

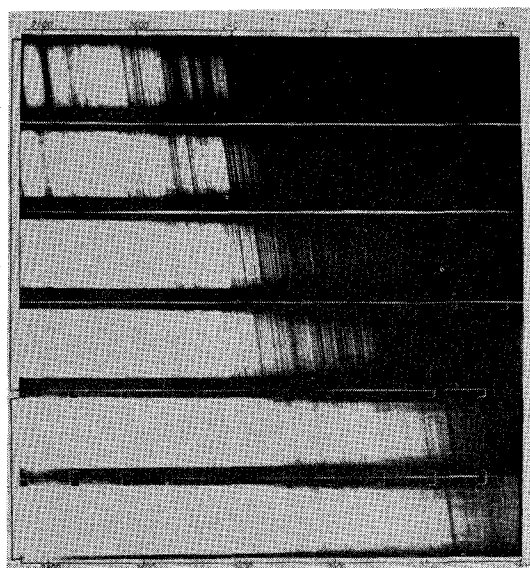
太陽極端紫外領域の輻射

西 恵 三*

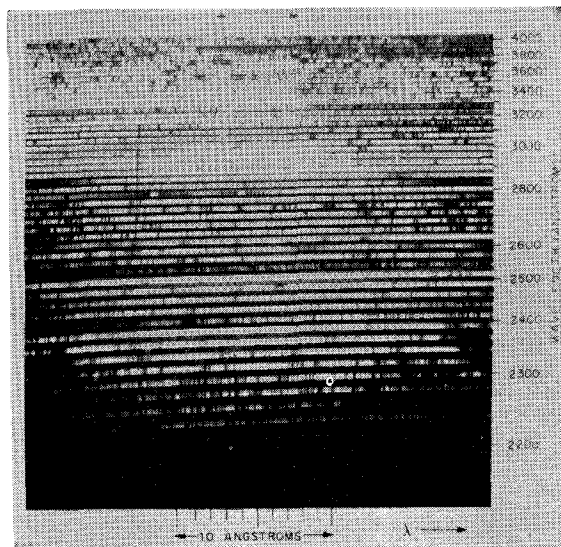
1. はじめに

井戸の中の蛙が始めて大海を望見する立場に置かれた光景を想像し、いろいろな角度から眺めて先人達はいくつかの智慧の言葉を残してきた。けれども今やわれわれ自身が全くその蛙に似た立場に置かれていることに気付くのである。すなわち地表から約 100 km の高度までロケットで上昇して、大気圏外から地球の大気の吸収を受けない太陽極端紫外領域スペクトルの分光的な観測が試みられ始めてその写真撮影に成功した 1946 年、人類は真理の大海を眺めるもう一つの新しい窓の前に置かれたということができよう。

最初の約 10 年間になされたこの方面の実験、すなわち始めは戦争の兵器として使用されたロケット弾がどのようにして自然科学探究の武器となっていたかという歴史的な話から、その観測的な意味についての解説などは、天文月報 1956 年 1 月号に斉藤国治氏による「ロケット分光学」にきわめて内容豊富に掲載されている。またこの頃まではロケットの発射数もさほど多くなかったので、発射ごとに新しい観測資料が入手された様子など、同じく天文月報 1957 年 2 月号筆者による「ロケットによる太陽輻射の測定」にまとめてある。



第 2 図 非点収差除去用複分散型分光系による分光写真 (1967)



第 1 図 エシエル型分光器による太陽紫外域分光写真 (1961)

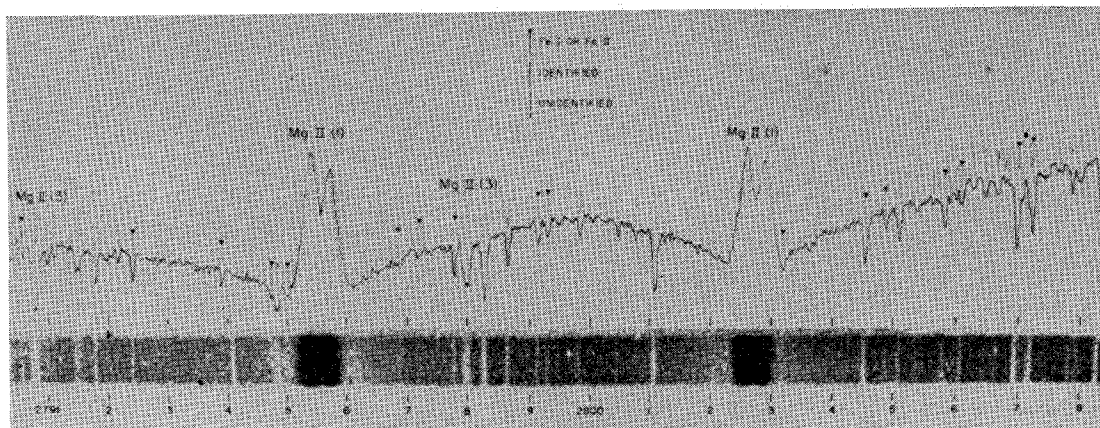
その後約 10 年の間に飛翔体関係、たとえば精密な姿勢制御などの技術的な諸問題の解決と、観測器関係、たとえば分光系や検出器などの改善とが相俟って、この方面の観測は著しい成果をあげてきた。すなわち太陽物理学に関してどのようなことを知るためにはこの方面でどのような観測をすればよいかということを考えることに明るい希望を持ち得るようになってきたということができよう。このような面からきわめて有意義な解説を、末元善三郎氏が「大気外からの太陽観測」と題して、1966 年応用物理第 35 巻第 3 号に寄せられている。欧文によるこの種の解説ないし総合報告は大へん多く出ていて、どれを選び出してもいいのかも知れないが、この方面の観測の最初の写真撮影に成功した Richard Tousey による “Some results of twenty years of Extreme Ultraviolet Solar Research” Ap. J. Vol. 149, 239 (1967) をあげておこう。

2. 得られた観測資料とそれからわかった事柄

さきにも少しふれたように、約 10 年前には飛翔されたロケットごとについてどのような観測がなされてきたかという結果を列記するので十分であった。しかしその後太陽物理学の面からの必要上、当然観測されるスペクトルの分解能の向上と、波長をできる限り短波長側へのばしてゆく努力に重点が置かれてきたので、ここでは現

* 東京天文台

K. Nishi: Extreme Ultraviolet Solar Radiation

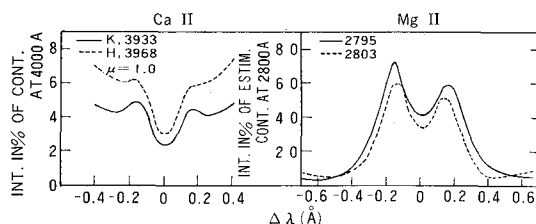


第3図 Mg II の吸収線 (2796Å, 2803Å)

在までに観測に成功している結果を適当な波長範囲に分割して、得られている資料をできるだけ多く眺めて戴き、それからわかった事柄や将来の問題などについて話を進めたい。

A) 3000Å~2085Å

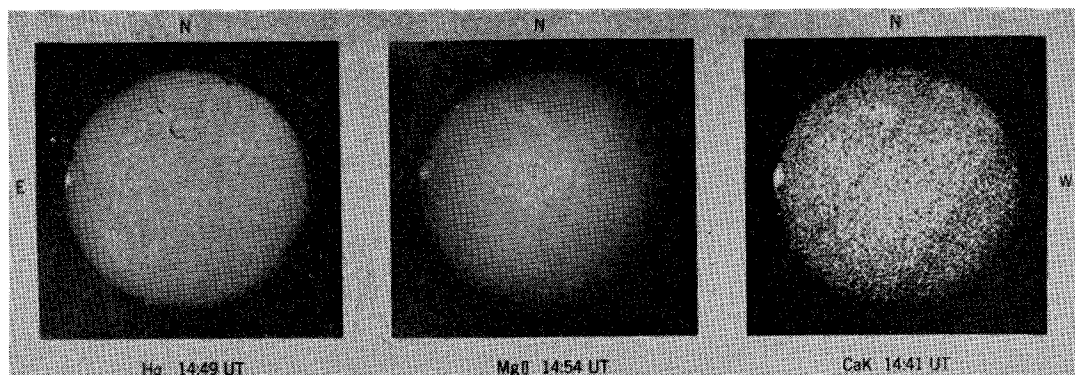
1946年の最初の観測以来きわめて多くの資料が得られているが現在までに得られたスペクトルの分解精度の最高のもは 0.03 Å に達している。この観測に用いられたのはエシエル型分光器であったが、この分光器が計画から実行段階に至るまでには約 10 年の歳月が必要だったそうで、まるで 1 つの大型望遠鏡を作るにも似ていたと Tousey はのべている。第1図が得られたスペクトル写真である。この資料についての総合的な結果は未発表であるが部分的には発表されていて、たとえば発見された吸収線は 7146 本でその中同定されたものが 3929 本のことである。この領域におけるスペクトルの様子は可視域の短波長への延長と見られるほどにほとんど変わらない様子を示しており、強い吸収線の核 (Mg II, ~2800 Å) 以外は光球からのものと考えられる。ただ吸収線の混み方が著しく、2700Å より長波長側で 2, 3 カ所程度しか連続スペクトルが取り出せないほどなので、現存す



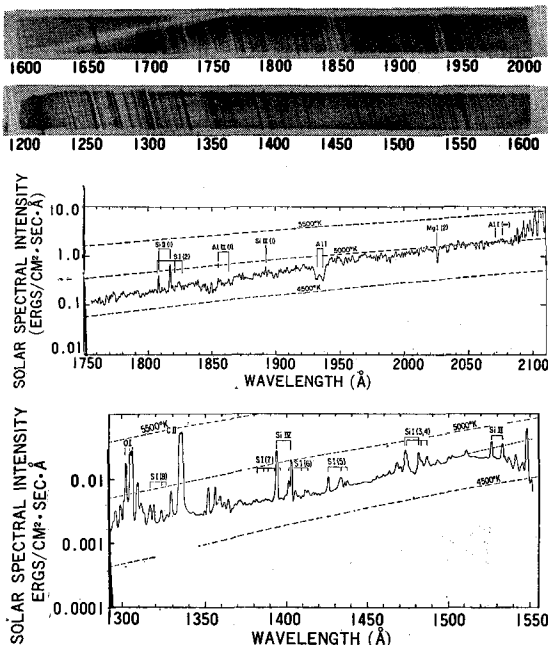
第4図 Ca II と Mg II の核付近の輪廓

る太陽光球モデルと連続吸収係数とを用いて計算された結果が観測値とかなりの不一致を示すのは、吸収線の混み方が原因なのか、太陽モデルが悪いのか、連続吸収係数に問題があるのか、または観測値そのもの、特に絶対エネルギーの測定に改良点が残っているのか、よくわかっていない。

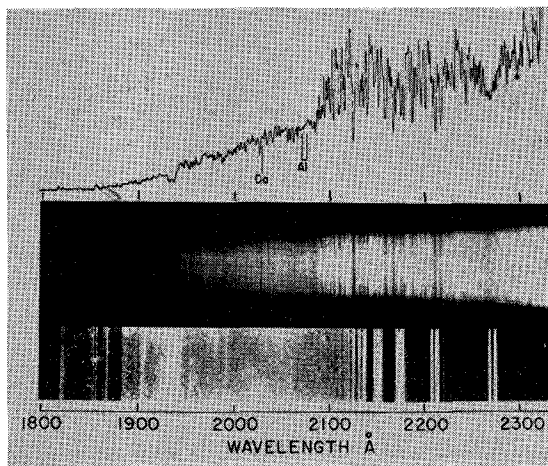
一般に太陽表面の物理的状態が深さと共にどうなっているかということを調べるには、太陽像の中心から周縁にゆくにつれて明るさがどのように変化していくかという資料 (中心周縁強度変化) が有効に利用される。この点に着目してフランスの Blamont および Bonnet はこの領域で種々な方法で数回中心周縁強度変化の観測を行ってきた。その中で最もスペクトルの分解精度の高い



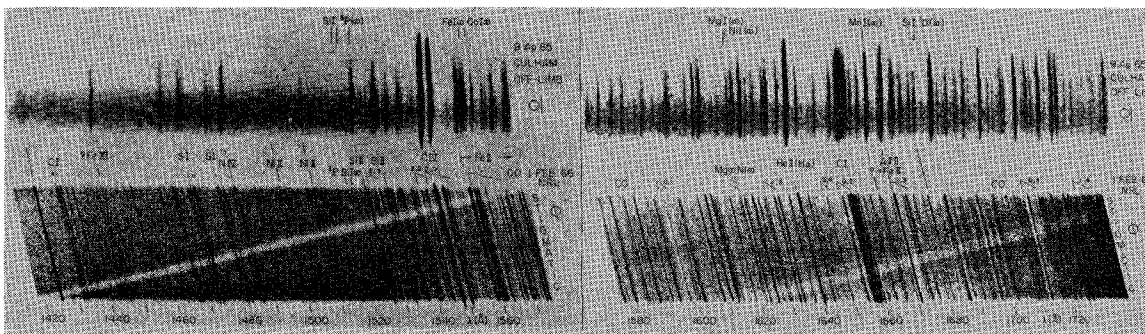
第5図 太陽単色写真の比較 (1965年4月12日)



第6図 2000 Å ~ 1200 Å の太陽スペクトル



第7図 2085 Å 付近の太陽スペクトルおよび実験室におけるアルミニウム輝線スペクトル



第8図 1730 Å ~ 1420 Å 太陽スペクトル。収差を除くように工夫された太陽像上スペクトル (NRL) および太陽縁上彩層-コロナのスペクトル (CULHAM)

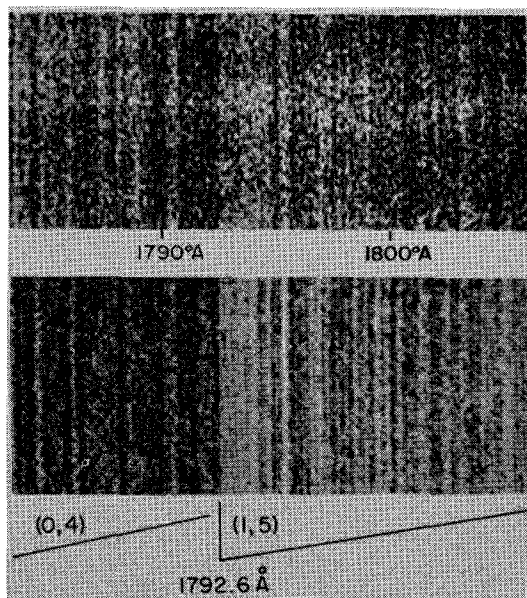
0.5 Å として場所的な精度は 20 秒程度のものが第 2 図である。この資料を整約した結果は、理論的な計算から出した連続スペクトルの中心周縁強度変化とはかなりの違いを示し、問題は解決に向かうかと思ひの外、さらに深刻の度を加えたと思ふこともできる。

この領域で最も強い吸収線は電離マグネシウム (Mg II) による 2800 Å 付近の 2 本の線である。第 3 図にその写真およびトレースを示してある。これらの線は可視域における電離カルシウム (Ca II) の H 線 (3969 Å) や K 線 (3934 Å) と同様にその核の部分は彩層で生ずると考えられるので、比較の輪廓を第 4 図に示しておこう。これで気が付くことは Ca II にくらべて Mg II の方がその輝線の部分がはるかに強いということである。これは太陽大気ではマグネシウムの量がカルシウムにくらべて 10 倍も多いということや、波長が短くなるにつれて連続吸収係数が大きくなるので連続スペクトルは太陽のより表面、すなわち温度の低い部分を示すことになり、これら吸収線の核の部分が形成される彩層との温度差が大きくなるためと考えてよいであろう。けれども Ca II と Mg II についてそれぞれ K 線と H 線の強度が逆転しているのはどうしてであろうかということは、結局これら吸収線の生成について未解決な点が残っている限り、説明はつかないままに残されている。

Ca II の K 線で太陽面のスペクトロヘリオグラムを撮影することによって彩層の様子を一望の下に眺められることは周知の事柄であるが、Ca II と Mg II の類似性を考慮すれば、Mg II でも同様のヘリオグラムが得られてよい理屈である。この点に着目して、スエーデンの Fredga は狭帯域 (3.5 ~ 4 Å) のフィルターで場所的な精度が 0.3 分 ~ 0.4 分のヘリオグラムを得たが(第 5 図)結果が地上で得られた H α や Ca II のものにくらべて貧弱なのは、フィルターの透過幅の点や飛翔体の方向制御に不十分な点があったと考えられる。

B) 2100 Å ~ 1200 Å

現在までにこの領域で得られた資料(第 6 図)は 0.2 Å

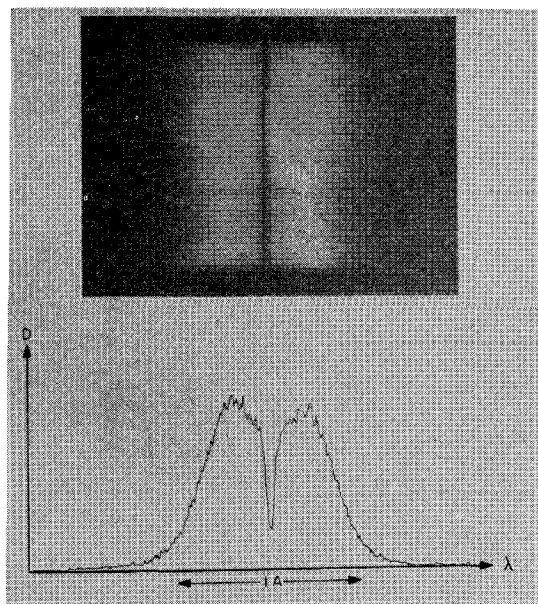


第9図 (上) 1800 Å 付近の太陽スペクトルおよび
(下) 実験室内における Shock-tube による CO のスペクトル

のスペクトルの分解精度を持つ複分散型分光器によるものであるが、この領域のトレースを見てわかることは、連続スペクトルを背景にして吸収線がしだいに輝線へと移行してゆく。これはこのあたりの輻射が光球の上層部から彩層へと移行する境界付近の温度極小部をはさんだ部分の寄与によるものと見ることができよう。したがって皆既日食における第2, 第3接触のフラッシュスペクトルと本質的には同じものであって、一方はその輻射を接線方向に積分したものを眺めるべく運命づけられているが、他方は垂直方向から接線方向近くに至るまでの情報を含んでいるから、さきにもべた中心周縁強度変化に注目してこれらの情報を分析できる程度の観測を行なうことができるならば、その方面からその付近の物理的状态を探ることができる可能性を残しているといえる。

この領域で 2085 Å を境にして太陽スペクトルの様子がかなり違っている。(第7図) この説明は多くの人々によってなされたが、小平桂一氏はスペクトル線の量的な解析を行なって、この 2085 Å 前後の強度変化はアルミニウムの吸収端によることを発表して一応解決したと考えられており、最近の実験室での実験結果から得られた衝突断面積が、彼の採用した理論的なものと矛盾しないことも明らかになってきた。

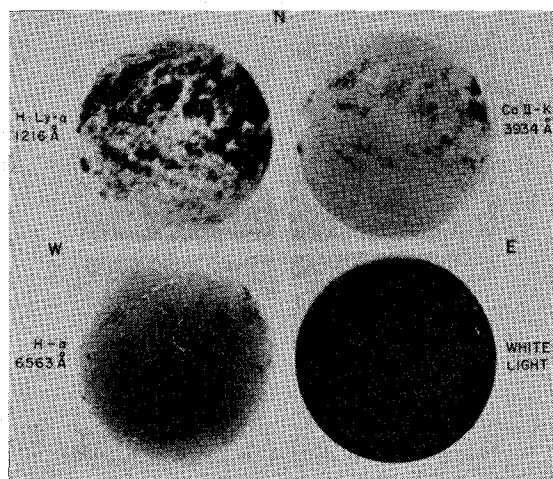
さらに波長が短くなり強い輝線があらわれ始める1800 Å あたりから吸収線と輝線とが複雑に混入して次第に吸収線が認められなくなってしまう 1500 Å あたりまでは、



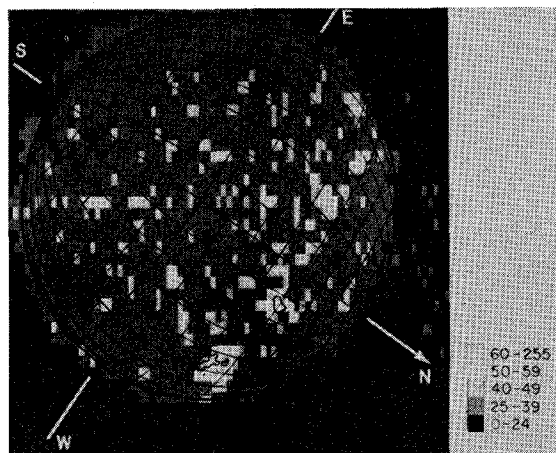
第10図 高分解 L_{α} の写真およびトレース

太陽光球上層から彩層下部へ移行する極小温度を示す付近の情報が最も多く含まれているといえることができる。

(第8図) 可視域の中心周縁強度変化の観測、日食観測、この領域での輻射エネルギー分布等をもとにして得られたいくつかの太陽表面モデルを採用して、この領域での中心周縁強度変化を計算してみると、第8図でみられるような観測資料とは必ずしもよい一致を示しているとはいえない。この辺を何とかうまく解決するべく、昨年4月17日から20日にわたってオランダにおいて持たれた勉強会の結果提出された Bilderberg Continuum Atmosphere というモデルを採用しても、3000 Å ~ 2000 Å あたりのエネルギー分布の不一致と 1680 Å にあると期待さ



第11図 L_{α} 線によるヘリオグラムと H_{α} , CaII-K, white light による太陽像



第12図 OSO-第2号より送られてきた L_{α} ヘリオグラム

れる2桁に近い強度変化に関しては著しい相異が残っている。しかし一方、温度極小付近に存在するCO分子の影響に注目して、実験室内のShock-tubeを用いた実験結果がこれらの問題を解く鍵を握っているのではないかという希望が持たれている。(第9図)

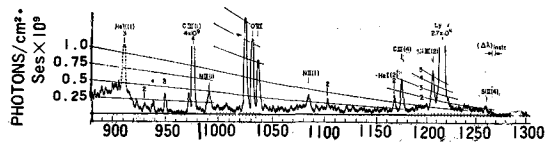
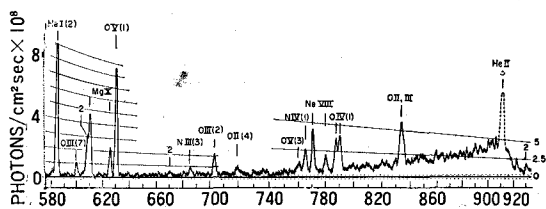
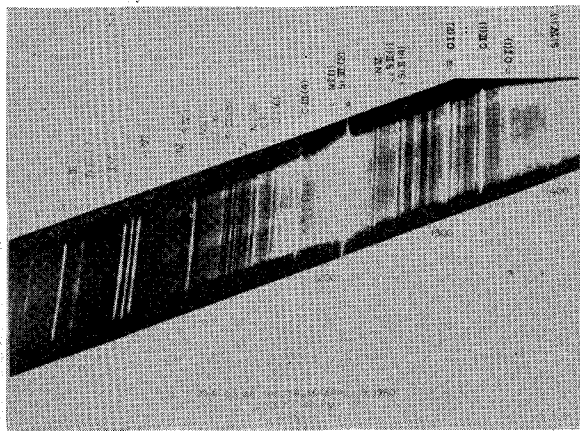
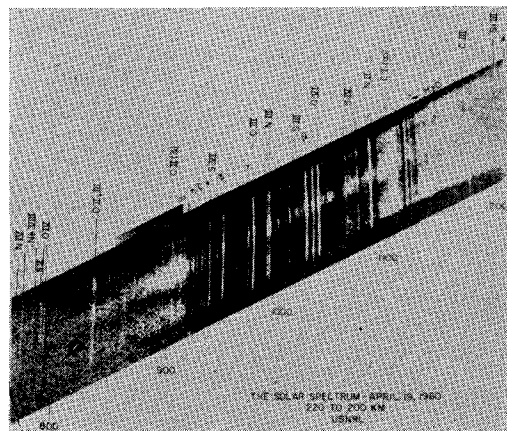
この領域でイギリスのCulham研究所のグループが行なった興味ある観測に一言しておこう。彼等は三軸方向に数秒の精度を持つ方向制御を行なって、太陽縁から5秒程度離れた場所のスペクトルを撮影した。(第8図)これと前者の太陽面上のスペクトルを比較することによ

り、新しいコロナ輝線が容易に発見されたのである。

この領域で最も明るい輝線は水素のライマン系列の α 線 (L_{α} , 1216Å) である。現在までに得られている L_{α} の最高の分解精度 0.03Å の写真が第10図である。広い輝線の中央にある極めて細い吸収線は地球の上層大気にある水素原子の吸収によると考えられている。 L_{α} 線は彩層で生ずることはわかっているが、Mg II の場合のように全部をうまく説明できる理論はみつかっていない。この線はあたりにくらべて非常に明るいのでヘリオグラムを撮ろうという工夫は早くからなされてきたが、現在得られているものは場所的な精度が約1分が最高である。(第11図)これを可視域のH α 線やK線のものと比べてみると、どちらかといえばK線のものと似ているが、コントラストは少なくとも2倍以上は違っている。同様の観測器はOSO (Orbiting Solar Observatory, 太陽観測用人工衛星) 第2号に搭載されて1965年には L_{α} による太陽面の常時観測がなされた。(第12図)

C) 1200Å~500Å

この領域にはB)と同様な複分散型分光器によって写真撮影されたものと、1300Åよりも長い波長には感度を持たない検出器を組み合わせることで散乱光の除去に成功したHintereggerのグループの観測がある。(第13図)この領域では輝線があらわれ、主に彩層からコロナにわたっての輻射を示している。これらの輝線の強度をもとにして末元善三郎、守山史生両氏により紫外輻射の場所が平



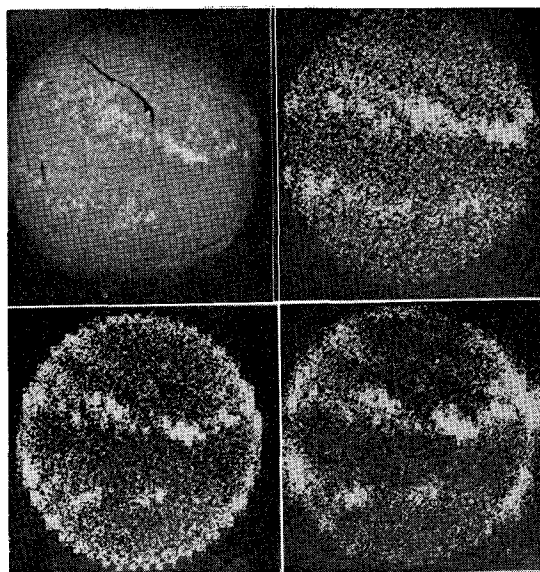
第13図 (上) 1200Å~500Å 太陽スペクトル写真
(下) Hinteregger 式光電分光計によるもの

面的に限られているというモデルが提唱されたし Zirin, Dietz によれば彩層の高温部分がスピキュールに集中しているというモデルもある。一方, Pottasch は重元素(鉄, マグネシウム, アルミニウム, シリコン)が光球に比べて多いという結果を得ているし, Athay は少し異なった形式で求めると光球の元素量で正しいと結論し, Jordan は鉄とシリコンの存在量比が光球の 10 倍だといえ、一方 Dupree, Goldberg はシリコン, 酸素, 鉄は光球の値で正しいと推定しているなど, この問題に関しては未だ一致した結論はない。

この領域におけるヘリオグラムとしては OSO 第 4 号によるものがあげられよう。OSO 第 4 号は現在も飛翔中であり資料は続々入手中と思われるが, その 1 例を第 14 図に示してある。ここには水素のライマン連続部を出す光 Lc (897A) と OVI (酸素原子から 5 個の電子がはぎとられたイオン) の出す 1032A, そして MgX (マグネシウム原子から 9 個の電子がはぎとられたイオン) の出す 625A によるヘリオグラムを当日の地上における H_{α} 線のヘリオグラムと共に示した。それぞれの光は Lc が約 1 万度, OVI は約 30 万度, MgX は約 100 万度で有効に光るので, 簡単にいえば彩層→その中間→コロナへと移ってゆくあたりの様子をながめているということがができる。これらをくらべてみると明るい部分は大体一致しているが, 細かい模様や中心周縁強度変化の様子などはそれぞれ違っていることに気付くであろう。

D) 500A~30A

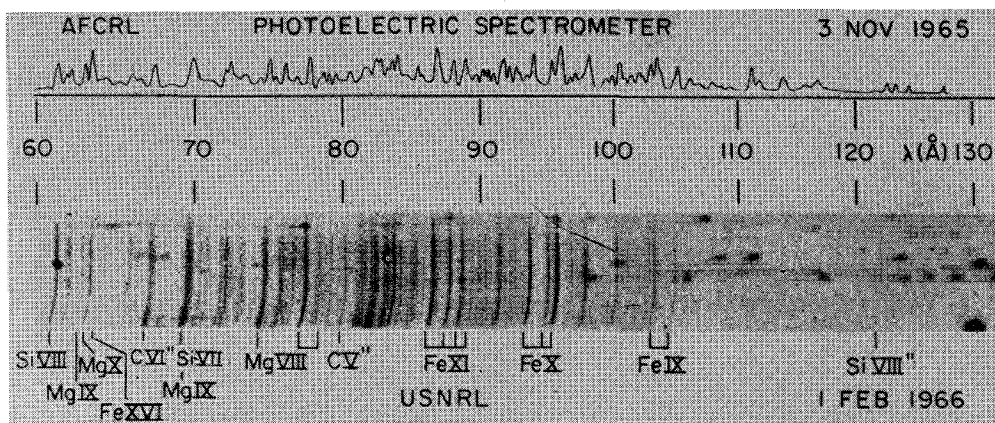
この領域では物質の反射能は極めて低くなるので, スペクトルは斜入射系分光器によるのが普通である。斜入射系では散乱光が大きくなるので長波長側を除去するフィルターをスリットの前に置いて写真撮影を行なうか, または Hinteregger 型の分光計が用いられる。そのようにして得られた資料の 1 例が第 15 図に示されている。



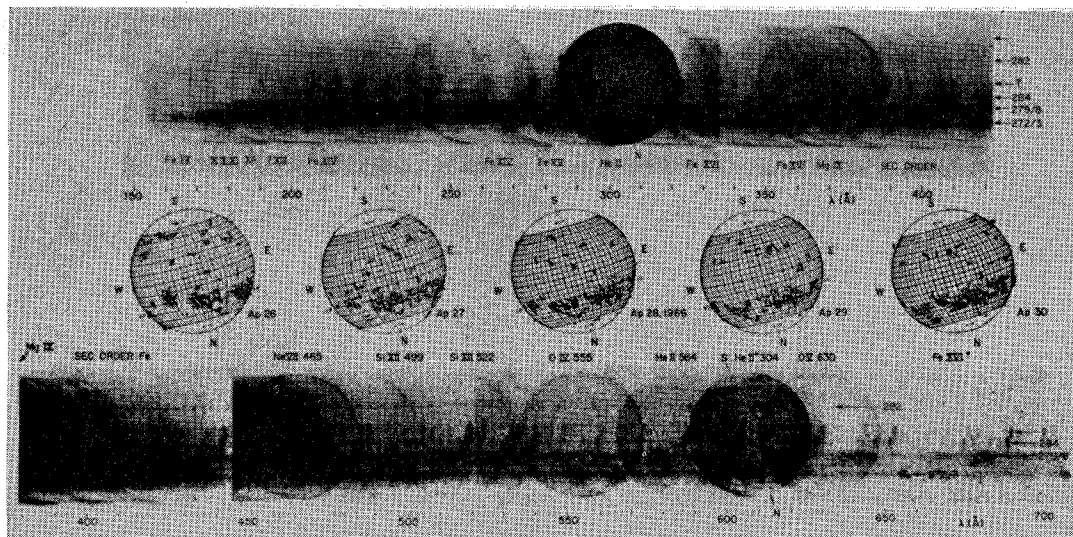
第 14 図 OSO-第 4 号から送られてきたヘリオグラム (右上 Lc: 897A, 左下 OVI: 1032A, 右下 MgX: 625A) および H_{α} (左上)

この領域で著しいことは, 電離ヘリウム He II による 304A の強い輝線の外に, 高次に電離した鉄やマグネシウム等のコロナからの輝線が認められ, それらがコロナの活動度に応じて強くなったり弱くなったりすることである。

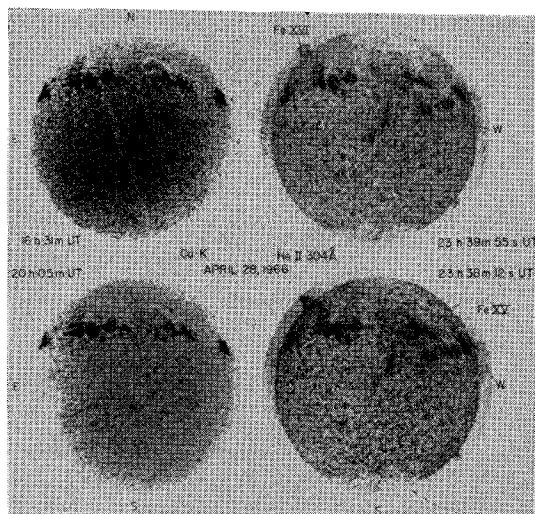
この領域でヘリオグラムを撮ると, 第 16 図でわかるように, 彩層の線である He II (304A) によるものは丸く写るが, しだいにコロナへと移る部分からの輝線によるものは丸い太陽像に写らなくなり, コロナコンデンセーション (コロナコンデンセーションに関しては, たとえば天文月報 1967 年 3 月号に椿都生氏による解説が



第 15 図 130A~60A 太陽スペクトル
(上) Hinteregger 式光電分光計によるもの
(下) 写真



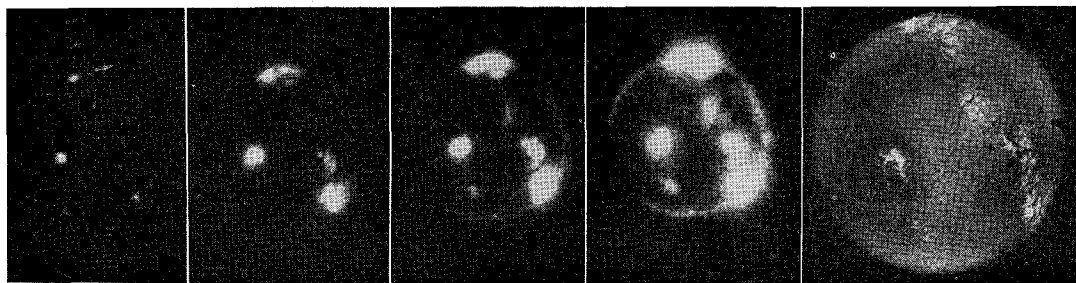
第 16 図 700 Å~200 Å のヘリオグラム

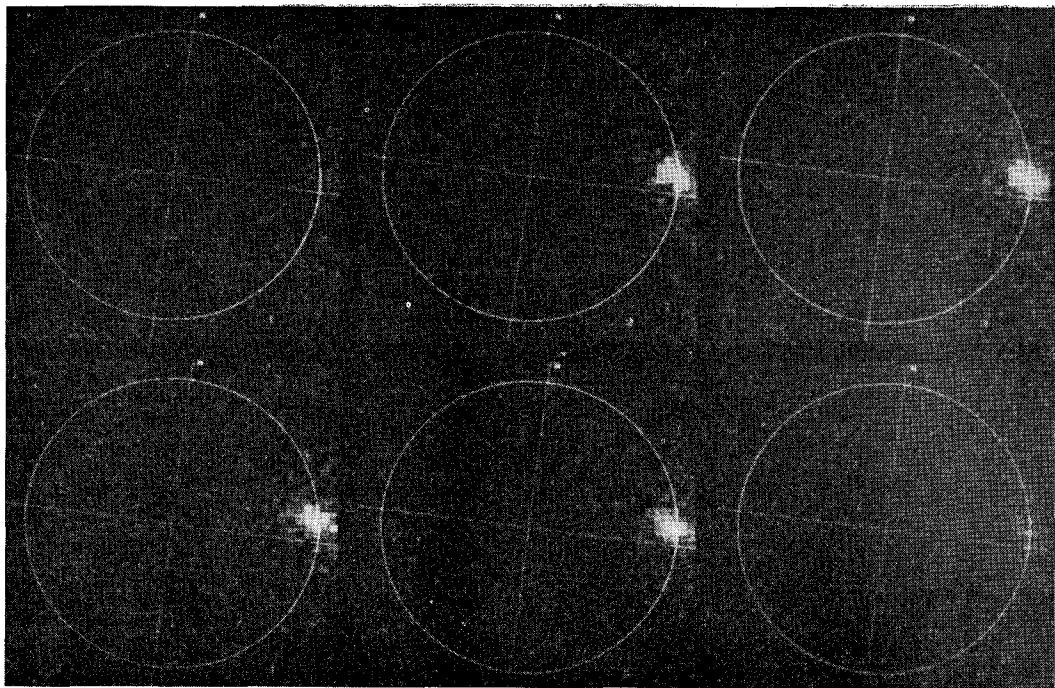


第 17 図 Ca II-K (3934 Å) (右側の 2 つ) と He II (304 Å) (左側の 2 つ) によるヘリオグラム

ある。) だけが明るい点になってくる様子がよく見られる。

現在までに得られている場所的な精度が最高の 10 秒程度の He II によるヘリオグラムを当日の Ca II-K によるものとくらべてみると (第 17 図), 全般的なブラージュの様子はよく似ているが, よく見ると一致しないものもあるし, また K 線のものの方が中心周縁強度変化が著しく, He II は太陽の両極を除いて割合に一樣で, 極めて縁近くで明るさが増しているようであるが, これは精度ギリギリの話であるので将来の問題として残るであろう。第 16 図でわかるように, このような光学系では近所の輝線による像の影響があって太陽面上の細かな模様を調べるにはあまり便利とはいえないので, 波長の単色性については少々まじったもので我慢してもよいから, とにかくコロナの出す光だけでヘリオグラムを得ようとする工夫が, 適当なフィルターと結像系の組み合わせによって考えられた。その光学系にはピンホールに改

第 18 図 透過域をかえたヘリオグラム. 右から左へ Be, Al, Ti, Makrofol, H α



第22図 1967年10月28日のフレアーに伴うX線ヘリオグラムの変化の様子 (OSO-第4号)

この領域では前節のヘリオグラムでのべたように、コロナ全体の輻射よりもその活動的な部分つまりコロナコンデンセーションが対象となる。OSO第4号に搭載されたX線望遠鏡によるヘリオグラム（透過域 3~18A, 分解精度約1分）はこのようなコンデンセーションが太陽と共に自転している様子を示している。（第20図）すなわちこの領域は太陽活動度と共に大きく変動することが察せられたと思うが、特にフレアー時には著しい。OSO-第3号に搭載されたBragg式分光計が1967年3月22日に重要度2bのフレアー時におけるこの領域の変動を捕えた資料を第21図に示してある。これらの資料や同じくOSO第3号に搭載された7.7~210 KeVの硬X線測定器による資料などを加味して、フレアー時には数千万度に相当するエネルギーを持った現象を伴っていることが確実性を増した話などが、先日東京において開かれたCOSPAR総会に付随して開かれたフレアーシンポジウムで報告された。

OSO第4号に搭載されたX線ヘリオグラムが、1957年10月28日に重要度1のフレアーの前後を捕えた時の資料を第22図に示してある。上側左端はフレアー発生前で中央が発生時、右端はそれから20分後、下側の左端から順に30分後、40分後、100分後とフレアー前後数時間にわたるコロナの消長の様子を見事に捕え、その最大強度は20倍にも達したとのことである。

3. おわりに

以上眺めてきたようにこの約20年間に大気圏外から

の太陽極端紫外領域の観測が驚異的な進歩をとげたとはいえ、地上からの太陽観測が不必要になってしまうことを意味するのではない。太陽の観測を専門とする新しい型の望遠鏡が世界各国で次々と計画され作られていくのはこの点の事情を有力に物語っているといえよう。太陽物理学も特にその微細な構造を調べるのに非常な精力が注がれていることは、たとえば天文月報本年4月号石田五郎氏による「岡山・きょうこのごろ」や6月号牧田貢氏による「太陽直接像の観測」などからも察せられるであろう。ところが地上で観測する限り、大気の厚い層のゆらぎがこの細かな部分を調べることに大きな障害となっているのならば、そしてまた紫外領域の観測に必要であるならば、地上で用いられるような大型の望遠鏡や分光器を宇宙空間に持ち出してはどうかということを考えるのは至極もっともなことである。そこでアメリカではATM (Appollo Telescope Mount) という計画の下に口径80cm, 有効焦点距離60mという大きな望遠鏡を宇宙空間に持ち出して、0.15秒（太陽面において約100kmに相当する）の微細構造やそのスペクトルを調べるために観測者が交替でかけるといった夢のような話が着々実行段階へと移されている。OSO-計画はあとまだ3つが残っているとのことであるが、その計画が終わる1970年代には、このATM計画による資料が続々と入手され始めているのではないだろうか。そのときにはここにのべた事柄のかかなりの部分は古くなり、また新しく書き改めなければならないのではあるまいか。