

天文学国際共同観測専門委員会（天文学研究連絡委員会）
報告

一日食専門委員会の果たした役割と今後の日食観測の課題
について－

平成9年6月20日

日本学術会議

天文学国際共同観測専門委員会
（天文学研究連絡委員会）

本報告は、第16期日本学術会議天文学国際共同観測専門委員会（天文学研究連絡委員会）の審議結果を取りまとめて発表するものである。

天文学国際共同観測専門委員会（天文学研究連絡委員会）

- | | | |
|-----|-------|-----------------------------|
| 委員長 | 椿 都生夫 | （滋賀大学教育学部教授） |
| 幹事 | 末松 芳法 | （国立天文台太陽物理学研究系助教授） |
| | 仙石 新 | （海上保安庁水路部企画課主任研究官） |
| 委員 | 杉本大一郎 | （第4部会員、放送大学教授） |
| | 秋岡 眞樹 | （郵政省通信総合研究所平磯宇宙環境研究センター研究官） |
| | 磯部 琇三 | （国立天文台光学赤外線天文学研究系助教授） |
| | 一本 潔 | （国立天文台太陽物理学研究系助教授） |
| | 川上 新吾 | （大阪市立科学館学芸員） |
| | 北井礼三郎 | （京都大学大学院理学研究科・理学部附属天文台助手） |
| | 白木 正規 | （気象庁観測部測候課長） |
| | 瀬戸 正弘 | （東北工業大学通信工学科教授） |
| | 中島 遑 | （海上保安庁水路部航法測地課長） |
| | 花岡庸一郎 | （国立天文台電波天文学研究系助手） |
| | 山本 哲生 | （北海道大学大学院理学研究科・理学部教授） |
| | 湯元 清文 | （九州大学理学部教授） |
| | 小川原嘉明 | （宇宙科学研究所宇宙圏研究系教授） |

1. はじめに

日食観測は世界のさまざまな国において実施する必要がある、天文学研究において国際協力を必要とする代表的な分野であったが、近年、天文学の多くの研究分野で国際的な観測活動の必要性が急増してきた。このため、日食観測事業だけにとらわれず天文学全分野での国際的観測事業の諸問題を審議できるよう、専門委員会の名称を天文学国際共同観測専門委員会と改名し、専門委員会の近代化を図ることになった。

この節目に当たり、また委員の構成が大きく変わるに際し、今までの日食専門委員会の果たしてきた役割と、今後の日食観測の課題を総括し、新委員会への円滑な移行に役立つ資料とする目的でこの報告を提出する。

2. 日食専門委員会の果たした役割

日食観測の準備・遂行を円滑に進めるためには、皆既日食帯の気象予報、地理的環境、政情、太陽－月位置関係、皆既時間の正確な予報、月縁の正確な形状予報、気球・ロケットなどの飛翔体の利用可能性などの実用的な情報が必要である。また、観測を有効にするためにはサイエンス面からの観測方法の検討も慎重に行う必要がある。日食専門委員会はこのような情報の収集・交換、議論検討、調整をするために、関係する複数の省庁・研究分野からの委員により構成され、実質的にこの役割を果たしてきた。

皆既日食は多くの場合、海外の辺鄙な場所での観測を余儀なくされるが、このような場所における実際の観測においては、観測準備・本観測を効率よく行うために、観測グループ間の連携、情報交換が必要である。このため、日食専門委員会では個々の観測グループをまとめて日本観測隊とし、観測隊長を任命することで、関係諸国の政府・研究機関との連絡、情報交換をスムーズに行えるよう、調整役を果たしてきた。

同時に、個々の観測グループの観測目的・方法、また、観測結果を発表、議論する場も提供してきた。

以上のように、日食専門委員会は複数の省庁にまたがって、日食観測事業の円滑な推進役としての重要な役割を果たすと同時に、さまざまな研究グループの日食観測研究を総合的に吟味検討する場を提供してきたわけである。

3. 日食観測の成果と今後の課題

日食観測を考える上でも当然ながら科学的な意義の検討は重要である。

スペースからの観測時代を迎え、今まで皆既日食時以外では観測の難しかった太陽コロナもX線波長などで日常的に観測されるようになり、日食観測の重要性が問われている。以下は、日食専門委員会委員がまとめた冊子「皆既日食時における観測：その現代的意義と今後の研究課題について」（添付資料）

を要約したものである。スペース時代になっても、可視・赤外光での高分解能でコロナ観測の可能な皆既日食観測は相補的な物理情報を与え、その重要性は失われていないこと、また、皆既日食は太陽観測以外でも、暦、惑星物理、地球高層大気物理分野において貴重なデータ収集の機会を与え重要視されている。

3. 1. 日食観測で得られた主な成果

3. 1. 1 太陽物理学分野

太陽物理学においてはスペースからの紫外線、X線による観測に先立ち彩層、コロナの基本的な構造・物理状態は皆既日食時に既に観測されている。例えば、皆既日食観測で蓄積されたデータの解析から、内部コロナは細かなループ構造をもつことが明らかにされた。更に、このループ構造には、色々なタイプのものがあることが判明してきた。活動現象にともなって現れる高温ループの芯に対応する部分に、より低温のループが存在することが見いだされ、一方、低温ループ(100万度)と高温ループ(200万度)が必ずしも同軸ではなく、互いにずれた位置関係を示すループ構造が多く存在することもわかってきた。コロナループが多様な構造を示すという結果は、コロナの加熱機構研究の基礎的な観測的成果であり、大気圏外からの軟X線によるコロナループの観測研究の先駆けとなった。この他、光球上層の詳細な大気構造、プロミネンスの物理構造、コロナ低部での低温・高温大気の褶曲構造を明らかにしたこと、コロナの大局的形状の周期的変化を説明する三双極子磁場モデルの提唱など、日本の観測隊の果たした役割は大きい。

3. 1. 2 惑星間空間物理学分野

太陽系惑星の元となったと考えられる惑星間塵の性質（組成、サイズ分布）を明らかにするため、気球や高山での赤外線、偏光観測が行われてきた。惑星間塵が多く存在すると考えられる太陽中心から4倍太陽半径以遠のコロナは暗く、この観測には、明るい内部コロナが散乱光として効いてくるため高所（標高5000m以上）での観測が必要で、日食観測でも最も難しいものの一つである。日本観測隊はこの困難に過去2回挑戦し、塵の輪が太陽周期（約11年）に応じて生成・消滅されるらしいこと、塵の主成分がカンラン石で、サイズが 100μ 程度と比較的大きなものであることなど、画期的な成果を上げている。

3. 1. 3 超高層地球物理学分野

1958年10月12日に南太平洋のSuvarrow島で起こった皆既日食時に、東北大学の加藤愛雄教授グループが、日食効果として最大12nT程度の微小地磁気変化を世界で初めて観測したことは、我が国が世界に誇る画期的な日食観測成果の一つである。この発見により、日食効果による電離層E層の電気伝導度の減少が58%にも及んでいることが判明した。その後、過去10回の皆既日食中の地磁気観測を重ね、皆既日食中の電離層電流の形状変化、電気伝導度の変化、変化の時定数など電離層パラメータについて貴重なデータが蓄積され研究が進められている。

3. 1. 4 天体暦

海上保安庁水路部では、天体暦の検定のため、皆既日食を利用して太陽・月の相対位置を正確に求める観測を継続して行っている。日食観測は現在最も精度が高く、原理も単純で信頼性が高いことが知られている。例えば、子午環による観測では、1回あたりの角度の測定精度が0.3秒程度であるのに対し、日食観測では約0.02秒の精度が得られている。長期に渡り同一の観測・解析手法を継続しており、副産物として、太陽の半径が76年の周期で振幅約0.2角度秒で変動している証拠が得られている。

3. 2 日食観測の現代的意義と今後の研究課題

3. 2. 1 太陽・物理学分野

スペース時代に入っても、皆既日食時における、低散乱光による高測光精度、月と太陽の相対運動を利用した微小空間スケール構造の研究が可能であることは突出したものであり、現代でも意義を失っていない。これらの特徴と、大型の装置を利用して、スペース観測と相補的に以下のテーマが研究課題として考えられる。

(1) 光球から彩層にかけての非一様温度構造大気の説明：

波長 $4\sim 5\mu$ 近傍の CO 分子線などの観測により、温度4000度台の大気が存在していることが確認された。これは彩層加熱と関連して非常に興味ある観測で、日食を利用して、太陽縁での詳細観測により、高さ方向の大気構造の非一様性を調べる必要がある。

(2) 低コロナ域の温度構造、太陽風の加速領域の研究：

コロナの電子温度を求める最も確実な方法は、電子の熱運動の大きさを直接測ることである。これはコロナの連続光スペクトルの形に見いだすことが出来る。同時にスペクトルの波長のずれから速度の情報も得ることが出来る。この観測には紫外域で約0.1%の側光精度が必要で、大型の装置が望まれる。

(3) コロナ磁場の直接観測：

コロナ輝線は線幅が広いため可視域ではゼーマン効果による磁場測定が難しいが、赤外域ではこれが可能になってくる。最近 S IX $\lambda 1.25\mu$ 、Si X $\lambda 1.43\mu$ といったコロナ輝線が赤外観測により確認され、偏光観測による磁場測定が期待される。

(4) 超微細コロナ構造のダイナミクス：

最近の大型望遠鏡を利用した観測から、コロナ中に1秒角以下の構造が運動している様子が見つかり、コロナ加熱、太陽風加速などを解明する手がかりになると考えられている。この観測はスペース観測では難しく、皆既日食時に、月と太陽の相対運動（約0.4秒角/s）を利用する、移動可能な大型望遠鏡を用いた観測を行う必要がある。

これらの課題達成には、大部分、大型の望遠鏡（1mクラス以上）と赤外線域観測技術が必要であり、且つ移動可能な装置が要求され、観測場所の提供だけでなく装置においても国際協力、分野間協力を今後とも重視していく必要がある。

3. 2. 2 惑星間空間物理学分野

惑星間塵の成分同定、太陽の塵の輪の存在確定（あるいは生成・消滅機構の解明）は重要テーマで、高山（5000 mクラス）、気球高度での観測を今後とも引き続き継続して行う必要がある。

3. 2. 3 超高層地球物理学分野

日食効果による超高層大気的环境変化を利用し、最新のハイ・テクノロジーを用いることにより、以下のような新しい研究課題を遂行していく必要がある。

（1）地磁気脈動観測：

最近の観測機器の性能の向上にともない、観測対象が地磁気脈動の日食効果観測に移行しつつある。地磁気脈動とは、地磁気の短周期($T=0.2\sim1000$ 秒)、微小（低緯度での振幅 1nT以下）変動のことである。太陽風と地球磁気圏との相互作用で励起された電磁流体波が、磁気圏内を複雑に伝播したのち、電離層で電流を誘導し、地上で地磁気脈動として観測されている。特に、皆既日食時に陰とそうでない地域でネット観測される周期10～45秒の脈動の波動特性から、磁気圏-電離圏-地上の電磁気的な物理結合過程が解明されるはずである。

（2）リモートセンシング観測：

最近の衛星通信やレーダ技術の進歩は、日食の現代的意義を拓げつつある。地上の Ω 局からのVLF電波やGPS衛星の基準電波が皆既日食の陰の部分を通過した時に、地上の離れた所で観測される受信波の振幅や位相変化を検出することによって、電離層の密度変化や光電離時定数を測定することが可能である。また、MF（中波）レーダによる高度30～80kmの大気風速ベクトルの観測が近年容易になったので、日食領域の大気風速ベクトルの高度分布変化や大気・電離層擾乱（重力波）の測定から日食時の大気力学の研究の進展が期待される。

（3）昼間大気光観測：

微弱な大気光を昼間の強烈な青空の背光のもとでは検出・観測することにいろいろ困難がある。皆既日食時に、昼間観測不可能な、例えば、ナトリウムの5890から5896 Åの輝線を観測することにより、大気中のナトリウムの起源が宇宙塵にあるのかそれとも海水にあるのか、また、光化学反応と時間変化から中間圏の化学と力学の相互作用の解明の糸口が得られるはずである。次に、酸素分子の 1.27μ 放射観測から、高さ

60km以上の中間圏のオゾン密度の推定が可能であり、最近大きな問題になっている地球環境変動の視点からも重要な研究テーマであると言える。

3. 2. 4 天体暦

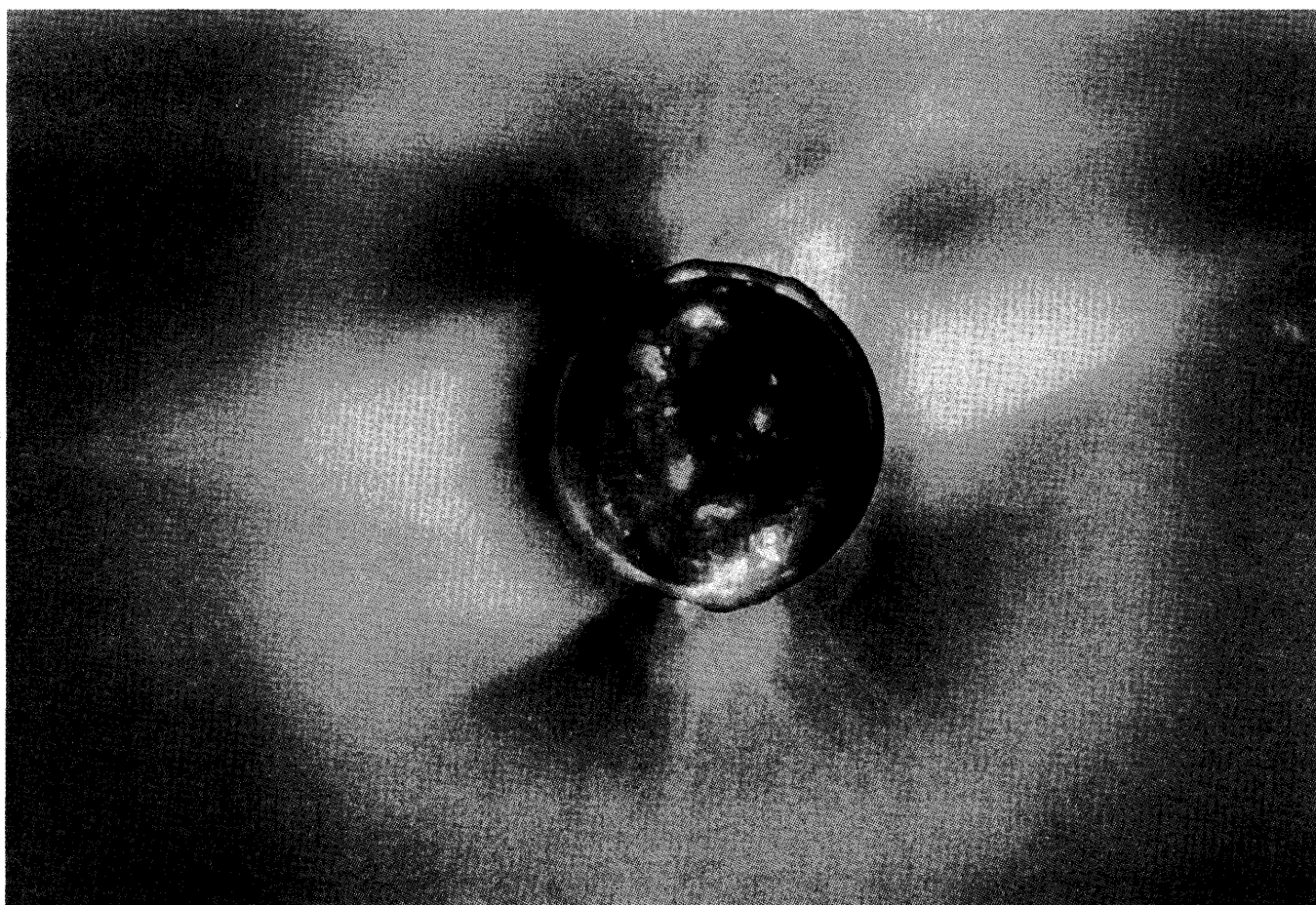
成果の章で述べたように、太陽の位置測定方法として日食観測は、太陽と月の縁の接触時刻の計測という原理としては単純であるが、現在でも最も精度が高く、信頼性が高いものである。この利点を利用して、今後とも

(1) 暦改訂のための基礎データ、

(2) また、同時に、太陽直径精密計測によりその変動の証拠データ、
を得、研究する手段として、引き続き日食観測を継続していく必要がある。

皆既日食時における観測：その現代的意義と今後の研究課題について

第16期 日食専門委員会（天文学研究連絡委員会）



1991年7月11日皆既日食時のコロナ。ロケット観測による軟X線コロナ像（太陽面）と白色光コロナを合成したもの。上が東。S. Koutchmy氏提供。

はじめに

太陽物理学はもちろん、位置天文学、地球物理学、そして惑星間空間物理学など、さまざまな学問領域の発展に、日食観測はきわめて重要な役割を果たしてきた。日食、とりわけ皆既日食が、それらの研究上またとない貴重な機会を提供してくれるからである。そのため、ひとたび好条件の日食が起こるとなると、大洋上の孤島であれ、広大かつ過酷な環境の砂漠であれ、世界各国から多数の研究者が集まって観測を競ってきたのである。

このように、世界のごく限られた地域でしか起こらない日食観測の遠征を行うに当たっては、事前に相当な準備が必要なのはいうまでもないことであって、現地における交通・運輸・天候・政治・生活状況などについての、詳細な調査と現地における政府機関などとの交渉が必須である。このような活動を効率よく行うとともに、わが国から遠征する各機関相互の学術的な調整・検討をも行う目的で、日食専門委員会が設けられ、事実現在までにきわめて重要な役割を果たしてきた。

ところで、この間に、「スカイラブ」、「ひのとり」、そして「ようこう」に代表されるような、スペースからの観測が精力的に行われるようになり、太陽外圏大気である彩層やコロナにおける活動現象が日常的に把握できるようになった現在、もはや日食の学問的意義は無くなったのではないかという声が聞かれるようになったが、事実はどうであろうか。答はノーである。スペースからの観測に代表される新しい観測方法の進展によって、一部の領域にあっては、確かに、日食に依らずとも観測できるようになったのも事実であるが、本文の各章に述べられているようなお多くの領域において日食観測の学問的意義は継続しているのである。

本報告は、これらの点に関する、本委員会における検討結果をまとめたものである。関係各位が本問題に対してご理解いただく上での一助となれば幸いである。

なお、天文学のさまざまな分野において、日食観測と同様、国際的な共同活動の必要性が急速に増大したのも事実であって、この点に目を向け、従来の日食委員会の機能を受け継ぐことを前提に、さらに広い見地から天文学全般における国際的諸問題を検討できるような委員会に本委員会を改組することにしたことを追記しておく。

(日食専門委員会委員長 椿 都生夫)

目 次

1	太陽物理学と日食観測	4
1.1	京都大学隊によるこれまでの成果とこれからの日食観測	4
1.2	皆既日食における太陽の活動現象の研究	6
1.2.1	コロナの温度構造の直接観測	6
1.2.2	月の移動を利用した高空間分解能観測	7
1.3	太陽コロナの温度・密度、太陽風速度の観測	8
1.4	地上での皆既日食観測の利点と今後の観測方針	12
1.4.1	序	12
1.4.2	皆既日食の意義	12
1.4.3	今後の皆既日食観測	13
2	惑星間空間物理学：惑星間塵、太陽の輪の観測	13
2.1	はじめに	13
2.2	粒子のふるまい	14
2.3	太陽の塵の輪の観測	14
3	地球物理学：地球磁気圏、超高層大気の物理	16
3.1	外部コロナの太陽周期変化とその地球磁気圏への影響	16
3.2	超高層物理学分野における日食観測	19
3.2.1	今までの成果	19
3.2.2	日食の現代的意義	20
4	天体暦：太陽位置の精密計測と太陽半径変動	21
4.1	太陽位置の精密計測	21
4.2	観測方法	21
4.3	これまでの観測成果	21
4.4	太陽半径変動の計測	21
A	今後の主な皆既日食	24

1 太陽物理学と日食観測

1.1 京都大学隊によるこれまでの成果とこれからの日食観測

希有な天体現象である日食は、通常見るできない太陽彩層・コロナの素顔を我々に表示してくれる。皆既時には、散乱光の影響がなくなり、微かなコロナ放射を高い測光精度で観測することが可能となる。また、太陽と月の相対位置が高い精度で求めることができ、これを利用して高い空間分解能で構造を分解して解析することができる。ここでは、これらの特質を活かして京都大学が行ってきた日食観測の成果を、近年のものを中心に簡単にまとめることにする。また、それを踏まえてこれからの日食観測の意義について述べることにする。

京都大学では、主として理学部附属天文台が近年の日食観測を行ってきた。その時々観測目的、日食条件、太陽活動状態に応じて、望遠鏡および観測装置を開発・製作してきた。また、観測技術の進展に応じて装置の改善・高精度化・空間分解能の向上を計ってきた。例えば、シーロスタット望遠鏡、フラッシュスペクトル分光器、スリットスペクトル分光器、スロット分光器、多波長単色光像撮影望遠鏡等である。

これらの装置で観測されたデータを精密測光測定を行うことによって、太陽外層の彩層・コロナの構造及び物理状態について多くの新知見が得られた。まず、数回の皆既日食データの蓄積の解析から、コロナは大規模な構造をもつばかりではなく、内部コロナにおいては、より細かなループ構造をもつことが明らかにされた。そして、磁場によって形成されるこのループ構造には、色々なタイプのものがあることが判明してきた。活動現象にともなって現れる高温ループの芯に対応する部分に、より低温のループが存在することが見いだされた(1973、1980 日食)。一方、低温ループ(100 万度)と高温ループ(200 万度)が同軸ではなく、互いにずれた位置関係を示すループ構造が多く存在することも、最新の高分解能観測から得られた(1991 日食、図 1 参照)。コロナループが多様な構造をしめすという結果は、コロナの加熱機構の研究の基礎的な観測的成果であり、最近年の大気圏外からの軟 X 線によるコロナループの観測研究の先駆けともいえる。

また、別の面からも日食観測から、太陽外層加熱の問題に重要な結果が得られている。太陽彩層とコロナが、平行平板モデルで記述されるような形で層を接しているわけではなく、コロナの高温ガスと彩層の低温ガスがそれぞれ微細構造を形成しており、それらの構造が混在するような形になっていることである。言い換えれば、従来考えられていた高さより更に低い大気に高温のコロナガスが存在すること、およびコロナ・彩層間の遷移層が一層の平板ではなく極めて複雑に褶曲した構造となっていることを示している。この結果は、太陽外層の加熱を考える上で重要であるだけでなく、彩層上部のガスの運動状態さらには遷移層ガスの励起状態、運動状態、物理状態を解明する際に考慮すべき大事な観測事実である(1970、1973 日食)。この他、日食時の連続光強度の時間変化から太陽光球層から彩層部の標準大気モデルの改訂に寄与する基礎データ等も日食観測から得られている(1970、1973 日食)。

以上が、これまでの日食観測で得られた成果の概略である。皆既日食の観測は、太陽物理学に重要な問題の一つであるコロナ・彩層の加熱機構の解明に、貴重なデータを提供してきたし、これからも新しい発見をもたらすであろうと思われる。既に、幾度となく日食観測はなされており、新たな結果は期待できないと考える人もいる。しかし、近年の観測技術の進展は格段の早さを示しており、この新技術を日食観測にもちいれば、新事実がもたらされることは十分期待できる。例えば、赤外域のコロナ輝線の観測は、コロナガスの密度を求める有用な手段であることは、以前から指摘されてきているが、赤外感光素子の品質の問題のため、十分な結果が得られなかった。ところが、近年良質の赤外感光素子が開発提供されてきており、これからの日食観測におい

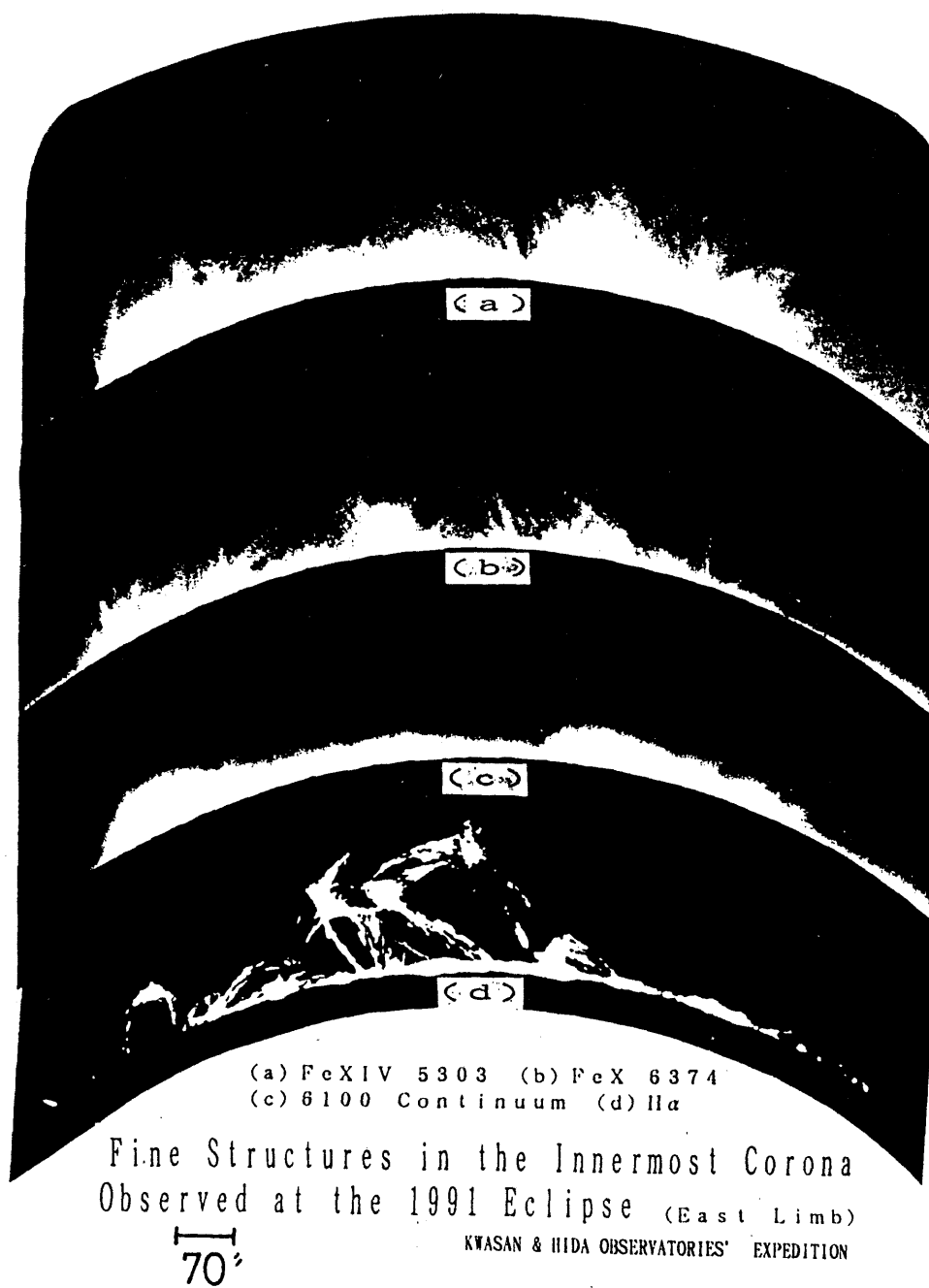
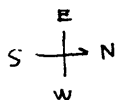


図 1: 1991 年 7 月 11 日メキシコ皆既日食時の東縁コロナ像。上より Fe XIV $\lambda 5303 \text{ \AA}$ 輝線像 (約 200 万度コロナ)、Fe X $\lambda 6374 \text{ \AA}$ 輝線像 (約 100 万度コロナ)、 $\lambda 6100 \text{ \AA}$ 連続光像、H α 像。

ては、赤外コロナ輝線の観測は優先的に試みるべきものである。

また、これからの日食で観測すべきものとして、コロナの磁場分布の導出がある。これはコロナの加熱問題と密接に関係する問題であり、太陽物理学の重要課題の一つである。大気圏外からの軟X線観測でコロナループは磁場によってその振る舞いが規定されていることが示唆されてきているが、コロナループの磁場を観測的に求めたものは未だ無いといってもよい状態である。これは、共鳴散乱およびゼーマン効果によるコロナ輝線の偏光度、あるいはハンレ効果およびゼーマン効果によるプロミネンス輝線の偏光度が小さく従来の測光観測装置では精度良く測定できなかった為である。しかし、近年の太陽光球磁場観測で開発され、培われてきた高精度偏光測定手法は、コロナ磁場測定に必要な0.1%の測光精度に達しつつある。実際、地上コロナグラフを用いてコロナ磁場を測定する試みが始まっている。皆既日食時には、地上コロナグラフよりも散乱光レベルは格段に低く、より精度良い偏光観測が可能となり、磁場配位、強度を正確に求めることができる。と期待できる。

以上、太陽物理学の観点から、これからの日食での観測主題の提案とそれから期待される成果について簡述した。これらの成果は、太陽外層のみに限らず、広く恒星外層の物理を解明する基礎データにもなると考えている。

尚、この文章を書くにあたってお助け戴いた、黒河宏企氏（京大・花山天文台）、川上新吾氏（大阪市立科学館）に感謝します。

（京都大学・理学部附属飛騨天文台・北井 礼三郎）

1.2 皆既日食における太陽の活動現象の研究

1.2.1 コロナの温度構造の直接観測

太陽のコロナは、極めて低密度であるため、明るさが光球の百万分の一程度しかなく、地上では皆既日食の時に光球が隠された時と、人工的に光球を隠したコロナグラフが主な観測手段である。一方、同時にコロナは数百万度という高温プラズマであるため、地上では観測できないX線・極端紫外線を強く放射しており、人工衛星・ロケットによるスペースでの観測は、コロナを研究する重要なデータを供給してきた。

太陽の活動現象は、可視光で見える黒点やフレアなど、太陽表面の現象として古くから認識されてきた。太陽活動現象の研究は晩期型の恒星に普遍的な現象を知る上でも、表面の磁場中のプラズマの振舞いを知る上でも、また惑星間空間でのさまざまな現象の要因を知る上でも、重要な意味を持っている。これら活動現象は現在では実際のエネルギーの蓄積・解放はコロナ中の磁場によるものであることがわかっている。そもそもコロナという高温のプラズマをつくりだす上で、このコロナ中でのエネルギー解放が重要な要因になっている。

結局、太陽の活動現象を解明するためにはコロナの直接観測が必要である。太陽の活動領域では磁力線が低い高度で閉じており、このようなコロナ底部の現象はコロナグラフでの観測は困難な面がある。そこで、コロナ中の活動現象は、飛翔体によるスペースでの観測と、地上からの皆既日食における観測によって研究が進められてきた。皆既日食においては、コロナ中の総電子数の分布、すなわち温度によらないプラズマの分布を表す白色光の像と、ある特定の温度のプラズマの分布を表すコロナ輝線の単色像を比較することで、コロナプラズマの温度構造の研究が進められてきた。例えば、活動領域のコロナループの温度構造については、図2に示すように、中心部分が低温になっているコアシェルの構造が明らかになり (Hanaoka et al. 1988) また、フレアに

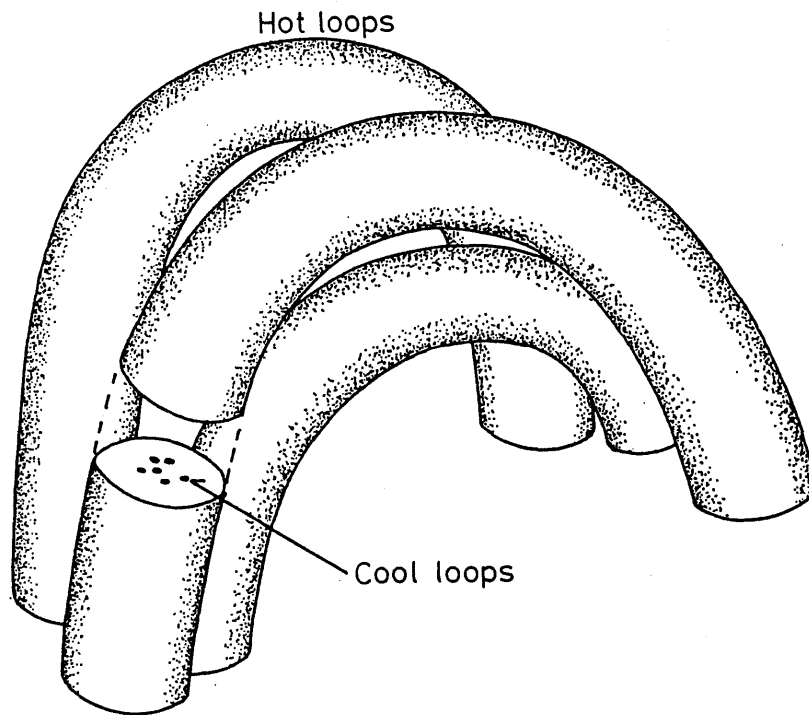


図 2: 活動領域のコロナループの構造。高温のループの中に細い低温のループが存在する。

ついても、図 3 に示すように、磁場のカスプ状構造と、その中での階層状の温度構造が明らかになった (Hanaoka et al. 1986a)。

現在、太陽物理学においてこのようなコロナプラズマの観測は極めて重要視されており、人工衛星による観測という大規模プロジェクトとして盛んに行なわれている。現在稼働中の衛星として「ようこう」「SOHO」があり、今後数年の間にさらに新たな衛星打ち上げが計画されている。衛星による観測は、日食と異なり連続的にコロナの変化を追跡できる利点がある。しかし、今後の皆既日食の観測では、地上からの観測であることの利点すなわち

- (1) 技術的に充分開発されている観測装置を使用できる、
- (2) ある程度大型の装置も使える、
- (3) 低予算で実験的・先進的な観測を行なうことができる、

といったことを生かして、将来のより大きなプロジェクトへの道を開く先進的な観測が行なわれることが期待される。例えば、コロナの精密な分光観測や、赤外線観測などが近い将来の重要なテーマになってくるであろう。

1.2.2 月の移動を利用した高空間分解能観測

太陽の表面現象の観測の中でも、スペースからの観測と競合するものばかりではなく、皆既日食の特異性を利用した観測も行なわれている。日食中に月が太陽に対して相対的に動いていくが、その速度を太陽表面での速度に換算すると約 300km/s である。すなわち、1 秒の時間間隔で撮影された画像の差は、太陽表面で 300km の幅の中の構造に相当する。300km というのは最近のスペースからの直接観測でも実現困難な分解能であるが、日食時においてさらに時間分解能をあげて観測すると、同時に空間分解能をもっとあげることができる。この空間分解能は月の運動方向、

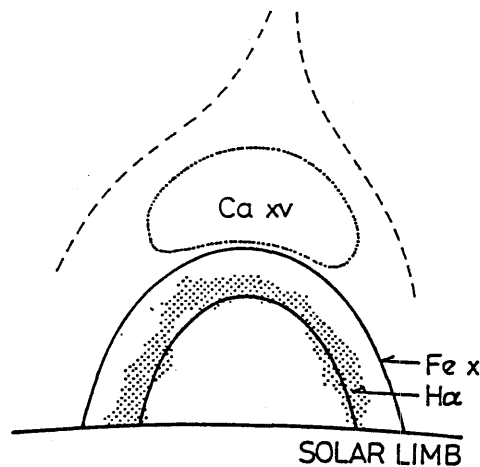


図 3: 日食観測で明らかになったフレアループの構造。下から順に、 $H\alpha$ 線で見える 1 万度のループ、Fe X 輝線で見える 100 万度のループ、Ca XV 輝線で見える 350 万度のループがあり、最も外側にカスプ構造をした磁力線が存在する。

概ね太陽表面の垂直方向の分解能に相当する。太陽大気は、光球とコロナにはさまれた薄い彩層と遷移層で急激に温度・密度が変化するが、狭い範囲で変化するため、この部分の観測には高い空間分解能を必要とする。皆既日食は高空間分解能を実現するための極めて有効な手段である。今までの皆既日食の観測から、コロナの最下部が、図 4 のように、100 万度のコロナと、1 万度のスピキュールが入り組んだ構造になっていることが確かめられている (Kanno et al. 1971; Hanaoka et al. 1986b)。彩層・遷移層はコロナの加熱機構を解明する上で重要であるが、観測の困難さからまだ十分にその構造が解明されているとはいえない。今後の日食観測の成果が期待される。

月の運動を利用して、時間分解能を空間分解能に変換することは、一般に空間分解能をあげることが困難な電波観測においても有効である。例えば Gary and Hurford (1987) は部分日食の時の、月による活動領域の食の観測で、望遠鏡の分解能以上の空間分解能での観測に成功している。

(国立天文台・野辺山太陽電波観測所・花岡 庸一郎)

1.3 太陽コロナの温度・密度、太陽風速度の観測

皆既日食は、太陽がちょうど月に隠れることによって空の散乱光が大幅に減少し、地上においても太陽の希薄な外層大気＝コロナを観測できるという点で、太陽研究にとっては非常にありがたい現象である。しかし、近年地上コロナグラフによる観測精度が向上し、宇宙飛翔体によるコロナの直接観測も行なわれる中、日食観測がその意義を問われるのは当然であろう。実際、いくつかの観測テーマについては日食はその中心的役割を他の観測手段に譲ったといえる。しかし、通常の地上観測では大気による強い散乱光のため、データの精度には尚厳しい限界がある。また、飛翔体による観測では、大型で複雑な装置を使えない、莫大なコストがかかる、などの理由から、先駆的な実験的観測を行うことは現実的に不可能である。したがって、現状においてはなお日食でのみ達成可能な価値ある学問的テーマがいくつかあると考えられる。ここではそのうちの 1 つを紹介したい。

太陽コロナの電子温度やガスの流れの大局的な空間分布を知ることは、コロナの加熱機構や

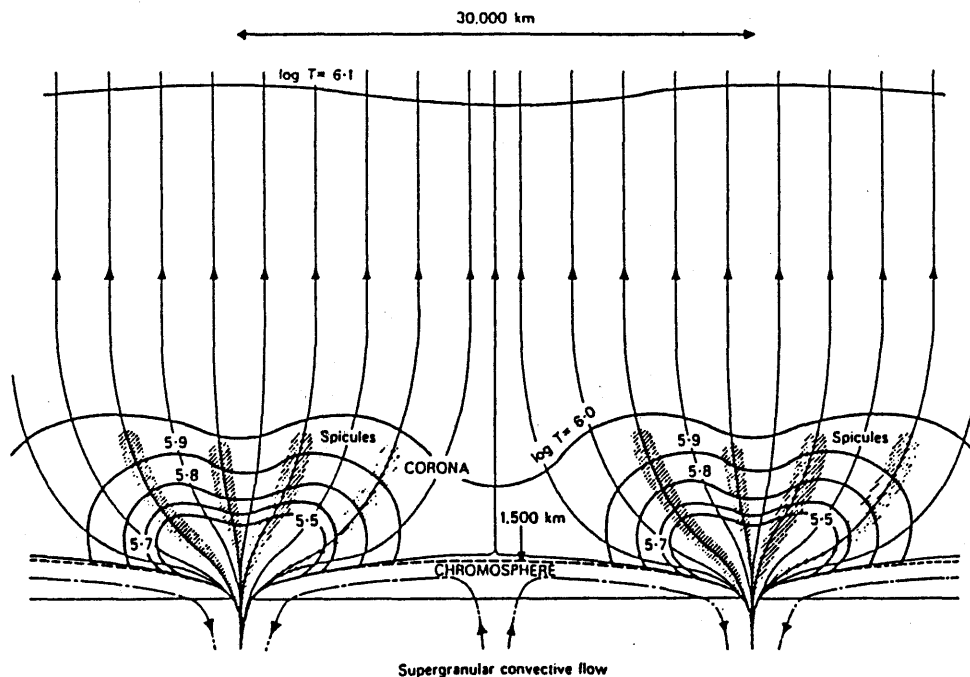


図 4: 光球から彩層、遷移層、コロナの構造の模式図 (Gabriel, 1976)。低温のスピキュールが高温のコロナ中に伸びている。

太陽風の起源を解明する上できわめて重要である。これまで、コロナの温度は様々な方法で測定が試みられてきた。例えば、密度の高さ分布より静水圧平衡を仮定して温度を求める方法、様々なイオンから出されるコロナ輝線の強度からイオンの電離温度を求める方法、輝線幅より原子の熱運動の大きさを求める方法、異なるエネルギーのX線強度比より求める方法、等である。しかしどの方法にも温度を導くためにそれぞれ特有の仮定が入っており、実際その結果にはいくつかの食い違いもあった。また多くの場合、明るい内部コロナしか測定できないのが現状である。

コロナの電子温度を求める最も確実な方法は、電子の熱運動の大きさを直接測ることである。そして、このような情報はコロナの連続光スペクトルの形に見いだすことができる。コロナの連続光は、コロナ中の自由電子が光球の光を散乱することによって形成されたものであるが、電子の熱運動が非常に大きいため、散乱時に受けるドップラー効果で光球スペクトルの吸収線が馴染らされてしまい、連続的なスペクトルとなる。しかし、吸収線のたくさん込み入ったところ、例えばCH分子バンドのある4300ÅやCa IIのH, K線を含む3850Åあたりには、電子の熱運動の大きさに応じた浅いへこみが尚残っていることが予想される(図5)。従って、コロナのスペクトルの形を精度良く観測することによって、我々はコロナの電子温度を高い信頼性で導くことができる。さらに、スペクトルのわずかな波長のずれは、太陽から流出するコロナガスの運動速度に関する情報をもたらしてくれる。

この効果に着目し、国立天文台は1994年11月3日におこった皆既日食を観測するため、南米チリへの遠征をおこなった。当日空にはあいにく薄雲が広がり、データの質としては当初目論んでいたものを得ることはできなかったが、ストリーマーやコロナホールを撮像することに成功し、上記の方法がコロナの温度診断に有効であることが示された。主な結果は、ストリーマーの温度はおおむね170万度であるのに対して、コロナホールは100万度程度であ

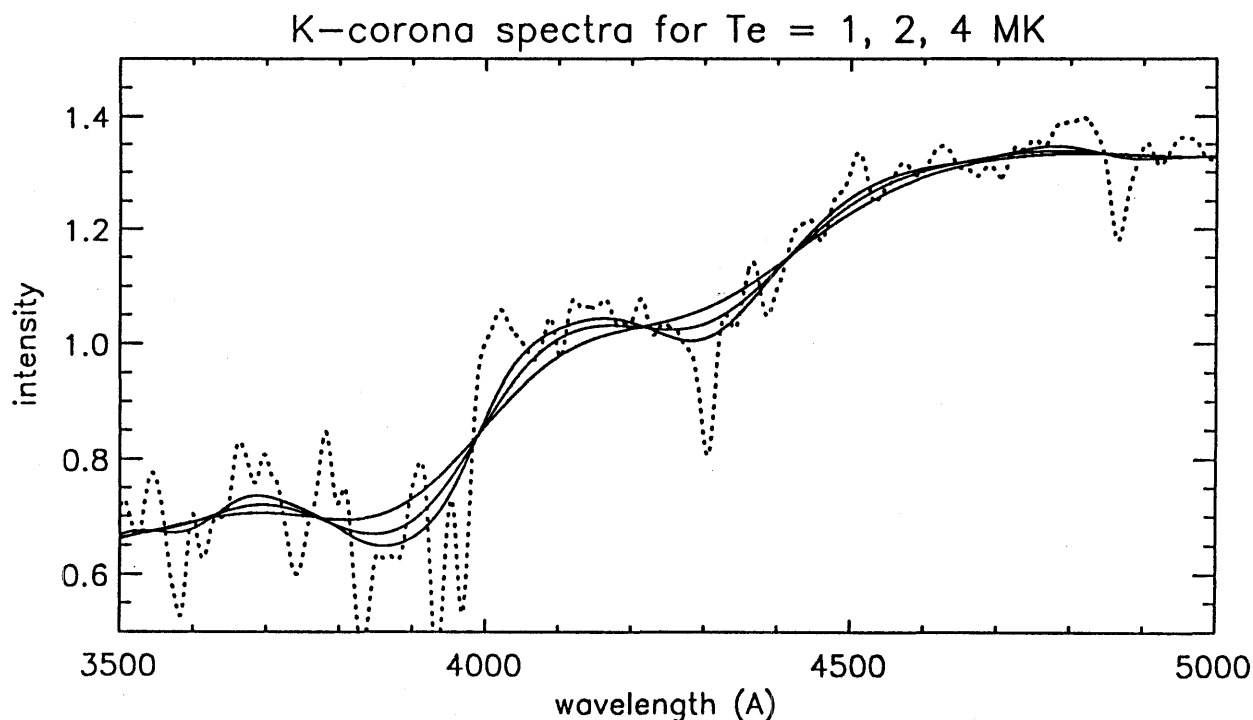


図 5: コロナの連続光スペクトル。3つのカーブは電子温度百万度，2 百万度，4 百万度に対応する。点線で光球スペクトルを示した。

ること、コロナホールでは温度が高さと共に上昇していること、等である（図 6）。また、ストリーマでは 1.1 太陽半径から 2.0 太陽半径の間に約 80km/s の太陽風加速がおこっている証拠が見いだされた。同診断法の有効性をはじめて確認したことは、この遠征で得られた大きな成果であると考えられるが、データとしては悪条件のもとコロナのごく限られた部分について観測がおこなわれにすぎない。今後さらに質の高い、またコロナのより広い範囲にわたるデータの取得されることが望まれる。

この観測を実現するための条件は、コロナの光を分光すること、および、十分に高い S/N （約 0.1%）を得ることである。大気の散乱光の影響を受ける地上の通常観測では、この S/N はとうてい達成できないものである。また、十分な口径の望遠鏡と分光装置をスペースに上げ、太陽をうまく隠して近傍のコロナを観測することは、現時点においてすぐに実現できるものではない。従って、コロナの大局的な電子温度を診断する上で皆既日食による観測は、現在最も現実的且つ有効な手段であると考えられる。太陽風の観測に関しては、現在飛翔体による直接観測や惑星間空間シンチレーションを用いたものがあるが、いずれも太陽からかなり遠いところを測るため、太陽風はすでに加速された後の状態を観測していることになる。また、SOHO 衛星は輝線による速度場観測装置を有しているが、太陽風速度を導出するにはモデルに起因する不定性がある。従って、皆既日食における連続光の観測は、太陽風加速を診断する上でもこれらの観測と相補的な役割を果たすと考えられる。

（国立天文台・太陽物理学研究系・一本 潔）

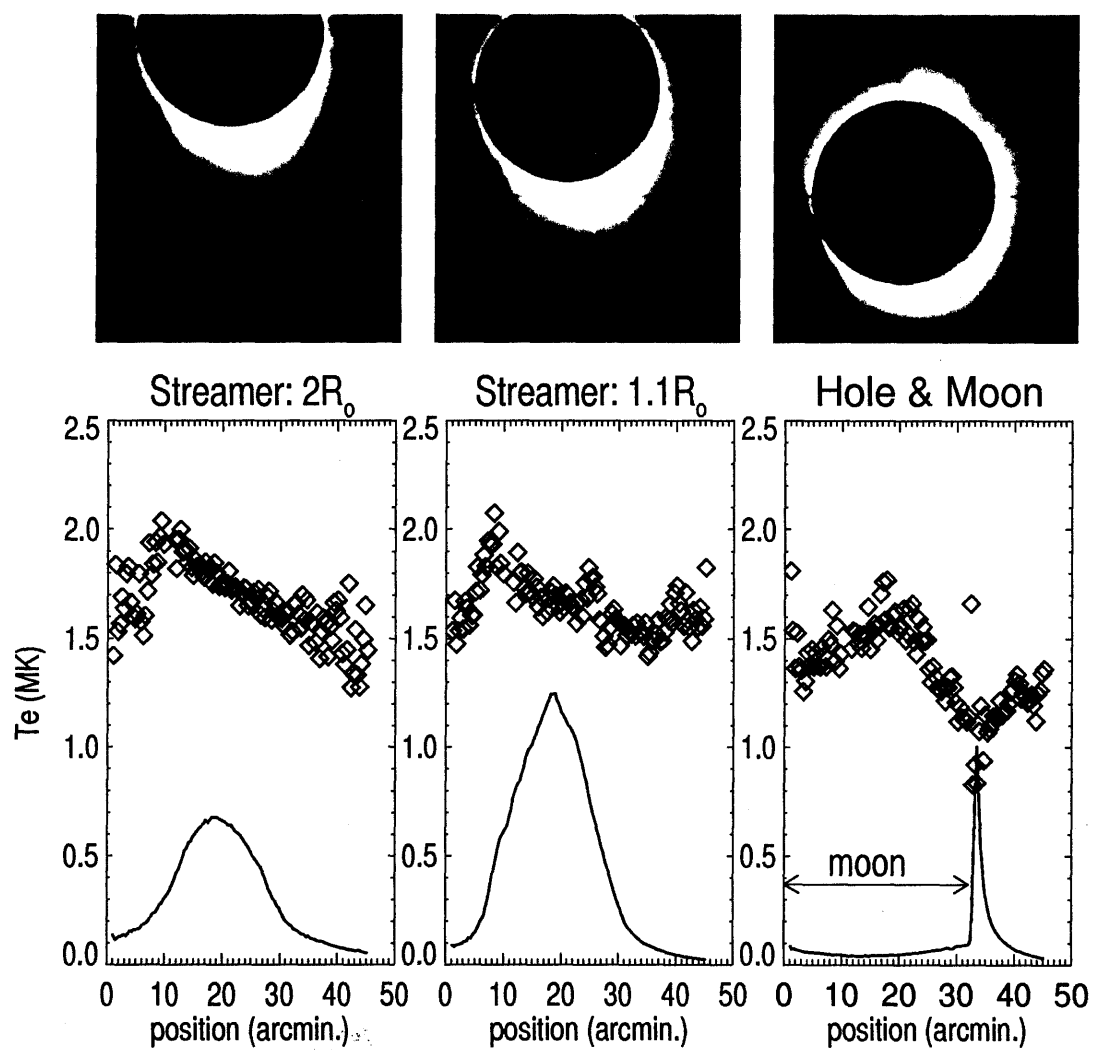


図 6: 1994 年 11 月 3 日の皆既日食で得られたコロナの電子温度。上の画像はスペクトルの得られたスリットの位置を示す。ダイヤモンドは温度、下の実践はコロナの輝度である。

表 1: 太陽コロナの観測

観測手法	観測時間	空間分解能	物理情報	特長
地上・コロナグラフ	長、天気依る	中	$T?$ 、 $\rho?$ 、 $B?$	長期変化
皆既日食	短、天気依る	中－高	T 、 ρ 、 $B?$	
ロケット UV、X 線	短	中	T 、 ρ	
人工衛星 UV、X 線	長	中－高	T 、 ρ	短期変化
人工衛星コロナグラフ	長	低－中	ρ	短期変化
電波	長	低	$T?$ 、 $\rho?$ 、 $B?$	短期・長期

(注) 物理情報で、 T は温度、 ρ は電子密度、 B は磁場を表し、?がついているものは精度が悪い
或いは測定が難しいことを意味している。

1.4 地上での皆既日食観測の利点と今後の観測方針

1.4.1 序

太陽物理学における未解決の問題のなかでも、コロナが 200 万度という高温になっている仕組み、また、コロナから太陽風として流れ出るプラズマの供給機構、プラズマ流の加速機構は、解決すべき重要な課題である。また、爆発的なエネルギー解放現象であるフレア現象も、コロナで起こり、その機構も未解明の重要問題である。このようなコロナ現象は太陽固有のものではなく、他の天体でも同様な現象が見られる。太陽コロナは中でも最も詳しく観測可能な対象であり、プラズマ現象の天然の実験室を提供している。

日食、特に皆既日食は、太陽と月の視直径が偶然にもほぼ同じになっているという僥倖により、通常観測が難しい、太陽彩層、コロナを露にして見せてくれる貴重な機会である。しかし、現在ではコロナ観測は日食時が唯一の機会というわけではなく、日食外でも様々な手法で観測が可能になっており、観測時間の限られる日食観測の必要性が薄らいでいるのが実状であろう（表 1 ではそれぞれの手法での一般的な特徴を示す）。

1.4.2 皆既日食の意義

表 1 からわかるように、日食観測の特徴は、短時間の高分解能・精密観測による正確な物理情報の導出が可能ということである。反面、時間変化する現象には必ずしも対応できない（超音速ジェット機で皆既帯を追跡することで 2 時間程度の連続観測は可能である）。また、観測時間の制限から、多くのデータを得ることができない。従って、数多くの皆既日食を観測することで、データ数を増やし、場所による物理状態の変化、長期的なコロナの変化などを解析する手段をとることになる。また、いうまでもなく、皆既開始時刻は正確に決まっており、これに合わせて観測準備を調えなくてはならず、失敗してもやり直しがきかない、天候にも大きく左右される等の問題点もある。

以下、少し、皆既日食の利点について述べる。

(1) 光球最外層、彩層、コロナの精密測光

良く知られているように、コロナの明るさは最も明るい内部コロナでも、太陽光球の百万分の 1 以下である。これほど暗くない、光球最外層、彩層でも、光球の散乱光がないため、精密測光