学習の手引き

2007 年 12 月 21 日更新　川村 嘉春

『例題形式で学ぶ 現代素粒子物理学』を利用する際の注意事項に関しては,「はじめに」で述べたが，不十分と思われるので，補足説明を含めた学習の手引き（および制作秘話のようなもの）を書き綴ることにする．

本書は全部で 23 章からなっていて，素粒子物理学の歴史的な進展に応じて，関連した話題をまとめて各々の章が作られている．各章の内容に応じて，その関連性を流れ図にまとめたものが図 1 である． 図 1 で矢印は主要な流れを表す．まずは，第 1 章を読んで，スタートラインに立とう．次に，第 2 章を読み始めて，場の量子論に関する知識不足などで，嫌気がさした場合には，他の参考文献を頼りに，場の量子論を習得するという道もあるが,（それと並行して）第 3 章にワープしてはどうでしょう（第 3 章の方が，計算がフォローしやすくて理解しやすいという感想を述べた学生がいました）．相互作用の観点から，次のような大きな流れに分類することができる．

第 2 章 $\to$ 第 5 章 $\to \cdots$ の流れ：電磁相互作用に関連した素粒子物理学
第 3 章 $\to$ 第 8 章 $\to \cdots$ の流れ：弱い相互作用に関連した素粒子物理学
第 4 章 $\to$ 第 7 章 $\to \cdots$ の流れ：強い相互作用に関連した素粒子物理学
第 15 章 $\to$ 第 21 章 $\to \cdots$ の流れ：電弱相互作用に関連した素粒子物理学

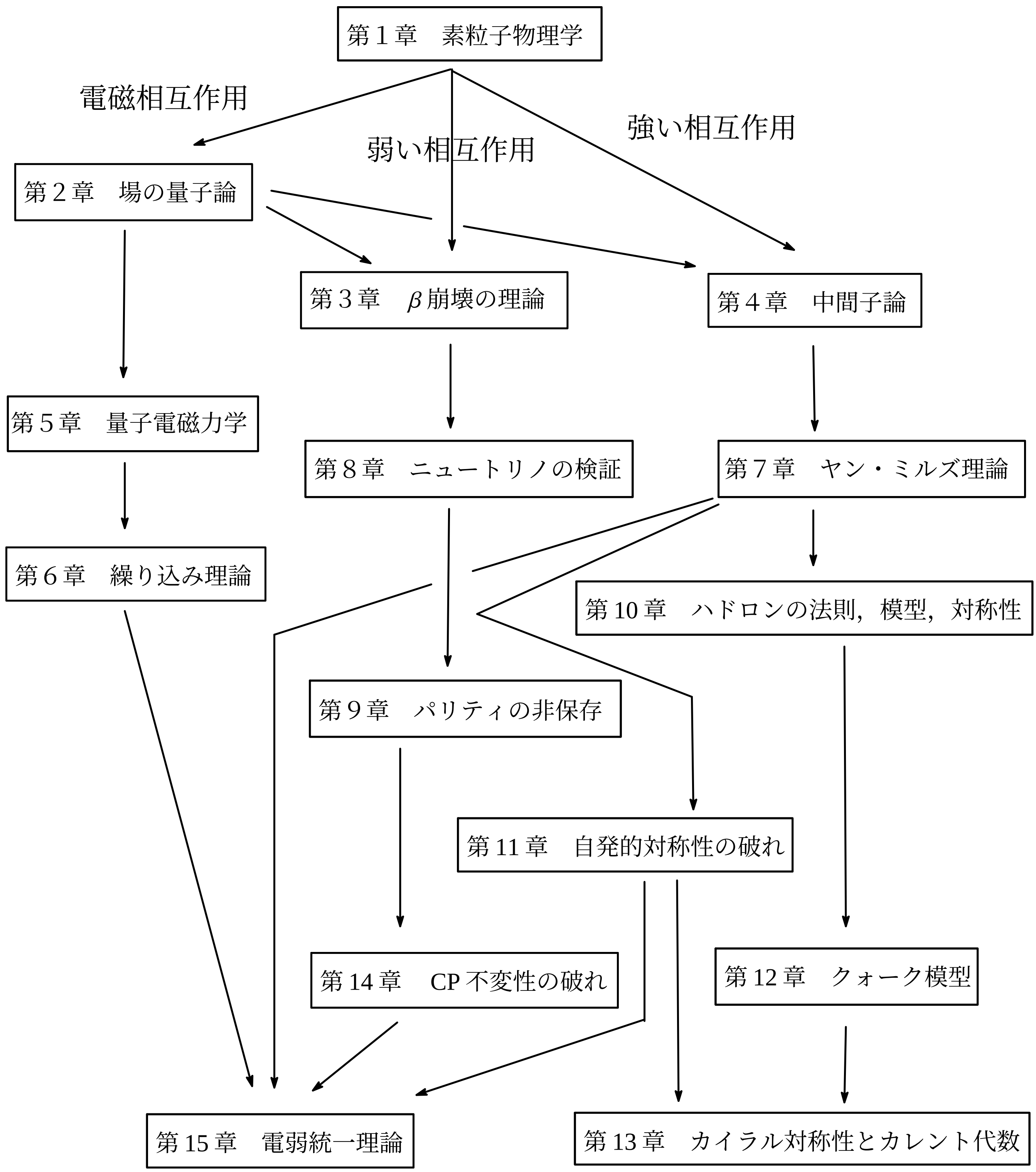
学習の順番を決める際に参考にしてください.

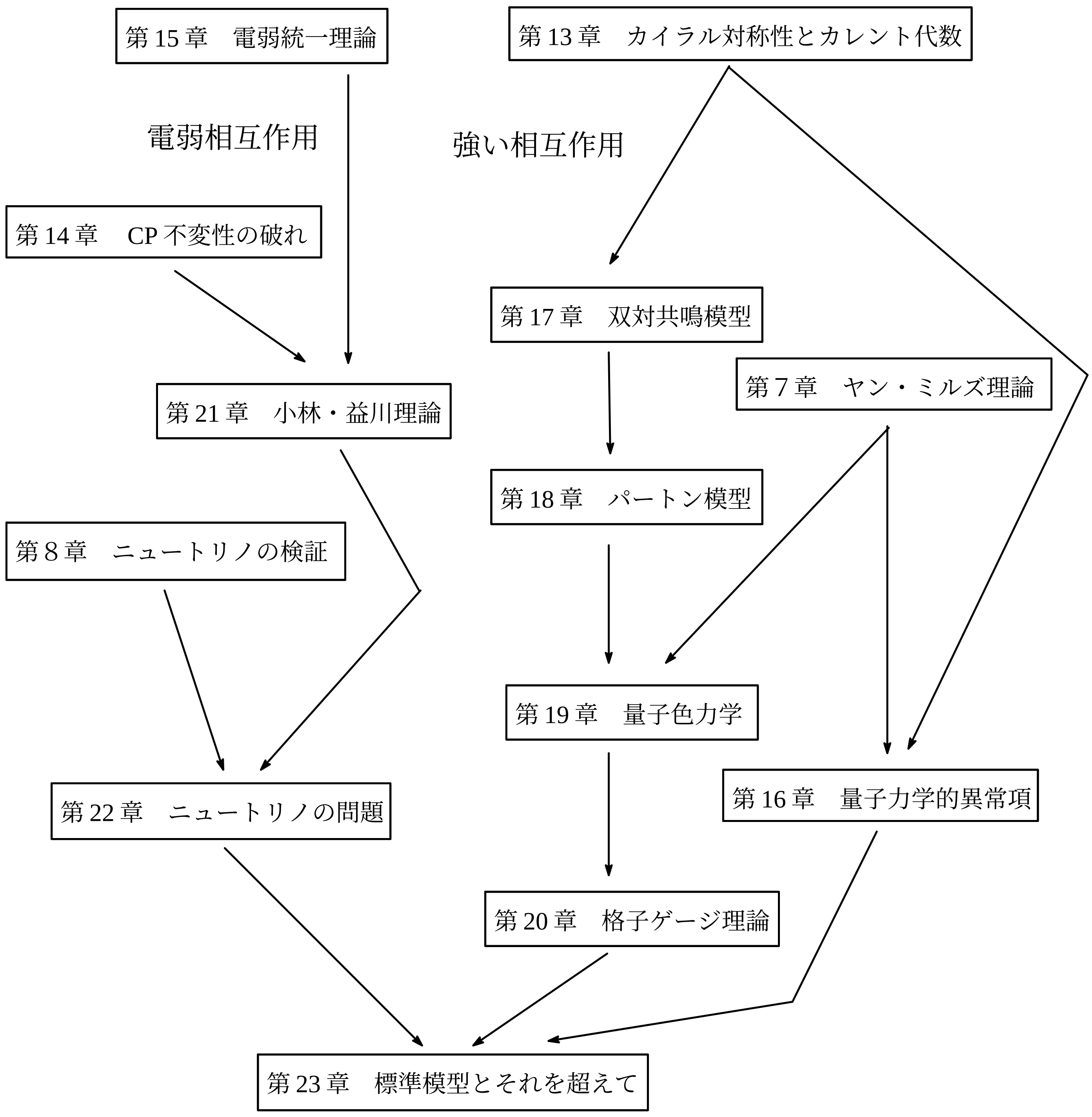
アドバイスとして，昔，Z 氏のおじいちゃんが言っていたことを応用し，実践してみてはどうでしょう（実は，それを読み取ってもらうつもりで少し現実離れした「まえがき」を書きました）.

> 「例題に対して，能動的な使い方をしなさい．例題が難問と思われていた当時に自分を置いてみる．その時代背景の下で自分だったら，いかに挑んだか想像してみる．主役になったつもりでイメージしてみる．どれくらい少ない情報量の下で解くことができるかどうかあれこれ試してみる．いろいろ工夫しなさい.」

長年，担当した講義を下にして，その講義ノートにお化粧を施してテキストを作成するのが通常のやり方であろう．私の場合は，ゼミの題材として「素粒子物理学」を選んだことはあるが，実際に講義をしたことはない．よって，大部分は学部および修士 1 年の時に学んだことを思い出しながら，その当時のテキストやノートを下にして本書を作成した（あるノートをめくった時，タイムカプセルを開けたような感動を覚えた．20 年ほどの歳月は，時の流れを実感させるのに十分である）．実のところは，平成 18 年度から「素粒子物理学」の講義を担当しているので，本書の作成はその予習を兼ねることとなった．余談ではあるが，興味深い講義をしようと意気込んでいた矢先に，春の学会で少し気になる発言を耳にした.

図 1: 流れ図


第 1 章　素粒子物理学
電磁相互作用
弱い相互作用
強い相互作用
第 2 章　場の量子論
第 3 章　β 崩壊の理論
第 4 章　中間子論
第 5 章　量子電磁力学
第 8 章　ニュートリノの検証
第 7 章　ヤン・ミルズ理論
第 6 章　繰り込み理論
第 10 章　ハドロンの法則，模型，対称性
第 9 章　パリティの非保存
第 11 章　自発的対称性の破れ
第 14 章　CP 不変性の破れ
第 12 章　クォーク模型
第 15 章　電弱統一理論
第 13 章　カイラル対称性とカレント代数


第 15 章　電弱統一理論
第 13 章　カイラル対称性とカレント代数
電弱相互作用
強い相互作用
第 14 章　CP 不変性の破れ
第 17 章　双対共鳴模型
第 21 章　小林・益川理論
第 7 章　ヤン・ミルズ理論
第 18 章　パートン模型
第 8 章　ニュートリノの検証
第 19 章　量子色力学
第 16 章　量子力学的異常項
第 22 章　ニュートリノの問題
第 20 章　格子ゲージ理論
第 23 章　標準模型とそれを超えて

「朝永先生の量子力学の講義はとても面白かった．ただし，テキストが出版されるまでは」というようなコメントであったと記憶している（そのテキストとは,「量子力学 I，II」（みすず書房，1951）で物理科学科の 2 年生向けの授業で使用している．私自身，教養部の頃に読んだ懐かしい思い出がつまった原点のような書物である）．よくよく考えてみると，これが仮に経験則のようなものであったとしても，私の場合には当てはまらないだろう．それは,長年，講義を担当したわけではないことと偉大な学者と私のような凡人が同じ法則に従うはずがないからである．自分の書いたテキストに基づいて講義ノートを作成していて，こうすればよかったというような箇所が見つかり，少ししょげたりする．落ち込んでいても，仕方がないので，この学習の手引きの中で補足説明を加えたり、修正点を正誤表として（随時）記載する．

「はじめに」に関して

いきなり重大な誤植の報告です（少しショック受けています）．

[正誤表]
ii ページ 21 行目
（誤）http://www.shinshu-u.ac.jp/~haru/
（正）http://azusa.shinshu-u.ac.jp/~haru/

「第 1 章　素粒子物理学」に関して

「いきなり最終回」というスタイルのテキストがある．第 1 章が現状報告の形を取ったもので，初学者が最初にそれを読んでも完全には理解できないけれども，目標がはっきりしていて，学習の過程で方向を見失わないという利点と読み終わった後に，再度，第 1 章を読み返した時，学習の進歩がはっきりとわかって心地よい気持ちになれるという利点がある．ただ，第 2 章から本格的に始めるという気持ちの切り替えがうまくできない人やわからないことを振りかけられると途端にやる気が溶けてしまうような人にとっては，筆者の思惑が外れることになる．本書では「歴史に学ぼう」をサブテーマとして,「ふつうの初回」という形で 1930 年代前半までの素粒子物理学とその周辺に関する多少ありふれた話から始めることにした．

1930 年代初頭までの素粒子物理学とその周辺に関して，記載しなかった重要な研究を追加する．

(1) **1904 年，トムソンと長岡（H. Nagaoka）はそれぞれ異なるタイプの原子模型を提案した．**両者の模型は対照的なものである．トムソンの原子模型は「原子とは約 10^{-10}m の一様に正電荷が分布する球状の物体で，その中に負電荷を持つ電子がつりあいの状態に存在する．電子がつりあいの位置からずれるとその周りで振動する．この振動により光が放出されると考える模型」である．長岡の模型は「原子とは中心に正電荷が集中した核が存在し，

その周りを電子が太陽系の惑星のように回っていると考える模型」である．1909 年のガイガーとマースデンの α 粒子による実験および 1911 年のラザフォードによる散乱公式の導出により長岡型の模型に軍配が上がった．

(2) **1915 年，石原（J. Ishihara），ゾマーフェルト（A. Sommerfeld）は独立に量子条件の一般化を提案した．**簡単な例として，1 次元の一般的な周期系（一般化座標を q，それに正準共役な運動量を p とする）に対して，作用変数 (J) が次のように量子化される．

$$J \equiv \oint pdq = nh$$

ここで，n は整数，h はプランク定数である．

(3) **1933 年，ツヴィッキー（F. Zwicky）は現在「暗黒物質（ダークマター）」と呼ばれている光っていない未知の物質の存在を指摘した．**彼は、ニュートンの重力理論に基づきビリアル定理を使って銀河団の質量を評価し，銀河の速度の分散を求めた．その値が観測値と著しく異なるため未知の物質を起源とする質量の存在を予言した．

「第 2 章　場の量子論」に関して

本書では「添字として同じギリシア文字が上下に現れたとき，和の記号を省く」という和に関するアインシュタインの規約を使用した.「なぜ，上下のギリシア文字に限定したのか？」と疑問に思われる方もいるかもしれない．その理由は個人的なもので，和の記号 $(\sum)$ が好きだからである．$\sum$ を使った和の表現法を初めて知った時，こんな単純な方法が有るのかと感激したのを覚えている．つまらないこだわりの一つである．

場の量子論に関する正統的な定式化をまともに記載しようとすると，それだけで 200 ページを超えてしまって，その応用としての素粒子物理学の話はできなくなってしまう．また，手短に述べると，公式の羅列（られつ）になってしまって付録にまわることになり（一部の読者は付録はただのおまけと勘違いしたりして）それほど重要視されなくなる．本書で取った方法は「既知の理論から，より一般性の高い理論を構築する」という形の話の展開である．もちろん，量子力学の構築やディラックの相対論的量子力学（ディラック方程式を基礎方程式とする電子に関する量子論）の構築に関しても例題形式で加えれば，より鮮明にそのメッセージが伝えられたかもしれないが，そのような余裕がなかった．各自で補ってほしい．

[正誤表]
10 ページ 4 行目
（誤）本義（proper）ローレンツ変換 ,（正）本義（proper orthochronous）ローレンツ変換
18 ページ 13 行目
（誤）$A^{\mu}(x) \to A'^{\mu}(x) = A^{\mu}(x) + \dfrac{1}{e}\partial^{\mu}\theta(x)$,　（正）$A^{\mu}(x) \to A'^{\mu}(x) = A^{\mu}(x) - \dfrac{\hbar}{e}\partial^{\mu}\theta(x)$

[補足]
“proper”は $\det L^{\mu}{}_{\nu} = 1$ を意味し，“orthochronous”は $L^{0}{}_{0} \geq 1$ を意味する．

「第 3 章　β 崩壊の理論」に関して

β 崩壊の現象を理解するために，現在，反電子ニュートリノと呼ばれている新粒子が導入された．結果を知っているから，8 ページ足らずで，曲がりなりにも β 崩壊の理論を紹介することができた．しかし，実際は紆余曲折・悪戦苦闘を経て，今日テキストに載っている理論に到達したことを忘れてはならない．テキストは主にサクセスストーリーを扱い，多くの場合，その内容を極めて美しい物語の形で提供する．表現が適切ではないかもしれないが，「おとぎ話」に似ていると思う．そして，現実に行われている研究は，砂漠をさ迷い歩いたり，ジャングルを探索するようなものに似ている．おとぎ話を現実と勘違いして，この世界にはまり込んでしまった一人の人間の発言なので，真実の一端をとらえているのではないだろうか？ さしずめ，本書は「イソップ物語（寓話）」ではないだろうか？

23 ページ最後の行の「時間反転の下での不変性を要請して実数とした.」については,『「第 9 章　パリティの非保存」に関して』のところで補足説明を行う.

[正誤表]
26 ページ 13~14 行目
（誤）単位時間当たりに自然崩壊する確率 (λ)（崩壊定数）は，全粒子数 (N) に対する単位時間当たりに崩壊する粒子数で，次の式で与えられる．
（正）単位時間当たりに自然崩壊する確率は，全粒子数 (N) に対する単位時間当たりに崩壊する粒子数である．よって，時刻 t に自然崩壊する確率 (λ)（崩壊定数）は，次の式で与えられる．

[補足]
誤解は生じないと思うが,（参考）に出てくる E と例題 3.6 の E を区別するために，どちらかを E' と表記した方がよかったかもしれない（24 ページの（参考）において，G_{β} の値は例題 3.6 で求めた値をそのまま使っている）.

「第 4 章　中間子論」に関して

本年（2006 年）は朝永振一郎博士の生誕 100 年，来年（2007 年）は湯川秀樹博士の生誕 100 年に当たり，両博士にちなんだ様々なイベントが予定されている．私は両博士を直接知らない世代である．ただ，文献や先生・先輩方からの話により，感銘を受けたことは事実である．両博士と懇意にされた方々がどれほど影響を受けられたかについては，私の想像をは

るかに超えたものに違いない．

[正誤表]
33 ページ (4.14) 式の中　（誤）$\delta(r)$ ，（正）$\delta^3(\boldsymbol{x})$
34 ページ (4.18) 式の中　（誤）$\delta(r)$ ，（正）$\delta^3(\boldsymbol{x})$
34 ページ脚注　（誤）井上（Y. Inoue），（正）井上（T. Inoue）

「第 5 章　量子電磁力学」に関して

紙面の都合上，散乱断面積などに関する詳細な計算を省いた．たいていの場の量子論のテキストには量子電磁力学に基づく散乱断面積の計算が記載されている．例えば，一（または二）昔前の標準的なテキストである J. D. Bjorken・S. D. Drell 著あるいは C. Itzykson・J. B. Zuber 著のテキストにおいて，丁寧な解説がなされている．日本語のテキストならば，牧二郎・林浩一著の「素粒子物理学」などがある．計算が大変だからという理由だけで，脱落・棄権するのはもったいない話である．γ 体操に勤(いそ)しむ，あるいは，第 7 章以降にワープして，別の話題に慣れ親しんでから，再挑戦していただければ幸いである．

[正誤表]
39 ページ 3-4 行目
（誤）単位体積当たり $2E$ 個の粒子が体積 V に存在しているとする．
（正）体積 V に 1 個の粒子が存在しているとする．
46 ページ (5.35) 式の中　（誤）d^3k ，（正）d^3q

[補足]
散乱断面積は波動関数の規格化に依存しない．実際,「単位体積当たり $2E$ 個の粒子が体積 V に存在しているとする.」という規格化条件を使用した場合，終状態の各粒子に関する位相空間因子は $\dfrac{d^2p_j}{(2\pi)^3 2E_j}$，波動関数の規格化因子は 1 で $t_{fi} = \mathscr{M}$ となる．また，(入射フラックス f）×（体積 V における標的の粒子数) は $2E_A v 2E_B V$ で与えられる．参考までに，B を標的の粒子とした場合，$d\lambda_{fi}$ および f は次のようになる．

$$
\begin{aligned}
d\lambda_{fi} &\equiv \lim_{T\to\infty}\frac{|S_{fi}-\delta_{fi}|^2}{T}\times(\text{終状態の位相空間因子})\times\frac{1}{(\text{体積 }V\text{ における標的の粒子数})} \\
&= \frac{d^3p_1}{(2\pi)^3 2E_1}\cdots\frac{d^3p_n}{(2\pi)^3 2E_n}\frac{(2\pi)^4}{2E_B}\delta^4(P_f-P_i)|\mathscr{M}|^2\,, \\
f &= 2E_A v\,.
\end{aligned}
$$

これらを使って，(5.10) 式を得ることができる．

「第 6 章　繰り込み理論」に関して

大学生協で最初に購入した本がディラック著の「一般相対性理論」（江沢洋訳，東京図書，1977）である．内容は非常に簡潔なもので，現在，単行本のサイズで出回っているのをみて奇妙な感覚を覚える．単行本の感覚で読めるようになったのは，内山龍雄著の「相対性理論」（岩波全書，1977）を勉強し終えた後のことである（もちろん，本格的に相対性理論を学習していなくても，解析力学，電磁気学などの知識があれば十分読みこなせると思う．そう思って，以前，同僚に「相対性理論」に関する輪講のテキストとしてディラックの本を薦めたことがある）．ディラックという人物とその研究対象に興味を持ち始めたのは,「量子力学」の教科書を読んだころである（本書で度々ディラックが登場する理由の一つである）．

[正誤表]
52 ページ脚注*2)
（誤）有効作用 $\Gamma(\varphi)$ とは，量子論的な効果を取り込んだ作用汎関数で $\Gamma(\varphi) \equiv W(J) - \int J(x)\varphi(x)d^4x$ で定義される．ここで，J は外場，$W(J)$ は連結グリーン関数の生成汎関数で $e^{iW(J)} \equiv \langle 0|\mathrm{T}\exp\left(i\int J(x)\varphi(x)d^4x\right)|0\rangle$ で定義される．
（正）有効作用 $\Gamma(\varphi_{\mathrm{B}})$ とは，量子論的な効果を取り込んだ作用汎関数で $\Gamma(\varphi_{\mathrm{B}}) \equiv W(J) - \int J(x)\varphi_{\mathrm{B}}(x)d^4x$ で定義される．ここで，J は外場，$W(J)$ は連結グリーン関数の生成汎関数で $e^{iW(J)} \equiv \langle 0|\mathrm{T}\exp\left(i\int J(x)\varphi(x)d^4x\right)|0\rangle$ で定義される．また，$\varphi_{\mathrm{B}} = \delta W(J)/\delta J$ である．
56 ページ (6.38) 式の 1 行目； 1 番右側の式の分母に $\hbar^n$ が抜けている（この節では，$\hbar$ を明記すると宣言していた）．

「第 7 章　ヤン・ミルズ理論」に関して

内山龍雄著の「物理学はどこまで進んだか –相対論からゲージ論へ–」（岩波書店，1983）という解説書がある．その中に，ヤンとミルズよりの早く非可換ゲージ理論という発想に到達していながら，発表が遅れたせいで十分な評価を得ていない（功績が認められていない）ことなどに対する後悔の念を綴（つづ）った章（第 10 章 痛恨記）がある．7.4 節のタイトルは,「ゲージ場の一般論」（あるいは「ゲージ理論」）が妥当であるが，功績を称えて「内山理論」とした．

教訓：発表は早めに！チャンスの前髪を掴（つか）もう！

23.3 節「あとがきに代えて」において述べたように，本書では，主に先駆的な研究に着目して（年号と）研究者名を添えた．基本的なアイデアの提案の重要性は疑う余地はないと思われるが，そのアイデアをより具体的かつ現実的なものに発展させる研究も重要であることは言うまでもない．そのように認識しているけれども，後者について（一部を除いて）コメントしなかったのは，主に時間的な余裕がなかったからである（多くの素晴らしい発展的な仕事が成されているにも拘らず，それらについて言及されていないことに関して，何卒，ご容赦願います）．研究者として生きていない時代の出来事に対して，自分なりに消化し公

平なコメントをするために，より多くの時間がかかると予想しました．限られた時間内で，本書を仕上げるために，犠牲にしたものの一つである．

単純に計算して，2 週間に 1 章ずつ作成したことになる（当初の予定は 1 週間に 1 章）．今にして思えば，当初の予定は無謀窮(きわ)まりなし！実際のものでも予想以上のハイペースで，一から勉強して書いていたら,（最初から休日を返上していたとしても）締め切りに間に合わなかったのではないだろうか．多くの場合，20 数年前に意識を戻して，頭に浮かんだことをそのまま文章にしていった（その際，式は後で文献などと照合しながら修正するつもりで頭の中にある形のものを打ち込んだ）.「はじめに」で述べたように，同僚や学生に添削してもらい多くの有益な指摘を受け修正を施したけれども，恐らく 9 割以上は原文のままである(「原文」⇒「思考パターン」⇒「脳の構造（脳のヌード)」ではないと思うが，将来，脳の研究者の教材になった場合（そんなことはまずないと思うが）を想像すると思いのままに書き綴(つづ)った部分に関して少し恥ずかしくなる)．それから，式については，著者以外はほとんどチェックしていないことを白状する．よって，誤りがあれば，著者のチェック不足が原因である．

[正誤表]
60 ページ 7 行目の式中　（誤）$G^{b}_{\mu\nu}$ ，（正）$G^{b\mu\nu}$

[補足]
紙面の関係で尻切れトンボのようになった例題 7.8 の略解の続きを書くことにする．局所ローレンツ変換に関するゲージ場 ${A^{kl}}_{\mu}$ から構成された場の強さ ${F^{kl}}_{\mu\nu}$ はリーマンテンソルと関係し，重力ポテンシャル $g_{\mu\nu}$ の 2 階微分 $(\partial_\lambda\partial_\rho g_{\mu\nu})$ を含んでいると考えられる．よって，重力場の方程式として重力ポテンシャルに対する 2 階の微分方程式を導くためには，ラグランジアン密度は ${F^{kl}}_{\mu\nu}$ の 1 次式で，スカラー密度であることから $h\sum_{k,l}{h_k}^{\mu}{h_l}^{\nu}{F^{kl}}_{\mu\nu}$ に比例した量であると予想される．ここで，$h\equiv\det{h^k}_{\mu}=\sqrt{-g},\ (g\equiv\det g_{\mu\nu})$ である．また，$-\sum_{k,l}{h_k}^{\mu}{h_l}^{\nu}{F^{kl}}_{\mu\nu}$ はスカラー曲率 R に一致する．よって，次のようなラグランジアン密度から構成された作用積分はアインシュタイン・ヒルベルトの作用積分に一致する．

$$\mathscr{L}_{\mathrm{EH}}=-\frac{c^4}{16\pi G}h\sum_{k,l}{h_k}^{\mu}{h_l}^{\nu}{F^{kl}}_{\mu\nu}\,.$$

電磁場やヤン・ミルズ場に関するラグランジアン密度は「ゲージ場の強さ」の 2 次式で与えられ，重力場に関しては 1 次式で与えられるという違いは次の表に示されるようなポテンシャルや場の間の（アンバランスな）対応関係に起因している．

	電磁相互作用	重力相互作用
		${h^k}_\mu(x)$ $g_{\mu\nu}(x)$：重力ポテンシャル $g_{\mu\nu}(x) = \sum_{k,l} {h^k}_\mu(x){h^l}_\nu(x)\eta_{kl}$
ゲージ場（接続）	$A_\mu(x)$：電磁ポテンシャル	$A^{kl}_\mu(x)$（：スピン接続） $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}(x)$：重力場 ${\Gamma^\lambda}_{\mu\nu}(x) = \sum_k {h_k}^\lambda(x)(\partial_\mu {h^k}_\nu(x)$ $- \sum_l {A^k}_{l\mu}(x){h^l}_\nu(x))$
ゲージ場の強さ（曲率）	$F_{\mu\nu}(x)$：電磁場	${F^{kl}}_{\mu\nu}(x)$ ${R^\alpha}_{\beta\mu\nu}(x)$ ${R^\alpha}_{\beta\mu\nu}(x) = -\sum_{k,l} {F^k}_{l\mu\nu}(x){h_k}^\alpha(x){h^l}_\beta(x)$

「第 8 章　ニュートリノの検証」に関して

レプトンに関する補足説明 : 強い相互作用には関与しないスピン 1/2 の粒子で，現在,（電子 e^-，電子ニュートリノ ν_e）,（ミューオン μ^-，ミューニュートリノ ν_μ）および（タウオン τ^-，タウニュートリノ ν_τ）が見つかっている．タウオン τ^- とタウニュートリノ ν_τ に関しては，12.4 節を参照せよ.

例題 8.9 の解で，ミュー粒子に付随して生じるニュートリノ（$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ において生じるニュートリノ，$\mu^- \to \nu_\mu + e^- + \overline{\nu}_e$ において生じるニュートリノ）を同一のものであると考えている.

[正誤表]
67 ページ (8.12) 式　（誤）$\mathscr{N}_{\overline{\nu}}$ ，（正）$f_{\overline{\nu}}$
68 ページ 6 行目　（誤）σ_w ，（正）σ_{w}
69 ページ 6 行目（誤）「中性のフェルミ粒子を区別
（正）「中性のフェルミ粒子とその反粒子を区別
73 ページ下から 2 行目　（誤）（第 16 章で考察する），（正）（第 15 章で考察する）

「第 9 章　パリティの非保存」に関して

CPT 変換の下での不変性に関する補足説明：CPT 定理の意味するところは，相互作用が局所的で，本義ローレンツ変換の下で不変であるならば，作用積分 (S) は CPT 変換 (Θ) の下で不変 ($\Theta S \Theta^{-1} = S$) である．時間反転の下でのカレントの変換性および c 数の変換性を使って，時間反転不変性の要請から (3.8) の G_β が実数になることがわかる.

[正誤表]
77 ページ 10 行目　（誤）ヘリシティ演算子（helicity）
（正）ヘリシティ（helicity）演算子

「第 10 章　ハドロンの法則，模型，対称性」に関して

昭和 30～40 年代に対するノスタルジー，団塊の世代はもとより，その頃，生まれ育った人たち（私を含む）が抱く一種独特な感情である．この章を含むいくつかの章の内容はそんな時代に研究された話題である．虫や魚を追いかけていた頃，世の中の一部で素粒子に関する様々な研究・議論がなされていたのかと思うと不思議な気分になる．時の狭間に入り込んだような感覚である．

[正誤表]
87 ページ 3 行目　（誤）固有値 –1 ，（正）固有値 +1
89 ページ 4 行目，6 行目，22 行目　（誤）$SU(3)$ ，（正）$U(3)$

「第 11 章　自発的対称性の破れ」に関して

アルファベットで書かれた人名を片仮名に変えるときに苦労する．本人から正式な発音を聞いたとしても，正確に表記できるとは限らない．本によっても，表記の仕方が異なる．無難なのは，アルファベットを使用することである．とにかく，本書における人名の片仮名の表記は必ずしも，正しい発音に基づくものでも，一般的に使われているものでもないことを心に留めておいてほしい．参考までに，Jona-Lasinio さんに関しては南部陽一郎著の「クォーク」の中の表記法をそのまま借用した.「トフーフト？トホーフト？トフト？」「フェルトマン？ヴェルトマン？」どれがよいのだろうか？

美しいものにあこがれるのは人情である．物理の場合で言えば,（実証性をひとまず置いといて）理論の数学的構造が有する美しさに酔いしれることがある．特に，自分のやった仕事の数学的な美しさに恋してしまう状況は一部で「ピグマリオン症候」と呼ばれているらしい（高橋康著「理論物理のはなし」日本評論社，2006）．恐らく「アインシュタインの統一場理論」や「ハイゼンベルクのスピノール一元論」が該当するのだろう．ただし，このような偉い先生方がピグマリオン症候にかかっていたとしても，百害あって一利なしではなく，何利も得る可能性を秘めていたと思う．例えば，より高次元の重力理論から「非可換ゲージ理論」や真空の縮退から「自発的な対称性の破れ」といった理論や物理的な概念を手にする可能性を秘めていた．要は，いかにピグマリオン症候と付き合うかである．つまり，時には視点を変えることが重要と思われる（大発見が目の前にあるかもしれない）．もっとも，ピグマリオン症候はそのような余裕までも奪ってしまうのかもしれない．

[正誤表]

98 ページ下から 7 行目　（誤）$m_\rho = \sqrt{\lambda} v$ ，（正）$m_\rho = \sqrt{2\lambda} v$

[補足]

自発的対称性の破れが起こる場合，破れるチャージ Q^α は（カレントの第 0 成分に関する空間積分が発散する可能性があり）一般に well-defined ではない．本書では，表記的に Q^α を使用した．よって，例えば，$[\Phi, Q^\alpha]$ は，$\int d^4y[\Phi, J_0^\alpha(y)]$ を表していると考えて欲しい．

[補足]

ハイゼンベルクらの野心的な試みを紹介するために，つい作用積分を書き下してしまったが，歴史的観点（時代背景）から言えば運動方程式の方が妥当かもしれない．

$$i\sigma^\mu \partial_\mu \chi(x) + l^2 \sigma^\mu : \chi(x)(\chi^\dagger(x)\sigma_\mu \chi(x)) := 0$$

ちなみに，この方程式は**宇宙方程式**と呼ばれていたらしい（なんとなく神秘的？）．

「第 12 章　クォーク模型」に関して

「次数 3 のパラ統計」とは,「同じ状態に 3 個まで粒子が入ることを許す統計」のことである．場の間に成立する代数関係の違いにより，パラフェルミ統計とパラボース統計に大別される．

[正誤表]

104 ページ (12.8) 式　（誤）$\sin^2\theta = \dfrac{3m_\omega^2 + m_\rho^2 - 4{m_{K^*}}^2}{3(m_\omega^2 - m_\phi^2)}$　（正）$\sin^2\theta = \dfrac{3m_\phi^2 + m_\rho^2 - 4{m_{K^*}}^2}{3(m_\phi^2 - m_\omega^2)}$

105 ページ 4 行目　（誤）波動関数で 1 重項状態と仮定する．
（正）波動関数でハドロンは 1 重項状態と仮定する．

「第 13 章　カイラル対称性とカレント代数」に関して

「光学定理」とは,「粒子の散乱の全断面積 σ_{tot} は散乱振幅 $f(\theta)$ の前方 $\theta = 0$ での値の虚数部に比例する」である．具体的には，次の公式で表される．

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{4\pi}{k} \mathrm{Im} f(0)$$

ここで，k は波数ベクトルの大きさである．

[正誤表]

118 ページ (13.40) の 2 番目の式
（誤）$f_{K^\pm}^2 m_{K^\pm}^2 = f_{K^0}^2 m_{K^0}^2 = f_{\bar{K}^0}^2 m_{\bar{K}^0}^2 = \dfrac{m_u + m_s}{2}\langle 0|\bar{u}u + \bar{s}s|0\rangle$

（正）$f_{K^\pm}^2 m_{K^\pm}^2 = \dfrac{m_u + m_s}{2}\langle 0|\bar{u}u + \bar{s}s|0\rangle$,　$f_{K^0}^2 m_{K^0}^2 = f_{\bar{K}^0}^2 m_{\bar{K}^0}^2 = \dfrac{m_d + m_s}{2}\langle 0|\bar{d}d + \bar{s}s|0\rangle$

「第 14 章　CP 不変性の破れ」に関して

図 14.1 ~ 図 14.3 は，フェルミ型相互作用を超えるより基本的な相互作用の存在を考慮してわざと少し離した曖昧な形にしている．次章を学んだ後に，より基本的な相互作用に基づくファインマン図を（各自で）描いてください．

[正誤表]
128 ページ 13 行目　（誤）壊過程 ，（正）崩壊過程

「第 15 章　電弱統一理論」に関して

電弱統一理論はマックスウェルの電磁気学以来の力に関する統一理論であり，本書のクライマックスの一つである．登場する物質粒子の量子数などを見る限り，決して単純な構造をしているとは言えないが，それが自然法則の整理整頓と矛盾するわけではない．例えば，**より単純な構造を持つ高エネルギーの理論が背後に存在し，電弱統一理論はその理論の低エネルギーにおける有効理論に過ぎない**と考えればよい．

実は，この章の内容は「*W* の喜劇–私はセンセーショナルな粒子–」というタイトルの卒論[1]の内容と一部かぶっている.「ノーベル賞委員会は大きな賭けを行い，見事に勝利した！」という文章もそのまま借用している（「ノーベル賞委員会は大きな賭けを行った.」という誰かのセリフに「見事に勝利した！」というオチをつけたものである）．あれから 20 年くらいたっている．別のオチが浮かばなかったのは，ほとんど進歩がないということなのだろうか :-(

[正誤表]
131 ページ (15.6) 式　（誤）$K^0 \to \pi^+ + \pi^0$ ，（正）$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$
135 ページ下から 4 行目　（誤）$f^{(X)}_{\alpha\beta}$ ，（正）$f^{(X)}_{AB}$

「第 16 章　量子力学的異常項」に関して

軸性異常項やゲージ異常項に関する特徴として，アドラー (Adler)・バーディーン (Bardeen) の定理が存在する．この定理の内容を要約すると「軸性異常項やゲージ異常項は高次の輻射補正を受けない」である．

[1]「*W* の悲劇」というタイトルの映画化された推理小説をもじったものである．このようなタイトルで提出したら，卒業取り消しになるかもしれないという友人のアドバイスに従ったので，実際はふつうのタイトルに変えたと思う．e-print arXiv などに投稿される論文の中には，時々，奇抜なタイトルが存在し，目を引くことがある．今にして思えば，それほど非常識なタイトルではなかったのではないだろうか.

[正誤表]
142 ページ 4 行目
（誤）$= -\int_{-\infty}^{\infty}\frac{d^4p}{(2\pi)^4}\left[\mathrm{Tr}\left(\frac{i}{\not{p}-m}\gamma_5\frac{\tau_3}{2}\frac{i}{\not{p}-\not{q}-m}\gamma_\nu\frac{i}{\not{p}-\not{k}_1-m}\gamma_\mu\right)\right.$
（正）$= -\int_{-\infty}^{\infty}\frac{d^4p}{(2\pi)^4}\left[\mathrm{Tr}\left(\frac{i}{\not{p}-m}\gamma_5\frac{\tau_3}{2}\frac{i}{\not{p}-\not{q}-m}\gamma_\nu Q\frac{i}{\not{p}-\not{k}_1-m}\gamma_\mu Q\right)\right.$
（ここで，Q はループを回るフェルミ粒子の電荷である.）
例題 16.8 は簡単のためゲージ群が 1 個の場合を，例題 16.9 はゲージ群が 1 個および複数個の場合を議論している.

「第 17 章　双対共鳴模型」に関して

人は知らず知らずのうちに「サプライズ」を求めているような気がする．実は，最初の構想では，標準模型を超えた内容を含むより多くの内容を盛り込んだテキストを作成しようと目論んでいた．第 2 章を書いた時点で，少なめに見積もっても 500 ページを超える分量になり，出版社の意向に反するものとなってしまうのがわかった（各章，3〜4 ページにおさまると予想したのは若気の至りと考えられる）．内容を標準模型までに限定し，歯切れのよい 24 章とする構想に変更し，作成したが，やはり，まだ，ページ数がオーバーして 1〜2 章分を削除する必要に迫られた．最終的に取ったのは,「$U(1)$ 問題」というタイトルの章と参考文献の削除（それらは HP 上に掲載する）である．23 という数字は当初，あまり好きになれなかったが，5 月 15 日の W 杯代表発表後は，すっかり気に入っている.「$U(1)$ 問題」を外して,「双対共鳴模型」を選んだことを人は「サプライズ」と呼ぶかもしれない.

例題 17.2 の解はスピン J の値が整数の場合を議論している.

17.2 節では，相対性理論でしばしば使用される計量に関する表記 $\eta_{\mu\nu} = \mathrm{diag}(-1, +1, \cdots, +1)$ を用いているのをコメントし忘れました（すいません）.

[正誤表]
153 ページ下から 6 行目　（誤）$g_{ab} = \mathrm{diag}(1, -1) \equiv \eta_{ab}$ ，（正）$g_{ab} = \mathrm{diag}(-1, 1) \equiv \eta_{ab}$
156 ページ 1 行目
（誤）タキオンの散乱振幅 ，（正）図 17.5 のような散乱過程の散乱振幅
158 ページ 5 行目
（誤）ソリトン解を見つけたこと ，（正）ソリトン解がブラック p ブレイン（p 次元的に拡がった質量分布を持つ重力理論の解）であることを示したこと

「第 18 章　パートン模型」に関して

ハドロンの構成要素に関して，ゲルマンとファインマンが激しく論争しあったことは有名

である．ゲルマンは「クォーク」であると考え，ファインマンは「パートン」と考えた．結局,「荷電パートン＝ {価クォーク，海クォーク}」「中性パートン＝グルーオン」という解釈で落ち着くことになる．

「第 19 章　量子色力学」に関して

人はコード（暗号）に心を引かれる．量子色力学の研究は，つまるところ $\mathscr{L}_{\mathrm{QCD}}$ に秘められたコードの解読である．余談ではあるが，本書にはコードは組み込まれていない．それを行う理由はないし，したたかさもありません．

「第 20 章　格子ゲージ理論」に関して

「繰り込み理論再考」は，章立てにするほどの十分な内容を有しているが，スペースの都合で簡略化して節に組み入れた．

「人間原理」とは「自然界の基本法則を探究する人間という生物が存在している．この事実に反しないように，この世界はできている.」である．例えば，物理定数の値が少しずれていたら,（知的生命体が生まれないような）全く異なる世界になっていたと考えられる．

「第 21 章　小林・益川理論」に関して

CP 不変性の破れはラグランジアンに現れる物理的な複素位相に起因する．ここで,「ソフトに CP 不変性を破る機構」と呼ばれる小林・益川理論とは異なる機構を補足説明する．ソフトに CP 不変性を破る機構とは「複数のヒッグス 2 重項を持った模型において，複素数の真空期待値を得ることにより CP 不変性が自発的に破れる機構」のことである．

「第 22 章　ニュートリノの問題」に関して

「密度パラメータ」とは,「臨界エネルギー密度 ρ_{cr} と宇宙における物質，放射，真空のエネルギー密度の平均値の総和 ρ_{tot} との比で定義されるパラメータ Ω」である．具体的には,自然単位系で次の公式で表される．

$$\Omega \equiv \frac{\rho_{\mathrm{tot}}}{\rho_{\mathrm{cr}}}\,,\ \ \rho_{\mathrm{cr}} \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}\,.$$

ここで，H はハッブルパラメータ，G はニュートンの重力定数である．

[正誤表]
198 ページ 5 行目 （誤）第 16 章 ，（正）第 15 章
205 ページ下から 2 行目 （誤）軽いの場合，　，（正）軽い場合,

「第 23 章　標準模型とそれを超えて」に関して

標準模型を超える理論の構築に際して，非常に多くの試みや模型の提案が行われている．しかし，本物があるとは限りません．近い将来，LHC や大型の線形加速器（LC）による衝突実験により，新たな多くのドラマ・物語（章）が生まれる可能性が高い．本書や他の参考文献などを使って，素粒子物理学を学ぶことにより，標準模型を超える未知の現象を目の当たりにしたとき，そして，新しい物理が構築されたとき，深い感動が得られると思います．いや，読者自身が新しい物理の構築に深く係わる事を期待いたします．

$\boxed{\text{活躍の舞台がすぐそこにある！}}$

[正誤表]
217 ページ下から 7 行目　（誤）してい頂けたと思う．　，（正）して頂けたと思う．