



# システムの視点から 分光機器の進化を読み取る

科学計測スペシャリスト  
阪大・大阪電通大名誉教授

南 茂夫

# 話の道筋

- 1) 光学と分光学の離合の軌跡 —耐久消費財カメラと資本財分光機器—
- 2) 模倣は進化への糸口? —デッドコピーは発展への通過儀礼—
- 3) 分光の方式と測光の方式 —分散分光法はアナログ光コンピュータ—
- 4) 天空からの贈り物—独自の道を拓く天文学者—
- 5) システム化の第一歩はブレークダウン—サブシステムから機能素子, 単純素子へ—
- 6) 偽放射との闘い—stray radiationはstray sheepではなくlonesome wolf—
- 7) 「コンピュータ」薬の副作用に注意 —羊の皮を被った狼—
- 8) 全天候型の分光機器 —ラクダの背中から落ちてても壊れない—

# 1) 光学と分光学の離合の軌跡

## —耐久消費財カメラと生産財分光機器—

- 望遠鏡・顕微鏡・カメラを3本柱とする光学器械が工業化の波に乗ると共に、幾何光学即光学という概念が定着する。片や分光機器は物理から離れて、光分析機器として分析化学分野に広がる。近年になってイメージング分光がクローズアップし、再度光学と分光学は唇齒の間柄となる。

# 光学機器としてのカメラと分光機器の対比

## 〔カメラ〕

耐久消費財。 わが国生産額は現在一兆円超。

主管協会：日本カメラ映像機器工業会（J C I A）

生産形態：主として大量生産形態。

ユーザー：大部分が一般市民、一部がマスコミや芸術界、産業界、医学界などで専門家が使う。

機能：幾何学的空間構成と色の二次元的再現（画像収集と記録）。

動作原理：光の振舞い（幾何光学、物理光学）。

波長域：主として可視域。 検出は銀塩写真材（アナログ）、CCD, MOS など光電センサー（デジタル）の導入は大幅に遅れた。

光学設計：軸対称光学系で、収差論（5 収差＋色収差）が主体。

レンズ材料の分散（ $dn/d\lambda$ ）は色収差として現在でも嫌われる。

## 〔分光機器〕

生産財（創知のためのマザーツール）。わが国生産額は現在800億円前後。

主管協会：日本分析機器工業会（JAIMA）

生産形態：変種少量生産あるいは一品生産形態。

ユーザー：研究開発者、機器分析技術者など専門家。

機能：波長（エネルギー）の関数としての一次元出力が基本。

動作原理：光と物質の相互作用という光の本質を利用（物理光学、分光学）。

波長域：極紫外～遠赤外。古くから光電センサーによる検出が基本。単検出器波長走査のほかTV撮像管の利用が古くから行われていた。

光学設計：非軸対称光学系であり、反射光学系が多いので色収差は無関係。スリット像対象の収差論。

プリズム分散型は大きな $(dn/d\lambda)$ の利用から始まった。

## 2) 模倣は進化への糸口？ —デッドコピーは発展への通過儀礼—

- 昔の大先生が外国留学の土産に持ち帰った分光機器が、当時の大学ご用達町工場で日本の名人芸でコピーされて普及し、戦時の兵器用材料の分析などに活躍。戦後は輸入された自動化分光機器のデッドコピーが日本の復興を助ける。当時は特許を如何に逃げるかが日常の議論(今でもそうか?)

## 分光機器発展の系譜

専門用語 Spectroscopy, Spectrometry, Spectroscope, Spectrograph, Spectrometer の意味するもの

物理分析機器と定義される三つの分光分野: 初期の頃は検出法として写真法が用いられた。

年代	Optical Spectroscopy	X-ray Spectroscopy	Mass Spectroscopy
源流	キルヒホッフとブンゼンによる分析法の 確立(1865)	レントゲンによる X 線の発見(1895)	トムソンによる同位体分離(1912)
2次大戦以前 ~1940	主として写真検出法を用いた各種産業分析への応用。欧米製品の分光写真器を模倣する形で島津で国産化。Hilger, Zeiss, Bausch and Lomb, GE などが手本。		
2次大戦中 ~1945	欧米で自動電子化分光機器が続々製品化。Beckman, Cary, Perkin-Elmer, Baird, ARL Jarrell-Ash など。	Norelco(Philips), GE, ARL など。	CEC, Vickers(VG), GE, Atlas-Werken など。
1950~65	輸入と模倣時代: GE 自記分光計、Beckman DU, DK, IR-2, IR-3、Cary-14 Perkin-Elmer 12C, 13, 21、Baird ARL, Jarrell-Ash など輸入。島津、日立、日本分光など。	Norelco, GE, ARL など輸入。理学電機など。	CEC, GE など輸入。日立(国産初)、日本電子など。有機マスへの展開。
1965	第 1 回応用スペクトロメリー東京討論会、第 4 回分析機器展。分析機器のコンピューター化始まる。		
1965~85	海外模倣から脱皮。国内各社による独自開発競争激化。輸出ドライヴ。1970 年環境アセスメント開始で、普及型・簡易型機器量産に拍車。ベルトコンベアで分光機器製造。価格競争激化。一品型高度分析機器の製造を敬遠。高度分析機器の輸入が再度伸びる。1970 年以降から続く日米貿易摩擦。フーリエ分光機器や GC/MS など複合機器の定着。		
1985~90	プラザ合意。為替相場是正。ドル減らしのための機器輸入奨励。昔に戻り、輸入分析機器が増加。		
1990~	バブル経済崩壊、失われた 10 年始まる。ヒトゲノム計画、ポストゲノム計画。バイオ用高度分析機器の大量輸入。科学技術基本計画 1 期、2 期。島津田中耕一さんノーベル賞で科学計測機器業界に光。		

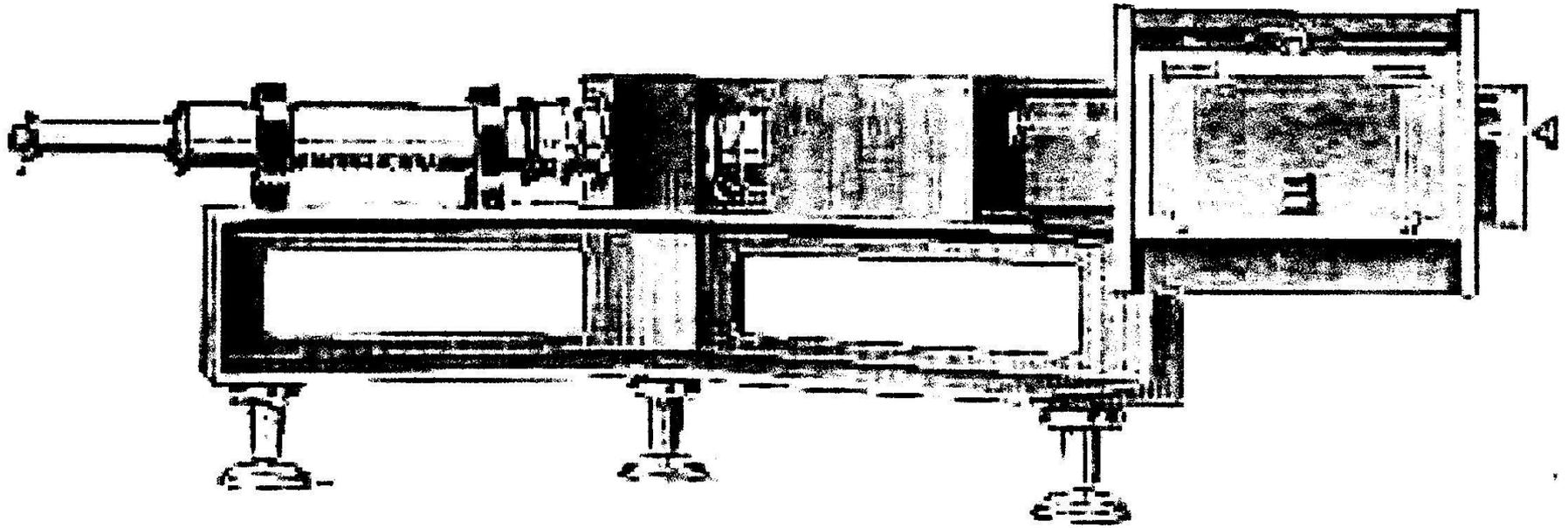
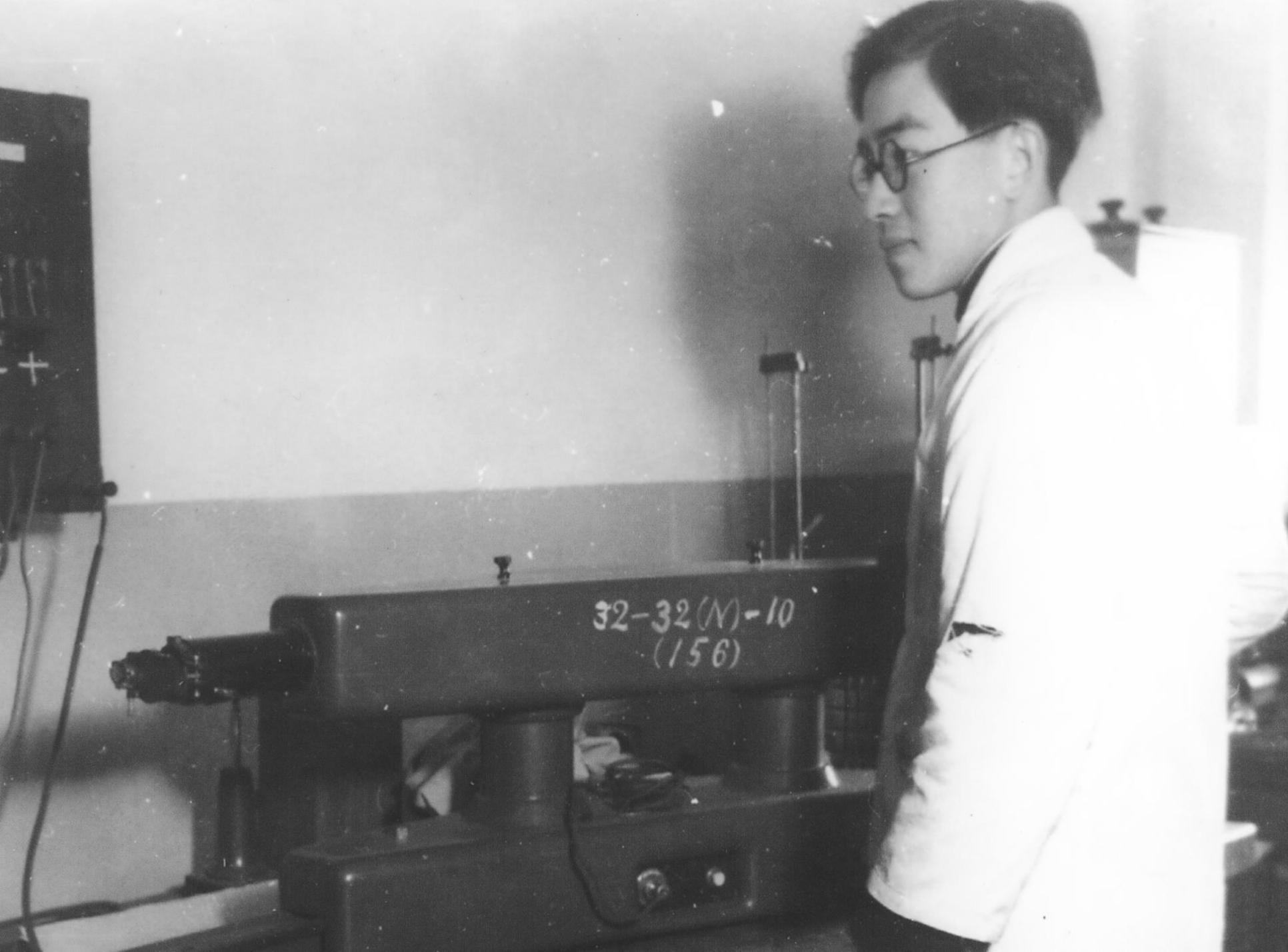


Fig. E B.

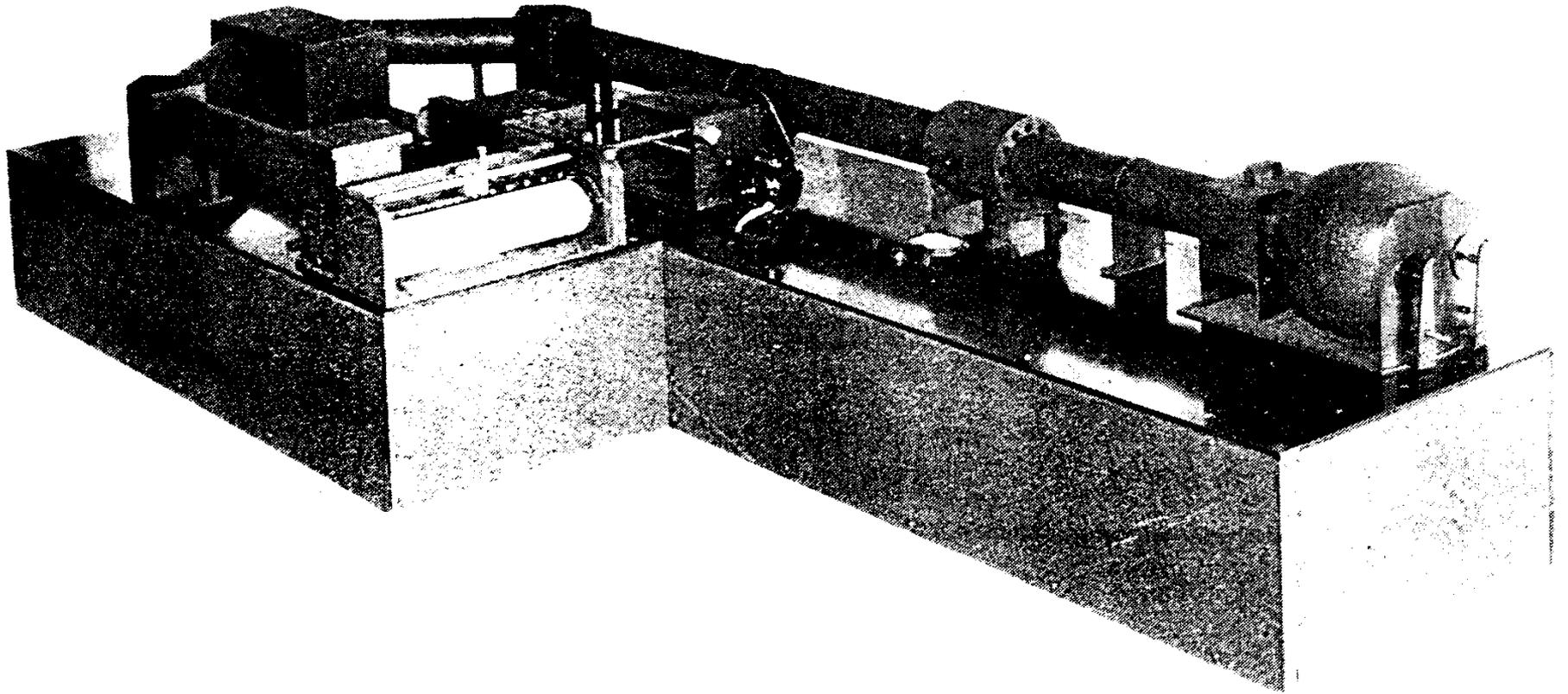


32-32(N)-10  
(156)

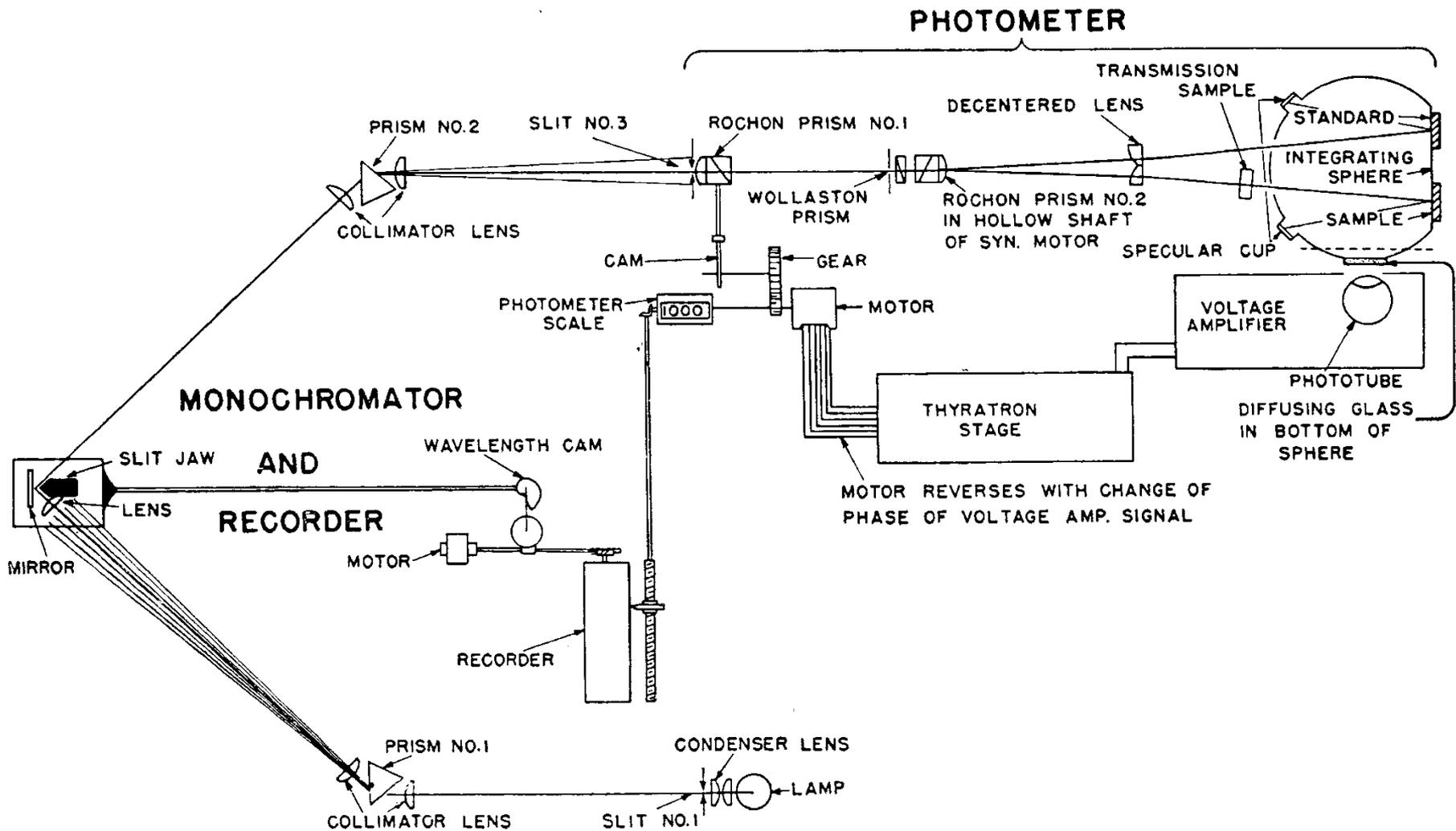
## 戦後復興期に輸入された分光機器

1945 ~ 1950 ~ 1955 ~ 1960

- ・ 紫外可視分光光度計  
Beckman DU  
(National Technical Lab.)
- ・ 光電発光分光分析装置  
カントメーター (ARL)
- ・ 大型回折格子分光写真器  
(Jarrell-Ash)
- ・ 自記可視分光光度計 (色彩計)  
Hardy 型 (GE)
- ・ 自記紫外可視分光光度計  
Cary 14 (Applied Physics Corp.)
- ・ 自記赤外分光光度計  
Baird, Beckman IR-3,  
Perkin-Elmer 12C, 21
- ・ 各種分光機器の本格的国産化
- ・ 分光機器の国産化始まる



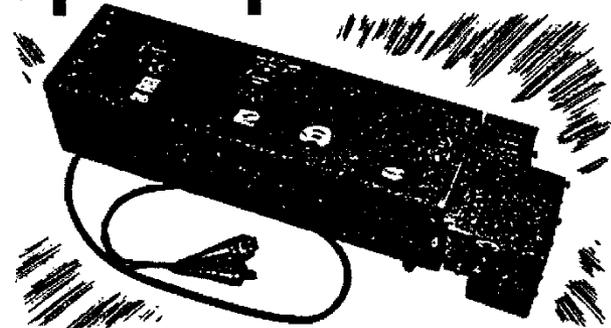
**Hardy-Type GE Automatic Recording Visible Spectrophotometer**



Hardy automatic recording photoelectric spectrophotometer for the visible region. (Courtesy General Electric Company, Schenectady, N. Y.).

*Announcing*  
AN IMPORTANT NEW BECKMAN DEVELOPMENT

**THE BECKMAN Spectrophotometer**



**Features Many Unique and Far-Reaching Advancements**

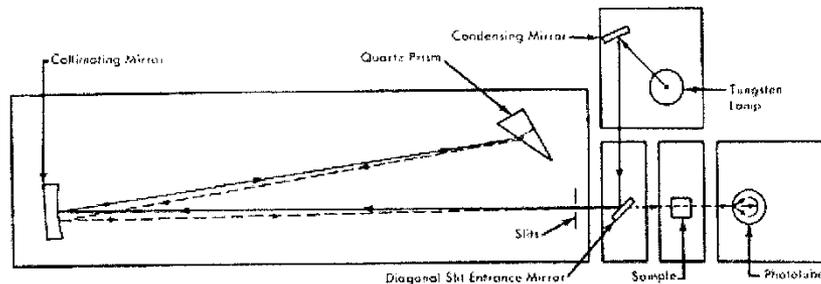
This precision instrument—the product of several years intensive development by the Beckman research staff—incorporates many important advancements in the design of spectrophotometric equipment, such as:

**OF THE BECKMAN SPECTROPHOTOMETER**

**MONOCHROMATOR** \* Auto-collimating type with selected crystal quartz prism provides high dispersion in the ultraviolet. Wavelength scale graduated from 200 millimicrons in ultraviolet to 2000 millimicrons in infrared, easily readable to 0.1 millimicron in ultraviolet to 1.0 millimicron in the red, with scale accuracy better than 1.0 millimicron. Optical parts rigidly mounted in a massive heat-treated iron block, within a dust-proof cast aluminum case. Slits are protected by quartz windows and are continuously adjustable from 0.1 to 2.0 mm. by a unique mechanism that permits very precise adjustment, particularly when slit width is small. Slits cannot be damaged by closing too far.

**LIGHT SOURCES** \* Interchangeable light sources permit ready adaptability to all types of spectrophotometric work. Efficient design provides full scale accuracy even with low light intensities. Lamp housing is well ventilated and heat-shielded to minimize temperature changes in absorption cells and phototubes.

**SAMPLE HOLDER** \* Absorption cells are held in light-tight slide holding 4 cells with light path of 1 cm. or less. Interchangeable additional holders are available for cells up to 10 cm. in length. Top of cell compartment is removable for titration and other special



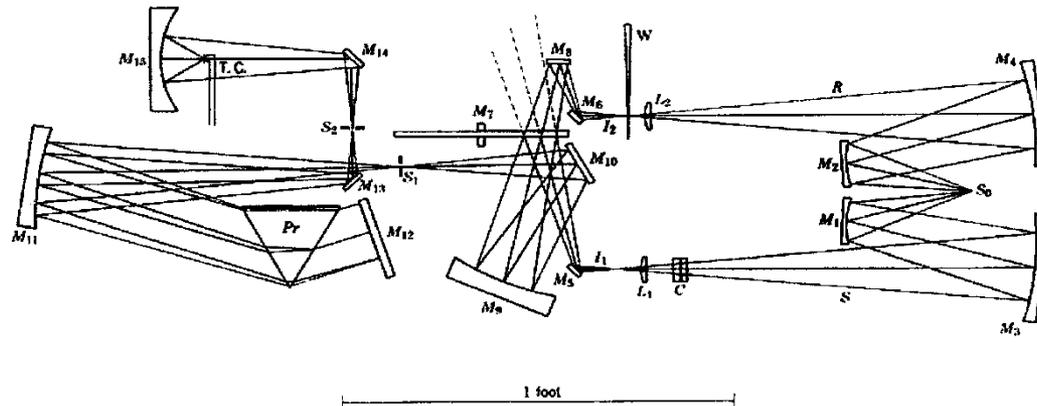
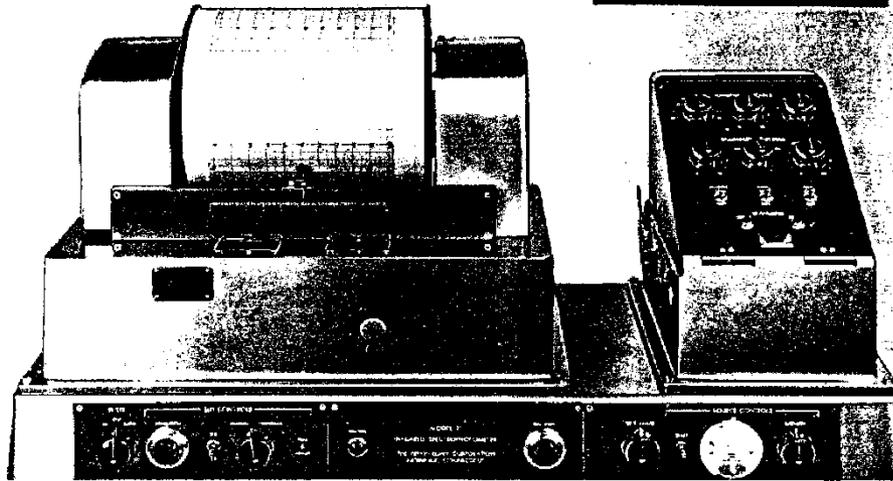
# The Model 21 Double Beam Infrared Spectrophotometer

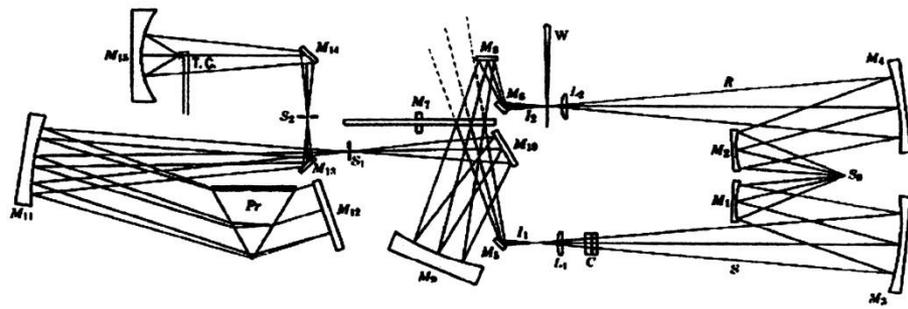
The Standard Instrument for Infrared Analysis

FAST ANALYSIS

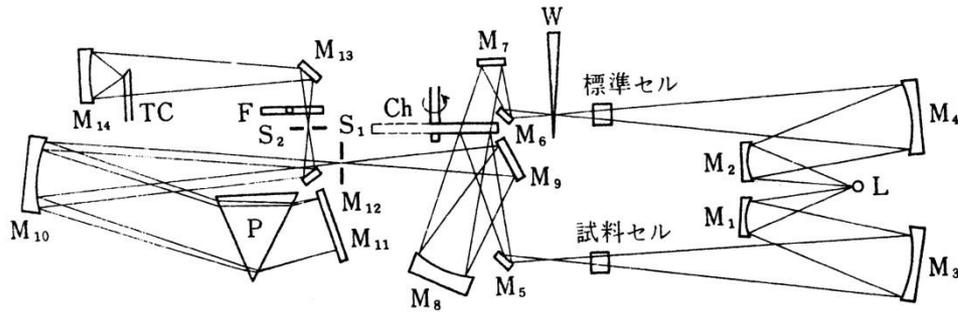
HIGH RESOLUTION

GREAT FLEXIBILITY

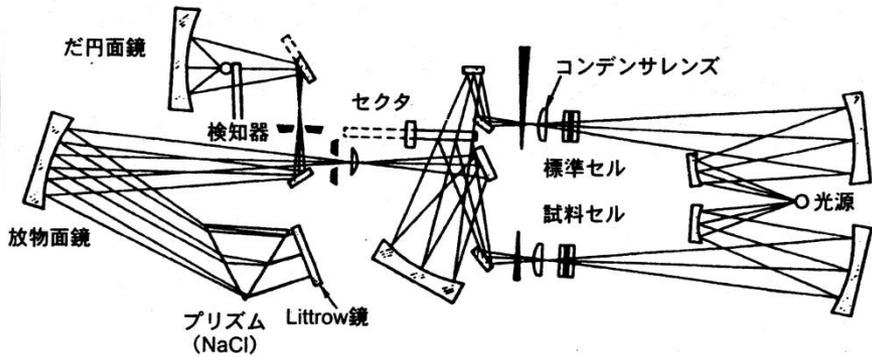




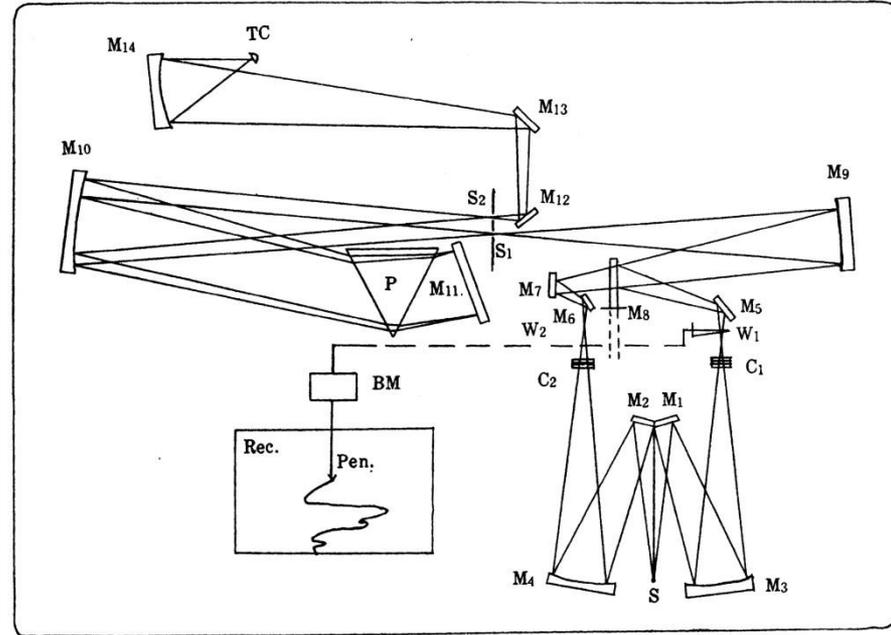
パーキンエルマー Model-21



島津製作所 IR-27C



日立製作所 EPI-1



日本分光 (応用光学研究所) D101

### 3) 分光の方式と測光の方式 —分散分光法はアナログ光コンピューター—

- 1次元型の分光計測は2次元から3次元に向かって進展、多パラメータ計測の時代となる。古くからの光学的分散分光が年々進化するのと並行してコンピュータによるフーリエ変換分光が普及した。分光光束関連量を定量化する測光方式も光変調法に始まり多種多様化してきた。

$I = f(\lambda)$  : 静的スペクトロスコピー

$I = f(\lambda, t)$  : 時間分解スペクトロスコピー

$I = f(\lambda_1, \lambda_2)$  : 波長2次元マトリクススペクトロスコピー  
相関スペクトロスコピー

$I = f(\lambda, x, y)$  : 空間2次元スペクトロスコピー

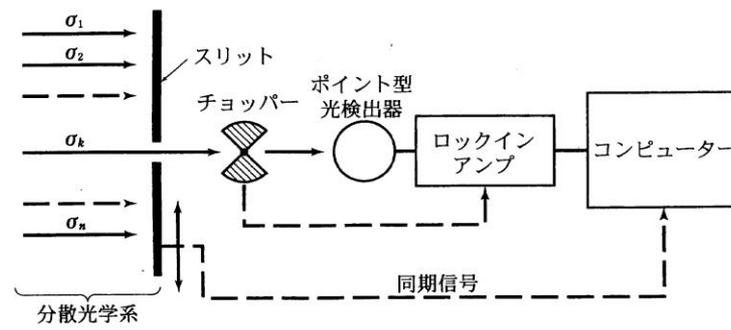
$I = f(\lambda, t, x, y)$  : 時間分解空間2次元スペクトロスコピー

$I = f(\lambda, x, y, z)$  : 3次元空間スペクトロスコピー

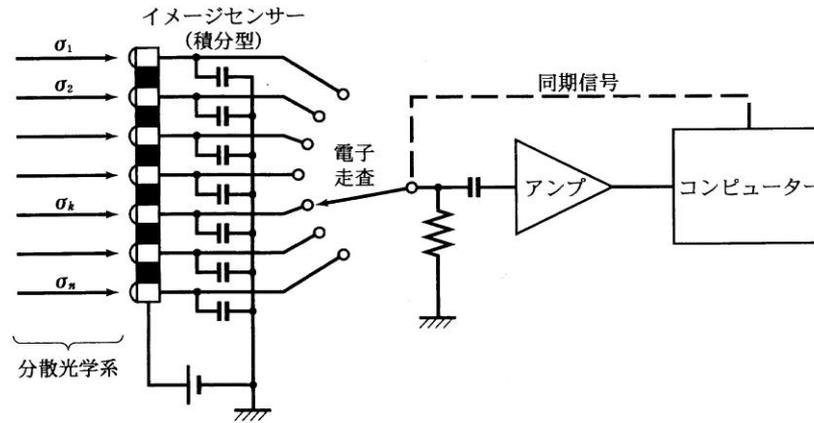
$I = f(\lambda, t, x, y, z)$  : 時間分解空間3次元スペクトロスコピー

## 分光測光データ収集方式

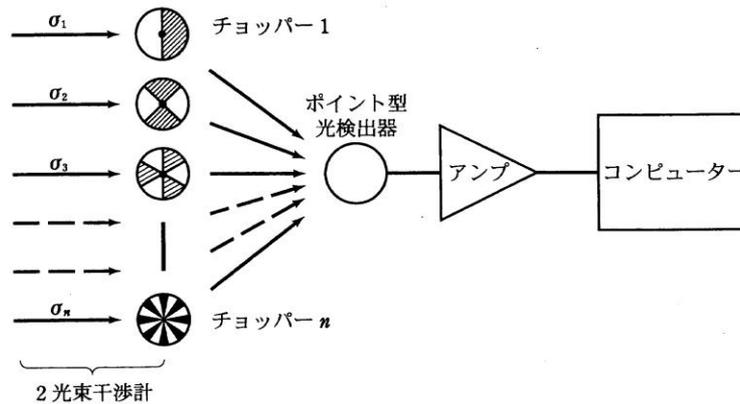
シーケンシャル方式	シングルチャネル	非分散	薄膜干渉同調フィルタ 液晶同調フィルタ (LCTF) 音響光学同調フィルタ (AOTF)
		分散	逐次連続走査 (SLS) 逐次間欠走査 (SSS) イメージディセクタ
パラレル方式	マルチチャネル	非分散	共鳴検出器方式
		分散	写真フィルム 比例型マルチチャネルセンサ 積分型イメージセンサ
マルチプレクス方式	シングルチャネル	非分散	干渉型フーリエ分光法 (IFTS) 時間領域分光法 (TDS) 相関分光法
		分散	アダマール分光法



(a) シングルチャンネル方式



(b) マルチチャンネル方式



(c) マルチプレクス方式

June 12, 1952 at 9:00 A. M.  
Auditorium, New Physics Laboratory  
Infrared Detection and Recording of Spectra

E. E. Bell, presiding

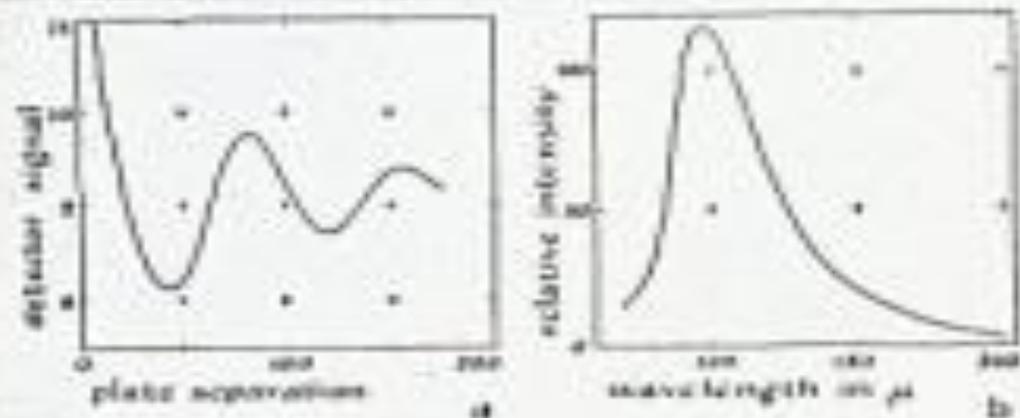
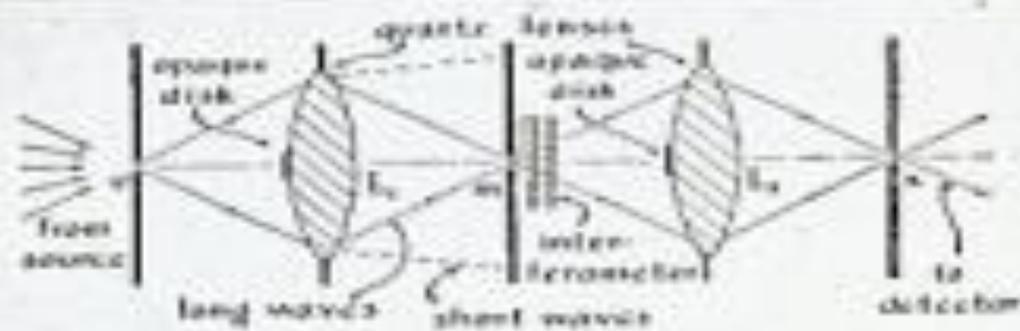
II MULTICHANNEL SPECTROMETRY

P. Fellgett  
Lick Observatory  
Mount Hamilton, California

The sensitivity of infrared detectors is already so close to fundamental limits that further large increases seem unlikely. Improvements in the performance of spectrometers are possible by increasing the area of the source that is used, either by increased dispersion or by multiple techniques. It is theoretically possible to increase the intensity of the source almost without limit if the random thermal processes of radiation can be replaced by a coherent mechanism such as occurs in a radio antenna. This principle is the basis of modern microwave spectrometry, but there is no immediate prospect of it being extended to infrared frequencies. Semicoherent spark techniques perhaps deserve more attention than they have been given in recent years. Further improvements must depend on using more efficient methods of observation. A scanning spectrometer is very inefficient in that at every instant it rejects all but one element of the incident spectrum. This loss is avoided in a spectrograph by having effectively a separate radiation detector for each spectral element. Sensitive infrared image detectors are not at present available, but the spectral elements can be measured simultaneously by a single detector if suitable orthogonal modulation patterns are impressed on the separate elements. A convenient method of producing the required modulation is by varying the path difference in a two-beam interferometer. No dispersing optics, such as prisms or gratings, is then required.

The theory of this method, which may be termed multichannel spectrometry, has been investigated in detail, and it has been confirmed experimentally that the method gives spectra with the expected resolution and that the theoretical increase in sensitivity is realized.

The multichannel method is especially appropriate to astronomical spectrometry, where no improvement in intensity or area of the source is possible.

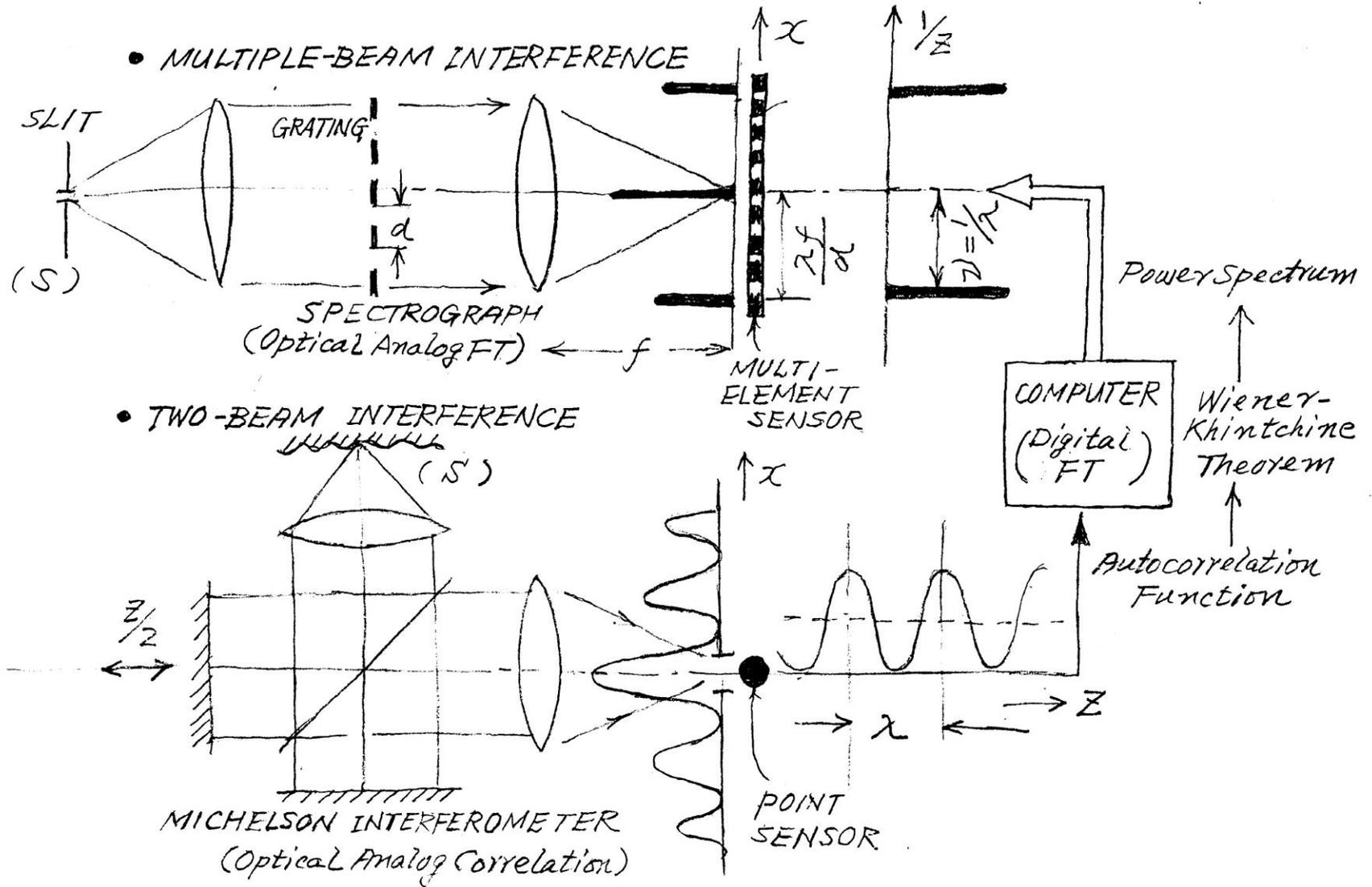


(a) Two-beam interferogram obtained by Hulme and Wood. (b) Result of Fourier analysis of curve a where abscissae are in Na-D wavelengths.

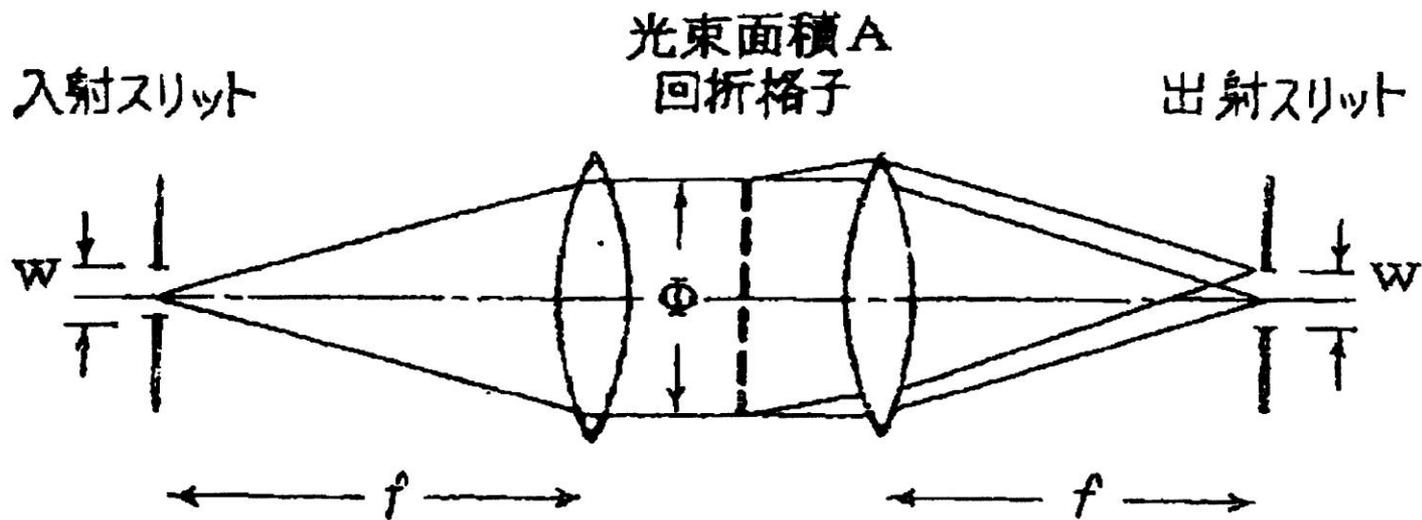
表2 分光システムのSN比比較表.

雑音条件 SN 比比較	検出器 雑音支配	光子 雑音支配	変調 雑音支配	
	$N \propto \sqrt{T}$	$N \propto \sqrt{I \cdot T}$	$N \propto I \cdot \sqrt{T}$	$N \propto I \cdot T$
$\frac{\text{SN 比(MX)}}{\text{SN 比(SC)}}$	$\sqrt{n}$	$\frac{\sqrt{B(\sigma)}}{\bar{B}}$	$\frac{B(\sigma)}{\bar{B}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$	$\frac{1}{n}$
$\frac{\text{SN 比(MC)}}{\text{SN 比(SC)}}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	1

SC：シングルチャネル，MC：マルチチャネル，MX：マルチプレックス， $N$ ：積算雑音レベル， $I$ ：光強度， $T$ ：全測定時間， $B(\sigma)$ ：スペクトル強度， $\bar{B}$ ：平均入射光強度



COMPARISON BETWEEN MULTICHANNEL DISPERSED AND MULTIPLEX FT SPECTROMETRY



単色放射源

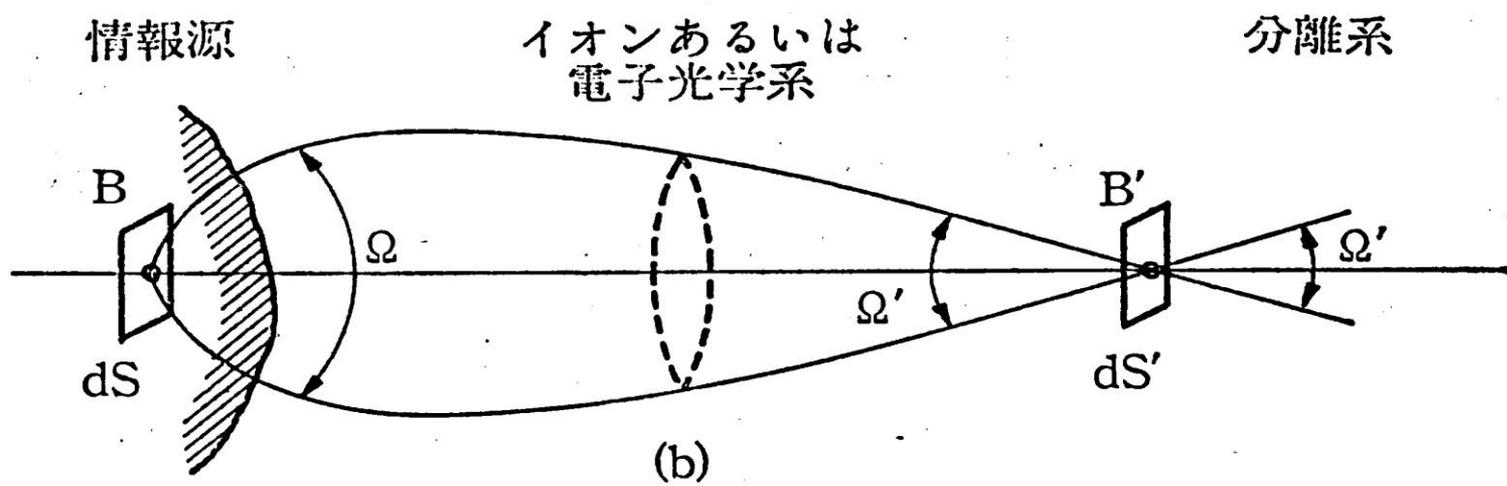
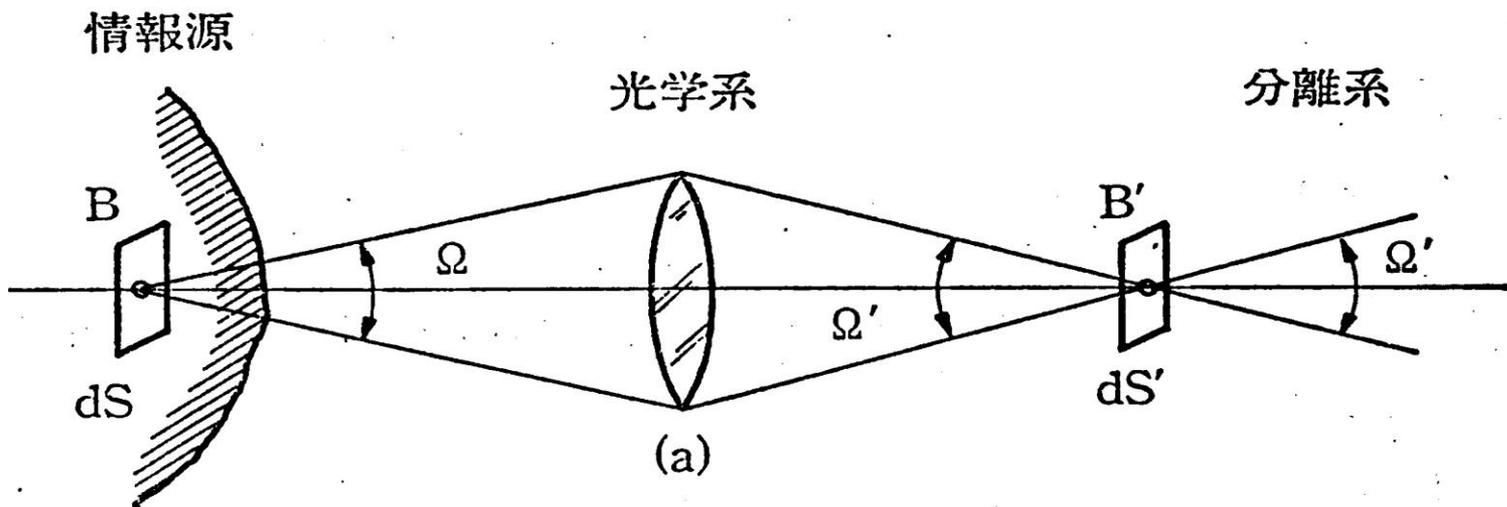
$$P_d = \frac{h w A}{f^2} N \quad (1)$$

連続放射源

$$P_{d\lambda} = \frac{h w^2 A}{f^3 D_\theta} \quad N_\lambda = \frac{h D_\theta A}{f} \quad N_\lambda (\Delta\lambda)^2 \quad (2)$$

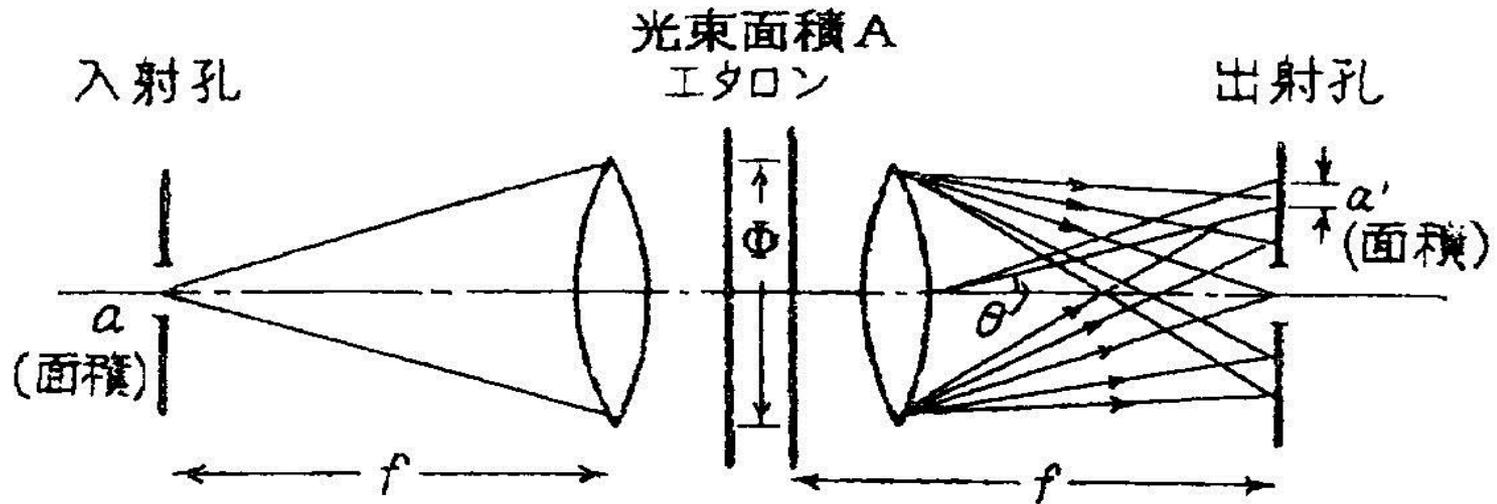
P : 有効放射パワー, N : 光源放射輝度, h : スリット高,

D : 角分散,  $\Delta\lambda$  : 分解波長



情報源から分離系への情報のとり込み。

# 干渉分光法



ファブリ・ペロー干渉計概念図

連続放射源

$$P f \lambda = a' \frac{A}{f^2} N_{\lambda} \Delta \lambda = A D_{\theta} N_{\lambda} (\Delta \lambda)^2 \quad (3)$$

$P$  : 有効放射パワー,  $N$  : 光源放射輝度,  $h$  : スリット高,

$D$  : 角分散,  $\Delta \lambda$  : 分解波長

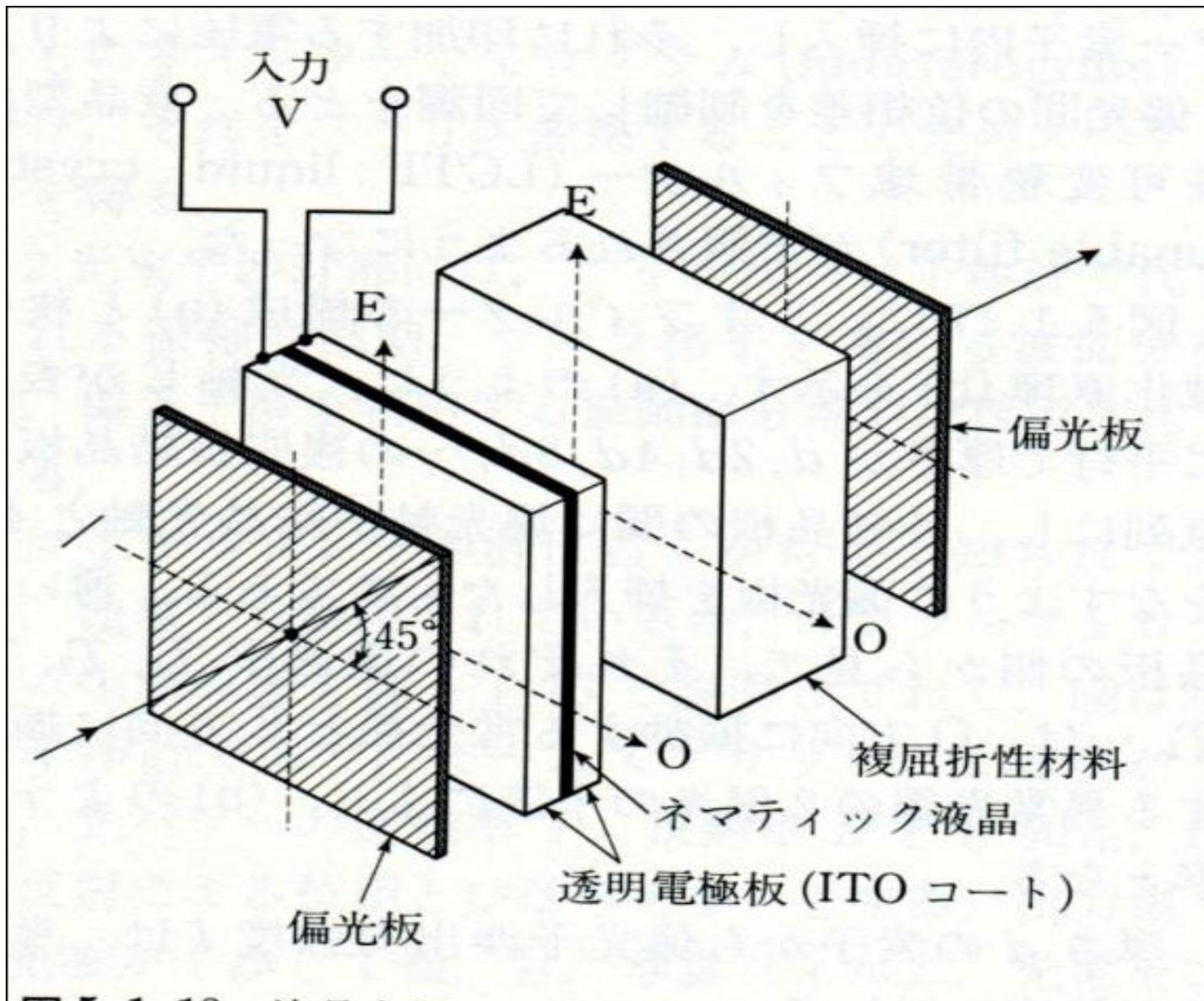


図 5-1-10

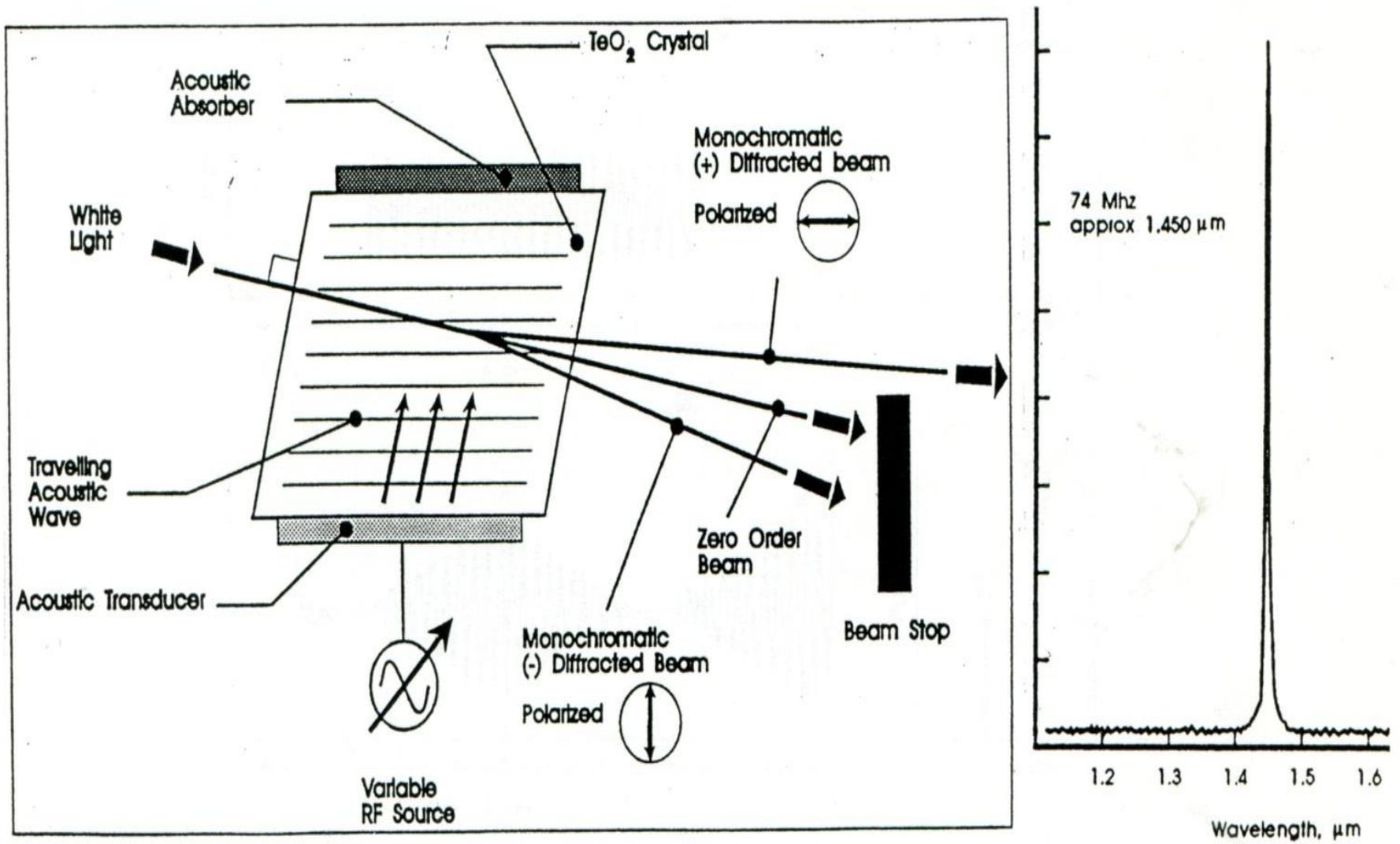


Fig. 8 Operational principle of AOTF and typical tuned output. (Brimrose Co.)

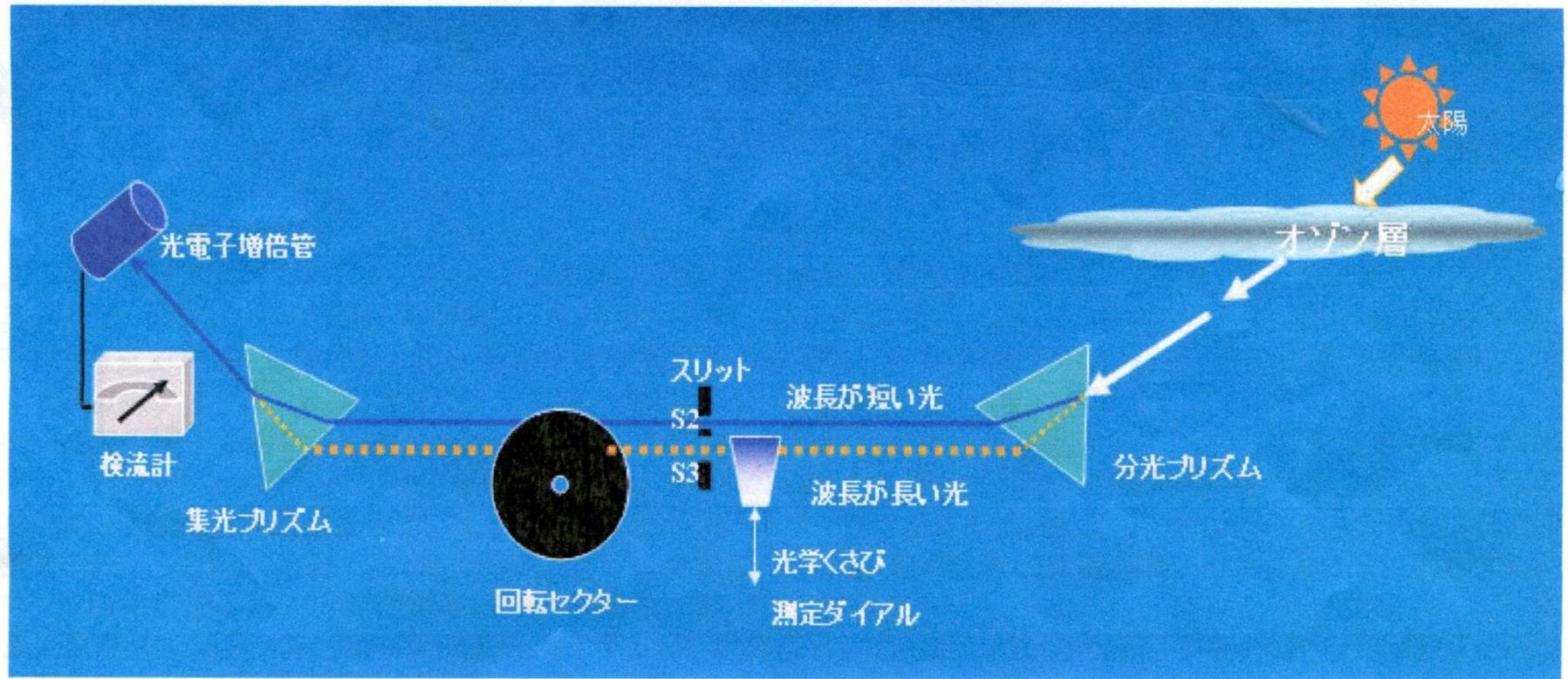
## 4) 天空からの贈り物 —独自の道を拓く天文学者—

分光機器の発展に天体分光学が大きく関わっている。1813年の Fraunhofer 線の発見や回折格子の製作を考えてもわかる。2波長分光光度計や高分解FTSなどは、地上に先駆けて天文分野で実用化。

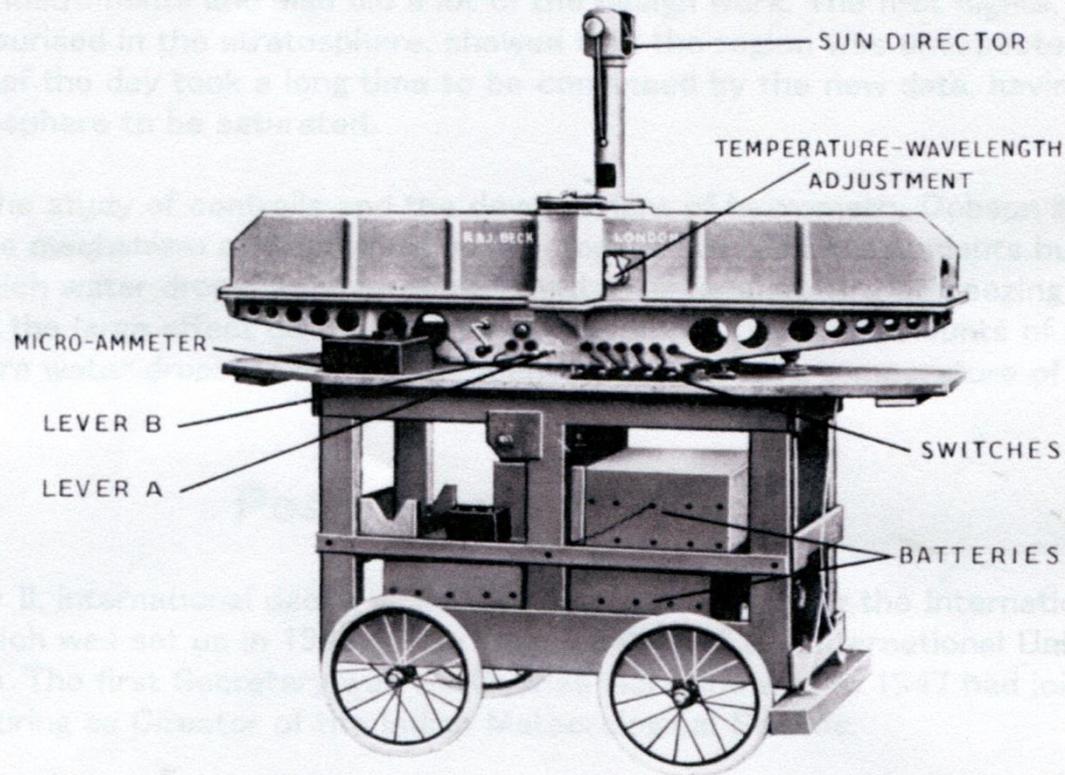
イメージング分光も、天体物理や高空からのリモートセンシングにその源を発している。

。

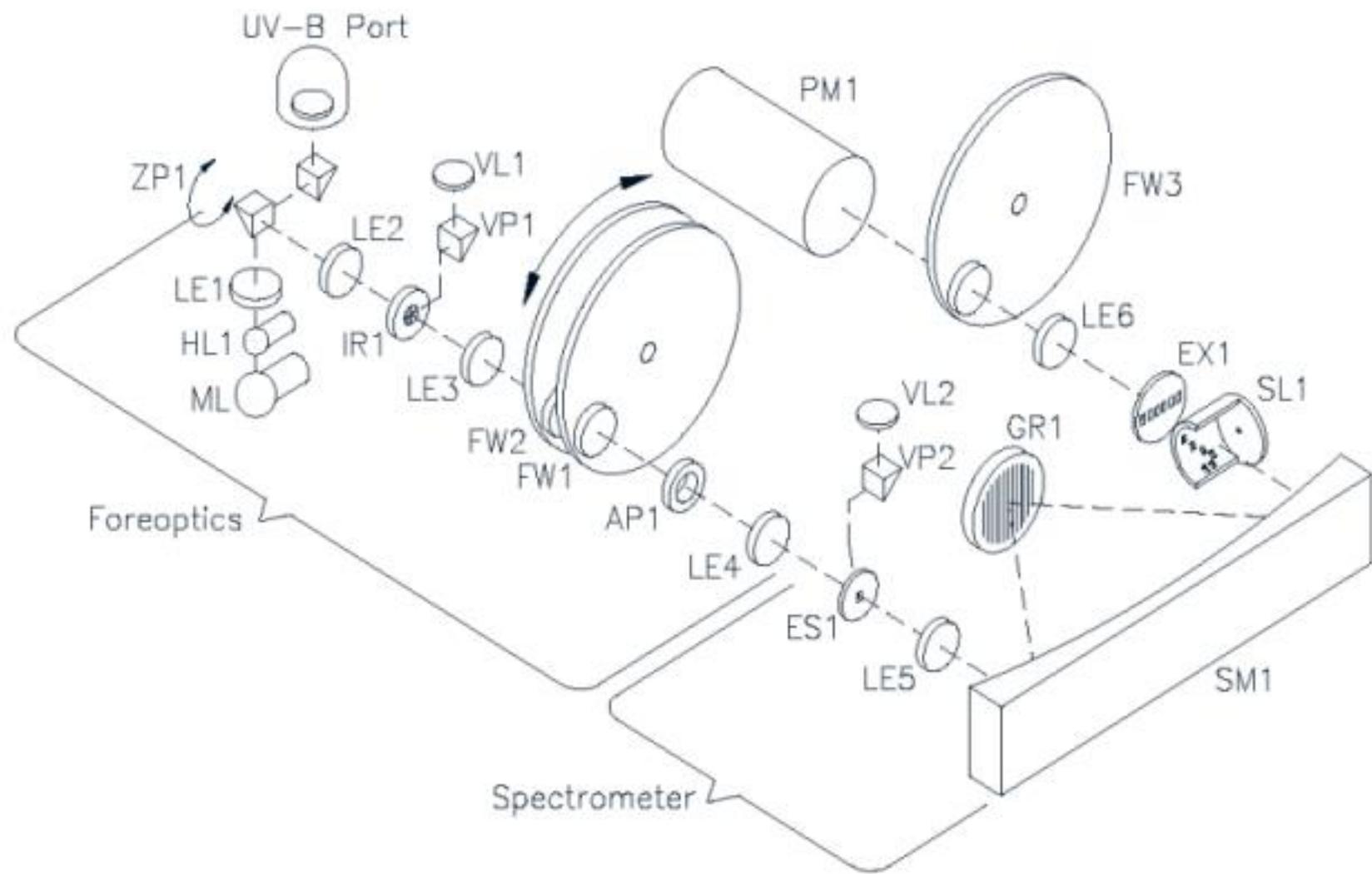
波長組	S2スリット	S3スリット
A	305.5	325.0
C	311.5	332.4
D	317.5	339.9



## The development of the photoelectric spectrophotometer



The inconvenience of the photographic technique led Dobson to design and build his photoelectric spectrophotometer which enabled the relative intensity at two wavelengths to be measured directly. It was completed in 1927 or 1928, the design being remarkably advanced for its day. It is probably the first spectrophotometer to use the principle of synchronous detection of a weak signal. It used a photocell with a sodium cathode made by T. C. Keeley, who had also made the photocells used in the microphotometer which Dobson built for measuring the photographic plates. This instrument, like the Fabry spectrographs, was built by Dobson himself in his own workshop.



(Amich イタリア 1786~1863)

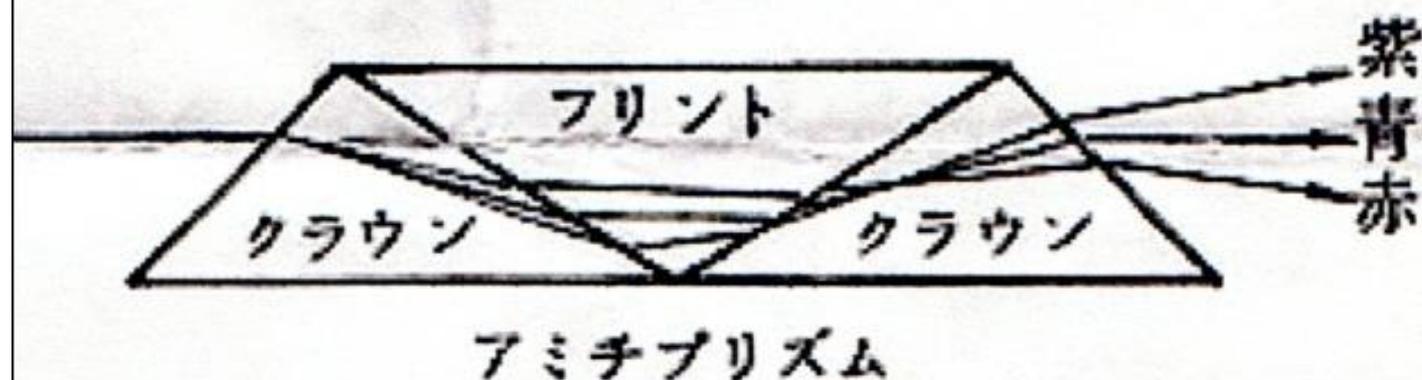
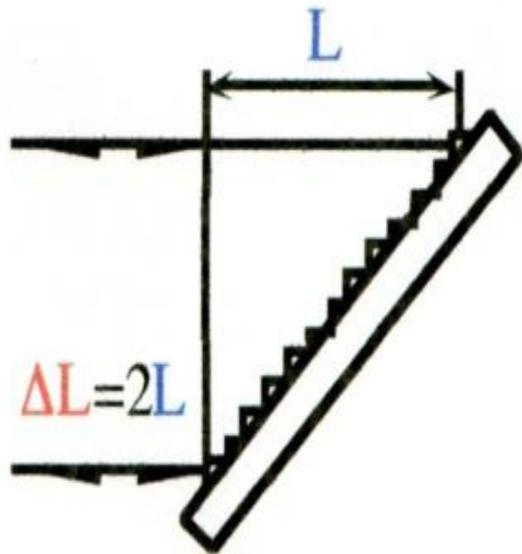
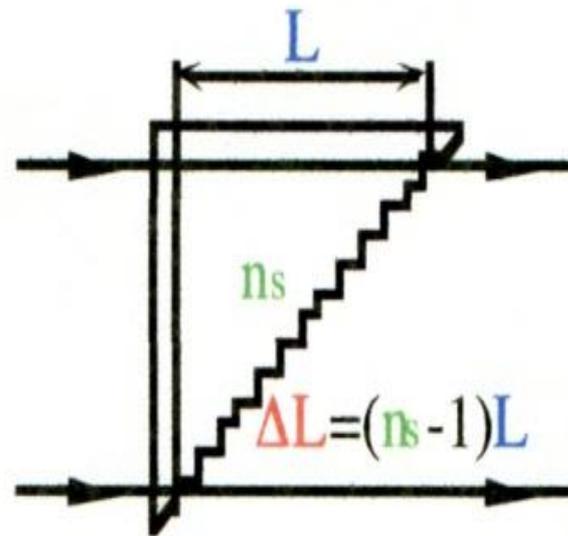


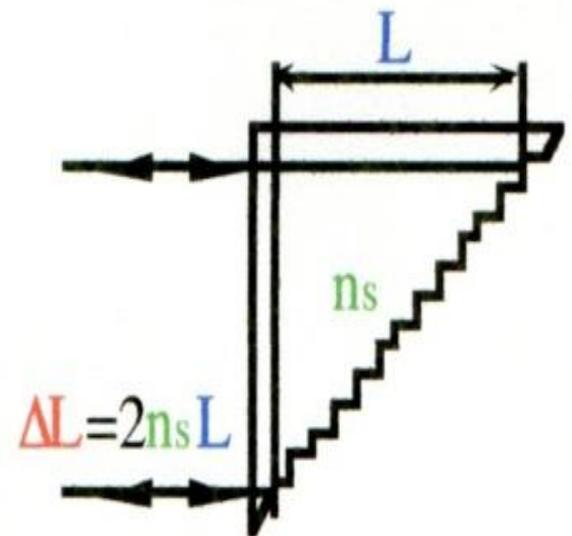
図1 アミチプリズム



(a) Reflection grating



(b) Grism



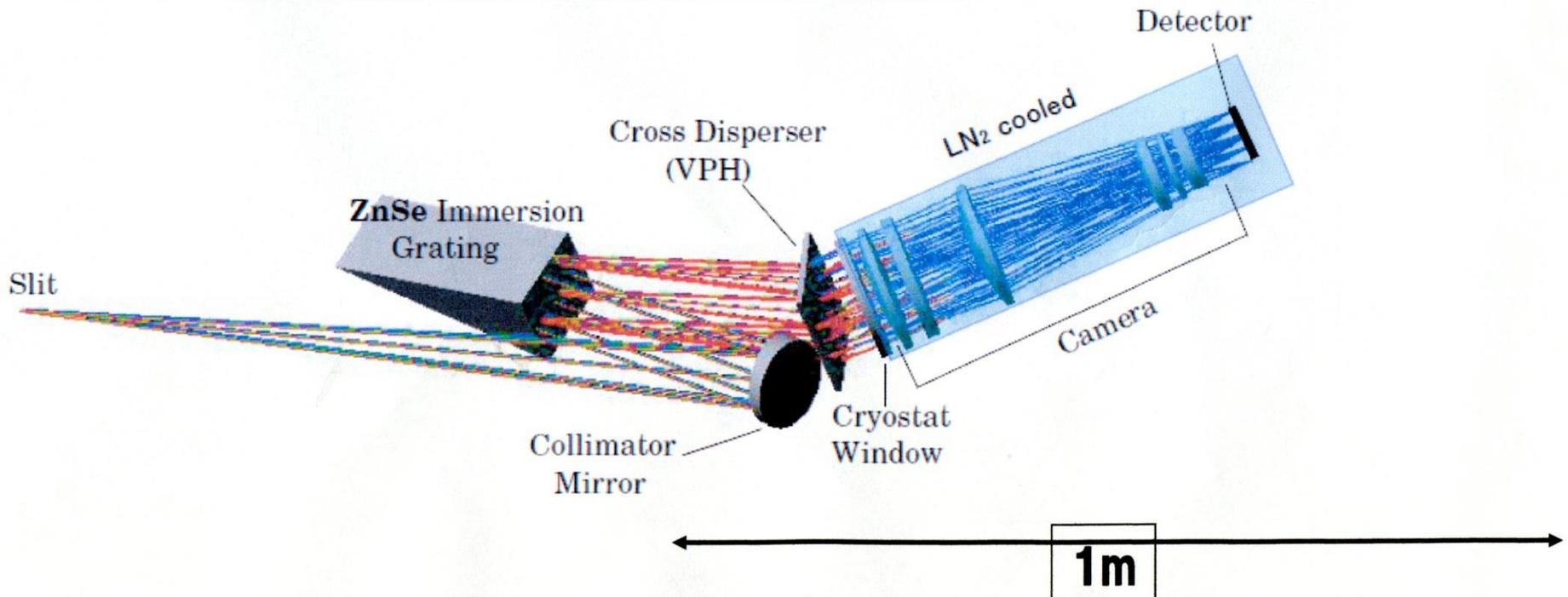
(c) Immersion grating

Ideal Resolving Power :  $R = \Delta L / \lambda$ ,  $n_s$  : Refractive index

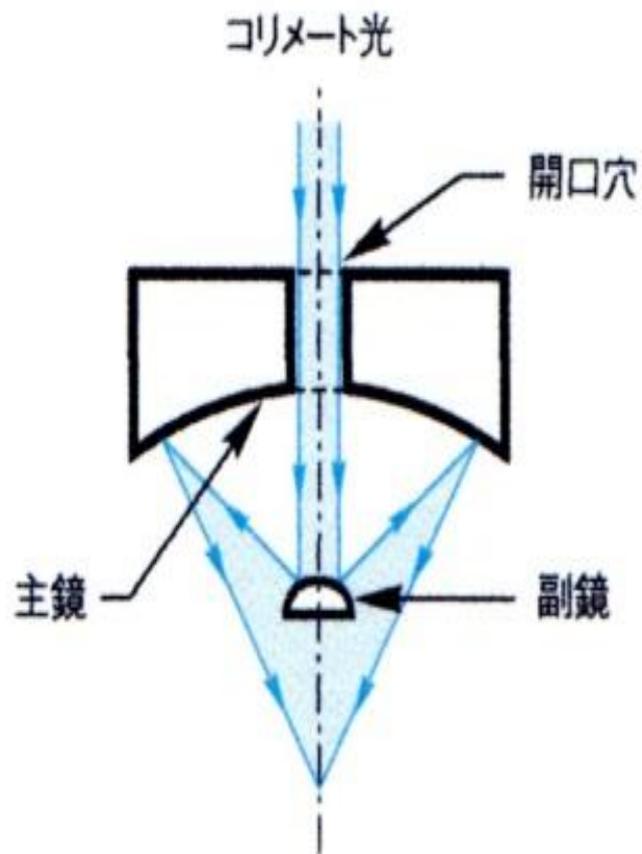
波長	分解能	材質	溝ピッチ	有効径
<b>0.9~1.35</b> <b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b><u>10万</u></b>	<b><u>ZnSe</u></b> <b>or</b> <b><u>ZnS</u></b>	<b><u>30 <math>\mu\text{m}</math></u></b>	<b>70mm</b> <b><math>\Phi</math></b>
<b>1.25~</b> <b>5.5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b><u>7万</u></b>	<b><u>Si</u></b>	<b><u>30 <math>\mu\text{m}</math></u></b>	<b>25mm</b> <b><math>\Phi</math></b>
<b>5.0~</b> <b>20 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b><u>3万</u></b>	<b><u>ZnSe</u></b> <b>or</b> <b><u>CdTe</u></b>	<b><u>200 <math>\mu\text{m}</math></u></b>	<b>35mm</b> <b><math>\Phi</math></b>

**(1) Warm optics  $\lambda$  0.9–1.35  $\mu\text{m}$**   
**(2) ZnSe immersion grating**

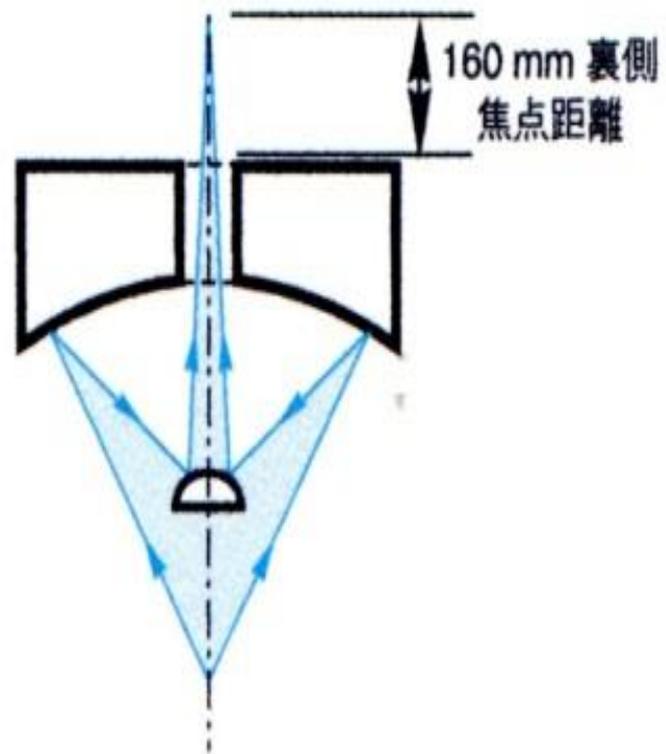
*Ikeda et al. 2006, SPIE*  
*Yasui et al. 2006, SPIE*



A)



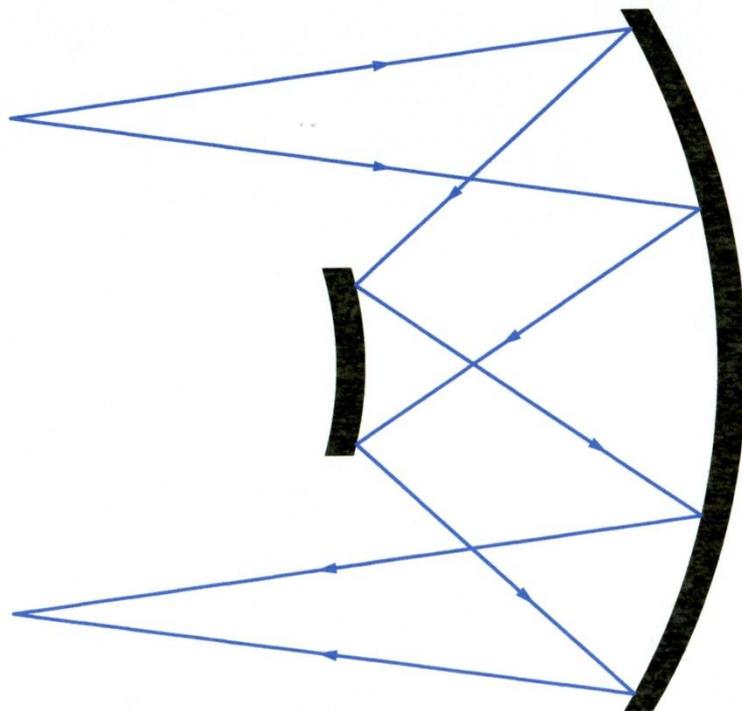
B)

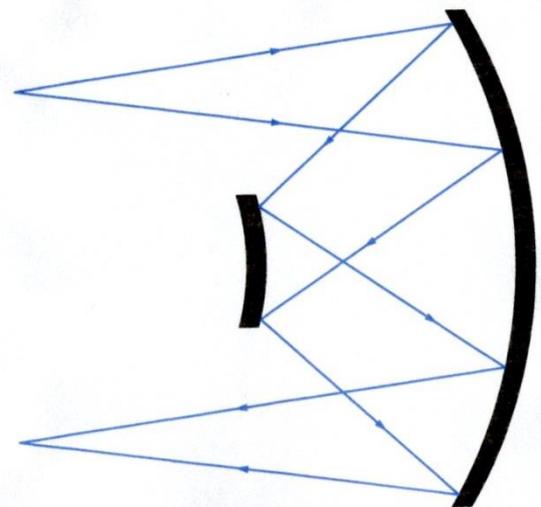
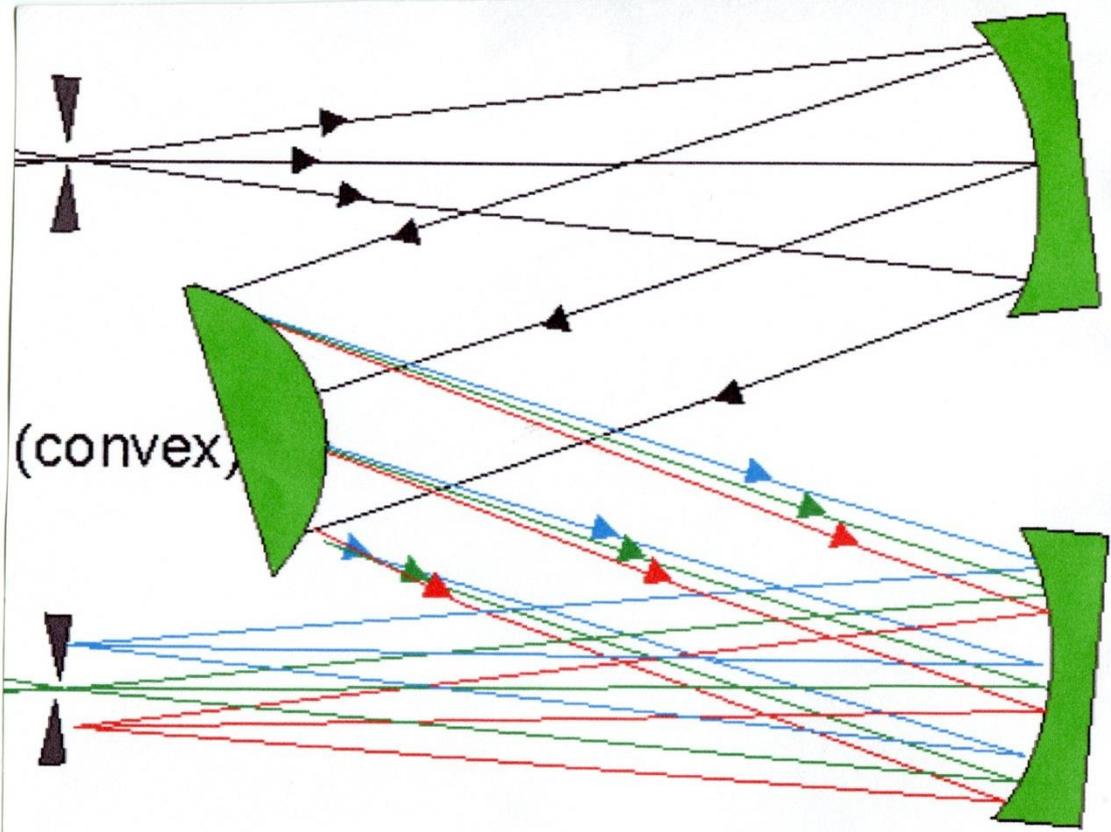


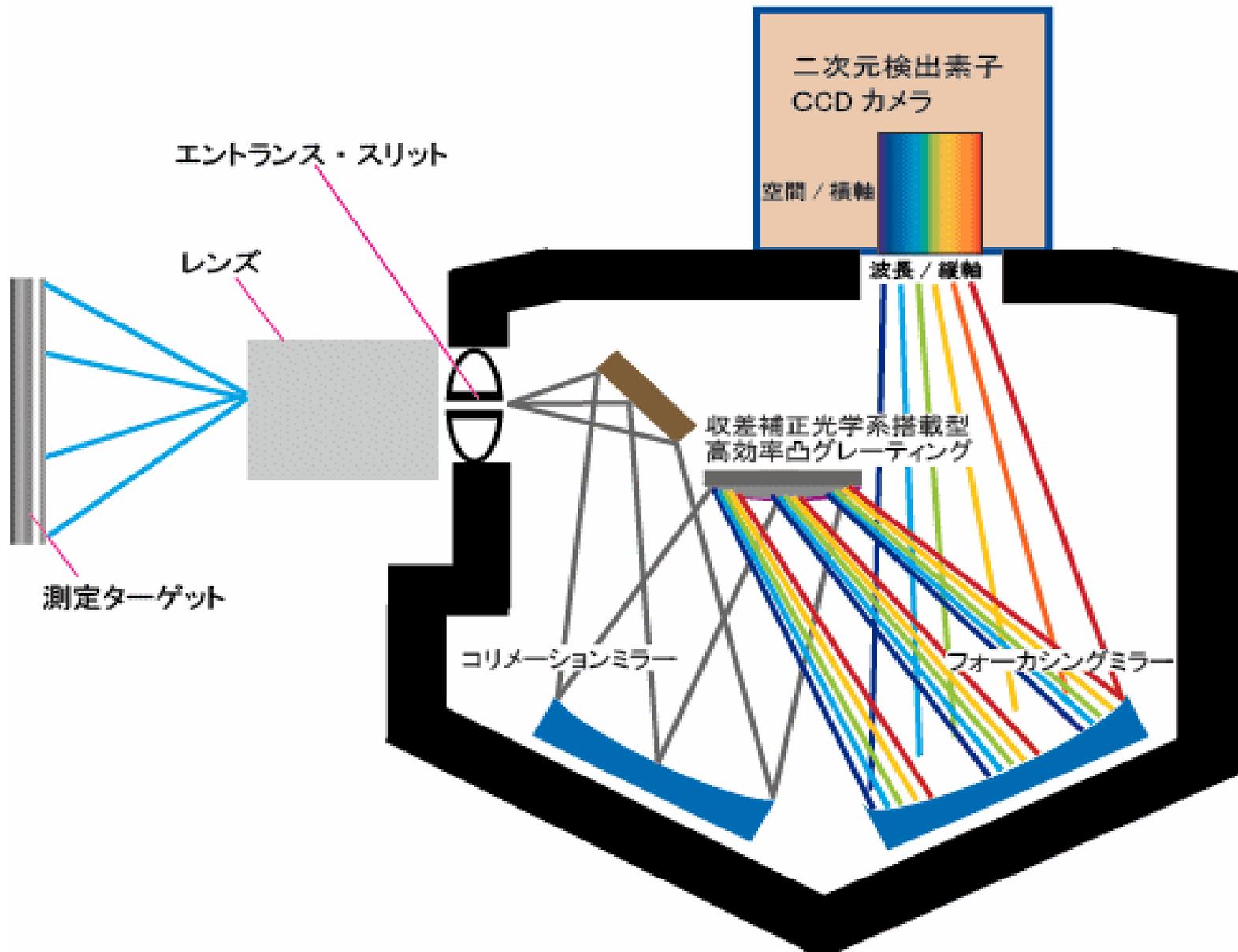
## <オフナー光学系>

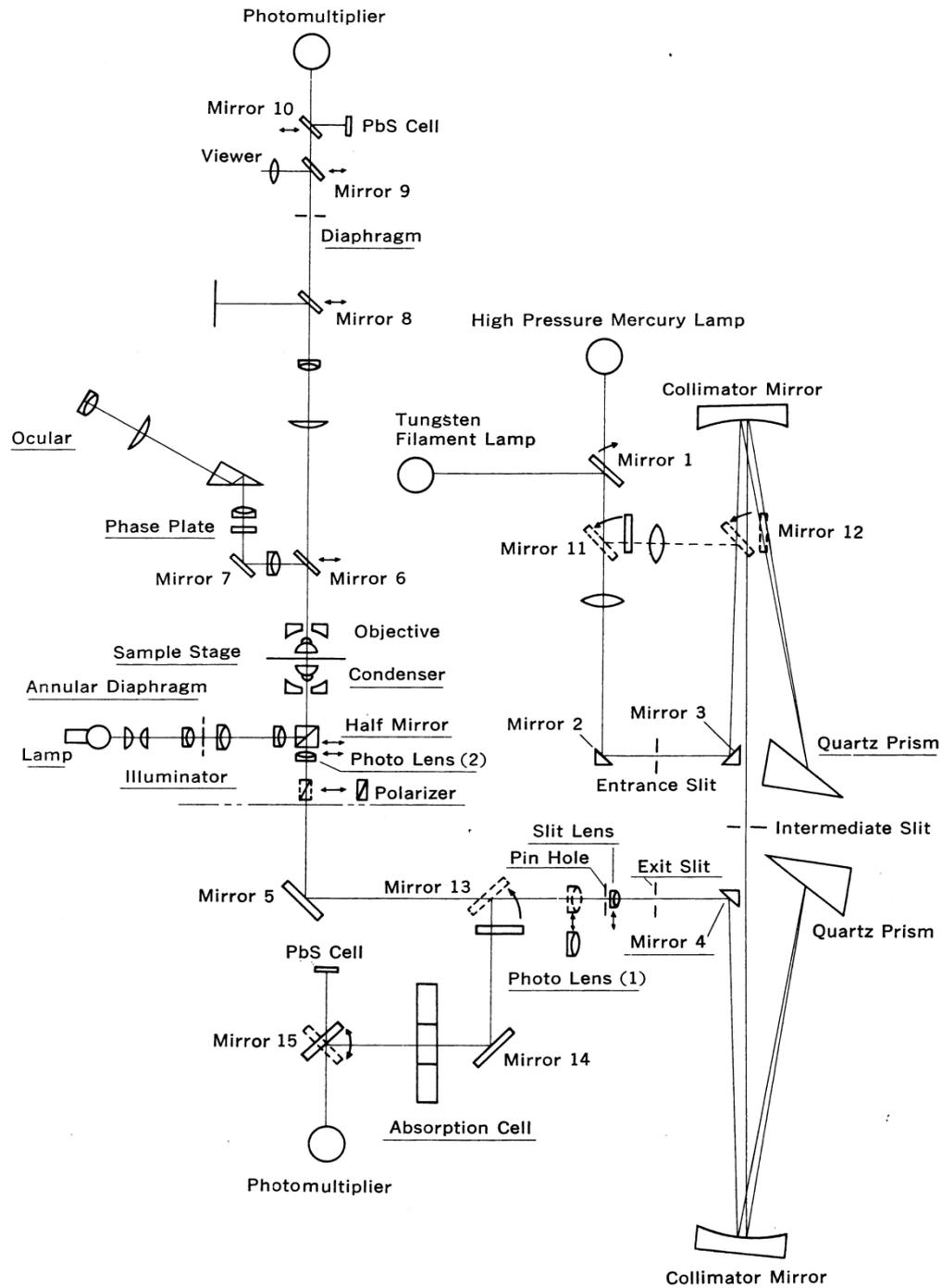
この光学系はパーキンエルマー社のオフナー氏の発明による。基本は同心球面ミラーを使うことで自動的に収差補正がなされる原理を応用したもので、ある像高で非点収差を除いて無収差に近い結像が可能になる。但し、良像の範囲は球心を通る対称軸に対して円環状の範囲に限られる。原理上色収差も無く、等倍結像する両側テレセントリック光学系になっている。ミラーのコーティングを変えれば真空紫外領域から赤外まで使うことができる。

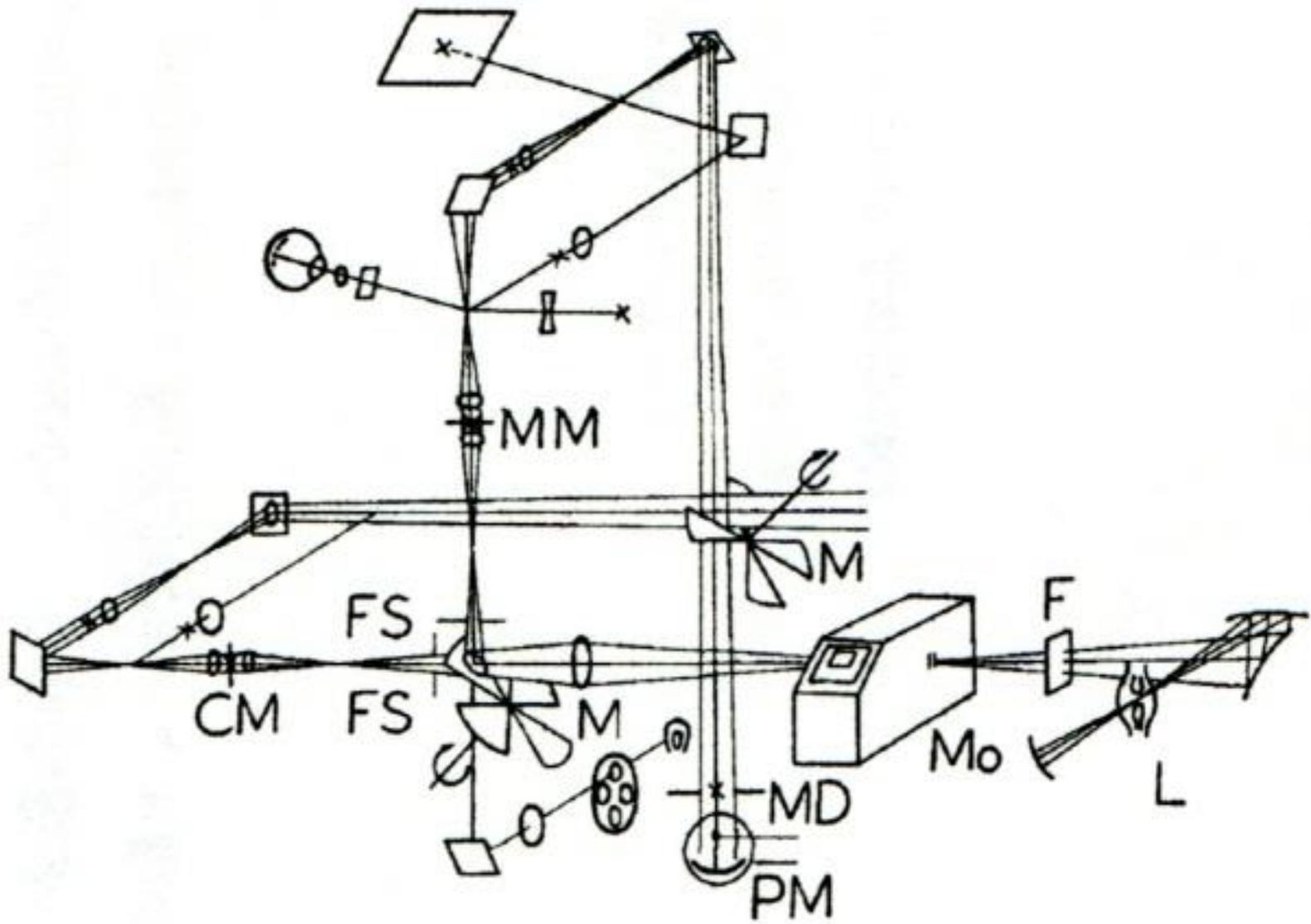
この光学系は紫外光が使えるため、一時半導体リソグラフィに使われたが、倍率が1倍であるため(等倍のマスクを作るのが大変)、今は一部を除いて使われていない。また、この光学系はフェムト秒ストリークカメラ用の群速度分散の無い光学系として使用されている。オプトメカ エンジニアリングのトレードマークになっている。



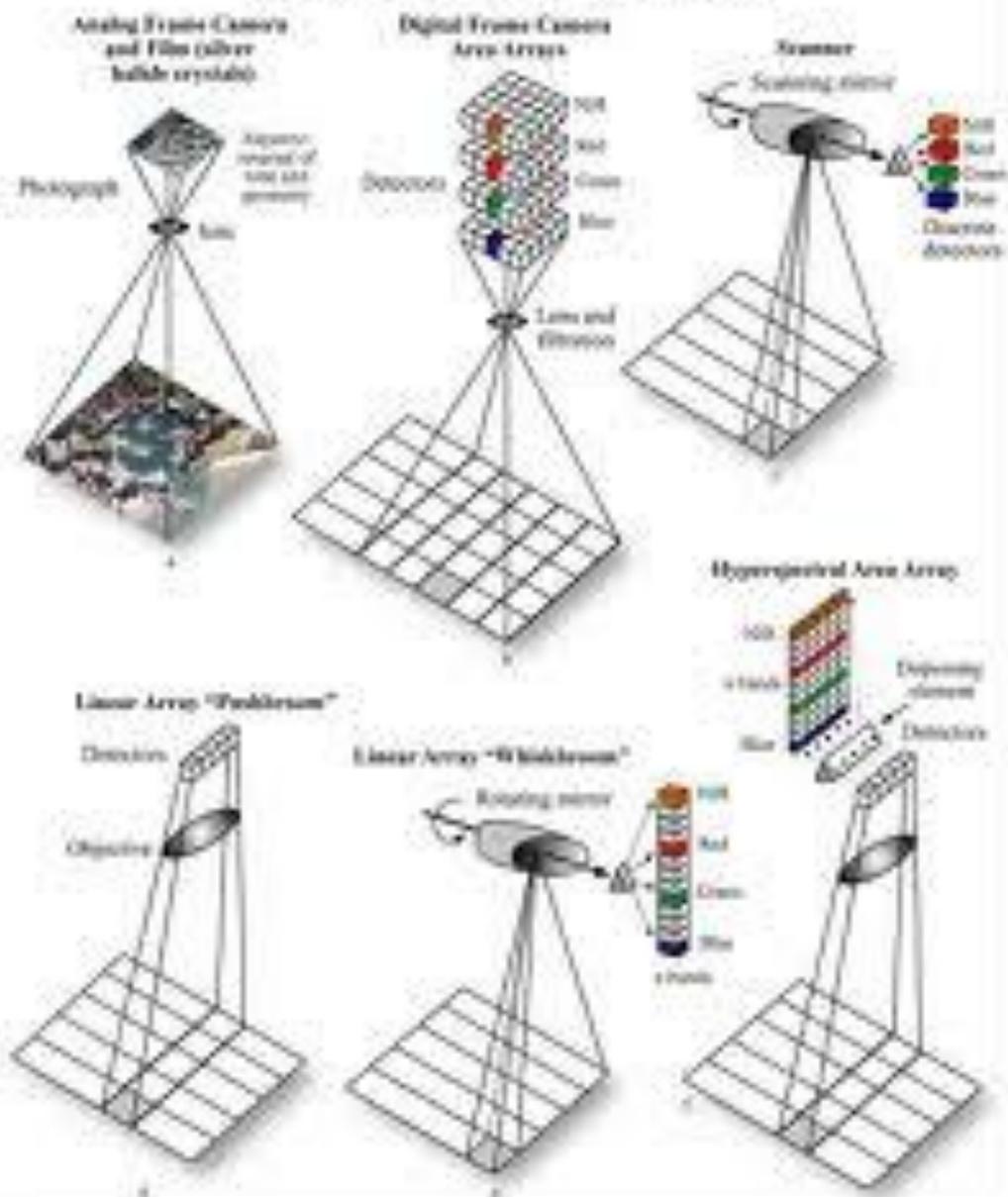








## Remote Sensing Systems Used to Collect Aerial Photography, Multispectral and Hyperspectral Imagery

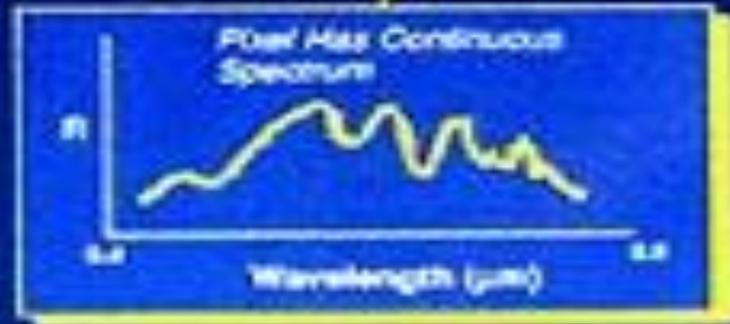


# Multispectral/ Hyperspectral Comparison

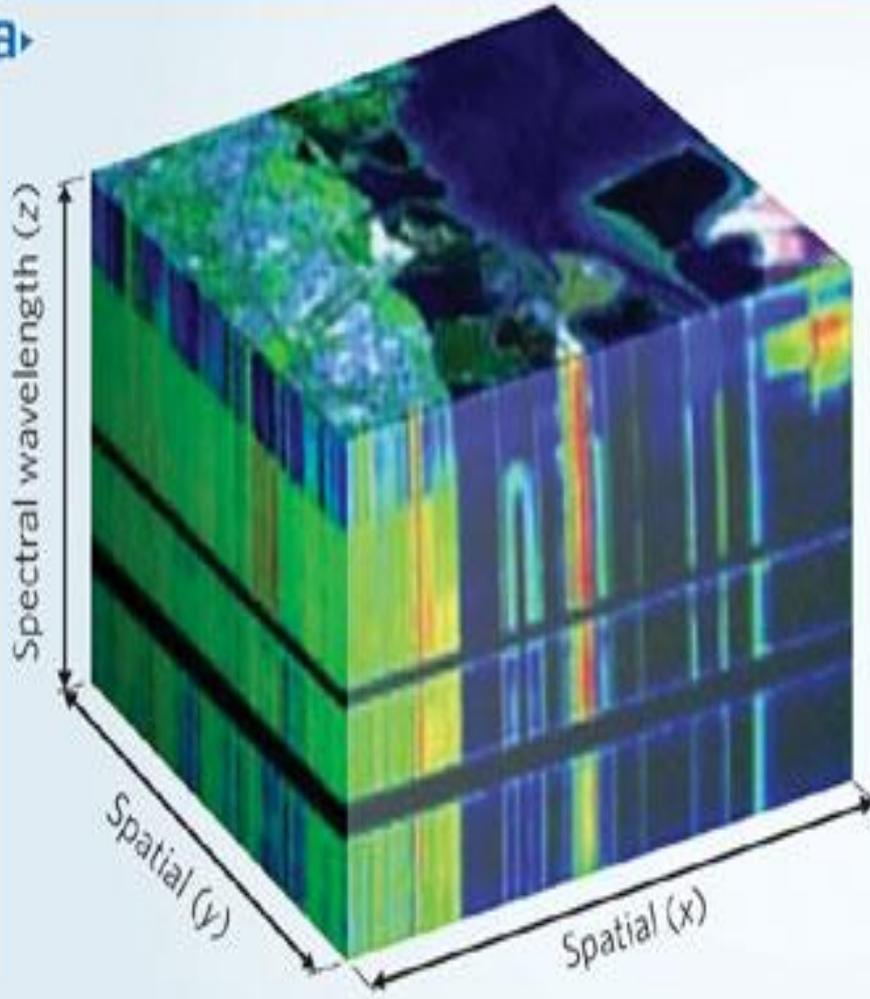
Multispectral



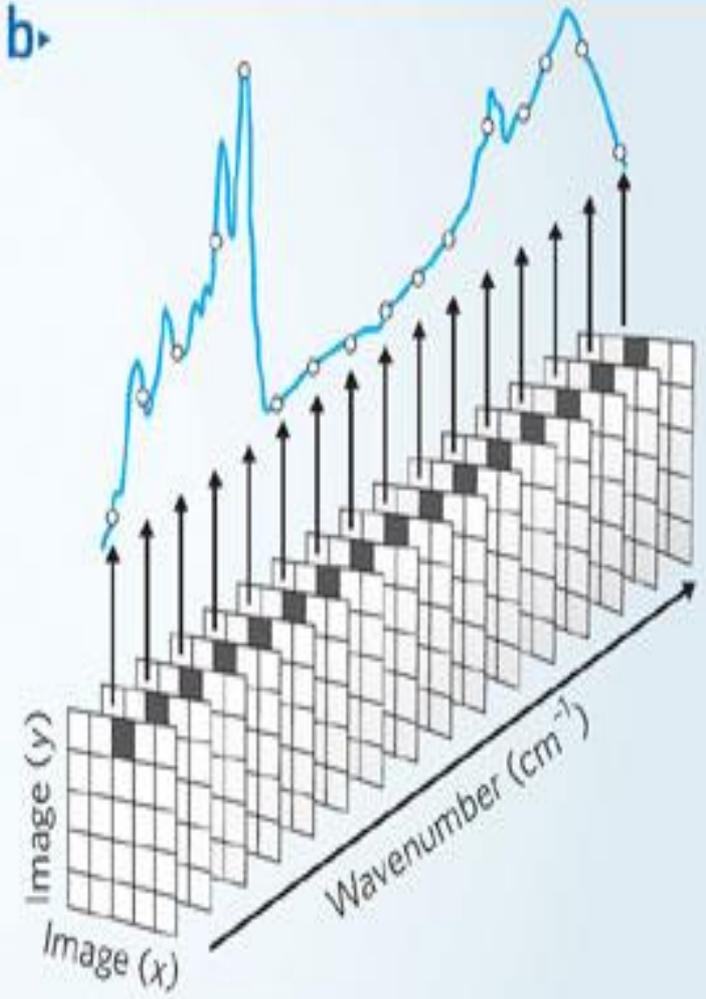
Hyperspectral

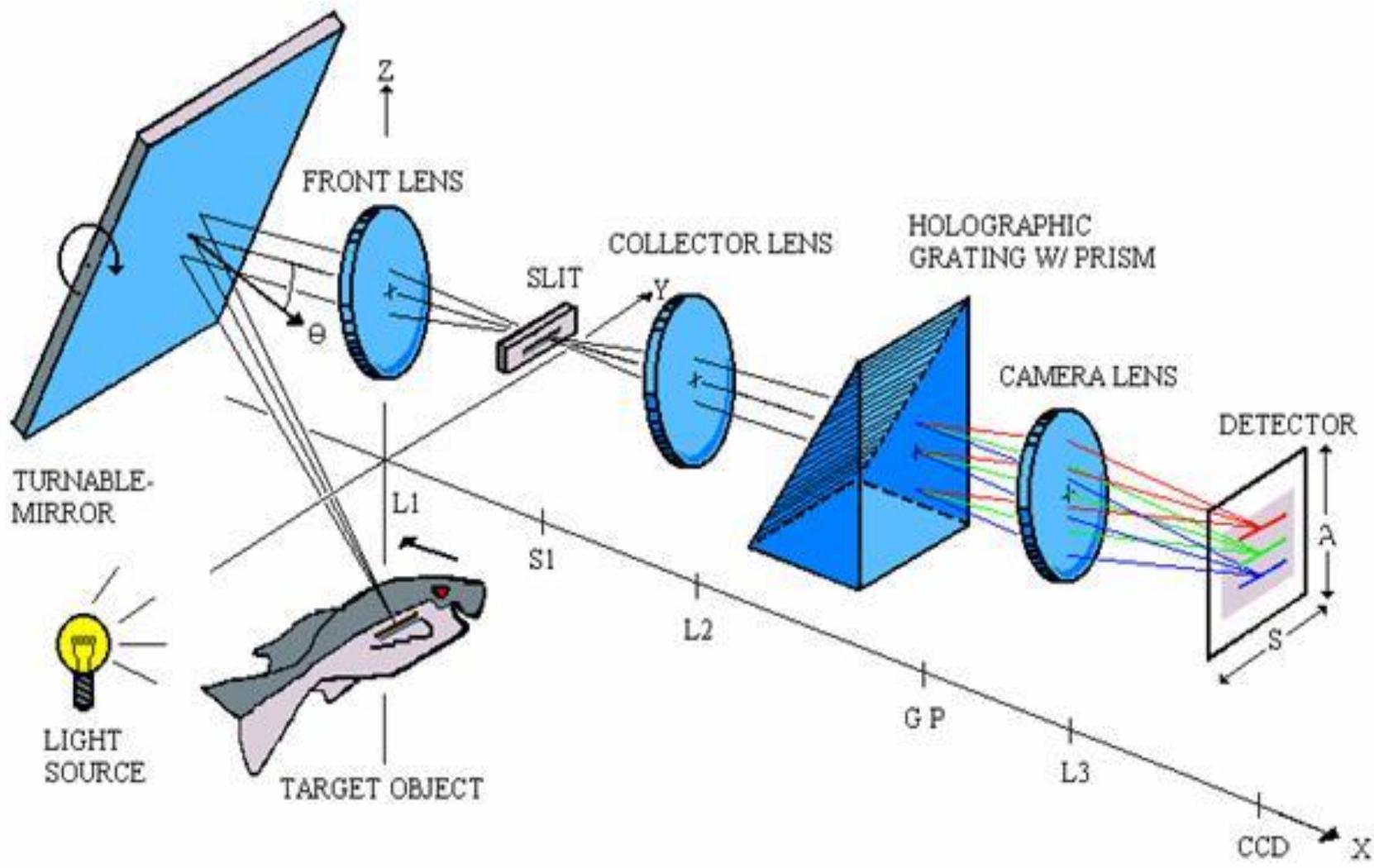


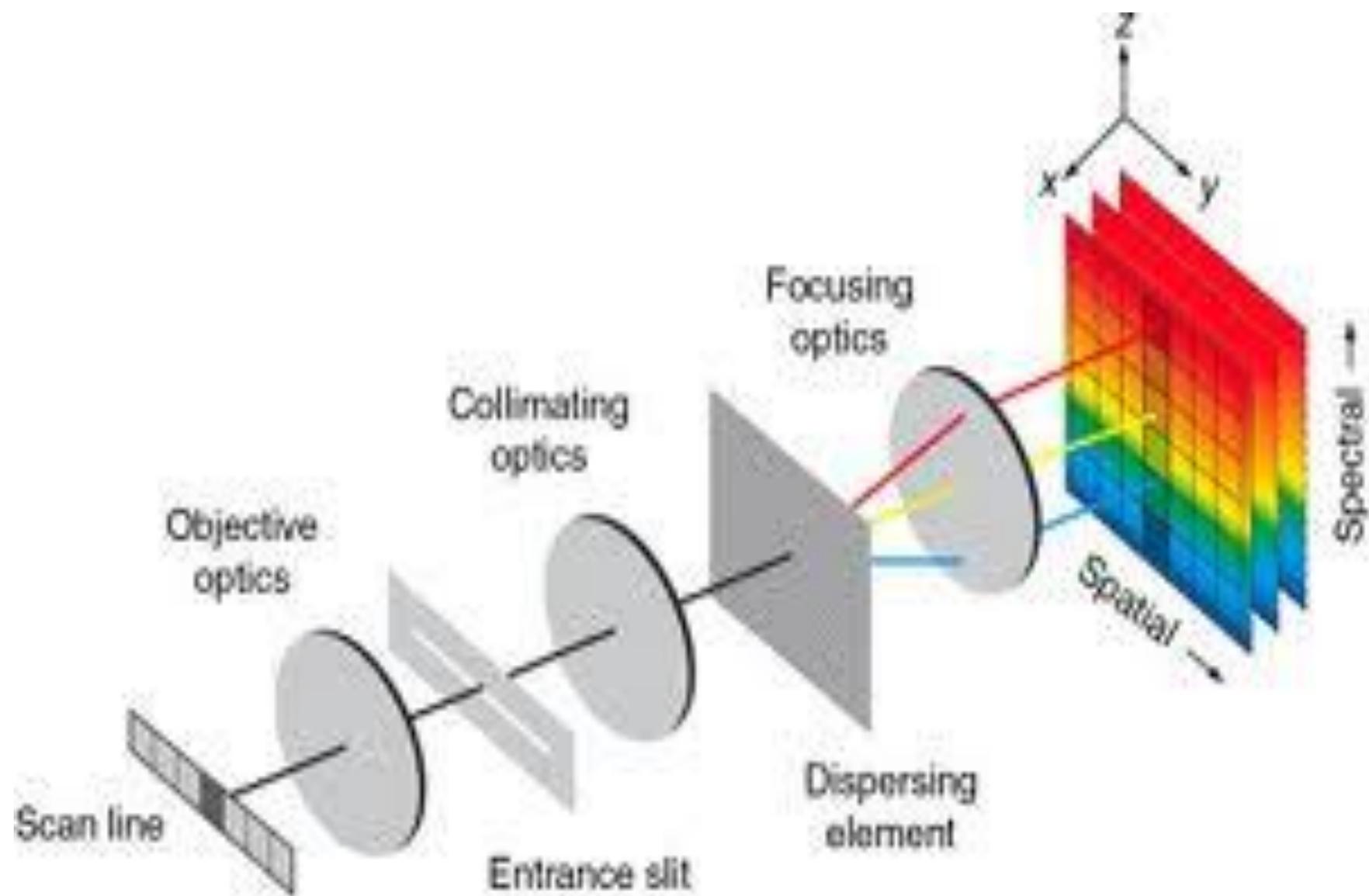
a

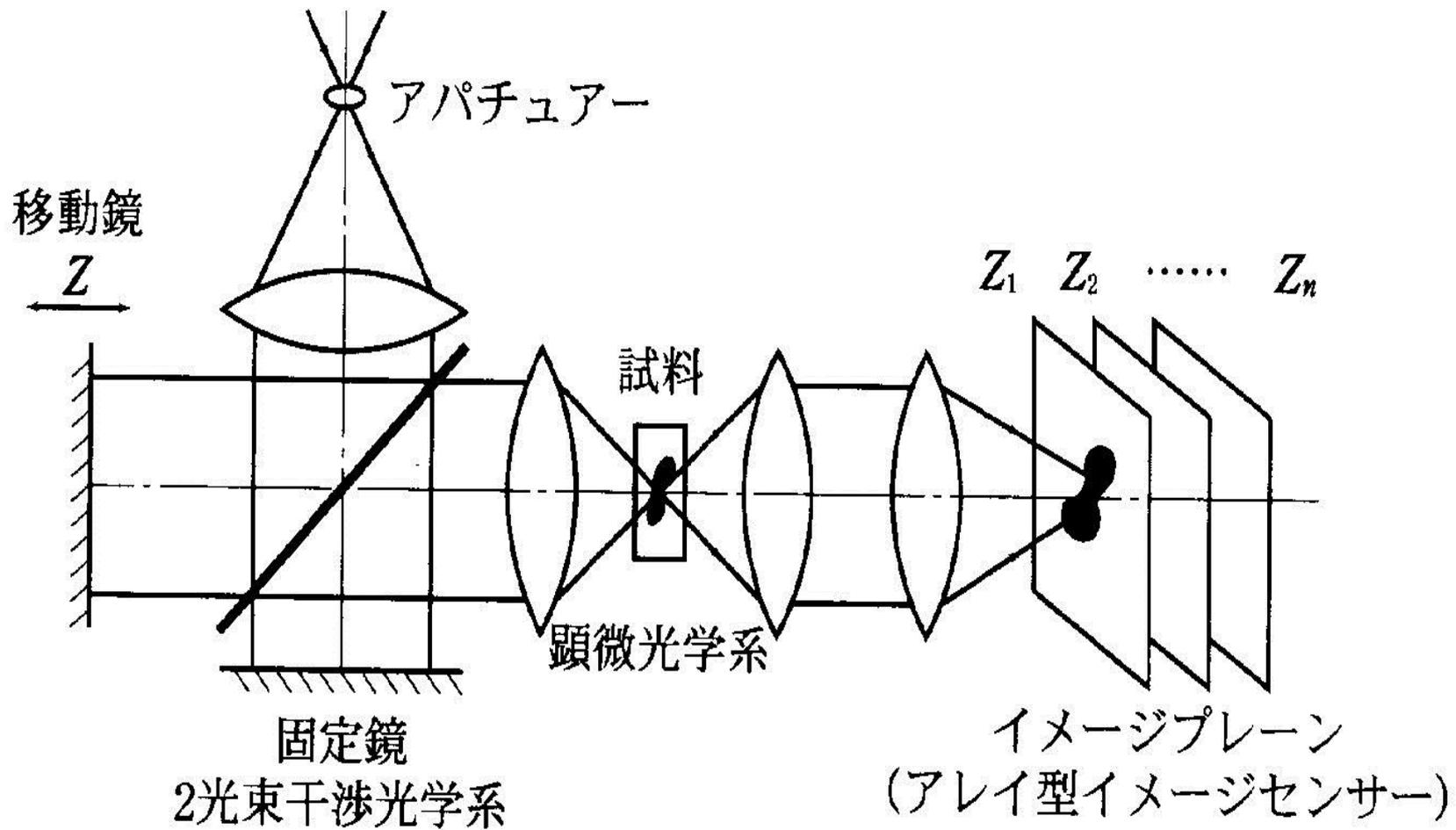


b







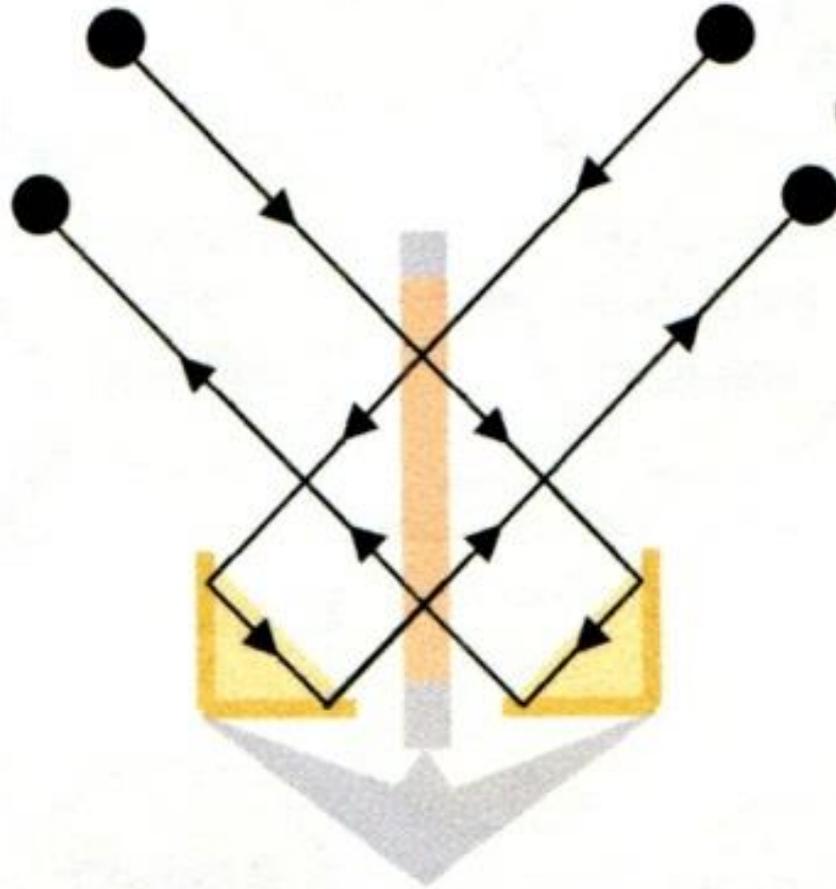


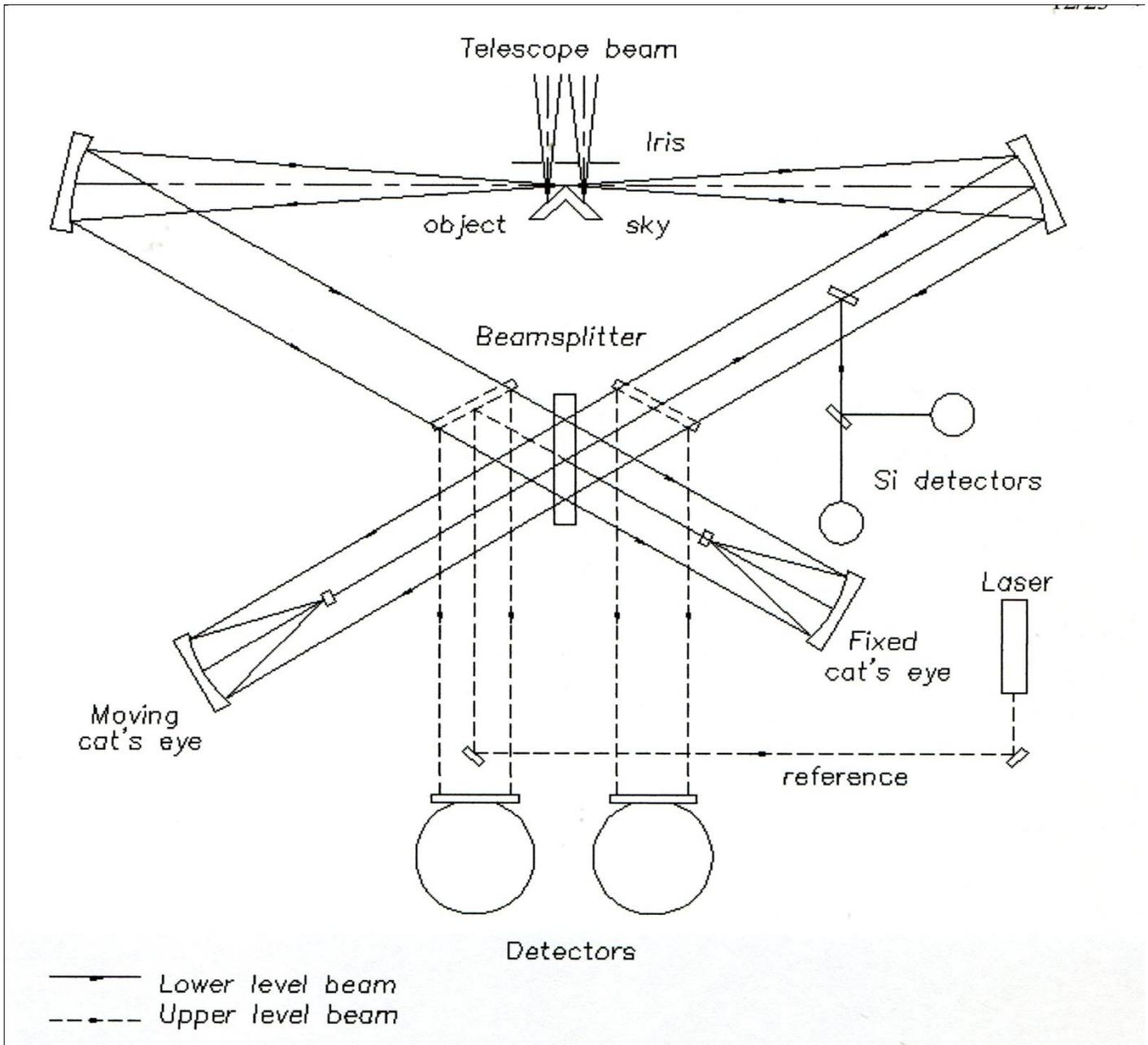
Input Port 1  
(target)

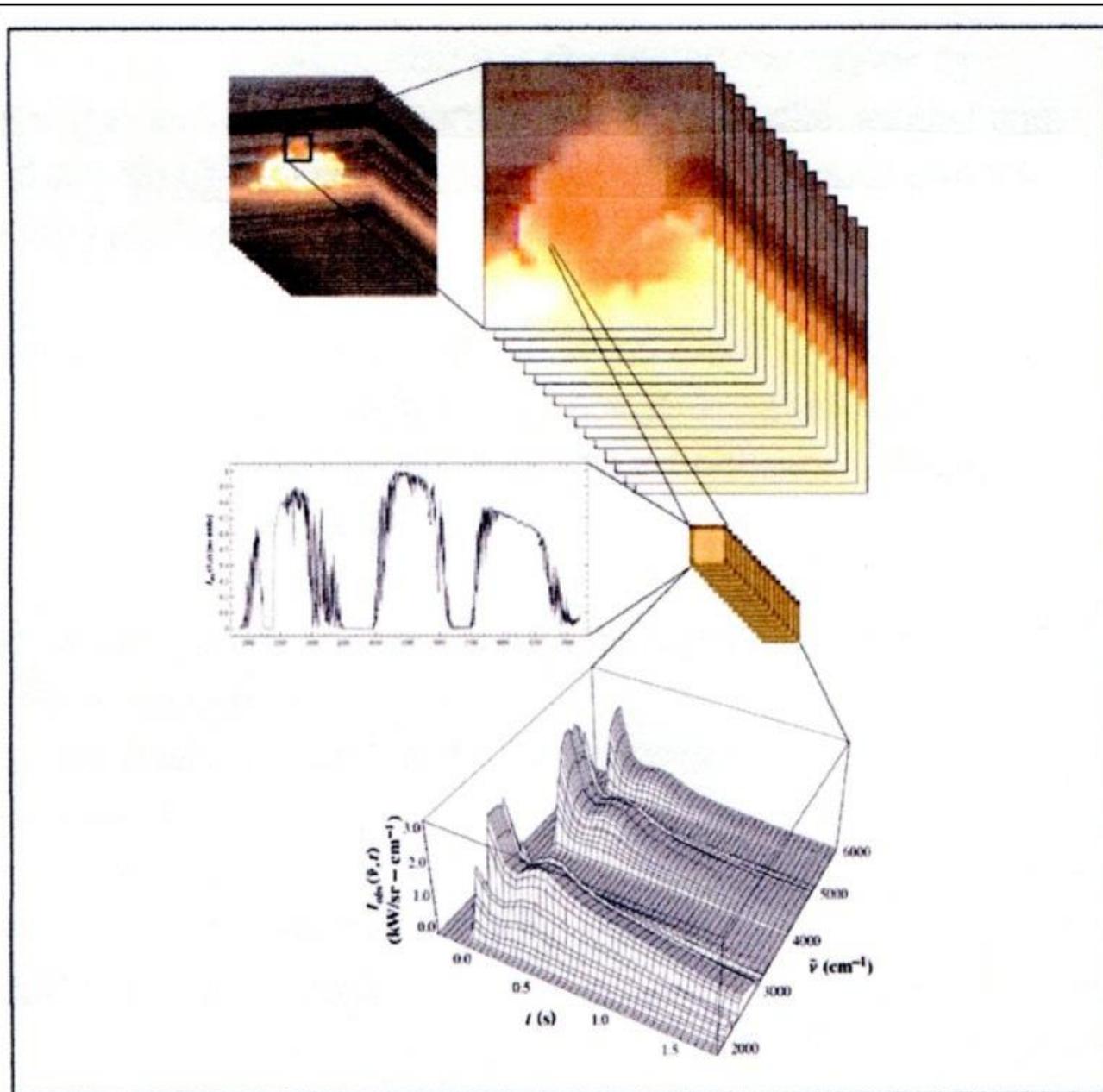
Input Port 2  
(background or  
cold source)

Output Port 1  
(Detector #1)

Output Port 2  
(Detector #2)





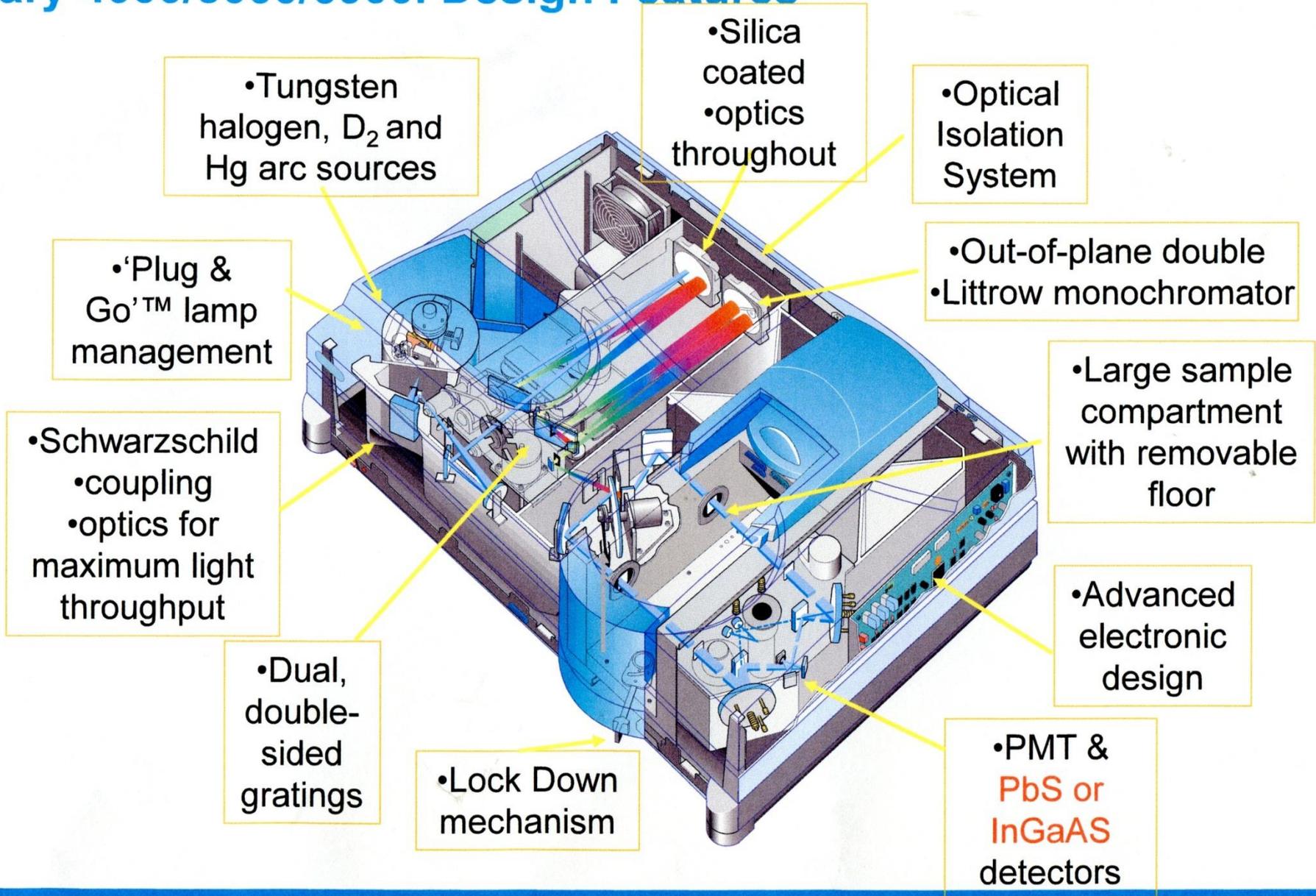


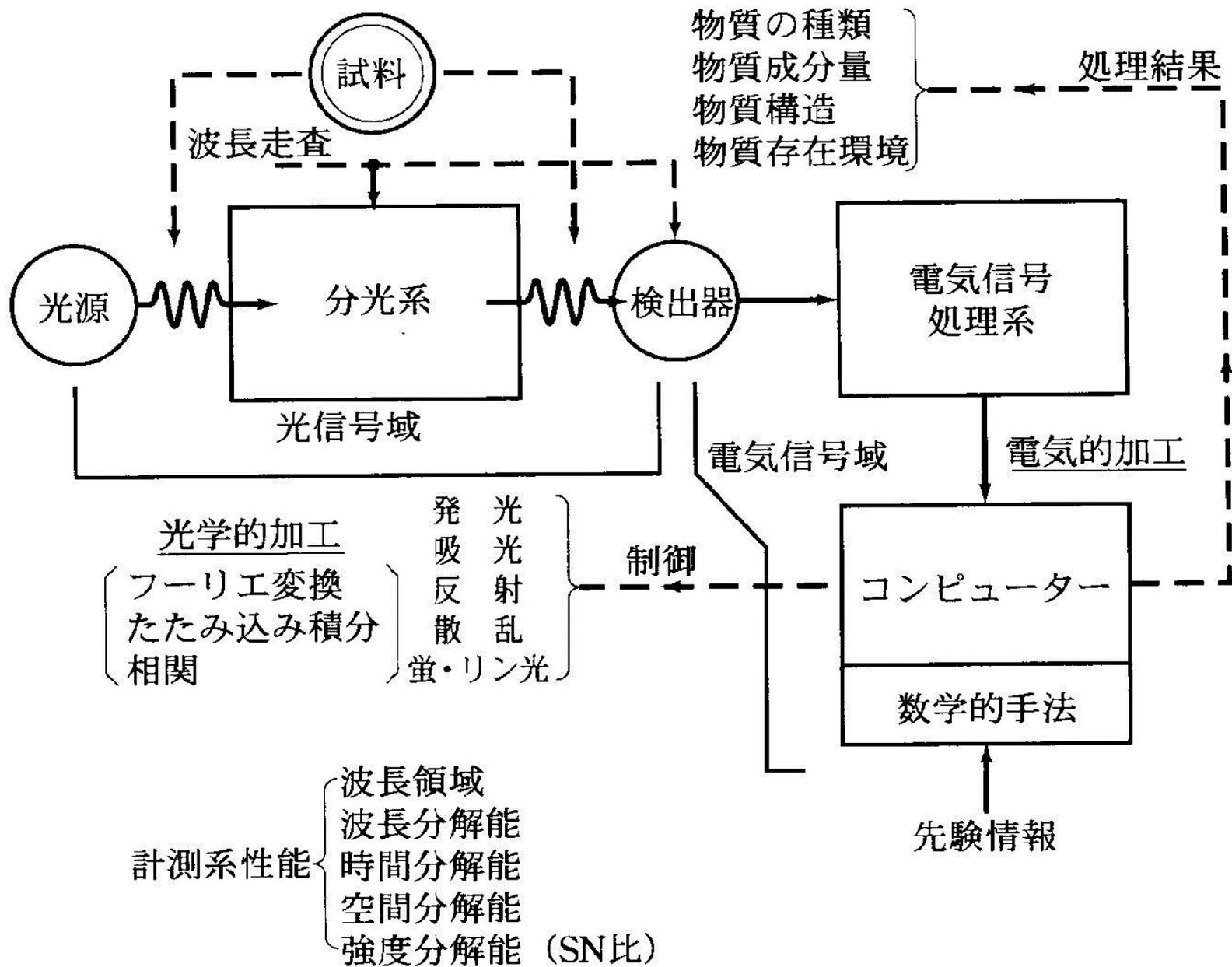
**The MR-i Spatial, Spectral and Time Resolution**

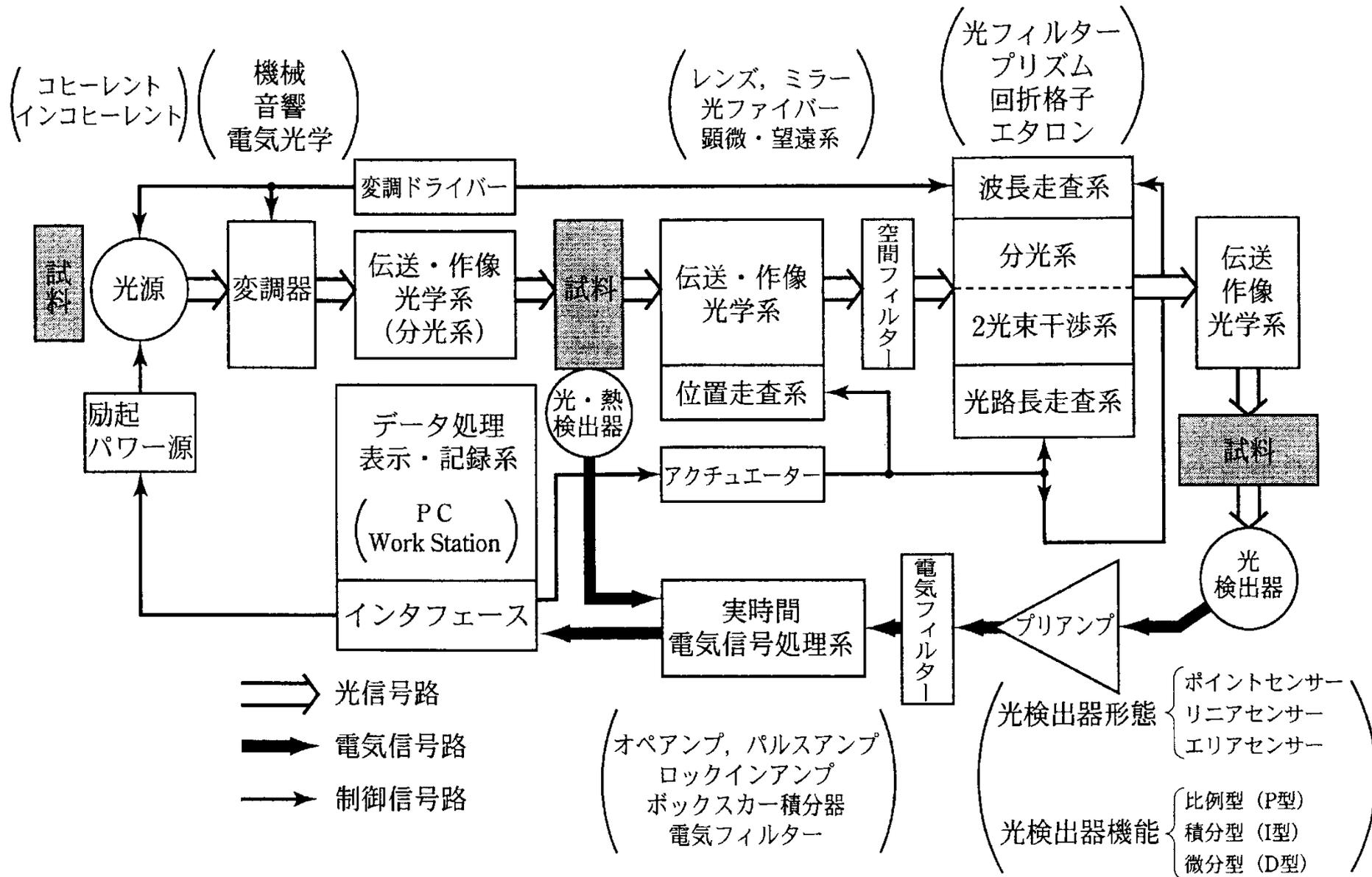
## 5) システム化の第一歩はブレークダウン ーサブシステムから機能素子・単純素子へー

分光機器中を流れる光・機械・電気信号は、一括して情報の流れと考えてシステム全体を捉え、各要素に分解する。それが、各要素を如何に効率的に結合・融合するかの発想の原点となる。

# Cary 4000/5000/6000i Design Features







分光システムの要素部品結合ブロック図.

	点型 (0次元)	線・面型 (1・2次元)
比例型 (P型)	量子型センサ・熱型センサ	イメージディセクタ 並列出力センサ
積分型 (I型)	線量計・放射カロリメータ	写真フィルム ビディコンなど撮像管 (直列出力) 固体イメージセンサ (直列出力)
微分型 (D型)	焦電型センサ (熱型)	ハイブリッド固体イメージセンサ

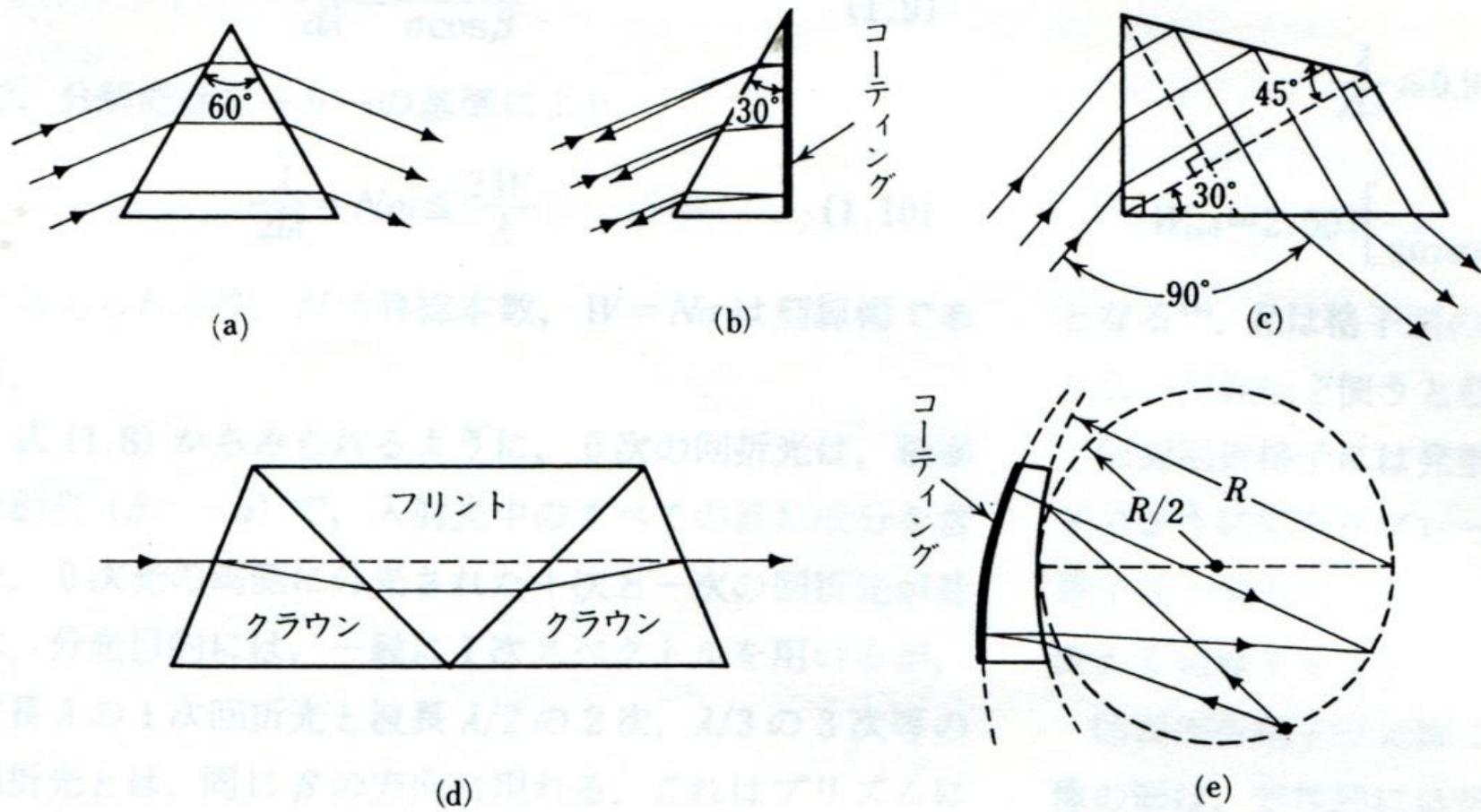
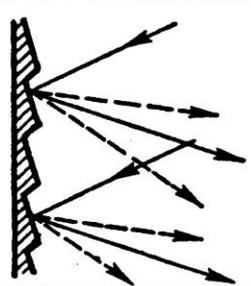
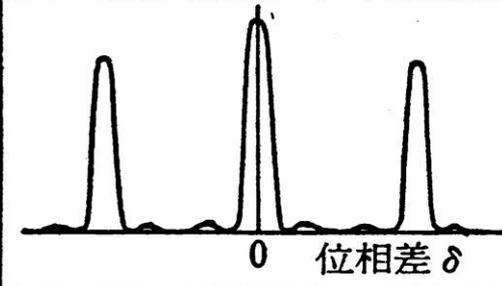
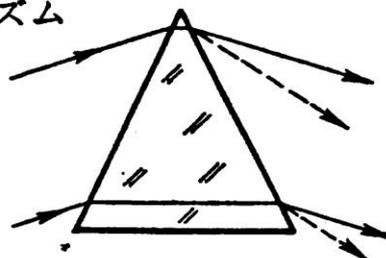
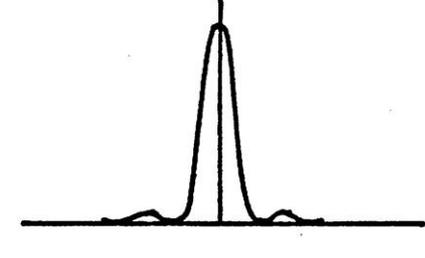
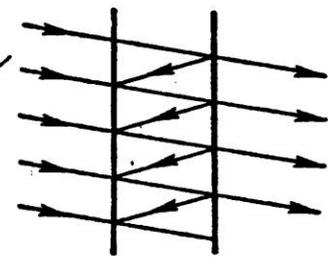
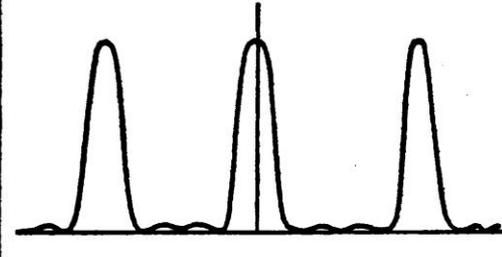
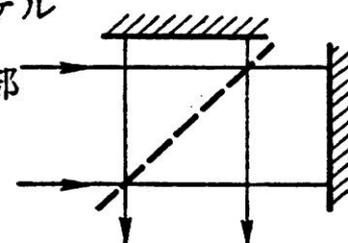
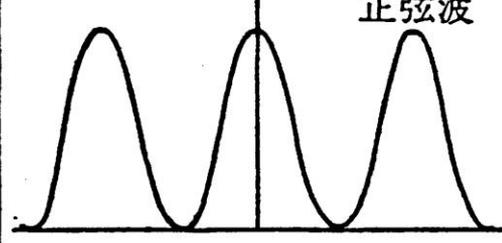


図1.24 分光用プリズム.

分光法	分光素子	単色光干渉パターン	有効干渉光束数
分散 分光法	回折格子 	 0 位相差 $\delta$	$N$ (格子溝数)
	プリズム 		$\infty$
干渉 分光法	F-P エタロン 		$N$ (フィネス)
	マイケル ソン 干渉部 	 正弦波	2

分散分光法と干渉分光法の原理比較

が定着する以前に使われたものである。

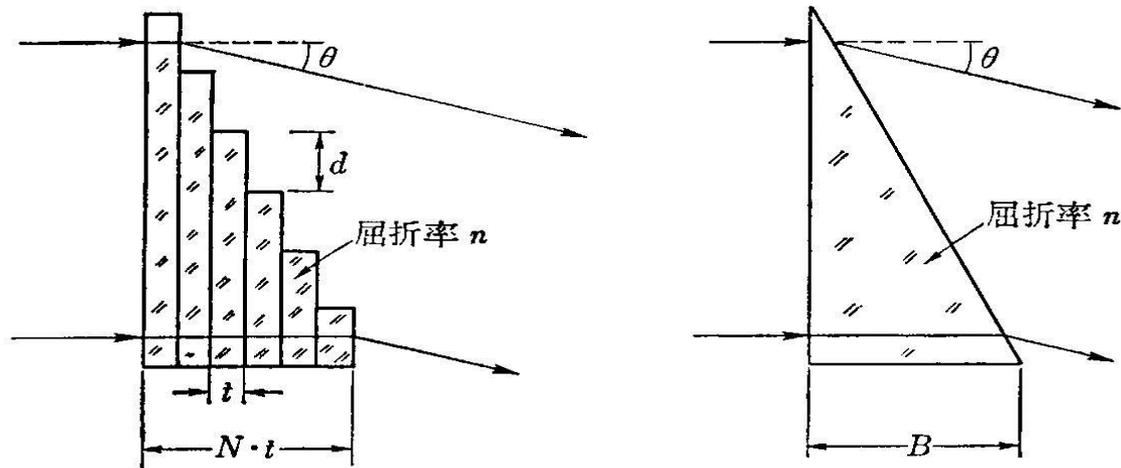


図 3.1.2 透過型エシェロンとプリズムの対比

ただし、 $n$  はガラス板の屈折率、 $\lambda$  は波長である。理論分解能はガラスの分散  $\partial n / \partial \lambda$  の項が加わり、

透過型エシェロンは、厚さ  $t$  の薄い平行平面ガラス板を図 3.1.2 に示すように階段層状に並べたものである。ステップ幅  $d$ 、回折角  $\theta$  が十分小さいとすれば、次教  $m$  は

$$m = (n - 1)d / \lambda \quad (3.1.2)$$

ただし、 $n$  はガラス板の屈折率、 $\lambda$  は波長である。理論分解能はガラスの分散  $\partial n / \partial \lambda$  の項が加わり、

$$R = Nm - Nt \frac{\partial n}{\partial \lambda} \quad (3.1.3)$$

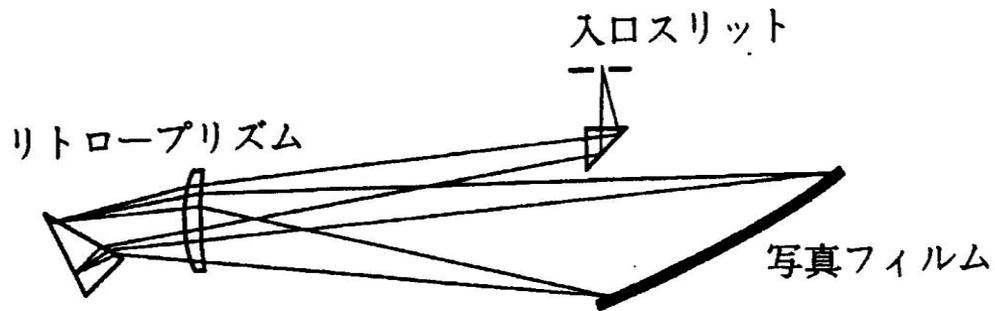
の形になる。ここで  $N$  はガラス板の枚数、すなわち光束数である。

いま、エシェロンのステップ幅  $d$  とガラス板の厚さ  $t$  を無限に小さくし、 $N$  を無限に大きくすると、結局は図 3.1.2 のようなプリズムに近づく。式 (3.1.2) で  $m=0$  となり 0 次の光しか使わないので干渉を利用していない。また  $Nt$  はプリズムの底長  $B$  に等しく、式 (3.1.3) は

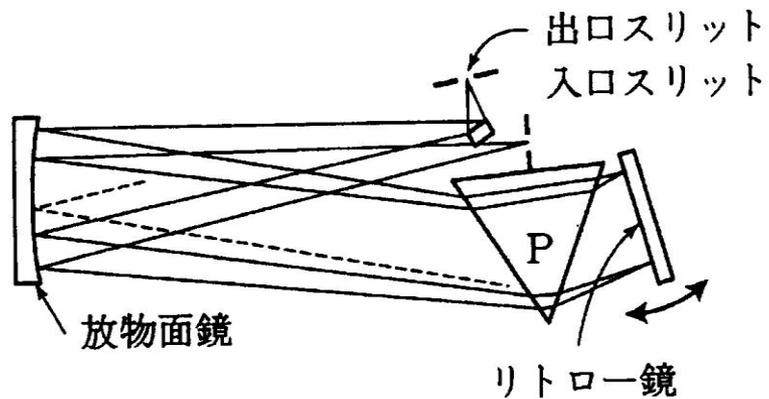
$$R = -B \frac{\partial n}{\partial \lambda} \quad (3.1.4)$$

というプリズムの分解能の式に変わる。プリズムを用いた分散方式の原理は、透過型エシェロン干渉分光の原理において  $N \rightarrow \infty$ 、 $d \rightarrow 0$ 、 $t \rightarrow 0$  とした極限の結果として導かれる<sup>3)</sup>。

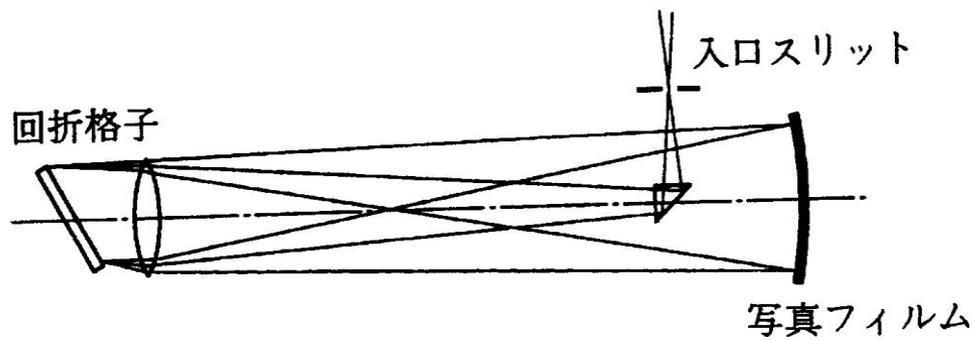
回折格子（厳密には反射型）は素子の幾何学的形状のみを利用する干渉型分散素子であり、プリズムは幾何学的形状と物質の両者を利用する非干渉型分散素子である。



(a)

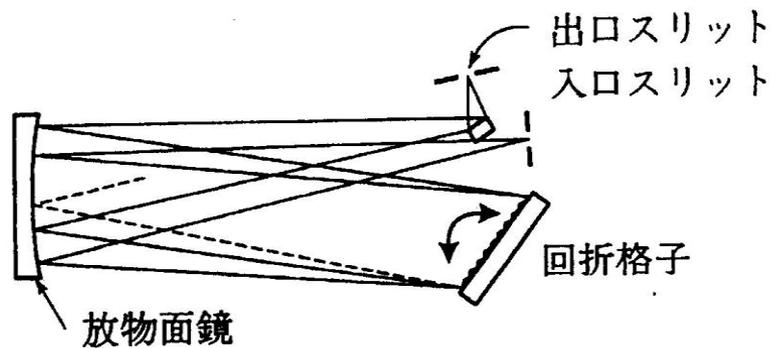


(a)



(b)

リトロ型分光写真器



(b)

リトロ型モノクロメーター

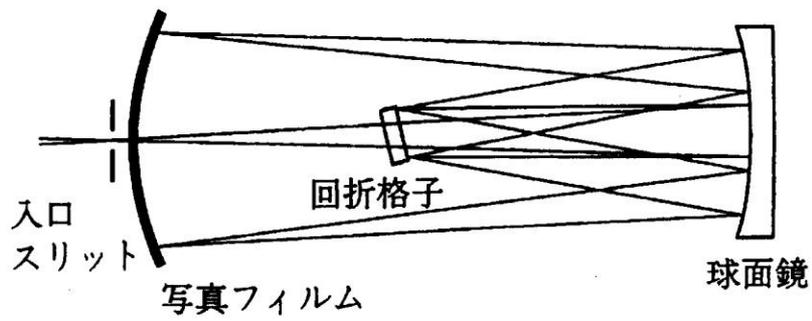
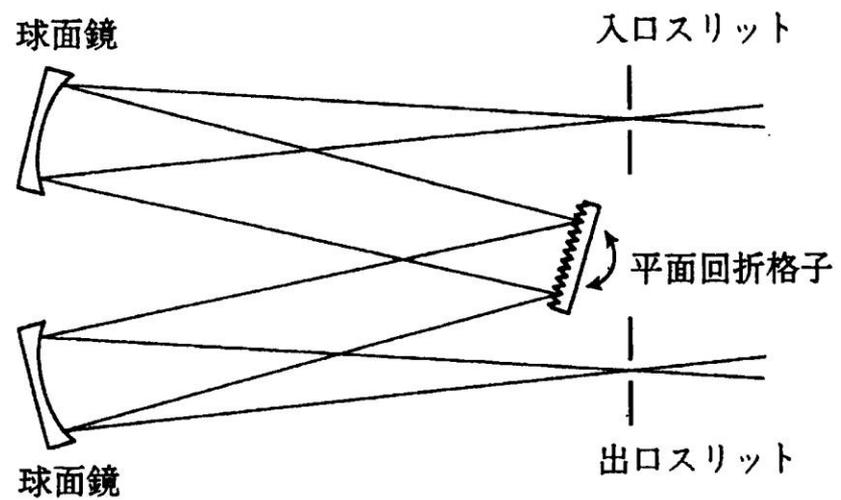
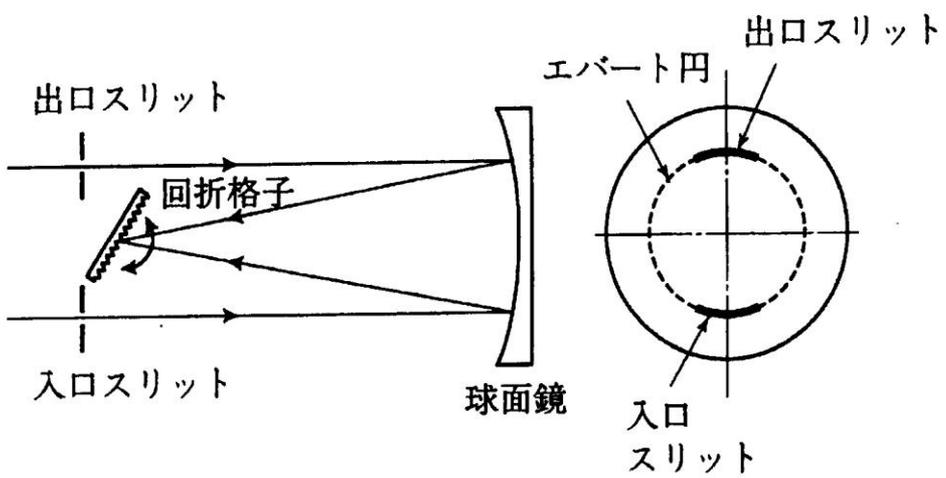


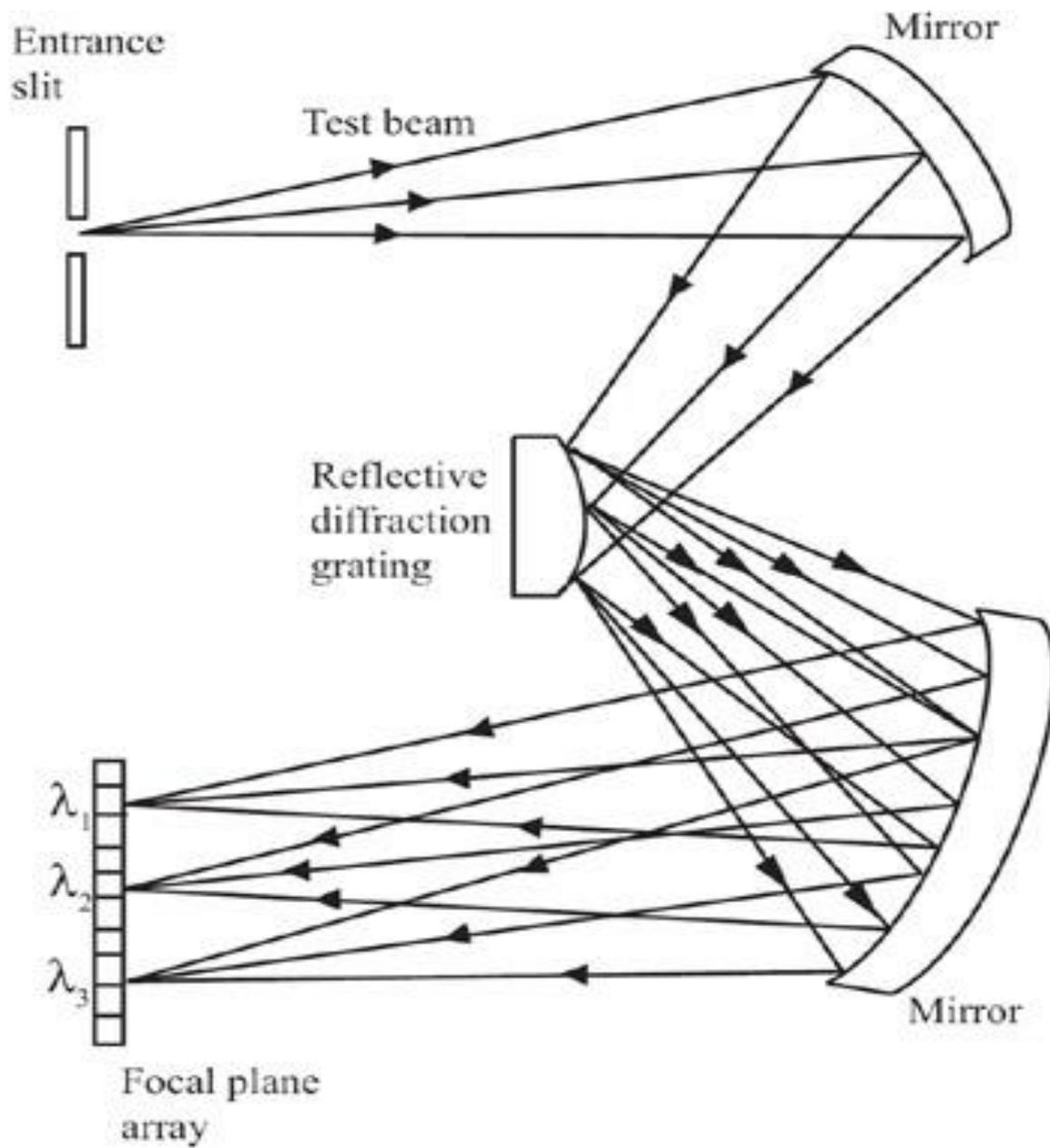
図 5.1.3 エバート型分光写真器

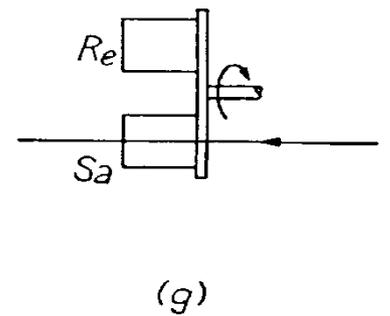
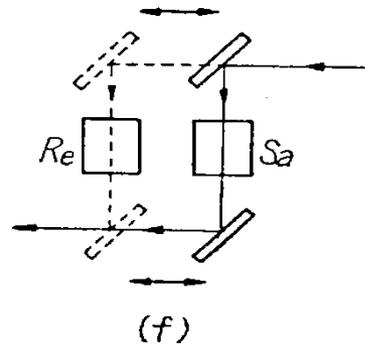
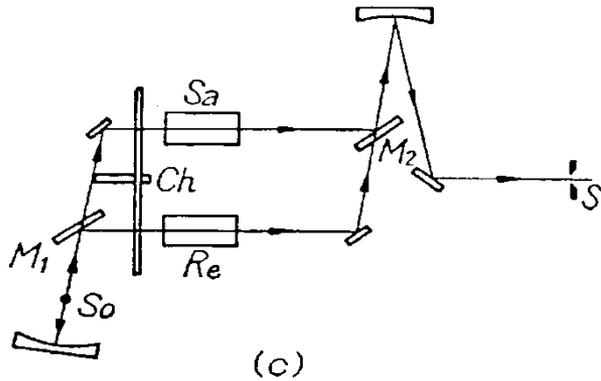
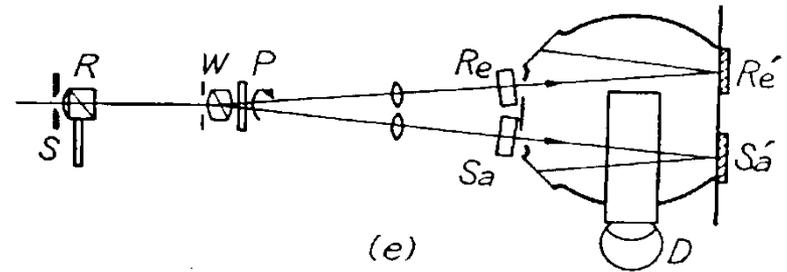
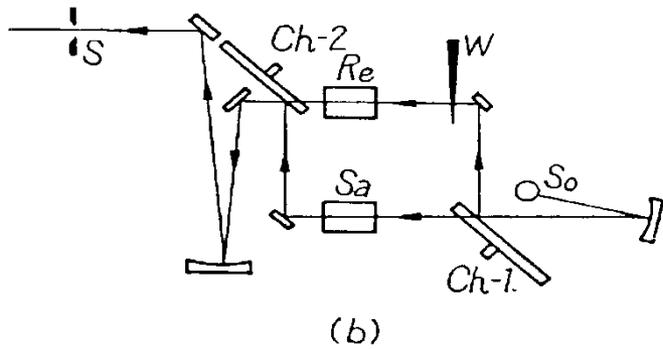
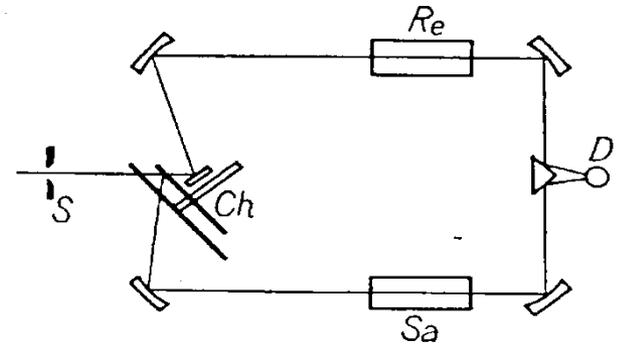
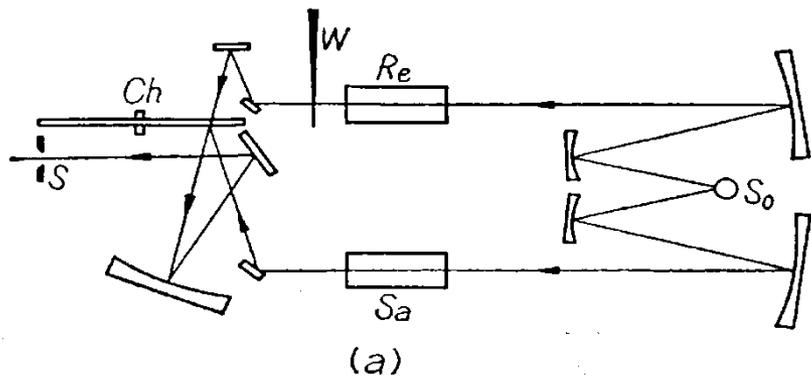


ツェルニーターナー型モノクロメーター

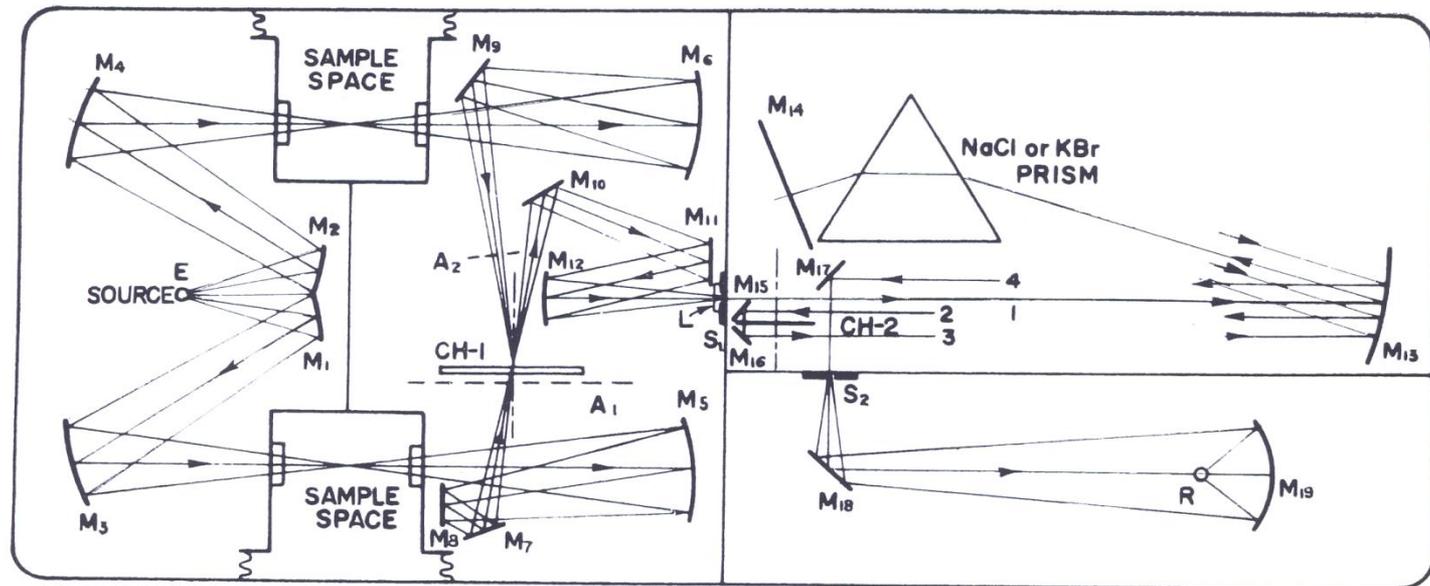
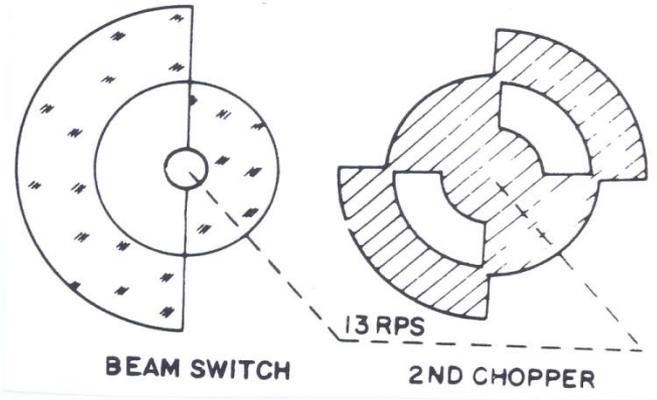
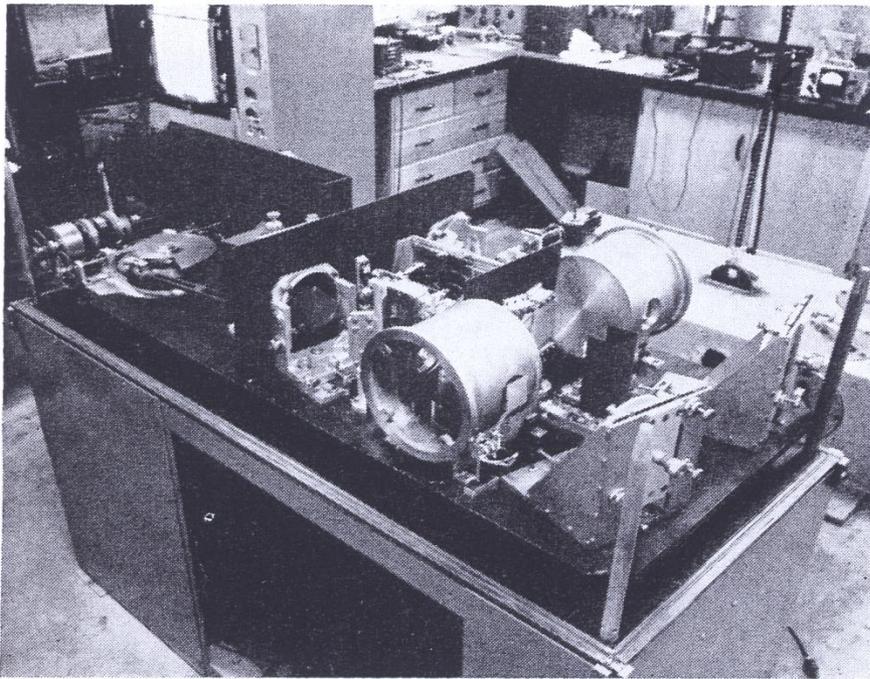


ファスティー-エバート型モノクロメーター





交照式光度計光学系



各サブシステムの検討項目

光源 (放射源)	伝播系	集光光学系	分光光学系
1. 形状、寸法、距離、動き 2. 温度 3. 分光放射率 4. 分光放射特性 5. 時間特性	1. 伝播系の分光放射 2. 伝播長 3. 分光透過率	1. 視野角 2. 空間走査モード 3. 空間走査範囲 4. 視野外放射除去能	1. 波長域 2. 波長分解能 3. 偽放射 (迷光、高次光など) 除去能

検出器	実時間信号処理系 (増幅系)	後処理系・表示系 (コンピュータ)
1. 分光感度域 2. 絶対感度 3. NEP, $D^*$ 4. 動作温度 5. 背景放射 6. 周波数特性 7. エレメント数	1. 検出器—プリアンプマッチング 2. 電圧・電流利得 3. 周波数特性 4. フィルタリング 5. 位相弁別検出	1. 出力電圧範囲 2. 信号源インピーダンス 3. 制御系 4. メモリ系 5. 通信系 6. 表示系 7. 数値処理アルゴリズム

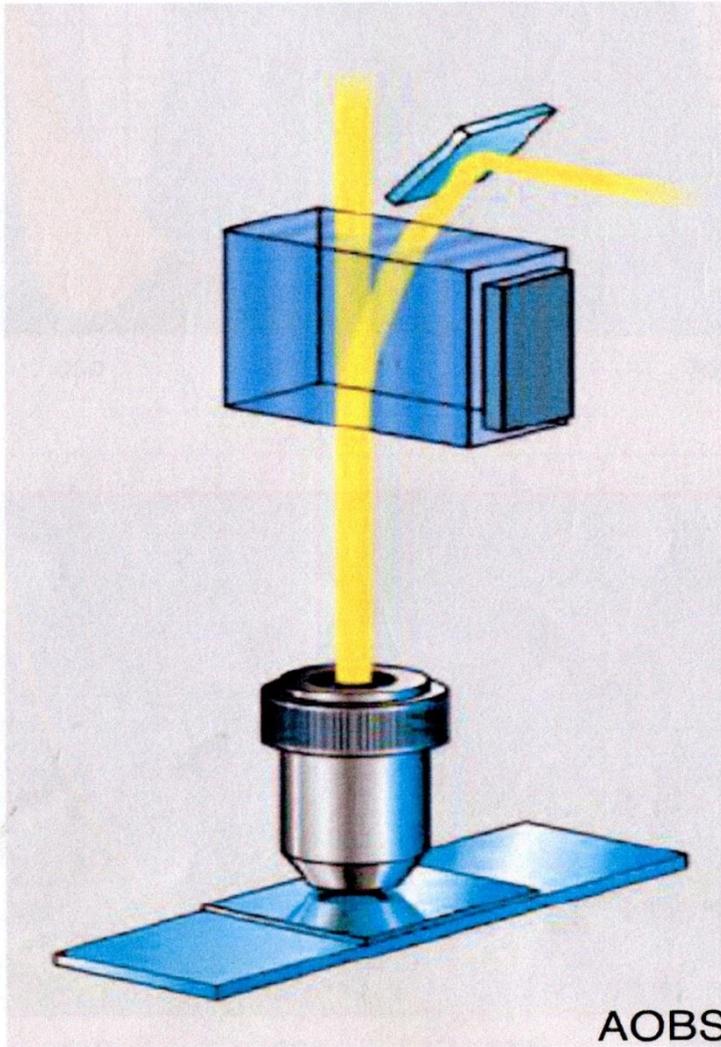
表1 市販光部品の機能別分類

モード	効果区別	光部品名称
受動型光部品	形状効果	普通レンズ(均質), ミラー, 回折格子, 絞り減光器, ビームスプリッター, フィルタ位相板, エタロン, 光路変換プリズム, レンチキュラー板
		光ファイバー, 光ファイバーバンドル, 光導波路, 微小光学素子
		通信用光改組部品〔コネクタ, 光分岐・方向性結合器, 分波器〕
	物質効果	ホログラフィックレンズ, ホログラムメモリ
		GRINレンズ, ミラー(狭帯域), ビームスプリッター, フィルタ, 光ファイバー(セルフロック), 分散用プリズム, 通信用光回路部品〔光分岐・方向性結合器, 分波器〕
		写真感光媒体, 光ディスク, 光カード, サーモプラスチック素子
能動型光部品	形状効果	光センサ
		機械シャッター, 機械変調・偏向素子
		走査型エタロン
		音響光学部品(結晶, 非晶質, 液体)〔変調, 偏向, シャッター, 演算〕
		光走査素子(ガルバノミラー, ポリゴン, ホログラム, デジタルマイクロミラー)
	物質効果	通信用光回路部品〔光スイッチング, 変調〕
		電気光学部品(結晶, 非晶質, 液晶, エレクトロクロミック材)〔変調, 偏向, シャッター, 減光, 演算, 表示, 記憶〕
		磁気光学部品(結晶, 非晶質)〔変調, 偏向, シャッター, ローテーター, 減光, 記憶〕
		非線形光学部品(無機固体結晶, 有機物・高分子, 気体)〔SHG, THG, パラメトリック発振, 光双安定, シャッター, 位相共役〕
		応力光学部品(結晶, 高分子)〔変調, 偏向, シャッター, センサ〕
		空間変調器〔アナログ, デジタル〕
		ホトクロミック素子, 電子写真感光媒体, 光磁気ディスク
		レーザ, LED, CRT, LCD, PDP, SED, ELD, 一般インコヒーレント光源
		光センサ〔変調センサ, シャッターセンサ〕, 光増幅器
光コンピュータ素子, OEICを含む能動型通信光回路部品		



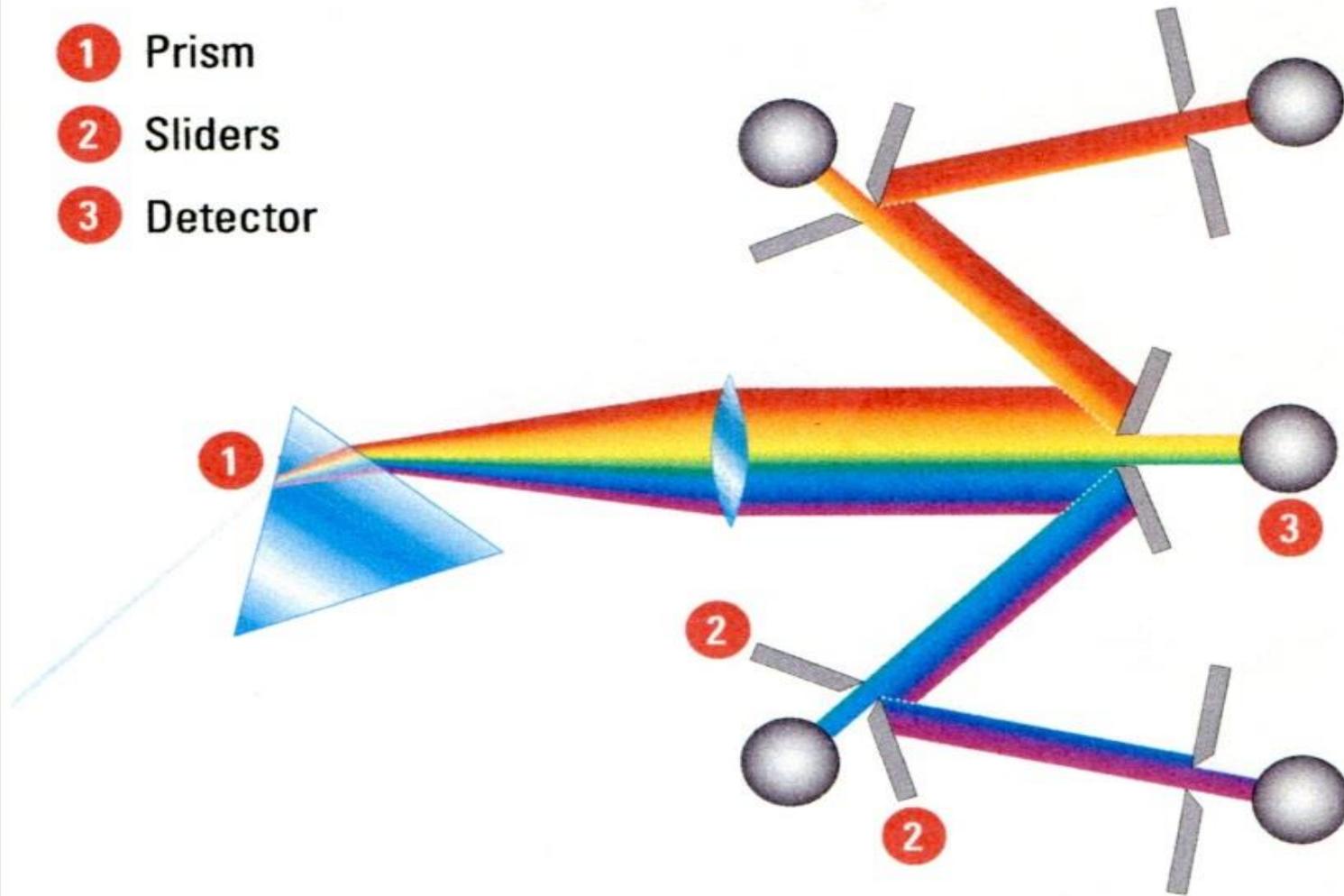
# AOBS Acousto-Optical Beam Splitter

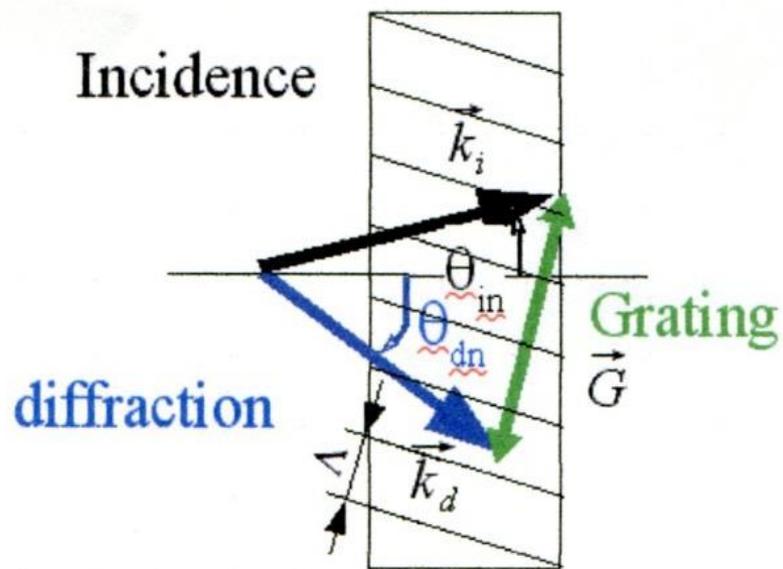
*in comparison to the filter-mirror beam splitter*



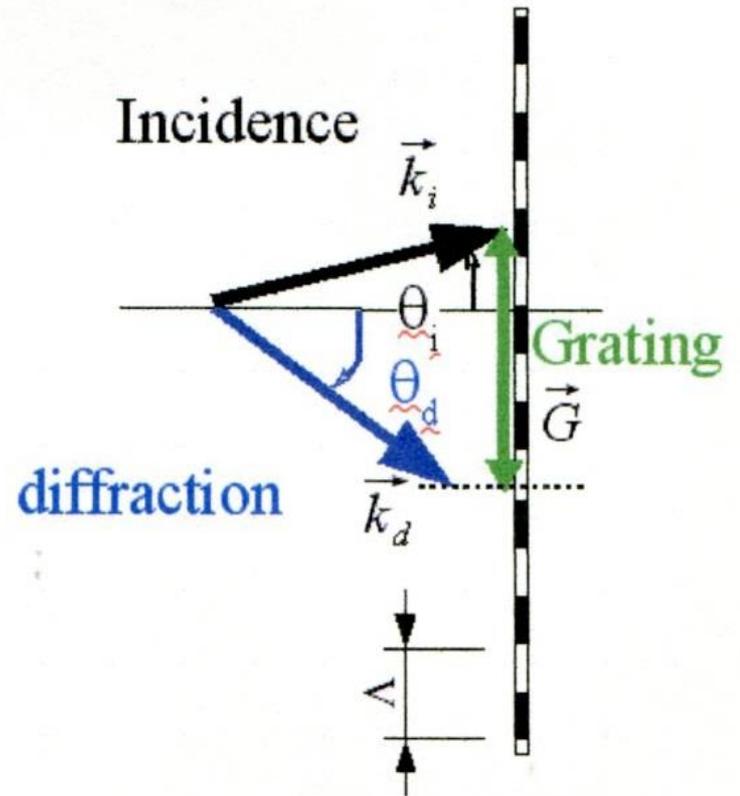
# The Spectral Detection Module

- 1 Prism
- 2 Sliders
- 3 Detector





(1) VHG Bragg condition



(2) surface grating Bragg condition

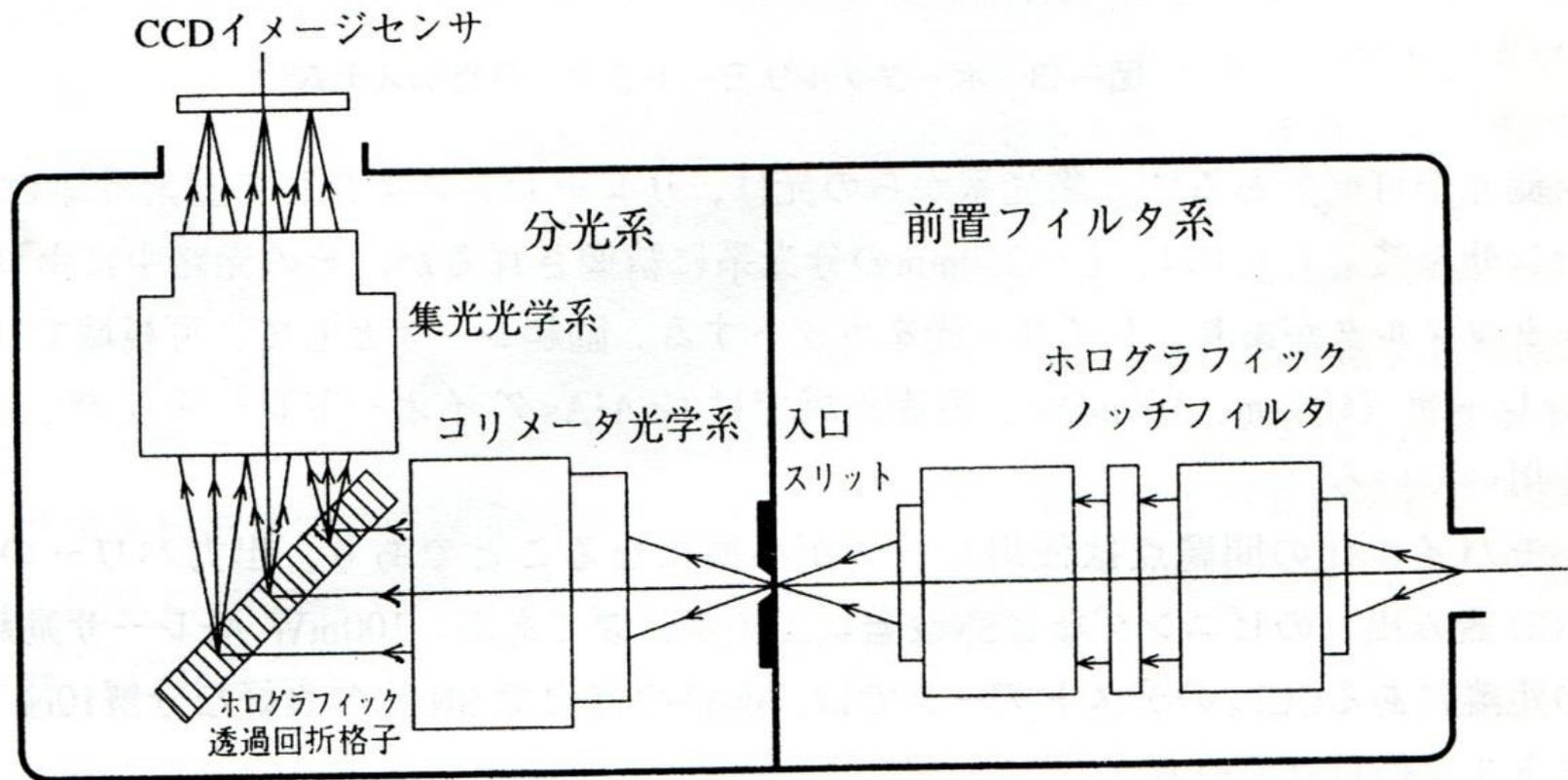
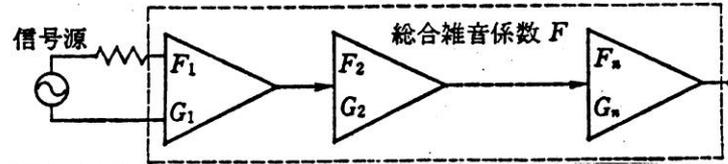


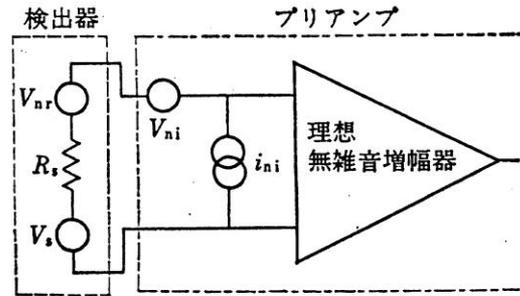
図-11 低Fナンバーホログラフィックラマン分光システム<sup>12)</sup>  
 (Kaiser Optical社カタログより)

$$NF(\text{dB}) = 10 \log_{10} F \quad \text{但し} \quad F = \frac{S_i^2/N_i^2}{S_0^2/N_0^2} \quad (16)$$



直列接続増幅系の雑音係数  $F$  値

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_2 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (17)$$



$i_{ni}$  : 等価入力電流雑音,  $V_{ni}$  : 等価入力電圧雑音,  $V_s$  : 信号電圧,  $R_s$  : 信号源理想内部抵抗,  $V_{nr}$  :  $R_s$  による熱雑音.

$$NF(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{V_{ni}^2 + i_{ni}^2 R_s^2}{4kTR_s \Delta f} \right) \quad (18)$$

$$R_{s0} = \sqrt{\frac{V_{ni}^2}{i_{ni}^2}} \quad (19)$$

# 偽放射との闘い —stray radiationはstray sheepではなく lonesome wolf—

計測目標とする放射束以外に侵入する偽の放射パワー全てを指す。迷光ともいわれていたもの。回折格子の高次光や機器内の乱反射光をはじめバックグラウンド光を含む。除去技術が極めて重要。



## 偽放射 (false radiation)

- i) 光学素子の欠陥や不完全遮光にもとづく散乱光で通常迷光とよばれるもの
- ii) プリズム多光路型モノクロメーターの低次分散光や、回折格子モノクロメーターの他次分散成分などの異次数分散光
- iii) 高温・低温試料からの熱放射

### 赤外分光測光における高次光の影響

いま光源として黒体に近似した熱放射体を考え、長波長域における1次光エネルギー  $W_{\lambda_1}$  とそれに重なる短波長側の  $n$  次高のエネルギー  $W_{\lambda_n}$  の関係を示すと

$$\frac{W_{\lambda_n}}{W_{\lambda_1}} = n^3 \frac{\eta_{\lambda_n}}{\eta_{\lambda_1}}$$

となる。ここで  $n$  は次数、 $\eta_{\lambda_n}$ 、 $\eta_{\lambda_1}$  はそれぞれ  $n$  次および1次光に対する回折格子の効率である。もし  $n$  次光と1次光に対する効率が等しいとすると(実際 blaze の位置ではそうなる)  $n$  次光エネルギーは1次のその  $n^3$  倍となり、そのうえ高次光全体のエネルギーはこの和で示されるので、偽放射量は膨大な値になることは容易に想像できる。たとえば可視・近赤外域での透過率が0.001%の短波長除去フィルターを用いたとしても遠赤外域にある1次の blaze 位置では20%以上の偽放射が現われる。

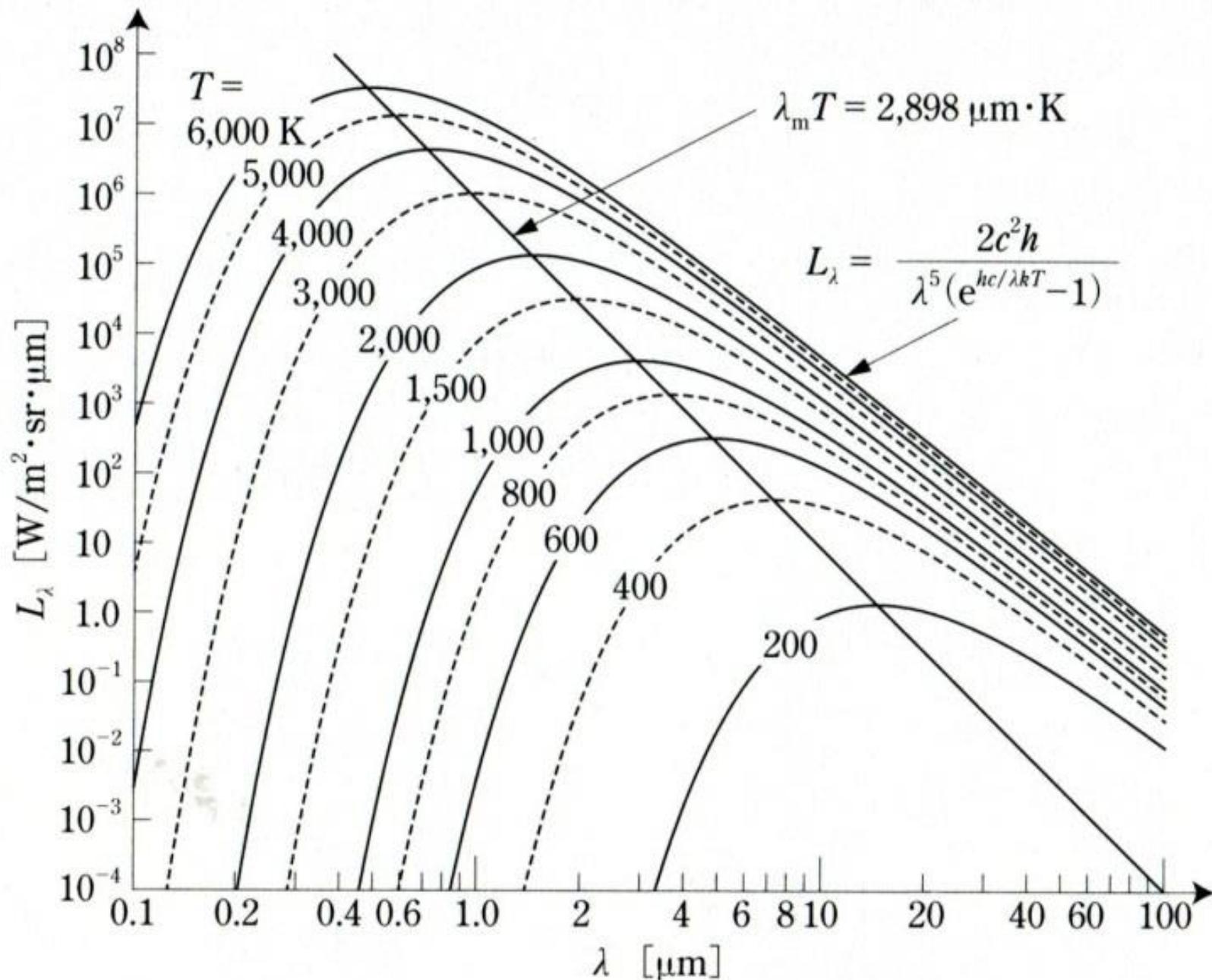
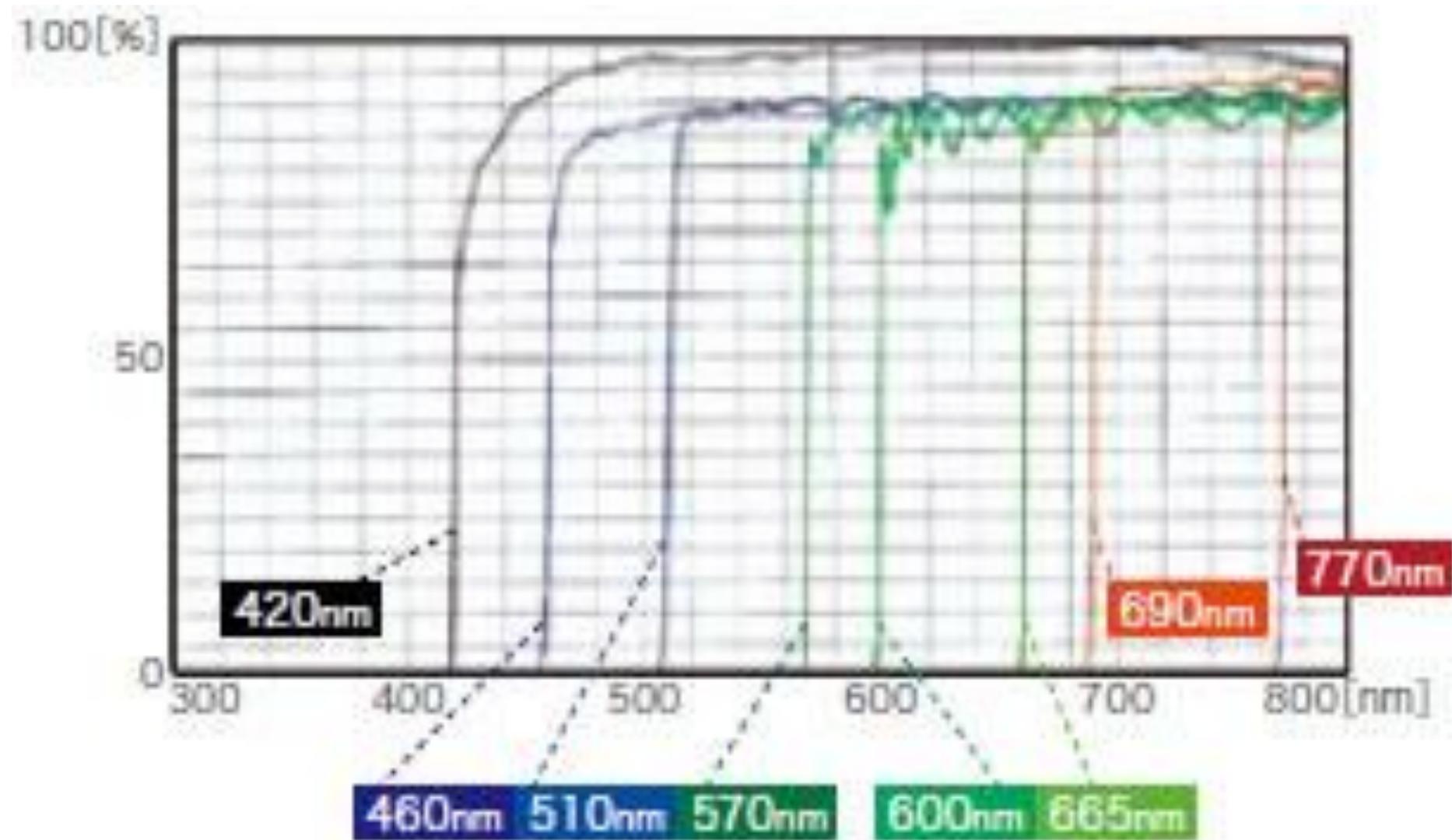
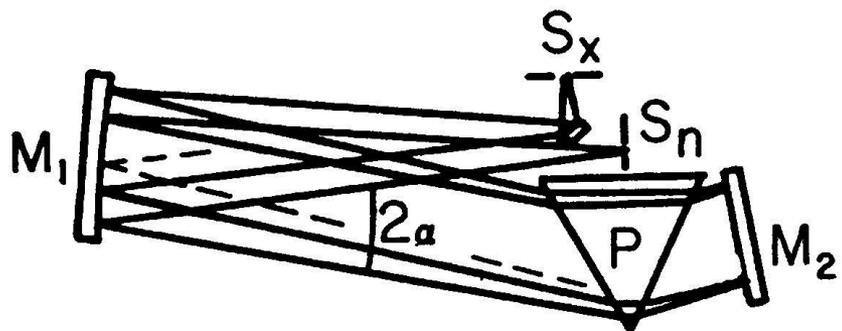
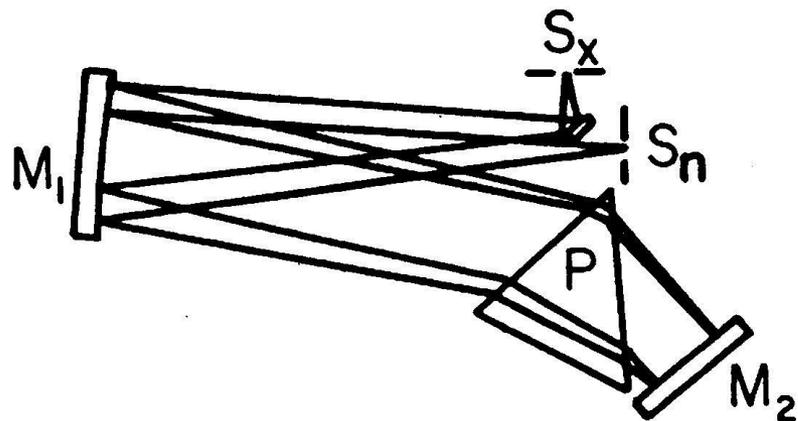


図4 プランクの式で表される分光放射輝度分布

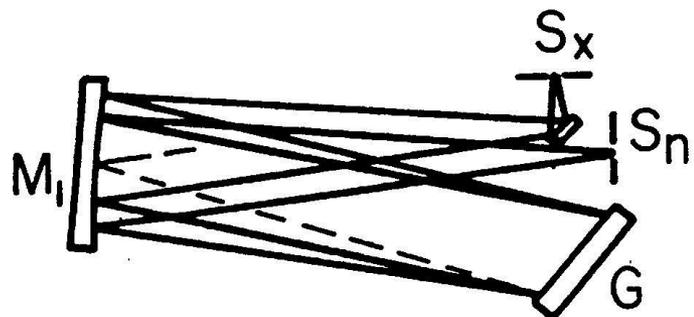




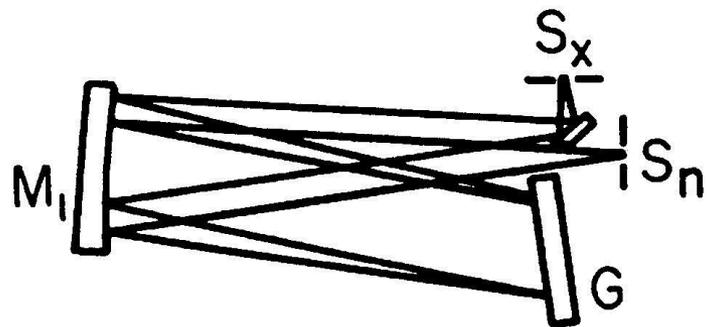
A



C



B



D

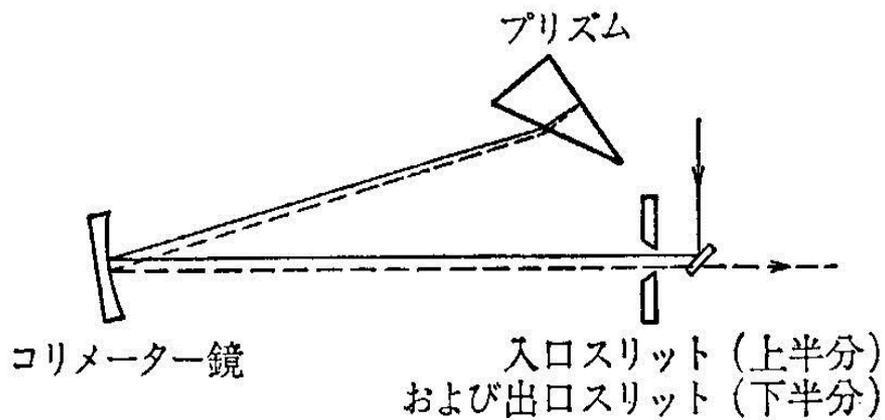


図 4.1.2 紫外・可視・近赤外リトロ型  
プリズムモノクロメーター

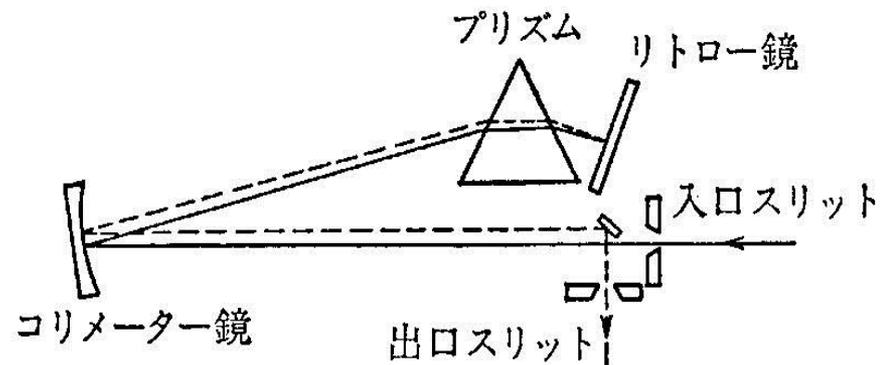
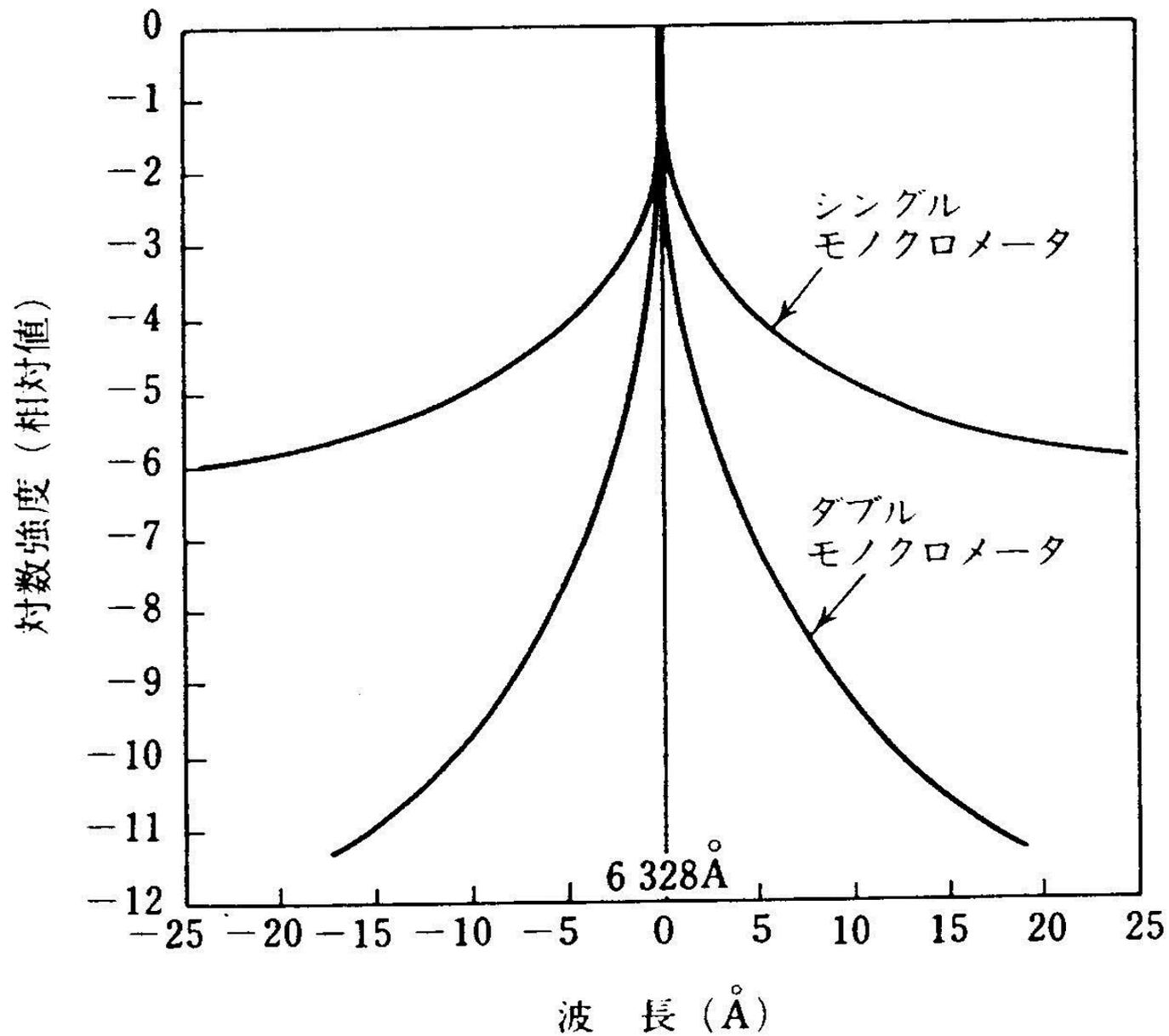
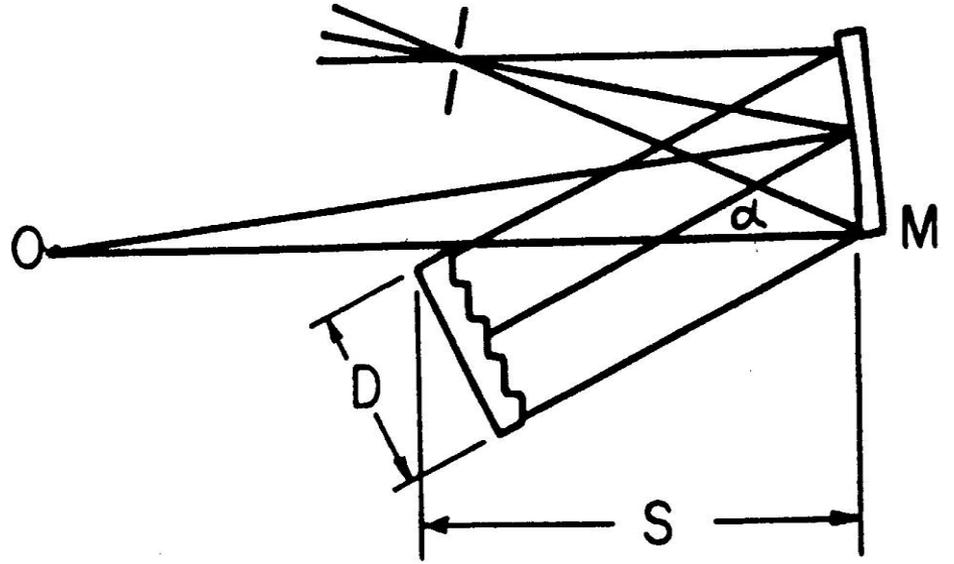
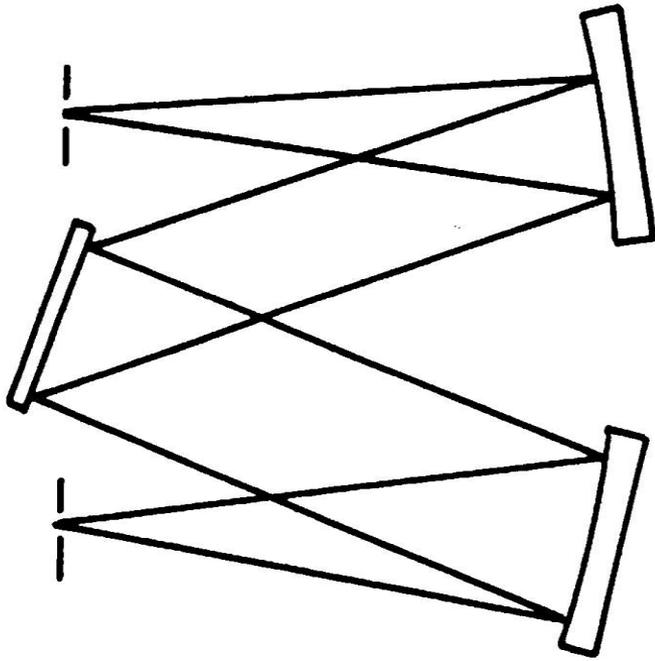
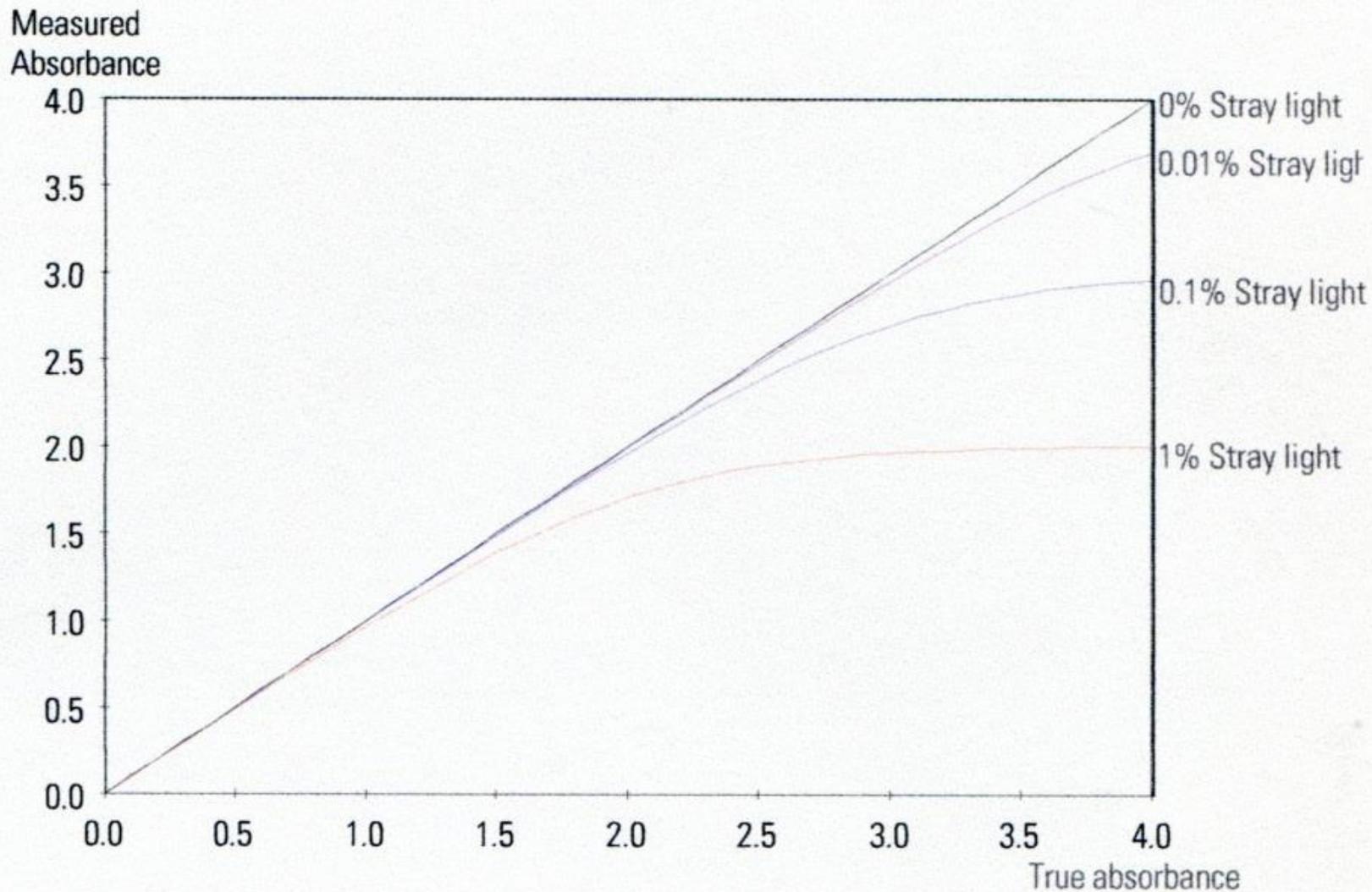


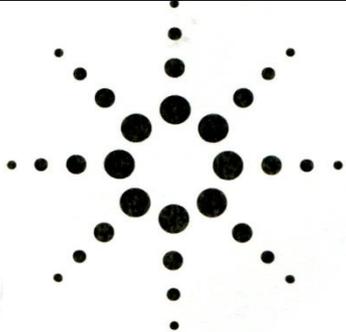
図 4.1.3 赤外リトロ型プリズム  
モノクロメーター





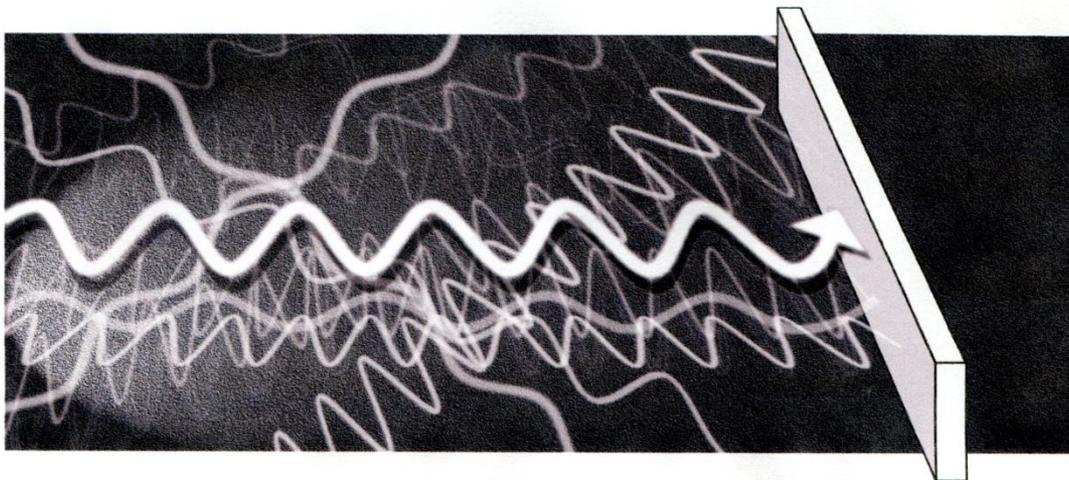


**Figure 1**  
**The effect of stray light on measured sample absorbance**



# Measuring the Stray Light Performance of UV-visible Spectrophotometers

## Technical Note



### Introduction

Stray light is defined as detected light of any wavelength that is outside the bandwidth of the selected wavelength. The equation used to calculate transmittance and therefore absorbance is:

$$T = (I + I_s)/(I_0 + I_s)$$

where:

T = transmittance

$I_0$  = intensity of incident light

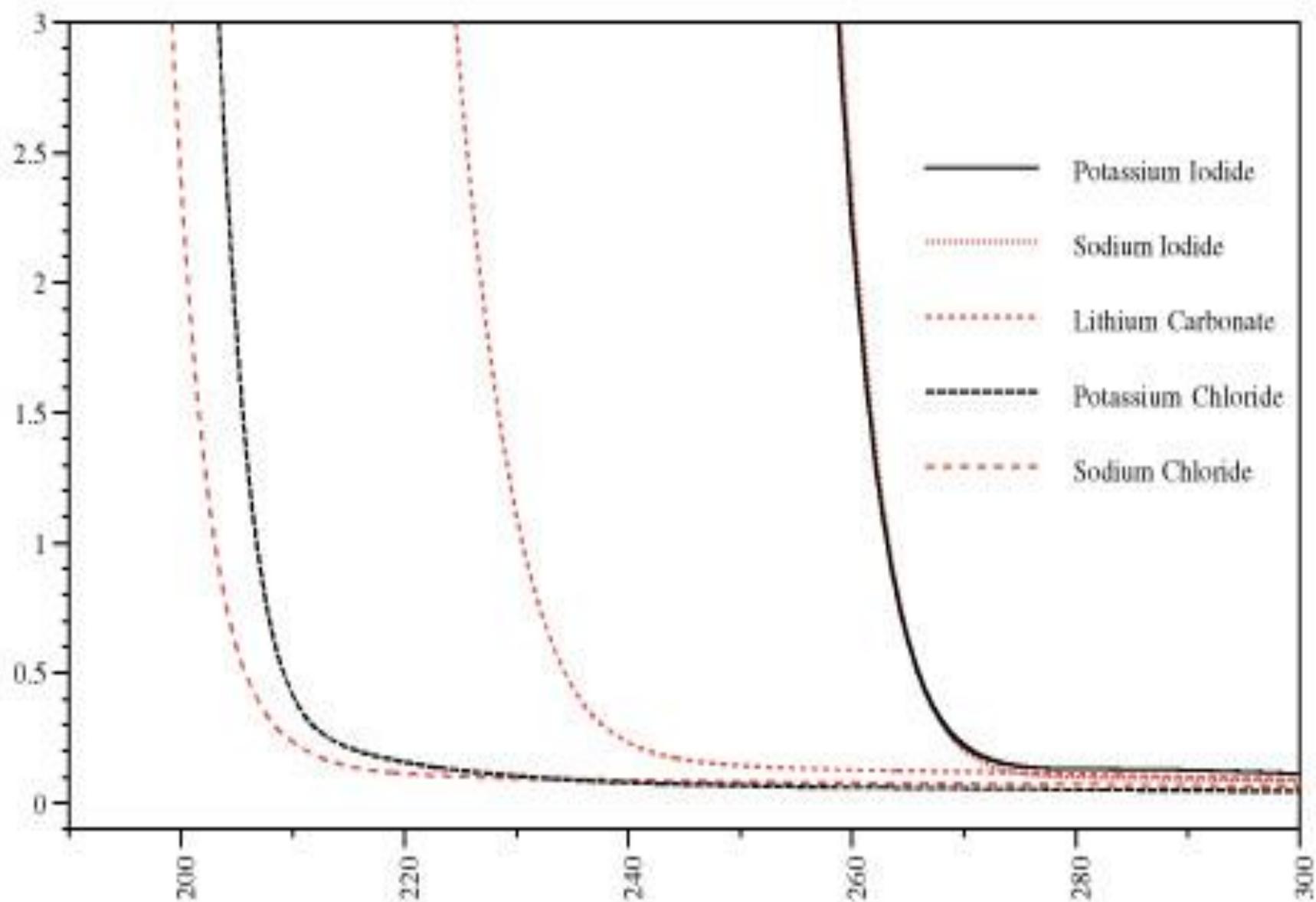
I = intensity of transmitted light

$I_s$  = intensity of stray light

Typically the intensity of stray light is not dependent upon the intensity of the transmitted light, however if it remains near constant it becomes the dominant term at low levels of I. The result is that, at high absorptions, stray light causes a negative bias in instrument response and eventually is the limiting factor for absorbance and therefore concentration that can be measured. This compromises the photometric accuracy of the instrument. The effect of various levels of stray light on measured absorbance compared with actual absorbance is shown in Figure 1 (page 2).

To measure stray light, some kind of filter is required that absorbs all light of the wavelength at which the measurement is to be made and transmits higher and lower wavelengths (the sources of the "stray light") as shown in Figure 2 (page 2). In practice such filters do not exist, so "cut-off" filters which transmit all light above or below a certain wavelength and block all light in the wavelength range, are used. For example, figure 3 (page 3) shows the spectrum of  $\text{NaNO}_2$ .

This Technical Note examines some aspects of the methods for assessing stray light for UV-visible spectrophotometers.



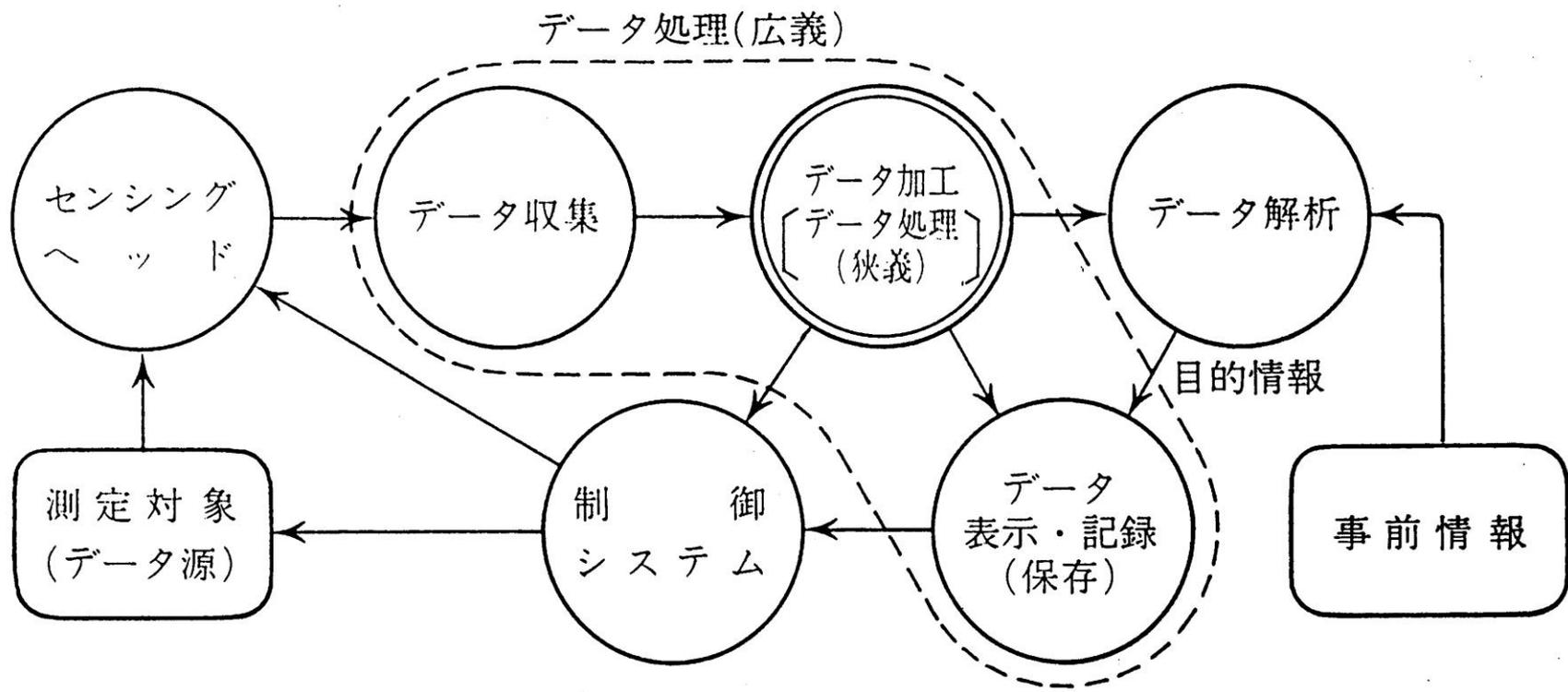
---

<b>Material</b>	<b>Cutoff</b>	<b>Concentration</b>
Potassium Iodide	260 nm	1% aqueous
Sodium Iodide	260 nm	1% aqueous
Lithium Carbonate	227 nm	saturated aqueous
Sodium Chloride	205 nm	1% aqueous
Potassium Chloride	200 nm	1.2% aqueous
Sodium Nitrite	390 nm	5% aqueous

## 7) コンピュータ化の副作用に注意 —羊の皮を被った狼—

スペクトル波形処理や画像処理は後処理として重要であり、分光データに対する基礎知識があつてこそ信頼できる結果が得られる。光学系の調整不良をコンピュータソフトで補うのは邪道。





測定系内でのデータの流れと処理

Table I 計測における波形データ処理法一覧

処 理 目 的	従 来 の 処 理 法	新 し い 処 理 法
周波数解析	フーリエ変換 ( DFT , FFT )	最大エントロピー法 ( MEM ) 自己回帰モデル適合 ( z変換 ) ウェーブレット変換
装置関数測定	フーリエ変換 ラプラス変換 自己相関関数	セブストラム推定 ( ホモモルフィックフィルタリング )
雑音の除去 ( SN比改善 )	積算平均 平滑化 ( コンボリューション , Savitzky-Golay法 , フィルタリング , Wienerフィルタ 等 )	適応平滑化 スプライン関数適合 ウェーブレット変換
分解能向上	ディコンボリューション ( 反復法 , Jacobi法 , Gauss-Seidel法 , SQR法 , 逆フィルタリング 等 )	ブラインドディコンボリューション ( ホモモルフィックフィルタリング ) 超解像 ( 共役勾配法 ) 非負拘束 ( 二次計画法 ) MEM , 自己回帰モデル適合
波形分解と適合	非線形パラメータ推定 ( DLS法 , GN法 )	DSP法 , Simplex法
混合試料系の成分分解	定性定量分析 ( 線形最小二乗法 , 線形計画法 )	非負拘束付定量分解 ( NNLS法 ) 未知混合物に対する定性・定量分析 ( 主成分分析 , 非負拘束 , PLS 非線形最適化法 )

(エレクトロニクスとコンピュータの進歩を先取りしつつ開発してきたシステム例)

エレクトロニクスと  
コンピュータの進歩  
の流れ

試作した機器とシステム

1950

計測用アナログ  
エレクトロニクス  
の進歩

光源解析のためのアナログ光電測光回路  
発光分光分析のための光電測光方式  
光電子増倍管ゲート型時間分解分光測光方式  
赤外分光測光機器設計用アナログシミュレータ  
複光束複光路光学的零位型赤外分光光度計  
ダブルチョッピング型光学的零位遠赤外分光光度計  
時間分解蛍光分光光度計  
分光測光用各種アナログデータプロセッサ

計測用デジタル  
エレクトロニクス  
の進歩

デジタル型光電発光分析装置  
光分析用デジタルデンシトメータ  
分光測光用ハイブリッドデータプロセッサ  
分光測光用各種デジタルデータプロセッサ  
光子列同時検出マルチチャンネル測光方式  
時間分解測光型原子吸光光度計

1960

汎用大型コンピュータ  
の普及と  
ミニコンの登場

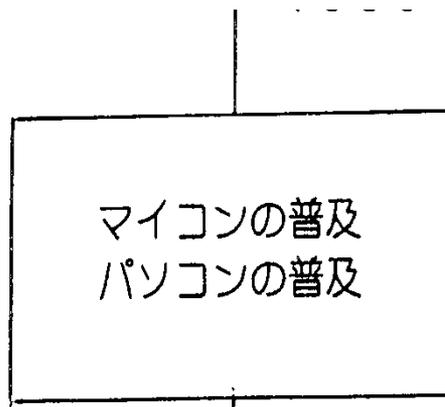
- 遠赤外フーリエ分光測光装置
- 分光測光用平滑化最適パラメータ設定法
- 分解能向上処理適正化シミュレーション法
- ミニコン援用型蛍光分光光度計
- ミニコン援用型遠赤外分光光度計
- ミニコン援用型吸光・蛍光同時測光分光光度計
- ミニコンによる実時間フーリエ分光方式
- ミニコン援用型CD・ORD分光光度計

1970

ミニコンの普及と  
マイコンの登場

- ミニコン援用型閃光分解分光光度計
- ミニコン援用型レーザーマイクロプローブ発光分析装置
- マイコン内蔵型蛍光分光光度計
- マイコン内蔵型赤外分光光度計
- マイコン内蔵型顕微分光光度計
- モジュール型紫外・可視分光光度計
- 光分析用知能化インタフェース方式
- 垂直分散マイコンネット型分光測光システム
- 水平分散マイコンネット型分光測光システム

1980



1990

- パソコンを中心とした光分析用L Aシステム
- マルチチャンネルフーリエ分光装置
- 光CT分析顕微鏡
- 分光測光用適応平滑化アルゴリズム
- MEM, SVDによる新しい分解能向上アルゴリズム
- スペクトル分析のための高度多変量解析アルゴリズム
- パソコン計測器用モバイル光分析機器へのアプローチ

## 8) 全天候型の分光機器 —ラクダの背中から落ちても壊れない—

フィールド使用のポータブル分光機器が、ホームランドセキュリティーや遺跡調査などに使われている。丈夫で長持ちに加えてメンテフリーの必要性。



# プロセス・現場用機器に求められる条件

## 1) 非接触分析

負荷効果の軽減。高速移動物体や遠隔位置・危険環境に対応。

## 2) 非破壊分析

試料サンプリングや前処理の回避。分析廃棄物への考慮。

## 3) 多成分同時分析

その場での計測対象化学種の即時変更。対象物の時間変動や予測外成分の出現への対処。

## 4) 多パラメータ同時計測

物質情報と同時にその時間変動や空間広がりでの計測をはじめ、温度、湿度、気圧など環境パラメータの計測も必要。分析点の位置情報はGPSで取得。

## 5) 検出感度、確度、選択性

機器の小型軽量化による取得有効信号成分の減少。環境外乱による偽信号や雑音成分の増大への対処。

## 6) 新しい前処理システムの導入

サンプリング、分離・分解、希釈・濃縮、発色などの試料前処理は機器のモバイル化を制約。前処理の回避や単純化が望まれるが、近年要求されているスペシエーションには、複雑な前処理を容認せざるを得ない。マイクロ化学プロセスの成果を導入した新前処理システムに期待。

## 7) キャリブレーション

検量標準にはマトリクスの影響を考慮した標準試料の選択が鍵。現場への標準試料持参、あるいは、現場と中央分析室間の高速データネット活用による手法などを選択。

## 8) コンピュータ支援

モバイルコンピュータの付属や内蔵は常識。ハードウェアの性能低下を補う数値処理。外乱によるハードの乱調回避と自動回復、故障箇所の自動診断。簡易データベースのビルトイン。フィールドに分散された機器の通信ネットワーク化。

## 9) 堅牢性、耐久性

防爆などを含めた周辺温度、圧力、粉塵・化学雰囲気に対する耐力や液中・地中耐力必要。姿勢変化、振動・衝撃などの加速度対策。機械運動部回避、姿勢フリーなどの配慮。システム部品をフィールドに持ち込み、組み立てる手法も一案。

## 10) 小型化、軽量化、省電力化

前二者は常識、省電力化が最重要。モバイル型の特徴は消費電力如何にあるといえる。小型発電機、カーバッテリー、燃料電池、太陽電池。

## 11) 操作性、保守性

分析技術者以外の現場技術者への対応。誤動作やブレークダウンに対する短時間復帰機能。高速通信網を利用したリモートトラブルシューティング。メンテナンスフリー指向。

## 12) コスト

保守費を含むトータルコスト面で、センサーヘッドの使い捨ても有効。分析性能低下に反してコスト高も起こりうる。

### 分析機器の形態

	分類(JAIMA準拠)	目的・機能	生産方式	使用者	機器の性格
上流 (清流)	ラボラトリー用	多目的、多機能 コンソール型 卓上型	一品生産 多種少量生産	専門家 専任オペレータ	温室育ち 青白きインテリ
上方向指向(高度化)  下方向指向(スリム化)					
下流 (奔流・濁流)	プロセス・ 現場用	限定目的、限定 機能 設置型 モバイル型	変種変量生産 少種多量生産	非専門家・素人	丈夫で長持ち 雑草的で全天候型

# おわりに

- ・周辺技術の進歩に感謝
  - ・光電子増倍管の登場(RCA→東芝→浜松ホトニクス)
  - ・アナログからデジタルエレクトロニクスへ
  - ・コンピュータの急速な発展と普及(ミニコン→マイコン→パソコン)
  - ・レーザーの登場と普及(光源)
  - ・光ファイバーの発展(光伝播系)
  - ・高性能回折格子の普及とフーリエ分光方式の登場(分光光学系)
  - ・半導体イメージセンサの普及(検出系)
  - ・技術の抜本的な転換期間を十二分に活用して独自研究
    - 旧物理実験技術→ガラス細工と写真技術(先輩に利)
    - 新物理実験技術→エレクトロニクスとコンピュータ(後輩に利)
- 幸か不幸か下積み期間が長かったため、大学紛争中も産学協同研究を実行できた(工学部の責務を遂行)

# 今後の研究方向

- 分光工学のさらにローエンドに向けての定着  
民生用の種々の光エレクトロニクス部品を利用した簡便安価な分光機器の開発(現場計測用や教育用)
- フィールド計測用(臨床を含む)モバイル分光機器の開発  
システム化手法を使って、性能を落とさず何処まで小型軽量化が出来るか？ 保守不要への志向は？
- ホームランドセキュリティのための分光計測機器の開発

乏しい研究費予算ではあるが、学内の研究室もだいぶ計測や分析、精製、抽出等の科学装置が整備されて来たようである。しかしながら一、二の使いなれた装置以外のものについては、その原理や構造等に関する知識、我々の得た実験 data が生み出された径路について案外無関心であり、与えられた既製の装置を慢然と使用していることも多い。そのためややもすると、装置の性能や機構に関する認識の不足から適用を誤って、とんだ実験 data を掴んですましていることにもなりかねない。例えば誘電率の測定にしても、その測定回路や、試料の conductivity の差異により、その測定値を異にする。外国の著名な学者ですら、不合理な data を得て、錯誤を犯し、その理解に苦しんだ例もある。この実験 data が生み出されて来た径路、すなわち、科学計測装置が、その実験に適しているか否か、その性質を十分に検討しなかったからである。少くとも我々は我々の研究に使用する科学装置の原理や回路について、十分な予備知識をもち、その得られた data が十分に信頼し得るものであるや否やを検討しなければならない。しかしながら、我々化学、生物系統の研究者はその修学過程において、余りにも電気、物理、機械の知識を学ぶ機会が少かった。復興した出版界のブームにのって最近分析化学講座、実験化学講座、物理化学実験法、エレクトロニクス講座等のシリーズが相ついで刊行され、エレクトロニクスの解説書も散見されるようになったが、仲々これらの知識をマスターするのも楽でないし、取りつき難い方もあると思う。しかし正確な実験 data を catch し、さらに一步研究を奥にすすめるのにはどうしても科学装置そのものに対する勉強が必要である。

マナスル，エヴェレストの登頂や，極地深海等の探検において見る如く，今後に残された未知の世界を探るにはどうしても高度の科学装置を必要とする。我々の研究においても，試験管，フラスコの時代は遠く過ぎ去って，より正確な，高性能の科学装置を必要とする。

科学は近年著しい進歩をとげたが，我々の行手には人をよせつけぬ“物性”の峻峰や，神秘の霧にとざされた“生命現象”の絶壁が横たわっている。この断岸絶壁を一步登るためにも，大密林を一步奥に立入るためにも，新しいより高度な，科学装置が切実に待望されるのである。我々，生物，化学系の研究者であっても，来るを待つだけでなく，電気や物理の研究者と協力してこの開拓のためのより高度の科学装置を自らの手で築き上げねばならぬ必要が今後大いにあると思う。

今後，分子自体の発振を検出する装置や，microwave spectroscopy, magnetic resonance visible ray 等が科学装置の花形として登場する日も近いであろうし，酵素反応の解折に Chance がやっているような電子計算機等も大いに利用されるであろう。足下にかけている身近な装置から，高度の機械に到るまで適当に採択して行くつもりである。

昭和 33 年 7 月

科装学置懇談会幹事一同

ご清聴有難うございました。  
また、お目に掛かりましょう。

