

B型星の酸素とネオンの化学組成

竹田洋一(国立天文台三鷹)、神戸栄治(国立天文台岡山)、定金晃三(大阪教育大)、増田盛治(あすたむらんど徳島子ども科学館)

1. 本研究の背景と目的

1-1. 同じラインを用いた太陽とB型星の相対酸素組成解析

最近の恒星分光学における大きな問題の一つが、「つい最近のガスから誕生したはずのB型星などのCNO組成が五十億年前のガスから生まれた太陽の表面CNO組成よりも平均的に0.3dex程度も明らかに小さく出ており銀河ガスの化学進化の観点から元素組成は時間がつたにつれて増大するのが当然なのにまるで逆だ！」という矛盾である(図1: Nissen 1993, ASPC, 40, 108のレビューより)。とりわけ酸素は重要であるが、従来の仕事は高温星では太陽では全く見えないスペクトル線(OIIなど)から絶対組成を決めて単に太陽の公称の絶対組成と比べていただけなので正確な差の議論が出来ないことが大きな問題であった。この点「太陽もB型星も全く同じラインを用いての酸素の組成解析」をしてやると遷移確率の誤差も効いてこないで正確な組成差が得られる。この目的にうってつけのラインはOI 6155-8Å(3p 5P - 4d 5D; multiplet 10)の線である。つまりこの中性の高励起線は、太陽のような低温晩期型星では(中性水素衝突等の不確定要素に左右される)non-LTE効果が全く無視できるし3D効果も重要でないから、早期型星のnon-LTE効果(電子衝突のみなので状況はわりと単純)のみをきちんと考慮するだけでいいからである。そこで本研究の第一の目的はB3-B9の早中期〜晩期のB主系列星の酸素組成をこのOI 6155-8Å線からnon-LTE解析で決定し、それを同じ線から決定した太陽酸素組成と比較して差の有無を定量的に議論することである。言い換えれば本当にあるのか? もしそうならどの程度なのか?

1-2. B型星のネオン組成決定

実はこの矛盾を解決したと主張するグループが最近出ており、それは実に基準の原点の変更を示唆している。つまり「太陽のCNO組成はよりリアルスティックな3D動的非均一大気を用いると有意な下方修正を要し、従来思われていた値よりも実際は0.2-0.3dex低い値を採用すべきだ(Asplund et al. 2004, A&A, 417, 761)」というわけである(酸素の場合は8.9から8.6-8.7に)。この主張の妥当性は別として、もし仮にこの改訂が真だった場合に非常に迷惑を被るのが太陽物理学者である。つまり重元素比の $Z=0.019 \rightarrow Z=0.015$ の変化は日震学に大きな影響を及ぼし、これまでうまく観測事実を説明していた太陽内部構造標準モデルの輝かしい成功が台無しになってしまうのである。ただ太陽CNOが下方修正されたとしても、もしネオンの組成が現在信じられている $\log \epsilon(\text{Ne}) \sim 8.0$ よりも大きくて ~ 8.3 程度もあれば $\epsilon(\text{Ne})/\epsilon(\text{O}) \sim 0.5$ の相殺効果でこの矛盾は解消されるとの逃げ道の指摘がなされた(Antia & Basu 2005, ApJ, 620, L129; Bahcall et al. 2005, ApJ, 631, 1281)。それで近傍太陽型星の活動領域X線スペクトルの解析から確かに予測通りのネオン高値との報告が当初いつの間にか(Drake & Testa 2005, Nature, 436, 525)。その後の太陽のX線スペクトルや極紫外域のスペクトルの追解析はいずれも従来通りの $\epsilon(\text{Ne})/\epsilon(\text{O}) \sim 0.1-0.2$ であってこのNeの上方修正には否定的な結果である(Schmelz et al. 2005, ApJ, 634, L197; Young 2005, A&A, 444, L45)。このように状況は現在混乱している。(太陽は他の太陽型星とは異なっているのか? どれかの解析に間違いがあるのか?) ここで重要になってくるのは現在の銀河ガスの組成を反映していると考えられるB型星である。このサンプルに対して酸素同様正確なネオン組成non-LTE解析で決定することで太陽の $\epsilon(\text{Ne})/\epsilon(\text{O})$ 比に対する情報も得られて問題の本質が見えてくよう。これが我々の第二の目的である。

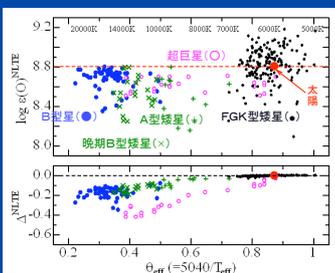
2. 観測・解析・結果

サンプルとして選んだのは比較的明るい($V \sim 5-6$ 等)B3からB9までの主系列星主体の進化した進んでいないB型星64個である。観測は2006年10月17-23日に岡山観測所188cm鏡+HIDES分光器を用いて、キョロスディスプレイバーを用いて5600-6800Åの領域のスペクトルを得た。スリット幅は標準の200 μm で分解能は $R \sim 70000$ であり、S/N $\sim 300-400$ 程度は達成されている。これらターゲットを理論HR図上にプロットしたのが図2であるが、3~9太陽質量の星であることがわかる。

大気のパラメータ(T_{eff} と $\log g$)はStrömgenのuvby色指数からuvbybetanewコード(Napiwowski et al. 1993, A&A, 268, 653; <http://www.astro.le.ac.uk/~rm38/uvbybeta.html>)を用いて決定した。解析のためのスペクトル領域は6140-6165Åに絞った。ここにはOI 6155-8の三重線並びにNe I 6143線(2p⁵ 3s-2p⁵ 3p)とNe I 6163線(2p⁵ 3s-2p⁵ 3p)が存在し、加えて温度によるC IIとFe IIの線も見える。解析はスペクトル合成フィッティングを行い、酸素、ネオン、炭素、鉄の元素の組成と自転速度をフリーパラメータとして最適なフィットが得られるという条件で決定した。微小乱流速度はこのあたりの進化した進んでいないB型星では典型的に10-50km/sの範囲内であることから一律3km/sを仮定した(42km/sの変化を調べたがランダム性が弱いので高々百分の数dex程度の変化である)。また酸素とネオンの二種の元素についてはnon-LTE効果を取り入れた。最終的なフィットの様子を図3に示す。また組成の解から逆に線等価幅を求めたnon-LTE補正や大気パラメータの摂動から組成の誤差をも見積もったが、それも図4(酸素 O I 6155-8)と図5(ネオン Ne I 6143)に図示してある。

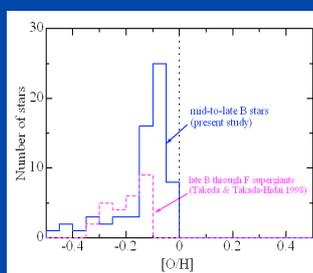
これらの図から、non-LTE補正を入れたと T_{eff} に関する傾向が除去されて概ね一様な組成が得られていると言えよう。ただしいくつかの星では(特に $T_{\text{eff}} \sim 15000\text{K}$ あたりの晩期B型星では)明らかに全体のトレンドから外れた酸素欠乏やネオン欠乏の化学特異性も見受けられることに注意されたい(逆にO過剰やNe過剰の星は見られない)。

図6



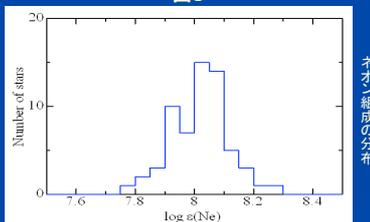
広い温度範囲にわたる $\log \epsilon^{6155-8}(\text{O})$ のふるまい
[我々がこれまでに得た結果の統合]

図7



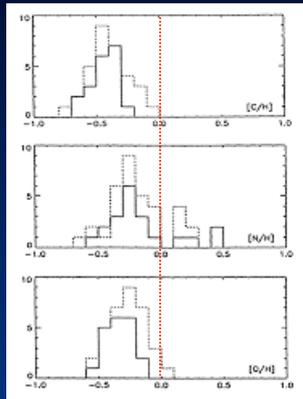
[O/H]の分布

図8



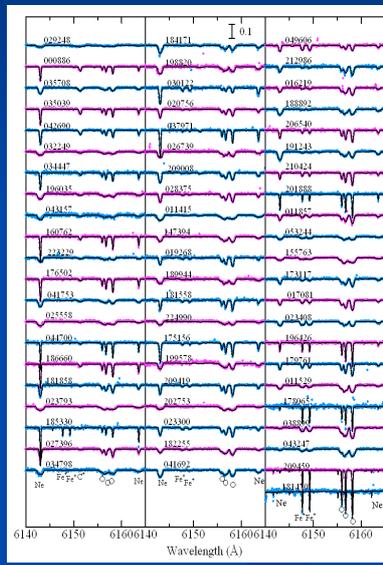
ネオン組成の分布

図1



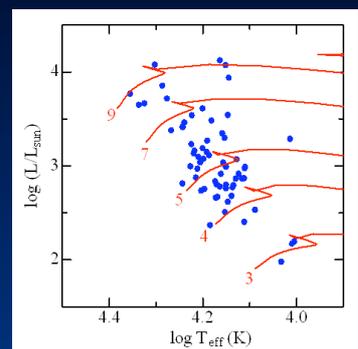
従来の早期B型CNO組成解析の結果
(Nissen 1993より引用)

図3



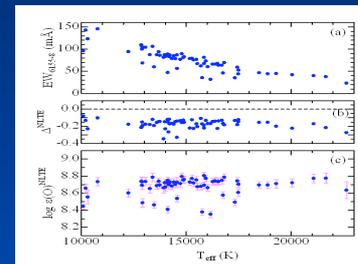
6140-6165Åフィッティング(黒線:理論、色丸:観測)数字はHD番号、 T_{eff} の降順に上→下、左列→右列

図2



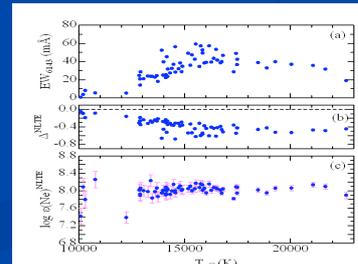
ターゲット星の進化の理論的進化の軌道

図4



酸素線の解析結果(6155-8線全等価幅、non-LTE補正、O組成)の T_{eff} に対するプロット

図5



ネオン線の解析結果(6143線等価幅、non-LTE補正、Ne組成)の T_{eff} に対するプロット

3. 考察

3.1 銀河ガスにおける酸素の太陽に対する相対組成

今回B型星について得られた酸素組成の結果を晩期B-F型超巨星(Takeda & Takada-Hidai 1998, PASJ, 50, 629)、晩期B-A型矮星(Takeda et al. 1999, PASJ, 51, 961)、太陽型F-G-K矮星(太陽を含む; Takeda & Honda 2005, PASJ, 57, 65)、のそれぞれの場合と一緒にして有効温度 T_{eff} に対して図6にプロットした。いずれも全く同じOI 6155-8線(同じ遷移確率を使用)から求めた組成である。太陽では $\log \epsilon(\text{O})_{\text{sun}} = 8.81$ であることに注意されたい。[O/H] ~ 0.13 (B型星)または 0.19 (超巨星)である。従って結論としては「銀河ガスの酸素組成は $0.1-0.2$ dex程度太陽値を下回る」ということになる。これは以前言われていた 0.3 dex程度の大きな差異は緩和されたが、言い換えは依然として残るといえる。

3.2 B型星のネオン組成

今回得られたB型星の $\log \epsilon(\text{Ne})$ の頻度分布を図8に示す。平均値は $\langle \log \epsilon(\text{Ne}) \rangle = 8.0$ であり、 $\langle \log \epsilon(\text{O}) \rangle = 8.7$ と合わせると $\epsilon(\text{Ne})/\epsilon(\text{O}) \sim 0.2$ となる。ネオンも酸素も大質量星で産まれて銀河ガスに放出される元素であるから、ここ五十億年で銀河ガス中の富裕はさして進んでいないと思われるので、太陽のNe/O比もほぼこれに軌を一にするものと考えても良からう。したがって(太陽のCNO組成の下方修正がもし仮に真だった場合に日震学の矛盾を解消するだけの) $\epsilon(\text{Ne})/\epsilon(\text{O}) \sim 0.5$ 程度の太陽高Ne/O比の可能性は明らかに否定される。

3.3 太陽CNO組成の下方修正について

Asplund一派の主張する「従来の太陽CNO組成の0.2dex程度の下方への改訂」は最近業界内部での認知度も上がってきているようで、これを標準値として比較の基準に用いる研究者も増えて来つつある。しかしこれはまだ十分な検証は受けていないので盲目的に信用するべきではないと我々は考える。特に日震学に大きな矛盾をもたらすという難題を抱えていることは忘れてはならない。

また「銀河ガスの組成 < 太陽組成」の逆転現象に対して「これはありえないことであるのでその間違った原因を探そう」という姿勢は思いこみによる偏見であって正しいとは言えないだろう。これが事実である可能性も視野に入れる柔軟な心を持つべきではなかろうか。むしろ我々はこの逆転の食い違いは実際に存在するものという見解を持っている。[たとえばB型星の組成解析からは subsolar metallicity が示唆される事実(Niemczura 2003, A&A, 404, 689)やG型巨星における上限[Fe/H]がより若い太陽型星の上限[Fe/H]より低くなっている事実(Takeda, Sato, Murata 2008, PASJ, 60, 781)に注意されたい。]