

# 太陽表面最低温度

西 恵 三\*

## 1. はじめに

天文月報の読者の方々に、太陽の中心・表面・外側(コロナ)の温度は夫々約1500万度・約6000度・約100万度ですというような事柄から書き始めると、もうこの先は読んで戴けないような気がします。しかも最高ばやりの世の中に、“最低”などという言葉がその表題についているとなると事態は猶更深刻の度を加えるかも知れません。けれどもここまででも目を通して下さった方々には、もう少し先まで忍耐して戴ける事を望みつつ筆を進めることにします。

太陽という一恒星の物理的な姿の中で、例えばその中心から表面を経て外側のコロナに及ぶまでの温度がどうなっているのかを知りたいと思われる方々は、教科書、参考書、辞典、或いは理科年表などを開いて、所謂太陽モデルという項目を探される事でしょう。そして注意深く見ると夫々の数値の間には若干の相異があるとはいえ、共通しているのは、太陽の中心から外側に向って温度は次第に下降し光球とよばれる附近までその傾向は続き、更に外側の彩層に入ると温度は再び上昇しその傾向はコロナまで及んでいるということです。つまり温度が最低を示す場所が光球上部から彩層に移行する附近にあるということですが、この最低の温度( $T_{min}$ )がいくらであるのかを調べようというのが本稿のねらいなのです。

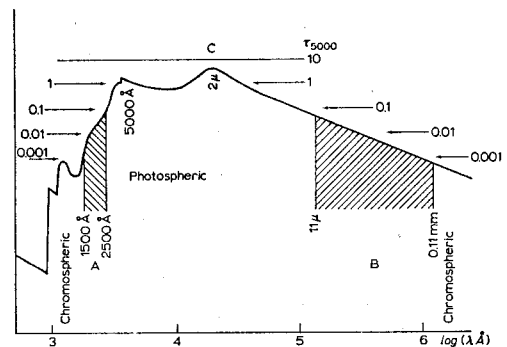
## 2. 調査の方法

太陽はその主成分が水素という気体からできていますので、太陽表面といっても地球上で私共が感知しているような土地の表面とは同様に考えることはできません。それでは私共が普通眺めている太陽の表面というのはどのようにしてきめられているのでしょうか。

最近日本の大都會では空気も水も次第に濁ってきていて、昔は遠くの山々の景色が美しく眺められたし河や池の底までよく透き通って見えていたのに、今ではすっかり見えなくなってしまった状景を思い起して戴きましょう。これは空気とか水とかの中に塵埃とかスモッグとかの異物の混入があって透明度が悪くなってしまったわけですが、つまりは遠くの景色とか水底から出た光が途中の空気や水の中の濁りのために通過して来ないことを

意味しています。即ち可視光の領域で見ている、この濁った空気や水の彼方のどこまで見透せるかということが、空気や水の層の彼方にある物の存在を肉眼で確認する事柄と深く結びついていることに気が付きます。そしてまた目で見て少し霞や霧がかかっているでも赤外線写真でははっきり撮影できたり、ラジオの聞え方やテレビの見え方には影響されないことでも分るとおり、この見透しのよさ悪さは光の波長によっていることが分ります。この見透しのよさ悪さを表現する一つの工夫として吸収係数( $\kappa_\lambda$ )が登場することになります。

さて太陽大気を地球上に居る私共が眺める場合にも同様の事柄があって、太陽大気を外側から見透していつてどこまで見えているかということが、あのくっきりとした太陽の形を支配し表面をきめていることになるのです。これを吸収係数を用いて量的に表現するために、幾何学的な深さ  $x$  という場所まで光学的に見透している所謂光学的な深さ(optical depth)  $\tau$  を導入します。即ち  $\tau_\lambda = -\int_x^\infty \kappa_\lambda dx$  (負号の意味は、 $x$  を、太陽から観測者に向う方向を正とし、 $\tau$  は逆の方向に増加するという定義によったため) であって、 $\kappa_\lambda$  は大気を構成している元素の種類、分量、温度等の複雑な関数です。一方、 $\tau$  という場所の温度に相当する Planck の値を  $B_\lambda(\tau_\lambda)$  で表わすと、私共が測定する輻射の強さ  $I_\lambda$  は大気が熱力学的平衡にある事を条件として  $I_\lambda = \int_0^\infty B_\lambda(\tau_\lambda) e^{-\tau_\lambda} d\tau_\lambda$  となります。もし  $B_\lambda(\tau_\lambda)$  が  $\tau_\lambda$  に関して線型で表現できれば(そしてこれは第一近似としては正しいとされています)  $I_\lambda$  が最も有効に寄与するのは  $\tau_\lambda = 1$  の場所からのものなのです。分り易くいえば  $\tau_\lambda$  が充分大きい奥深い場所からの輻射は  $\tau_\lambda = 1$  あたりで不透明なために地球



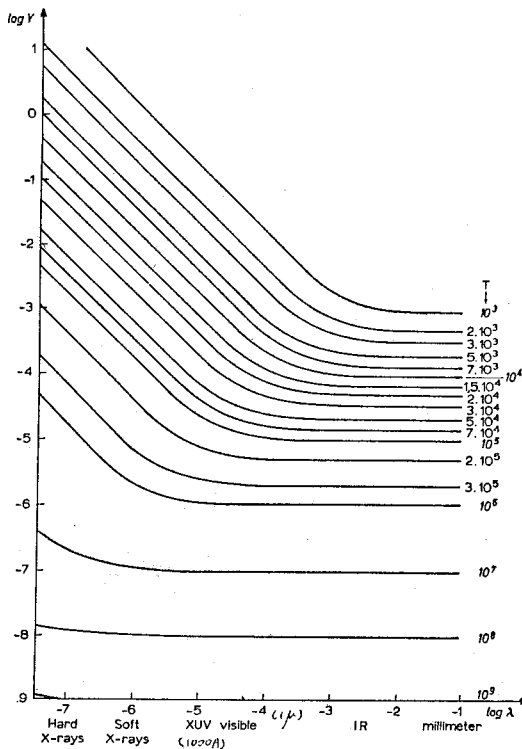
第1図 太陽の連続スペクトルの波長と発生場所との関係図。  $\tau_{5000}$  は 5000 Å に於ける  $\tau$ 。

\* 東京天文台

K. Nishi: The Solar Minimum Temperature

へ到達しないし、 $\tau_2$  が充分小さい場所からの輻射は透明すぎて地球への輻射の寄与が殆んどなく、結局  $\tau_2=1$  が表面ということになるわけです。従って大まかにいえば、太陽大気吸収係数  $k_2$  が波長に関してどのようなかということが、どの波長で眺めれば大気深さのどのあたりを眺めているかを示すと考えられます。第1図にその概要を示してありますが、これで分るとおり可視光領域から近赤外領域では太陽の最も奥深くまで眺めることになるし、紫外領域から波長が短くなってX線領域にゆくほど、そしてまた一方遠赤外から波長が長くなって電波領域にゆくほど太陽表面の外側即ち彩層やコロナを眺めることになるという事情が察せられることと思います。

さて以上説明してきたことによって、太陽光球上層から彩層へと移行するあたりの所謂最低温度を知ろうとするには波長の短い紫外領域とか波長の長い赤外領域に注目すればよいということが御分り戴けたと思いますが、筆者が紫外領域を選んだのにはもう一つの理由があったのです。もう一度先程の輻射の強さを求める式  $I_\lambda = \int_0^\infty B_\lambda(\tau_\lambda) e^{-\tau_\lambda} d\tau_\lambda$  の中の  $B_\lambda(\tau_\lambda)$  をみましょう。これは  $\tau_\lambda$  という場所の温度に相当する Planck の値ですが、今温度の変化に対する  $B(T)$  の変化を調べるために  $Y =$



第2図  $Y = \frac{1}{B} \frac{dB}{dT}$  の計算結果。

$\frac{1}{B} \frac{dB}{dT}$  を考え、その計算結果を第2図に示してあります。これによって直ちに分ることは一般に短波長ほど  $Y$  が大きな値であるし、しかも温度が低いほど有効であること、即ちよい温度計として使用できることを示しています。従ってこの領域での太陽の輻射絶対量の測定が温度決定に選ばれたわけです。

さて日本に於てこの種の観測を計画して私共の測定技術の水準で可能かどうか、また国際的に見て測定に成功した場合に未だ充分発言の余地を残しているかどうか等をいろいろ調べて見た結果、その頃までに発表されていた幾つかの太陽表面モデルを用いて太陽面中心の絶対輻射強度およびそれが周縁にゆくに付れてどのようになっているだろうかという所謂中心周縁強度変化を計算してみようという気になったのが1966年頃でした。

次にこの目的達成のためには大きく分けて2つの困難を克服しなければなりません。1つはこの観測波長、具体的には 1500 Å ~ 2000 Å あたりは空気中の酸素のために光は完全に吸収されてしまうので、ロケットを用いて地上 150 km 以上に観測器を持ち上げなければならないし、地上に於ける基礎実験もすべて真空中で行なうということです。もう1つはこの領域での輻射絶対量を測定するために必要な標準光源とか或いは標準検知器が現存していないので、実験者が自分で何とか工夫をして信頼度の高い絶対値付けをしなければならないということなのです。

ロケットを用いて始めて太陽観測がなされたのは1946年10月10日のことですから、すでに4分の1世紀以上も経過しています。そしてそれ以来なされた太陽観測は全くすばらしい成果を残して来ました。その概要については天文月報第61巻第8号に筆者がすでに紹介しましたが、その後特に1973年代には所謂 Sky Lab. 計画の下に今までの総仕上げとも思われる種々の観測がなされています。筆者は最近この Sky Lab. の計画を進めて来た NRL (Naval Research Laboratory), HCO (Harvard College Observatory), HAO (High Altitude Observatory) GSFC (Goddard Space Flight Center) 等の諸研究所を訪ね、各グループの人々とも面談しその新しい資料も眺める機会が与えられたのですが、その驚くべき成果には全く目をみはるものがありました。例えばスペクトルの分解能とか太陽面上の場所的な分解能とかは、所謂無人のロケットや人工衛星 (OSO 計画) によって得られたものにくらべて一段と精度が向上し、これで得られた資料を基にして太陽物理学は更に一段の進歩が期待されます。けれども一方輻射量の絶対値付けに関しては未だ改良や進歩の余地を多分に残しているという事柄も強く印象付けられたのです。

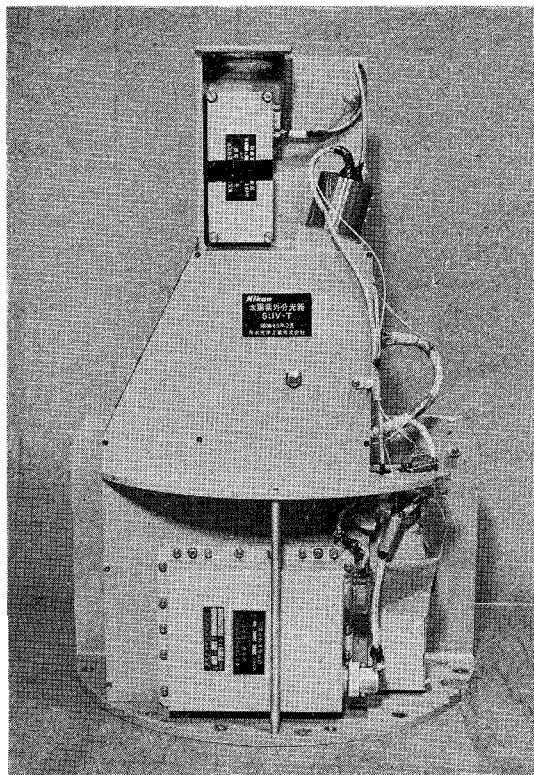
### 3. 観測準備

私共が太陽スペクトルの 1500 Å~2000 Å の輻射絶対量と中心周縁強度変化の観測をしてみようと考えた頃は、この領域に於ける信用度の高い標準値が存在しなかったとはいえ、それまでにアメリカの NRL の Tousey は NBS (National Bureau of Standards) から豊富な実験資料を入手して写真的に太陽スペクトルの分光観測を行ない絶対輻射量の測定を行っていました。その測定結果を基にして1968年に所謂 BCA (Bilderberg Continuum Atmosphere) という太陽モデルが提唱され  $T_{\min}$  は 4600°K でした。その後も NRL のグループは NBS と緊密な連繋の下に、所謂可視領域に於ける標準光源を基にして真空紫外領域へその輻射絶対量を移行させる方法に加えて、シンクロトロン輻射を光源として測定した絶対量と所謂 Cross Check した標準量を基にして観測を行ない、従来までの観測結果が信用すべきものであると報じています。

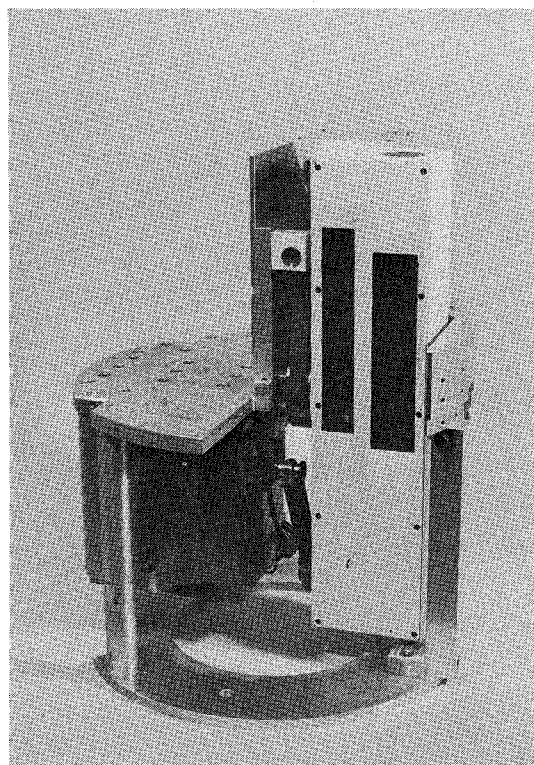
同様の趣旨の分光観測を HCO が光電的な方法で行っ

たのが1968年のことでした。この絶対値付けも NBS に依存しています。しかしこのグループが測定した結果は NRL よりはるかに小さく、両者の違いは約3倍であったのです。実際の測定値は 1650 Å 附近で最低で約 4300°K の Planck の値に一致していますが、この値は HAO が 200 $\mu$ ~300 $\mu$  あたりの赤外領域で観測した値とよく一致しています。これ等の測定結果を基にして提唱されたのが HSRA (Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere) という太陽モデルで  $T_{\min}$  は 4170°K となっています。

これが、私共が東京天文台の旧分光部の木造の建物の東側実験室の片隅で、雨もり、酷暑、厳寒などという条件の下に、真空槽とか瀬谷一波岡型真空紫外モノクロメーター等を整備するという初めての経験に頭を痛めていた頃の状態で、東京大学宇宙航空研究所の観測ロケットは高度的には私共の観測に充分上昇する能力を備えていたものの、所謂姿勢制御は天文観測という意味では充分な目安がなかった段階であった頃なので、諸外国の観測に追いつくのは何時の日かと暗澹とした準備期間を過し



第3図(A) 観測ロケット K-10-6号に搭載された複分散型分光測光器。1629 Å, 1684 Å, 1739 Å の3波長、スペクトル分解精度 8.3 Å, 空間分解能 1/3, で太陽面輻射の絶対強度と中心周縁強度変化の観測が行なわれた。(1971年9月1日観測)



第3図(B) 観測ロケット K-10-9号機に搭載された単分散型分光測光器。1500 Å~2000 Å の波長範囲をスペクトル波長幅 80 Å で太陽面全体からの輻射絶対量の測定を行なった。(1973年2月19日観測)

ていたのです。

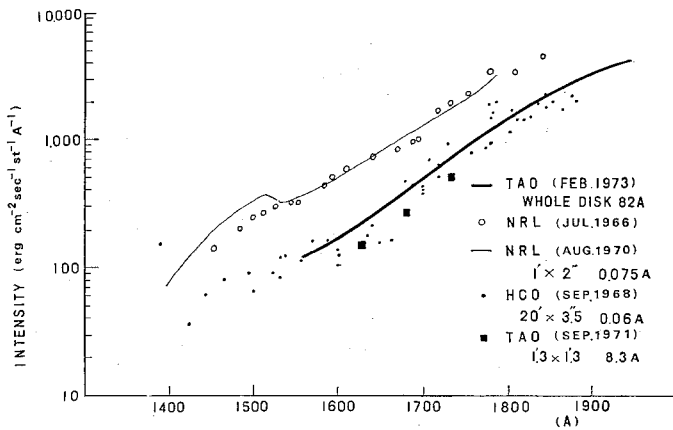
さて太陽スペクトルの輻射絶対量を測定するには、大まかについて2つの手続きが必要です。第一は太陽スペクトルを測定するためのロケット用分光器の光学系の Transmission, 具体的には分光器に使用される凹面回折格子とか鏡等の反射率を測定すること, 第2は検出器の絶対値付けをするということです。このような手続きとか実験装置および測定結果など所謂基礎実験に関しては、すでに東京天文台報 (第15巻, 253頁, 1970; 第16巻, 584頁, 1973) とか東京大学宇宙研究所報告 (第6巻, 第1号(B), 1970) 等にくわしく説明されているので興味のある方はそれ等を参照して載くとして, 要点をかいつまんでいうと, 第1については真空槽の外側から真空槽内にある検出器を移動させて測定しようとする凹面回折格子とか鏡とかへの入射単色光と反射光を真空槽の真空を保ったまま測定して比を取るということ, 第2については可視領域に於ける標準光源の既知輻射絶対量を熱電対を仲介にして真空紫外領域への光源へ移行させその光源を基にしてロケット用検出器の絶対値付けを行なうということなのです。これ等一連の操作が真空の中で完遂されなければならないこと, また一般に真空紫外領域では安定した強い光源作りに苦心をしなければならないということなど, すべてが初めての経験であっただけに無駄な実験にも時間を費した様な気がしています。

4. 観測および結果

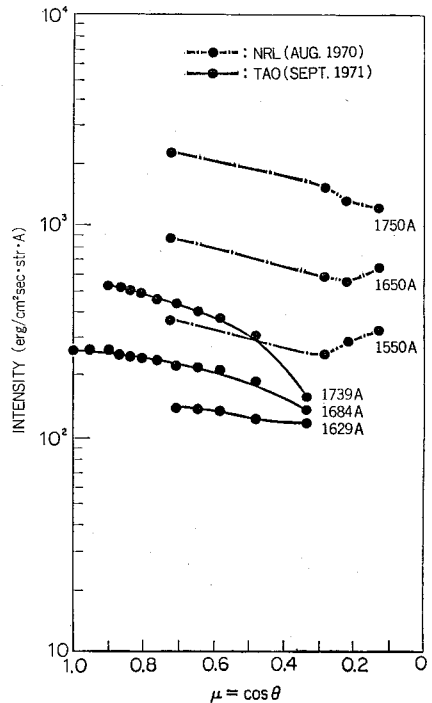
私共は観測に2つの段階を予定していました。第1は単分散型の分光測光器を姿勢制御なしのロケットに搭載し, その spin で太陽をチラチラ眺める間に光電測光して測定値を地上へテレメートし, その precession で波長の走査を行なおうというものでした。波長純度は約80Åで太陽全面からの輻射量を測定するというものです。第

2段階では第1段階の分光系にもう一つの分光系を附置するという所謂複分散型の分光測光器を姿勢制御つきのロケットに搭載し, 太陽面上約1'の空間分解精度, 約8Åのスペクトル分解能で観測を行ない, 測定値を地上へテレメートする方式なのです。この分光系は, 分光測光器自体には可動部分を全然設けなくて, 3波長で太陽面の中心から周縁への強度変化を測定できるという独創的なものですが, これは東大宇宙研の観測ロケットが始めて天文観測という意味での精度の高い姿勢制御へ挑戦するという機会でもあったために考案されたものであったという方が当たっているかも知れません。

実際の観測は第1の型式のものについては第1回目が1971年1月24日, 東大宇宙研観測ロケット K-9M-34号機により鹿児島県内の浦の実験場で行なわれたが, ロケットの姿勢が予想より外れ太陽光が分光器に入射せず資料は得られませんでした。第2回目は1971年8月25日に K-9M-36号機により行なわれましたが, ロケット自体が発射後間もなく異状を起しこれまた失敗, 第3回目になってやっと成功したのです。それは1973年2月19日 K-10-9号機によって行なわれたものですが, ロケット自体の spin はそのままにしておいて, 分光器自体には太陽の光が間歇的に入る様にロケット軸に対して太陽方向に指向させる様な所謂1軸の制御を私共の方で開発したものを使用したわけです。



(A)



(B)

第4図 観測結果

第2段階の複分散型分光測光器による観測は1971年9月1日、K-10-6号機によって行なわれ、姿勢制御は順調に働き観測器も完全に作動して観測は成功したのです。順序からいうと第1段階の観測が終ってから第2段階へ進むのが望ましかったのですが、結果的には種々の事情のために順序が逆になってしまいました。K-10-6号機およびK-10-9号機に搭載された分光測光器の外観を示す写真を第3図にあげておきます。これ等は今は太平洋の底深く沈んでしまっていて、再び私共の手にはとどかない場所にあるものなのです。

私共の観測結果を諸外国の結果と一諸にして第4図にあげておきます。これで見ると、私共の観測はHCOの測定結果によく一致していることが分ります。また中心周縁強度変化の観測も、1629Å, 1684Åの2波長は所謂HSRAモデルを支持しているようですが、1739Åは全然違っているようです。勿論私共の観測はスペクトルの分解精度が悪いために連続スペクトルの外に吸収線や輝線を一諸にして測定しているし、空間分解能も悪いために極めて縁近くの強度変化の状態までは解析不可能なので、この結果からモデルを導き出すことはできませんが、ともかく中心周縁強度変化の観測に関しては光電的に測定された世界最初のものであることを附記しておきます。

アメリカではNRL, HCOの外に最近HAOが同様の観測を始めましたし、オーストラリアやベルギー等ヨーロッパの国々でも絶対量測定を本腰にやり始めた様に感じられます。元来輻射絶対量の測定という仕事は非常に大切なものですが極めて地味なもので、例えば太陽常数とか太陽スペクトルの波長強度分布の絶対測定は可視領域に於てさえ未だに行なわれていることを思えば、その様子も御判断戴けると思います。ロケット, 人工衛星, Skylabよりの観測というような極めて花々しい宇宙空間からの太陽観測の半面、全く地味でしかも“最低”を目指しての仕事も意味のある仕事として残されていたことを憶えて戴きたいものと思います。

1971年9月1日午前11時10分に内の浦から発射されたK-10-6号機ロケットは、発射後99秒姿勢制御装置が順調に働いて太陽を捕え、始めて太陽真空紫外領域の輻射測定の結果を得ることができました。その瞬間の緊張と興奮と感激を新たに思い起す機会を与えて下さった編集の方に、またこれ等の観測や準備の基礎実験のために種々御援助下さった大勢の方々にも心より御礼を申し上げます。特に観測成功の瞬間に同じ場所で同じ喜びを味わった同働者の東康一、山口朝三両君に感謝しつつ筆を置きます。



カラーアルバム

# 星空の四季

藤井旭著

■B5変型判／148ページ／定価二,〇〇〇円(〒一四〇)

好評発売中!

日本の都市の夜空から星が消えつある今、紙上に美しい星空をカラー印刷で再現。春夏秋冬の星座と、よく知られている星雲星団を、順に追って紹介。

〈主な内容〉

冬の星座——こぐま座・北斗七星・おおぐま座・M82・りょうけん座M3・M51・しし座のかがま／他  
 秋の星座——さそり座・M6M7・いて座・南斗六星・三裂星雲・M8とオメガ星雲・夏の銀河／他  
 夏の星座——カシオペア座・カシオペア座と北極星・ケフェウス座の銀河・NGC6946・M31／他  
 春の星座——オリオン座・オリオン星雲・プレアデス星座／他