

太陽のヘリウム EUV 輝線の励起

神野 光 男*

太陽の EUV (極紫外) スペクトルの観測のためには、ロケットや人工衛星を使って地球大気の外に出なければならぬ。可視域のスペクトルとはちがって、EUV スペクトルは沢山の輝線の集まりである。多くは彩層 (1 万度) からコロナ (100 万度) にかけての遷移領域にある高階電離イオンが出す輝線である。一番強い輝線は水素の L_{α} 線である。つぎは電離ヘリウムの共鳴線 He II 304 Å である。中性ヘリウムの共鳴線 He I 584 Å もかなり強く輝いている。この 2 本のヘリウム輝線がどのような仕組みで光っているのか、いま世界の学界で大論争がくりひろげられている。

1. EUV 輝線の解析

太陽の輝線スペクトルといえば、皆既日食のとき観測される彩層のフラッシュ・スペクトルが思い出される。フラッシュ・スペクトルで最も強い輝線は水素の H_{α} 線である。太陽のリムで見たときの明るさは $1 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$ である。それに対して、EUV スペクトルで一番強い L_{α} 線でも $7 \times 10^4 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$ であり、 H_{α} 線の 1/10 以下の強さである。He II 304 Å は H_{α} 線の 1/100、He I 584 Å は 1/1000 の強さであるから、これらヘリウム輝線は彩層の H_{α} 線にくらべて微々たるものであると云うことが出来る。強い H_{α} 線の発光機構は問題にならなくて、このように弱い輝線が問題になるのはなぜだろうか。それはヘリウム輝線の波長が短いこと、すなわち励起エネルギーが大きいためである (He II 304 Å は 40.8 eV, He I 584 Å は 21.2 eV)。

太陽は 6000 K の高温のガス球である。非常に強い熱と光を放出している。彩層の水素原子はこの強い光をうけて励起され、 H_{α} 輝線を発光している。これを放射励起という。それでは、ヘリウムの EUV 輝線もこれと同じ方法で発光しているのだろうか。太陽の放射は紫外域になると急激に弱まる。たとえば、He I 584 Å の波長では可視域の 10 万分の 1 の強さである。これでは H_{α} 線の 1/1000 の He I 584 Å でも光らせることは出来ない。大体、励起エネルギー 15 eV 以上 (波長 830 Å 以下) の遷移には、光球からの放射励起は問題にならない。

ヘリウム輝線にかぎらず、太陽の EUV 輝線はすべて電子衝突、すなわち衝突励起によって光っていると信じられている。遷移領域という高温の大気中には、高速

でとびまわる自由電子が満ちあふれている。この自由電子がイオンと衝突して、イオンがもっている電子をエネルギーの高い準位につき上げる。この励起された電子がもとの準位にもどるとき、その励起エネルギーに相当した波長の光を出すという仕組みである。従って、EUV 輝線の強度 I は太陽大気中で起る衝突励起の数に比例する:

$$I_{\text{occ}} \int N_1 N_e C_{12}(T) dv \quad (1)$$

N_1 は下の準位にあるイオンの密度、 N_e は自由電子密度、 $C_{12}(T)$ は衝突励起の確率で、ある温度以上で急に大きくなる電子温度 T の関数である。図 1 の点線はヘリウム共鳴線の $C_{12}(T)$ を示している。右側の点線が He II 304 Å, 左側が He I 584 Å の値である。

この式はつぎのように書きかえることが出来る:

$$I_{\text{occ}} \int \frac{N_1}{N_{\text{ion}}} \frac{N_{\text{ion}}}{N_{\text{element}}} \frac{N_{\text{element}}}{N_{\text{H}}} \frac{N_{\text{H}}}{N_e} N_e^2 C_{12}(T) dv \quad (2)$$

N_{ion} はすべての準位にあるイオンの密度である。ほとんどのイオンはその基底準位にあるから、これは基底準位にあるイオン密度とほぼひとしい。観測される主な EUV 輝線はイオンの基底準位との遷移であるから $N_1 = N_{\text{ion}}$ とみなせる。大気中にはそのイオンと同じ元素であるが、電離回数のちがういろいろのイオンがある。すべての電離状態にあるイオンの密度が N_{element} である。た

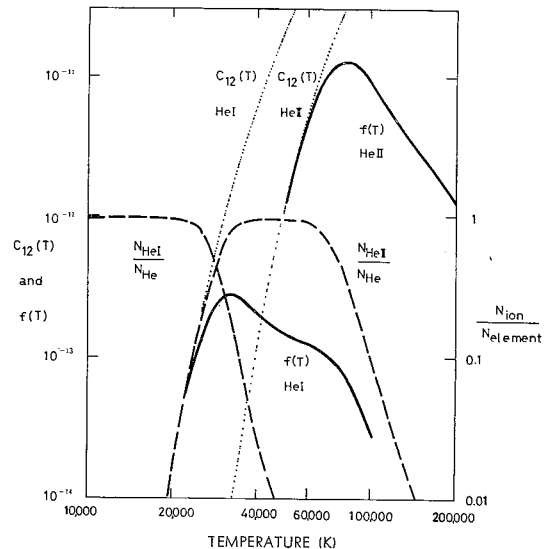


図 1 ヘリウム共鳴線の衝突励起

* 飛騨天文台 M. Kanno: Excitation of Helium Lines in the Solar EUV Spectrum

たとえば、ヘリウムは2回まで電離できるから、 $N_{\text{He}} = N_{\text{He I}} + N_{\text{He II}} + N_{\text{He III}}$ である。つまり、 $N_{\text{Ion}}/N_{\text{Element}}$ はそのイオンの電離度を表わす。前述のように、光球放射は 15 eV 以上の励起には無力であるので、EUV 輝線を出すイオンの電離も電子衝突によって起る（電離エネルギーは He I が 24.6 eV, He II が 54.4 eV）。この場合、 $N_{\text{Ion}}/N_{\text{Element}}$ は電子温度 T だけの関数となり、ある温度範囲でだけ 1 に近い値となる。ヘリウムのこの値が図 1 の破線で示してある。右側の破線が $N_{\text{He II}}/N_{\text{He}}$ 、左側が $N_{\text{He I}}/N_{\text{He}}$ の値である。たとえば、He II イオンは 20,000~150,000 K の温度範囲にだけ認められると云える。(2) 式の $N_{\text{Element}}/N_{\text{H}}$ は、輝線を出す元素の水素に対する相対存在度である。これは大気中どこでも一定であると仮定できる。また、自由電子はほとんど水素の電離によるものであるから、 $N_e \cong N_{\text{H}}$ とみなせる。結局、(2) 式は

$$I_{\text{oc}} A \int N_e^2 f(T) dv \quad (3)$$

となる。ここに、 $A = N_{\text{Element}}/N_{\text{H}}$ 、 $f(T) = C_{12}(T)N_{\text{Ion}}/N_{\text{Element}}$ である。

前述の事情から、 $f(T)$ はある温度範囲でだけ大きい値となる。図 1 の右上の実線が He II 304 Å の $f(T)$ 、左下の実線が He I 584 Å の $f(T)$ の値である。304 Å は 60,000~110,000 K, 584 Å は 25,000~50,000 K の温度範囲で主に発光していることがわかる。 $f(T)$ がこの温度範囲 (T_1, T_2) で一定であり、それ以外の温度では 0 であると仮定すれば

$$I_{\text{oc}} A \int_{v(T_1)}^{v(T_2)} N_e^2 dv \quad (4)$$

となる。一例として、Si と S のいろいろなイオンの輝線強度 I の観測値から、右辺の値を温度に対して図示し

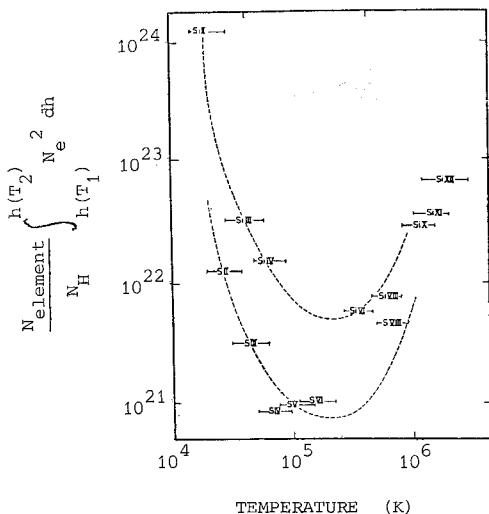


図 2 Si, S の EUV 輝線の解析

たのが図 2 である。Si と S の各点を通る曲線の形は非常によく似ている。ただ 2 つの曲線は上下方向にずれている。エミッション・メジャー (EM) とよばれる $\int_{v(T_1)}^{v(T_2)} N_e^2 dv$ は太陽大気構造によって決まる量であって、Si と S とでかわらないはずである。上下方向のずれは両元素の存在度 A のちがいを示していると云える。この図から、太陽大気中で Si は S のおよそ 3 倍多くふくまれていることがわかる。

各元素の存在度が決まれば、EM が温度の関数としてわかる。これは太陽の彩層コロナ遷移領域の大気構造（温度・密度分布）を知る重要な手掛りである。このような EUV 輝線の解析方法をあみ出したのはポタシュ (1963, 1964) である。今ではこれは定本となり、世界中の学者によって採用されている。

2. ジョーダンの新説

ヘリウム共鳴線の問題への火つけ役はジョーダン (1975) である。もともとこの問題はポタシュ (1964) の研究によって片付いていると思われていた。ポタシュはヘリウム以外の輝線の観測から得られた EM の値を使い、衝突励起の仮定でヘリウム EUV 輝線の強度の予想値を計算している。その結果は観測と良く一致している。

ところが、英国の女流天体物理学者ジョーダン嬢が 10 年後に同じ計算をやり直してみると、予想値は He II 304 Å で観測値の 1/5.5, He I 584 Å では 1/15 になることがわかった。何故こんなに小さい値になったのだろうか。原因の一端は、ヘリウムの存在度として現在の通説となっている $A_{\text{He}}=0.1$ のかわりに、ポタシュは $A_{\text{He}}=0.2$ と仮定していたことにある。もっと大きい原因は、10 年間の歳月による EUV スペクトルの観測精度の向上によって、また、遷移確率や衝突断面積など、より確実な理論値の採用によって EM の値がポタシュの時代より 3~10 倍小さくなったことである。

この予想値と観測値との大きい違いに悩んだ挙句、ジョーダンはヘリウム輝線の拡散型衝突励起という新説を唱えた。太陽大気、特に遷移領域は平衡状態にあるのではなくて、低温のヘリウムガスが高温の自由電子と混ざりあっていると云う考え方である。これは、図 1 の破線 $N_{\text{He I}}/N_{\text{He}}$, $N_{\text{He II}}/N_{\text{He}}$ が右の方へずれることにあたる。その結果、それと $C_{12}(T)$ との積である $f(T)$ はどんどん大きくなり、(3) 式から計算されるヘリウム輝線強度の予想値を観測と合わせることが出来る。

3. チリンの主張

ジョーダンの新説に早速クレームをつけたのはチリン (1975) である。拡散型衝突励起が本当だとすれば、ヘリウム輝線は強められるが、同時に水素の電離が進むので

パルマー輝線は弱まり、He/H の輝線強度比は彩層の高さとともに増加するはずである。しかし、日食のときの観測では、この強度比は高さとともに減少している。だから、ヘリウム共鳴線が予想以上に強いことを、拡散型衝突励起で説明しようとするのは無理である——これがゼリンの云い分である。

彼は、ヘリウム輝線は光電電離による励起によって発光しているのだと主張している。ヘリウムの電離は電子衝突によって起ることを前に述べた。この衝突電離のほかに、504 Å (24.6 eV) と 228 Å (54.4 eV) の電離限界波長より短波長の放射が十分に強ければ、この放射エネルギーの吸収によって He I → He II, He II → He III への電離が起る。これを光電電離という。光電電離したイオンは、やがて自由電子と再結合して He II → He I, He III → He II と元の状態にもどる。このとき自由電子の多くは He I, He II の上の方の準位に再結合し、だんだんと下の準位に遷移し、最後に基底準位へ落ちるとき 584 Å と 304 Å の輝線を発光する。

ヘリウムの光電電離には、勿論、光球からの放射は弱すぎて問題にならない。しかし、遷移領域の上にひろがっているコロナからの放射、特にコロナ輝線の放射は相当に強い。これらは太陽から外界へ放射されているのと同じ量だけ遷移領域にもふりそいでいるはずである。228 Å 以下では Fe X 175 Å, Fe XI 171 Å などのコロナ輝線が特に強い。504 Å 以下では、面白いことに He II 304 Å の輝線が He I の光電電離に一番役立っている。

彩層のフラッシュ・スペクトルに He I 5876 Å (D₃線) や He II 4686 Å の輝線が強く出ていることは、昔から太陽の謎の1つであった。これらは今問題にしている共鳴線よりさらに励起エネルギーが大きい。これらが吸収線として現われるのはB型星(30,000 K)より高温度の星である。それが6000 Kの太陽に見られる理由として、ヘリウムの光電電離による励起が昔から考えられていた。ゼリンはそれをヘリウム EUV 輝線にもあてはめたわけである。

光電電離が効けば、衝突電離だけのときより電離が進むことになるので、図1の破線 $N_{\text{He I}}/N_{\text{He}}$ と $N_{\text{He II}}/N_{\text{He}}$ は左の方へずれることになる。このため衝突励起による発光は弱まるが、それ以上に再結合による発光がふえる。これは光電電離が密度の高い(光学的に深い)遷移領域の底の方で起るためである。ゼリンの計算によると、光電電離を起すコロナ輝線の強度が、太陽面の場所によって平均の10倍くらいになっておれば、He II 304 Å の説明はつくことがわかった。また、それだけ304 Å が強ければ、He I 584 Å の方の観測値も充分説明できる。

4. ミルキーの反論

ゼリンの光電電離による励起説にも、すぐ反論があらわれた。ミルキー(1975)の論文である。この論文はゼリンの論文より2週間早く Ap. J. に受理されている。さすがに反論の出版は1号遅れになっている。

ミルキーの云い分は He I 584 Å と He II 304 Å の輝線の線輪郭の問題である。これらの輝線が光電電離-再結合によって発光しているとすれば、前述のように、発光場所は密度の大きい遷移領域の底の方である。すなわち、He I, He II の電離放射に対する光学的深さが1の程度のところである。これは、共鳴線の光学的深さで言えば 10^4 くらいになる。光学的深さがこんなに大きくなると、共鳴線の光はスペクトル線の中心付近では大気の外へ逃げられなくなる。中心波長から両向きへ少し離れた波長だと光学的深さも小さくなるので、ほとんどの光がこのすき間を通して大気の外へ流れ出すことになる。結局、観測される 584 Å, 304 Å の輝線の線輪郭は図3の c) のように、中心波長が谷になり両向きが山になる

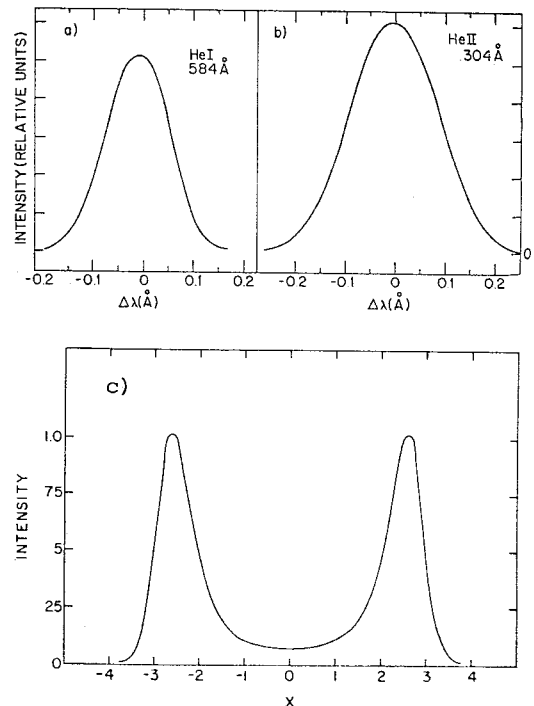


図3 ヘリウム共鳴線の線輪郭。a), b) は観測, c) は理論

形となるはずである。ところが、ロケットに分光器を積みこんで観測したスペクトル写真によれば、ヘリウム共鳴線の線輪郭は図3の a), b) のようになっている。このことからミルキーは、ヘリウム EUV 輝線は光電電離に

よって励起されているのではなく、ジョーダンの拡散型衝突励起が本当だと主張している。

5. 拡散説と光電電離説の検討

両説がこれだけ鋭く対立してくると、世界中のほかの学者もだまって見てはいない。早速シャイン達 (1975) は、拡散説によって実際どれくらい 304 \AA , 584 \AA の輝線が強まるか詳しい計算をした。その結果は、ジョーダンの予想に反して 2~4 倍強くなるだけであった。これでは、観測値と 15 倍のくい違いのある He I 584 \AA の説明はできない。

光電電離説による He II EUV スペクトルの計算は、リンスキー達 (1976) によって行われた。これには普通の衝突励起もふくまれている。ただし、光電電離を起すコロナ輝線の強度には、デリンの仮定 (平均値の 10 倍) はとらないで観測値をそのまま使っている。結果はやはり悲観的である。He II 304 \AA の計算値は観測値の $1/3$ 以下である。この不一致の説明のためには、 $80,000 \text{ K}$ くらいの温度をもった厚さ 100 km の大気層をつけ加えるか、拡散型衝突励起も同時に働いていると仮定しなければならない、とリンスキー達は云っている。前者は他の EUV 輝線や cm 波の電波観測と矛盾するので問題にならないし、後者には前述のデリンの批判がある。

アヴレット達 (1976) も光電電離説での計算を発表している。He II 304 \AA の観測とのくい違いはリンスキー達と同様である。その解釈として電子衝突断面積が小さすぎるのではないかと、遷移領域ではヘリウム存在度が大きいのではないかと云った意見まで持ち出している。

6. おわりに

ジョーダンが指摘した太陽のヘリウム共鳴線が予想以上に強いという観測事実に対して、すっきりとした解釈が出来ていないと云うのが現状である。今迄の研究で欠けていることは、彩層コロナ遷移領域の不均質性の効果ということである。図 4 を見ていただきたい。スカイラブで撮った He II 304 \AA での太陽の単色像である。 304 \AA 輝線は太陽面で一様に光っているのではなくて、Ca II K 線と同じように超粒状斑の縁で強く輝いている。これは他の遷移領域輝線についても同様である。地球大気圏外からの観測技術が未熟なため、このような EUV 単色像の観測が出来なかった 15 年も昔に、末元・守山はすでにこの EUV 輝線放射の不均質性を予言している。

すべての EUV 輝線が太陽面の $1/10$ の部分からだけ発光してるとしよう。この発光領域での本当の輝線強度は、太陽全面に平均した観測値より 10 倍大きいことになるから、図 2 の各曲線は一様に 10 倍だけ上へあがる、すなわち発光領域の EM は 10 倍大きくなる。し

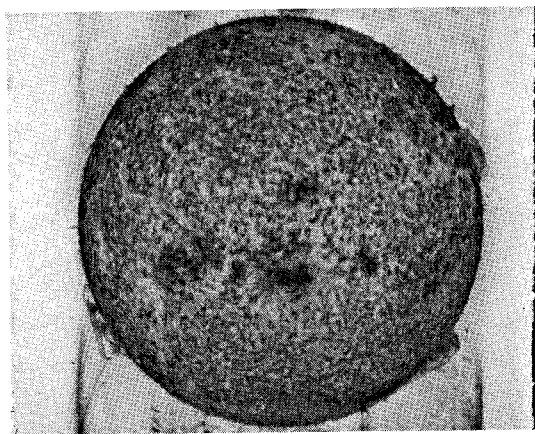


図 4 太陽の He II 304 \AA での単色像

かし、ヘリウム輝線の太陽全面での平均強度を求めるとき、(3) 式の比例定数は $1/10$ となる。つまり、衝突励起には不均質性の効果は皆無であることがわかる。

では、光電電離による励起への効果はどうであろうか。太陽 EUV スペクトルで 228 \AA 以下のコロナ輝線全体の光子の数は、He II 304 \AA の観測を説明するのに充分である。これらの光子をすくい上げる (吸収する) He II イオンの網の目が荒いために、HI や He I の網にすくわれてしまう——これがリンスキーやアヴレットの計算で 304 \AA の値が小さくなった原因である。コロナからの照り返しが 10 倍大きくなれば、HI→HII, HeI→HeII への光電電離が進み、He II イオンの網の目だけが細くなる。(これは前述のデリンの仮定に相当する。) 従って、EUV 輝線放射の不均質性は He II 304 \AA を強める効果がある。私見では、これこそがヘリウム共鳴線の異常強度の元凶ではないかと考えている。

(追記) その後の検討によると、ジョーダン (1975) の使った EM に問題があるように思われる。従って、ヘリウム EUV 輝線の異常強度の問題は、その出発点から考え直す必要があるだろう。

掲 示 板

第 10 回 月・惑星シンポジウムのお知らせ

期日: 1977 年 7 月 7 日 (木) から 9 日 (土) まで

場所: 東京大学宇宙航空研究所講堂

講演を希望される方は、講演者 (所属・身分)、題目、講演要旨 (400 字以内) を 5 月 28 日 (土) までに、下記世話人のところへお届け下さい。

〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

東京大学宇宙航空研究所

清水幹夫 Tel. 03-467-1111-内 440 or 495