

報告

大学教育の分野別質保証のための
教育課程編成上の参照基準
物理学・天文学分野



平成28年（2016年）10月3日

日本学術会議

物理学委員会

物理学分野の参照基準検討分科会

この報告は、日本学術会議物理学委員会物理学分野の参照基準検討分科会の審議結果を
取りまとめ公表するものである。

日本学術会議物理学委員会物理学分野の参照基準検討分科会

委員長	田島 節子	(第三部会員)	大阪大学理学研究科教授
副委員長	江口 徹	(連携会員)	立教大学理学研究科特任教授
幹事	芝井 広	(連携会員)	大阪大学理学研究科教授
	岡村 定矩	(連携会員)	法政大学理工学部教授
	櫻井 博儀	(連携会員)	東京大学理学系研究科教授
	覧具 博義	(連携会員)	東京農工大学名誉教授
	笠 潤平	(連携会員)	香川大学教育学部教授
	須藤 彰三	(連携会員)	東北大学理学研究科教授

報告書作成にあたり、日本物理学会及び日本天文学会にご協力いただいた。

本報告書の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務局	石井 康彦	参事官 (審議第二担当)
	松宮 志麻	参事官 (審議第二担当) 付補佐
	西川 美雪	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職付

要 旨

1 作成の背景

2008年5月、日本学術会議は、文部科学省高等教育局長から学術会議会長宛に「大学教育の分野別質保証の在り方に関する審議について」と題する依頼を受けた。これを受けて日本学術会議は、同年6月に、課題別委員会「大学教育の分野別質保証の在り方検討委員会」を設置して審議を重ね、2010年7月に回答「大学教育の分野別質保証の在り方について」を取りまとめ、同年8月に文部科学省に手交した[1][2]。

同回答においては、分野別質保証のための方法として、分野別の教育課程編成上の参照基準を策定することを提案している。日本学術会議では、回答の手交後、いくつかの分野に関して参照基準の策定のための審議を進めてきた[3]。

物理学・天文学分野については、第三部物理学委員会が策定方法を検討し、物理教育や天文教育について議論する部門を擁する日本物理学会と日本天文学会に、第一段階の議論を依頼した。その結果報告を受け、2015年4月に物理学委員会の下に「物理学分野の参照基準検討分科会」を設置し、審議を開始した。ほぼ同時期に、物理学会と天文学会はそれぞれ参照基準に関するシンポジウムを開催し、関係者の意見を集めた。分科会では、それらの議論も参考にしつつ、審議を重ねた。本報告は、この「物理学分野の参照基準検討分科会」の審議結果をまとめたものである。なお、物理学と天文学は源流を一にしつつ、互いに相補的な科学として発展してきたため、学部教育では共通する部分が多い。このことを考慮し、両分野の参照基準を一つにまとめることとした。

2 報告の内容

(1) 物理学・天文学分野の定義

物理学・天文学分野は、「我々を取り囲む自然界に起こる現象のしくみやその奥に存在する法則を、実験や観測から得られる事実を頼りに探究するとともに、それらの知見をもとに狭義の自然界を越えたより広い世界の多様性を理解しようとする学問分野」であると言することができる。物理学の成果は、人類の知的欲求を満たすと同時に、技術の発展を促し、我々の生活を豊かなものとしている。天文学は研究対象を「宇宙の果てまでの空間」と「宇宙の始まりまでの時間」に広げ、「宇宙の諸現象と宇宙そのものの成り立ちを理解しようとする学問」として、我々の世界観に大きな影響を与えている。

(2) 物理学・天文学分野に固有の特性

物理学・天文学の基本的構成要素と特性としては、(i)基本法則に基づき自然界を理解しようとするものであること、(ii)その基本法則は数学という言葉で記述されること、(iii)自然現象をモデル化し定量的予測をすることを目指していること、(iv)実験と観測が重要な位置を占め、そのために必要な技術も学問分野の重要な一部であること、(v)理論と実験が分業されていること、などが挙げられる。

物理学・天文学の自然認識に関しては、素粒子から宇宙に至る物質の階層性が中心的概念となる。それに関連して、基本法則は階層ごとに適用範囲があることも、重要な自

然認識である。

また、天文学は人類最古の学問の一つとされ、天体现象及びその議論が、神話、伝説、政治、哲学、宗教、世界観、風俗、農耕、暦法、時計、航海術、人工衛星などを通じて、人類の知性の形成、さらには文明や科学の発展に大きい影響を及ぼしてきた。その結果、天文学は他研究分野との交流や社会との交流が特に活発である。

(3) 物理学・天文学分野を学ぶ学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養

学士専門課程において、物理学・天文学分野の学びを通じて獲得すべき基本的な知識は、力学、熱力学、統計力学、電磁気学、特殊相対論、量子力学、実験・観測といった基本的科目の中心概念や実験・計算のスキルである。その他に、素粒子、原子核、物性、光学、流体、弾性体、プラズマ、生物物理などの内容を適宜選択して学ぶ。天文学では、宇宙の階層構造や元素・物質の起源、天文学の歴史や宇宙観の変遷についても学ぶ。

これらの学修を通じて、学生は物理的問題を数学的形式に書き換える能力や実験・観測を計画・実行しレポートにまとめる能力など、さまざまな分野固有の能力を身につける。さらに、問題抽出能力、客観的・相対的視点を持つ能力、問題解決能力、コミュニケーション能力、情報収集能力、ICT 技術活用能力、個人としての学修能力、グループとしての学修能力、倫理的価値判断をする能力などのジェネリックスキルを身につける。

このようにして獲得された能力は、社会のあらゆる分野で役立つ能力であり、職業的意義は大きく、物理学・天文学を学んだ学生は実際さまざまな職業で活躍している。

(4) 学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方

物理学は、数学と同様に、積み重ねの学問領域である。そのため、知識の習得のためには、順序良く、系統的に授業を構成する必要がある。加えて物理学・天文学は、数学と異なり、実験や観察、観測をもとに自然現象を探究する学問領域であり、理論的考察と実験・観測的考察を連携させながら自然現象を理解することが求められる。“講義”のクラス、それに伴う“問題演習”のクラス、そして、“実験・観測”のクラス、“卒業研究”が典型的な授業の構成要素になっている。

学生の達成度評価の最も基本的な方法として、中間試験や期末試験、小テストなどの各種筆記試験があり、実験レポートや実験ノートも良い評価手段となる。

(5) 市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育の関わり

物理学・天文学以外の理系学生や文系学生は、一般教養科目として物理学・天文学を学ぶことにより、批判的思考能力、真摯に自然と向き合える能力、全宇宙的視点で考える能力、実験やセミナーにおける共同作業を通して得られる、自立を尊び、他の学生を尊重する能力を身に付けることができる。

一方、物理学関係学科の卒業生は、コミュニケーション能力、物理以外の理系分野や法律・経済などの知識、感性的なものへの理解などが不足している、と自覚しており、これらを補うためにも教養教育は必要不可欠である。

目 次

1	はじめに	1
2	物理学・天文学分野の定義と発展の歴史	2
3	物理学・天文学分野に固有の特性	5
	(1) 物理学・天文学の基本的構成要素と特性	5
	(2) 物理学・天文学の自然認識	7
	(3) 天文学固有の特性：他研究分野や社会との交流	8
	(4) 現代物理学・天文学の目指すもの	9
4	物理学・天文学分野を学ぶ学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養	10
	(1) 物理学・天文学分野の学びを通じて獲得すべき基本的な知識と理解	10
	(2) 物理学・天文学分野の学びを通じて獲得すべき基本的な能力	12
5	学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方	15
	(1) 学修方法	15
	(2) 学修成果の評価方法	17
6	市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育との関わり	18
	(1) 物理学・天文学を学ぶことで涵養される市民性	18
	(2) 物理学・天文学を専攻する学生への教養教育の必要性	19
	<参考文献>	21
	<参考資料1> 審議経過	23
	<参考資料2> シンポジウム開催経過	24

1 はじめに

高等学校の理科教育には物理という科目があり、新聞等に天文や宇宙という言葉がしばしば登場することから、社会の人々は物理学や天文学に対しておおよそのイメージを持っていると思われる。しかしながら、大学においてこれらの学問が「どのように」「どこまで」教育されているのか、広く知られているとは言いがたい。物理学の一つの特徴は、古典から現代まで整然とした学問体系が構築されており、教育においても教えるべき内容やその順番が明確なことである。従って、国内外のほとんどの大学において、暗黙の了解のもとに、専門家として身につけるべき科目が、低学年から高学年へ向かって系統だった形で教えられている。本参照基準は、そのような現状を基に、学問分野の特性、獲得を目指すべき知識や能力、学修方法や評価方法などについて、あらためて議論しまとめたものである。

人類の科学の歴史を振り返ると、物理学・天文学は最も古い学問分野の一つと言える。どの古代文明においても、星の観測による暦づくりが存在したことは、驚くべきことである。天体は古代から人類共通の興味の対象であり、生活に深くかかわるとともに、その研究は文明・文化の発展の重要な一端を担ってきた。

16世紀以降の近代科学に関して言えば、天体の運行の謎や落体の運動を解き明かすことから始まった物理学は、研究対象を身の回りのすべてのものに広げ、自然現象の根本原理の発見を目的として発展してきた。その成果は、工学という重要な分野を生み出し、科学技術の発展を促して現代文明の礎となった。しかし物理学の歴史を振り返るとき、人類に快適な生活をもたらした正の側面だけでなく、戦争の道具や公害といった負の側面で人類の生存に大きな脅威をもたらしたことも忘れてはならない。

天文学は、宇宙や天体そのものを興味の対象とする学問として発展してきた。人々の宇宙に対して抱く好奇心やロマンは、現代でも尽きることがなく、宇宙天体現象に関する報道の多さや各地の公共天文台等の盛況ぶりなどは、それを反映していると言えよう。

このように物理学と天文学は、源流を一にしつつ、互いに相補的な基礎科学として発展している。実際、国内では物理学科と天文学科が独立に存在する大学は少なく、天文学教育は物理学科教育の一部として行われているところが多い。海外でも Physics and Astronomy という学科が多く存在する。これは、両者の学士課程教育に共通する部分が多いためである。従って、本参照基準では、学士課程教育に照準を絞り、両分野の学生に共通した「学ぶべき素養」についてまとめる。

人類の知の限界に挑む学問分野として、今後も物理学・天文学が果たす役割は非常に大きい。学問の体系や特徴を改めて見直し、学士課程教育によって身につく素養を明示することで、高校の教員や生徒には高校教育の先にあるものを示し、企業等には物理学・天文学の教育を受けた人材の活用を促すといった形で、本参照基準が役立てられることを期待する。

なお、関連した分野である「地球惑星科学」については、日本学術会議・地球惑星科学委員会によって、独立した参照基準が策定されている。また、天文学教育については、専門課程だけでなく教養教育と一般社会へのアウトリーチも含めた「天文学の教育と普及(仮題)」が日本天文学会から公表される予定である。

2 物理学・天文学分野の定義と発展の歴史

物理学・天文学は自然科学の一つの学問分野であり、その源流は人類文明が始まった古代における天体の運行に関する研究に遡る。近代科学としての物理学・天文学は16世紀後半に始まり現在に至るまで自然理解の地平を絶えず広げながら発展してきている。21世紀に入った現在の状況を考慮して物理学・天文学を定義するのは容易ではない。あえて言えば、「我々を取り囲む自然界に起こる現象のしくみやその奥に存在する法則を、実験や観測から得られる事実を頼りに探究するとともに、それらの知見をもとに狭義の自然界を越えたより広い世界の多様性を理解しようとする学問分野である」と要約できるであろう。その背景には、「自然現象は数学によって表現される法則によって記述される」という基本哲学がある。物理学の精神は「可能な限り少数の単純な基本法則によって自然界を統一的に説明すること」にあると言って良いだろう。その成果は、人類の知的欲求を満たすとともに、技術の発展を促し、我々の生活を豊かなものとしている。天文学は研究対象を「宇宙の果てまでの空間」と「宇宙の始まりまでの時間」に広げ、「宇宙の諸現象と宇宙そのものの成り立ちを理解しようとする学問」として、我々の世界観に大きな影響を与えてきている。

次に、物理概念の発展の歴史を振り返りながら、このような学問分野の定義の背景を明らかにしていこう。哲学としての物理概念は、古代ギリシャのアリストテレスの宇宙論・運動論やアルキメデスの“てこ”の原理・浮力の原理(アルキメデスの原理)等に遡ることができる。しかし、「実験」と「論証」に基づく物理学は、16世紀以降に形づくられてくる。

始まりは、天体はどのように運動するのだろうか、地球上の物体はどのように運動するのだろうか、という疑問であった。16世紀後半から17世紀初め、ケプラーは、ティコ・ブラーエの精密な天体観測結果をもとに、惑星の運行に関する“ケプラーの三法則”をまとめた。ほぼ同じ時期、ガリレオは、人間が自然に働きかけてその仕組を明らかにする「実験」という手法を開発し、「論証」と合わせて、“振り子の等時性”、“落体の運動(自由落下)”、そして、外力がなければ静止した物体は静止したままであり、運動している物体は等速直線運動をするという“慣性の法則”をまとめた。17世紀後半、上述の天体の運動と地上の物体の運動は、ニュートンによって統一されることになる。1687年、ニュートンは最も基本的な法則“運動の三法則”と“万有引力の法則”を発表し、ケプラーの三法則、ガリレオの振り子の等時性、自由落下運動等の全ての運動は、この基本的法則から完全に導き出せることを明らかにした。この時、ニュートンは微分積分学を建設し、微分方程式を使って自然現象を研究する手法を産み出した。「力学」の完成である。力学を適用することにより、人類は惑星や物体の運動を予測することが可能となった。

18世紀に入ると技術は格段に進歩し、歴史は産業革命へと進み、その中でワットの改良した蒸気機関は社会的に大きな役割を果たした。そこで生まれてきたのは、熱が機械力を生む時、その過程の中にどのような自然法則が潜んでいるのかという問題である。カルノー、ジュール、ヘルムホルツ、トムソン(ケルヴィン卿)、クラウジウス等により“熱力学の三法則(第0法則、第1法則、第2法則)”をもとに「熱力学」が体系化され、今日、

我々の用いている意味でのエネルギー、絶対温度、エントロピー等の概念が導入された。19世紀後半になるとヘルムホルツにより自由エネルギーが、ギブスにより化学ポテンシャルが導入され、化学反応を含む広い範囲の現象を熱力学で議論することが可能になってきた。この後熱力学はさらに体系化が進み、物質（気体・液体・固体）を構成する原子や分子に基づく「統計力学」へと発展した。

ほぼ同時期に、我々の身の回りに存在する電気と磁気に関する問題が研究されるようになってきた。1864年、マクスウェルは、電磁気現象を記述する最も基本的な法則として“マクスウェル方程式”を提案した。マクスウェル方程式は、それ以前に発見された電荷に関する“クーロンの法則”、2本の導体の間に働く磁気力に関する“アンペールの法則”、ファラデーの“電磁誘導の法則”等を体系化したものである。さらに、“マクスウェル方程式”と電荷が電場と磁場によって受ける力を表す“ローレンツ力”によって、全ての電磁現象が統一的に理解できることが分かった。「電磁気学」の完成である。また、マクスウェル方程式では電磁波の存在も予言され、19世紀後半にヘルツの実験によりその存在が確認された。さらに、その方程式では電磁波の伝わる速さも確定しており、それが光の速さの測定値に近いことから、光も電磁波であると考えられた。これらの成果は、電気、磁気、電磁波(光)は、マクスウェル方程式により統一的に記述されることを示す。日常、我々が使用しているモーターや冷蔵庫等の電化製品は、電磁気学に基づいて開発された技術によって製品化されている。

光（電磁波）が波動方程式で記述される波であることが分かった19世紀後半から20世紀初めにかけて、それを伝える媒質（エーテル）の探索とその性質の議論が真剣に行われた。アインシュタインは、ガリレオの“慣性の法則”の成り立つ世界では、光の速さは一定であり、物理法則も変わらないと考える“特殊相対性理論”を完成して、実験結果を説明した。彼は、他の物理学者のようにエーテルの存在を仮定して工夫することをやめた。この結果は、動いている座標系では、止まっている座標系に対して時間が遅れ、長さが縮む（ローレンツ収縮）ように見える、しかもそれがどちらの座標系でも成り立つという奇妙な現象が起きることを示す。さらに、重力の問題を考え、ニュートンの“万有引力の法則”より基本的な“一般相対性理論(アインシュタイン方程式)”を提案した。一般相対性理論は、宇宙の起源や進化の問題と深くかかわり、現在も活発に研究されている。

最後に重要なのが、「量子力学」である。19世紀後半から20世紀初めにかけて、それまでに確立してきた「力学」、「電磁気学」、「熱力学・統計力学」で説明のつかない自然現象が次々と発見された。例として、プランクは溶鉱炉から放射される光（電磁波）の強度と振動数の関係を、光（電磁波）のエネルギーは連続量ではなく離散化してやりとりされるとするという提案から導いた“プランクの公式”で説明した。さらに、この考えを進めてアインシュタインは光自体を量子と仮定し光電効果を説明した（光量子仮説）。これらの実験事実を論証することにより、光はいわば波であり粒子であること（光の二重性）が明らかになった。一方、J. J. トムソンにより発見された電子も、原子の構造を説明する“ボーアの量子仮説”、“物質波の仮説（ド・ブロイの関係式）”により粒子性と波動性があるのではないかと考えられるようになり、やがて結晶による回折も確認された。これらの公式

や仮説を統一する基本法則として、独立に“ハイゼンベルクの行列力学(不確定性原理を含む)”及び“シュレディンガー方程式”が提案され「量子力学」が完成した。量子力学は原子や分子などの微視的(ミクロ)な物理現象を説明し、現代物理学の基礎となっている。加えて、応用の面からトランジスタ効果の発見に始まる電子デバイスやレーザーの動作原理等の提案につながっている。現在に至るまで活発な研究がなされており、ミクロな世界で量子力学の破れを示す現象は見つかっていない。

宇宙で起きる現象を解明する基礎もまた、物理法則をはじめとする既知または未知の自然法則である。宇宙には、地上では実現できない極限的物理状態が存在し、かつ最大の空間スケールは 10^{26} メートル(138億光年)、最長の時間スケールは過去方向のみでも138億年にも及ぶ。宇宙の観測から既知の自然法則の新しい理解や全く新しい法則の発見がもたらされることも多く、最近のダークマターとダークエネルギーの発見は物理学に新たな展開をもたらしている。

このような歴史的発展の結果として、現在の物理学・天文学の研究分野は「素粒子物理学」、「原子核物理学」、「天文学・宇宙物理学」、「物性物理学」、「原子・分子・ナノ物理学」、「プラズマ・流体・非平衡系・生命物理学」、「光量子科学」、「計算物理学」、「地球惑星物理学」、「物理学史」、「物理教育研究」等へと分化し、深化している。

物理学は、自然の基本法則を探求する学問分野として、他の自然科学分野、化学、生物学、地学と結びつきが強く、また工学の基盤となって、より大きな広がりを見せている。各学問分野の法則も、物理法則に則って矛盾なく形成されており、自然を支配する基本法則の深い理解なしに、自然の産物から人類に必要な機能性や物質を開発することができないからである。例えば、20世紀半ばに当時の物理学の最先端研究手法であったX線回折実験によって、DNAの二重らせん構造が決定され、それが現代生命科学の中心的概念となっていることや、量子力学が化学の発展に重要な役割を果たしたことなどは、物理学の他分野への貢献の良い例である。加えて、物理学は、これらの分野とは常に協力的循環関係にあり、異分野での新しい発見や技術の開発が新しい物理現象の探求に結びついている。さらに、社会現象や経済を研究対象とする物理学の出現にもみられるように、今や物理学の対象は、決して狭い意味での自然界に限るものではない。また天文学は、化学、生物学、地球惑星科学、環境科学などと、より密接に関係する学際的研究分野として発展している。

なお、高校理科では、天文学に近い内容が地学の中に含まれているが、大学の学部教育においては本参照基準で述べる通り、天文学の教育は物理学分野と非常に近いものとなっている。本参照基準の「はじめに」に記述したように、「地球惑星科学」も物理学・天文学との関わりが深い、独立した参照基準としてまとめられている。

3 物理学・天文学分野に固有の特性

現代社会は、科学に支えられた技術の成果なしには1日たりとも存立しえない。その基盤を担う一学問分野としての物理学・天文学は、社会の在り方、人々の生活にも大きな影響を与える存在となっている。物理学・天文学の論理的思考法（物理的な考え方）を通して、我々は世界（人間、社会、自然）を理性的に認識するようになり、科学技術を通して豊かな生活が実現されている。本章では、分野固有の特性を挙げながら、物理学・天文学の世界（人間、社会、自然）認識の仕方と世界への関与の仕方をまとめ、次章以降の当該分野を学ぶすべての学生が身に付けるべき素養の基礎としたい。

(1) 物理学・天文学の基本的構成要素と特性

① 基本法則

物理学は実験と理論で論理的に構成される精密科学であり、自然界をエネルギーや運動量等の数少ない鍵となる物理量とそれを支配する基本法則で理解することを目指している。物理学の特性の一つは、物理学の数少ない基本法則が広く自然界で成り立つ普遍的法則であるということである。例えば力学では、ニュートンの運動方程式（第2法則）が、星や銀河の運動ばかりでなく、我々の日常生活で用いる機械や建物の強度までも予測する。また熱力学の法則は、化学反応をも記述する。

② 言語としての数学

物理学・天文学固有の特性の一つとして、基本法則が数学の言葉によって記述されていることが挙げられる。物理学・天文学が自然界を記述するのに成功している理由として、数学という厳密性を持つ言語を用いていることが一つの鍵に挙げられる。

さらに基本法則は、ほとんどの場合、微分方程式の形に書かれている。その本質的な理由は、自然界における空間（時間）の性質に依存している。ある点（時刻）における物理量の変化が、その点の周りの（その直前の時刻の）物理量の値によって決まるという近接相互作用（時間発展）の考え方を数学の言葉で表すと、必然的に微分方程式の形をとるからである。また、原点を相対化する空間、時間の並進対称性も微分方程式によって表される。

ニュートンとライプニッツが微分積分学を建設したように、それ以後今日に至るまで、数学の発展が物理学・天文学の発展を促し、物理学・天文学の発展が数学の発展を促す関係を保って、共に大きな進歩を遂げている。

③ 自然現象のモデル化と定量的予測

基本法則から自然現象を理解し定量的予測を行うために、物理学では、自然現象を先ず単純化(理想化)して考察する。例えば、物質の運動を扱う場合、初めに物体を質量はあるが大きさの無い“質点”として理想化し、ニュートンの運動方程式を解く。次に、測定している物理量の数値を求め現象を定量的に予測し、実験結果と比較する。一致しない場合は、物体の形状も考え、再び定量的予測をする。また、摩擦や空気抵

抗等も考慮し、実験結果と比較し、起きている現象を理解する。このように、基本法則をもとにモデル化された現象と実験（観測）している現象との間を振り子のように行き来して、自然現象を理解する。実験・観測の対象が日常の物理現象である限り、力学、熱・統計力学、電磁気学、量子力学の基本法則で理解が可能である。

先端の研究においては、既存の基本法則だけでは理解ができない現象も積極的に探求する。その研究を通じて、新たな基本法則を発見できるか、それができなくとも既知の法則の限界と普遍性に関する深い理解が得られるからである。この作業の繰り返しによって、物理学・天文学は常に最先端の学問分野であり続けている。

④ 実験と観測

物理学・天文学において最も重要な特性は、全ての仮説やモデルは実験で検証されるということである。上述のように、研究者は、仮説やモデルと実験結果を行き来し、仮説やモデルが正しいかどうかを検証する。現在では、この方法は全ての自然科学に広まっている。天文学の観測のように実験条件の制御が事実上不可能なものについては、統計的実験の性格を持つ。この場合、単純な仮説の検証にも統計的取り扱いが必要となり、大量のデータが必要になることが多い。近年は高性能コンピューターによるシミュレーションが広義の実験の役割を果たす場面が増えてきた。

物理学・天文学では、大きな概念の転換が繰り返し起こってきた。例えば、地球中心説（天動説）から太陽中心説（地動説）への転換、ガリレオの相対性原理の概念からアインシュタインの特殊相対性理論による時間と空間の概念の転換、古典力学における粒子と波動の個別概念からミクロな世界を支配する量子力学における光の二重性や物質波の概念への転換、静止宇宙からビッグバン膨張宇宙への宇宙観の転換等が挙げられる。物理学・天文学では、仮説やモデルが数式によって立てられ、かつ実験データが数値によって得られるため、このような転換に対して客観的で厳密な検証が可能だからである。さらに、このような物理学・天文学の基本法則や概念の転換は、人類の自然認識とその変化として、哲学を含む人文・社会科学にも大きな影響を与えてきた。

⑤ 実験・観測技術

実験及び測定・観測を行う技術と方法は物理学・天文学の一部である。多くの重要な発見は、新しい実験・観測技術の発展によってもたらされた。例えば日本で、わずかな光を検出することができる検出器“光電子増倍管”の性能を向上させることにより、マゼラン星雲で爆発した超新星から来たニュートリノの観測が可能となった。この実験結果によって、物理学及び天文学の新しい研究領域が開拓された。また、コヒーレンスの高い（位相の揃った）レーザー光源の発明は、原子や分子及び物質の物理的・化学的性質を研究するのみならず、光通信や光ディスクのピックアップ、金属や半導体の加工装置、メスなどの医療機器、計測用の照準器、授業や講演で用いるレーザーポインターなど様々に応用されている。技術開発が物理学の測定技術、天文学の

観測技術の発展を促し、発見された新しい基本法則の応用が更なる技術の発展を促す一例となっている。

⑥ 理論と実験の分業

現代において、最先端の技術を用いた「実験・観測」と高度な数学を用いて行われる「理論的考察」を同時に一人の人間が行うことは困難である。そこで、20世紀以来、物理学の研究は、主に実験研究を行う者と理論研究を行う者の二つに分かれて実施されることが多くなってきた。実験研究者は、仮説やモデルの検証のために実験装置を開発し、測定を行う。実験研究者の最先端の実験器具や精度を上げた測定が、予期せぬ自然現象を明らかにする場合も多い。一方、理論研究者は、数学を論理的な表現手段として使うばかりでなく、計算を行い、実験と比較し仮説やモデル、理論の検証、そして法則の提案を行う。既存の理論を新しい現象に適用すること、今まで用いられていた仮説を批判的に検証することなどが新しい発見に結びつく。このような分業は、必然的に両者の協力関係を促す。特定の問題（課題）に対して、理論と実験の研究者が共同で取り組むという研究スタイルは、一般的といてよい。

(2) 物理学・天文学の自然認識

① 物質の階層性、基本法則の適用範囲

物理学・天文学の対象は、宇宙全体から物質を構成する最小単位である素粒子までを含む。物質は原子から構成されている。その原子は原子核と電子から構成されており、原子核は陽子と中性子から構成され、陽子と中性子は、現在素粒子と考えられているクォークから構成されている。これは、物質の階層性として理解されている。

物理現象を記述する基本法則や概念として、「力学」のニュートンの運動方程式、万有引力の法則、「熱力学」の3法則、「電磁気学」のマクスウェル方程式、ローレンツ力、「量子力学」のシュレディンガー方程式が挙げられる。さらに、光速に近い運動の場合には、特殊相対論による補正が必要になってくる。

一般に、個々の原子の性質を反映する系を微視的（マイクロ）な系、連続的な物質として扱える系を巨視的（マクロ）な系と呼び、マイクロな系ではシュレディンガー方程式が物理現象を記述し、マクロな系ではニュートンの運動方程式が記述している。一方、熱力学の3法則は、生物も含む自然界の全ての階層で成り立つと考えられている。このように、基本法則は、その適用範囲を持ち、対象とする系の自然現象を記述する。

原子核内で起こる自然現象も、量子力学を基本として発展した理論によって解明が進んでいる。そのような物理学・天文学の発展の流れの中で、宇宙の構成要素として原子から構成される物質は少なく、ダークマター、ダークエネルギーと呼ばれる既知の物質階層では説明できないものがほとんどであることが明らかになってきた。このように、物理学・天文学は、更なる自然の理解へと探究を進めている。

② 世界観・宇宙観の形成

物理学・天文学は古代から人類の世界観（宇宙観）や哲学思想と密接な関わりを持っている。地動説（コペルニクスの転回）、銀河系と銀河の発見、膨張宇宙の発見など新しい宇宙観の提示は物理学・天文学の成果に基づいている。生命体を含むあらゆる物質の材料である多様な元素の起源は、恒星内部の核融合反応や超新星爆発現象であることも、忘れてはならない。また、太陽系外惑星の中に第二の地球を発見し、そこに生命の手がかりを見いだすようなことがあれば、紛れもなく人類の世界観に極めて大きい影響を与えるであろう。

天文学は、音楽、修辞学、文法学、論理学、算術、幾何学と並んで最古の学問の一つとされ、農耕と暦や航海術など人類文明の発展と不可分の関係にあった。歴史的に、天体现象及びその議論が、神話、伝説、政治、哲学、宗教、世界観、風俗、農耕、暦法、時計、航海術、人工衛星などを通じて、人類の知性の形成、さらには文明や科学の発展に大きい影響を及ぼした。

(3) 天文学固有の特性：他研究分野や社会との交流

① 総合科学の性格

天文学は、その研究手段として物理学、化学、数学、計算機科学、統計学などが駆使される総合的理学である。さらに理学の中でも、「不変の真理」を追究する数学、物理学、化学とは異なり、我々がその中で暮らす宇宙の歴史・成り立ち（宇宙の始まり、太陽系の始まり、それらの行く末）を対象とすることから、生物学、地球科学、環境学などとのつながりも強い。また天文事象の研究は歴史学ともつながっている。さらに電波工学技術、光学技術、赤外線工学技術、エックス線・ガンマ線技術、宇宙望遠鏡などのスペース飛行体技術、スーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションなど、最先端技術を駆使する学問である。

② 一般社会に開かれた研究活動

アマチュア天文家や学生（中学、高校、学部学生）が専門研究者と比肩する優れた研究成果を達成できる分野である。研究者の成果発表の場である学会において、高校生中心の「ジュニアセッション」を始めたのは天文学分野であり、顕著な成功を収めている。また、世界各地で同一天体の観測が可能であるため、一般社会人も含めた全地球的共同研究が活発に行われている。また多くの観測データが一般に公開されており、学術文献は検索・閲覧できるものが多いために、発展途上国の研究者や一般社会人であっても専門的研究ができる環境にある。

③ アウトリーチ

宇宙の始まり、生命の起源など、人類の知的好奇心の核心部分に答えようとする分野である。研究者・教育者は天文学・宇宙物理学のこの特性を認識し、アウトリーチ活動を熱心に行う傾向にある。社会では宇宙への関心が強いいため、概して好意的に受け取られている。このように天文学のアウトリーチ活動は、一般社会人や生徒・児童

の科学への興味を醸成することに大きな貢献をしている。

(4) 現代物理学・天文学の目指すもの

物理学・天文学は、「我々の存在する宇宙はどのようにしてできたのだろうか？（宇宙の起源）」「物質は何からできているのだろうか？（物質の起源）」等の人類の持つ根源的な疑問に答えようとしている。定義で述べた物理学・天文学の発展の歴史に続く最先端の研究分野とその目標を鳥瞰することは現代物理学・天文学の固有の特性を理解する上で重要であろう。基本法則は、すべて発見されているわけではなく、既に発見されている基本法則を頼りに、更なる探究が続いている。

① 素粒子物理学

素粒子・宇宙・時空(時間と空間)の起源を解明し、物質と時空を一つの基本法則から説明する究極の理論の完成を目指している。

② 原子核物理学

クォークから陽子・中性子等のハドロン粒子を経て様々な原子核が生成する宇宙での物質の創生・進化のプロセスの解明を目指している。

③ 天文学・宇宙物理学

宇宙の構造・起源・未来、及び宇宙の物質・天体の進化を解明することを目指している。さらにその先に、宇宙における生命の探査が真剣に検討されている。

④ 物性物理学

原子や電子の多体効果は、多様な物理現象を発現する。物質の性質を解明し新物質を探索すると同時に、新機能物質の創生を目指している。

⑤ 原子・分子・ナノ物理学

量子力学の完全解明、量子情報処理技術の実用化、そして、ナノサイエンス・テクノロジーのさらなる展開を目指している。

⑥ プラズマ・流体・非平衡系・生命物理学

プラズマを含む流体や生命を含む非平衡系のダイナミズムと乱れの現象を解明し、自然界の変化の全容を明らかにすることを目指している。さらに、核融合発電の実現や生命現象・経済現象への広範囲な応用を目指している。

⑦ 光量子科学

光(フォトン)を使いこなして、基礎物理学からグリーン・ライフイノベーションまで多面的かつ学際的な研究を目指している。

⑧ 計算物理学

自然現象の全てを計算機の上で再現すると同時に、プラズマ、乱流等カオスの制御や新物質・量子機能の設計を実現することを目指している。

⑨ 物理学教育・天文学教育の研究

認知科学や脳神経科学の成果も取り入れて物理学・天文学の学習のプロセスを明らかにしつつ効果的な教育の実現を目指している。

このように、物理学・天文学の最先端の研究は、分野自身の進展のみならず、人類に大きな知的刺激を与えるとともに、現代社会を先導する技術開発にも強く結びついている。

4 物理学・天文学分野を学ぶ学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養

本章では、物理学・天文学の専門課程の学生が身につけるべき基本的素養を挙げる。物理学・天文学を学ぶ目的は、在籍する課程、将来の進路、職業等によって異なる。ここに記載された事項を参考に、各大学・学部で適切なカリキュラムを構成することを希望する。

(1) 当該分野の学びを通じて獲得すべき基本的な知識と理解

① 物理学・天文学のカリキュラム構成の基本的考え方について

ア カリキュラム構成の必須条件

物理学・天文学は実験と理論で論理的に構成される学問領域であり、基本法則を理解する「理論的側面の学修」と、実験・観測を通して自然現象に触れ基本法則との関係を理解する「実験的側面の学修」の両者を合わせて進めることが肝要である。

基本法則は数学の言葉で簡潔に表現されているが、その本質を理解するのは難しい。多様な自然に応用しようとするると新規の概念が出てきて、新規の概念を正確に記述しようとするると高度な数学が出てくる。基礎課題から発展課題まで、物理学の学修は積み重ねが基本であり、カリキュラムも学修が系統的に行われるように、構成をしっかりと練る必要がある。

学士課程における実験や観測の役割は、新しい自然現象の発見や検証という側面よりは、自然現象に触れ、法則発見の過程を追体験し、応用の方法の基礎を学ぶことが主な目的となる。うまく設計された実験や観測の授業では、基本法則の本質を感覚的に理解することも可能である。

また、天文学の学修においては、宇宙観・世界観の形成と、全宇宙的視野での地球環境や人類の持続可能性に対する理解が重要である。この学修は物理学のような積み重ねが必須ではないため、カリキュラムに柔軟性があり、早期から開始することで、学生の幅広い科学観を涵養することが可能である。

イ 学士課程と物理学・天文学教育

教育内容、及び使う数学等の違いから学士課程の物理学教育を(a)教養教育、(b)理科系教育(工学系、教員養成課程等を含む)、(c)物理学専門課程教育に分けて考えるのが適切であろう。また天文学専門課程においては卒業研究までに物理学専門課程とほぼ同じ物理学教育が必要であるとともに、天文学固有の教育も必要である。

理科系教育に関しては、教育内容が幾重にも階層構造を形成していることに注意を払う必要がある。例えば、工学において物理学は基盤として位置づけられているが、多くの場合、教科書は、直接対象とする問題に適用できるように書き換えられている場合が多い。電気回路を設計するためには、電磁気学を基礎とした電気回路に関する教科書で学修する。先端の新たな問題に対応する場合は、その基礎の電磁

気学に戻る必要がある。教員養成系学部においても同様である。物理学専門課程以外の、理科系教育でも物理学固有の特性を熟知したカリキュラムが必要である。

主に文科系学生を対象とした教養教育の中で開講される物理学の授業でも、数学の言葉を用いた授業を実施するとともに、実験や観測を体験させることが望ましい。実験や観測を経験せずに物理学・天文学を学んだ学生は、理解が観念的になりがちだからである。

ウ 本参照基準の対象と方針

以上の背景を踏まえ、本章では上記(c)の物理学専門課程の基本的素養を挙げ、この中から適宜選択することにより、(a), (b)を含む物理学を学ぶ全ての学生のために参照できるようにしたい。基本的内容は、力学、熱力学・統計力学、電磁気学、特殊相対論、量子力学、実験・観測が挙げられ、それらの基本法則の理解と応用が求められる。その他に、素粒子、原子核、物性、光学、流体、弾性体、プラズマ、生物物理、天文・宇宙等の内容も、適宜選択される。

② 獲得すべき知識と理解

これまで述べてきた「物理学・天文学の定義」、「物理学・天文学固有の特性」を考えると、物理学・天文学の根幹をなす重要な基本概念の数は少ない。基本法則の数も限られている。しかし、その本質の理解は難しく、高度な数学を駆使し自ら追実験を行う必要がある。しかも、適用範囲は全宇宙に広がるという豊かな想像力が要求される。そのために獲得すべき知識と理解を以下に列挙する。

- 1) 力と運動に関する基本法則と概念を系統的に理解し、説明できる。速度、加速度及びニュートンの“運動の三法則”を理解し、巨視的な系での物質の運動を説明できる。
- 2) 物理量（エネルギー、運動量、角運動量）の保存則を理解し、物体の運動の説明に適用できる。
- 3) 波の性質を理解し、波の重ね合わせ、干渉、回折などの波動現象を説明できる。基本法則から波動方程式を導出し、解を求め、進行波、定在波を理解することができる。
- 4) 熱力学の三法則を理解し、熱現象を説明できる。絶対温度、エネルギー保存則、不可逆過程、エントロピー等が説明でき、熱現象に適用できる。
- 5) 熱現象を原子や分子の運動から理解し、統計力学の手法を説明できる。また、その手法を用いて、エントロピー、古典的な統計性（マクスウェル・ボルツマン分布）、量子的な統計性（ボーズ・アインシュタイン分布、フェルミ・ディラック分布）を説明でき、対応する現象に適用できる。
- 6) 静電場、静磁場、時間に依存した電磁現象を説明するためのマクスウェル方程式を理解し、ローレンツ力と併せて、電磁気学的現象を説明できる。“場”の概念と近接相互作用に関して説明できる。

- 7) 物理量を測定（実験）するための、電気回路の仕組みを理解し、組み立てることができる。
- 8) 特殊相対論の基本仮定と、それから導かれる二つの慣性系の中に成り立つ時間と空間の関係を理解し、速さが光速に近い場合に見られる自然現象の説明ができる。
- 9) マクスウェルの方程式を理解し、光の性質を説明できる。光に代表される電磁波の伝搬（反射、屈折、透過）、干渉、回折等が説明できる。
- 10) シュレディンガー方程式を理解し、原子の構造、微視的な系での原子や分子の運動を説明できる。また、不確定性原理等の微視的な系を支配する原理や経験則を説明できる。量子力学の概念を用いて、物理量、物理状態を説明できる。
- 11) 基本的な実験・観測の手順や手法の原理を説明でき、実施できる。その際測定対象となる物理現象の本質を理解できる。
- 12) 物理学概念の形成の歴史を、説明することができる。何故、相対論や量子力学が必要になったかを説明できる。
- 13) 物理学で用いられる数学を説明でき、使用できる。微分積分学、微分方程式、ベクトル解析、線形代数、統計学、複素数の使用（複素関数論）、フーリエ解析、群論等の物理学に必要な内容を抽出し、基本方程式を理解し、自然現象を定量的に説明できる。
- 14) 計算機を使った実験結果の解析や現象のモデル計算ができるようになる。基本法則から適切なモデルを導き、計算を行い、自然現象、実験結果、観測結果を定量的に予測できる。

加えて、天文学固有の知識と理解としては以下のようなものがある。

- 15) 地球、太陽系、銀河系、銀河団、大規模構造、宇宙全体に至る宇宙の階層構造、及びビッグバン宇宙の誕生から現在までの宇宙の進化の道筋を説明できる。
- 16) 元素・物質の起源が恒星内部の核融合反応と超新星爆発にあること、及び太陽の核融合反応で発生したエネルギーが地球・生命を育むことを説明できる。
- 17) 古代文明とともに暦などの天文学が誕生した歴史的背景や、天動説から地動説に至る中世のコペルニクスの転回、及び望遠鏡の発明によってもたらされた観測事実に基づく現代の宇宙観への変遷を説明できる。

(2) 物理学・天文学分野の学びを通じて獲得すべき基本的な能力

① 分野に固有の能力

ア 物理の問題に取り組みその解を示す能力

学生は、典型的な物理学の問題を解くことができる。さらに、学生は現実の世界に起こる自然現象等の一般的な問題に関しても適切な物理法則を適用するための論理的思考法を知っている。特に、次のような項目を理解でき、活用できる。(i) 解析的に解くことが難しい解であっても、解答可能な解から推察すること、(ii) 極限の状態の解を参考にすること、(iii) 次元解析を利用すること、および数値の桁

(オーダー) をガイドとして、現在求めている解が正しいかを評価すること、(iv) 仮定を明らかにして解答を示すこと、(v) 法則や理論の適用限界を理解すること。

イ 物理学・天文学の記述に数学を使用する能力

物理的問題を数学的な形に書き換える方法、物理学的モデル化の理解、さらに近似の役割を理解することができる。

ウ 実験や観測を計画・実行し結果を科学的文章としてレポートにまとめる能力

- 1) 学生は、物理学・天文学における実験、観測の役わりを理解することができる。
- 2) 実験、観測の計画を立てることができる。
- 3) 実験、観測データを得るための実験器具、観測装置を使うことができる。
- 4) 適切な技術を用いたデータ解析ができる。
- 5) 実験や観測の問題点や不確かさ（誤差）を推定し、原因を理解することができる。
- 6) 研究結果をレポートにまとめることができる。
- 7) 実験や観測における安全や健康に配慮することができる。

エ 英語で書かれた物理学の教科書や論文を読める能力

英語で書かれた教科書や論文を読めるようになる。物理学は、世界に共通な知識体系を作っており、英語で書かれた文献が多い。

オ さらに高度な能力として獲得が期待されるもの

- 1) 実験や観測結果を、過去の文献を調べ、現在ある理論で説明できるかどうかを判断することができる。
- 2) 説明できない場合、現象の本質的な問題を分析し、説明するための仮説やモデルを作ることができる。
- 3) その仮説やモデルの検証が可能な実験を計画し、実施することができる。
- 4) その実験や観測の結果を解析し、現在ある理論と比較検討し、その仮説やモデルの受容、修正、または放棄ができる。

② ジェネリックスキル

物理学・天文学の教育課程で学んだ学生は、論理的思考法や常に基本に立ち返り新しい切り口で考える発想法のもとに、以下のような構成要素をジェネリックスキルとして身に付けるようになる。

ア 問題抽出能力

学生は、複雑な概念を把握し、理解する。詳細なデータを物理現象として翻訳し、論理的思考過程を経て、現象をモデル化することができるようになる。学生は、その過程で本質的な問題を抽出できるようになる。

イ 客観的・相対的視点をもつ能力

学生は、宇宙の広大さと、そこに広範な物理状態が存在しうることを学んだことから、常に広い視点から対象・現象を観察し考察する能力を身につけるようになる。

人類と地球の持続可能性を宇宙的視点から捉えることができる。

ウ 問題解決能力

学生は、典型的な方法で問題を解けるようになるだけでなく、複数の解法を提案し、異なったアプローチで解を見つけることができる。

エ コミュニケーション・プレゼンテーション能力

学生は、文章作成や発表、及び議論を通して複雑な情報を的確かつ簡潔に伝えることができるようになる。学生は、専門用語を適切に使えるようになる。

オ 情報収集能力

学生は、個人として教科書・論文等の文献を読み、データベースの検索を行って的確な情報を収集し、仲間との議論を通して、本質的な問題を探求する能力を獲得できるようになる。

カ ICT 技術を駆使する能力

学生は、適切なプログラミング言語やパッケージ等のソフトウェアを使用できるようになる。学生は、文章の作成、情報の検索、数値計算、及びデータの解析、まとめ、そして発表等にコンピューター及び ICT (Information and Communication Technology) 技術を使用する能力が身につく。

キ 個人としての学修能力

学生は、個人で学修を進める力を身に付けることができる。単独で自発的な学修ができ、目標の設定や達成期限の設定ができるようになる。学生は、グループ・ワークの経験をし、他の学生や教員と建設的に交流できるようになる。

ク グループとしての学修能力

学生は、実験や卒業研究を通して、協力関係を築きながら問題の解決にあたることができるようになる。自分の能力を認識し、他の協力者と互いの能力を補い、一人では解決不可能な大きな問題を解決できるようになる。

ケ 倫理的価値判断をする能力

学生は、客観的・相対的な視点に立つことにより、ねつ造、改ざん、剽窃等、何が科学研究における非倫理的行為であるかを理解することができる。学生は、科学に携わる上での高い倫理観を身に付けることができる。さらに、社会的倫理規範も理解できるようになる。

③ 獲得された能力が持つ社会的・職業的意義

物理学・天文学を学ぶことは生涯にわたって有益である。どの分野でも言えることではあるが、修得した知識やスキルは、分野外の人から見れば非常に貴重なものである。物理学・天文学を学んで社会で役に立つ能力として、(1) 問題の本質的要素を抽出してモデル化できる能力、(2) 論理的に考え発表できる能力、(3) 新技術の原理を理解し利用できる能力、(4) 数値データの処理・解析が行える能力、(5) プログラミング等、情報とコミュニケーションの ICT 技術を使うことのできる能力、(6) 常に客観的・相対的な視点に立つ能力等が挙げられる。

また、個人として、自力で最先端の科学を学修できる能力も大きい。科学における最新の発見を理解し、継続的に興味と満足を得ることが可能となる。加えて、修得した「論理的思考法」や「基本に立ち返り新しい切り口で考える発想法」は、社会生活を送る上で直面する様々な問題に対する場合にも有効である。問題の本質の把握、解決法のいくつかの可能性の提示、最良の可能性を判断し解決するための行動を遂行する能力がある。また、抜本的に新しい発想法で解決に導く能力も身に付けている。

卒業後、物理学・天文学を学んだ人は、大学や研究機関の狭義の研究者だけではなく、さまざまな職業で活躍している。製造業や情報・通信業を中心とした企業における技術・製品開発者、中等教育機関の教員などは言うまでもなく、最近では科学コミュニケーター、ビジネスコンサルティングや金融の分野に就職する学生も増えてきた。その分野の問題解決に、彼らの数値データを用いた解析的能力が有用だからである。また、どのような組織においても、マネジメント業務には、上の②に記載したような問題抽出能力・問題解決能力・客観的相対的視点など、物理学・天文学を学んだことで獲得した能力が威力を発揮する。このように、大学において物理学・天文学を学んだ学生は、そこで得た専門知識というよりむしろ、それらを通じて習得した科学的思考法とアプローチを武器として、社会において広く活躍する人材となっている。

5 学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方

(1) 学修方法

物理学は、数学と同様に、積み重ねの学問領域である。そのため、知識の習得のためには、順序良く、系統的に授業を構成する必要がある。加えて物理学・天文学は、数学と異なり、実験や観察、観測をもとに自然現象を探究する学問領域であり、理論的考察と実験・観測的考察を連携させながら自然現象を理解することが求められる。“講義”のクラス、それに伴う“問題演習”のクラス、そして、“実験・観測”のクラス、“卒業研究”が典型的な授業の構成要素になっている。なお、近年この学問分野の特質に根ざした実証的な教育研究として、物理教育研究・天文学教育研究がアメリカを中心に進展しており[14]、日本でも研究とそれに基づく教育の試行が拡大していることが、物理教育等に関わる複数の学会を通じての関連学術発表の増大から窺える。ここでは主に、我が国における従来型の学修方法の現状を記述するが、教育の質向上のために、各大学・学部における教育改善の積極的な対応を期待する。

① 講義

物理学・天文学に関する基本的な知識や概念を学ぶ重要な授業形態である。加えて、経験豊かな教員の考え方・方法論を学ぶ重要な場でもある。物理学・天文学は知識や概念の集合として取られがちであるが、学修の方法、考える道筋は多様であり、良い手本を学ぶ必要がある。小テスト、実験のデモンストレーション等があると、基本法則や物理概念をイメージし易い。また、適切な教科書の選定、講義のノートの取り方

も重要である。天文学の講義においては、実際の天体画像を例示することも重要である。

② 問題演習

講義は基礎知識の習得であり、問題演習で良質な多くの問題を解くことによって基本法則の意味をより深く理解し、他の問題に適用できるようになる。講義と連携することが望ましい。講義だけでは必ずしも理解できない概念や計算法も、TA (Teaching Assistant) や学修相談員を配置すれば、学生が直接議論して、問題点を具体的に把握することで、より深い理解が可能である。

③ 学生実験

決められた課題のもとに実験を行い、現象の普遍性、再現性、予想外の振る舞いの発見などの過程を具体的に追体験し、自然現象と基本法則の関係を学ぶ。自ら手を動かし、実験技術の修得も行い、実験装置の原理を理解する。基本法則の重要性を物理的センス（感覚）としてイメージできるようになる。天文学分野においては天体望遠鏡を用いた観測の実習が重要である。

④ セミナー

少人数で行う輪読や議論は、学生個人の物理学的視点、考え方、発想法を大きく育む。他の学生との考え方の違い、理解の仕方の違いを認識し、学生自身が普遍的な思考方法を身に付ける機会を与える。単独での学修で生まれやすい思い込みや誤概念を修正する機会でもある。

⑤ 課題研究（卒業研究）

物理学・天文学学修の集大成として卒業研究を課する意義は大きい。今まで積み上げて学修してきた物理学・天文学の内容、学生実験で素養を積んできた技術を一体化して、一つのテーマのもとに研究を行う。問題の設定、実験の計画、実施、解析、考察、まとめまでの一連の流れを体験することになる。そこでは、結果まで明確に設定された学生実験とは異なり、未知のデータに取り組むことになる。その中で、教科書や論文に書かれているデータや結論との違いに初めて気づき、その原因を自分の力で考え始める一つの契機になる場合が多い。理論研究においても、近似、適用範囲を“例題”から離れて検討し、自然現象を実体として認識する重要な機会である。

⑥ 自発的学修（授業外学修）

カリキュラムに設定された授業時間内の学修だけでは、物理学・天文学の習得は困難であり、自発的に、授業外の学修を行う必要がある。担当教員による問題演習等の自習課題設定はその助けとなる。

⑦ その他の学修

上記に挙げたもののほか、議論演習（チュートリアル）、学生の主体性の下に実施される自主ゼミ等、多くの例があり、適切にカリキュラムを構成する必要がある。特に、チュートリアルは、英国や北米（米国・カナダ）の大学に於いてとても重要な役割を果たしているが、日本の大学での実施例は少ない。

(2) 学修成果の評価方法

学生の達成度評価は、学生の現在の能力を伸ばし、潜在能力を引き出すための非常に重要な作業である。評価に関しても多くの研究成果があり、ICT の利用も考えられている。理論的考察と実験的考察を連携させながら自然現象を理解する物理学・天文学の学修について、ここでは、最も基本的な評価方法を記す。

① 中間試験、期末試験、小テスト

理論的考察、基本法則の理解と自然現象への適応に関しては、論述式の試験が効果的である。学生の獲得した知識、概念、数学の能力、論理展開能力、問題解答能力、そして、学生個人の理解できない問題点まで明瞭に認識することができる。そのためには、問題が適切であること、つまり、現在の教授内容に基づく重要課題を問う問題になっていること、学生が段階的に論理を進められる問題になっていること等が必要になってくる。

選択肢を用いた試験においては、解答が正解と一致していても正しく概念や法則を理解しているとは限らない。同じ概念や法則について異なる設定で問うたときに正解できない場合は、概念を正しく獲得していないか間違った理解をしている。間違いの背景には、日常感覚や経験からくる根強い思い込みや誤概念が潜んでいる可能性がある。

② 実験レポート・実験ノート

実験は、実際に手を動かして測定や観測を行う授業であるが、提出したレポートで、学生の実験能力がかなり判断できる。そこに記述された、実験の目的、実験の原理、実験データの整理の仕方と取り扱い、データ解析、考察、結論までの流ればかりでなく、論理性、簡潔性、完全性、他の人に読める文章を書けるか等で物理学・天文学の理解、学生の思考パターンまでが顕在化してくる。実験ノートの取り方も重要である。近年は、研究倫理上からも実験ノートが義務付けられており、良い訓練となる。

これら従来の評価方法に加えて、新たな評価方法の導入を検討することも重要である。一例として、セミナーや卒業研究における評価として近年注目・導入されつつあるルーブリック評価がある。学生は、得手、不得手を持つ個性的な存在である。ある項目が得意で高い能力を持っていても、意外なところが不得手である場合も多い。その得手、不得手を理解し、物理学・天文学の能力を伸ばし、有能な社会人・職業人として活躍でき

る素養を備え、学士課程を修了できるように評価を充実させる必要がある。

評価は学修目標と対であり、常に目標を明示し、それに対する達成度を評価する。目標とする能力を適正に評価する方法をとる必要がある。評価方法には、問題演習、論述、口頭試問、グループディスカッションでの発話記録等がある。他の学生と達成度比較する相対評価ばかりでなく、学生個人がどれくらい伸びたかを判断する絶対評価も重要である。また、教員による評価ばかりでなく、自己評価、学生相互の評価も教育的効果が大きい。

評価は、学生に何を学んでほしいかの強いメッセージとなるとともに、学生自身の評価力を高める。その意味で、教員に対する授業評価も重要な評価となってくる。

カリキュラムの作成に関しては、教育理念と内容と検討し、適切な評価法を適用することが必要である。

6 市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育との関わり

(1) 物理学・天文学を学ぶことで、涵養される市民性

物理学・天文学を専門として学ぶ学生だけではなく、他の理系学生や文系学生が一般教養科目として物理学・天文学を学ぶことにより、以下のような能力が身に着くと考えられる。物理学・天文学が自然哲学的な性格を併せ持つことを知ることは、将来の日本の社会・経済・文化を支えることになるすべての大学生にとって有用なことである。

① 批判的思考力

人は生まれながらにして、自然やその他の事柄に対する正しい認識を持っているわけではない。物理学・天文学を学んだ学生は、自らの観察を通して基本法則と矛盾しない様々な仮説を作り、統一した自然観を形成しようと努力する。自己の認識に対しても同様である。自己の世界認識と相容れない事象に出会ったとき、なぜそうなるのかを考えながら自分の行った観察や実験、自分の考え方、自己の信念、自己の判断までを検討の対象にし、徹底的に考え、一段と深い理解を得ようと努力する。物理学・天文学の学修によってこの批判的思考力を備えた学生は、他人の考え方に流されずに独自に判断できる力、知的誠実さとともに自明性を疑う力としての批判力を自ら涵養している。批判力のある市民が増えれば、似非科学や詐欺、流言飛語にだまされない、より健全な社会が形成される。

② 自然の判断

物理学・天文学の発展において、多くの仮説が生まれ、実験結果という“自然の判断”によって退けられてきた。考える人自身が、如何に矛盾のない精緻な論理であると考えようとも、自然はあるがままにその欠陥を暴く。物理学・天文学を身に付けたものは、真摯に自然と向き合うことができる。生き方においても、動機の客観性が育まれる。

③ 全宇宙的視点

宇宙の姿を学ぶことによって、「人類は銀河系の辺縁に 46 億年前に誕生した太陽という一恒星の周りをまわる地球という惑星の上で生活する生命体である」という、自らの存在に対する基本認識が生まれる。その結果、日常起きる地震、火山の噴火、気象災害なども地球という惑星の特性から理解するという考え方ができるようになる。また、地球環境や人類の持続可能性を、グローバル（全地球的）という観点だけでなくユニバーサル（宇宙的）という観点からも考えられるようになる。

④ 実験やセミナーにおける共同作業

物理学・天文学の学士課程では、実験やセミナーを共同で行う。そこでは、学生個人の能力、得手、不得手が明瞭に現れる。学生が自分の特徴を理解し、他の学生と協力して、一人ではできない実験や計算を完成させる教育は、学生が言論と行動において自律を尊び、他の学生を尊重する精神を養う。

(2) 物理学・天文学を専攻する学生への教養教育の必要性

物理学及び応用物理学に関わる 39 大学 45 学科の平成 15-16 年度卒業生、777 名を対象とするアンケート結果[13]には、学士課程で学修不足と自覚している内容が明瞭に記入されており、教員の認識とも一致する。（教育成果として挙げられる内容は、第 4 章 (2)③獲得された能力が持つ社会的・職業的意義の項目で記載されている。）ここでは、その調査結果を参照して、教養教育の意味を考えよう。それは、カリキュラム構成の他に、学生自身の学修目標・学修意欲にもかかわってくる。

① コミュニケーション能力の不足

卒業生たちは日本語の表記能力、英語の会話能力と文章力、自己表現能力、論理的でない相手とのコミュニケーション能力、(ユーモアを交えた) 発表能力等の未熟さを自己反省している。自然科学を学ぶ学生にとって、実験レポートから発展する論文や科学的文章を書く能力は、一生の中で最も必要とされる知的能力の一つであり、論理的にプレゼンテーションする能力と併せて、物理学・天文学分野の教育においても従来からその修得が重視されてきた。それにも関わらず、こうした能力が低いと考えている卒業生がおり、文章力・表現力を向上させる教育の一層の強化が重要である。英語教育は、国際社会の中で生活する人間として、物理学・天文学を含む全ての分野で重要である。その他の豊かな人間性に関わる部分は、大学の教科ばかりでなく、課外活動も含めて養われる人間性と判断される。

② 知識・技術の不足

自らに不足しているとして挙げられている知識・技術の項目は、数学、化学、生物、地学、工学一般、医学、社会学、コンピューター、法律、経済、金融、財務等である。多くの大学は、これらの内容に対応する教養科目を開講しており、それらを基に学生

は生涯にわたって自立した学修の展開が可能である。学生は、これらの教養科目での授業を礎として、自立して深く学修する方法を修得する必要がある。各大学は、この要請に対応できるように、カリキュラムを編成する必要がある。一方、学生の意識の問題も重要である。在学中に、専門科目を重視し、教養科目を軽視する傾向があるからである。学生に教養教育の重要さに目覚めさせる“刺激”や教授法を大学教員が積極的に獲得し展開する必要もある。

③ 行動・思考パターンの問題

卒業生は、感性的なものへの理解力が不足、世の中とのつながりに関する意識が薄弱、机上でばかり考え議論ばかりで実行力がない（抽象論に終わりやすい）、実用化を目指した思考力不足等を自省している。我々の住む世界には、「物」と「心」がある。17世紀中頃、デカルトは物心二元論を説いて二つを分離した。歴史的にはこの分離後、物理学が数学的に記述可能な部分に着目したという重要な意味を持ち、ニュートンの成果に引き継がれることになる。「心」を理解するには、物理学・天文学以外の教科目で人間の「心」を知る努力が必要である。また、これが人間社会との繋がりを意識することになろう。

以上のように、本参照基準に記載した物理学・天文学の特質やその歴史を考えると、これらを学修したことにより獲得できる能力がある一方、弱点が生まれる可能性もあることがわかる。人文・社会科学教育の相補性と重要性を念頭に置きながら、研究倫理や科学史を含めた幅広い教養教育を行うことが重要である。

<参考文献>

- [1] 中央教育審議会「学士課程教育の構築に向けて(答申)」、2008年12月.
- [2] 日本学術会議、回答「大学教育の分野別質保証のあり方について」、2010年7月22日.
- [3] 参照基準：数理科学分野、生物学分野、地球惑星科学分野、電気電子工学分野、機械工学分野、土木工学・建築学分野、材料工学分野
- [4] 中央教育審議会「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～(答申)」(平成24年8月28日)
- [5] 日本学術会議第三部、報告「理学・工学分野における夢ロードマップ(2014)」、2014年9月19日.
- [6] 学習指導要領、第2物理基礎、第3物理、文部科学省.
- [7] The Physics Degree, IOP Institute of Physics, 2011.
http://www.iop.org/education/higher_education/accreditation/file_43311.pdf
- [8] The Quality Assurance Agency for Higher Education 2008.
<http://www.qaa.ac.uk/en/Publications/Documents/Subject-benchmark-statement-physics-astronomy-and-astrophysics.pdf>
- [9] 「物理学とはなんだろうか(上・下)」朝永振一郎著、岩波新書86(1979).
- [10] 「LECTURES ON PHYSICS Volume I・II・III」FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS 著,
Definitive edition, Addison Wesley (2006):ファインマン物理学I-V、岩波書店(1967).
- [11] 「物理学はいかに作られたか」アインシュタイン・インフェルト著、石原純訳
岩波新書50(1939).
- [12] 「科学哲学への招待」、野家啓一著、ちくま学芸文庫, 2015.
- [13] 「大学卒業生の進路に対応した基礎物理教育の調査・研究」(課題番号15606004)平成15年度～16年度科学研究費補助金(基盤研究(C)、代表:覧具博義)研究成果報告書.
- [14] 「科学をどう教えるか:アメリカにおける新しい物理教育の実践」エドワード・F・レディシュ著、日本物理教育学会監訳、丸善出版(2012).
- [15] 「批判的思考と科学」兵頭俊夫、科学(岩波書店)vol.71(2014)958;
「教養教育とディシプリン」兵頭俊夫、「学術の動向」7月号(2005).
- [16] 「なぜ物理学を学ぶのか?」大学の物理教育(日本物理学会)vol.21(2015)52;
「異分野から見た物理学への期待:物理学分野の参照基準」大学の物理教育(日本物理学会)vol.21(2015)104.
- [17] 「宇宙を学べる大学・天文学者のいる大学 2013年度版」
http://phyas.aichi-edu.ac.jp/~sawa/2013_3.html
- [18] 「人類の住む宇宙」岡村、池内、海部、佐藤、永原編、シリーズ現代の天文学 第1巻 日本評論社(2007).
- [19] 「進化する宇宙」海部宣男、吉岡一男著、放送大学出版教材(2011).
- [20] 「人は宇宙をどのように考えてきたか」ヘリエ・クラウ著、竹内努、市來浄與、松原隆彦訳、共立出版(2015).
- [21] 「宇宙観5000年史」中村士、岡村定矩著、東京大学出版会(2011).

<参考資料 1> 審議経過

平成 27 年

- 3月12日 物理学委員会（第23期第2回）
参照基準検討分科会設置申請及び世話人を決定
- 4月24日 日本学術会議幹事会（第212回）
物理学分野の参照基準検討分科会設置
- 5月22日 日本学術会議幹事会（第213回）
物理学分野の参照基準検討分科会委員決定
- 7月10日 物理学分野の参照基準検討分科会（第1回）
役員選出、参照基準案の策定、今後の進め方について
- 9月14日 物理学分野の参照基準検討分科会（第2回）
参照基準案の策定
- 12月25日 物理学分野の参照基準検討分科会（第3回）
参照基準案の策定、公開シンポジウムについて

平成 28 年

- 3月30日 物理学委員会
物理学分野の参照基準検討分科会（案）報告「大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準 物理学・天文学分野」について承認
- 8月26日 大学教育の分野別質保証委員会（第6回）
報告「大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準 物理学・天文学分野」について承認

<参考資料 2> シンポジウム開催経過

平成 27 年

- 3月 21 日 日本物理学会第 70 回年次大会シンポジウム (於 早稲田大学)
「異分野から見た物理学への期待：“物理学”領域の参照基準」
- 7月 18 日 日本天文学会シンポジウム (於 東京大学)
「大学の質保証」

平成 28 年

- 3月 19 日 日本物理学会第 71 回年次大会シンポジウム (於 東北学院大学)
「物理学・天文学の参照基準」