

見つからない物質を大追跡

Hot pursuit of missing matter

J. Michael Shull

天文学者たちは、宇宙に「普通に」存在する物質の総量を求めるにはどんな苦労も惜しまない。最新の計画では、灯台のように X 線を放出するキューサーを用いて、銀河間空間に存在する温かいガスが探査された。

Nature Vol.433(465-466)/3 February 2005

宇宙論的な測定が可能に、そしてより精密になり、天文学者たちは宇宙のあらゆる形態の物質とエネルギーを網羅する、「宇宙目録」作成に着手している。自然はとてつもない賢く、いろいろな天体（恒星や惑星、銀河）中や、 10^4 K ~ 10^7 K の温度の銀河間ガス、さらにはいわゆるダークマターやダークエネルギーといったよりエキゾチックな形態で、物質を隠している。だが、最近の目録^{1,2}からすると、通常の物質の少なくとも 40% がまだ見つからない。それが今回、Nicastro らによると、チャンドラ X 線望遠鏡に搭載された分光器を使って、温度約 100 万ケルビンのガスに隠れて銀河間空間の膨大な体積全体に広がる、未検出だった物質を見つけたという（原著論文は、*Nature* 2月3日号を参照のこと）³。

標準宇宙モデルによると、宇宙は主にダークマター（25%）とダークエネルギー（70%）からなり、これに加えて、まばらに散らばった少量（5%）の「バリオン」と呼ばれる通常の物質がある。素粒子物理学者にとって、「バリオン」はクォーク 3 つからなる素粒子（陽子、中性子など）の総称だ。天文学者はより単純に、バリオンを、惑星、恒星と銀河、宇宙空間のガスを構成する通常の物質（水素、ヘリウム、そしてより重い元素）だと定義する。幸いなことに、物質の全量を求めるには名案がある。ビッグバンで形成された軽い元素についての研究⁴と宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎについての研究⁵から、宇宙にある全バリオン密度の精密な値が得られ、質量・エネルギーの全密度の $4.6 \pm 0.2\%$ となっている。

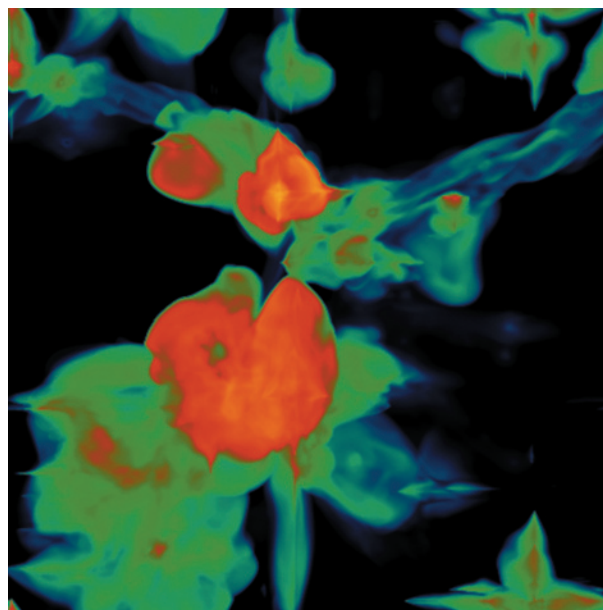


図1 もう少しで見つかる？

銀河から流れ出したガスの風は重力崩壊と合わさって、これらの数値流体力学シミュレーションによって示されるように、温度の高い銀河間物質の分布にめざましい影響を及ぼす。この「実」像の幅は約 5 千万光年である。紫外線観測⁷と X 線観測³によって、銀河をとりまく 10^5 K ~ 10^6 K の高温ガス（赤い領域）と銀河系と銀河系をとりまく銀河の近傍部分に対応する赤方変位 $Z=0$ の位置にある銀河間高温物質（WHIM）フィラメントが今回発見されたかもしれない。最も暗い領域の温度は 10^3 K で、緑の領域の温度は 10^4 K から 10^5 K である。（画像提供：R. Cen & K. Nagamine）

私たちが探している物質量がどれだけなのかは分かっているのに、既知の形態ではこのようなバリオン物質の一部しか捉えられないとはやっかいな話である^{1,2}。意外にも、光を発する通常の物質（恒星と銀河）は全バリオ

ンの10%以下にしかならない。残りはバリオン的ダークマターに属しているか、あるいはおそらく、観測の困難な何らかの形態で隠れているにちがいない。

紫外線とX線の分光測定では、見つかっていないバリオンが、いまだに銀河に合体していない銀河間物質(IGM)全体に分布している、密度の低いガス中に存在する可能性が見えてくる。このIGMの平均密度は、銀河内の星間ガスの100万分の1~1,000万分の1と極めて低いが、銀河間空間は途方もなく大きな貯蔵庫である。近傍宇宙の観測によると、バリオンうちの5~10%だけが合体して銀河や銀河集団になっている。さらに40%の存在は、冷たい水素の吸収線⁶とO VI(5回イオン化した酸素)の紫外吸収線に発見されたずっと高い温度のガス⁷から推測される。このような核種はIGMの微量成分だが、宇宙物理学の補正によってこれに付随する電離水素の総量を把握できる。

にもかかわらず、バリオン物質の40~45%はまだ見つかっていないので、銀河間ガス(H IおよびO VI)の貯蔵庫では謎が解けたことにならない。宇宙論的シミュレーション^{8,9}では、重力によってIGMの大規模な温度構造が作られることから、見つかっていない物質の隠れ場所がさらに他にあることが示唆される。このモデルは、重力崩壊と超新星爆発によって引き起こされた銀河からのガスの流出によって、衝撃加熱された約 10^6 Kのガスにバリオンの30~40%が存在すると予測している(図1)。このような高温では、低密度のガスは可視光の波長ではほとんど見えない。しかし、酸素、窒素、ネオンといった重い元素は束縛電子をまだ少し持っている。このようなイオンは紫外領域の吸収線(O VI)あるいはX線領域の吸収線(O VIIとO VIII)によって検出できる。

チャンドラX線望遠鏡とXMM-NewtonX線望遠鏡は、「銀河間高温物質(warm-hot intergalactic medium)」あるいはWHIMとして知られる⁸、銀河間ガスの最も温度の高い部分を探る機会を与えてくれる。Nicastroらは、WHIMを通して輝く「X線灯台」を見つける巧みな実験法を考え出した³。というのは、彼らは単に、活動銀河核が異常に明るい状態になるのを待ったのだ。とりわけ明るくて変光する活動銀河であるマルカリアン421が2度きらめいた。チャンドラの低エネルギー透過型回折格子分光計で20万秒の間に、この2回のきらめきを観測したのである。この間に観測された温度の高い銀河間ガスの精緻なスペクトルの中に、期待されていた高度にイオン化した酸素と窒素の吸収線が見つかった。赤方変位係数 $Z = 0.011$ と $Z = 0.027$ に対して通常のハッブル膨張則を仮定すれば1億5千万光年と3億8千万光年の距離にある、2つの遠く離れた吸収線系に特に関心が向けられた。

この2つのO VII吸収線系は、予測されていた 10^6 K

の高温ガス(WHIM)フィラメントに関する興味深い証拠を示している。短い経路に沿った2つの吸収体だけでは、この領域が全宇宙で考えて典型的なのか否かが分りにくい。統計的不確定性は大きい、酸素の存在量が太陽中の10%と同程度であると仮定すれば、この温度の高いIGMには見つかっていないバリオンのうち残りの30~50%が含まれていると著者らは推定している。これはIGMに対する標準的な仮定だが、IGM中の重元素存在量について、さらに研究を重ねて検証する必要がある。

次は何を探索すべきなのだろうか。まず、マルカリアン421はIGMの典型的とはいえない領域を調べている可能性がある、銀河間の別の視線に沿ったX線観測を行うのは有益だと思われる。残念ながら、他のほとんどのキューサーはこのような品質の高いデータを得られるほど十分に明るくない。天文学者たちは遠紫外分光探査機(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer; FUSE)を用いて、O VI吸収線($10^{5.5}$ Kガス)に関する40以上の視線の探査を行い、かなりの成功を収めてきた。しかし、現状のX線望遠鏡や紫外線望遠鏡ではバリオンの目録を正確に完成するには集光力が足りない。

このような課題には、X線分光用のNASAのConstellation-X計画¹⁰やヨーロッパ宇宙機関(ESA)のXEU計画を含む、新世代のより大きな宇宙望遠鏡が待たれる。また、ハッブル宇宙望遠鏡の分光能力に取って代わろうという、大型の紫外線光学宇宙望遠鏡が計画段階にある。新しい紫外線望遠鏡とX線望遠鏡は見つからないバリオンの目録を完成させるために必要である。これらの望遠鏡ではさらに多くのこと、つまり、最初の銀河と恒星が形成された、フィラメント状の銀河間物質からなる宇宙の「蜘蛛の巣」状態を精密に描くことも可能になるだろう。 ■

コロラド大学(米)、J.Michael Shull

1. Fukugita, M. & Peebles, P. J. E. *Astrophys. J.* **616**, 643–668 (2004).
2. Shull, J. M. in *The IGM/Galaxy Connection* (eds Rosenberg, J. L. & Putman, M. E.) Vol. 281, 1–10 (Kluwer, Dordrecht, 2003).
3. Nicastro, F. *et al. Nature* **433**, 495–498 (2005).
4. Kirkman, D., Tytler, D., Suzuki, N., O'Meara, J. M. & Lubin, D. *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 1–28 (2003).
5. Spergel, D. N. *et al. Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175–194 (2003).
6. Penton, S.V., Stocke, J. T. & Shull, J. M. *Astrophys. J. Suppl.* **152**, 29–62 (2004).
7. Savage, B. D., Sembach, K. R., Tripp, T. M. & Richter, P. *Astrophys. J.* **564**, 631–649 (2002).
8. Cen, R. & Ostriker, J. P. *Astrophys. J.* **514**, 1–6 (1999).
9. Dav, R. *et al. Astrophys. J.* **552**, 473–483 (2001).
10. NASA, Constellation-X Observatory website <http://constellation.gsfc.nasa.gov>
11. Space Ultraviolet Observatory *Tracing the Cosmic Web* <http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9907101>