまり、粒子であることを意味してしまう。すべての線に粒子のラベルを付けて、それが実際に反粒子であるかどうかは矢印の向きに任せるという方針にしたい。

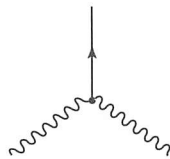


称性で関連づけられることを意識してほしい。ファインマン図の約束では、交差対称性は、図をひねるか回転することに対応している。たくさんのバーテックスがある場合（バッグの中からさらにいくつかの組み合わせブロックを引っ張り出すように）、可能な組み合わせが急速に増える。たとえば、四つのバーテックスがあると、以下の図が可能になる。

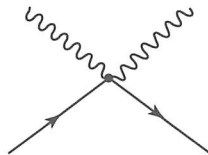


これらの図では、二つの電子が入ってきて、二つの電子が出ていく。それらも同符号電荷の斥力（メラー散乱）を表している。観測されたものを見ている限り、図の「内部」は無視してよい。内線（図の中で始まり終わっているもの）は、観測されない粒子を表現している。確かに、これらは、物理過程を完全に変えない限り観測されない。これらを仮想粒子とよぶ。外線（図に入って、そして出ていくもの）だけが、「実」（観測できる）粒子を表しているのだ。ということで、外線はどのような物理過程が発生したのかを表して、内線はそれに含まれているメカニズムを表している。

完全に定性的なレベルで、子供じみた単純なゲームではあるが、ルールをうっかり破ってしまう重大な危険が潜んでいる。たとえば、このような



あるいは、このような



バーテックスを含むか、あるいは、光子の線を電子の線につなげてしまったバーテックス



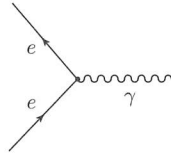
をファインマン図の中に見つけたとしたら、その図は間違っている。バッグの中にはそういう組み合わせブロックは入っていないし、光子を電子にくっつけようとしたときはつながらない。その図はもしかしたら何らかの相互作用を記述しているのかもしれないが、電気力学ではない。

ファインマン図は純粹に記号であり、(たとえば、泡箱の写真の中に見ることのできる) 粒子の飛跡を表しているわけではない。横軸は時間の次元だが、縦の間隔は物理的な距離に対応しているわけではない。たとえば、パーバー散乱では電子と陽電子は引き合っていて、(分岐している線が示しているように見えるかもしれない) 反発はしていない。図が示すのは「もし電子と陽電子がいると、それらは光子を交換し、そしてもう一度電子と陽電子になる」ということだけである。

定量的には、各ファインマン図がいわゆるファインマン則を使い計算されるある特定の数になっている(その方法については6章で学ぶ)。何らかの物理過程(たとえばメラウ散乱)を解析したいときは、まず最初に、適切な外線をもつすべての図(バーテックスを二つもつもの、四つもつものなど)を描き、そして次にファインマン則を使い、それぞれの図からの寄与を評価し、そして最後に足し上げる。ある外線が与えられたときのすべてのファインマン図を足し上げた和が実際の物理過程を表現している。ここには、もちろん、ちっぽけな問題がある。どのような粒子の反応過程にも無数のファインマン図が存在してしまうのだ! 幸運なことに、図中の各バーテックスで、微細構造定数  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$  が掛かる。これは非常に小さいので、バーテックスの数が増えれば増えるほど、最終結果に対する寄与はより小さくなり、必要な精度によるが、無視してよくなる。実際のところ、QEDの計算では、四つ以上のバーテックスをもつ図を含んだ計算をすることはまれである。答えは近似にすぎないが、その近似が6桁まで正しければ、よっぽど気難しい人以外は文句をいわないだろう。

ファインマン則は、それぞれのバーテックスでエネルギーと運動量の保存を強いる。よって、図全体でもエネルギーと運動量は保存する。これは、基本的なQEDのバーテックスそれ自体は実現可能な物理過程を記述しないということを意味する。図を描くことはできるが、計算によると寄与がゼロになってしまう。これは純粹に運動学が理由である。 $e^- \rightarrow e^- + \gamma$  はエネルギー保存則を破ってしまう(重心系で、初期状態

の電子は静止しているのでそのエネルギーは  $mc^2$  である。この電子は、光子と反跳する電子に崩壊できない。というのも後者だけでも  $mc^2$  より大きいエネルギーが必要になるからだ)。同様に、たとえば、 $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$  も図を描くのは容易だが、運動学的に不可能である。



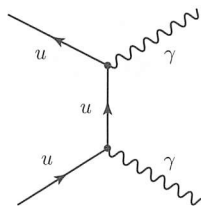
重心系では、電子と陽電子は対称的に向きが反対で同じ速さをもっているので、衝突前における運動量の合計はあきらかにゼロである。しかし、光子はつねに光速で飛ぶので、終状態の運動量はゼロになり得ない。電子-陽電子対は対消滅して二つの光子をつくれるが、一つの光子はつくれぬ。けれども、もっと大きな図の中だったとしたら、これらの図も容認できる。というのは、それぞれのパーテックスでエネルギーと運動量は保存しなければならないが、仮想粒子は、それに対応する自由粒子の質量を必ずしももつわけではないからだ。実際、仮想粒子はいかなる質量をももち得る\*4。専門用語を使うと、仮想粒子は質量殻に乗っていないという。対照的に、外線は実粒子を表しているので「正しい」質量を運んでいる\*5。

いまここで問題にしている荷電粒子は電子だと仮定しているが\*6、それはミュー粒子でもよいし、あるいは、クォークでもよい。次の図では何が起きているだろうか。

\*4 特殊相対論では、エネルギー  $E$ 、運動量  $\mathbf{p}$ 、質量  $m$  をもつ自由粒子は  $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$  の関係をもたなければならない。しかし、仮想粒子では、 $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$  がいかなる値をもってもよい。多くの研究者が、これを仮想粒子はエネルギー保存則を破っていると解釈している (問題 1.2)。個人的には、これは誤解を生むと思う。最低でも、エネルギーはつねに保存している。

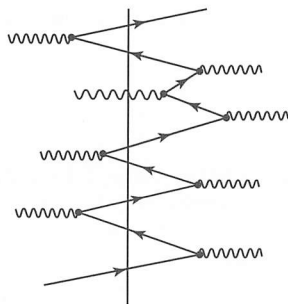
\*5 実際には、実粒子と仮想粒子の区別は、思ったほどははっきりしていない。もしケンタウルス座  $\alpha$  星で光子が放出されて目で吸収されたとすると、厳密にはそれは仮想光子だと私は考える。ところが、一般に、質量殻から離れば離れるほどその寿命は短くなるので、はるか彼方の星から飛んで来た光子は「正しい」質量にきわめて近い。それはほとんど「実」粒子なのだ。計算上の問題としては、その過程を二つの別々の事象 (星で実光子が放出され、その実光子が目で吸収されたとする) として取り扱っても本質的に結果は変わらない。実粒子は、どのように生成されたのか、どのように吸収されたのかを気にすることがないくらい長生きした仮想粒子だと思えばよい。

\*6 実際、「量子電気力学」という用語は、指定されない限り通常は、電子、陽電子、光子の相互作用を意味するのだと受け取られている。



ここでは、 $u$  と  $\bar{u}$  クォーク対が消滅し、二つの光子を生成している（一つの光子は運動学的に許されないことを思い出そう）。クォークの閉じ込めのため、散乱実験によりこれを観測することはできないが、二つのクォークが中間子、たとえば、 $\pi^0$  として一緒になっていたとしたらどうだろう。この図は  $\pi^0$  の  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  という「崩壊」を表現していることになる。ここではあえて「 $\pi^0$ 」を入れた。なぜなら、よく考えると、これは崩壊ではまったくない。たんにこれまで見てきた対消滅で、元々存在していた対がたまたま中間子として束縛状態だったのだ。そのため、 $\pi^0$  は電荷をもつ仲間 ( $\pi^\pm$ ) よりも9桁も短い寿命をもつ。 $\pi^0$  は電磁相互作用によって崩壊し、もう一方は、とてもゆっくりした過程である弱い相互作用が起きるのを待たなければならない。

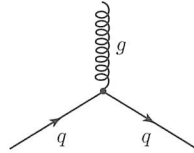
非常に面白い<sup>ぐうわ</sup>寓話をいいたくてたまらないが、読者のみなさんはこれをあまり真剣に受け取ってはいけない。ファインマンは、彼の指導者（J・A・ホイーラー）が、あるとき、すべての電子の同一性を説明しようとしたことがあったといい出した。電子は、このような図の上に乗っているとす。



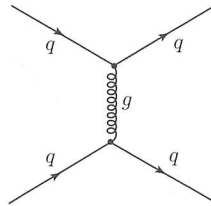
ある瞬間に（縦線）、電子は粒子として4回存在し（この線の上で）、反粒子としては3回存在する。しかし、それはすべて同じ電子だ。もちろん、これは宇宙に存在する陽電子の数が電子の数と同じ（プラスマイナス1）であるべしということを意味している。この点を除けば、ある意味非常にうまい説明だ。

## 2.3 量子色力学 (QCD)

色力学では、色が電荷の役割を果たし、基本的な過程は ( $e \rightarrow e + \gamma$  との類推で) クォーク  $\rightarrow$  クォーク + グルーオン ( $q \rightarrow q + g$ ) である\*7.



前と同様に、そのような「原始的なバーテックス」を二つ以上組み合わせることでより複雑な過程を表現する。たとえば、(第一義的にはクォークを束縛しハドロンをつくり、そして間接的には中性子と陽子を固めて原子核をつくる) 二つのクォーク間の力は、最低次では以下になる。

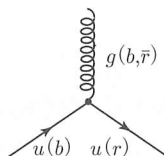


二つのクォーク間の力はグルーオンの交換により「媒介」される。

この時点では、色力学は電気力学と非常に似ている。しかし、重要な違いもある。最も大きな違いは、電荷は1種類しかない(念押しすると、電荷は正と負になり得るが、粒子の電荷量を特徴づける数は一つしかない)が、色には、3種類(赤、緑、青)あるという事実だ。

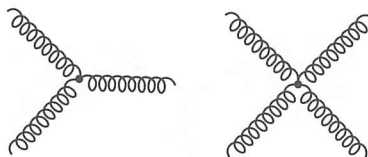
基本的な過程  $q \rightarrow q + g$  では、クォークの色は変わる(が、フレーバーは変わらない)。たとえば、青の  $u$  が赤の  $u$  クォークに変換する。(電荷のように)色荷はいつも保存しないといけなないので、その差(この例だとプラス1の青荷、マイナス1の赤荷)をグルーオンがもち逃げしなければならない。

\*7 レプトンはカラーをもたないので強い相互作用には寄与しない。



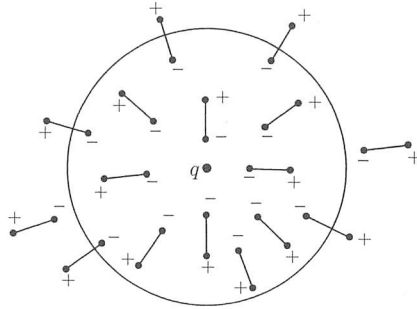
ということは、グルーオンは、プラス1とマイナス1の2色をもっている。3色×3色で9通りの可能性があることがあきらかなので、グルーオンは9種類だと思うかもしれない。しかし、8章で見るように、計算上の理由から実際には8種類しかない。

グルーオン自身が色をもつことから（これは光子とは違う、光子は電気的に中性である）、グルーオンは直接他のグルーオンと結合し、よって、基本的なクォークグルーオンバーテックスに加えて、元となるグルーオングルーオンバーテックスも存在する。実際には、三つのグルーオンが結合する場合と、四つのグルーオンが結合する場合の2種類がある。



グルーオン同士が直接結合することが、色力学を電気力学よりもはるかに複雑なものとしている。しかし、より豊かな物理現象、たとえば、グルーボール（クォークなしに相互作用しているグルーオンが束縛されている状態）の可能性を与える。

色力学と電気力学のもう一つの違いは、結合定数の大きさだ。QEDではバーテックスごとに $\alpha = 1/137$ という因子が掛かり、これが小さいため、バーテックスの数の少ないファインマン図だけを考えればよい。実験的に、それに対応する強い力の結合定数 $\alpha_s$ は（たとえば二つの陽子の間の力から決められるのだが）、1より大きく、その大きさが何十年もの間、素粒子物理学を悩ませてきた。複雑な図の寄与は、小さくなるのではなく、どんどん大きくなってしまい、QEDのとき非常にうまくいったファインマンのやり方ではあきらかに破綻してしまう。量子色力学（Quantum Chromodynamics, QCD）の最も輝かしい成功の一つは、この理論の中で結合「定数」の役割を果たす数を実際のところまったく一定ではなく、相互作用している粒子の間の距離に依存していることを発見したことだ（これを「走る」結合定数とよぶ）。相対的に距離の大きい原子核物理ではその値は大きい（陽子の大きさよりも小さいくらいの）非常に短

図 2.1 誘電体中の電荷  $q$  による遮蔽

い距離では、その値はきわめて小さくなる。この現象は漸近的自由として知られている [2]。つまり、たとえば陽子やパイ中間子の中では、クォークはあまり相互作用をせずにがらがら回っている。まさしくそういう振る舞いが深非弾性散乱で実験的に見つかった。理論的な見地からは、漸近的自由の発見により、ファインマンの計算方法が高エネルギー領域での QCD の計算手法の正統としての地位を確立した。

電気力学においてさえも、実効的な結合の強さは力の源からどれくらい離れているかによって変わる。これは、定性的には以下のように理解できる。まず、正の点電荷  $q$  が誘電体の媒質に埋め込まれているもの（つまり、電場の存在により偏極した分子をもつ物質）を想像してみよう。図 2.1 のように、分子でできた双極子の負の端は  $q$  に引きつけられるし、正の端は反発する。その結果、粒子は、元々の電場を打ち消すような負電荷の「ハロー」を獲得する。ということで、誘電体の存在により、あらゆる粒子の実効的電荷が多少なりとも小さくなる

$$q_{\text{eff}} = q/\epsilon \quad (2.1)$$

(場がどれくらい弱められるかという因子  $\epsilon$  は物質中の誘電率とよばれ、物質を簡単に偏極させられるかどうかの指標となっている [3])。もちろん、最も近い分子よりもさらに近づけば、そのような遮蔽効果はなくなり、全電荷である  $q$  を「見る」ことになる。よって、距離の関数として実効電荷の大きさを示すグラフを描くと図 2.2 のようになる。実効電荷は超短距離で増加する。

さて、量子電気力学では真空そのものが誘電体のように振る舞うことがある。これらのファインマン図に示されているように、陽電子-電子対を芽吹かせる。

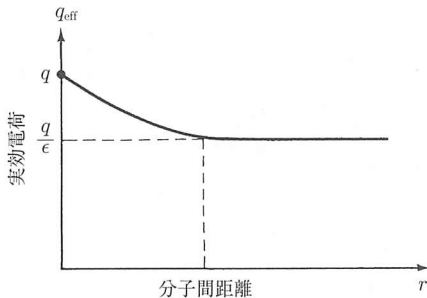
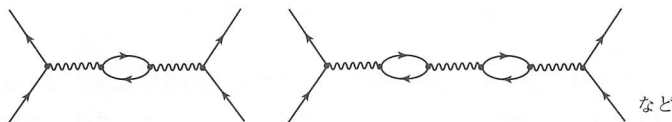
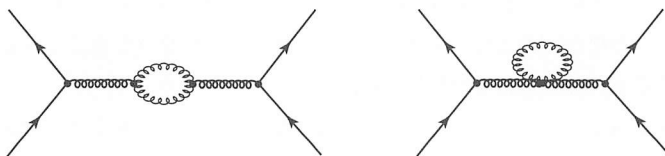


図 2.2 有効電荷の距離に対する依存性



「泡」のそれぞれのの中の仮想電子は  $q$  に引き寄せられ、仮想陽電子は反発される。その結果、真空偏極は電荷を部分的に遮蔽し、場を弱める。しかし、くり返しになるが、 $q$  に近づきすぎると、遮蔽効果はなくなる。この場合に、分子間距離の役目を果たすのは電子のコンプトン波長  $\lambda_c = h/mc = 2.43 \times 10^{-10}$  cm である。これよりも短距離になると、ちょうど図に示したように、実効電荷量は増加する。「本当の」電荷とみなしたくなる遮蔽されていない（「クローズアップ」）電荷は、通常の実験でわれわれが測定しているものではないことに注意すべきだ。というのは、そのような短距離での実験をすることはほとんどないからだ\*8。通常「電子の電荷」とよんでいるものは実際には完全に遮蔽された後の実効電荷である。

電気力学について多くを説明した。QCD についても同じことがいえるが、一つ付け加えなければならない重要なことがある。クォーク・クォーク・グルーオンバーテックス（これ自身もまた、短距離では結合の強さが増加する）があるだけでなく、グルーオン・グルーオンの直接の結合も存在することだ。QED の真空偏極に類推した図に加え、以下のようなグルーオンのループも含めなければならない。



\*8 唯一の例外は、水素のスペクトルのわずかな摂動であるラムシフトだ。真空偏極の影響（というよりもむしろ、短距離では真空偏極がないこと）をはっきりと認識できる。

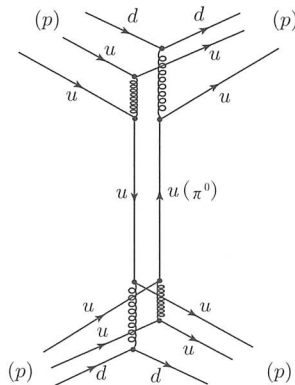


これらの図がどのような影響をもたらすのかは一見自明ではないが、それらの効果は反対向きだということがわかっている。クォークによる偏極（短距離で  $\alpha_s$  を押し上げる）と、グルーオンによる偏極（ $\alpha_s$  を小さくする）とのある種の競争が起こる。前者は理論中のクォークの数（つまり、フレーバーの数  $f$ ）に、後者はグルーオンの数（つまり、色の数  $n$ ）に依存するので、その競争の勝者を決めるのは、フレーバーと色の数の差である。その臨界点を決めるパラメーターは

$$a \equiv 2f - 11n \quad (2.2)$$

である。これが正ならば、QED のように、短距離では実効的な結合は強くなる。負ならば、弱くなる。標準模型では、 $f$  は 6、 $n$  は 3 なので、 $a$  は  $-21$  になり、QCD の結合定数は短距離では減少する。これが、漸近的自由の起源である。

QED と QCD との最後の違いは、多くの粒子が電荷をもつ一方で、自然に存在する粒子は色荷をもたないことである。クォークは、二つ（の中間子）や三つ（のバリオン）の色のないパッケージの中に閉じ込められている。そのため、われわれが実験室で実際に観測する過程は、必ず間接的であり、また、色力学の結果の複雑な重ね合わせである。それは、中性の分子間に働くファンデルワールス力からのみ電気力学を垣間みられるのと似ている。たとえば、二つの陽子の間の（強い）力は、（他の多くも含めて）以下の図を含む。



ここにパイ中間子を交換する湯川模型の名残を見ることができ、全体の描像は湯川がかつて想像したよりもはるかに複雑である。

もし QCD が正しければ、クォークの閉じ込めの説明がなければならない。つまり、

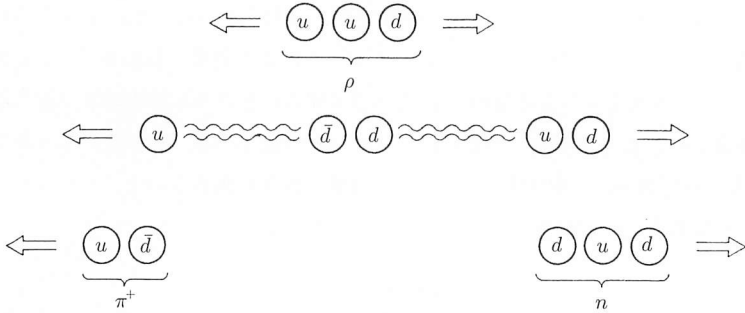


図 2.3 クォーク閉じ込めを説明し得る一つのシナリオ.  $u$  クォークを陽子から引き離すと, 1 個の自由クォークの代わりに, クォーク対が生成され, 結局パイ中間子と中性子になる

この理論の帰結として, 複数のクォークが無色の組み合わせのときのみ存在できることを証明できなければならない. とりあえず, この証明は以下になるだろう. クォーク同士が離れれば離れるほどその間のポテンシャルエネルギーは無制限に大きくなるので, それらを完全に引き離すには無限大のエネルギーが必要になってしまう (図 2.3) (あるいは, 新しいクォーク-反クォーク対をつくるのに足る十分なエネルギーを最低でも必要とする). これまでのところ, QCD が閉じ込めを示唆するということをはっきりと説明した者はいない (けれども, 1 章の参考文献 [27] は参照せよ). その難しさは, 閉じ込めがクォーク-クォーク相互作用の長距離での振る舞いを含むものであり, そこがまさにファインマンの計算方法がうまくいかない領域だということである\*9.

## 2.4 弱い相互作用

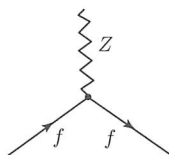
電荷が電磁気力を, そして色荷が強い力を生み出すという意味で, それに対応する弱い力を生み出す「もの」に対する特別な名前はない. それを「弱電荷」とよぶ人もいる. いずれにせよ, どんな名前を使おうとも, すべてのクォークとすべてのレプトンはそれをもっている (レプトンは色をもっていないので, 強い相互作用には寄与しない. ニュートリノは電荷をもっていないので, 電磁気力を受けない. しかし, これらすべてが弱い相互作用に参加する) [6]. 弱い相互作用には, ( $W$  により媒介される)

\*9 原子核中の 3 倍あるいは 4 倍以上の極高密度下では「相転移」が起こり, 閉じ込めを解放した, いわゆるクォーク・グルーオン・プラズマの状態になるという強い兆候がある. ゆえに, ビッグバン直後には自由クォークが存在した可能性があり, ブロックヘブンの Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) を使い, 実験室中で同様の状態を (小さなスケールで) 再現しようという試みがなされている [5].

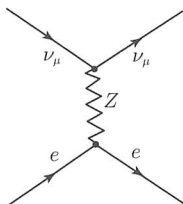
荷電と ( $Z$  により媒介される) 中性の 2 種類が存在する。中性の弱い相互作用の方がはるかに単純なので、まずはそこから始める\*10。

### 2.4.1 中性相互作用

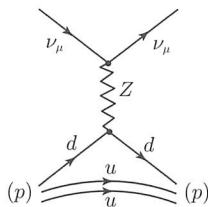
中性相互作用の基本的なバーテックスは以下である\*11。



ここで、 $f$  はいかなるレプトンでもクォークでもよい。 $Z$  は、ニュートリノ-電子散乱 ( $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ ) や、



ニュートリノ-陽子散乱 ( $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$ )



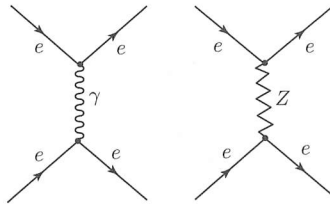
などを生み出す (後者では、二つの「傍観」クォークも一緒にいて、グルーオン交換

\*10 荷電弱相互作用は、弱い相互作用の研究開始直後から知られていたが (ベータ崩壊は古典的な例だ)、中性弱相互作用については 1958 年になるまで理論的重要性を認識されていなかった。GWS 模型は、中性弱相互作用を本質的な材料として取り込んでおり、その存在は、1973 年に CERN のニュートリノ散乱実験で初実証された [7]。

\*11 光子については波線を、グルーオンについてはカールした線を使うのが慣習になっているが、弱い相互作用の媒介粒子については、本によってまちまちである。この本ではジグザグの線を使うが、あまり標準的ではない (本書ではスピン 1/2 の粒子に実線を使い、スピン 0 の粒子に点線を使う。前者は標準的だが後者は標準ではない)。

という強い力によって  $d$  に束縛されているが、簡単のため、ここではグルーオンは描いていない)\*12.

光子によって誘起される過程、たとえば、電子-電子散乱は、必ず  $Z$  によっても誘起されることに気づいてほしい。



たぶん、クーロンの法則に対するわずかな補正が2番目の図からあるが、光子を交換する過程の方が圧倒的に寄与は大きい。(ハンブルクにある) DESY では、実験家が  $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$  という反応を非常に高いエネルギーで研究し、 $Z$  からの寄与の紛れもない証拠を見つけた [8]. 原子物理学では、弱い相互作用はパリティ (鏡面对称性) を破っているという特徴を利用して、電磁反応における中性弱相互作用の混入を取り出すことに成功している [9]. だが、純粋な中性弱相互作用を観測するには、邪魔になる電磁相互作用を含まないニュートリノ散乱を研究整理しなければならない。ニュートリノ実験は難しくて悪名高い。

#### 2.4.2 荷電相互作用

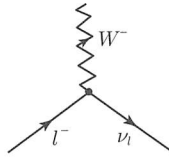
強い相互作用、電磁相互作用、そして中性弱相互作用の一番基本的なバーテックスは、入ってきたのと同じクォークあるいはレプトンが、グルーオン、光子、あるいは  $Z$  を伴って出ていくという共通の特徴を分かち合っている。QCD では、クォークの色は変わるかもしれないが、クォークのフレーバーは決して変わらない。荷電弱相互作用はフレーバーを変える唯一の力で、この意味で「本当の」崩壊を引き起こすことができる (たんにクォークの組み合わせを変えとか、見えない対生成、あるいは対消滅だったりするのは一線を画している)。レプトンの荷電弱相互作用の説明から始める)\*13.

\*12 もちろん、 $Z$  が  $u$  クォークと結合する図も存在する。

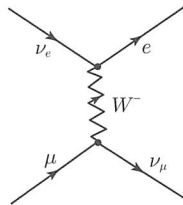
\*13 ニュートリノ振動の発見により、この描像の何らかの修正が必要になるが、われわれはまだそれがどのようなものか正確にはわかっていない (たぶん、クォークと同様の扱いをするような理論となる)。そこで、当面は (ニュートリノ振動以前の) 簡明な話に沿って進む。

## 2.4.2.1 レプトン

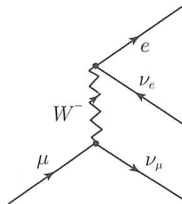
最も基本的な荷電バーテックスはこのようなものだ。



負電荷のレプトン ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ) が, 対応するニュートリノに変換し,  $W^-$  を放出する (あるいは  $W^+$  を吸収する), つまり  $l^- \rightarrow \nu_l + W^-$  だ\*14. そしていつものように, 最も単純なバーテックスを組み合わせることでより複雑な反応を生成できる. たとえば,  $\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$  という過程は以下の図で表現される.



このようなニュートリノ-ミュー粒子散乱事象を実験室で準備するのは難しいが, わずかに図をひねることで, 本質的には同じ図がミュー粒子の崩壊  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$  を記述する.



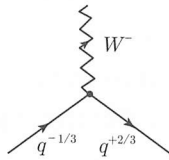
これが, あらゆる荷電弱相互作用の中で最もすっきりとしている. その詳細は 10 章で見えていく\*15.

\*14 これはもちろん交差反応である  $l^+ \rightarrow \bar{\nu}_l + W^+$  が許されることを意味している.

\*15 計算上, これはミュー粒子崩壊の最低次だが, 弱い相互作用の理論では, より高次の補正が必要になることはめったにない.

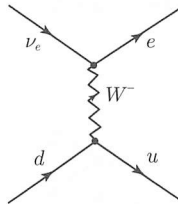
2.4.3 クォーク

レプトンが寄与する弱相互作用のバーテックスでは、いつも同じ世代のメンバーが結びついていることに注意してほしい。  $e^-$  が ( $W^-$  の放出を伴い)  $\nu_e$  に変換したり、 ( $Z$  を放出して)  $\mu^- \rightarrow \mu^-$  はあるが、  $e^-$  は決して  $\mu^-$  にならないし、  $\mu^-$  は  $\nu_e$  にはならない。 このように、理論は、電子数、ミュー粒子数、タウ数の保存を強いる。同様のルールをクォークにも適用し、最も基本的な荷電バーテックスは以下のようなものであると仮定する誘惑にかられる。



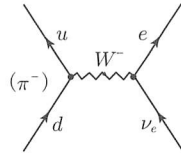
電荷  $-1/3$  をもつクォーク (つまり、  $d$  や  $s$  や  $b$ ) が、  $W^-$  を放出し、それぞれに対応する電荷  $2/3$  をもつクォーク (それぞれ、  $u$ 、  $c$ 、  $t$ ) に変換する。外に出ていくクォークは、入ってきたものと同じ色をもつが、フレーバーは違う\*16。

$W$  の線の端は、レプトン (「セミレプトニック」過程) あるいは別のクォーク (純粋にハドロニックな過程) と結合する。最も重要なセミレプトニック過程は、  $d + \nu_e \rightarrow u + e$  である。

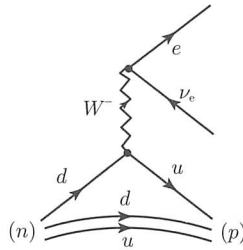


クォークの閉じ込めのため、この過程は自然の中でこのままの形態で起こることはない。しかし、縦と横を入れ替え、  $\bar{u}$  と  $d$  を (強い力によって) 束縛状態にすれば、この図はパイ中間子の可能な崩壊  $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  を表す (ただし後に議論する理由により、実際のところ、もっとよくある崩壊は、同じ図で  $e$  を  $\mu$  に置き換えた  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$  である)。

\*16  $W^-$  が「失った」フレーバーをもち逃げしているのではない。  $W$  はフレーバーをもっておらず、荷電弱相互作用では単純にフレーバーが保存しない。

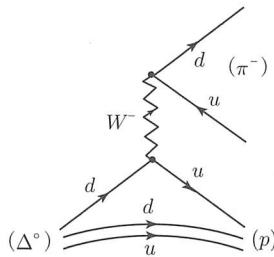


さらに、本質的には同じ図が中性子のベータ崩壊 ( $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ ) を表現している。



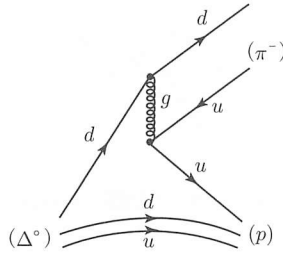
よって、(傍観クォークとして寄与する) 強い相互作用の混入を除けば、中性子の崩壊は構造上ミュー粒子の崩壊と同一であり、かつパイ中間子の崩壊と深い関係がある。クォーク模型誕生以前は、これらは三つのまったく別の過程だと思われていた。

電子-ニュートリノバーテックスをクォークのバーテックスに置き換えると、完全にハドロニックな弱相互作用である  $\Delta^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$  を得る\*17。



実際のところ、この特別な崩壊は強い相互作用によっても起きる。

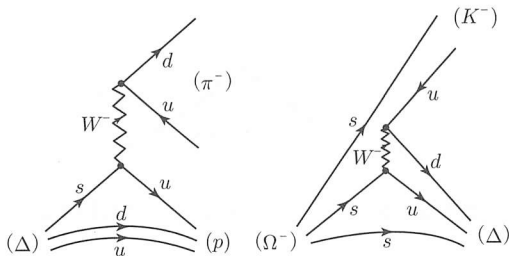
\*17  $\Delta^0$  は中性子と同じクォークからなるが、中性子は陽子とパイ中間子をつくれるほど重くないために、この崩壊が許されない。



弱い相互作用による効果は観測できないほどわずかな寄与しかない。レプトニックではない弱相互作用のもっと現実的な例をこの後見ていく。

これまでのところすべてが単純だった。クォークはレプトンを真似る。唯一の違いは、強い力（これがレプトンにはないことを思い出そう）が傍観者を通して全体像を複雑化させているだけで、弱い相互作用の本質とは何ら関わりがない。悲しいことに、これはじつは単純すぎる。最も基本的なバーテックスがそれぞれの世代の中でのみ運用可能だとしたら、ストレンジネスを変える弱相互作用を決して取り扱えない。たとえば、ストレンジクォークをアップクォークに変化させる、ラムダの崩壊 ( $\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$ ) やオメガの崩壊 ( $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$ ) はあり得ない。

この矛盾に対する解答は1963年にカビボによって提案され、1970年にグラシヨールとイリオポロスとマイアニ (GIM) によって完全なものになり、そして、1973年に小林と益川 (KM) によって第3世代にまで拡張された\*18。根本的なアイデアは、クォークの世代は弱い相互作用に対して「ゆがんでいる」ということである\*19



\*18 カビボ-GIM-KM 機構については9章でさらに議論する。

\*19 計算上、これは荷電だけでなく中性弱相互作用にも当てはまる。しかし、中性の場合は問題にならないので、この段階ではこの問題には触れずに話をなるべく簡明にしようとした。歴史的には、三つのクォークの存在しか知られていなかった時代には、(実験的に) ストレンジネスを変える中性弱相互作用がなぜないのか謎であった。GIM 機構は、奇跡的なキャンセルを起こすために、(11月革命の4年前に) 4番目のクォークと  $2 \times 2$  の「KM 行列」を導入した。その正味の効果は(中性の場合には) 大雑把には、クォークが「ゆがんで」いなかったのと同じくらいだった。



$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

の代わりに、弱い相互作用は

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

という対で結合する。ただし、ここで、 $d'$ 、 $s'$ 、 $b'$  は、物理的な  $d$ 、 $s$ 、 $b$  の線形結合である。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

もし、この  $3 \times 3$  の小林-益川行列が単位行列だったとしたら、 $d'$ 、 $s'$ 、 $b'$  は物理的な  $d$ 、 $s$ 、 $b$  と同じで、「世代をまたぐ」変換は生じなかったであろう。「アップネスとダウンネス」は（ちょうど電子数のように）完全に保存しただろうし、「ストレンジネスとチャームネス」も（ミュー粒子数のように）、そして「トップネスとボトムネス」も（タウ数のように）保存しただろう。しかし、それは（非常に近いとはいえ）単位行列ではなかった。実験的には、行列要素の大きさは

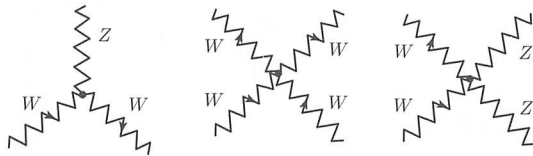
$$\begin{pmatrix} 0.974 & 0.227 & 0.004 \\ 0.227 & 0.973 & 0.042 \\ 0.008 & 0.042 & 0.999 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

となっている [10]。  $V_{ud}$  は  $u$  と  $d$  との結合の大きさ、 $V_{us}$  は  $u$  と  $s$  との結合の大きさなどの指標となっている。後者がゼロではないという事実により、ストレンジネスを変化させる過程、すなわち、 $\Lambda$  や  $\Omega^-$  の崩壊などが可能になる\*20。

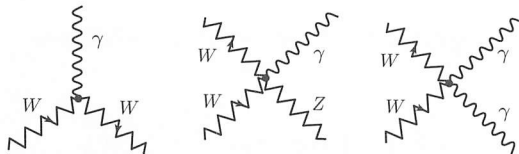
#### 2.4.4 $W$ と $Z$ の電弱結合

GWS 模型では（ちょうど、QCD にグルーオン-グルーオンの直接結合があるように） $W$  と  $Z$  の互いに対する直接結合が存在する。

\*20 ニュートリノ振動はレプトンセクターの世代をまたぐ結合を含んでいる。よって、レプトンも「KM 行列」をもっているのかもしれない。11 章を参照。



さらに、 $W$  は荷電なので、光子とも結合する。



これらの相互作用は理論内部の整合性としては重要であるが、現段階では実際のな面からの重要性は限られてくる（問題 2.6）。

## 2.5 崩壊と保存則

素粒子物理学における一般的な性質で最も衝撃的なのは、崩壊するという性質である。その性質は、何らかの保存則によって禁止されない限り、あらゆる粒子がより軽い粒子に崩壊するという共通の原理だと考えてもよいかもかもしれない。光子は（質量ゼロで、崩壊できるそれよりも軽い粒子が存在しないため）安定である。電子は安定である（最も軽い荷電粒子のため、電荷保存則が崩壊を禁止する）。陽子ももしかしたら安定である（最も軽いニュートリノの崩壊をレプトン数保存則が禁止するように、最も軽いバリオンのためバリオン数保存則が崩壊を禁止する）。同様に、陽電子、反陽子、そして最も軽い反ニュートリノも安定である。だが、これら以外のほとんどの粒子は勝手に壊れる。中性子ですら、多くの原子核中という守られた環境の中では安定になるが、それ以外では崩壊する。実際には、われわれの世界はほとんど陽子、中性子、電子、光子、そしてニュートリノで満ちている。よりエキゾチックな粒子はある瞬間（衝突によって）生成されるが、長生きしない。不安定な粒子はそれぞれ固有の平均寿命  $\tau$  をもつ<sup>\*21</sup>。ミュオン粒子は寿命  $2.2 \times 10^{-6}$  秒で、 $\pi^+$  は  $2.6 \times 10^{-8}$  秒、 $\pi^0$  は  $8.3 \times 10^{-17}$  秒だ。そしてじつは、たいていの粒子は異なる崩壊様式をもつ。たとえば、すべての  $K^+$  のうち 64% は  $\mu^+ + \nu_\mu$  に崩壊するが、21% は  $\pi^+ + \pi^0$  に、6% は

<sup>\*21</sup> 寿命  $\tau$  は、半減期  $t_{1/2}$  と  $t_{1/2} = (\ln 2)\tau = 0.693\tau$  の関係で結ばれている。半減期とは、大量の粒子が崩壊して半数になるまでの時間のことである（6.1 節を参照）。

$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$  に、5%は  $(e^+ + \nu_e + \pi^0)$  などのように崩壊する。素粒子物理理論のゴールの一つは、これらの寿命や崩壊比を計算することである。

ある特定の崩壊は、三つの根源的な相互作用の一つによって支配されている。たとえば、 $\Delta^{++} \rightarrow p^+ + \pi^+$  は強い相互作用に、 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  は電磁相互作用に、そして  $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$  は弱い相互作用によって引き起こされている。どのようにしてそれを見分けるのだろうか。もし光子が出てきたら、それは間違いなく電磁相互作用だし、もしニュートリノが現れたらそれは間違いなく弱い相互作用だ。しかし、光子とニュートリノのどちらも存在しなかったら、見分けるのは少し難しい。たとえば、 $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$  は弱い相互作用だが、 $\Delta^- \rightarrow n + \pi^-$  は強い相互作用だ。この後すぐ、どうやって区別すればよいか示すが、まず最初に、強い相互作用、電磁相互作用、そして弱い相互作用の間の最も劇的な実験上の違いについて言及したい。強い相互作用による崩壊の典型的な寿命は  $10^{-23}$  秒程度、電磁相互作用による崩壊の典型的な寿命は約  $10^{-16}$  秒、そして、弱い相互作用による崩壊の典型的な寿命は  $10^{-13}$  秒 ( $\tau$  の寿命) から 15 分 (中性子の寿命) の間である。同じ相互作用による崩壊では、坂が急なほどボールが速く転げ落ちるように、崩壊する前の粒子と崩壊物との質量差が大きければ大きいほど速く崩壊する\*22。この運動学的効果によって、弱い相互作用での寿命は幅広い範囲に広がっている。とりわけ、陽子と電子を足すと中性子の寿命に非常に近いので、 $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  はなかなか起きず、中性子の寿命は他のいかなる不安定粒子よりもはるかに長い。しかし、実験的には、強い相互作用と電磁相互作用とでは寿命にきわめて大きな差があり (約 1000 万倍)、また電磁相互作用と弱い相互作用との間にも大きな差がある (少なくとも 1000 倍)。本当に、素粒子物理学者は  $10^{-23}$  秒を「通常の」時間の単位として考えるのにあまりに慣れてしまったために、便覧では  $10^{-17}$  秒程度よりも長い寿命をもつものを「安定」粒子と分類してしまっている! \*23

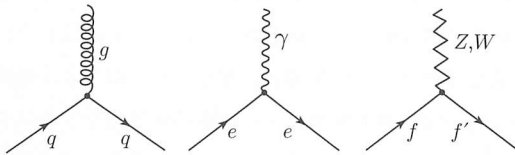
\*22 例外もある。たとえば、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  は、 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  より  $10^4$  倍も寿命が短い。しかし、そのようなケースは何らかの特別な説明を必要とする。

\*23 偶然にも、 $10^{-23}$  秒というのは、光が陽子 (直径約  $10^{-15}$  m) を横切るのにかかる時間である。そんな粒子の時間をストップウォッチでは当然測れないし、(問題 1.8(b) で  $\Omega^-$  に対して行ったような) 飛跡の長さの測定でさえも無理だ。飛跡を残すほど動かないのだ。代わりに、質量測定 of ヒストグラムをつくり、不確定性原理  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$  を発動する。ここで、 $\Delta E = (\Delta m)c^2$  で、 $\Delta t = \tau$  なので

$$\tau \geq \frac{\hbar}{2(\Delta m)c^2}$$

である。よって、質量の広がりはその粒子の寿命の指標になっている (細かいことをいうと、それは  $\tau$  の下限にすぎないが、それくらい短寿命の粒子についての議論は、おそらく、不確定性原理の制限ぎりぎりのところにいる [11])。

さて、ある特定の反応を許すあるいは禁止する保存則はどうなっているだろうか。まずは、(3章で学ぶ) エネルギーと運動量の保存と、(4章で解説する) 角運動量保存という純粋に運動学的な保存則がある。粒子が自身よりも重い粒子に自ら壊れることができないという事実は、実際にはエネルギー保存による帰結である(何の説明も必要としないくらい「あきらか」に見えるが)。運動学上の保存則は、強い力、電磁気力、弱い力のすべての相互作用に、そしてこの先出てくるあらゆる物に対して適用される。なぜなら、それらの保存則は特殊相対論そのものから導き出されるからだ。しかし、いまここでの問題は、基本的なバーテックスの構造から生じる動的な保存則である。



すべての物理過程が、これらをうまく組み合わせてくっつけることで得られるので、それぞれのバーテックスで保存する一切が反応全体でも保存しなければならない。では、何があるだろうか。

1. 電荷：三つの相互作用すべてで、当然、電荷は保存する。弱い相互作用の場合、入ってきたレプトン(あるいはクォーク)は、出ていくものと同じ電荷をもたないかもしれないが、その差は、 $W$  がもち逃げしている。
2. 色：電磁相互作用、および弱い相互作用は色に影響を与えない。強い相互作用のバーテックスでは、クォークの色は変わるが、その差はグルーオンがもち逃げしている(グルーオン-グルーオンの直接結合でも色は保存している)。しかしながら、自然に存在する粒子はいつも無色なので、観測する色保存の兆候ははっきりしている。色荷ゼロが入り、ゼロが出ていく。
3. バリオン数：すべての基本的なバーテックスで、もし一つのクォークが入ってくると、一つのクォークが出ていくので、存在するクォークの総数は一定である。この計算においては、反クォークは負と数えるので、たとえば、 $q + \bar{q} \rightarrow g$  バーテックスでは、始状態も終状態もクォーク数はゼロである。もちろん、われわれは個々のクォークを観測できず、(クォーク数3の)バリオン、(クォーク数-3の)反バリオン、そして(クォーク数ゼロの)中間子だけを観測する。なので、実

実際には、バリオン数（バリオンは1，反バリオンは-1，それ以外は0）の保存について語る方が便利だ。バリオン数はたんにクォーク数の1/3である。類似の中間子数の保存がないことに注意せよ。中間子はクォーク数ゼロなので、エネルギー保存を満たしていれば、ある衝突や崩壊において、好きなだけ数多くの中間子をつくることができる。

4. レプトン数：強い力はレプトンにはまったく関係ない。電磁相互作用では、入ったのと同じ粒子が（光子を伴って）出てくる。そして弱い相互作用では、一つのレプトンが入ってくると、一つのレプトンが出てくる（このとき、これらは必ずしも同じものではない）。よって、レプトン数は絶対に保存する。最近になるまで、レプトンの間には世代をまたぐ混合が存在しないように見えた。よって、電子数、ミュー粒子数、そしてタウ数がそれぞれ独立に保存しているように思われた。これはたいていの場合正しいが、絶対ではないということをニュートリノ振動が示唆している\*24。
5. フレーバー：クォークのフレーバーはどうだろうか。フレーバーは、強い相互作用、あるいは電磁相互作用のバーテックスでは保存しているが、弱い相互作用のバーテックスでは保存していない。そこでは、アップクォークがダウンあるいはストレンジクォークに変わり、失われたアップネスを捨てるものも、「新たに生じた」ダウンネスやストレンジネスを供給するものもない。弱い力はあまりにも弱いので、種々のフレーバーは近似的には保存しているという。実際、まさにこの近似的な保存があるからこそ、ゲルマンが初めてストレンジネスという概念を導入したことを読者も思い出すだろう。彼は、たとえば

$$\pi^{-}(d\bar{u}) + p^{+}(uud) \rightarrow K^{+}(u\bar{s}) + \Sigma^{-}(dds) \quad (2.7)$$

のように、ストレンジ粒子はいつも対で生成されており、さもないと

$$\pi^{-}(d\bar{u}) + p^{+}(uud) \rightarrow \pi^{+}(u\bar{d}) + \Sigma^{-}(dds) \quad (2.8)$$

のように、ストレンジネス保存を破ってしまうと「説明」した（実際のところ、弱い相互作用でならストレンジネスを破ることは可能だが、ストレンジネスを保存

\*24 クォークの世代に関する同様の保存（アップネス+ダウンネス，ストレンジネス+チャーム，ビューティ+トゥールズ）があってもよいが，世代間混合があることが，ここ何十年間も知られていた。それでもなお，KM 行列の非対角成分が相対的には小さいので，世代をまたぐ崩壊は抑圧される傾向があり，そのような交差が二つ必要な過程は極度にまれになっている。それゆえ， $\Delta S = 2$  を「禁止する」古い法則がある。

する、圧倒的に寄与の大きい強い相互作用に打ち勝たなければならないので、実験室で観測することはない。しかし、崩壊では、ストレンジネス非保存が非常に際立っている。というのも、打ち勝たなければならない強い力、あるいは電磁気力による過程が存在しないため、多くの粒子ではストレンジネスを破る崩壊過程しか存在しないからだ。たとえば、 $\Lambda$  は最も軽いストレンジバリオンで、もしそれが崩壊するとしたら、 $n$  (あるいは  $p$ ) と何かに崩壊しなければならない。しかし、最も軽いストレンジ中間子は  $K$  で、 $n$  (あるいは  $p$ ) と  $K$  を足すとその重さは  $\Lambda$  をはるかに超えてしまう。もし、 $\Lambda$  が崩壊するならば (それは、われわれが知っているように 64% が  $\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$  へ、36% が  $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$  に本当に崩壊する)、ストレンジネスは保存できないので、その反応は弱い相互作用で引き起こされなければならない。対照的に、(ストレンジネスがゼロの)  $\Delta^0$  は、強い相互作用によって  $p^+ + \pi^-$ 、あるいは  $n + \pi^0$  に崩壊できる。それゆえ、その寿命ははるかに短い。

6. OZI 則：最後に、1 章以来の私の良心に基づいて、非常に奇妙なケースについて話さなければならない。私が考えているのは、 $\psi$  の崩壊だ。 $\psi$  は、チャームクォークとその反クォークの束縛状態  $c\bar{c}$  ということのを思い出そう。 $\psi$  は驚くほど長い寿命をもつ (約  $10^{-20}$  秒)。問題はなぜかということだ。それはチャーム価の保存とは何の関係もない。 $\psi$  の正味のチャーム価はゼロだ。 $\psi$  の寿命は、強い相互作用によるものだとあきらかに認識できるくらい短い。しかし、なぜ強い相互作用による崩壊の時間スケールよりも 1000 倍もゆっくりで「なければならない」のか。その説明は、(そうよびたいのであれば)「OZI 則」として知られる大久保、ツヴァイク、飯塚による古い観測にさかのぼる。彼らは [12]、( $\psi$  のストレンジ版である  $s\bar{s}$  からなる)  $\phi$  が、エネルギー的には二つの  $K$  よりも三つの  $\pi$  への方が崩壊しやすいのにもかかわらず (二つの  $K$  の質量和は  $990 \text{ MeV}/c^2$  で、三つ  $\pi$  の合計は  $415 \text{ MeV}/c^2$  しかない)、三つの  $\pi$  よりも二つの  $K$  に崩壊しやすいという事実を疑問に思っていた (二つの  $\pi$  への崩壊は、4 章で見る理由により、禁止されている)。図 2.4 で、三つのパイ中間子の図は、グルーオンの線をばちんと切るだけで二つに切り分けられるのがわかる。

OZI 則によると、そのような過程は「抑圧」される。ただし、必ずしも禁止されるわけではないことに注意してほしい。実際  $\phi \rightarrow 3\pi$  は起こる。しかし、抑圧されていない過程よりはるかに起きにくい。OZI 則は、以下の点で漸近的自由に関係している。OZI 則で抑圧されている過程では、グルーオンは「ハード」(高

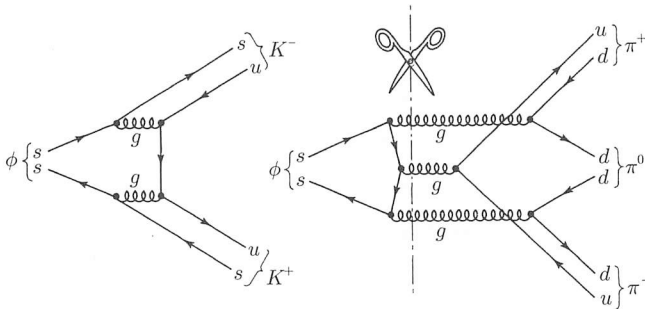


図2.4 OZI則：もし図が(いかなる外線も切らないで)グルーオンの線を切るだけで二つに分けられるときは、その過程は抑圧される

いエネルギー)でなければならない。というのも、そのグルーオンがクォーク-反クォーク対を放出、放出されたクォークや反クォークが束縛状態になりハドロンをつくるのに必要なエネルギーをもっていなければならないからだ。しかし、漸近的自由によると、高エネルギー(短距離)では結合が弱くなる。反対に、OZI則で許されている過程では、典型的にはグルーオンはソフト(低エネルギー)なので、この領域では結合が強い。少なくとも定性的にはこれがOZI則の説明になっている(定量的な理解のためには、より完璧なQCDの理解を待たなければならない)。しかし、これと $\psi$ に何の関係があるのだろうか。たぶん、同じルールが適用され、 $\psi \rightarrow 3\pi$ が抑圧され、二つのチャーム価をもったD中間子への崩壊が(Kとの類推で、ストレンジクォークをチャームクォークに置き換える)より望ましい道筋となる。ただし、 $\psi$ のときに比べて新たにひとひねりある。D対は $\psi$ より重いのだ。よって、 $\psi \rightarrow 3\pi$ がOZI則で抑圧される一方で、 $\psi \rightarrow D^+ + D^-$ (あるいは $D^0 + \bar{D}^0$ )崩壊は運動学的に禁止され、この幸せな組み合わせにより $\psi$ は通常ではあり得ないほど長生きになっている。

## 2.6 統一の方法

その昔、電気と磁気は二つの別物であった。一方はピスボール\*25や電池や照明を扱い、他方はロデオストーンや、棒磁石や、地磁気を扱った。しかし1820年にエルステッドは、電流がコンパスの針をそらすことに気づいた。そしてその10年後、ファラデーは磁石を動かすとその近くにある導線でできた環に電流が発生することを発見し

\*25 訳注：静電気力を観察するために絶縁体でできた糸にぶら下げられている金属球のこと。

た。マクスウェルが理論全体を最終形態にまとめた頃には、電気と磁気は電磁気という一つの題材の二つの局面だと正しく認識されていた。

アインシュタインは、さらに一歩進んで、重力と電磁気力とを合わせて統一的に扱う理論を夢見ていた。この夢は、うまくはいかなかったものの、同様の発想によって、グラショー、ワインバーグ、サラムが弱い力と電磁気力を一つにした。彼らの理論は四つの質量のない媒介粒子から始まったが、発展すると、そのうちの三つは（いわゆるヒッグス機構によって）質量を獲得した。その結果、二つの  $W$  と  $Z$  は質量をもち、残りの一つ光子だけは質量ゼロのままになった。実験的には  $W$ 、あるいは  $Z$  によって誘起された反応は  $\gamma$  による反応とまったく別物だが、どちらも同じ一つの電弱相互作用の結果である。弱い力が相対的に弱いのは、中間状態に現れるベクトルボソンの膨大な質量のせいだ。実際のところ、弱い力の本来の強さは、9章で見るように、電磁気力の本来の強さよりも強い。

1970年代の初め、当たり前のように多くの人が強い力（色力学）を電弱力と結合させるという次のステップを目指した。この大統一を実現するためのいくつかの困難が残っており、最終的な結論を出すのはまだ時期尚早だが、基本的な考え方は広く受け入れられている。強い力の結合定数  $\alpha_S$  は短距離では（つまり、非常に高エネルギーの衝突では）減少することを思い出すだろう。同じように、弱い相互作用の結合定数  $\alpha_W$  も減少するが、その変化の度合いはゆっくりだ。一方で、三つの結合定数の中でも最も小さい、電磁気力の結合定数  $\alpha_e$  は増加する。とてつもない高エネルギーでは、それらすべてがある共通の値に収束するのだろうか（図 2.5）。それが、大統一理論（GUT）

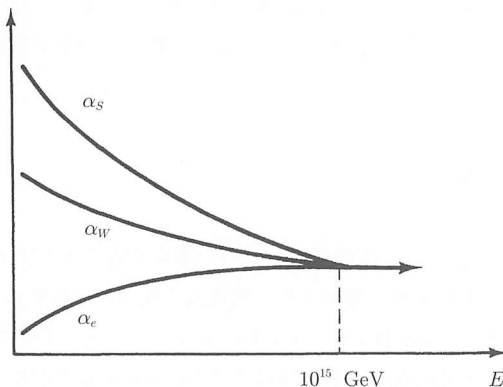


図 2.5 三つの根本的な結合定数のエネルギー依存性



の予言だ。実際のところ、結合定数のくりこみ関数のかたちから、どのエネルギースケールで統一が起こるのか見積もることができ、 $10^{15}$  GeV となる。これはもちろん、現在到達可能なエネルギーに比べて天文学的に大きな値だ ( $Z$  の質量が  $90 \text{ GeV}/c^2$  だということを思い出そう)。しかしながら、これはわくわくするアイデアだ。というのは、これが意味するのは、三つの相互作用の強さの違いを観測しているのは、われわれが、力の統一が隠れてしまった低エネルギーで研究せざるを得ないという事情による「偶然」だということだ。もしも、強い力、電磁気力、弱い力の「本当の」電荷を真空偏極による遮蔽効果なしに見ることができたら、それらがすべて同じ値であると見出すのかもしれない。なんと素晴らしい！

GUT のもう一つの予言は、陽子は、半減期が驚くほど長いものの (少なくとも宇宙年齢の  $10^{19}$  倍)、不安定であるというものである。ある意味、バリオン数やレプトン数の保存よりも、電荷や色の保存の方がより「本質的」だとしばしばいわれている。というのも、電荷は電磁気力の、そして色は色力学の「源」だからだ。もしこれらの物理量が保存しなかったら、QED や QCD を完全につくり直さなければならない。しかし、バリオン数やレプトン数は力の源の役割を果たしておらず、それらの保存が深遠な動的重要性をもっているわけでもない。大統一理論では、新しい相互作用が期待され、バリオン数もレプトン数も変化する、

$$p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 \quad \text{または} \quad p^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \pi^+ \quad (2.9)$$

というような崩壊が許されている。いくつかの大きな実験でこれらのまれな陽子崩壊を探索しているが、いまのところ結果は否定的だ [13]。

もし大統一があるとしたら、あらゆる素粒子物理学が一つの力による作用にまとめられる。そうなる、最後のステップは、重力を加えた究極の統一によってアインシュタインの夢をようやく実現することだ。これには超弦理論が最有力のアプローチだ\*26。期待して待とう！

## 参 考 書

- [1] 一貫性のある語源はギリシャ語の「フレーバー」からである。M. Gaillard: Physics Today, 74 (April 1981)。ギルラードは、弱いというギリシャ語から提案した。
- [2] グロス、ポリッツァー、ウィルチェックは、漸近的自由の発見で 2004 年のノーベル賞を受賞した。この辺りのことは、D. J. Gross: Physics Today, 39 (January 1987) を参照。

\*26 大統一については 12.2 節を、超対称性と超弦理論については 12.4 節を参照。

- [3] たとえば, 下記を参照. E. M. Purcell: *Electricity and Magnetism*, 2nd edn (McGraw-Hill, 1985) Sec. 10.1.
- [4] C. Quigg: *Scientific American*, 84 (April 1985) は, グルオン分極の効果の定性的解釈を与える.
- [5] 現状報告は, S. Aronson and T. Ludlam: *Hunting the Quark Gluon Plasma*, BNL-73847 Brookhaven National Laboratory, Brookhaven (2005).
- [6] 1960年までの弱い相互作用理論に関する古典的論文は, P. K. Kabir (ed): *The Development of Weak Interaction Theory* (Gordon & Breach, 1963). 現代的なものは, (a) C. H. Lai (ed): *Gauge Theory of Weak and Electromagnetic Interactions* (World Scientific, 1981). 下記も参照. (b) E. D. Commins and P. H. Bucksbaum: *Weak Interactions of Leptons and Quarks* (Cambridge University Press, 1983).
- [7] F. J. Hasert *et al.*: *Physics Letters*, B **46**, 138 (1973); *Nuclear Physics*, B **73**, 1. 以下も参照. (a) D. B. Cline, A. K. Mann, and C. Rubbia: *Scientific American*, 108 (December 1974).
- [8] S. L. Wu: *Physics Reports*, **107**, 59, (1984) Section 5.6. 以下も参照. (a) M.-A. Bouchiat and L. Pottier: *Scientific American*, 100 (June 1984).
- [9] B. G. Levi: *Physics Today*, 17 (April 1997).
- [10] 数値は, *Particle Physics Booklet*, (2006) からである.
- [11] このやり方の注意深い確認をしたければ, D. T. Gillespie: *A Quantum Mechanics Primer* (International Textbook Co., 1973) 78 を参照せよ.
- [12] S. Okubo: *Physics Letters*, **5**, 165 (1963); (a) G. Zweig; CERN Preprints TH 401 and TH 412 (1964); (b) J. Iizuka: *Progress in Physics Suppl.*, **37**, 21 (1966).
- [13] S. Weinberg: *Scientific American*, 64 (June 1981); (a) J. M. LoSecco, F. Reines, and D. Sinclair: *Scientific American*, 54 (June 1985). スーパーカミオカンデによる現在の陽子寿命の制限は, (b) M. Shiozawa *et al.*: *Physical Review Letters*, **81**, 3319 (1998).

## 問題

- 2.1 二つの静止した電子にかかる, 重力による引力と電気的な斥力の比を計算せよ (この計算に, どれだけ離れているかの情報は必要か).
- 2.2 デルブルク散乱  $\gamma + \gamma \rightarrow \gamma + \gamma$  の, 最低次のファインマン図を描け (この光と光の散乱過程は古典的な電気力学には相当するものがない).
- 2.3 4次 (バーテックスが四つ) のコンプトン散乱のファインマン図を描け (途切れている図を数えなければ, 17通り存在する).
- 2.4 パーラー散乱における最低次の図の, それぞれの仮想光子の質量を決定せよ (陽電子と電子は静止していると仮定する). また, その速さはいくらだろうか.
- 2.5 (a) どちらの崩壊がよく起こるだろうか.

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-, \quad \Xi^- \rightarrow n + \pi^-$$

答えを説明して, 実験データと比較することで確かめよ.

- (b)  $D^0(c\bar{u})$  中間子の崩壊は, どれが一番起こりやすいだろうか.

$$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+, \quad D^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+, \quad D^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$$

また, 最も起こりにくいのはどれか. ファインマン図を描き, 答えを説明して, 実験データ

を確認せよ (カビボ-GIM-KM 模型による予言の成功例の一つは、チャームクォークを含む中間子が、エネルギー的には  $2\pi$  への崩壊が好ましいのに、ストレンジクォークを含む中間子に優先的に崩壊としたことである)。

(c)  $b$  クォークを含む ( $B$ ) 中間子はどうか。  $D$  中間子,  $K$  中間子,  $\text{パイ}$  中間子のどれに崩壊するだろうか。

2.6  $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$  に寄与する最低次のファインマン図をすべて描け (このうち一つは,  $Z$  と  $W$  の直接結合を含み, また, 一つは,  $\gamma$  と  $W$  との結合を含む. そのため, LEP (CERN の電子-陽電子衝突型加速器) が 1996 年に, 二つの  $W$  をつくるのに十分なエネルギーに達したとき, これらのエキゾチックな過程を実験的に研究することができた. B. Schwarzschild: Physics Today, 21 (September 1996) を参照のこと)。

2.7 標準模型 (レプトン数とバリオン数の保存を破る可能性がある GUT は含まない) に従って, 以下の過程のそれぞれが, 可能か不可能かを述べよ. 可能な場合は, 強い相互作用, 電磁氣的相互作用, 弱い相互作用のいずれが原因であるかを述べよ. 不可能な場合は, それが起こるのを妨げる保存則を挙げよ (通常の慣習に従って, 明白なときは電荷を書かない. たとえば,  $\gamma, \Lambda, n$  は電荷をもたない,  $p$  は正電荷をもつ,  $e$  は負電荷をもつ, など)\*27.

- |   |  |
|---|--|
| (a) $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$         | (b) $\eta \rightarrow \gamma + \gamma$                     |
| (c) $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$          | (d) $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$                       |
| (e) $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$           | (f) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$                  |
| (g) $\Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$                | (h) $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$                  |
| (i) $e + p \rightarrow \nu_e + \pi^0$               | (j) $p + p \rightarrow \Sigma^+ + n + K^0 + \pi^+ + \pi^0$ |
| (k) $p \rightarrow e^+ + \gamma$                    | (l) $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$                |
| (m) $n + \bar{n} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ | (n) $\pi^+ + n \rightarrow \pi^- + p$                      |
| (o) $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$                 | (p) $\Sigma^+ + n \rightarrow \Sigma^- + p$                |
| (q) $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$         | (r) $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$                    |
| (s) $\Xi^0 \rightarrow p + \pi^-$                   | (t) $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$                  |
| (u) $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$             | (v) $\Sigma^- \rightarrow n + e + \bar{\nu}_e$             |

2.8 いくつかの崩壊には, 二つ (または三つすべての) 異なる力が含まれる. 以下の過程の可能なファインマン図を描け。

(a)  $\mu \rightarrow e + e + e^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$       (b)  $\Sigma^+ \rightarrow p + \gamma$

どのような相互作用が含まれているだろうか (これらの崩壊はどちらも観測されている)。

2.9  $b\bar{b}$  である  $\Upsilon$  中間子は  $c\bar{c}$  である  $\psi$  と似ていて, チャームクォークをボトムクォークに置き変えたものである. その質量は  $9460 \text{ MeV}/c^2$  であり, 寿命は  $1.5 \times 10^{-20}$  秒である. この情報から,  $u\bar{b}$  という  $B$  中間子の質量について何がいえるだろうか (観測されている質量は  $5280 \text{ MeV}/c^2$  である)。

2.10  $\psi'$  中間子の質量は  $3686 \text{ MeV}/c^2$  で  $\psi$  と同じクォークで構成されている (すなわち  $c\bar{c}$ ). このお

\*27 注意: 衝突は運動学的に禁じられてはいない. たとえば, もしあなたが, 反応 (e) がエネルギー保存によって禁止される (なぜなら電子の質量はミュー粒子より軽い) と主張するならば, それは少なくとも半分間違っている. 電子が質量差を補える運動エネルギーをもっている限り, この反応は起こり得る (実際に起こる). しかし, 同じことを崩壊に当てはめてみてはいけな. どのような運動エネルギーであっても, ある一つの粒子は, より重い粒子に崩壊することはできない. これは崩壊する粒子の静止系での過程を調べることで簡単に理解できる.

もな崩壊モード  $\psi' \rightarrow \psi + \pi^+ + \pi^-$  は強い相互作用だろうか. また, OZI 則によって抑制されるだろうか.  $\psi'$  の寿命はどれぐらいだと期待できるだろうか (実験的には  $3 \times 10^{-21}$  秒である).

- 2.11 図 1.9 は, 水素泡箱内で初めて確認された  $\Omega^-$  の生成を示している. 入射  $K^-$  はあきらかに静止粒子  $X$  に当たって  $K^0, K^+, \Omega^-$  を生成する. (a)  $X$  の電荷はいくらか. そのストレンジネスはいくらか. それは何の粒子だと期待できるか. (b) 右側の図中の各線に沿って, すべての反応を挙げよ. また, (強い相互作用, 電磁気相互作用, 弱い相互作用) どの相互作用なのか特定せよ (図が不明瞭な場合, 二つの光子は同じ点から来ると考えられる.  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$  は真空中では不可能だが (運動量が保存していない), 核の近傍では起こる. 核が「失われた」運動量を吸収するからだ. その反応は, 実際には,  $\gamma + p \rightarrow e^- + e^+ + p$  となるが, 陽子は重いのでほんのわずかしき動かず, 何の痕跡も残さない. 電子と陽電子は光子のエネルギーをもち去り, 陽子はたんに受動的な運動量の「受け皿」として働く).

- 2.12  $W^-$  は, 1983 年に陽子-反陽子散乱を用いて CERN で発見された.

$$p + \bar{p} \rightarrow W^- + X$$

ここで  $X$  は一つ以上の粒子を表している. この過程で最も可能性が高い  $X$  は何か. その反応のファインマン図を描き, なぜ, 他のいろいろな可能性ではなくその  $X$  を選んだのか説明せよ.