

天体現象と非線形・非平衡物理

— Introduction にかえて

杉本 大一郎 (東大教養)

1. 天体現象の2つの側面

天文学の研究に物理学者の発想を持ち込むのは、現在では当然のことと思われる。日本で両分野の交流の基盤を作ったもののひとつに、1955年にこの基礎物理学研究所で始められた天体核現象研究会があった。天体物理のなかに原子核物理を持ち込もうという、その試みは、その後、恒星進化論、元素の起源論を初めとして、広い意味での宇宙論に大きく成長し、1つのdisciplineとなるまでに発展した。そして、それは、天体現象そのものを説明するだけでなく、たとえば中性子星などの超高密度物質の状態方程式に見られるように、いろいろな問題を物理学のほうにも提供することになった。

これらの研究のなかで、しばしば強調された天体物理の意義として、天体では地上の実験室で実現できないような「超」高温とか「超」高密度の状態が実現しているということがあった。すなわち、天体は極限状態に関する物理に新しい実験ないしは実践の場を与えるものであるということである。それはそれで、もちろん大切なことであるが、今になって考えて見ると、それは天体現象で特徴的なことの1つの側面にすぎない。そこに現れるものは、ある温度と密度のときの物質の状態や、そのもとで起こる反応などが主な点であり、考えられているプロセスは星や天体の内部で起こっているかどうかということと関係なく、その温度・密度の一樣な媒質内で起こるものと同じである。それらは、すぐ後に述べる天体の空間的構造という、もうひとつの側面に対比させていうと、局所的物理(local physics) だとも言える。

それに対し、天体ではその場所・場所で温度や密度、それに流れがあれば、その速度などが、場所の関数になっている。天体にはグローバルな構造というか、「場」があるのだといってもよい。そのような構造とか場をきめるものを大局的物理学(global physics)というならば、それは上に述べたlocal physics とは違うもう1つの問題なのである。

具体的な例を上げるならば、それは恒星の内部構造、すなわち星の内部における温度・密度の分布、エネルギーの流れなどを解くという問題である。これは非線形性の甚だしい流体静力学の問題であるが、そうして求められた場について、

local physics できめられる原子核反応率などが積分される。もちろん、局所的に状態方程式からきめられる圧力はその場所的分布として、また光の吸収や散乱の過程は星の内部のエネルギー輸送にかかわるものとして、恒星のglobalな構造にはね返ってくる。

天体におけるこれらの問題が、ふつうの流体力学の問題と異なっているのは、天体では自分自身の重力、すなわち自己重力の効果によって、非線形性が著しいことにある。そのため、天体の構造や、構造の時間的変化としての進化の問題には、一般的にとり扱いはなく、個々の問題として解かれてきた。

天体は自己重力によって固まり、系の境界が設定されていないのに、自分自身で有限の大きさにおさまるために、非平衡・開放系になる。したがって、ふつうのやりかたのように、まず最初に平衡状態を考え、次いでそれからの微小なずれを論じるという論理構成をとることはできない。最初から有限振幅、すなわち非線形の非平衡なのである。しかも、次の節で述べるように、熱平衡状態でさえ存在しないということがある。また、天体ではいろいろな物理過程が混在し、それぞれ非常に異なるtime scaleで起こっているので、detailed balanceの状態になっていないプロセスが多い。そこで、われわれは非平衡状態のもの、または各成分の間に平衡が成りたっていない状態から出発して、系の内部でどのような過程が進んでいくかを議論することになる。こうして、非平衡から出発した系の進化を論ずることが、天体の物理学の構成となる。

一方、非線形・非平衡物理のほうは、最近、いろいろな側面で著しい発展をみせている。これも物理学が、新しい現象や、すでになじみ深かった現象のうちでも、その解析方法がこれまでの物理数学的構成に合わないために残されていたものに、その対象を広げてきたからであろう。そして、そのなかで、この研究会のプログラムにも見られるように、新しい概念が開発されてきている。それらを使って、天体の現象にも、より一般的で見通しのよい考えを発展させることはできないだろうか。また逆に、天体現象のほうから非線形・非平衡物理のほうに興味ある問題を提供できないだろうか。このようなことを考えて、今回の研究会をもつことになった。

2. 重力の効果

質量 M の系を考える。そのサイズを R とすると、系の自己重力のエネルギーは GM^2/R のオーダーである。これに対し、内部エネルギーは質量の1乗に比例する。したがって、質量の大きいものを考える(ただし、 R は M に比例するほど大きく

はならないとする) と、重力エネルギーは必ず他のエネルギーを圧倒するようになる。そして、そのようになっているものを「天体」と定義することもできる。この意味の天体では、重力も含めたエネルギーがもはや質量の1乗に比例する、extensive な量ではない。エネルギーが質量の1乗よりも大きい巾になるものを super-extensive な系と呼ぶことにするならば、そのような系が、われわれのよく知っている熱力学系とは異なる様相を示しても不思議ではない。Extensive でない系の例としては、表面エネルギーの関係する問題がよく知られているが、それは質量の1乗よりも小さい巾に比例するので、むしろ infra-extensive である。天体は、物理的に言って、われわれが比較的良好に知っている系の逆側にあることになる。

このように発想するとき、重力は、問題にしている系がいわゆる場として感じているものとして表現されるのではなく、重力をも繰り込んだ物理量として表現されている。そのもっとも簡単で典型的な例は、地球を回る人工衛星である。衛星の運動エネルギーを K 、重力ポテンシャルを Ω で表すと、よく知られているように Virial 定理

$$2K + \Omega = 0 \quad (1)$$

が成り立つ。全エネルギーを E で表すと、

$$E = K + \Omega = -K = \Omega/2 \quad (2)$$

である。衛星が大気内に突入して抵抗を受け、運動エネルギーが L のパワーで散逸すると、

$$L = -dE/dt = dK/dt = -(1/2)d\Omega/dt > 0 \quad (3)$$

となり、運動エネルギーはかえって増えることになる。ここで起こっている過程は、散逸した運動エネルギーの2倍だけの重力エネルギーが解放され、そのうちの1/2は出ていった運動エネルギーをまかなうが、残りの分は衛星の運動エネルギーを増すことになっている。

同様のことが、恒星についても成り立つ。そのとき、上の式で K と Ω をそれぞれ、星全体にわたって積分されたガスの内部エネルギーと重力エネルギーに読み替えばよい。ガスが非相対論的粒子からなっていて、比熱の比が $\gamma = 5/3$ だと、係数の値も上の式の場合と同じである。このとき、星から光としてエネルギーが出ていくと、 K はかえって増加し、ガスが完全なフェルミ縮退をしていない限り、ガスの温度が上がることになる。このことは、重力を繰り込んだ比熱という意味での重力熱力学的 (gravothermal) 比熱が負だと表現される。(粒子が相対論的な極限では $\gamma = 4/3$ となるが、そのときには、 $E = K + \Omega = 0$ となって、重力的結

合状態は存在しないことになり、負の比熱の問題も消失してしまう。しかし、実際の系では、中途半端に相対論的だから、いつでもそのような問題は残っていることになる。)

重力熱力学的比熱が負だと、系は熱力学的に不安定である。そして、系にはエントロピー極大の状態は存在しない。逆に、極小値は存在して熱平衡状態に対応するが、それは熱力学的不安定を示す。すなわち、熱伝導などの非可逆過程の進行に伴ってエントロピーが生成され、エントロピーがどこまでも増大していくのである。これは、恒星進化論では、星が重力収縮をして、ついにはブラックホールになる過程に対応する。

重力の入った系がこのように、一見、不思議な様相を呈するのは、重力という相互作用の遠距離性にある。相互作用を湯川ポテンシャル $\exp(-r/\lambda)/r$ の形で表すと、その effective range λ が無限大だということである。その他の相互作用では λ は有限（クーロンのときは Debye shielding distance で考える）であり、ふつうにマクロな系を考えるとときには、そのサイズ R は λ より大きい。これに対し、重力の問題では、系のサイズはいつでも λ より小さい。反語的な言い方になるが、重力の入った系は、この意味では、いつでもミクロな系だということになる。サイズが λ よりも小さい系では、相互作用のエネルギーは粒子数の2乗に比例する。このことから、系の super-extensive な性質がでてくるのである。

同じ理由によって相互作用に特徴的なスケールは存在しないから、long range correlation が重要になり、また他の物理現象からスケールが導入されない限り、そこから出てくる結果は power law で記述されるものとなる。こうして、その方面で開拓されたいろいろな概念が適用されうることになる。それらは homologous transformation, similarity solution, scaling law, singularity, fractal とそれに関連した chaos などであろう。

3. 天体に特有ないくつかの現象

非線形・非平衡に関連するものをいくつか上げてみる。

3-1) 分布の非一様化とパターンの形成

ある系を考えると、その中の物質は有限のサイズに固まる。たとえば、ガス雲は、水素原子が中性のままの低温の領域と、イオン化した高温の領域との2つの相に分かれる。前者はさらにガスの濃い部分としての星と、薄い部分としての星間空間とに分かれていく。そのような、また以下に述べるような現象は、全系が密度が高くエントロピーの低いところと、密度が低くエントロピーの高いところ

とに分かれていく現象だと見なすことができる（系は一様化の方向には進化しない）。星とまわりの空間を含めたものを全系として考えると、星はますます収縮してエントロピーを周囲の空間に捨て、低エントロピーになる。それに対し、周囲の空間には光子が蓄まり、エントロピーが増大する。1個の星を考えても、その内部で核反応が起こり、進化すると、密度の高い中心核と、密度がそれより何桁も低い外層とに分かれる。そのような物質分布はコア・ハロー構造と呼ばれ、天体にはありふれたものである。

星が超新星爆発をするときにも、星の物質は、爆発前よりも密度が高い中性子星と、密度が低い飛び散っていくガスとに分かれる。そのうえ、エネルギー的に言っても、最初は重力結合状態にある星として全エネルギーは負であったものが、中性子星という深い重力ポテンシャルに落ち込んだ負のエネルギーのものと、飛び散っていくガスという正のエネルギーのものに分かれるのである。エネルギー分布という点でも、物事は一様化の方向には進まない。まだよく分かっていない問題であるが、それと似たようなものとして、天体によく見られるジェットが発生がある。これも球対称に近いものから、それから大きくはずれたものが生みだされる過程である。

3-2) 非平衡・開放系

このようにして、いくつかの相に分かれたもののそれぞれを部分系だとみなすと、それらは開放系になっている。そして、物理量の勾配が存在するから、当然非平衡系になっている。それらが系内でおこる非可逆過程による緩和時間と比べて、長い間存続しているときには、それらは、重力や他のモードのエネルギー源からネゲントロピーを食って生きている。また、恒星の例になってしまうが、太陽のような主系列星は、われわれの体と同様な意味での、非平衡・開放系の定常状態にある。また、われわれの心臓のように極限サイクルを描きながら非線形振動をしているものの例としては、恒星の内部の厚さの薄い層内でおこる核反応の周期的暴走（新星や中性子星のX線バーストと関係する）などがあるし、また球状星団の中心部が重力でcollapseした後に、gravothermal oscillationと呼ばれる非線形振動を繰返すという計算もある。

3-3) 不十分な緩和とquenching

空間的に密度が大きく異なる領域ができ、それらの中には、relaxation timeの非常に異なるプロセスが混在している。そして系全体に熱平衡状態が存在しないのだから、系全体が τ_{evol} というtime scaleで進化（退化）する。この τ_{evol} を決めている過程よりも遅い過程は、系の進化についてゆけず、そこから落ちこ

ぼれることになる。系の進化によってquenchされるといってもよい。宇宙の初期には τ_{rel} のほうが宇宙の膨張による τ_{evol} よりも短いから、熱平衡が成りたっていた。膨張によって密度がしだいに低くなると、膨張も遅くなって τ_{evol} も長くなるけれども、 τ_{rel} はそれ以上に長くなる。こうして、宇宙が膨張してくるにつれて、相互作用の弱いものから順次 τ_{rel} のほうが τ_{evol} よりも短くなり、落ちこぼれていくわけである。その結果、熱平衡状態から非平衡状態が生みだされる。典型的な例は、宇宙初期で温度が 10^{10} K以上のとき、原子核は陽子と中性子とに分かれているのが熱平衡状態であった。しかし、宇宙膨張に伴って温度が下がると、それらは結合して ^{56}Fe になっているのが熱平衡状態である。幸いなことに、温度が低くなってしまった現在、落ちこぼれ現象によって、宇宙の物質はおもに水素という非平衡状態にある。それが鉄という熱平衡状態へと緩和していく過程は、現在、星の内部で進行している。そこで発生するエネルギーを使って、われわれは生きているのである。

このような落ちこぼれ現象は他にもいろいろある。極端な例をあげるならば、宇宙線粒子が磁場をもつ星間ガス雲と衝突して加速されるという、フェルミ加速がある。十分に緩和するならば、粒子1個とガス雲1個のエネルギーの間に等分配が成りたつようになるはずだが、そうなるまえに、粒子は、粒子・ガス雲系からこぼれ落ちてしまう。このとき、特徴的なスケールは存在しないから、宇宙線のエネルギー・スペクトルはpower lawになるというわけである。

3-4) 重力多体系での衝突時間

重力で相互作用しあっている多粒子系を考える。このとき、1個の粒子を1個の星と考えれば多体系全体は星団に相当し、1個の銀河だと考えれば多体系は銀河団とか宇宙にあたる。系全体でVirial定理がほぼ成りたっている状態を考えると、粒子の速度は

$$v^2 \sim 2GM/R \quad (4)$$

である。粒子どうしのclose encounterのimpact parameterを $Gm/a \sim v^2/2$ の a だとし、それからrelaxation time τ_{rel} をプラズマの場合のようにして推定する。ただし m は1個の粒子の質量である。粒子が系を横切るcrossing timeを

$$\tau_{cr} \sim R/v \quad (5)$$

とすると、両者の比は

$$\tau_{rel}/\tau_{cr} \sim f \cdot (N/100), \quad f = (\log 40)/\log(0.4N) \quad (6)$$

となる。ここで N は系全体の粒子数であるが、 N が100程度より大きいと、系はcollision freeだというふうに、直観とは逆の結果になる。その理由は、Virial

平衡が成りたっているときには、 N が大きいほど系の重力エネルギーが、したがって粒子の運動エネルギーが大きくなって、close encounter の cross section が小さくなり、かえって衝突が無視できるようになるからである。

実際の系について考えるとき、問題にしている時間スケールが τ_{or} よりはかなり長い、 τ_{rel} よりも短いと、close encounter は起こらないが、力の遠距離性と重力場の激しい変化のために、分布関数はゆさぶられる。そして、粒子相関が無視できて、重力のポテンシャル場という近似が成りたつ範囲内では、それぞれの粒子の運動方程式では、両辺から（一般相対性理論と関連して equivalence principle を考えたときのように）粒子の質量が消えてしまう。そのようなポテンシャルの変動によって分布関数が変わっていく過程は、Lynden-Bell によって violent relaxation と名づけられた。もし、その relaxation によってある種の一般的な状態に近づくのだとすれば、そこでは、違った質量の粒子の間でエネルギーの等分配になるのではなくて、速度の2乗の等分配になると考えられる。また、close encounter がないと phase volume は保存するから、phase mixing が起こった結果、ある種の chemical potential をもつような分布関数になり、そこでは Lynden-Bell statistics が成りたつという話がある。しかし、この議論も正しいかどうか、よく分からない。少なくとも、数値計算の結果では、そのような一般性のあるものに relax していくようには見えない。

話は変わるが、 N が100 より大きいと、いつでも collision free かというと、必ずしもそうではない。全体が重力的に bound system になっていると、粒子はその系のなかで何度も orbit をまわり、そのうちに τ_{rel} 程度の時間がたつと、他の粒子と衝突するからである。このとき系全体では Boltzmann 分布に近づくような relaxation も起こるが、同時に correlation も発達する。多くの星からなる星団を全系と考えると、そこで発達する2体相関は連星(binary star system)の形成である。こうしてできた連星に第3体が衝突すると、連星の軌道運動は excite されたり、deexcite されたりする。数値計算から推定される一般的傾向としては、ゆるく結合した、いわゆる soft binary は excite されやすく、ついには壊れる場合が多い。これに対し、強く結合したものは deexcite されて、ますます強く結合するようになる。こうして、相関の発達についても、系は一様化するのではなく、異なる相に分かれていく方向に進化する。

4. 天文学者の態度と物理学者

このように、天体には物理学の問題としても、いろいろとおもしろい側面があ

る。それらは個々の問題、個々の対象についてとり扱われてきた。しかし現実の天体では、いろいろな過程や効果が絡みあっていて、よく分からないことが多い。

これに対し、平均的な天文学者は、なるべくrealisticなモデルを作って観測と比較しようとする。そして、必ずしも中心的な役割をはたさない過程でも、モデルに取り入れられているのを、むしろ良しとする傾向がある。もちろん、原理的なことが分かってしまった後なら、そのようなことも良いであろう。しかし、重力、非線形、非平衡などの現れる問題では、local physicsは分かっている、系のglobalな振舞いについては必ずしもよく分からず、数値的な解の例があるだけにすぎないものも多い。

そのような場合には、むしろ物理学者の、系を理想化してその本質をえぐりだし、もっとも重要な過程をできるだけ一般的に理解しようというアプローチもなされなければならない。そのさい、物理学で開拓されてきた基本概念が役に立つであろうし、逆に天文学者が求めてきた数値解も、考える方向に見通しを与えたり、一般的考察の結果を確かめたりするのに役立つであろう。このような面でも、両者の協力を進めたいものである。そして、1955年に基礎物理学研究所で行なわれた研究会がその後の天体核物理学の発展に導いたように、今回の研究会も非線形・非平衡天体物理学を育てる基盤となるようにしたいものである。