

# 宇宙元素合成の謎に迫るハッブル宇宙望遠鏡

家 正 則 〈国立天文台 181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉



宇宙望遠鏡が打ちあげられたのは1990年4月のことであった。主鏡の研磨ミスのため大きな球面収差が生じ、残念なことにハッブル望遠鏡の空間解像力は期待された性能を実現していない。だが、光量さえ確保できれば、紫外線域での高分散分光観測については、地上からでは不可能な観測ができる。ピンボケで光を集めるのであるから、光をかなり損することになる。しかし明るい星をねらった紫外線分光観測は、このような状況でも充分に成果をあげることができる。ハッブル望遠鏡の運用チームは、初めの予定を大幅に変更して、紫外線分光観測を重点的に行ってきました。ハッブル望遠鏡による宇宙元素合成関連の最新成果を追ってみよう。

## 重水素量の測定

元素合成の標準モデルでは、重水素(D)は宇宙初期に強い力による反応で陽子(p)と中性子(n)から合成され、一旦陽子の1%程度まで個数密度が上がった後に、大半はヘリウム(<sup>4</sup>He)合成に消費されて、1万分の1程度の重水素がほぼ現在までそのまま残されると考えられている。

コロラド大学のジェフリー・リンスキ (Jeffrey Linsky<sup>1)</sup>) たちは、44光年の距離にある0等星カペラのライマンα輝

線スペクトル中に見られる星間吸収線スペクトルをハッブル宇宙望遠鏡により測定して(図1)。水素原子の100万分の16相当の重水素原子の存在を確認した。星の中心核で重水素が徐々に壊されて行くので、宇宙初期の重水素量は、実際にはこの3倍程度であったとリンスキは見積っている。これまで様々な方法で重水素量を決めようと努力がされてきたが、推定値には大きな誤差がつきものであった。

今回の重水素量測定値は推定誤差10%程度であり、これまで最も信頼できるものである。重水素/水素比はパリオン密度に依存する量なので、この観測から逆にパリオン密度を推定することができる。今回の観測値は、宇宙を閉じさせるのに必要な臨界密度の約10%程度しかパリオン密度が無いことを示唆している。もし、そなれば非パリオン物質が大量に宇宙を満たしていないかぎり、宇宙は永遠に膨張し続けることになる。

## ホウ素の発見

古い星はおもに水素とヘリウムからなり、わずかに第3元素のリチウム(<sup>7</sup>Li)を含んでいることが知られているが、第4元素のベリリウム(<sup>9</sup>Be)や第5元素のホウ素(<sup>11</sup>B)は極めて微量しか含まれていないと考えられてきた。このことはビッグバン理論の予言どおりで、ビッグバン理論の正しさを証明する観測事実の一つとされてきた。第6元素の炭素(<sup>12</sup>C)以下の重元素は、ビッグバンのずっと後で生まれた恒星の内部での核融合反応で合成される。これが、今までの元素合成のシナリオであった。

宇宙望遠鏡科学研究所のダンカン (Douglas Duncan) とテキサス大学のレムケ (Michael Lemke), ラムバート (David Lambert) は、ハッブル宇宙望遠鏡の高分散分光器を用いて、ハロー種族の三つのわい星について波長2,497Å近傍の紫外線領域にある中性ホウ素原子(<sup>11</sup>B)の共鳴線のスペクトルを、波長分解能25,000で測定した (Duncan<sup>2)</sup>)。観測した星は HD 140283, 19445, 20891 の三つで、金属量の指標となる鉄/水素原子組成比は太陽の鉄/水素組成比に比べてそれぞれ0.2%, 0.8%, 4.0%である。HD 140283は、太陽系からわずか100光年の近距離にあるが、銀河系の初代の天体が生まれた外部ハロー領域からやってきた星であることが、その運動からわかっている。ホウ素原子の2重線のうちの著しいほうの吸収線は強い鉄の吸収線と重なっ

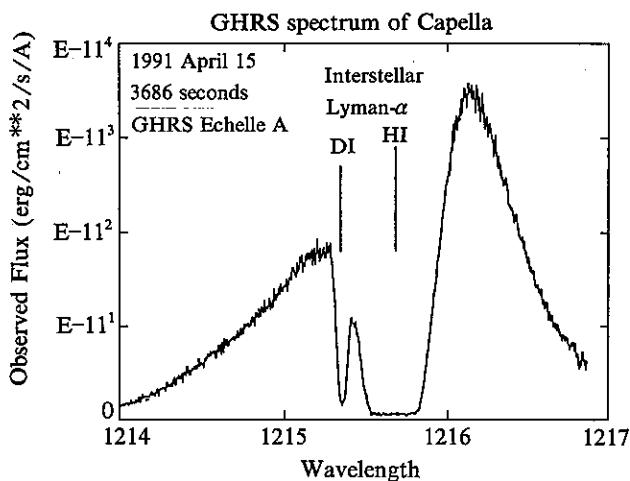


図1 星間空間の水素原子による幅の広いライマンα吸収線と重水素原子による幅の狭いライマンα吸収線とがカペラのライマンα輝線中に見られる。(J. Linsky: Space Telescope Sci. Inst. Newslett. 9 (1992) No. 1, 1より転載。)

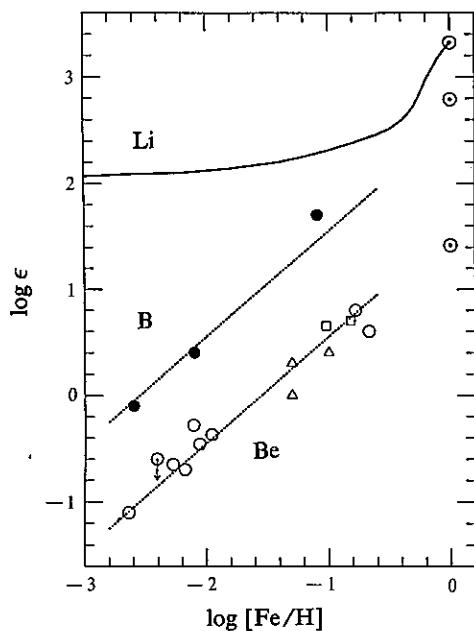


図2 ハロー種族のわい星について測定された Li, Be, B の組成比と Fe の組成比。縦軸は  $\log \epsilon (H) = 12$  で規格化、横軸は太陽の Fe 組成比で規格化されている。黒丸が B に対する今回の結果。中塗りの二重丸印は隕石からもとめた太陽系天体での値。破線は  $B/Be = 10$  に相当。(D. K. Duncan 氏のご好意による。)

る可能性を考慮すると、測定値はホウ素原子に対する上限値と見なすべきであろう。従って、観測されたホウ素/ベリリウム比を破碎過程のみで説明できるかどうか微妙なところである。

宇宙創世後20マイクロ秒から1秒の時代に起きたクォーク/ハドロン相転移に起因する密度ゆらぎが、軽元素合成過程に影響を及ぼした可能性が示唆されている。オハイオ州立大学のボイド(Boyd)と東京都立大学の梶野<sup>4)</sup>は非一様性のために宇宙初期にベリリウムが大量に生成され、ホウ素/ベリリウム比が0.1程度になった可能性を指摘した。非一様性モデルの場合、合成される軽元素量の推算は密度ゆらぎのスペクトルなどにも強く依存していて、計算された<sup>7</sup>Be量は著者によりまちまちであった。一方、理化学研究所の寺沢と東京大学の佐藤<sup>5)</sup>は、多層モデルを用いて中性子の拡散過程を考慮すると、軽元素生成量が観測と矛盾しない範囲では、非一様性があってもベリリウム生成量は一様な元素合成の場合と大差ないと結論している。だとすると、ホウ素/ベリリウム比は非一様性の有無にはあまり依らないことになる(寺沢<sup>6)</sup>)。このあたりの事情については本誌須藤の稿を参照されたい。

いずれにせよ、今回のホウ素量の測定値を、非一様モデルの証拠とみなすことはできないようである。

#### 参考文献

- 1) J. Linsky: Space Telescope Sci. Inst. Newslett. 9, No. 1 (1992).
- 2) D. Duncan: preprint (1992).
- 3) G. Gilmore, et al.: Astrophys. J. 378 (1991) 17.
- 4) R. N. Boyd and T. Kajino: Astrophys. J. 336 (1989) L55.
- 5) N. Terasawa and K. Sato: Astrophys. J. 362 (1990) L47.
- 6) 寺沢信雄: 私信 (1992).

非会員著者の紹介: 家正則氏は1949年札幌生まれ、1972年東大理学部卒、1977年同大学院博課程修了。東大理学部助手、東大東京天文台助手、同助教授を経て、現在、国立天文台助教授。専門は銀河物理学。

ているため分離できないが、弱いほうの吸収線が三つの星すべてについて測定できた(図2)。

吸収線の強さから恒星の表面大気によるホウ素原子の吸収をモデル計算すると、ホウ素/水素存在比はそれぞれ、一兆分の0.6, 2.5, 32程度と見積ることができる。HD 140283については最近、Gilmore<sup>3)</sup>が英豪天文台3.9 m望遠鏡の観測で、ベリリウム量として水素の一兆分の約0.16程度という値を得ている。この観測データを合わせて再解析すると、この星についてはホウ素/ベリリウム比が10程度となる。

ベリリウムとホウ素の発見、特にホウ素の発見は重要な意味を持っている。ホウ素の存在は、初期宇宙での宇宙線による軽元素の破碎過程で説明できる可能性がある。だが、観測された存在比は、宇宙線による星間ガス中での破碎反応から期待される存在比の理論上の下限値10とほぼ一致する。この下限値は宇宙線が高エネルギー成分のみに限られる場合に得られる値である。もし、今日の太陽近傍で観測されるように、低エネルギー陽子成分が混ざっていればホウ素/ベリリウム比は15–40程度になるはずである。測定した吸収線にホウ素以外の原子による吸収線が混ざっている