

序

素粒子物理学

素粒子物理学は、「物質は何からできているのか」というような最も根源的な、いい換えると最もミクロな世界の疑問に答える。驚くべきことに、原子よりも小さなスケールでは、物質はわずかな粒と、粒の間の非常に大きな空間からできている。さらに驚くべきことには、これらの小さな粒にはいくつかの違った種類があり（電子、陽子、中性子、パイ中間子、ニュートリノなど）、それらが天文学的な量だけ積み重なることでわれわれの周りの「物」を形づくっているのだ。そして、その複製はまったくもって完璧なコピーなのだ。同じ工場の組み立てラインでつくられた2台のフォードのようにたんに「よく似ている」のではなく、まったく区別できないのだ。一つ、あるいはすべての電子をもし見ることができたとしても、認識するためのシリアル番号を押印することはできない。この絶対的な同一性という概念は、マクロの世界にはない（量子力学では、パウリの排他原理で反映されている）。この同一性が、素粒子物理学をとてつもなくすっきりさせた。大きな電子と小さな電子、あるいは新しい電子と古い電子という心配はしなくてもよい。電子は電子なのだ。そのような同一性に到達するのは、そう簡単なことではなかった。

そこで、私の最初の仕事は、さまざまな種類の素粒子たち、ドラマに例えるなら役者を紹介することである。それらをたんに表にして、性質（質量、電荷、スピンなど）を教えることもできるが、ここでは歴史的な視点を取り入れ、それぞれの粒子がどのようにして初めて登場してきたのかを説明するのがよいと考える。そうすることで粒子たちは個性をもち、より記憶しやすく、より興味深くなるはずだ。さらに、そのような話のいくつかはそれ自体が面白い。

1章で粒子たちの紹介が済んだら、次の課題は「それらはどのように相互作用をするのか」になる。この問題は、直接的にも間接的にも、本書の残りすべてを占めている。もし肉眼で見える二つの物体を取り扱い、それらがどのように相互作用するのかを知りたかったら、たぶん、それらをさまざまな間隔で置き、二つの物体間に作用する力を測定するだろう。まさにそれが、クーロンが電荷をもった二つの小さな球体間に働

く電氣的反発力の法則を決めた方法であり、キャベンディッシュが鉛でできた二つの重りの重力による引力を測定した方法である。しかし、陽子をピンセットでつまんだり、電子を糸の端に結びつけることはできない。それらは小さすぎる。そこで、実際上の問題から、素粒子の相互作用を探索するには、より間接的な方法に頼らなければならない。後にわかるように、われわれが実験で得る情報のほとんどすべては三つの方法で得ている。(1)一つの粒子を別の粒子に入射し、(たとえば)その散乱角度を記録するというような散乱事象。(2)瞬時にばらばらになる粒子の破片を精査する崩壊。そして(3)二つ以上の粒子が一つに固められている複合物の性質を研究する束縛状態。以上の三つだ。いうまでもなく、そのような間接的な検証から相互作用の法則を決めるのは簡単な仕事ではない。通常は、相互作用のかたちを想像して得られた理論的予言を実験データと比較する。

そのような想像(「模型」がもっとちゃんとした用語だ)の形成は、ある普遍的な原理、とくに相対論と量子力学のうえに成り立っている。下に示す表に、力学の四つの領域を概観した。

古典力学	量子力学
相対論的力学	場の量子論

日常生活は、もちろん古典力学で支配されている。しかし、非常に高速(光速に匹敵する速さ)で移動する物体に対しては、古典力学の法則は特殊相対論に修正される。また、非常に小さな(ごっくりいって原子の大きさ)物体に対しては量子力学に置き換えられる。そして最後に、速くて、かつ小さな物については、相対論と量子力学を組み込んだ場の量子論が必要となる。さて、素粒子はもちろんとてつもなく小さく、かつ典型的には非常に高速である。そのため、当然素粒子物理学は場の量子論の領域に入る。

ここで、よく見て認識してほしいのは、力学の枠組みとある特定の運動法則との違いである。たとえば、ニュートンの万有引力の法則はある特別の相互作用(重力)を記述している一方で、ニュートンの三つの運動法則は力学の適用範囲(古典力学)を定義し、(その管轄内では)あらゆる相互作用がその運動法則に従う。いまある例では、力の法則により F がどのようなものかわかり、力学によって運動を指定するにはどのように F を使えばよいのかわかる。ということで、素粒子物理の力学のゴールは、場の量子論の枠組みの中で粒子の振る舞いを正しく記述する運動法則ひとそろえを推定することになる。

しかしながら、粒子の振る舞いのよくある特徴のいくつかは、相互作用の詳細とは何の関係もない。むしろ、それらは相対論によって直接決まってしまうたり、あるいは量子力学から、あるいはまたその両方の組み合わせから決まってしまう。たとえば、相対論では、エネルギーと運動量はつねに保存するが、(静止)質量は保存しない。それゆえ、 Δ は p と π の合計よりも重いにもかかわらず、 $\Delta \rightarrow p + \pi$ という崩壊は完全に許容される。このような反応は、質量保存を厳格に要求する古典力学では不可能だ。さらに、相対論は(静止)質量がゼロの粒子の存在を許すし、つまり質量のない粒子という極限の発想は古典力学では許されず、後に見ていくように、光子とグルーオンには質量がない。

量子力学では、物理体系は状態 s (シュレーディンガー方程式の波動方程式 ψ_s あるいはディラック理論のケット $|s\rangle$) で記述される。散乱や崩壊などの物理過程は、ある一つの状態から別の状態への遷移から成り立っている。しかし、量子力学では初期状態を与えたからといって、終状態が一意的に決まるわけではない。一般に、われわれが計算できるのは、ある遷移が起こる確率だけである。この不確定さは、粒子の振る舞いの中に見出される。たとえば、荷電パイ中間子は通常ミュー粒子とニュートリノに崩壊するが、まれには電子とニュートリノに崩壊する。もともとのパイ中間子に違いはなく、完全に同じだ。これはたんに粒子がどちらにも崩壊できるという特性なのだ。

最後に、相対論と量子力学の統合によって、それらが単独では生むことのできない特別なボーナスがもたらされた。それらは、反粒子(粒子と同じ質量、同じ寿命をもち、電荷は反対)の存在と、パウリの排他律(非相対論的な量子力学ではたんに経験則的な仮定であった)の証明と、いわゆる *CPT* 定理である。これらについては後でさらに詳しく説明するが、ここで言及したのは、これらの特質が、ある特定の模型によって導き出されるのではなく、力学体系そのものから得られるということを強調したかったからだ。劇的な革命がない限り、それらは不変なのだ。ところで、栄光に包まれた場の量子論は難しく深遠ではあるが、心配するには及ばない。ファインマンが、美しく、直感的にわかりやすく、学ぶのがそれほど難しくない定式化を發明している。これについては6章で見ていく(すでに存在している場の量子論からファインマン則を導き出すことは別の話であり、それをやろうと思うと大学院生の授業の後半の大部分を使ってしまう。だから、ここではそれについてはやらない)。

1960年代から1970年代にかけて、重力以外の、素粒子の知られているすべての相互作用を記述する理論が現れた(いまの段階でいえるのは、重力はあまりに弱すぎて通常の粒子反応にはまったく寄与しないということだ)。この理論、より正確には、素粒

子の2種類のグループ(クォークとレプトン)のうゑに立脚した、量子電磁気学と、グラシヨ-ワインバーグ-サラムによる電弱相互作用の理論と、量子色力学のひとまとめは、標準模型とよばれるようになった。それが素粒子物理学の最後だとは誰も思っていないが、少なくともいまのわれわれはすべてのカード(粒子)を得た。1978年に標準模型が「正統」であるという地位を獲得して以来、あらゆる実験の結果が標準模型と合っている。さらに一つ、魅力的な^{たんび}耽美的特徴がある。すべての基本的相互作用は、局所ゲージ対称性の要求という一般原理によって導き出されるのだ。さらなる将来の発展は、標準模型の否定ではなく、拡張であるように思える。本書は「標準模型の導入」とよんでもよいくらいである。

その別名が示す通り、本書は素粒子物理学の理論について述べており、実験の手法や装置についてはほとんど触れていない。これらは重要な点であり、それらを教科書の中に組み入れてもよいという議論もあるが、内容が散漫になり、理論そのものの簡明性や美しさの邪魔をする可能性がある。読者が議論している内容の実験について勉強することをすすめるし、ときどき読みやすい記事の参照もする。だがいまここでは、実験に関する最もよくある二つの質問に対して、非常に短い回答を与えるにとどめる。

素粒子をどのように生成するのか？

電子と陽子は、通常物質を構成する安定粒子なので簡単だ。電子が必要ななら、一片の金属を熱すればよい。勝手に電子が飛び出してくる。もし電子ビームがほしいなら、電子を引きつけるための正に帯電した板を近くに置いて小さな穴を開ければよい。穴を通り抜けてきた電子がビームになる。このような電子銃が、テレビのブラウン管の部品、あるいはオシロスコープ、そして電子加速器(図1.1)になっている。

陽子を得るには、水をイオン化させる(いい換えると、電子を剥ぎ取る)。実際のところ、陽子を標的として使おうとするなら、電子について気を使う必要さえない。非常に軽い電子は、高いエネルギーの入射粒子によって吹き飛ばされてしまうからだ。それゆゑ、水素タンクは実質的には陽子タンクなのだ。もっとエキゾチックな粒子を得るにはおもに三つの方法がある。宇宙線を使うか、原子核反応を使うか、粒子加速器を使うか、である。

宇宙線：地球はつねに宇宙空間から飛来する高エネルギー粒子(おもに陽子)の爆撃を受けている。これらの粒子の源が何であるかは依然として謎のままだ。いずれにせよ、それらが大気上層の原子にぶつかると、二次粒子(地表に届くとき

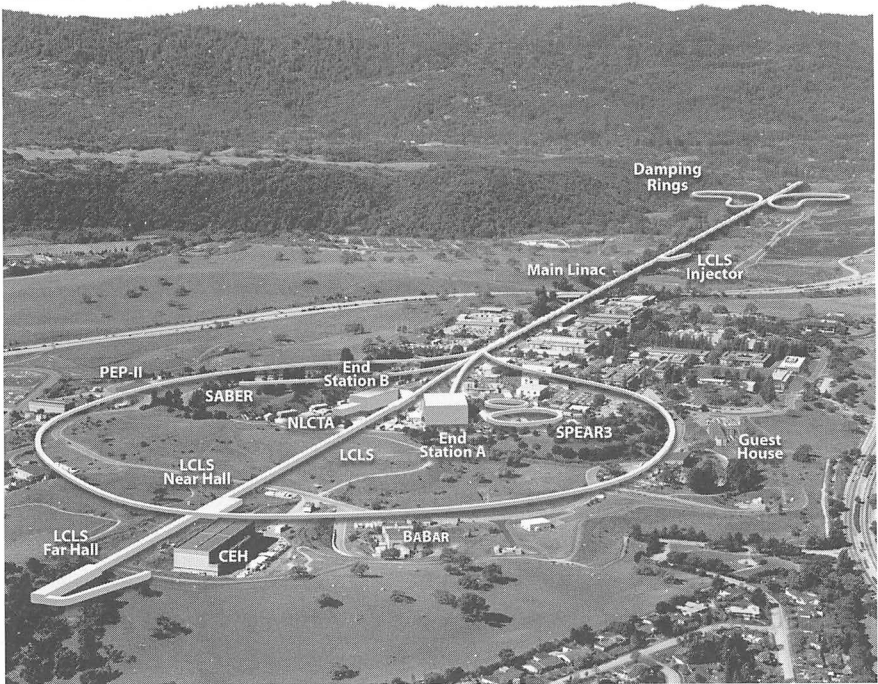


図1.1 SLAC 国立加速器研究所全景. 直線が線形加速器 (提供: SLAC)

にはおもにミュー粒子とニュートリノ)を生成し、その二次粒子が四六時中雨のように降り注いでいる。素粒子の源泉として、宇宙線には二つの利点がある。それらは無料で、そして実験室で到達できるよりもはるかに高いエネルギーをもっている。しかし、二つの大きな欠点がある。現実的な大きさの検出器に当たる頻度が非常に低く、また、まったくコントロールできない。そのため、宇宙線を使った実験には忍耐と幸運が必要になる。

原子核反応：放射性原子核が崩壊するとき、中性子やニュートリノやアルファ線とよばれるもの（実際にはアルファ粒子は二つの中性子と二つの陽子の束縛状態）やベータ線（実際には電子あるいは陽電子）やガンマ線（実際には光子）などさまざまな粒子を放出する。

粒子加速器：電子または陽子からスタートして、それらを高エネルギーにまで加速し、標的にぶつける（図1.1）。吸収材と磁石をうまく配置することで、標的にぶつけてできた粒子の中から研究に使いたいものを分離抽出することができる。今

日ではそのような方法で、陽電子、ミュー粒子、パイ中間子、 K 中間子、 B 中間子、反陽子、そしてニュートリノなどの強度の高い二次ビームを生成可能である。そしてその二次ビームをさらにまた別の標的に当てることもできる。電子、陽子、陽電子、反陽子という安定粒子は、強力な磁石により軌道を保たれる蓄積リングに放り込まれることさえあり、その中を数時間も高速で周回し、必要なときに引き出される [1].

一般に、生成したい粒子が重くなればなるほど、衝突のエネルギーはより高くなければならない。だからこそ、歴史的に、軽い粒子がまず発見される傾向があり、時間が経つにつれて加速器がより強力になり、より重い粒子が発見されているのだ。一つの粒子を動かない標的に入射するのに比べて、二つの高速な粒子を正面衝突させると圧倒的に高い相対エネルギーを得られることがわかる（もちろん、こうするにははるかに難しい照準合わせが必要だ）。こうした理由で、現代の実験の多くは蓄積リングの交差で得られるビーム衝突を使っている。もし粒子が最初の交差で衝突に失敗しても、次の周回でまた衝突するチャンスがあるからだ。実際のところ、電子と陽電子（あるいは陽子と反陽子）は同じリングを使うことができ、その中で正電荷の粒子はある方向へ、負電荷の粒子はその反対方向に回っている。不運なことに、荷電粒子が加速すると放射光を出し、結果としてエネルギーを失ってしまう。円運動の場合（もちろん加速を含んでいる）シンクロトロン放射とよばれ、高いエネルギーをもつ電子の蓄積リングでの効率を著しく制限する（同じエネルギーならば、より重い粒子の加速度は小さく、シンクロトロン放射はそれほど問題にならない）。そのため、電子の散乱実験は徐々に線形衝突型加速器に代わっていき、一方で蓄積リングは陽子やもっと重い粒子に使われ続けるだろう。

素粒子物理学者がいつも高いエネルギーを求めるのにはもう一つ理由がある。概して、衝突のエネルギーが高いと、二つの粒子は互いにより近づく。だから、もし非常に近距離での相互作用を研究したいときには、非常に高いエネルギーをもつ粒子が必要になる。量子力学の言葉では、運動量 p の粒子はド・ブロイの式 $\lambda = h/p$ で与えられる波長 λ をもつ。ここで h はプランク定数である。大きな波長（低い運動量）では、相対的に大きな構造を見ることしかできない。何か極度に小さいものを検査するには、その大きさと同じくらい短い波長、つまり高い運動量が必要なのだ。これを不確定性原理 ($\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$) で考えることもできる。つまり、 Δx を小さくしたければ、 Δp は大きくなければならない。でも結局のところ、結論は同じだ。短距離を探



図1.2 フェルミ国立加速器研究所（フェルミラボ）全景．後ろに見える大きな円がテバトロン（提供：フェルミラボ Visual Media Services）

査するには高いエネルギーが必要である。

いまのところ世界中で最も高いエネルギーを達成しているのはフェルミラボのテバトロンで、最大のビームエネルギーはほぼ1 TeVである（図1.2）。テバトロン（陽子-反陽子衝突型加速器）は1983年に稼働開始し、その後継者である Superconducting Supercollider (SSC) は1993年まで建設が続けられたが、議会によって中止された。その結果として、主要な発達が不可能な時期が長く続いた。この不毛な時代は、欧州原子核研究機構 (CERN) で Large Hadron Collider (LHC) が2008年にデータ収集を開始することで終わった（図1.3）。LHCはビームエネルギーが7 TeVを超えるように設計されていて、この新たな地平によってヒッグス粒子*1、もしかしたら超対称性粒子、そして一番よいのはまったく予期されていなかった何かが発見されることだ [2]。LHCの後に何が来るかははっきりしない。一番あり得るのは、提案されている International Linear Collider (ILC)だ。しかし、加速器はあまりに巨大になり（SSCの周長は87 kmの予定だった）、さらなる巨大化の余地はない。たぶん、加速器の時代は終わりに近づいていて、素粒子物理学はさらなる高エネルギーの情報を求めて、天体物

*1 訳注：2012年にLHCでヒッグス粒子は発見された。



図1.3 欧州原子核研究機構 (CERN) 全景. 円がLHCトンネル (その前はLEP) の通り道を示す. ジュネーブとモンブランが背景に見える (提供: CERN)

理学あるいは宇宙論にならなければならないのかもしれない. あるいは, もしかしたら, 誰かがエネルギーを素粒子に絞り込む新たなうまいアイデアを生むのかもしれない*2.

素粒子をどのように検出するのか?

ガイガーカウンター, 霧箱, 泡箱, スパークチェンバー, ドリフトチェンバー, 写

*2 巨視的なスケールでは, 使われているエネルギーは大したことはない. 結局のところ, 1 TeV (10^{12} eV) はたった 10^{-7} J である. 問題なのはエネルギーをどうやって粒子に送り込むかだ. そうすることを妨げる物理法則はないのだが, いまのところ巨大な (かつ高価な) 機材を使う以外の方法を誰も思いついていない.

真乳剤、チェレンコフカウンター、シンチレーター、光電子増倍管など、たくさんの種類の粒子検出器が存在する。実際のところ、現代の典型的検出器はこれらの装置すべてを並べたもので、それらがコンピューターにつながれ、粒子を追跡しその飛跡をスクリーンに映し出す（図1.4）。

詳細を気にする必要はないが、一つだけ覚えておかなければならないことがある。粒子検出のたいていの仕組みでは、高エネルギーの荷電粒子が物質を通過する際その経路に沿って原子をイオン化しているという事実を利用している。そして、そのイオンが、それぞれに応じて、しずく（霧箱）あるいは泡（泡箱）あるいは火花（スパークチェンバー）の「種」として働く。しかし電気的に中性の粒子は、物質をイオン化しないので足跡を残さない。たとえば、図1.9の泡箱の写真を見ると、5個の中性粒子は「見えない」ことがわかる。それらの経路を、写真中の荷電粒子の飛跡を解析し、各頂点でエネルギーと運動量の保存を課すことによって再構成することができる。もう一つ大事なのは、写真中のほとんどの飛跡が曲がっていることである（実際は、多

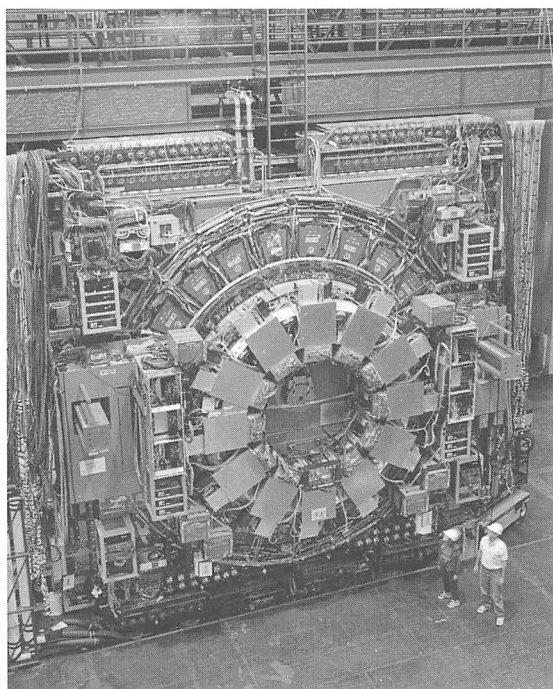


図1.4 フェルミラボのCDF検出器。トップクォークが発見された（提供：フェルミラボ Visual Media Services）

かれ少なかれすべてが曲線である。直線だと思ふものがあつたら定規を当ててみよ)。泡箱は巨大な磁石の二極間に設置されていた。磁場 B 中では、電荷 q と運動量 p をもつ粒子は、有名なサイクロトロン式の $R = pc/qB$ で与えられる半径 R の円運動をする。ただし c は光速とする。よつて、磁場を知つていれば、飛跡の曲率から非常に単純に粒子の運動量を求めることができる。さらに、曲線の向きからただちに電荷の符号もわかる。

単位

素粒子は小さいので、グラムやエルグ、ジュールなどの通常の単位は大きすぎて不便だ。原子物理では、1V のポテンシャル差によつて加速されたときに電子が獲得するエネルギーを電子ボルト ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$) という単位として導入した。eV は小さすぎて不便なのだがこれを使うことにしよう。原子核物理では keV (10^3eV) を使う。素粒子物理での典型的なエネルギーは、MeV (10^6eV)、GeV (10^9eV)、あるいは TeV (10^{12}eV) だったりする。運動量は、MeV/c (あるいは GeV/c など) の単位で測られ、質量の単位は MeV/c² だ。よつて陽子は、 $938\text{MeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-24}\text{g}$ の重さになる。

実際のところ、素粒子の理論家は怠け者で (あるいは、見方によつては賢いので)、彼らは式の中でめつたに c や \hbar ($\hbar \equiv h/2\pi$) を使わない。次元を正しくそろえるために、一番最後に c や \hbar を入れればよいようにしている。彼らがいつもいうように「 $c = \hbar = 1$ とすればよい」。これは結局のところ、時間は cm を単位として、質量とエネルギーは cm の逆数を単位として使うことになる。つまり、時間の基本単位は光が 1 cm 進むのにかかる時間で、エネルギーの基本単位は波長 $2\pi\text{cm}$ の光子のエネルギーである。計算を終えた最後に、通常の単位に戻せばよい。これによつて物事は非常にすっきりとするのだが、本書ではすべての c と \hbar を残しておこう。というのは、そうすることで、先に進んでも次元が合つているかどうかを自分で確認できるからだ (うつとうしく感じるかもしれないが、 \hbar を無視する方が、誰かが \hbar を正しい場所によりみがえらせるよりもはるかに簡単なのだ)。

最後に、電荷の単位に何を使うかという問題がある。物理の初級コースでは、たいていの教師が SI 単位系を好む。SI 単位系では、電荷はクーロンで測られるので、クーロンの法則は以下になる。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{SI})$$

応用コースでは電荷を静電単位 (esu) で測るガウス単位系が使われ、クーロンの法則は以下になる。

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{G})$$

しかし、素粒子物理学者はローレンツ-ヘヴィサイド単位系を好み、クーロンの法則は以下のかたちになる。

$$F = \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{HL})$$

それら三つの単位系での電荷は以下のような関係になる。

$$q_{\text{HL}} = \sqrt{4\pi} q_{\text{G}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} q_{\text{SI}}$$

本書では混乱を避けるため、ガウス単位系のみを使っていく。可能な限り、微細構造定数

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.036}$$

を用いて結果を表していく。ここで、 e はガウス単位系での電子の電荷である。たいていの素粒子物理学の教科書ではこれを $e^2/4\pi$ と書く。なぜなら、ローレンツ-ヘヴィサイド単位系を使って $c = \hbar = 1$ としているからだ。が、いかなる単位系でも数値は $1/137$ で一致する。

さらに勉強したい人のための参考図書

1960年代初頭以降、カリフォルニア大学バークレー校の Particle Data Group は、確認されている粒子とそれらの性質をまとめたリストを定期的に発行している。これらは1年おきに、Review of Modern Physics か Journal of Physics G で出版され、その要約を載せた(無料の)小冊子を <http://pdg.lbl.gov> から注文することができる。当初は、この要約は財布に入るカードの大きさであったが、2006年には315ページもある分厚いものとなった。これを Particle Physics Booklet (PPB) と今後表記する。素粒子物理学を学ぶ学生全員がそれをもつべきだ。家に忘れてきてはならない！ より長い方は、Review of Particle Physics (RPP) とよばれ、専門家にとってのバイブルだ。2006年版は1231ページに達し、あらゆるトピックについて、その道の世界的権威によって書かれた信頼できる記事も載っている [3]。素粒子に関するどんな話題についても、確実かつ最新の情報を得ることができる (Particle Data Group のウェブ

サイトからアクセス可能)。

素粒子物理は、広範であり、かつ急速に変化している学問である。本書の目的は、いくつかの重要な概念と方法を紹介して、そこから何を学ぶべきかというセンスをもってもらい、願わくは、その先をもっと見たいという好奇心を刺激することである。もし場の量子論についてさらに詳しく学びたい場合は、以下をとくにおすすめる。

- ・ J. D. Bjorken and S. D. Drell: Relativistic Quantum Mechanics and Relativistic Quantum Fields (McGraw-Hill, 1964).
- ・ D. Itzykson and J.-B. Zuber: Quantum Field Theory (McGraw-Hill, 1980).
- ・ M.E. Peskin and D. V. Schroeder: An Introduction to Quantum Field Theory (Perseus, 1995).
- ・ L.H. Ryder: Quantum Field Theory (Cambridge University Press, 1985).
- ・ J.J. Sakurai: Advanced Quantum Mechanics (Addison-Wesley, 1967).

素粒子物理については、以下がとりわけ有用である(平易なものから順に並べてある)。

- ・ F. Close, M. Marten and C. Sutton: The Particle Explosion (Oxford University Press, 1987).
- ・ H. Frauenfelder and E.M. Henley: Subatomic Physics, 2nd edn (Prentice-Hall, 1991).
- ・ K. Gottfried and V. F. Weisskopf: Concepts of Particle Physics (Oxford University Press, 1984).
- ・ D.H. Perkins: Introduction to High-Energy Physics, 4th edn (Cambridge University Press, 2000).
- ・ F. Halzen and A. D. Martin: Quarks and Leptons (John Wiley & Sons, 1984).
- ・ B. P. Roe: Particle Physics at the New Millennium (Springer, 1996).
- ・ I.J.R. Aitchison and A.J.G. Hey: Gauge Theories in Particle Physics, 3rd edn (Institute of Physics, 2003).
- ・ A. Seiden: Particle Physics: A Comprehensive Introduction (Addison-Wesley, 2005).
- ・ C. Quigg: Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions (Addison-Wesley, 1997).

参 考 書

- [1] 包括的な参考文献は、Q. W. Chao: American Journal of Physics, **74**, 855 (2006) を参照。
- [2] C. L. Smith: Scientific American, **71** (July 2000); (a) L. Lederman: Nature, **448**, 310 (2007).
- [3] 現時点での参考文献としては、W.-M. *et al.*: Journal of Physics, G **33**, 1 (2006)。しかし、最新のバージョンを使用したいだろうから、たんに Particle Physics Booklet と Review of Particle Physics を参考文献として挙げておく。関連事項に更新があると、毎年それに加わる。