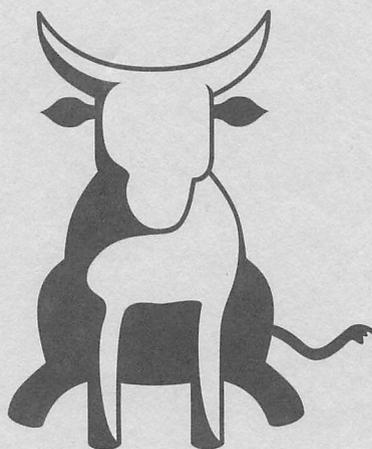


グリフィス
素粒子物理学

Introduction to Elementary Particles

David J. Griffiths

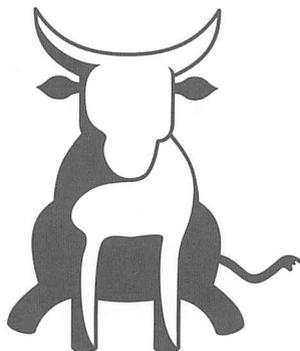


花垣 和則・波場 直之
訳

丸善出版

グリフィス
素粒子物理学

Introduction to Elementary Particles
David J. Griffiths



花垣 和則・波場 直之
訳

丸善出版

Introduction to Elementary Particles

Second, Revised Edition

by

David Griffiths

Copyright © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

All Rights Reserved. Authorised translation from the German language edition published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Maruzen Publishing Co., Ltd. and is not the responsibility of Wiley. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original publisher.

Japanese translation rights arranged with John Wiley & Sons Limited through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo.

第2版のはじめに

本書の初版が出版されてから20年が経過した。大部分がそれなりに最新のままだということは、満足であると同時に苦痛でもある。念のためにいっておくと、完全に抜け落ちている点はいくつかある。たとえば、トップクォークの存在は当時は確認されていなかったし、(よい理由があるわけでもないのに)ニュートリノは一般的に質量がゼロであると仮定されていた。しかし、本質的には本書の主題は標準模型であり、その標準模型は、驚くほど堅固であることが証明された。これは、理論が賞賛に値しているのと同時に、私たち素粒子物理学者全体の想像力に対する告発でもある。素粒子物理学の歴史の中で、これほどまで、真に革命的な発見のない期間というのはなかったと思う。ニュートリノ振動はどうだろう。確かに、素晴らしい話ではあるが(この話題についての章を追加した)、この尋常ではない現象は、標準模型に非常にうまく収まっているし、(もちろん後知恵ではあるが)振り返ってみると、もしニュートリノ振動がなかったら、もっと驚くべきことであった。超対称性と弦理論はどうだろう。その通り、いまのところ憶測にすぎない(現代の理論の発展に関する章を追加した)。確かな実験的検証がある限り、(ニュートリノ質量と混合を含む)標準模型が依然として支配者なのだ。

すでに述べた二つの新しい章に加えて、1章で歴史を最新のものに、5章を短く、6章で黄金律に関するより説得力のある紹介を、そして、電磁形状因子とスケールリングを説明する8章の大部分を削除した(これは、クォーク模型を確固たるものとした深非弾性散乱実験を解釈する上では決定的に重要であったが、今日ではクォークの存在を疑う人はいないし、そこでの詳細は本質的にはもはやそれほど重要ではない)。そして、8章で削除しなかった部分と、元々の9章とを組み合わせ、ハドロンに関する新しい章をつくった。これら以外の変更はあまり重要ではない。

多くの人々が私に提案や訂正を送ってくれ、また、私の質問に辛抱強く答えてくれた。全員に感謝することはできないが、とくにたくさん助けてくれた何人かにお礼をいいたい。Guy Blaylock(マサチューセッツ大学アマースト校)、John Boersma(ロチェスター大学)、Carola Chinellato(ブラジル)、Eugene Commins

(カリフォルニア大学バークレー校), Mimi Gerstell (カリフォルニア工科大学), Nahmin Horwitz (シラキュース大学), Richard Kass (オハイオ州立大学), Janis McKenna (UBC), Nic Nigro (シアトル大学), John Norbury (ウィスコンシン大学ミルウォーキー校), Jason Quinn (ノートルダム大学), Aaron Roodman (SLAC), Natthi Sharma (イースタンミシガン大学), Steve Wasserbeach (ハバフォード大学), そして, とりわけ Pat Burchat (スタンフォード大学) に感謝する.

この作業の一部は, スタンフォード大学と SLAC でサバティカルの間に行った. とくに, この作業を可能にしてくれた Patricia Burchat と Michael Peskin に感謝する.

David J. Griffiths

2008

初版のはじめに

この素粒子理論の序論は、おもに物理学を専攻している学部上級生を対象としている。同僚のほとんどは、このテーマは彼らには不適切だと考えている。というのも、数学が難しすぎて、現象論が広範囲に散らばりすぎていて、定式化がややふやで、将来内容が変わってしまうかもしれないからだ。10年前なら私は同意しただろう。しかし、過去10年間で、物事は驚くほど整理され、素粒子物理学は成熟したといえる。学ぶべきことがもっとたくさんあるのはあきらかだが、現在までにすでに筋の通った統一された理論構造がある。それは、大学院まで勉強しないでは、あるいは、現代物理学のわずかな一部分として薄く定性的な形で伝えるには、あまりにも刺激的かつ重要すぎるものだ。私は、素粒子物理学を標準の学部課程カリキュラムに入れるときが来たと思っている。

残念なことに、この分野の研究文献は学部生にとってはあきらかに手も足も出ない。また、いまでも大学院生向けの優れた教科書はいくつかあるが、それらは、場の量子論ではないにしても、高度な量子力学を十分に準備しなければならない。逆の極端としては、多くの一般書や、Scientific American の優れた記事が多数ある。しかし、学部生のために特別に書かれたものはほとんどない。本書は、その必要性を満たすための努力の成果で、私がリード大学でときどき担当した素粒子の授業の学期一つ分を元にしていて。その受講生たちは、電磁気学 (Lorrain の教科書と Corson の教科書のレベル) と、量子力学 (Park の教科書のレベル) を履修しており、特殊相対論はかなり熟知していた。

想定しているおもな読者に加えて、本書が、大学院初年度の学生のための初めての教科書、あるいは、より専門的な内容の準備として役立つことを願っている。このことを念頭に置きつつ、より完璧かつ柔軟であるために、本書には、一つの学期で楽にこなすことができるよりも多くの題材を盛り込んだ (私自身の講座では、1章と2章を学生自身に読んでもらって、3章から講義を始めている。5章を全部飛ばして、6章と7章を集中してやり、8章の最初の2節の議論の後、10章に飛ぶ)。読者 (および教師) の手助けのために、各章とも、目的と内容、必要とされる予備知識、および、その後の内容における位置付けについての簡単なイン

トログクシオンから始めている。

本書は、私がスタンフォード線形加速器センター (SLAC) でサバティカルの間
に書いたものである。Sidney Drell 教授と理論グループのメンバーのホスピタ
リティに感謝する。

David J. Griffiths

1986

訳者まえがき

原書は、素粒子物理学実験の研究室で、4年生、あるいは修士課程の初年度に、ゼミで広く使われているのではないかと思います。そのような有名な本を、私のような者が訳してよいのか、訳することができるのか非常に心配しました。

実際、翻訳の作業を始めてみると、予想していた通りではあったのですが、「翻訳」という作業は「著述」以上に難事業でした。数式の説明や、物理法則の説明自体は自明なのですが、著者が込めたメッセージをどう日本語にしたらよいのか思いつかない、あるいは、微妙なニュアンスをどう伝えればよいのか考え込む、こういう時間が翻訳作業の大部分を占めました。自分の考えに基づいての説明になってしまわないよう、著者の思考を汲み取りつつ、文章の背後にある意図に思いを巡らせつつ、物理の説明として間違っていない文章をつくるのは、自分自身との葛藤でもありました。

しかし、そのような読み方をしたおかげで、以前ゼミで使ったときには物理の内容しか気にしていなかったために見えなかった、教育という観点での戦略や、思考の流れが多少なりとも見えてくるようになりました（気のせいかもしれませんが）。私の力量不足のために、それをうまく翻訳し表現することができなかったかもしれませんが、一読者として、本全体を眺めると、著者の戦略は「イントロダクション」として素晴らしい^{さじ}匙加減であったと実感しています。拙訳を自信をもってお勧めできるかどうかわかりませんが、原著は素晴らしくよくまとまったものであり、冒頭に書いたように、4年生あるいは修士課程の初年度に初めて素粒子物理学に触れる学生にとっては最適の書の一つであることを再認識しました。

最後に、本書を日本語に翻訳する機会を与えてくださった原著者のグリフィス氏に感謝いたします。また、辛抱強く翻訳作業にお付き合いいただいた丸善出版の担当者の方々、とくに、校正でお世話になった村田レナさんに感謝いたします。そして、本書の翻訳という企画を提案してお声がけくださった元丸善出版の沼澤修平さんに心からお礼申し上げます。

グリフィス氏のこの本は、素粒子物理学の初学者によい本だと思います。しかし、理論の研究者として、どうしてもコメントしておかなくてはいけないと思う箇所があります。

一つ目は、6章、7章のくりこみに関してです。くりこみが開発されたときは著者も書くように、無限大の問題を「絨毯じゅうたんの下にごみを隠す」たんなる処方箋であって、理論とは程遠いように思われていました。しかしながら、現代では、くりこみは、たんに「絨毯の下にごみを隠す」のではなく、自然の階層性を正しく記述し（クォークとグルーオンの詳細なダイナミクスを知らなくても水素原子のエネルギースペクトルを正確に計算できますよね）、量子場の理論だけでなく、スピン系などの多様な問題にも適用可能な普遍的な理論だとわかっています。また、発散を差し引いた残りの有限部分（たとえば、 m や g ）が、エネルギー依存性（「走る」質量、「走る」結合定数）をもつと理解するよりは、「高エネルギー（近距離）から低エネルギー（長距離）への粗視化のスケーリングの情報が、発散に含まれていることが本質」で、物理量のエネルギー依存性があらわれると理解した方がよいです。こうしたくりこみ理論は精密に機能していて、QCDの漸近的自由や、QEDの微細構造定数 137 分の 1 のエネルギーによる変化が実験と一致します。そして、電子の磁気能率などは実験結果と 1 兆分の 1 以下の精度で一致するのです。

二つ目は、7章で、「 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の崩壊は、 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ と基本的に同じで、始状態の二つのクォークがたまたま束縛状態になっているとみなせる」と記述がありますが、この崩壊過程は、「たまたま束縛状態になっている」とみなすのではなく、もっと豊かな物理が背後に存在することを知らせていただきたいのです。それは、「QCDのカイラル対称性の自発的破れ」と「量子効果での対称性の破れ（アノマリー）」の二つです。実際、 π をカイラル対称性の自発的破れに付随する南部・ゴールドストーンボソンとみなしたうえで、アノマリーを考慮すると、崩壊過程や散乱過程が実験と非常によく一致します。

また、12.3節のレプトジェネシスに関して、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ と $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ などニュートリノ・反ニュートリノの振動の違いに寄与する MSN 行列中の CP 位相だけだと、多くの人が考えている右巻きニュートリノの崩壊によるレプトジェネシスは機能しないことに注意して下さい（ただし、近年この CP 位相だけで機能するレプトジェネシスも研究されています）。

このような話をきちんとしようと思ったら、さらにたくさんのページ数や数学

的準備が必要ですから、この本の範囲を超えてしまうことはよくわかります。ただ、この本の先に、もっと深遠な物理の世界が広がっていることを頭の隅に残しておいてほしいものです。それを踏まえたくて、本書をさらに進んだ勉強へ踏み出すきっかけにさせていただけたらと思います。

最後に、業績をフェアに評価するのは難しいことだと思いますが、個人的には、本文の「ゴールドストーンボソン」や「ウォードの恒等式」は、「南部-ゴールドストーンボソン」、「ウォード-高橋の恒等式」と覚えてほしいと思います。

波場 直之

注：原書のあきらかなミスや式の引用間違いについては、修正しました。

公式と物理定数

粒子データ

質量 (MeV/c²), 寿命 (秒), 電荷 (陽子の電荷を 1 とした単位)

レプトン (スピン 1/2)

世代	フレーバー	電荷	質量*	寿命	おもな崩壊
第 1	e (電子)	-1	0.510 999	∞	-
	ν_e (電子ニュートリノ)	0	0	∞	-
第 2	μ (ミューオン)	-1	105.659	2.19703×10^{-6}	$e\nu_\mu\bar{\nu}_e$
	ν_μ (ミューニュートリノ)	0	0	∞	-
第 3	τ (タウ)	-1	1776.99	2.91×10^{-13}	$e\nu_\tau\bar{\nu}_e, \mu\nu_\tau\bar{\nu}_\mu, \pi^-\nu_\tau$
	ν_τ (タウニュートリノ)	0	0	∞	-

* ニュートリノの質量は非常に小さいので、ほとんどの場合ゼロとしてよい。詳しくは 11 章を参照。

クォーク (スピン 1/2)

世代	フレーバー	電荷	質量*
第 1	d (ダウン)	-1/3	7
	u (アップ)	2/3	3
第 2	s (ストレンジ)	-1/3	120
	c (チャーム)	2/3	1 200
第 3	b (ボトム)	-1/3	4 300
	t (トップ)	2/3	174 000

* 軽いクォークの質量は正確でなく推測値である。メソンやバリオンの中での有効質量は 5 章を参照。

力の媒介粒子 (スピン 1)

力	力の媒介粒子	電荷	質量	寿命	主崩壊
強い力	g (8 グルーオン)	0	0	∞	-
電磁力	γ (光子)	0	0	∞	-
弱い力	W^\pm (荷電)	± 1	80 420	3.11×10^{-25}	$e^+ \nu_e, \mu^+ \nu_\mu, \tau^+ \nu_\tau, cX$ \rightarrow ハドロンの
	Z^0 (中性)	0	91 190	2.64×10^{-25}	$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \tau^+ \tau^-, q\bar{q}$ \rightarrow ハドロンの

バリオン (スピン 1/2)

バリオン	含有クォーク	電荷	質量	寿命	主崩壊
$N \begin{cases} p \\ n \end{cases}$	uud udd	1 0	938.272 939.565	∞ 885.7	- $p e \bar{\nu}_e$
Λ	uds	0	1115.68	2.63×10^{-10}	$p\pi^-, n\pi^0$
Σ^+	uus	1	1189.37	8.02×10^{-11}	$p\pi^0, n\pi^+$
Σ^0	uds	0	1192.64	7.4×10^{-20}	$\Lambda\gamma$
Σ^-	dds	-1	1197.45	1.48×10^{-10}	$n\pi^-$
Ξ^0	uss	0	1314.8	2.90×10^{-10}	$\Lambda\pi^0$
Ξ^-	dss	-1	1321.3	1.64×10^{-10}	$\Lambda\pi^-$
Λ_c^+	udc	1	2286.5	2.00×10^{-13}	$pK\pi, \Lambda\pi\pi, \Sigma\pi\pi$

バリオン (スピン 3/2)

バリオン	含有クォーク	電荷	質量	寿命	主崩壊
Δ	uuu, uud, udd, ddd	2, 1, 0, -1	1232	5.6×10^{-24}	$N\pi$
Σ^*	uus, uds, dds	1, 0, -1	1385	1.8×10^{-23}	$\Lambda\pi, \Sigma\pi$
Ξ^*	uss, dss	0, -1	1533	6.9×10^{-23}	$\Xi\pi$
Ω^-	sss	-1	1672	8.2×10^{-11}	$\Lambda K^-, \Xi\pi$

擬スカラーメソン (スピン 0)

メソン	含有クォーク	電荷	質量	寿命	主崩壊
π^\pm	$u\bar{d}, d\bar{u}$	1, -1	139.570	2.60×10^{-8}	$\mu\nu_\mu$
π^0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	0	134.977	8.4×10^{-17}	$\gamma\gamma$
K^\pm	$u\bar{s}, s\bar{u}$	1, -1	493.68	1.24×10^{-8}	$\mu\nu_\mu, \pi\pi, \pi\pi\pi$
K^0, \bar{K}^0	$d\bar{s}, s\bar{d}$	0	497.65	$\left\{ \begin{array}{l} K_S^0 : \\ 8.95 \times 10^{-11} \\ K_L^0 : \\ 5.11 \times 10^{-8} \end{array} \right.$	$\pi\pi$ $\pi e\nu_e, \pi\mu\nu_\mu, \pi\pi\pi$
η	$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$	0	547.51	5.1×10^{-19}	$\gamma\gamma, \pi\pi\pi$
η'	$(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})/\sqrt{3}$	0	957.78	3.2×10^{-21}	$\eta\pi\pi, \rho\gamma$
D^\pm	$c\bar{d}, d\bar{c}$	1, -1	1869.3	1.04×10^{-12}	$K\pi\pi, K\mu\nu_\mu, Ke\nu_e$
D^0, \bar{D}^0	$c\bar{u}, u\bar{c}$	0	1864.5	4.1×10^{-13}	$K\pi\pi, Ke\nu_e, K\mu\nu_\mu$
D_s^\pm	$c\bar{s}, s\bar{c}$	1, -1	1968.2	5.0×10^{-13}	$\eta\rho, \phi\pi\pi, \phi\rho$
B^\pm	$u\bar{b}, b\bar{u}$	1, -1	5279.0	1.6×10^{-12}	$D^*\ell\nu_\ell, D\ell\nu_\ell, D^*\pi\pi\pi$
B^0, \bar{B}^0	$d\bar{b}, b\bar{d}$	0	5279.4	1.5×10^{-12}	$D^*\ell\nu_\ell, D\ell\nu_\ell, D^*\pi\pi$

ベクトルメソン (スピン 1)

メソン	含有クォーク	電荷	質量	寿命	主崩壊
ρ	$u\bar{d}, (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}, d\bar{u}$	1, 0, -1	775.5	4×10^{-24}	$\pi\pi$
K^*	$u\bar{s}, d\bar{s}, s\bar{d}, s\bar{u}$	1, 0, -1	894	1×10^{-23}	$K\pi$
ω	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$	0	782.6	8×10^{-23}	$\pi\pi\pi, \pi\gamma$
ψ	$c\bar{c}$	0	3097	7×10^{-21}	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, 5\pi, 7\pi$
D^*	$c\bar{d}, c\bar{u}, u\bar{c}, d\bar{c}$	1, 0, -1	2008	3×10^{-21}	$D\pi, D\gamma$
Υ	$b\bar{b}$	0	9460	1×10^{-20}	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$

スピン 1/2

パウリ行列：

$$\sigma_x \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \epsilon_{ijk} \sigma_k, \quad (\mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\sigma})(\mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\sigma}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + i \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

$$\sigma_i^\dagger = \sigma_i = \sigma_i^{-1}, \quad e^{i\boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{\sigma}} = \cos \theta + i(\hat{\boldsymbol{\theta}} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \sin \theta$$

ディラック行列：

$$\gamma^0 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \sigma^i \equiv \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ -\sigma_i & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^{0\dagger} = \gamma^0, \quad \gamma^{i\dagger} = -\gamma^i, \quad \gamma^0 \gamma^{\mu\dagger} \gamma^0 = \gamma^\mu$$

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}, \quad g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix}$$

$$\gamma^5 \equiv i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \{\gamma^\mu, \gamma^5\} = 0, \quad (\gamma^5)^2 = 1$$

(積のルールとトレース定理は付録 C を参照)

ディラック方程式：

$$i\hbar\gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$$

$$(\not{p} - mc)u = 0, \quad (\not{p} + mc)v = 0, \quad \bar{u}(\not{p} - mc) = 0, \quad \bar{v}(\not{p} + mc) = 0$$

$$\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger \gamma^0, \quad \bar{\Gamma} \equiv \gamma^0 \Gamma^\dagger \gamma^0, \quad \not{a} \equiv a_\mu \gamma^\mu$$

ファインマン則

	外線	伝搬関数
スピン 0:	なし	$\frac{i}{q^2 - (mc)^2}$
スピン 1/2:	$\left\{ \begin{array}{l} \text{入射粒子: } u \\ \text{入射反粒子: } \bar{v} \\ \text{放出粒子: } \bar{u} \\ \text{放出反粒子: } v \end{array} \right.$	$\frac{i(\not{q} + mc)}{q^2 - (mc)^2}$
スピン 1:	$\left\{ \begin{array}{l} \text{入射: } \epsilon_\mu \\ \text{放出: } \epsilon_\mu^* \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{質量ゼロ: } \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \\ \text{質量をもつ: } \frac{-i[g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / (mc)^2]}{q^2 - (mc)^2} \end{array} \right.$

(バーテックス因子については付録 D を参照)

基本定数

プランク定数：	\hbar	$= 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J s}$ $= 6.58212 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$
光速：	c	$= 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$
電子質量：	m_e	$= 9.10938 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.510999 \text{ MeV}/c^2$
陽子質量：	m_p	$= 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.272 \text{ MeV}/c^2$
電子電荷 (大きさ)：	e	$= 1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$ $= 4.80320 \times 10^{-10} \text{ esu}$
微細構造定数：	α	$= e^2/\hbar c = 1/137.036$
ボーア半径：	a	$= \hbar^2/m_e e^2 = 5.29177 \times 10^{-11} \text{ m}$
ボーアエネルギー：	E_n	$= -m_e e^4/2\hbar^2 n^2 = -13.6057/n^2 \text{ eV}$
古典電子半径：	r_e	$= e^2/m_e c^2 = 2.81794 \times 10^{-15} \text{ m}$
QED 結合定数：	g_e	$= e\sqrt{4\pi/\hbar c} = 0.302822$
弱結合定数：	g_w	$= g_e/\sin\theta_w = 0.6295$
	g_z	$= g_w/\cos\theta_w = 0.7180$
弱混合角：	θ_w	$= 28.76^\circ \quad (\sin^2\theta_w = 0.2314)$
強結合定数：	g_s	$= 1.214$

変換因子

1 Å	$= 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$
1 fm	$= 10^{-15} \text{ m}$
1 barn	$= 10^{-28} \text{ m}^2$
1 eV	$= 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$
1 MeV/c ²	$= 1.78266 \times 10^{-30} \text{ kg}$
1 Coulomb	$= 2.99792 \times 10^{-9} \text{ esu}$

目次

序	1
1 素粒子物理学の歴史	13
1.1 古典時代 (1897~1932 年)	13
1.2 光子 (1900~1924 年)	15
1.3 中間子 (1934~1947 年)	19
1.4 反粒子 (1930~1956 年)	21
1.5 ニュートリノ (1930~1962 年)	24
1.6 ストレンジ粒子 (1947~1960 年)	32
1.7 八道説 (1961~1964 年)	36
1.8 クォーク模型 (1964 年)	40
1.9 11 月革命とその余波 (1974~1983 年, 1995 年)	46
1.10 仲介役ベクトルボソン (1983 年)	50
1.11 標準模型 (1978 年~?)	51
2 素粒子の運動学	63
2.1 四つの力	63
2.2 量子電気力学 (QED)	64
2.3 量子色力学 (QCD)	71
2.4 弱い相互作用	76
2.4.1 中性相互作用	77
2.4.2 荷電相互作用	78
2.4.3 クォーク	80
2.4.4 W と Z の電弱結合	83
2.5 崩壊と保存則	84

2.6	統一の方法	89
3	相対論的運動学	95
3.1	ローレンツ変換	95
3.2	4元ベクトル	98
3.3	エネルギーと運動量	102
3.4	衝突	107
3.4.1	古典的衝突	107
3.4.2	相対論的衝突	108
3.5	応用例	109
4	対称性	123
4.1	対称性, 群, 保存則	123
4.2	角運動量	128
4.2.1	角運動量の足し算	130
4.2.2	スピン 1/2	135
4.3	フレーバー対称性	138
4.4	離散対称性	146
4.4.1	パリティ	146
4.4.2	荷電共役	153
4.4.3	CP	155
4.4.4	時間反転と CPT 定理	160
5	束縛状態	171
5.1	シュレーディンガー方程式	171
5.2	水素	174
5.2.1	微細構造	177
5.2.2	ラムシフト	179
5.2.3	超微細分離	180
5.3	ポジトロニウム	181
5.4	クォーコニウム	185
5.4.1	チャーモニウム	186

5.4.2	ボトモニウム	188
5.5	軽いクォークでできた中間子	189
5.6	バリオン	193
5.6.1	バリオンの波動関数	194
5.6.2	磁気モーメント	202
5.6.3	質量	204
6	ファインマン則	211
6.1	崩壊と散乱	211
6.1.1	崩壊の頻度	211
6.1.2	断面積	213
6.2	黄金律	218
6.2.1	崩壊の黄金律	218
6.2.2	散乱の黄金律	223
6.3	トイモデルに対するファインマン則	226
6.3.1	A の寿命	229
6.3.2	$A + A \rightarrow B + B$ 散乱	230
6.3.3	高次のダイアグラム	232
7	量子電気力学	239
7.1	ディラック方程式	239
7.2	ディラック方程式の解	243
7.3	双一次共変形	250
7.4	光子	254
7.5	QED に対するファインマン則	258
7.6	例	262
7.7	カシミール・トリック	266
7.8	断面積と寿命	271
7.9	くりこみ	280
8	クォークの電気力学と色力学	293
8.1	e^+e^- 衝突におけるハドロン生成	293

8.2	弾性電子-陽子散乱	299
8.3	色力学のファインマン則	303
8.4	カラー因子	308
8.4.1	クォークと反クォーク	309
8.4.2	クォークとクォーク	311
8.5	QCDにおける対消滅	314
8.6	漸近的自由	318
9	弱い相互作用	327
9.1	荷電レプトン弱相互作用	327
9.2	ミュー粒子崩壊	330
9.3	中性子の崩壊	336
9.4	パイ中間子の崩壊	342
9.5	クォークの荷電弱相互作用	345
9.6	中性弱相互作用	351
9.7	電弱統一	360
9.7.1	カイラルフェルミオン	360
9.7.2	弱アイソスピンとハイパー荷	364
9.7.3	電弱混合	367
10	ゲージ理論	377
10.1	古典力学によるラグランジアン の定式化	377
10.2	相対論的場の理論におけるラグランジアン	378
10.3	局所ゲージ不変	382
10.4	ヤン-ミルズ理論	386
10.5	色力学	391
10.6	ファインマン則	395
10.7	質量項	398
10.8	自発的対称性の破れ	401
10.9	ヒッグス機構	404

11	ニュートリノ振動	413
11.1	太陽ニュートリノ問題	413
11.2	振動	416
11.3	ニュートリノ振動の確認	419
11.4	ニュートリノ質量	423
11.5	混合行列	424
12	その後：次は何だろうか？	429
12.1	ヒッグスボソン	430
12.2	大統一	434
12.3	物質・反物質非対称	438
12.4	超対称性, 弦理論, 余剰次元	440
12.4.1	超対称性	440
12.4.2	弦理論	442
12.5	暗黒物質と暗黒エネルギー	444
12.5.1	暗黒物質	444
12.5.2	暗黒エネルギー	446
12.6	結論	448
付 録		453
A	ディラックのデルタ関数	453
B	崩壊率と断面積	458
B.1	崩壊	458
B.1.1	二体崩壊	458
B.2	断面積	458
B.2.1	二体散乱	459
C	パウリ行列とディラック行列	461
C.1	パウリ行列	461
C.2	ディラック行列	461
D	ファインマン則 (ツリーレベル)	464
D.1	外線	464
D.2	伝播関数	464

D.3 パーテックス因数 _____ 464

索引 _____ 467