

相对論的多体系としての原子核
－ 相对論的平均場理論とカイラル対称性 －

土岐 博、保坂 淳

平成 20 年 3 月 26 日

まえがき

この本は阪大で物理学を専攻しようとする学部4年と修士1年の学生を対象に行っている授業をもとにして書かれてある。原子核物理の話題は数多く多岐にわたっているが、最近とくに強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (Quantum Chromodynamics = QCD) に基づいた研究が活発に行われている。強い相互作用の基礎理論が QCD であることが認識されたのがすでに 1970 年代であるので、この様な研究はすでに 30 年以上も続けられてきていることになるが、強い相互作用の法則が思いのほか難しく、原子核の問題を QCD から直接解くという点では十分成果が得られるに至っていない。この状況は、現在でも完全に解決された訳ではなく、今日に至るまで多くの研究者が研究を続けている。

しかしながら最近になり、面白い発展の方向付けがなされようとしている。カイラル対称性という、QCD の最も重要な側面を原子核物理で本格的に取り入れようとする研究である。この際、パイ中間子の導入が不可欠になる。元々パイ中間子は 1934 年に湯川秀樹によって、強い相互作用をする核力を説明しようとして導入された粒子である。その後素粒子物理学の発展において、非常に重要な役割を果たしてきたにもかかわらず、これまで多くの原子核物理の研究ではそれほど重視されてこなかった。多くの核子から構成される原子核において、電荷とスピンを交換しながら相互作用をするパイ中間子を正確に扱うことは非常に難しく、その効果を陽に扱うことは多くの場合避けられてきた。これを、再度見直そうというのである。近年の計算機性能の向上により、複雑な系に対しても厳密な計算が可能になってきたという事情が大いに手伝っている。

パイ中間子とカイラル対称性の問題を扱おうとすると、相対性理論に基づいた量子力学が不可欠になる。これは相対論的量子場の理論の分野であるが、今日、原子核より小さな系を研究しようとする際には必要不可欠な道具である。これを修得するのはそれほどたやすいことではなく、多くの学生そして研究者が相当の時間を費やしてようやく使えるようになっていく。それ相応の努力が必要であるが、一旦それなりの理解に到達すると、驚くほどに自然法則を探求するのに便利な道具であることがわかる。

この教科書は、相対論的量子場の理論に基づいて、最近の原子核物理学がどのように理解されていくかを紹介したものである。およそ各章が 1 回分の授業内容になるように構成した。1 回の授業で説明できる量は限られてくるので、他の関連授業や自学自習に委ねる部分も多々あるかと思う。しかしこの本全体を読み通すことによって、上で述べたような雰囲気は伝わるのではないかと思う。各章の終わりには、簡潔なまとめと問題を用意した。まとめには、最低限その章で学ぶべきことのキーワードが書かれてある。

著者には各章の印象を絵にしてみたいという願望が強くあった。何かを理解し議論する

際には、多かれ少なかれそれなりのものをイメージしているはずである。そこでこの本では試みとして、各章にそれぞれの内容及び人をイメージしたイラストを挿入した。著者の共同研究者である門田英子氏に内容の一読をお願いし、実際にイメージしたものを描いてもらった。著者の方からも多少の注文をつけた。門田氏に感謝したい。

参考文献

この本を執筆するにあたって、いくつかの教科書を参考にした。またこの本のスタイルとして、通常の教科書のように基礎からの過程をすべて記述するというようにしなかった。あえて、手短にすましたところが多々ある。以下の参考書はこれらの点を補ってくれる。

1. J.D. Bjorken and S.D. Drell 著

”Relativistic Quantum Mechanics ”および ”Relativistic Quantum Fields ”(McGraw-Hill Book Company, 1964 年および 1965 年)

相対論的量子力学、場の理論の古典的な名著。ディラック方程式がどのように導出され、どのように応用されるかがいろいろな例とともに詳しく説明されている。

2. 杉本健三、村岡光男 著

原子核物理学 (共立出版、1988 年)

多くの実験データをもとに、原子核物理の説明がなされている。

3. A. Hosaka and H. Toki 著

”Quarks, Baryons and Chiral Symmetry ” (World Scientific, 2001 年)

カイラル対称性を大学院の学生や分野の若い研究者のために紹介した本である。ハドロン物理で実際にどのようにカイラル対称性が使われているかが記述されている。

4. L.N. Sabushkin and H. Toki 著

”The Atomic Nucleus as a Relativistic System ” (Springer, 2004 年)

原子核を相対論的平均場近似で記述するのに必要な数学を説明した本である。相対論的方法で原子核を記述している研究を紹介してある。

5. A. Bohr and B.R. Mottelson 著

”Nuclear Structure” (World Scientific, 1998 年)

原子核物理の古典的な名著。基本事項として原子核における対称性を正確に記述している。原子核物理に限らずひろく物理一般に共通する概念や計算方法が記述されている。

目次

第 1 章	序：強い相互作用する系の面白さ	1
第 2 章	原子核の常識	5
2.1	原子核の質量	5
2.2	原子核の飽和性	7
第 3 章	マジック数とスピン軌道力	11
3.1	マジック数	11
3.2	強いスピン軌道力	15
第 4 章	相対論的量子力学	21
4.1	シュレーディンガー方程式	21
4.2	クライン・ゴールドン方程式	22
4.3	ディラック方程式	23
4.4	ディラック方程式のスピン軌道力	27
4.5	自然単位系と共変的に書かれたディラック方程式	28
4.6	ディラックの方程式から導出されるカレント	30
第 5 章	場の理論における核子と中間子	37
5.1	古典粒子の運動と古典場の理論	37
5.2	場の量子論におけるラグランジアン	40
5.3	実スカラー場の理論の正準量子化	41
5.4	場の理論における相互作用	43
5.5	アイソスピンとフレーバー	44
第 6 章	原子核の相対論的記述	51
6.1	原子核の σ - ω 模型	51
6.2	第二量子化	53

6.3	核物質の性質	55
6.4	中性子星	59
第 7 章	原子核の構造	65
7.1	σ - ω 模型を使った平均場理論による原子核	65
7.2	有限核の計算結果と実験との比較	67
第 8 章	カイラル対称性	73
8.1	パイオンの基本的な性質	73
8.2	カイラリティー	75
8.3	対称性と保存カレント	78
8.4	カイラル変換	81
第 9 章	線形シグマ模型	87
9.1	核子と中間子のラグランジアン	87
9.2	湯川型相互作用	90
9.2.1	行列要素	90
9.2.2	ポテンシャル	92
第 10 章	南部-Goldstone の定理と質量生成機構	97
10.1	線形 σ 模型のラグランジアン	97
10.2	カレント	101
第 11 章	南部-ヨナラシニオ (Nambu-Jona-Lasinio) 模型	107
11.1	平均場近似と質量生成	108
11.2	南部-Goldstone の定理	111
第 12 章	原子核におけるカイラル対称性	119
12.1	原子核の線形 σ 模型での記述	119
第 13 章	原子核と量子色力学	125
13.1	カイラル対称性の申し子であるパイオン	125
13.2	パイオンの原子核における働き	126
13.3	原子核の物理	127