

赤外線天文学におけるファブリ・ペロ分光器

田中 培生*

1. はじめに

何千年にもわたる天文学の歴史を振り返ってみると、絶え間ない観測の積み重ねが私達の宇宙に対する理解を一步一步前進させてきたことは明らかである。エジプト、ギリシャ、ローマの時代は別としても、チョコブラーエ、ケプラーの膨大かつ緻密な観測がケプラーの法則、コペルニクスの地動説を生み出し、またガリレオに始まる望遠鏡の進歩によって、ハーシェルは銀河系という概念に到達したのである。そして今世紀に入り、次々と大望遠鏡が建設されて、そのたびに宇宙は私達の眼前にその新しい姿を現わしてきた。

一方、1930年代にジャンスキーによって電波天文学の道が開かれて以来、X線、紫外線、赤外線と現在ではほとんどすべての波長域での観測が可能になった。これらの観測の生み出した宇宙観は、以前のものとは質的に飛躍し、新たな観測手段が新しい宇宙像を創り出すことはもはや疑う余地もない。そして天文学も“より速くまで”と同時に“より詳しく、手にとるように”という方向への前進が目ざましい。

このような状況のもとで、赤外域でも単なる測光観測から次第に高分解能分光観測の必要性が認識され始め、1970年代末からすでに本格的な観測が多くなされ、重要な成果が得られている。たとえば近赤外域では、水素分子の振動回転準位線がオリオン分子雲を始めとする多くの星生成領域で検知されており、分子雲内の衝撃波面の構造、そこでの密度、温度分布などがわかっている。また水素原子の再結合線の速度場を求めることによって、生まれたばかりの星の表面からの星風、質量放出の様子を知ることができる。また、中間赤外域ではネオンイオンなどの禁制線の観測により、銀河中心核のガスの特異な運動が明らかになり、これは最近、セイファート銀河の活動的な中心核との関連においても議論されている。そしてこれらの観測に用いられ威力を発揮している分光器の多くがファブリ・ペロ分光器である。この小文では、現在世界の第一線で活躍している赤外域ファブリ・ペロ分光器を紹介すると共に今後の展望についても簡単に考察する。

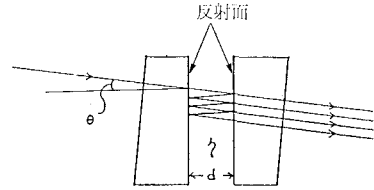


図1 ファブリ・ペロの原理

2. ファブリ・ペロ分光器 (以下 FP と略記する)

歴史的には 1896 年フランス人のファブリとペロによって発明された。天体観測にも比較的初期から使われ始めたが、種々の技術的困難のため、第一線で使われ始めたのは比較的最近である。そして現在では回折格子、フーリエ変換型干渉計 (FTS)、と共に特に高分解能分光観測には不可欠な分光器となっている。

FP は原理的には図に示すように、2枚の平行反射面で光を多重回反射させ、特定の波長の光だけを取り出す干渉計の一種である。選り出される波長は反射面間の光学的距離 (l) によって決まり次式で与えられる。

$$\lambda = 2l/n$$

ここで n は干渉の次数である。また l は平行反射面間の幾何学的距離 (d)、反射面間の物質の屈折率 (η)、入射光の入射角度 (θ) によって $l = d\eta \cos \theta$ と表わされる。つまり真空 ($\eta=1$)、垂直入射 ($\theta=0^\circ$) の時には $l = d$ となる。また取り出したい波長を変える場合には、何らかの方法でこれら3つの量のうちの1つを変えなくてはならない。そして波長分解能 (以下 R と書く) はフィネス×干渉の次数 (n) で与えられる。ここでフィネスとは n 次と $n+1$ 次との波長の差を n 次の波長に対する透過幅で割った量であり、これが大きいほど高分解能が得られる。フィネスを大きくするためには次の4点を考慮しなければならない。

- 1) 反射面の反射率を大きくする。
- 2) 反射面の面精度をよくする。
- 3) 2反射面を平行にする。
- 4) 入射光を平行ビームにする。

FP の理論に関しては何人もの人たちが、すでに詳しく解説しているので、ここでは回折格子、FTS と比較して FP の特徴を述べる。表1にこれら3種の分光器をいくつかの性能に関して比較してみた。まず最初に、これらの分光器はそれぞれの利点を持っており、観測の種類、又は目的に応じて使い分けするのが妥当であると言え

* 京大理 Masuo Tanaka: Fabry-Pérot Spectrometer for Infrared Astronomy

表 1

| | 回折格子 | FTS | FP |
|----------------|-------------|------------------|------------------|
| 分解能 | $\leq 10^3$ | $10^4 \sim 10^5$ | $10^4 \sim 10^5$ |
| 多重性* | 検出器の数だけ | 原理的には ∞ | 1 |
| 明るさ (視野の広さ) | × | ○ | ○ |
| 背景輻射** | ○ (小さい) | × | ○ (小さい) |
| データ処理 | 容易 | コンピュータ が必要 | 容易 |
| 形状 | 分解能による | 大型 | 小型 |

* 同時にデータがとれる波長域の数。

** 赤外線 (特に中間-遠赤外) 観測においては背景輻射をできるだけ小さくすることが必要である。

る。つまりどんな観測にも最適な分光器というものはない。

$R \geq 10^4$ が要求される場合、現在のところヘテロダイナミクス分光器を別にすると、FTS と FP とが考えられる。この両者を比較すると、FTS は広い波長域が同時に分光できるという利点を持っている。しかしデータ処理にはかなり大型のコンピュータが必要であろう。また波長が長くなると背景輻射が大きくなり、かなり波長幅の狭いフィルターを併用しないとよい観測結果は得られない。そしてこのために FTS の最大の利点である広波長域同時分光可能という性質は失われてしまう。したがって赤外線 FTS はほとんどが近赤外線用である。それでもこの波長域ではすばらしい FTS が何台か稼動している。世界最高の分解能 ($R \geq 10^5$) をもつ FTS はアメリカ、キットピーク国立天文台の 4m メイヨール望遠鏡のクーデ室に設置されており、この望遠鏡の大集光力とあわせて高波長高空間分解能での観測が行なわれている。カセグレン焦点用としては、アリゾナ大学のラルソンたちのグループが 2 号機まで作っており、これはたいへんエレガントな FTS である。飛行機からの観測ですばらしい成果を得ている。 $R = 10^4 \sim 10^5$ である。他に $R = 2 \times 10^3$ 程度ではあるが、アリゾナ大学シュワード天文台、2.2m 望遠鏡のカセグレン焦点用としてよく働いている FTS がある。

一方 FP の利点としては高分解能は別としても、

- 1) 明るい、又は視野が広い
- 2) データ処理が容易
- 3) 形状が小型

等があげられる。また特に中間・遠赤外線では

- 4) 低背景輻射

の利点が増えらる。これらは観測上きわめて重要なことである。FP は一種の干渉計であるために、一般には次数の異なる波長の光をも同時に通す。そこでもし

も特定の一つの波長の光だけを検出器に導きたい場合には、他の次数の光を遮断しなくてはならない。そのために、フィルター、回折格子などを併用する。したがって表 1 にあげた性質は混合されたものになってしまう。特に回折格子を併用すると、視野が広いという性質はかなり制限される。しかし中間赤外線の場合には、この回折格子を液体ヘリウムで冷却することによって背景輻射を大幅に減らし得る。(FP 自身を液体ヘリウムで冷却することは現在のところ難しい。) このように FP の場合にも観測からの要求に応じた組み合わせを考えるべきであろう。次の章で現在世界中で稼動している赤外線 FP について入手し得た資料をもとに紹介しよう。

3. 世界の赤外線ファブリ・ペロ分光器

i) カリフォルニア大学パークレー校、遠赤外線 FP

赤外線 FP 分光器に関して先駆的役割を果たしたのが、タウンズたちである。タウンズはレーザーの研究でノーベル賞を受賞した物理学者であるが、60 年代末からすでに赤外線での FP 分光器を作り始めていた。そして彼のもとで FP 分光器を設計、製作し、それを使った観測によって Ph.D. を得た人たちとしては、ホルツ (71) 以来、ジュボル (74) レイシー (79) 等すでにこの分野の第一線の天文学者があげられる。試作機を含め、すでに何台もの改良機が稼動しているが、まず遠赤外用の分光器を図 2 に示す。これは酸素イオン ($88.4 \mu\text{m}$, $51.8 \mu\text{m}$) などの禁制線の観測に用いられている。2 台の FP を、1 台は反射面の間隔が可変で常温に、そしてもう 1 台は固定で、液体ヘリウム温度に保たれ、一種のフィルターとして使われている。反射面の間隔はピエゾ素子に電圧を加えることによって変える。このように 2 台を直列に配置することで、高分解能かつ低背景輻射の分光器を形成している。図 2 に見られるように 2 台の FP 以外に、平行調整用、波長校正用の光学系が組み込まれてい

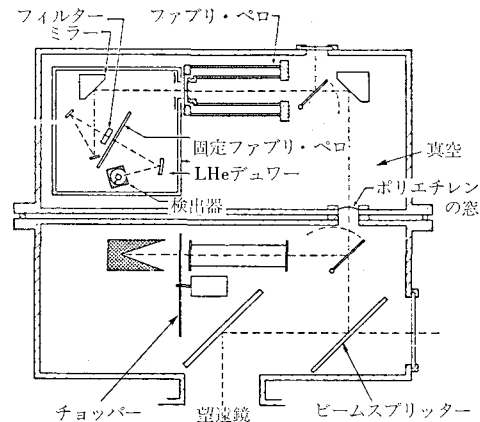


図 2 遠赤外線 FP

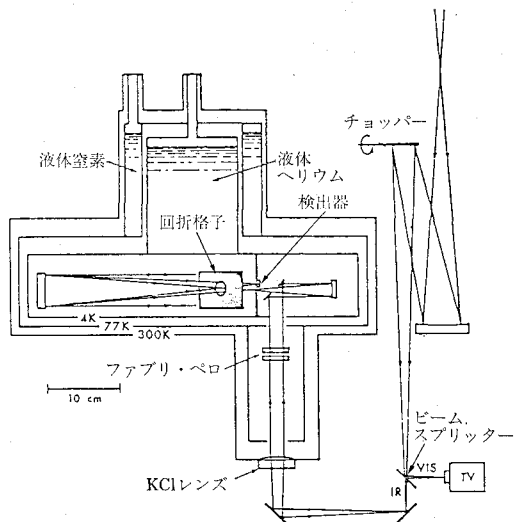


図 3 中間赤外域 FP

る。この分光器は飛行機からの観測に使われている。

ii) カリフォルニア大学バークレー校, 中間赤外域 FP

同じくタウンズたちの分光器であるが、これは中間赤外域用で、地上から観測する場合には $8\sim 13\mu\text{m}$ 帯に限られる。この領域には有名なネオンイオン ($12.8\mu\text{m}$) を始めとしてアルゴン ($9.0\mu\text{m}$) 硫黄イオン ($10.5\mu\text{m}$) などの禁制線と、水素分子の純回転線 ($12.3\mu\text{m}$) が含まれる。まず 70 年代前半にセロトロロ天文台の 1.5m 望遠鏡クーデ焦点用に 2 台の FP からなる分光器が作られ、その後その改良型とも言えるカセグレン焦点用 FP 分光器が作られた。これを図 3 に示す。これは液体窒素 (77 K) で冷却された FP と液体ヘリウム (4K) で冷却された回折格子から成り、 $R\approx 10^4$ である。この分光器は銀河中心核のネオンイオンの禁制線 ($12.8\mu\text{m}$) の観測に用いられ、この観測によって、銀河中心 1 パーセク内のガスが銀河面の垂線と 60° ほど傾いた軸のまわりに約 300 km/秒もの速さで回転していることがわかった。

中間赤外域の場合、地上からと上空からとの観測を比べると背景輻射の点で圧倒的に上空が有利であるが、 $R\geq 10^5$ 程度の高分解能分光観測を行うと、その有利さはなくなる。この場合には図 3 にみられるように回折格子を液体ヘリウムで冷却する必要があり、FP 自身も液体窒素で冷却されている。この構成は中間赤外域での分光器を作る場合、1 つの基準となるであろう。なお、この分光器は FP 本体から冷却系にいたるまで、かなりの部分が彼らの手作りである。

iii) オランダ, 中間赤外域 FP

中間赤外域用としてもう 1 台紹介しよう。これは ii) と違って、いかにもヨーロッパらしく大がかりなものである。構成としては FP (常温)+FP (液体窒素温度)+

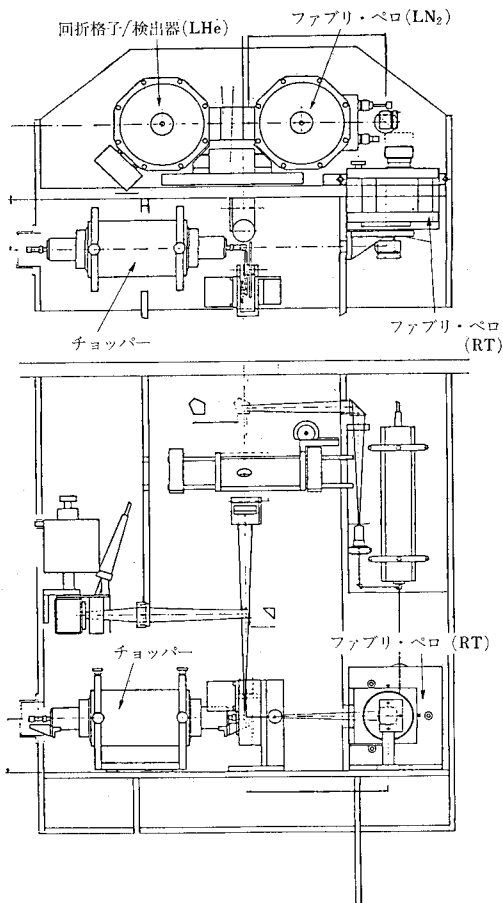


図 4 中間赤外域 FP

回折格子 (液体ヘリウム温度) である。 $R\approx 10^5$ が得られている。図 4 をみても感じられるように、見るからに複雑で、調整も難しそうである。そのためかどうかはわからないが、実際の観測データはあまり公表されていない。

なお、i), ii) はほとんど手作りの感がうかがわれるが、iii) 以下のほとんどの近赤外域用 FP 分光器では、FP 本体はアメリカ、パーレイ社の TL38-IR (反射面の間隔はビエゾ素子に電圧を加えることによって変える)、検出器のクライオスタットはアメリカ、IR Lab 社の HD3 型が用いられている。

iv) カリフォルニア大学バークレー校, 近赤外域 FP

以下、近赤外域 FP であるが、まずトレファーズたちの分光器を図 5 に示す。これは 1 台の FP から成り、たいへん単純な構成である。 $R\approx 2\times 10^4$ であり、図 5 には同じく彼らの可視域用 FP も示されている。

v) カリフォルニア工科大学, 近赤外域 FP

続いて図 6 に示す FP はナドーたちによって作られたものである。これは FP (常温)+CVF (液体窒素温度)

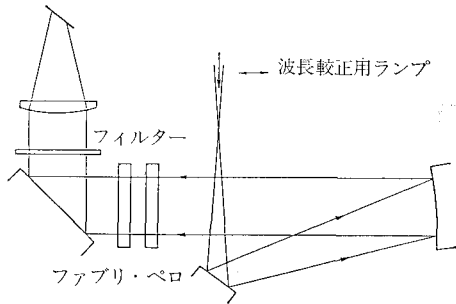
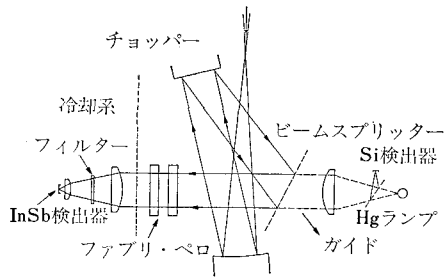


図 5 近赤外域 (上)、可視域 (下) FP

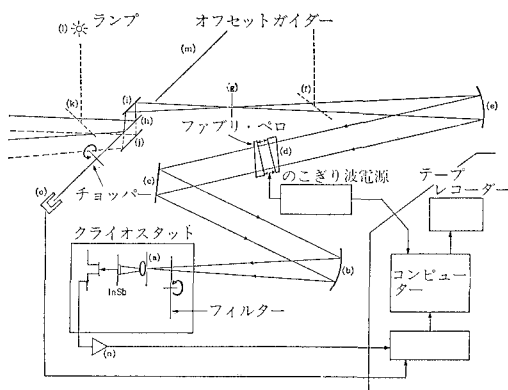


図 6 近赤外域 FP

という構成で $R=3 \times 10^4$ である。FP のほかにチョッパー、オフセットガイド、波長較正用ランプ、調整用光源、さらに検出器、データ処理機器が組み込まれている。チョッパーは副鏡振動が可能な望遠鏡の場合には必要ないが、最近の新しい望遠鏡や赤外専用望遠鏡を除くと、既存の大望遠鏡では他の観測との関係から焦点部でのチョ

ッピングが必要な場合が多い。例えばヘール天文台の 5 m, ウィルソン山の 2.5 m 望遠鏡を使用する場合にはチョッパーが必要である。

ここで分解能について少し説明を追加する。彼らの FP もそうであるが、普通近赤外域の場合、パーレイ社 TL38IR では特別な注文をしない限り、フィネス=30~50 である。(面の反射率によって決まる。) $R=$ フィネス $\times n$ であるので $R=3 \times 10^4$, フィネス=30 とすると $n=10^3$ となる。つまりかなりの高次で使っていることになる。すると、 n 次と $n+1$ 次との間隔が小さくなり、1つの波長だけを取り出すには、かなり狭い波長幅のフィルターを併用しなければならない。しかし彼らの CVF は $R \approx 70$ なので、現実には CVF の透過幅の中に違う次数の波が 10 本以上含まれていることになる(図 7 参照)。この場合でも、輝線の観測で、かつ CVF によって目的の線スペクトル以外の線スペクトルを遮断でき、 n 次と $n+1$ 次との差が、目的の線スペクトルのドップラー幅よりも大きい場合には、これで高分解能分光観測が可能なのである。

彼らはこの分光器を使ってオリオン分子雲の水素分子線 ($2.1 \mu\text{m}$) の高波長高空間分解能分光観測を行い、この分子雲での衝撃波の構造を明らかにし、また銀河中心での水素原子の再結合線 ($B\gamma$, $2.17 \mu\text{m}$) の観測によって、レイシーたちの結果を確かめた。(ii) 参照)

vi) ウィルソン山ラスカンパナス天文台、近赤外域 FP 80 年代に入り、この大天文台は $1 \sim 5 \mu\text{m}$ をすべてカバーする(もちろん複数個の FP で)分光器を作った(図 8)。この分光器の構成は FP (常温)+フィルター+回折格子(液体窒素温度)である。回折格子が含まれていること、FP が波長域に応じてスライドすることによって交換できることを除けば、v) の分光器とほぼ同一である。

しかしこの分光器の意義は別のところにある。70 年代には大学のあるグループがいろいろ改良しながら半ば手作りで作成し、これを適当な望遠鏡に取り付け観測していたのだが、そろそろ回折格子分光器と同じ水準、つまり、一般の観測者がある程度容易に使えるまでになったとみられるからである。これは画期的なことであり、赤外域 FP 分光器も特殊な分光器ではなく、第一級

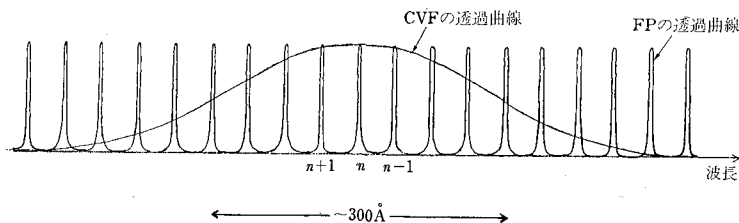


図 7 FP と CVF との透過曲線

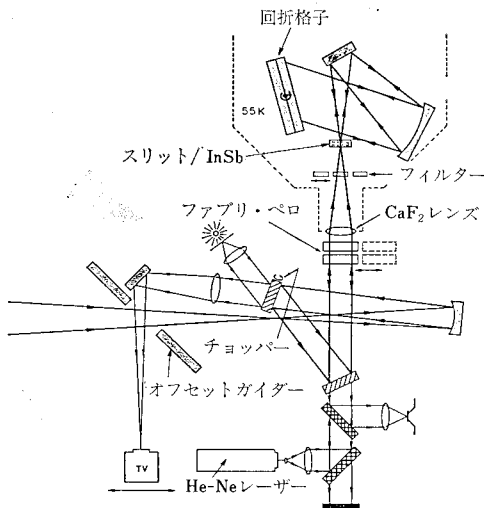


図 8 近赤外域 FP

の天文台には必需分光器となる日もそう遠くはないであろう。

なおパークレー出身のジュボール (ii), v), vi) に関係している) が最近ハワイのイギリス赤外線天文台に移り, そこでも FP 分光器を作るという話である。

vii) 京都大学, 近赤外域 FP

以上述べてきた分光器に比べると, まだ完成された分光器とは言えないが, ここで私達の FP にも言及しておこう。その理由はこの分光器もいくつかの特徴を持っているからである。構成を図 9 に示す。この分光器は奥田教授の指導のもと, 佐藤氏と共に製作したものである。まず現在のテスト観測は 1 台の FP で行っているが, 2 台直列に配置することができる。FP 箱は真空箱になっており, 特に焦点部と検出器へ集光するためのレンズとは液体窒素温度に冷却できる。将来 FP 自身も冷却するつもりである。FP はパーレイ社の TL381R であるが, 特別に注文して反射率を高くし, フィネス ≈ 100 が達成されている。そのためには 2 枚の反射面の間隔を 50 \AA 以下の精度で平行に調整して保たなければならない。そ

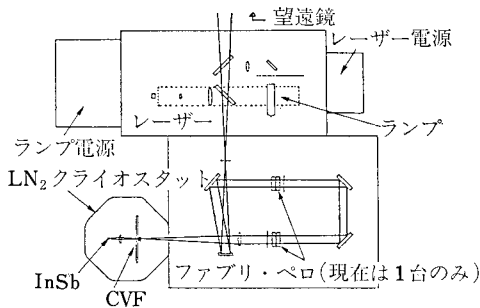


図 9 近赤外域 FP

の方法としては, iv), v), vi) で採用されている方法では不十分で, 私達は直径 30 mm のヘリウム・ネオンレーザービームと 3 点シリコンフォトダイオード検出器とを使用する方法を採択した。この場合の精度はきわめて良く, 最終的には, 反射面の平行性はピエゾ素子の安定性の方で制約をうける。このようにフィネス $= 100$ はたいへん高い値であるが, 高反射率のために, 透過率 45% と若干低い値になっている。v) の FP と違って現在は $n \approx 10^2$ で使用しているので, $R \approx 10^4$ である。しかし $n \approx 10^3$ で使用すれば $R = 10^5$ の高分解能が得られる。フィルターとして, 私達も CVF ($R = 50$) を使っているので, 20 本ほどが CVF の透過幅の中に含まれる (v) 参照)。なお, 3 本の波長校正用ランプの光と平行調整用レーザー光とを, それぞれフリップミラーで FP の光学系に通すように作られている。チョッパーは上松その他の赤外線専用望遠鏡に取り付けることを考えて設計されたので含まれていない。

この FP を使って 1982 年 3 月に試験観測を行い, Be 型星 MWC 349 から, 100 km/秒 の線幅を持つブラケット γ 線 ($2.17 \mu\text{m}$) を検出した。この観測によると, この線スペクトルは, 星表面からの星風に起因するものと思われる。なお, この観測で使用したデータ処理のプログラムは小林氏に作製していただいた。

viii) そのほかの FP 分光器

他に近赤外域用としてはウィスコンシン大学の FP がある。これは 2 台の FP + フィルターであり, l を変えるのに, 反射面間の気体の圧力を変化させて η を変える, という方法を採用している (第 2 章参照)。同じ方法を使用しているものとしては, 可視域用ではあるが, PEPSIOS という商品名 (?) を持つ 3 連結 FP がある。また近赤外域用で, イタリアのアジアゴ天文台の FP は, θ を変えることによって l を変えている (第 2 章参照)。一方, 日本の機械技術研究所で, 紫外用であるが, 反射面を磨くところから始めた FP があり, 気球にのせて太陽の観測に使用された。また名古屋大学でも松本助教授を中心に, 近赤外域 FP による観測が進められている。以上紹介した主な FP の性能等を簡単に表 2 にまとめておく。

4. 今後の展望

このように続々と赤外域の高性能 FP 分光器が出現している。そして技術開発も一段落した様である。70 年代には先見の明があった少数のグループによって何年もかかって天体観測用に開発されてきたのが, 80 年代に入って, ウィルソン山天文台, イギリス赤外線天文台をはじめとする世界の大望遠鏡に装備されつつある。あと 4~5 年の後には, ほとんどの大望遠鏡に常備されて, 測光

表 2

| | 波長域 (μm) | 分解能 | 構成* |
|------|--------------------------|-----------------|---|
| i) | 50-200 | 10^3-10^4 | FP (RT)+FP (LHe) |
| ii) | 5-15 | 10^4 | FP (LN ₂)+G (LHe) |
| iii) | 8-13 | 10^5 | FP (RT)+FP (LN ₂) +G (LHe) |
| iv) | 2.2, 0.6 | 2×10^4 | FP (RT)+F (LN ₂) |
| v) | 2-2.5 | 3×10^4 | FP (RT)+CVF (LN ₂) |
| vi) | 1-5 | 10^3-10^5 | FP (RT)+F (LN ₂) +G (LN ₂) |
| vii) | 2-2.5 | 10^4-10^5 | FP (RT)+(FP (RT)) +CVF (LN ₂) |

* RT: 常温, LN₂: 液体窒素温度 (77~55 K),
LHe: 液体ヘリウム温度 (4 K), FP: ファブリ・
ペロ分光器, G: 回折格子, F, CVF: フィルター

器と同程度の容易さで、誰でも FP 分光器を使った観測が可能になるものと思われる。

書 評

アルマゲスト

プトレマイオス 著 藪内 清 訳

(恒星社 昭和57年3月発行 12,000円)

天文学の三大古典は、プトレマイオス・コペルニクス・ニュートンの著といわれるが、本書「アルマゲスト」はプトレマイオスの著書である。三書の中ではもっとも古くて A.D. 150 年ごろの作といわれる。本書の原文はギリシャ語であるが、他にフランス語・ドイツ語・英語・アラビア語訳があり、藪内氏はフランス語、ドイツ語訳本によって訳出されたという、訳書の上巻は 1949 年に、下巻は 1958 年に初版を出している。それらは久しく絶版となっていたが、天文学史に関心ある読者の要望にこたえて、今回再版された、再版にあたって上下二巻をまとめて一冊とし、初版のミスプリントその他の訂正がなされている。

本書の内容は、A.D. 150 年当時のギリシャ文化圏での天文知識を集大成したもので、天動説の立場から天体の運動を数学的基礎の上に組み立てようとの意図で書かれている、ここでいう数学とはユークリッド幾何学であり、読むのになかなかわずらわしい。

本書が天文学史研究家にとって座右の書とすべきことは論をまたないが、そうでない人にとっても下のような現代的関わりのある点を挙げておこう。

(1) 本書の随所に、プトレマイオスの観測とともに、古代ローマ・バビロン・アレキサンドリヤの古天文記録が集録されていて、これらは惑星運動の長年変化や地球

赤外域の線スペクトルとしては、原子、イオンの再結合線、禁制線、分子の振動回転準位線などきわめて多数のラインが存在する。また赤外域で見られる天体も多種多様である(恒星、惑星を始めとして、分子雲、H II 領域から系外銀河まで)。したがって、今まで赤外観測をされたことのない人たちで、学問的に赤外域分光に対して興味を持っておられる人もずいぶん多いことと思われる。

現在わが国においても大型望遠鏡の計画が進められているが、岡山の 188 cm 反射望遠鏡、また計画中の大型望遠鏡に上記の規模の赤外域高分解能 FP 分光器が装備されれば、赤外域分光観測がより広い分野の人々にも比較的容易になるであろう。現在私達は FP 第 1 号機製作の経験と、世界の最先端からの情報に基づいて多くの天文学者の要求に耐え得る FP 分光器の構想を練りつつある。波長域 1~5 μm をカバーし、 $R \geq 10^5$ (速度で 1 km/秒に対応) 程度の分光器は十分製作可能であり、近い将来にはどうしても必要な基本的観測機器であろう。

自転の減速の研究に現実的に役立っている。たとえば、R. R. Newton, *Ancient Astronomical Observations and the Acceleration of the Earth and Moon*, Johns Hopkins Press, 1970.

(2) 本書中の恒星表は古代の星表として有名で、歳差や星の固有運動の研究に役立った歴史をもっている。

(3) その中に、「シリウスと呼ばれる非常に明るい赤味があった星」という記述があり、久しく不思議に思われていた(訳書の 351 ページ)。この形容詞は、ギリシャ語では hipokeros と書き、「赤い、銅のような、黄色い」などの意味がある。かつての恒星表には、アルデバラン・ベテルギウス・アルクトゥルス・アンタレス・ポルクスなどの赤色巨星をあげ、色はみな hipokeros だと書いてあり、これらの星の色は昔も今も変わりはない。シリウスだけが 2000 年間に赤色星から青色星に変わったのであろうか。もしそうなら天体物理学上の大事件である。シリウスがむかしは赤かったとは、他にもいくつも記録があるので、アルマゲストの誤記だと簡単に片づけるわけにはいかないらしい。詳しくは、K. Brecher, *Sirius Enigma*, M.I.T. Technology Review, 80, No. 2, 53, Dec. 1977; S.F. 的な解説は「天文月報」75, No. 1, 30, 1982。本書は本来じっくり落ちついて読むべき本だが、こんなトピックス的なものも拾い出せる。

アルマゲストと同時代の天文学の集成としては、中国に「漢書律曆志」、つづいて「晉書天文志」がある。ともに『世界の名著』続 1、「中国の科学」の中に邦訳がある。(藪内清氏の責任編集、中央公論社、1975) 合わせて読むことで、東西文化圏の天文知識の発達の比較ができる。(斉藤国治)