



Title	宇宙は熱いのか？冷たいのか？
Author(s)	池内, 了
Citation	大阪大学低温センターだより. 1995, 91, p. 1-5
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7740
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

宇宙は、熱いのか？冷たいのか？

理学部 池 内 了（内線5481）

1. はじめに

低温センターでは、基本的に、原子でできた物質の物理的性質の温度に関わる挙動が研究の中心だと思う。物質の基本構造は物質を構成するイオンによって決まり、軽くて大量に存在する電子の振る舞いが温度によって微妙に変化することから、実に多様な現象が生じている。それに比べて天体は剛構造で、重力という強い枠で固められているので、温度による微妙な振る舞いは少ない。また、温度の概念も物性世界とは異なっている。そこで、まず天体の温度について簡単にまとめる。次に、温度が重要な物理量である星間ガスや銀河間ガスの話題を取り上げ、私たちが高温ガスに取り巻かれていることを示す。最後に、温度に関わる宇宙論の最近の私の研究にふれる。

2. 天体の温度

この宇宙には、地球のような惑星、太陽のような恒星、恒星が1000億個も集合した銀河、そして銀河が1000個集まつた銀河団という構造があり、それぞれ特徴的な質量や密度を持っている。これらの天体の平均密度は、惑星や恒星の $1\text{g}/\text{cm}^3$ から（中性子星や白色矮星のような例外的な高密度星もあるが）、宇宙全体の平均密度の $10^{-30}\text{g}/\text{cm}^3$ まで30桁にわたっていて、密度 ρ と天体のサイズ R の間に

$$\rho \propto R^{-2} \quad (1)$$

という関係が近似的に成立している。一方、原子でできた地上の通常の物質は、サイズに関わらず平均密度が（1—10） g/cm^3 である。通常の物質は原子が電磁力で横並びに結合されているのに対し、天体は重力（万有引力）で縦並び（入れ子構造、またはフラクタル構造）に結合されていることが、この差の原因である。力が、物質構造を決めているのだ。

それでは、温度はどうだろうか。温度は、物質を構成する基本単位となっている物質のランダムな熱運動の大きさの目安だから、物質間に働く力とは関係しない。しかし、重力平衡にある天体の温度 T は、その質量 M とサイズ R によって

$$kT = GMm/R \quad (2)$$

とユニークに決まっている。 k はボルツマン定数、 G は重力定数であり、 m は天体を構成する基本物質の質量である。重力が常に引力であり、物質を中心に集めようとするのに対して、圧力勾配でそれに抵抗して平衡状態が成り立っているから、温度がユニークに決まってしまうのだ。

ただ、注意しなければならないのは、圧力勾配を作り出すのが必ずしも基本物質の熱運動に限らないことである。地球の場合は、原子でできた固体や液体の自由電子の縮退圧であり、(2)はそのフェルミ・エネルギーの大きさの目安と言える。この縮退圧で支えられる質量の上限がほぼ木星くらいで、木星より重い星は支えきれずに収縮し、中心で核反応が起こって輝く恒星になる。また、白色矮星は物質がプ

ラズマになった自由電子の縮退圧、中性子星は中性子の縮退圧で支えられており、各々それらのフェルミ・エネルギーの大きさを表している。だから、実際に電子や中性子が持つ熱エネルギーと比べて、フェルミ・エネルギーが圧倒的に大きいと、たとえ温度が高くても低温の星ということになる。例えば、中性子星のフェルミ・エネルギーは10MeV（温度に換算すると 10^{11} K）以上にもなるから、温度が100万度でも極低温の星と言える。中性子星物質の超流動が議論されるゆえんである。

一方、銀河は星が基本単位である。回転する銀河の場合、温度という概念より、星が回転運動する速度 v が

$$v^2 = (kT/m) = GM/R \quad (3)$$

と決まっていると考えればよい。星は回転運動の他にランダムな運動成分を持っており、その速度は回転速度の10分の1くらいである。これが星の温度に対応するから、回転する銀河は低温度銀河と言えそうだ。回転する銀河は、角運動量を持っているため、収縮するにつれ速く回転するようになり、遠心力で支えられるから十分温度が上がらなかった銀河なのである。他方、橢円銀河と呼ばれるフットボールやレンズ形状の銀河は、ほとんど回転していらずランダム運動のみで支えられており、その速度分散が(3)で与えられる。従って、橢円銀河は高温度銀河なのである。橢円銀河は、角運動量を持たないから、重力収縮して温度が上がったと考えればよい。

ところで、天体の質量は $M \sim R^3 \rho$ だから、(1)の関係を利用すると

$$v^2 \sim kT/m \sim \text{一定} \quad (4)$$

という関係が得られる。プラズマが固まった恒星と星が集合した銀河という、まったく組成も構造も異なった天体なのに、(4)の関係がユニバーサルに決まっているのである。一般には、等エネルギー（＝等温）状態が平衡系を特徴付けるが、重力系では質量毎に密度が異なるのである。この関係式がなぜ成立するのか、まだよくわかっていないが、重力平衡系の重要な特徴であると思われる。

3. 星間ガスと銀河間ガス

星や銀河のような物質の固まりでなく、銀河系内の空間や宇宙空間に一様に広がるガスの話題に移ろう。

(星間ガス)

銀河系内には1000億個の星が分布しているが、星が占める体積の割合は全体の 10^{-24} にしか過ぎず、ほとんど空白と言える。（原子に占める原子核の体積の割合が 10^{-15} であることを思い出すと、銀河がいかにスカスカなのかがわかるだろう。）この星間空間は完全な真空なのではなく、うっすらとガスが漂っている。それを星間ガスと呼んでいる。星間ガスの組成は、時代の観測能力と共に、非常に多様であることがわかつってきた。まず、始めは可視光でしか観測できなかったから温度が数千度のガスしか知られていなかったが、やがて電波（マイクロ波）観測から水素原子（1950年代）、波長の短い電波観測から分子（1960年代）が検出された。さらに1970年代に入って、人工衛星を使ったX線や紫外線観測から、温度が10万度を越える高温ガスが発見された。このように、新たな波長で見ると、新たな星間ガスの相が発見されてきたのだ。その度に理論家は、モデルを変更しなければならなかつた。

星間ガスの平均密度は1個/cm³で（実験室の真空と比べると、より完全な真空だが）、濃淡はある。

濃い部分は星間雲と呼ばれ、水素原子（H I）が主成分のH I雲と水素が分子（H₂）となっている分子雲が知られている。前者の温度は100K、後者は10Kと、低温の世界である。この分子雲から星が生まれていることがわかっている。一方、密度の低いガスが、数千度以上100万度の範囲で大きく広がって分布しており、さまざまな履歴があることを示唆しているようだ。

問題は、これら星間ガスが全体としてどのような状態にあるかである。かつては全体として圧力平衡にあると予想されていたが、最近はイメージが変わってきた。星間ガスは、星の爆発によって激しく加熱され、徐々に輻射冷却によって温度が下がってゆくから、いろいろな温度の相をほぼ圧力一定の状態で経験していると想像されていたのだ。ところが、星は星団として集団で生まれるから、星の爆発も集中して起こる（星の寿命の差があるだけ、爆発時刻は少しずれるが）。その結果、周りの星間ガスは非常な高温に加熱され、銀河から逃げ出そうと大きく広がる。しかし、やがて輻射冷却で冷え、重くなつて銀河へ戻ってくる。このようなガスの銀河内での大循環を、私は「煙突モデル」として提案した。

[1] 公害問題のアナロジーである。

星が次々と爆発する場所は、いわば工場のボイラーを沸かす部分。ここで高温になったガスには、星の爆発時に作られた重元素（ウランやプルトニウムなど）が多く含まれ、原爆のキノコ雲のような形で銀河上空へ昇ってゆく。これは、煙突から排出される窒素やイオウの酸化物を多く含まれるガスに似ている。やがて、銀河上空でガスは冷え、密度が上がって雲になり、やがて銀河へ落下して戻ってくる。さしつけめ、酸性雨が降るのに似ている。地上で起きているのと似たガスや水の循環が、銀河でも星間ガスの1億年をかけた3千光年もの大きさの循環運動が生じているのである。この煙突モデルは、星間ガスが静かに相変化しているのではなく、ダイナミックに大運動をしつつ相変化をしていることを示している。

（銀河間ガス）

さらに大きな宇宙空間に話を広げよう。この宇宙では、物質のほとんどは銀河という固まりになって宇宙空間に分布している。そのため、銀河宇宙と呼ばれている。さて、この銀河と銀河の間の空間には何が存在するのだろう。すべての物質が銀河に取り込まれてしまったとは考えにくいから、やはり銀河間ガスが漂っていると考えられてきた。しかし、この30年、いろいろな波長で観測したが、まったく銀河間ガスが存在する徵候が見つかなかった。そこで、銀河間ガスは非常に希薄で、ほとんど完全電離している（温度が1万度以上）のだろうと考えられてきた。透明人間が見えないのは、体から光を発することも、光を吸収することもないためで、そのためには密度が低く、かつ後ろからの光を遮らないためには原子であってはいけない。（原子は光を吸収するので、吸収線で検出される。）だから、透明人間は不可能なのだが、広がったガスなら影も形も見えないということが可能なのだ。

しかし、昨年（1994年）、ようやく銀河間ガスの影らしきものが見つかった。[2]（まだ1例しかないので、確定したとは言い難いが。）銀河間ガスは水素とヘリウムから成り立っている。それより重い元素は星内部の核融合反応によって作られ、ほぼ銀河内部に閉じ込められていると考えられるからである。これまでの銀河間ガスの探査は、水素原子による放射輝線か吸収線（背後の銀河やクエーサーの光を調べる）で行われてきたが、すべて上限値しか得られなかった。現在、私たちの上空600kmくらいを望遠鏡が人工衛星となって飛んでいる。大気外からの観測なので、紫外線領域でも光がやってくる。こ

れにより、ヘリウムの原子（HeI）、一回電離したイオン（HeII）の観測が可能になった。その結果、HeIIによる吸収が検出されたのだ。これが実際銀河間ガスによる吸収とすると、温度は 3×10^4 K程度と予想できる。さて、どのような過程によって銀河間ガスがこのような高温度に加熱されたのだろうか。

4. 宇宙の歴史

ビッグバン宇宙論によれば、宇宙の時刻が30万年のころ温度は3000K以下となり、物質（水素とヘリウム）は中性の原子となり輻射との相互作用が切れた。このとき自由になった輻射は、その後断熱膨張を続け、現在「3 K輻射」と呼ばれる宇宙背景輻射（厳密には、2.74Kである）として検出されている。〔3〕この輻射の発見（1965年）によってビッグバン宇宙論が確立した。この輻射は黒体スペクトルをしており、波長が1mから1mmくらいまでの電波で観測される。（現在では、眼で見ることができる。テレビ放映が終わった後、プラウン管をチカチカさせている雑音電波の一部は宇宙背景輻射だから。）

一方、原子は重力で結合して銀河となった。銀河に成りそこねたガスが、銀河間ガスとして宇宙空間に漂っている。もし、銀河間ガスも断熱膨張してきたなら、温度は1mKにまで下がっているはずである。しかし、観測されている温度は 3×10^4 Kである。なんらかの物理作用で銀河間ガスが加熱されたのだ。

銀河が生まれる際には巨大な重力エネルギーが解放されるから、その際に加熱されたのだろうと考えるのが最も素直な解釈だが、これでは 10^4 K以上には加熱できないことがわかっている。銀河には星間ガスがあり、これが紫外線を吸収してしまうので可視光しか外に洩れ出ない。可視光では、銀河間ガスの温度が上がらないからである。

そこで考えうる加熱源は、銀河の大爆発のような運動エネルギーの放出か、紫外線やX線を強く放射する変わった天体である。前者については、3K輻射が強い制限を与えててしまう。高エネルギーの電子が存在すると、3K輻射の光子とぶつかって（逆コンプトン散乱）黒体スペクトルを歪ませてしまうからである。現在、3K輻射は、 10^{-5} の精度まで黒体分布であることが観測から抑えられている。〔4〕3K輻射を歪ませずに銀河間ガスだけを加熱するには、物質の運動エネルギーでは困難なのである。結局、高エネルギーの輻射に頼らざるを得ないことになる。

その第1候補はクエーサーである。クエーサーは、中心に太陽の100万倍以上の質量を持つ巨大ブラックホールが存在している銀河らしき天体である。不思議なことに、クエーサーは宇宙の若い（20億年）頃（従って、遠く）に大量に存在していたが、近傍にはまったく見つかっていない。銀河の100倍ものエネルギーを紫外線やX線で放射しているが、その大きさは太陽系くらいしかない。この奇妙な天体であるクエーサーこそが、銀河間ガスを加熱イオン化したに違いない。

そこで、クエーサーからの紫外線を重ね合わせて紫外線背景輻射量を計算し、銀河間ガスをイオン化して必要なHeIIを作り得るかを調べた。この紫外線は、他の証拠から見つかっている銀河間に漂う雲や若い銀河をもイオン化していると考えられ、それらの観測結果とも整合しなければならない。実は現在のところ、クエーサーからの重ね合わせでは、全体を無矛盾に説明し得る背景紫外線輻射とならない。観測結果の解釈が間違っているのか、まだ知らない物理過程があるのか、今後問題点を詰めてゆかねばならないが、宇宙論が、意外にも観測の制約が多い実証科学になっていることがおわかりだと思う。

今後、大望遠鏡や専用望遠鏡を使っての宇宙の詳細観測が進むだろう。それによって、宇宙がひと続きの織物のように、天体が互いに関係し合って複雑な現象を呈していることが明らかにされてゆくだろう。

参考文献

- [1] C.A.Norman and S.Ikeuchi
The Global Multiphase Structure of Interstellar Medium
Astrophysical Journal **345**,372 (1989).
- [2] P.Jacobsen et al
Detection of Intergalactic Ionized Helium Absorption in a High Redshift Quasar
Nature **370**,35 (1994).
- [3] J.Mather et al
A Preliminary Measurement of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the
COBE Satellite
Astrophysical Journal **354**,L37 (1990).
- [4] G.Smoot et al
Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First Year Map
Astrophysical Journal **396**,L1 (1992).