天文現象の見方－法則性を認識する

長 島 雅 裕

1. はじめに

「本質は現象をまとって現れる」と言う。天文学においてもその通りで、様々な星座（星の配置）や月・金星の見かけの形の変化など、多種多様な現象が観察されるが、その本質は実に単純である。天文学が扱う現象は幅広いけれども、本質的な部分では、多くの場合、あらゆる学問分野においても最も単純なのが天文学なのではないだろうか。

その証左が、近代天文学・近代物理学の成立過程であると言えるであろう。ニュートンにより物体の運動法則が確立したが、その背景には、ケプラーの法則をはじめとする天体現象があった。天体現象の解析は、おそらく、実にシンプルなこの運動法則に気づくきっかけであったろう。例えば、慣性の法則を考えてみよう。「力が働かなければ物体は等速直線運動する」というのは、例えば摩擦が避けられない日常の常識にはある意味反することである。ニュートンの偉大さは、この例で言うならば、摩擦は本質ではなく無視してよいものである、ということを見抜いたことにあったと言ってよい。つまり、天体現象というのは、物事の本質をほぼそのまま我々の目の前に見せてくれる、またとない実験場なのである。

本稿では、まず天文学を含む現代物理学がどのように世界を捉えているかから話を始めたいと思う。それを踏まえ、天文学の特質である重力（万有引力）がもたらす特徴的な現象について、宇宙全体から惑星の運動に至るまで、様々なスケールで考察する。重力による運動は、多くの場合回転をもたらすが、回転という加速度運動は、見かけの力を発生させる。そこで、次には運動の相対性について考える。最後に、天文学において、法則性をどう認識すべきか考察したい。なお以下では重力という言葉は万有引力を含む重力相互作用のことを指して使う。

2. 物質の密度と大きさ

自然界には様々な大きさ、様々な密度の物体があるように感じられる。実際、枯れ木と鉛では密度が随分違うと感じられるし、ミクロな原子もあれば太陽のように巨大な天体も存在する。しかし、そこには厳然とした法則があるのであって、単に「いろいろ」ある、というわけではない。

図１に、サイズ－密度面上にプロットした様々な物体・物質を示す。ここには自然界のほぼすべての物体がカバーされている。サイズはおよそ40桁、密度はおよそ45桁の範囲を示しており、これだけ広い範囲にわたって自然界の物質は存在している。しかしその一方、見て明らかなように、一様に分布しているのではなく、３種類の系列を成している。ここには、自然界を貫く物理法則が実は現れているのである。

自然界には、つきつめると４種類の力（相互作用とも言う）しか存在しない。それぞれ、強い力、弱い力、電磁気力、重力と呼ばれる。どんな力も、還元していくと４つの力のどれかになる。たとえば摩擦は物体を構成する原子の電磁気力に還元できる。これらのうち、３種類の力が３種類の物質の系列に対応しており、弱い力は物質の系列を作らない。そこで、まずは電磁気力、強い力、重力について見ていこう。

一つ留意しておきたいのは、天文学は、この図に現れるあらゆる密度・サイズの物体を扱うが、図に表れていないもう一つの軸が本当は考慮されなければならない。それは「複雑さ」である。この図で生物の占める領域はごく僅かだだが、その複雑さは途方もなく大きい。一方、天文学は広い範囲を扱うが、どれも基本的には単純な現象ばかりであることに注意して欲しい。

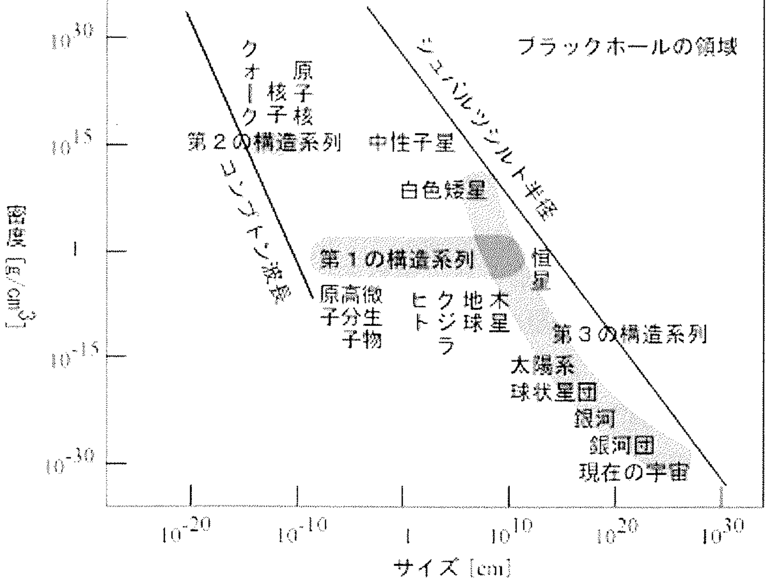

図1. 物質の密度とサイズ。コンプトン波長とシュバルツシルト半径を伸ばして交わったところが現代物理学で扱える宇宙開始直後の状態。「宇宙から見た自然」（池内了）をもとに改変。

2 -a. 電磁相互作用

通常の古典的な世界では、電磁相互作用の現れとしてクーロン力がある。距離r離れた二つの物体が電荷q, q'をそれぞれ持っていたとすると、これら物体間に働く力の大きさは

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{qq'}{r^2}$$

と書ける（εは誘電率）。距離の自乗に反比例するので、弱くなるとはいえ、長距離でも力が働きうる。ここで重要なことは、電荷には正負の符号があることである。異符号電荷は引き合い、同符号では反発する。従って、現実世界では、正電荷のまわりには負電荷の物体が集まり、遠目には電荷が打ち消しあってゼロになっているように見える（逆もまた同様）。つまり、日常生活で見られるマクロなスケールでは、たいていの場合は電荷同士打ち消しあって電気的に中性に見えるようになる。

電磁気力が作る物質の基本単位は原子である。原子は、正電荷の原子核を負電荷の電子が取り巻く構造をしている。原子の大きさは、原子核と電子の間の電磁気力と、ミクロの世界で顕著になる量子力学の性質を反映した「ボーアの量子条件」（ド・ブロイの物質波の波長の整数倍が電子軌道の長さ）の二つから決まる。つまり、電磁気力の強さが原子のサイズを決めている。

サイズが決まれば、原子（核）質量と電荷はほぼ比例しているので、原子の典型的な密度が求められる。これが、図１の「第１の物質系列」の左端に当たる。

さて、日常目にする物質・物体を考えて見よう。結晶や水滴、チリなどの小さい物体も、人間を含む生物も、岩石や岩石を主成分とする地球も、実は原子を並べてできている構造である。その意味で、原子は日常世界を作る「積み木」であると言える。積み木で何を作っても、密度は積み木単体の密度とそうは変わらない。したがって、「原子」という「電磁相互作用」で作られた「積み木」が作る物体は、それも似たような密度を示すことになる（無論、金属は大き

い密度を示すし、固体か気体かによっても密度は変わる。しかし、それは高々2, 3桁程度の違いに過ぎない)。生物は非常に複雑に積み木が積まれたシステムであるけれども、こう見て見ると、電磁相互作用の産物である、とも言える。

2-b. 強い相互作用

これはミクロなスケールのみで働く力で日常世界では現れない。

原子核を構成する陽子や中性子(まとめて核子と呼ぶ)は、さらにクォークと呼ばれる素粒子の複合体である(クォーク3つで核子が一つできる)。このクォーク間に働く力が強い力(相互作用)である(なおクォークは6種類存在するが、6種類あることを予言したのは日本の小林ー益川による論文である)。電磁気力とは異なり、距離が大きくなるほど力が強くなり、まるでゴムひものようである。核子サイズ以上にクォークを引き離すと間に新しいクォークが対生成し、核子が分裂する。このように、通常はクォークを単体で引き出すことは不可能であるような変わった力である。

さて、この説明でも明らかなように、クォークは核子を作る力である。従って、核子の密度・サイズが強い力によって決まっていると言ってよい。核子が集まった原子核も同様で、この場合の「積み木」は核子になる。これが図1で「第2の構造系列」として示されているものである。

ところで核子間にも原子核がバラバラにならないような力が働いている。原子核という原子に比べて非常に狭い範囲に同符号の電荷が密集しているというのは良く考えると不思議である。なぜなら、電磁気力により反発し、原子核がバラけてしまいそうだからである。従って、核子間の引力は、電磁気力よりもずっと強くなければいけない。核子間に働く力、核力は、強い力がもとになっている。クォーク2つで構成される「中間子」をやり取りすることで、核力が生じている。核力が中間子のやり取りで生じると考え、中間子の存在と質量を予言したのが湯川秀樹であった。彼は核子のサイズ程度の長さが量子力学的なコンプトン波長になるような質量を持つ素粒子が存在すると主張し、後にそのような粒子が発見され、ノーベル賞を獲得した。ちょっと計算してみるとすぐわかるが、たしかに中間子の質量程度の粒子のコンプトン波長は核子のサイズ程度になる。高校物理程度の知識でも理解できる結果である。

天文学と核力は重要な関係にあるので、ここで一つ例を挙げてみよう。それは恒星のエネルギー源としての原子核反応である(原子核物理を取り込んだことで、天文学が宇宙物理学としてスタートした、という人もいるくらいである)。

太陽のような主系列星は、中心部で水素が核融合反応を起こし、ヘリウムに転換されることでエネルギーを生成している。ここで、原子核反応の知識から、水素原子核(陽子)4個からヘリウム原子核1個への転換で、質量の0.7%が減少することが知られている。相対性理論によれば、質量がΔm減少すると、$\Delta E = \Delta mc^2$だけエネルギーが生成する。ここでcは光速である。太陽進化の理論から、太陽は一生の間に全水素の1割程度が核反応を起こすことがわかっているので、一生の間に生成するエネルギーは、$E = 0.007 \times 0.1 M_{Sun} c^2$程度になる。ここで、$M_{Sun} = 2 \times 10^{30}$ [kg], $c = 3 \times 10^{8}$ [m/s] である。さらに、観測より、光度(単位時間当たりに放出されるエネルギー)は、$L_{Sun} = 4 \times 10^{26}$ [W] である。ということは、総放出エネルギーを単位時間当たり放出するエネルギーで割れば、おおよその太陽の寿命τが求まることになる。従って、

$$\tau \approx \frac{E}{L_{Sun}} \approx 3.1\times10^{17}[\mathrm{sec}] \approx 1.0\times10^{10}[\mathrm{yr}]$$

となり、およそ100億年であることがわかる。なお、言うまでもないことだが、これは概算であり、このような単純な計算によって、太陽の寿命が10億年でも1000億年でもなく、およそ100億年程度であることがわかる、ということが重要である。

最後に電磁相互作用との簡単な比較をしてみよう。上の原子核反応で、水素からヘリウム1 molが生成すると、0.007 x 4 [g] = 2.8×10^{-5} [kg] だけ質量が減少し、生成エネルギーは$2.8\times10^{-5}c^2 = 2.5\times10^{12}$ [J] である。一方、電磁相互作用が司る化学反応では、$C + O_2 \rightarrow CO_2$で二酸化炭素が1 mol生成する場合は、4×10^5 [J] のエネルギーが生成されることが知られている。質量欠損に換算すると、c^2で割ればよいので5×10^{-12}[kg] だけ質量が減少することになる。比にすると約1.1×10^{-10}, つまりたった10^{-8}%しか質量が減らない。核反応と化学反応は、およそ7桁も違っており、まさに「別世界」を構成しているのである。

2-c. 重力相互作用

重力を記述する理論は一般相対性理論であるが、たいていの問題はニュートン重力で理解できる。これはクーロン力に似て、距離r離れた質量M, mの二つの物体間に働く力は

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

と書ける。ここでGは重力（万有引力）定数である。

クーロン力との最も大きな違いは、クーロン力での電荷に相当する質量には、正符号の値しかないことである。つまり、常に引力として働く。力としては、重力相互作用は電磁相互作用よりもずっと弱い（小さい磁石が地球の重力に抗して金属を引き付けられることからもイメージできる）が、異符号電荷により遮蔽されるようなことがないため、ものが集まれば集まるほど大きな力になる。これが、天体スケールでは重力が重要になる大きな理由である。

以下では、重力が本質的役割を果たす天文現象について見ていこう。

3. 重力と天文現象

本章では、重力が本質的な役割を果たす現象として、宇宙の膨張、銀河の回転、惑星の回転（公転）について述べる。

3-a. 宇宙の膨張

この宇宙は高温・高密度で誕生し、約137億年にわたって膨張を続けているという「ビッグバン宇宙論」が確立して久しい（宇宙年齢については今後の観測により多少変更される可能性はある）。宇宙全体の進化については、無論、一般相対性理論に基づいて議論する必要があるが、その本質を理解するにあたってはニュートン重力で十分である。

ここで宇宙を半径r=137億光年の球のようにイメージし、その総質量をM, 膨張する速度をvとする。ちなみにMは太陽質量の10^{21}～10^{22}倍程度である。すると、宇宙の膨張というのは、あたかも地球上でボールを投げ上げたときのボールの軌道のように見ることが出来る。速度が遅ければやがて地球の重力により落ちてくるし、十分速ければ地球の重力圏を脱出し、どこまでも上昇を続ける。同様に、膨張速度が遅ければ、宇宙それ自体の重力により収縮に転じるし、

速ければどこまでも膨張を続けることになる。ここで最も単純な場合、つまり運動エネルギーと重力による位置エネルギーの和がゼロになり、ぎりぎり収縮に転じない場合を考える（地球の重力圏からの脱出速度に相当）。すると、宇宙の進化を表す式は、

$$G\frac{M}{r}=\frac{1}{2}v^2$$

と書ける。いわゆる「ハッブルの法則」に出てくるハッブル定数は$H=v/r$と書けるが、この式からH^2はM/r^3，すなわち密度に比例することがわかる。短い時間の間は密度もそう変化しないので、ほぼHは定数のように振る舞い、ハッブルの法則が成り立つことになる。

実際の宇宙では、無限遠での全エネルギーがゼロでなかったり、「真空のエネルギー」「ダークエネルギー」などと呼ばれる「場」があると考えられており（アインシュタインの宇宙定数と実質的に同じもの）、付加項があるものの、本質は上の式で尽きている。

3-b. 銀河の回転とダークマター

銀河には渦巻や楕円など幾つかあるが、渦巻銀河は回転しており、その遠心力によって円盤状になっていることが知られている。我々の銀河系もそのような銀河の一つである。

さて、太陽は大体２億年で銀河系内を一回転するが、その回転について考えてみる。銀河の質量をMとし、半径をrとする。また回転速度をvとする。すると、重力と遠心力の釣合いより、

$$\frac{GM}{r^2}=\frac{v^2}{r}$$

と書くことが出来る。ここで銀河は広がった天体なので、質量ではなく密度で考えてみよう。密度をρとすると、大雑把には$M\fallingdotseq\rho r^3$としてよい。これを上式に代入すると、

$$\rho\propto\frac{v^2}{r^2}$$

となることがわかる。さて、銀河の回転速度は、多くの渦巻銀河で、半径によらずほぼ一定であることが知られている（「平坦な回転曲線」と呼ばれる）。これは太陽系の場合とは異なっている。後述するように、太陽系の場合は、回転速度は半径の１/２乗に反比例して小さくなっていく。この違いは、太陽系では質量は中心にある太陽が担っているのに対し、銀河の場合は外側にいくにつれその内側の質量が増大していくためである。速度一定とすると、密度は半径の自乗に反比例することになる。

ところで、光っている星の分布を観測してやると、星はもっと中心に集中しており、外側に行くにつれて急激に減少する。もし、星が質量の大半を担っているとすると、これは平坦な回転曲線（速度一定）という観測事実と矛盾する。そこで引っ張り出されるのがダークマターの存在である。電磁波では観測できないけれども、多くの質量を担うような物質が存在していれば、矛盾は解決する、と言うわけである。ダークマターが何なのか、現状ではまだわかってはいないが、平坦な回転曲線はその状況証拠として重要な観測事実の一つである。このような現代天文学の重要なトピックスが、上で示したような式（重力と遠心力の釣合い）ひとつで理解することが可能になる。

3-c. 惑星の回転（公転）

惑星の運動と言えばケプラーの法則、である。その第3法則が、「調和の法則」とも呼ばれる、軌道半径rの3乗が公転周期Tの自乗に比例する（$r^3 \propto T^2$）、というものである。これも銀河回転の場合と同様に、重力と遠心力の釣合いで理解できる。

簡単のため惑星軌道は円であると仮定する（楕円であるというのがケプラーの第1法則であるが、8つの惑星はどれもほぼ円軌道を描き、円からのズレは小さく、ここでの議論には影響を与えない）。太陽の質量をM、惑星の軌道半径をrとし、惑星の運行速度をvとすると、銀河回転の場合と同様に

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

と書ける。公転周期は軌道（円周）の長さ$2\pi r$を速度で割ればよいから、

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

となり、これら2式からvを消去して

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \propto r^3$$

が得られる。銀河回転との関係は、太陽系の場合は質量が中心に集中しており半径が増大しても全質量が変化しない、つまり$\rho \propto M/r^3 \propto r^{-3}$になっていることである。なお速度については、上の式から$v \propto r^{-1/2}$になっていることはすぐわかるであろう。

もっと簡単に理解する方法は運動方程式（$ma = F$）の次元解析である。加速度aは、おおよそ$a \approx r/T^2$としてよいから、$F = GMm/r^2$のとき、ケプラーの第3法則が直接求まることになる。

なお、ケプラーの第2法則は、次に述べる角運動量の保存則と密接に関係している。

4. 運動の相対性と絶対性

4-a. 回転とはなんだろうか

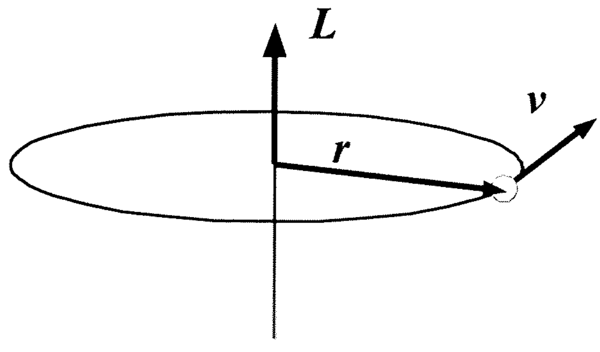

図2. 角運動量と物体の運動

ひとくちに回転と言っても、それをどのように定量化し理解したらよいだろうか。物理学では、エネルギー・運動量に並んで重要な保存量として、角運動量というものがある（保存量は「対称性」と結びついている。物理法則が時間がたっても変化しないこととエネルギー保存則は関連している。場所が変わっても物理法則が変化しないことは運動量保存則と関連している。同様に、どの方向を向いても物理法則が変化しないことと角運動量の保存則は関連している）。質量mの物体がある点のまわりを距離rはなれて速度vで動いているとする。ここで太字で表した距離・速度は向きを持つベクトル量である。角運動量ベクトルを$\vec{L}$とすると、外積（x）を用いて

$$\vec{L} = m\vec{r} \times \vec{v}$$

と書ける。外積とは内積に少し似ているが、掛けた後もベクトルになる。ベクトルの向きは、

掛けられる二つのベクトルに直交し、xの前のベクトルから後のベクトルへ右ネジの方向に進む向きである（図２参照）。大きさは、二つのベクトルが見込む平行四辺形の面積に等しい。つまり、内積$c=\vec{a}\bullet\vec{b}=ab\cos\theta$だったのに対し（$\theta$は見込む角）、外積の場合は$|\vec{c}|=|\vec{a}\times\vec{b}|=ab\sin\theta$となる。

円軌道の場合を考えよう。また角運動量の向きも忘れ、大きさのみを考えよう。すると、$L=mrv$である。では、角運動量が保存するとして、半径rが変化する場合を考えよう。rが小さくなると、Lを一定に保つため、通常はvが増大する。つまり回転が速くなる。これがフィギュアスケートのスピンが、伸ばした腕を曲げて縮ませると速くなる理屈である。これを実感するには、回転する台の上で回した自転車の車輪を手で持ちひっくり返すか、回転する椅子に座りダンベルを持ち腕を曲げ伸ばしする、あるいは傘を開いたり閉じたりするなどすればよい。

角運動量保存則から導かれるもう一つの面白い性質が、歳差運動である。角運動量を時間で微分すると、

$$\frac{d\vec{L}}{dt}=m\frac{d\vec{r}}{dt}\times\vec{v}+m\vec{r}\times\frac{d\vec{v}}{dt}=m\vec{v}\times\vec{v}+m\vec{r}\times\vec{a}=\vec{r}\times(m\vec{a})=\vec{r}\times\vec{F}$$

と変形できる。ここで上で述べた外積の定義より、同じ向きのベクトルの外積はゼロであることを使った。さて、力が重力のみの場合、つまり位置ベクトルと向きが同じ力の場合、外積の定義より角運動量の時間変化はゼロである、つまり角運動量が保存することがわかる。ここで、外力を加えたらどうなるだろうか？上の式が語ることは、回転軸の向き（角運動量ベクトルの向き）が変化する方向は、位置ベクトルと力の向きのそれぞれに垂直な方向である、ということである。例えばコマの場合、地球の重力は回転軸を倒そうとするが、その時回転軸が動く方向は重力が倒そうとする方向に垂直である。そのため、コマはなかなか倒れないのである。このようにして、歳差運動が理解できる。自転車が倒れないのも同様の理由である。これらのことを実感するには、「地球ゴマ」あたりが手ごろな良い教材であろう。

ここで惑星の運動に戻る。角運動量が保存するため、もし惑星が太陽に向けて落っこちると、その惑星の公転速度は速くなる。これはケプラーの第３法則と比べるとわかるが、落ちた軌道でケプラーの第３法則から期待される速度よりも大きくなる。つまり、遠心力が重力よりも強くなっているということである。そのため、一旦太陽に向かって落ちた惑星は、遠心力により再び元の軌道に向けて戻されようとする。このようにして、惑星の軌道は長期間安定に保たれているのである。

４-b. 運動の相対性と見かけの力

さて、加速度運動している人には「見かけの力」が必ず伴う。これは運動方程式を見れば一目瞭然で、通常は$ma=F$を「質量×加速度＝力」と読むが、「質量×加速度に等しい力maと、力Fが釣り合っている」と読むことも可能である。これは、慣性系（加速度運動の外部にいる人）から見るか、加速度運動をしている人から見るかで運動の意味合いが変化する例である。急ブレーキをかけた電車に乗っている人は前につんのめるが、中の人は前向きの力が働いたと感じるのに対し、外にいる人は電車だけが急に減速したので中の人は慣性の法則で電車よりも前に行くように見える。現象は一つ（絶対的）なのであるが、その見え方が異なる（相対的）、というわけである。

回転している場合は、たとえ中心からの距離が変わらなくても、常に加速度運動である。加速度ベクトルを、動径方向（中心からの距離が変化する方向）と、それに垂直な角度方向に成分を分解すると、動径方向の加速度（向心加速度）には、（距離）×（角速度の自乗）のお釣りの項がついてくることがわかる。これが遠心力の起源である。紐におもりをつけて回すと、おもりのところで紐の張力とおもりの遠心力が釣合い、飛んでいかない、ということになる。

引っ張る力が重力の場合はどうなるであろうか。人工衛星を考えよう。スペースシャトルの軌道は高々地上500km程度である。まず、この高さでの重力加速度を計算してみよう。

万有引力がある場合の運動方程式は、地球の質量をM，人工衛星の質量をm，地球の中心からの距離をrとして

$$ma = \frac{GMm}{r^2}$$

とかける。ここから、重力加速度は

$$g' = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{(R+h)^2}$$

であることがわかる。ここで地球の半径をR，人工衛星の地表からの高度をhとした（$r=R+h$）。一方、地表での重力加速度は$h=0$とすればよいので、

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

と書ける。では、この比を取ってみよう。すると、

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2} = \left(1 + \frac{h^2}{R^2}\right)^{-1} \approx 1 - \frac{h^2}{R^2}$$

となる。ここで地球半径（約6400km）、高度500kmを入れると、スペースシャトル軌道上では重力加速度は１％も変わらないことになる。ほとんど体重も変わらない。ではなぜ、スペースシャトルでは無重力状態が実現されているのだろうか？

その答えは、もちろん、スペースシャトルが地球からの重力と遠心力の釣合いの位置・速度にあるからである。二つの等しい力に引っ張られ、見かけ上無重力になっているのである。これは、地球上にいる人から見れば、スペースシャトルが「落ち続けている」からに他ならない。自由落下するエレベーターの内部では、見かけ上無重力状態が発生するのと本質的に同じことである。

この、一つの現象の違う見方は、実は「等価原理」と結びつき、一般相対性理論の概念の基礎をなすものになっている。当たり前のようで、実は結構深い内容を持っているのである。

もう一つ、回転する系で生じる見かけの力を紹介しよう。これは気象で出てくる「コリオリの力」である。地球を回転軸方向から眺めてみよう（北極や南極を中心にして見る）。地球上を運動する物体は、仮にそれが（宇宙空間に対し）まっすぐ動いていても、回っている地球にいる人にとっては、曲がりながら運動しているように見える。つまり、地球上にいる人にとっては、運動する物体には何らかの力が働いているように見える。

これを実験するためには、回転する円盤の上に乗ってボールを転がしてみると良い。円盤の外にいる人にとってはボールは単にまっすぐ転がるだけであるが、円盤の上で回っている人から見ると、ボールが曲がって運動しているように見える。

4-c. 天動説と地動説

ここで、天動説と地動説の違いを考えて見よう。天動説は地球中心の世界観、地動説は太陽中心の世界観である。天動説から地動説への世界観の変遷が、ほぼそのまま天文学の成立と結びついていることは広く知られていることであるが、「中心」とはいったい何を意味するのだろうか。

例えば、ティコ・ブラーエ（ケプラーは彼の弟子。彼の残した膨大な観測データにより、ケプラーの3法則が導かれた）の宇宙モデルは、天動説ではあるものの、地球以外の惑星は太陽のまわりをまわり、その太陽が地球のまわりをまわる、というものであった。これは数学的に言えば、我々が正しいと思っている太陽系モデルを、地球が常に中心に来るように座標変換したものに他ならない。その意味で、ティコ・ブラーエの天動説は、現代の太陽系モデルと変わるところがない。では、天動説・地動説と区別することに意味はないのであろうか？

これは無論悪しき相対主義の典型であって、実際には重心という概念により区別される。つまり、我々の太陽系では太陽の質量が圧倒的であり、重心と太陽の中心はほぼ一致し、それゆえ太陽を中心に考えることが「自然」なのである。実際にはほんのわずか太陽の中心と太陽系の重心とはずれている。最近続々と見つかりつつある太陽系外惑星の多くは、このズレを利用して発見されている。つまり、太陽に相当する主星が、惑星との間で作る重心のまわりをほんのわずかではあるが公転しているのである。そこで、ドップラー効果により主星の運動速度を観測的に求め、惑星の質量を計算することができる。

さらに言えば、太陽系自体、銀河系の中で、銀河中心のまわりを約2億年かけてまわっている。このように、何が中心か、というときは、より本質的には重心のような物理的な考察が必要となる。

5. おわりにー自然界の法則を認識する練習問題としての天文学

太陽・月・星の動き、日周運動、などといった「見かけの運動」は、夜空を見上げる文化さえあれば、それなりに常識として身につくものであるかもしれない（最近は自然には難しいかもしれないが）。しかし天文学の本質に迫ろうとすると、例えば地球の自転・公転について理解しようとすると、途端に体験では把握できなくなり、なんらかの形で結論を導いてやらざるを得ない。

これに対する一つの有効なアプローチは、運動の相対性を認識することであろう。日周運動と、走る電車の窓から見える流れる景色は、本質的に同じである。一つの現象を、違う立場で見れば、違うように見える。このような「錯覚」の認識は、特に天文学においては重要である。実際の研究現場でも、運動する物体から見たらどう見えるか、また同じ現象が、地球上からはどう見えるか、などということは、常に議論されていることである。特殊相対論・一般相対論を使わねばならない現象の解析などは特にそうである。「誰から見ての現象か」ということは、常に頭においておかなければならない。

おそらく、このような発想は、天文学だけではなく、広く社会において重要なものなのだと思われる。自分の立場ではない立場に立って物事を考える、ということだからである。

天文学が有効である別の側面として、物理法則が現象にストレートに現れるということがある。たとえば惑星の運動では、地上では重要になる摩擦を（基本的には）考えなくても良い。これは、ニュートンの運動法則を理解する上で格好の材料だろう（高校以上のレベルになるかも

しれないが)。天文学というと遠いところの現象のように思われがちだが、実は法則性を認識し身につけるためには良い入門教材なのではないかと思っている。

本稿では、はじめに現代物理学における天文学の位置づけを述べた後、主に重力と遠心力の釣合、あるいは重力による位置エネルギーと運動エネルギーの観点から、幾つかの代表的な天文現象の本質が理解できることを示してきた。さらに運動の相対性についても考察した。これらから、天文現象の多くは、角運動量と、高校レベルの物理で出てくるような幾つかの簡単な法則で、その本質から理解できることがお分かりいただけたと思う。これは他の学問分野にはない強力さである。なんらかの仮定・前提抜きに、もっとも基礎的な物理法則で、根底から現象を理解できるのである。高校レベルで理解できるということは、話の仕方で、定性的にはもっと低年齢の子どもでも理解しうるであろう(実際には難しいだろうけれども)。天文学を理解するというよりも、天文学を通じて、世界の成り立ち、科学的な見方、そういったものを伝えられたらと思う。

参考文献

「宇宙から見た自然」池内了、新日本新書
「観測的宇宙論」池内了、東京大学出版会
「ものの大きさ」須藤靖、東京大学出版会
「新しい高校物理の教科書」左巻健男、講談社ブルーバックス