

宇宙を“知る”

垣本 史雄*

“Understanding” The Universe

Fumio KAKIMOTO*

ふと見上げた夜空に輝く星々を見たとき、宇宙の中に存在する自分を強く意識し、宇宙の不思議に思いを馳せることは、殆ど全ての人が経験することである。このとき、人は、普段生活している世界とは全く次元が異なる時空間に放り出されたような恐怖感とともに、この大自然の中に存在していることに対する何とも言えない感動を覚える。そして、人は宇宙そのものを知り、自分自身の存在の意味を知りたいと願う。宇宙は、まさに人類究極の知的対象であり、これからも変わることはない。この動機に導かれて、人類は宇宙の謎の多くを解き明かしてきた。特に、現代の物理学の進展し、思いもよらぬ宇宙の仕組みによって、この宇宙が巧妙に誕生し、進化してきたことがわかってきた。私自身、宇宙に関する知識が増すにつれて、より深く感動するとともに、この知識が自分自身の生き方にも大きな影響を与えていることを自覚している。このように、宇宙に関する知識は、単に“知っている”だけに止まることなく、人の生き方に大きな影響を与える力を持っているのである。普通、日本人であれば、地球が球体で1日に一回自転していることは知っている。しかしそれは、例えば「横浜と白楽までの運賃がいくらか」といったぐいの知識と同列のものであろう。富士山頂でご来光を鑑賞しても、日の神々しさは感じて、足下の地球が雄大に回転していることを実感し、その地平線の下から太陽が姿を現し始めていることに感動している人は、殆どいないと思う。このように、一般の人が得ている宇宙に関する多くの“知識”は、データベースとしてのものであり、それがその人の人生で影響を及ぼすようなものとなっていないのが実情である。その一方で、多くの人が宇宙に関する話題に強い興味を示すのは、この不可思議な宇宙に存在している自分の意味を知りたいと本能的に願っているからに他ならない。たまたま、職業として宇宙に関わる教育研究に携わることになったが、多くの若い学生に宇宙に関する感動を伝える機会が与えられたことは、極めて光栄なことだと思っている。できるだけデータベースにとどまらない“知識”を授けることができるよう努力したい。

本学において、教養科目である「宇宙科学Ⅰ、Ⅱ」を担当し始めたのは2002年4月である。当時は、他大学の教員であったため、非常勤講師として担当させていただいた。当初、担当期間は2、3年くらいと考えていたが、十数年も過ぎ、2016年3月に本学の教員として採用していただき、さらに担当を続けることになるとは、全く

予想外のことであった。

この始まりは、桜井邦朋先生が本学の学長に就任されるとのことで、先生が担当していたこの講義を代役として担当してみないかとお誘いをいただいたことにある。桜井先生とは1976年に香港で開催されたアジア宇宙線国際会議で一緒させていただいた以来、国内外の学会等で挨拶をさせていただく程度の関係であった。これは、先生の専門分野が宇宙線物理学の中の一次宇宙線であるのに対して、私の方は高エネルギー宇宙線ということで、対象エネルギー領域が5桁以上離れていることから、直接の研究交流がないことが原因だった。すなわち、宇宙線のエネルギー領域は 10^9 から 10^{20} eV以上にもおよび、かつ、その到来頻度はエネルギーの-2乗に比例して減少していく。このため、対象エネルギー領域が桁単位で異なると、観測手法が全く異なるとともに、研究目的も多少異なっているためである。したがって、講義担当のお話をいただいたときは、少し意外な感じを抱いたことを今でも憶えている。ただ、本学と以前所属していた大学との距離が近いことが理由だったのだろうと理解している。

担当させていただくにあたって、不安に思ったことがある。桜井先生は、当時から多くの著作を發表され、高い博識を有する研究者として知られていた。したがって、その先生の講義の代役が務まるとはとうてい思えなかった。つぎに、当時所属していた大学でも宇宙に関する講義を担当していたが、その講義回数は7回から14回程度であり、その内容も専門分野である「宇宙線物理学」を中心として、その関連分野の話題を取り上げるものであった。一方、本学の場合は、1年を通じて宇宙全般に関して約30回の講義を行うことになり、「かなりきつそうだ」との印象を強くもった。そして最後の不安は、本講義は教養科目であり、文系から理工系まで幅広い知識レベルの学生を対象としなければならない点である。これは、理工系教養科目全体にいえることなのかもしれないが、物理嫌いが蔓延する昨今、科学を話題にする講義ではやはり厳しいものがある。本講義を担当するに際して、まず要求されたことは「数式を使わずに、講義せよ」ということだった。いままで、少なくとも理工系の学生を対象とした講義しか経験がない私としては、極めて途方に暮れる思いだった。

さて、第一の不安に関しては、とにかく桜井先生に追いつくように勉学に励むしかない、との至極当たり前な結論を出した。二点目については、幸い、宇宙には多くの天体があり、それぞれに異なる現象が起こっており、1年間の講義で扱う話題には事欠かない。そこ

*教授 物理学教室
Professor, Dept. of Physics

で、方針としては、我々の近くから遠方へ、すなわち、太陽から始めて、惑星、恒星、銀河系、系外銀河、そして、宇宙空間そのものを話題にして終わる、と決めた。ただ、告白すれば、宇宙分野の中でも極めて狭い「宇宙線物理学」を専門にしているため、講義の準備に多くの時間を費やすことになった。また、宇宙に関する知識の進展は、極めて急速であり、教養科目の講義といえども、常日頃から情報収集に努める必要があることも依然として変わっていない。

問題は第三の点である。物理現象の正確な理解には、数式の導入は不可欠である。しかも、その数式をみて、それが表している物理現象が頭の中で思い描けるようであればならない。しかし、本講義を受講する学生は、専門家を目指してはいないのであるから、むしろ物理現象が起こった原因とその結果と結びつける“理屈”を理解させることに重点を置くべきであると決めた。この点を明確にしておけば、文系の学生も安心して申告ができるはずである。ただ、単にこのことを口で説明しても、なかなか理解してもらえないのも事実である。さらに、この理屈を理解する妨げとなる“習慣”が身につけていることを気づかせ、これを改めさせなければならない。これは、現象を理解するのに、理屈ではなく、「いつもそうだから」「当然だから」という理由づけを無意識にしている点である。この悪習は、われわれも注意しなければならないことであり、自然現象に対して常に謙虚でなければならないことを肝に銘ずる必要がある。過去の歴史を振り返るまでもなく、この謙虚さこそが多くの大発見に至るきっかけを与えてくれたのである。そこで、4月、9月のガイダンスの折に、次のような問を学生に考えさせ、その後、解説を行い、以上の点を理解してもらっている。

問) 赤道上の高い塔の上から手に持っている物体を静かに落とす。ただし、風や空気抵抗などの影響は無視するとして、この物体が地表に到達したときの位置はどこか、次の3つから正解を選べ。①塔の真下 ②塔の真下より西側 ③塔の真下より東側

これは、学部一年次の理工系学生が学ぶ「コリオリ力」に関する問である。このコリオリ力を式で憶えている学生は多いが、その“理屈”を本当に理解している学生は、極めて少ない。この問に対して、多くの学生は、「いくらなんでも、小学生、いや、幼稚園児じゃあるまいし」との不満げな表情を示す。さて、挙手で答えてもらった結果は、案の定①を正解とする学生が大部分で、②、③と答える学生は、約300名中数名である。ここで、答①を導く過程においては、理屈はなく、ただ頭にあるのは、「いつもそうだから、当然そうだから」であることは明白である。もちろん正解は③である。これを告げると、学生は、少し真顔になって、「そんな、冗談でしょう」という表情を示す。そこで、解説に移る。まず、学生が“当然”と思っている現象から始める。すなわち、等速直線運動している電車内で、両側の座席に相対して座っている2人AとBとの間で物体を渡す現象を説明する。AからBに投げ渡すとき、AはBに向かって物体を投げれば、物体はきちんとBに届く。これは、日常経験することだから、当然なこととして理解する。次に、1台の電車を2台の併走する電車に置き換える。はじめは、2台とも同じ速度で等速直線運動をしている場合。二台のうち一台にはAが、他にはBが、それぞれ同じ位置に乗車していて、同じようにAからBに物体を

投げる。これは、一台の電車が二台に分かれただけで何も変化はないので、AはBに向かって物体を投げれば、きちんとBに届くことになることは抵抗なく理解してもらえる。さて次に、Bが乗車している電車の速度が遅い場合を考える。AがBに物体を投げるタイミングは、Aが乗った電車がBの電車を追い抜くとき、Aの目の前にBが来たときとする。1つ前の考察では、Aが投げた物体がBの電車に到達したとき、Aの目の前にいるBに届いたのである。今度は、Bの電車の速度はそれより遅いのであるから、Bの電車に物体が届いたときは、BはAの面前より後方になることになる。したがって、物体はBより電車の進行方向前方に到達することになる。このあたりになると、多少不安げな表情を示す学生が出てくる。ここで最後の仕上げにかかる（下図）。地球は地球の中心の周りに自転している。宇宙から眺めたとき、塔の上の回転速度は、中心からの距離が地表よりさらに遠いため、地表の回転速度より大きいと説明する。すなわち、始めの間は、塔の上（速い速度の電車に乗ったA）から地表（遅い速度の電車に乗ったB）に向けて物体を投げたことに相当するということを理解させる。ここまでくれば、物体は、地表面に到達したとき、塔の真下より進行方向前方（東側）に落ちることが、自然と納得できることになる。もちろん、出席している学生全員が理解できているわけではないと思うが、すくなくとも、「このような説明方法で宇宙現象の解説をしてもらえるのだな」ということは理解され、講義を申告する上での学生の不安は、かなり解消されているものと自負している。

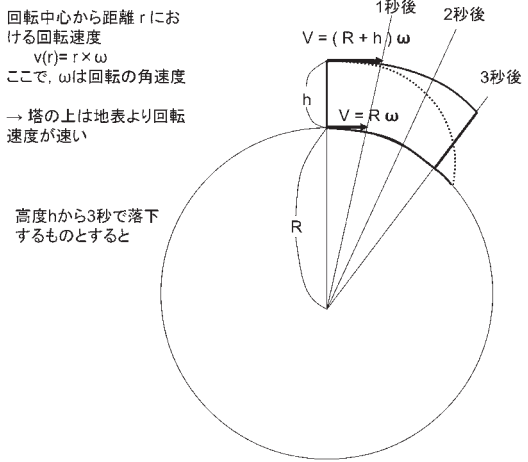


図. 図中、円は北極上空から眺めた地球の赤道面を表す。自転に伴う回転速度の大きさは、その場所の回転中心軸からの距離（回転半径）に比例して早くなる。

さて、実際の講義である。宇宙現象を理解するには、古典物理学の知識だけでは不十分であり、現代物理学、すなわち量子力学と特殊・一般相対性理論、さらには、それを基礎とした素粒子物理学や宇宙物理学の知識が不可欠である。しかし、これらに関する説明では、普段の我々の身の回りで起こる現象とは極めてかけ離れたもの、全く見たことも経験したこともない現象を題材としなければならない。そこで、まずは奇妙な実験事実を素直に受け入れてもらわねばならない。つまり、これこそが我々が生まれてきた宇宙の真の姿なんだと認めることから始める必要がある。これには、多く学生が抵

抗を憶えるであろうが、避けようがないことである。そこで、話の最後に、身の回りのよく知っている現象に対して、古典論だけでは説明ができないが、新たな考え方を導入することによってきちんと理屈が通ることを示すことによって、納得してもらうことにする。その1例を述べよう。量子力学に関しては、「太陽の元素組成」の項目で解説している。これに関するデータベース的知識を与えるだけなら、表を1つ提示すればすむ話である。講義では、この表がどのようにして得られたかについて解説を始める。すなわち、太陽光の分光スペクトル上に現れる暗線（ブラウンホーファー線）の分析によって分かったのであり、その理屈を理解するために、量子力学を説明する。そこで、最初に、電子線を狭いスリットに打ち込んだとき、粒子としての電子では考えられない回折、干渉現象が起こるといふ実験事実を示す。これにより、ミクロな世界では不確定原理で表現される現象が起こっており、粒子であるはずの電子（素粒子）が波動性を示すようになることを説明する。すなわち、ミクロ世界の電子は、この粒子・波動の2重性が両立できる状態でなければ存在できないと説く。以後、話を次のように続ける。ミクロな世界の代表である原子では、極小の原子核の周りに電子が存在している。この電子の波動性（波は1周して戻ってきたときスムーズに接続できないと消し合ってしまう）のために、電子に許される軌道は、とびとびのものに限定されてしまう。しかも、軌道ごとに電子の運動エネルギーが異なることから、原子内の電子のエネルギー状態がとびとびの値となる。これが、“量子”の名前の由来である。また、この電子のエネルギー値は、元素ごとに個数が異なる原子核中の陽子と電子との電気的な相互作用によって決まる。したがって、元素ごとに電子が取り得るエネルギー値の組み合わせが異なることになり、これが元素の存在証明に使われることになる。さらに、この軌道電子がその軌道に移る時には、軌道間のエネルギー差に相当するエネルギーを光（電磁波）として瞬時に吸収、放射する。以上から、太陽表面から放射された光は、表面付近に存在する太陽大気を通過する際に、そこに存在する原子ごとに定まった値のエネルギー光子（特定の色の光）が吸収され、これが地球上で暗線として観測されるのである、と結ぶ。さて、ここまでだと、多少知識は深まったものの、データベースの量が多くなっただけなのかもしれない。そこで、ミクロな世界で有効な量子力学という仕組みが、いかに我々の存在に大事なのかを話題にする。まずは身近なところから。毎日お世話になっている携帯電話やスマートフォンの情報交換手段には、電波が使われている。この電波は、電子（電流）を振動運動させ、周囲の電場を振動させることにより放射される。これに伴って、電子はエネルギーを失うことになる。一方、原子内の電子も原子核の周囲で振動運動をしている。したがって、本来なら電波を放射し、そのエネルギーを徐々に減少させ、ついには原子核に吸収されてしまうことが、古典物理学からは予測される。すなわち、宇宙に原子は存在しないことになってしまい、当然、今あるような天体も、我々自身も存在しないことになる。そのような状況になっていないのは、まさに、量子力学のお陰である。すなわち、原子内の電子は電波放射によるわずかなエネルギー減は許されず、軌道差に相当する大きなエネルギーを授受したときのみ、軌道変化＝エネルギー変化が可能なのである。このように、“当然だ”と思っている知識だけで普段目にする現象を考えると、辻褃が合わないことが多いこと

に気づいてもらう。そして、この新たに得た知見が、宇宙自身が有している極めて巧みな仕組みなのだと理解する。その例のいくつかを記してみよう。

電気には正負二種類の電荷があって、同じ電荷同士は反発し合い、異なる電荷同士は引きあう。また、二つの電荷間に働く電気力の強さは、電荷間の距離の2乗に逆比例する。すなわち距離が10分の1になれば、電気力の強さはもとの100倍になる。これらは、当然の知識であろう。さて、重い元素の原子核の内には、正電荷を帯びた多くの陽子が 10^{-15}m 程度の微小な領域におさまっている。当然の知識で考えれば、陽子間には強い斥力が生じているのだから、陽子はあつという間に原子核内から飛び出て、原子核は壊れてしまうと予想できる。もちろん現実には、原子核は存在し続けている。実は、ここにも宇宙に仕込まれた巧みなからくりが作用している。すなわち、原子核内には、陽子の他に中性子が存在しているが、これらの粒子を結合させる「強い力」とよばれるものが存在するのである。なぜ「強い力」とよぶのかというと、まさに、その結合力が、原子核内の陽子間に作用する電気斥力より約100倍も強いからに他ならない。さて、このような「強い力」が存在するなら、今度は、変なことが起こりはしないかと不安になる。たとえば、人と会って握手をすると、相手の手を構成している原子核と自分の手の原子核同士がこの強い力によって結合してしまい、離れられなくなると結論できる。もちろん、こんなことは起こらない。実は、この「強い力」は、不思議なことに、陽子や中性子が 10^{-15}m 程度まで近づいて初めて作用する性質を有しているのである。この力の存在も、この宇宙形成にはなくてはならない仕掛けの1つなのである。そして、この知識が、恒星の中心部で重い元素を作り出す核融合反応現象を理解する上で重要となる。

さて、中性子が登場したので、これに関わる不思議な話題の1例を紹介しよう。我々のような生命が存在するためには、多種多様な元素が不可欠である。異なる元素を特徴づけるのは、原子核内の陽子の数の違いである。しかし、原子核が安定であるためには、ほぼ同数の中性子が核内に含まれている必要がある。強い力が作用するとはいえ、陽子間の電気斥力は中性子の存在によって緩和される必要があるのである。すなわち、多様な元素が存在する宇宙が形成されるためには、中性子の存在は不可欠なのである。ところが、原子核外に存在する自由な中性子は、寿命約15分で陽子（+電子+ニュートリノ）に崩壊してしまうのである。宇宙誕生直後、宇宙は高温の状態にあり、陽子も中性子も自由な状態であった。この高温状態では、陽子と中性子は平衡状態にあり、それぞれの総粒子数は、同数であった。時間がたつにつれて宇宙の温度が低下し、中性子が陽子よりわずかに重いことが顕著になると熱平衡状態は解かれ、陽子数が中性子数を上回るようになる。さらに、中性子は徐々に崩壊をはじめ、中性子数は次第に減少していく。このままでは、中性子は崩壊により全て陽子になってしまうことになるのである。それを防いだのが、原子核の生成である。宇宙誕生約3分後、温度にして 10^9 度の時、陽子2個と中性子2個が結合してヘリウム原子核が生成されるのである。この温度は、陽子や中性子相互の結合エネルギーに相当するため、これより低い温度では、陽子や中性子は自由でいるより原子核を形成した方が安定して存在できるからに他ならない。これにより、自由であった全ての中性子は、ヘリウム原子核

内に取り込まれることになる。すなわち、殆ど全ての中性子は、量子力学に支配された状況になることにより、陽子への崩壊が抑制されることになった。この結果、現在まで生き延びた中性子は、多様な宇宙の形成に貢献することになるのである。ここで、強く感動するのは、中性子を生き延びさせた量子力学の仕組みより、この原子核生成が宇宙誕生後3分に起こったということである。もしこれが、誕生後15分以上経過した後起こったなら、殆どの中性子は陽子に変わってしまったのですから、この宇宙誕生後3分という時間は、必然だったのだろうか。この時間は、宇宙誕生時の状況、およびその直後の宇宙膨張の様相に大きく関わっているはずであるが、現在の物理学の知識では、まだその答えに至っていない。

宇宙初期における原子核合成では、ヘリウムの次に重いリチウム、ベリリウム、ボロンが不安定であるため、陽子そのものが原子核である水素とヘリウムのみが作られた。したがって、我々生命に必要な重い元素はどのようにして作られたのか、という間に答える必要がある。宇宙で最初にできた恒星の材料となったのは、水素とヘリウムであることは疑問の余地はない。これらの物質が万有引力により集まり始めるのであるが、ここでも不思議なことに気がつく。万有引力は電気力と極めて同じ性質を持っている。異なるところは、電気には、正負の電荷が存在し、それにより引力と斥力があるが、万有引力は引力のみであること。また、電気力は普段の生活のいたる所で活用されているのに対して、万有引力は天体規模にならなければ感じないほど極めて弱く、重力として認識できるのみである点である。ならば何故、天体の形成について、強い電気力ではなく弱い万有引力が有効なのだろうか。ここでも、宇宙の巧妙さを知ることになる。電気力は強く、正負二種類の電荷が存在することから、正電荷を有した陽子は、負電荷を有した電子を強い力で引き寄せ、電子を量子力学が支配する領域に引きずり込む。この結果、電子は容易に陽子がある原子核には落ち込むことができず、原子核内の陽子が作る強い正電場は周囲の電子が作る負電場によって中和され、原子の大きさ外には殆ど電場が存在しない状況を実現することになる。すなわち、電気力自体は、無限遠まで到達する性質を有しているが、現実の宇宙では、原子の大きさ程度の有限の到達距離を有した力として振る舞うことになる。このため、原子の化学的性質は原子外縁部にある電子の状態によって決まり、この電子が、原子相互の結合を司ることになるのである。この結果、遠方の物質まで力を及ぼすものは万有引力のみであり、これが天体を形成する原動力となるのである。しかも、これは引力のみであるので、周囲の物質はしだいに引き寄せられ、天体に成長していくことになる。この過程において、集められた物質の重力エネルギーが解放され、天体の中心部の温度が上昇する。この結果、中心部の陽子は高速で運動することになり、1200万度を超えると、陽子同士の電氣的斥力に打ち勝って

10^{-13}m 程度まで近づくことができるようになる。こうなると、陽子間に「強い力」が作用し、新たな原子核が形成されることになる。これが核融合反応であり、結果として4個の陽子から1個のヘリウムが形成される。この際、多量の熱が発生し、この熱による膨張力と万有引力が釣り合い、天体は一定の形を保つことになる。この核融合反応は、次にヘリウム原子核同士による反応で炭素を生成し、というよう次々に反応を繰り返し、最も安定な鉄の原子核までを生成することが可能である。しかし、反応を起こすために必要な温度

は、生成される原子核が重くなるにつれてより高温であることが必要となる。このことは、例えばヘリウム原子核は陽子2個を含むため、ヘリウム原子核同士に作用する電気斥力が、陽子1個同士の場合に比べて4倍となることから理解できる。このような高温状態を実現するには、天体自体がより重くなくてはならない。鉄までの元素を生成するには、太陽の約10倍の重さの天体である必要がある。さらに、天体の中心部で生成された重い元素は、宇宙に拡散される必要がある。これには、超新星爆発というからくりが用意されている。この爆発機構にはいくつかのパターンがあるが、ここでは、太陽の10倍以上の恒星の場合について述べる。恒星の中心部には核融合反応の燃焼灰である鉄が蓄積されてゆく。鉄は最も安定な元素であり、これ以上、核融合反応は起こさない。前にも記したように、天体としての形状を保つためには、重力収縮に釣り合う力が必要である。よって、鉄を成分とする中心部では、熱生成が起こらないため、重力収縮することになる。この収縮に伴って、中心部の温度は上昇する。ついには40億度に達すると、今度は、鉄が一挙に多数のヘリウム原子核他に分裂する反応が起こるのである。しかも、これは吸熱反応であるため、恒星の中心部は一挙に収縮し、中性子のみからなる固いコアが形成される。このコアに落下してきた恒星外層物質が衝突し、外向きの強い衝撃波が発生する。この衝撃波により、恒星を形成していた外層物質が吹き飛ばすことになり、これが超新星爆発と呼ばれる現象である。中心部の重さが、太陽の重さの約2倍より小さい場合は、中性子星があとに残るが、それ以上重たい場合はブラックホールが残ることになる。この爆発現象により、恒星内部で延々と生成されてきた重い元素が宇宙空間に放出される。また、爆発時には、放出される多量の中性子により、さらに重い元素が形成され、これも宇宙に拡散していくことになる。

このようにして拡散された重い元素を含む宇宙物質を材料として、我々の太陽系はできあがった。その第3惑星である地球には、幸運にも生命が誕生しうる環境が形成され、太陽誕生から約46億年たった、我々人類が誕生したわけである。普段はまったく考えもしないことであるが、地球上の生命が生命活動を維持していくために必要なエネルギーも太陽中心部の核融合反応によって生成されたものであることも強調しておくべき知識である。

紙面の関係上、宇宙に仕込まれたからくりの一部分、特に簡単に理解してもらえるものしか取り上げられなかった。しかし、これだけでも「なんて巧妙ですてきな仕掛けが、宇宙には組み込まれているのだろう」という感動を持っていただけたのではないだろうか。私は、「宇宙科学」の講義を通じて、全ての学生諸君に、この感動を味わっていただき、このようなすばらしい宇宙に生命として生まれてきたことを幸せに思っほしいと願っている。また、この覚醒により、ものの見方が激変し、自分自身も含めた広い世界を外から眺めることができるようになると思う。さらに、宇宙誕生以来138億年の永きにわたって、宇宙の進化の中で延々と生成されてきた原子核が、偶然より集まって形成されている自分というものの存在に気づき、自分自身が極めて貴重なものであるとの思いに至るのではないだろうか。こうして、この宇宙の中で、わずか100年くらいかもしれないが、この貴重な時間を、一人でも多くの学生が、すばらしく、楽しく、有意義な人生をおくられることを心より願い、筆を置くことにする。