

宇宙論と宇宙物理：早川尚男(京大人環)

夜空に輝く星を見るまでもなく、宇宙がどうなっているのかというのは根源的な問である。世界最古の学問が天文学であったのは暦を作る上で必要であったという実利的な側面があっただけでなく、宇宙がどうなっているのかという神話が必要であったのだと想像がつく。また物理学の黎明期においてもガリレオ、ケプラー、ニュートンの例を見れば分かる通り宇宙の記述が物理の最も主要な課題であった。このような古い歴史を持つ天文学ではあったが、やがて物理学の主流から外れ、独立な学問分野と認識されるに至った。宇宙を再び物理学の問題として捉える様になったのは20世紀に入ってからである。

今世紀に入って重力に関する一般相対論の発見、原子核物理の発展に伴う星のエネルギー源の理解、各種観測手段の発見と発展があって、宇宙像は格段に発展した。特に19世紀までは絵空事であった、宇宙そのものの創成と進化を科学の対象として議論できるようになった。その結果ビッグバンという言葉は今や聞かない日がない位流布するようになった。¹

1 天文学的数値

天体現象が地上の現象と著しく違うのはそのスケールである。しばしばとてつもない数字が現われる。こうした大きな数字を天文学的と形容するのがこの事実を如実に示している。このスケールの違いが宇宙を縁遠いものとしている面もあるが、20世紀の物理学が得意とする極限的状況が実現するために恰好の実験システムとなっている面もある。それ故に一般大衆まで含めてロマンをかきたてるのである。

さてここで天文学的数値に慣れるために太陽の中心温度を見積もってみよう。太陽は非常に大きな質量を持っており、それが重力で収縮しようとしている。それを支えるのは粒子の運動による圧力と考えて良い。運動エネルギーの平均値は温度を与える。ボルツマン定数を k , 絶対温度を T として、1自由度当りのエネルギーは $\frac{kT}{2}$ なので3次元運動をする系では1粒子あたりの運動エネルギーは $\frac{3kT}{2}$ である。

圧力勾配が重力に等しいとして状態方程式を用いれば密度と温度の関係が得られるが、一般には複雑である。ところが統計力学で知られたビリアル定理² を用いると平均運動エネルギーの倍と平均ポテンシャルエネルギーの和が0に等しい。そうした事を知らなくても平均すれば大体大きさが同じ程度になることは想像がつくであろう。粒子数密度を n , 質量密度を ρ とすると運動エネルギー³ とポテンシャルを大体等しいとして

$$\frac{3}{2}nkT \sim \frac{GM\rho}{R} \quad (1)$$

¹ ここでは宇宙物理の概略を中村誠太郎編 NHK 市民大学叢書 38(1977); R.J. Taylor, The Stars: Their Structure and Evolution (Wykeham Publ. London, 1970); 高原文郎、宇宙物理学 (朝倉書店、1999); 佐藤文隆、いまさら宇宙論? (丸善,1999) 等に沿って紹介する。

² ビリアル定理は以下の様に導出できる。半径 r 内にある質量 M_r は $dM_r/dr = 4\pi r^2\rho$ に従う。一方、力学平衡は $dP/dr = -GM_r\rho/r^2$ で表される。但し P は圧力、他の物理量は本文中で紹介してある。この式の両辺に $4\pi r^3$ をかけて積分すると $\int_0^R dr 4\pi r^3 (dP/dr) = -4\pi G \int_0^R dr M_r \rho r = -\int_0^R GM_r/r dM_r$ を得る。左辺は部分積分により $[4\pi r^3 P]_{r=0}^{r=R} - 3 \int_0^R 4\pi r^2 P dr$ となるが星の表面では圧力は0であるので消える。圧力と内部エネルギー密度 u の間には比熱比 γ を通じて $P = (\gamma - 1)u$ の関係がある。このことは1原子分子では比熱比が $5/3$ であり、 $u = (3/2)kT$ であることと理想気体の状態方程式 $P = NkT$ を考えれば成り立つであろうことが想像がつく。よって全内部エネルギー $U = \int_0^R 4\pi r^2 u$ を使うと結局 $-3(\gamma - 1)U$ となる。一方右辺は重力エネルギー Ω であり $\Omega + 3(\gamma - 1)U = 0$ となる。これがビリアル定理である。 $\gamma = 5/3$ とすると再びポテンシャルと運動エネルギーの関係を得る。

³ 実際には温度の四乗に比例する輻射圧力も存在する。

と置こう。ここで R, G はそれぞれ太陽半径と万有引力定数である。太陽は殆んど水素から出来ていて、水素原子は陽子と電子からなるから $\rho = nm_H/2$ である。よって

$$T \sim \frac{GMm_H}{3R} \sim 10^7 [K] \quad (2)$$

という見積もりが出来る。ここで有効数字一桁で $G \sim 7 \times 10^{-11} Nm^2/kg$, $R \simeq 7 \times 10^8 m$, 電子質量 $m_e \simeq 9 \times 10^{-31} kg$, $k \simeq 1.4 \times 10^{-23} J/K$ と太陽の比重 1.4, 陽子質量が電子質量の 2×10^3 倍であることを用いた。

2 星の物理の概略

2.1 太陽のエネルギー源

太陽の様な恒星は輻射を通じてエネルギーを放出しているのでその供給がなければたちまち冷却してしまう。そうした事情は地球でも同じであって、かつてケルビン卿が一樣な熱い球からの冷却過程にあるとして地球の寿命を 1 億年と見積もり、ダーウィンの進化論に対する反論の有力な根拠を与えていた。太陽ではもっと深刻で、太陽質量と同じ石油を使って太陽の発熱量を維持しようとするとならずか 5000 年で燃え尽きてしまう。これでは誰が考えてもおかしいので古典物理では窺い知れない別の機構が働いていると想像がつく。20 世紀に入り放射能物質の発見に伴い、こうした古典的計算は意味をなさなくなった。量子力学の誕生後、改めて恒星のエネルギー源に考察を加える事で熱核反応 (核融合) であることが知られるようになった⁴。平たく云えば、絶えず水爆が爆発しているのである。

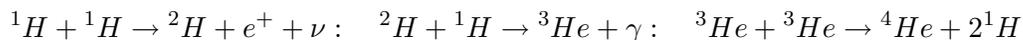
太陽はおおよそ陽子と電子がプラズマ状態になって飛び交っていると考えてよい。通常は 2 つの原子核が衝突しても電気的な反発力のため融合することなく散乱する。しかし量子力学では粒子は波の様に振舞うので光が透過するように壁をすり抜けて進む事が可能である。例えば 崩壊もこうしたトンネル効果によって 粒子 (He) が抜け出て来るのである。⁵

星の内部では原子核の衝突が頻繁に起こり、凶の様な障壁を通り抜けるトンネル効果が起こり得る。トンネルを通り抜けて 2 つの水素が接触すると両者の間に引力が働き、安定化する。

2.2 PP チェーン

陽子が融合して思い原子核になるには 2 つの過程がある。1 つは陽子だけから出発するもので、もう一つは炭素や窒素を触媒とするものである。前者は PP チェーンと呼ばれ、現在の太陽の主要なエネルギー源となっている。ここではこのチェーンを簡単に紹介しよう。

PP チェーンは以下の反応が順に起こっている。



ここで左上の数字が質量数を表し、 e^+, ν, γ はそれぞれ陽電子、ニュートリノ、光子 (線) を表す。このうち一個目が 崩壊と呼ばれる過程であり、弱い相互作用を媒介として極めてゆっくりと生じる。したがってこの反応が律速となって全体の反応もゆっくりと進む。以上の反応をまとめると



⁴ 1929 アトキンソンとフーバーマン。ベータによって 1939 年に完成される

⁵ トンネル効果はビッグバンの提唱者として知られるジョージ・ガモフが発見した。

となる。このように4つの陽子が1つのヘリウム核に転化したことになる。ヘリウム核は2つの陽子と2つの中性子から成り、4つの陽子よりも軽い。その質量欠損は有名な

$$E = mc^2$$

という式によってエネルギーとして解放される。エネルギーは中間生成粒子の運動エネルギー、ニュートリノ、陽電子の運動エネルギー、 γ 線のエネルギー等になる。解放されるエネルギーは水素1 kg あたり6億メガジュールという膨大なものになる。

2.3 主系列星

太陽の様な若い恒星は主系列星と呼ばれる。それはHR(ヘルツシュプルング・ラッセル図)と呼ばれる恒星の色(従って表面温度)と星の明るさの関係図の中で最も多くの星は左上から右下にほぼ直線上に分布しているからである。つまり主系列に属する星(種族I)では青い星程明るく、赤い星程暗い。その他、赤いが青い星と変わらない程明るい一群の星がある。それらは非常に大きな老いた星であると考えられ、巨星(種族II)と呼ばれる。主系列から巨星への進化は次に述べるとしてここでは主系列星について簡単に説明しよう。

主系列星の光度は統計力学でよく知られているステファン・ボルツマンの法則でほぼ決まる。半径 R の球の表面積が $4\pi R^2$ なので光度は温度 T と

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (3)$$

という関係がある。温度とスペクトル型には一定の関係があるのでHR図でほぼ一直線に分布しているのである。

また(1),(2)式から質量 M と半径が比例関係にあること、密度と圧力が質量の2乗に反比例することなどが直ちに導かれる。他にも光度 L と質量 M の間には $L \sim M^5$ という関係があることも知られている。

2.4 巨星への進化と重力崩壊

陽子がヘリウムになるとかなり様子が変わる。(1),(2)の間で $\rho = nm_H/2$ という式を使ったが、これはヘリウムであれば電子2に対して4核子から成る核が1の比で分布しているので数密度と質量密度の比は3/4となる。このため圧力と重力の比が3/8になる。この過剰な重力を支えるためには温度を上げる必要がある。このように中心温度が上昇し、それに伴って温度勾配をあまり大きくしないように星が膨張を始める。このように星が巨星になっていき、主系列星を外れて行く。

中心部にヘリウムが出来ると更に質量数の大きな元素を次々と作って行く。従って表層部には水素を残しながら、玉ねぎ状に核融合域と重元素域が繰り返される。中心部により安定な鉄のような元素が出来、また核物質がなくなっていくと最早重力を支える圧力はなくなってしまふ。このように重力崩壊によって星は一生を終える。その際、表層を吹き飛ばし、中心部には圧縮された高密度星が残る事になる。星の最後は新星とか超新星とかいった華やかなイベントになる。蟹星雲はよく知られているように1054年の超新星の残骸である。当時、何もない処から金星よりも明るい昼でも見える星が現われたという記録が日本に残っている。最近では1987年の超新星が注目を集めたが、銀河系外であったので一般の人の目を引くには至らなかった。

3 高密度星

上記の様に星が一生を終えた後、中心部にコンパクト星が残る事が多い。場合によってはブラックホールになる。コンパクト星の研究史、エピソードと概略を知るにはキップ・ソーン「ブラックホールと時空の歪み」(白揚社)が面白くてよい。

3.1 白色矮星

星の質量があまり大きくないときに、芯は電子の縮退圧で支えられる。電子のようなフェルミ統計に従う粒子は同じ量子状態を占められないというパウリの排他律がある。従って密度が上がって狭い領域に閉じ込められると不確定性原理で激しく動く。このように電子は重力エネルギーによって運動エネルギーを獲得するので収縮が止まる。白色矮星の密度はおよそ $10^6 g/cm^3 = 10^9 kg/m^3$ であり、太陽ほどの質量が地球程の大きさに収まっている事になる。数字で書くと驚く数字ではないが地上で最も重いオスミウムの比重が 22 程度であることを考えるとまさに $1 cm^3$ で 1 t という重さはまさに天文学的数字である。

最も有名な白色矮星はシリウスの伴星である。シリウスの不規則な運動から大きな質量の星が近くにあることが古くから知られていたが、それが白色矮星であることが分かったのは量子力学が発展して後のことである。白色矮星自体は 1926 年にファウラーによって予言された。その後、チャンドラセカールが 19 歳で白色矮星には質量限界があって、ある臨界質量以下でしか存在し得ない事を示した。しかし不幸にも当時の天文学の第一人者であるエディントンはその考えを認めようとはせず、両者の間に確執があったことはよく知られている。

白色矮星の物理自体はそれほど難しくはない。大学院入試レベルである。簡単である理由はニュートン重力の考察で充分であって、理想気体の統計力学の計算で結果が得られるからである。実際、入環の入試にも出たことがあるが誰も解答するものがいなかったのは残念であった。

3.2 中性子星

大質量星ではより高密度になり、電子の縮退圧では支え切れない。この場合、電子は核の中に押し込められ、核の中の陽子はそれを飲み込み中性子に変わる。完全に電子を吸収して全体として電氣的斥力の影響がなくなればより安定に星が存在できるであろう事が想像がつく。また中性子はやはりフェルミ粒子なので縮退圧があり巨大な重力を支える事が可能になる。ここで白色矮星との違いは一般相対論の考察が必要になる点である。しかしそのことを除けばほぼ似たような計算をすればやはり臨界質量があり、それ以上の大質量星では安定に存在し得ないことが分かる。

中性子星の密度はおよそ $10^{15} g/cm^3 = 10^{18} kg/m^3$ である。つまり 1cc あたり 10 億トンという超高密度になり、太陽質量がわずか半径 10km 程度の領域にまで収縮した事になる。

中性子星は巨星の持っていた角運動量を殆んど保持したまま圧縮されるのでものすごい勢いで回転していることになる。それが潮汐力でばらばらにならないのは強力な重力のためである。回転をすると電磁放射をするので規則的なパルスを発生する。中性子星は早くから予言されていたが観測では 1967 年にこのパルスを発する星 (パルサー) を偶然発見することで直ちに中性子星と結びつけられて議論されるようになった。

3.3 ブラックホール

ブラックホールは更に高質量では中性子の縮退圧では支え切れず遂に重力崩壊を起こしてしまう状態を指す。ブラックホール解の存在自体は量子力学よりも古く、一般相対論の提出後すぐにシュバルツシルトによって球対称な場合の厳密解として求まっていた。一般に重力があれば脱出速度が必要になる。ニュートン重力の場合は粒子の運動エネルギーとポテンシャルが等しい場合に脱出速度が決まる。この場合、脱出速度は $v_{\infty} = \sqrt{2GM/R}$ となる。ここで M, R は星の質量、半径である。シュバルツシルトの見つけた解はコンパクト星においては星の外部に臨界半径、すなわち脱出速度が光速を越えてしまうというものであった。

ブラックホールという名称が使われる様になったのは 1967 年からのことである。シュバルツシルトの解は 1916 年に発見されたがその意義の定着には 50 年余りを要した訳である。これは何も維持する力が存在しない事を認めることに対する心理的なバリアを表している。アインシュタインですら一定の密度を仮定して、そのようなコンパクトな星は存在し得ないという計算をしている。エディントンのチャンドラセカールに対する抵抗もまさに同種の抵抗感故であった。