

## まえがき

この本は、大学1年生の文科系を含む学生を対象とした講義「宇宙物理学入門」と、自然科学系3年生以上を対象とした講義「宇宙物理学概論」の両方のために作ったなんとも欲張りな本である。良識のある著者ならばこのような無謀を働くことはせずに、初心者向けのやさしい本と専門向けの難しい本を書くであろう。しかしこの本では、一冊を読めば宇宙物理の最先端の研究を始めるに必要な予備知識を身につけることができるだけでなく、難しいところはどんどん読み飛ばしても、日常生活をより豊かにする（支障は生じないと思う）に十分な知識を得ることができるようにする試みを行ってしまった。

各章のはじめのうちはやさしい内容を中心に書いたので、すべての読者は読むことができるであろう。3段落ほど進んだところから式が登場したりすることがある。勇気ある学生はどんどん読んでいって、計算を自力でやってほしい。もちろんここは読み飛ばしてしまっても、大学初年度の一般教養程度の知識はそれまでの段落で身に付いているはずなので自信を持って「この本を読破しました」と宣言してほしい。

この本は大きく2部に分かれている。

第1部では恒星の進化について、何よりはじめには夜空に見えている恒星の分類について紹介し、色鮮やかに輝く恒星の秘密について紹介する。この章では後の章で使われる専門用語の基礎（意味）がたくさん紹介されているので熟読されることをお薦めする。はじめに身近な太陽の解説を行う。太陽は近くにあるものの、特にその内部に関してはなかなか理解されてこなかった。最近10年間の飛躍的な進歩で太陽内部の構造について詳しいことが解ってきたのでそれについて解説することにする。

その後で太陽以外の一般の恒星の進化について解説する。恒星の質量によって進化の道筋が決まっていることがわかり、大きな恒星は最後に華々しく爆発して超新星となり、全体を吹き飛ばしたり、中心部に高密度の（角砂糖一個分の質量がなんと1tを超える）白色矮星や数億tを超える中性子星、さらには吸収したものは一切外には出さないブラックホールなどを作る。一方小さな恒星はわずかな燃料をゆっくりと消費し、静かにその一生を終えていくことが知られている。

第2部では宇宙の構造と進化について紹介する。はじめに広大な宇宙空間でどのように天体の距離を測定していくかについて紹介していく。地球上で距離を測るのは違って現地まで行って距離を測定するわけにはいかないので、いろいろな方法を組み合わせて徐々に遠方の天体の距離を明らかにしていく。近くの天体を測定することができる一定の明るさを持つ天体（標準光源という）を利用して近くの天体を測定し、その天体で更に新しい基準となる明るい標準光源を見つける。このようにして距離の測定方法を順序立てて測定する方法は「距離の梯子」として知られている。

古代から人類は宇宙の構造をさまざまに想像してきた、そして、19世紀の終わり頃から科学的なデータをもとに現在多くの研究者が考えているような宇宙を作り上げてきた。その歴史をはじめにひもといてみる。現代でも宇宙は永遠不変であるという理論と時々刻々と進化を続けているという説が対立しており、議論の最中である。とはいえ、多くの観測データは、宇宙は過去のある時点で誕生し、進化を続けているという進化宇宙論、その中でも宇宙が加速しながら膨張しているという膨張宇宙論が主流である。膨張宇宙論の理論的基礎はアインシュタインが作った相対性理論である。はじめにアインシュタインが構築した理論を紹介し、そのいくつかの解について議論する。

6章では宇宙の主成分の一つである宇宙暗黒物質の探索について詳しく説明する。筆者が今まで十数年にわたって宇宙暗黒物質探索を行ってきたこともあって少々微にわたって記述されすぎている感が強

いが、思い入れの強さがそのような結果を生んでしまったので容赦いただきたい。難しいと思われる方は遠慮なく読み飛ばしていただいて結構である。7章で宇宙の始まりと元素の起源について紹介する。5章で解説したビッグバン宇宙論に基づく宇宙論では全てのものはエネルギーから作られる。通常の素粒子理論ではエネルギーからは物質と反物質が同数ずつ作られる。しかし、現在我々が観測している宇宙では物質しか観測されていない。反物質はどこへ行ったのか、このような問題について解説する。さらに宇宙の進化の歴史について詳しい観測が進んでいるので紹介していきたい。ここの内容は5章の膨張宇宙論で解説したことを更に詳しく解説したのものもあるので少し深く勉強できるであろう。

## 第2版にあたって

先輩に「教科書は売れないよ」と言われていたにもかかわらず、初版は売り切れてしまった。これも拙著を教科書に採用してくださっている多くの先生のおかげとこの場で御礼申し上げる。初版を2008年に上梓してからわずか7年で初版の内容はだいぶ古くなってしまった。これはこれまでのこの分野の観測技術の飛躍的な進歩によるものが大きい。6年で売り切れるのであればこの際速報性のある情報も盛り込んでおこうという気分になって、いくつかの章で最新の情報を取り入れた。

基本姿勢は初版と変わらず、大学初年次から大学院生まで使えるという欲張った内容にしている。大きな変更点は、

1. 本題に入る前に宇宙全体の概観と構成要素の紹介をすることにした。これから勉強する宇宙とはどんなもので何が面白いかということを非常に簡単に紹介している。ここでは写真を多用してイメージをつかみやすいように配慮したつもりであるが、授業ではもっとたくさんの写真をスクリーンに映すことで理解をより深めることができる。
2. 初版では宇宙論の後に宇宙暗黒物質の解説をし、そのあとに宇宙進化の話をしていたが、話の連続性を考えると宇宙論、宇宙進化、宇宙暗黒物質の順に話をするほうがよいと考えて修正した。
3. 付録に相対性理論の概説を加えた。宇宙科学を専門で解説する大学ならばたいはいは相対性理論の授業があるはずであるが、本書でもある程度解説しておいたほうがよいと感じたためである。

次の第3版を出すころには宇宙物理学の講義はどのように変わってきているのか楽しみにしている。

2015年8月

# 目次

序論・宇宙の階層.....	1
第I部 恒星.....	11
第1章 恒星の種類.....	13
1.1 恒星の明るさ.....	13
1.2 恒星の色.....	14
1.3 恒星の色とスペクトル型.....	16
1.4 ヘルツシュプルング・ラッセル図.....	16
第2章 太陽.....	21
2.1 太陽の表面.....	21
2.2 太陽の熱源.....	22
2.3 pp連鎖反応.....	24
2.4 太陽ニュートリノの観測.....	27
2.5 太陽ニュートリノ問題.....	31
第3章 恒星の進化.....	37
3.1 恒星の誕生.....	37
3.2 ヘリウムの燃焼.....	37
3.3 ヘリウムが燃え尽きた後の進化.....	38
3.4 超新星の分類.....	40
3.5 I型超新星.....	40
3.6 II型超新星.....	42
3.7 中性子星・ブラックホール.....	43
3.8 ブラックホールの時空.....	44
3.9 裸の特異点と特異点定理.....	46
第II部 宇宙の構造と進化.....	49
第4章 宇宙の広さ.....	51

4.1	はじめに . . . . .	51
4.2	年周視差 . . . . .	52
4.3	変光星による距離測定 . . . . .	54
4.4	超新星による距離測定 . . . . .	55
4.5	距離のはしご . . . . .	55
第 5 章	宇宙論 . . . . .	57
5.1	宇宙論の変遷 . . . . .	57
5.2	プトレマイオスの天動説 . . . . .	57
5.3	地動説 . . . . .	59
5.4	膨張宇宙論 . . . . .	65
5.5	膨張宇宙論の理論的基礎 . . . . .	69
5.6	Friedmann の膨張方程式 . . . . .	70
5.7	膨張方程式の解 . . . . .	73
第 6 章	宇宙の進化 . . . . .	78
6.1	膨張宇宙論 (進化宇宙論) の観測的証拠 . . . . .	78
6.2	宇宙の始まりと物質の起源 . . . . .	89
6.3	宇宙の晴れ上がり . . . . .	97
6.4	クォーサーの時代と宇宙の再電離 . . . . .	98
6.5	銀河形成 . . . . .	103
第 7 章	宇宙暗黒物質 . . . . .	106
7.1	宇宙を構成するもの . . . . .	106
7.2	銀河団の力学的質量 . . . . .	107
7.3	銀河の力学的質量 . . . . .	108
7.4	宇宙暗黒物質の分類 . . . . .	109
7.5	アキシオン . . . . .	110
7.6	超対称性粒子 . . . . .	115
7.7	WIMPs の探索法 . . . . .	119
7.8	世界の WIMPs 探索実験 . . . . .	126
7.9	宇宙暗黒物質探索の展望 . . . . .	132
付録 A	相対性理論入門 . . . . .	134
A.1	特殊相対性理論 . . . . .	134
A.2	一般相対性理論 . . . . .	148
A.3	計量テンソルによる空間の記述 . . . . .	151
A.4	歪んだ空間の表し方 . . . . .	152
付録 B	ニュートリノの性質 . . . . .	155
B.1	標準理論とニュートリノ . . . . .	155

B.2	ニュートリノの質量 . . . . .	157
付録 C	ビリアル定理 . . . . .	162
付録 D	球面調和関数 . . . . .	164
付録 E	単位・定数 . . . . .	166
E.1	単位換算 . . . . .	166
E.2	宇宙物理学でよく使う定数 . . . . .	167
E.3	その他 . . . . .	168
付録 F	参考図書 . . . . .	169
索引	. . . . .	172