

大気光 3 測器編

ver21may22

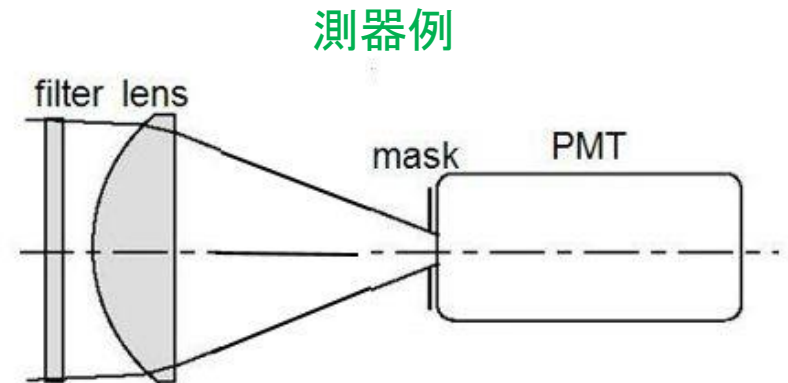
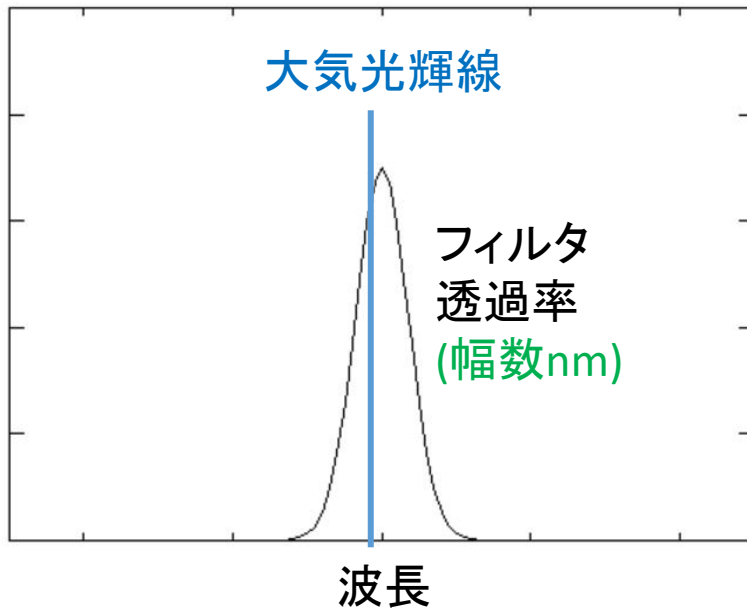
干渉フィルタ・分光撮像・魚眼全天単色撮像・ドップラー撮像
主な分光測器: 回折格子・ファブリペロー干渉計・マイケルソン干渉計

例1. 狭域干渉フィルタによる簡易分光

単方向の輝度を求めるだけなら

干渉フィルタ+レンズ+PMT(光電子増倍管)でできる

ロケット観測では発光層をつき抜けて発光高度分布を得る(次頁に例)



ロケットで発光層を突き抜け 酸素原子同時測定して 励起メカを検討した例

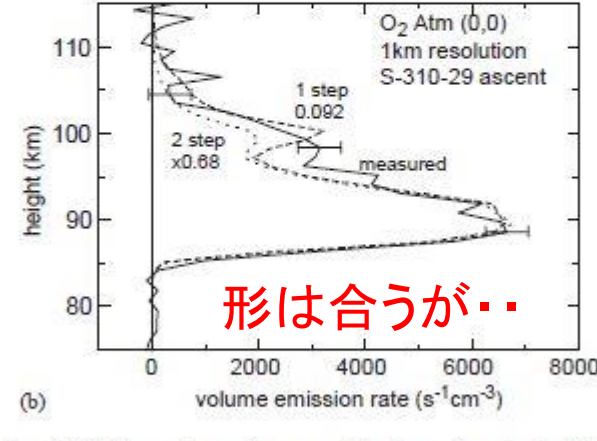
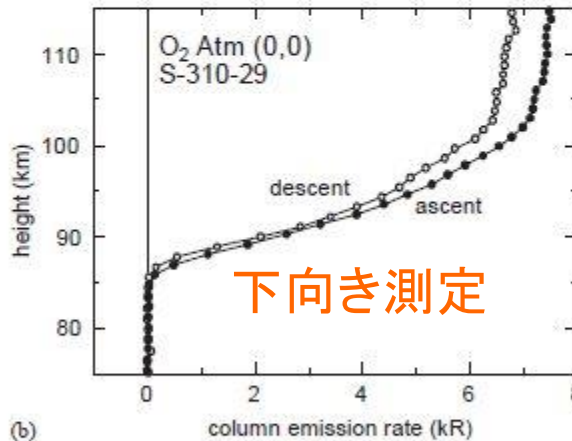
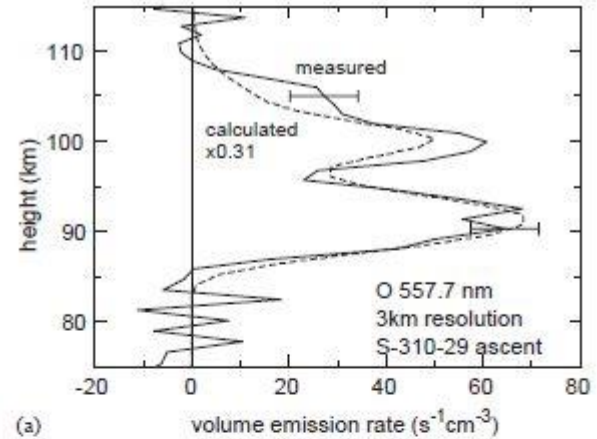
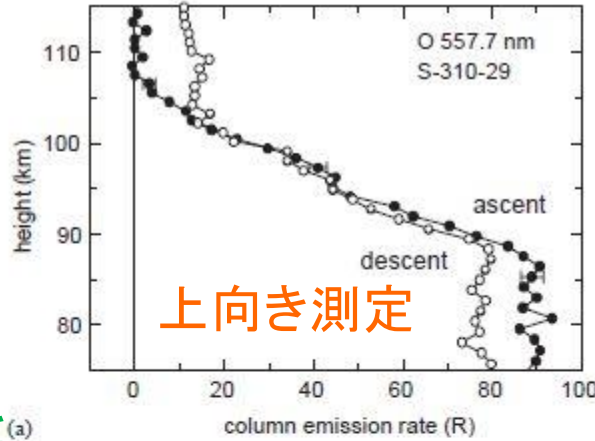
$$-\frac{d}{dz}(4\pi I) = \varepsilon$$

コラム放射率 $4\pi I$

体積放射率 ε

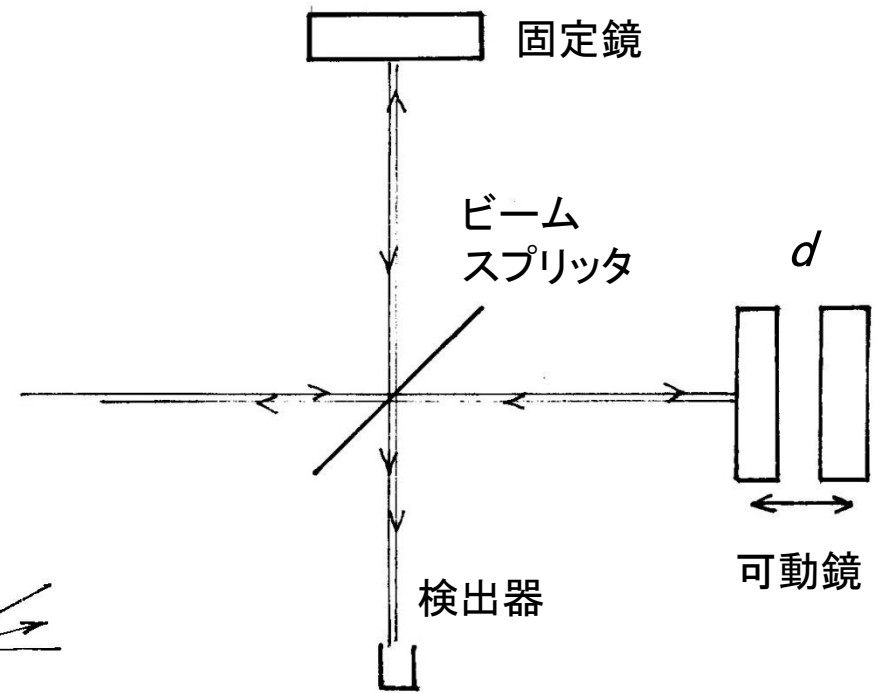
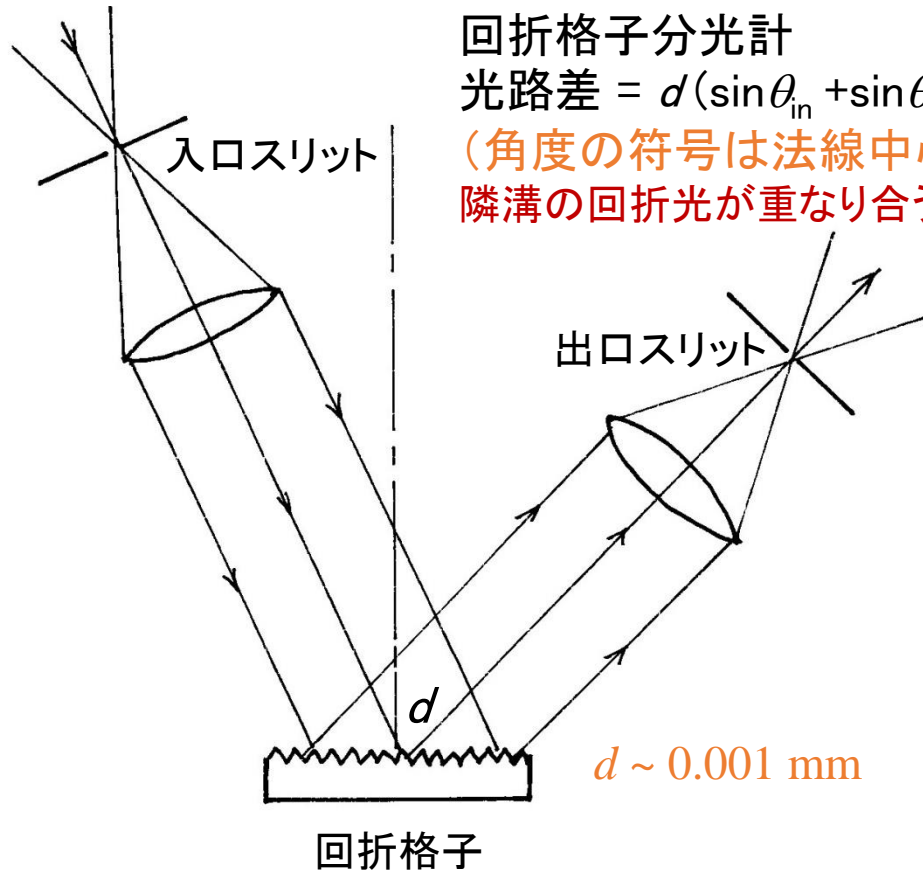
O 557.7 nm G線励起は
 $O + O + M \rightarrow O_2^* + M$
 $O_2^* + O \rightarrow O(^1S) + O_2$
 $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu(557.7)$ と
 されているが
 中間体 O_2^* の正体が不明

金星大気光情報から
 中間体は $O_2(c, v' > 1)$ で
 決まりかと思われたが・・・
 話はその後2転3転・・・

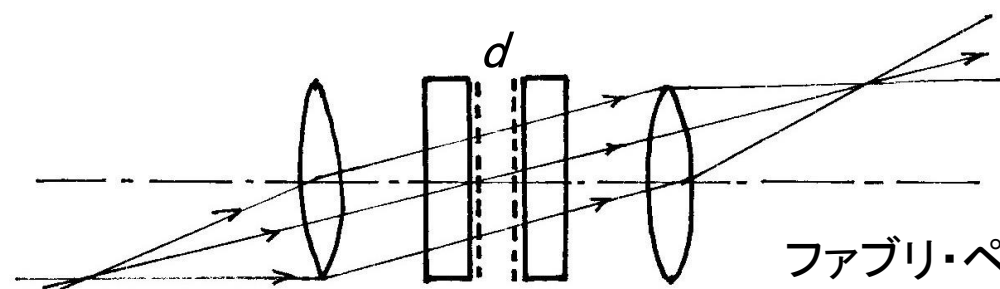


観測値(実線)とO測定値に基づく理論値(点線)の比較。絶対値は557.7nmで0.31倍、O₂A帯で0.68倍して合わせてあるが、密度換算では0.68倍、0.82倍で大差ではない (岩上他 2003)

主な分光測器3種



マイケルソン干渉計
光路差 = $2nd \cos\theta$
 $d \sim 100 \text{ mm}$
光路差のある光束を重ねる



ファブリ・ペロ干渉計
光路差 = $2nd \cos\theta$
 $d \sim 10 \text{ mm}$

干渉フィルタはこの仲間
平行平面内側の反射膜で多重反射

回折格子

回折格子分光器の基本形は図2.1aのように、「入口スリットの単色像を出口スリットに結ぶ」だが、最近は出口スリットの代わりにCCDカメラを置き、適当な幅のスペクトル情報を同時に得ることが多い。基本形では回折格子を回転させて波長走査を行うが、CCDを置いた場合には波長走査は必要ない。この結果、スペクトルが光源時間変化の影響(例えば、雲の通過)を受けないという大きな長所がある。

図2.1a 回折格子分光器 基本形

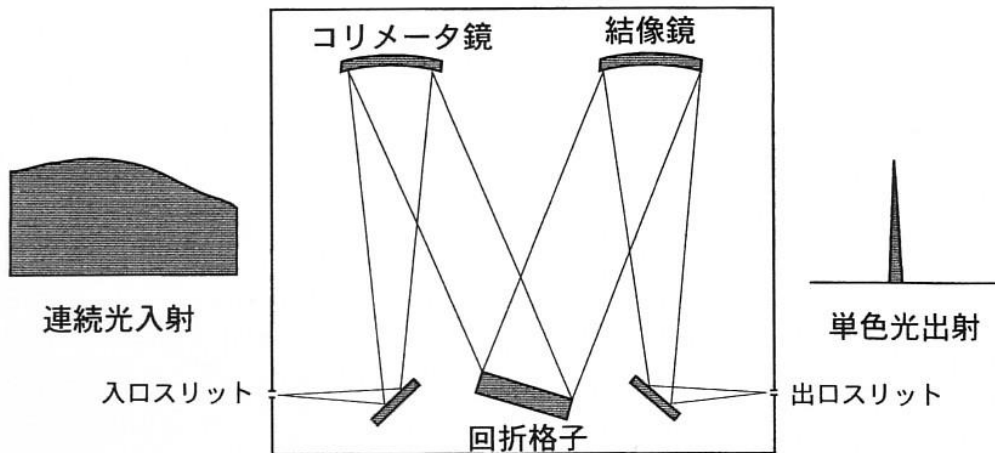
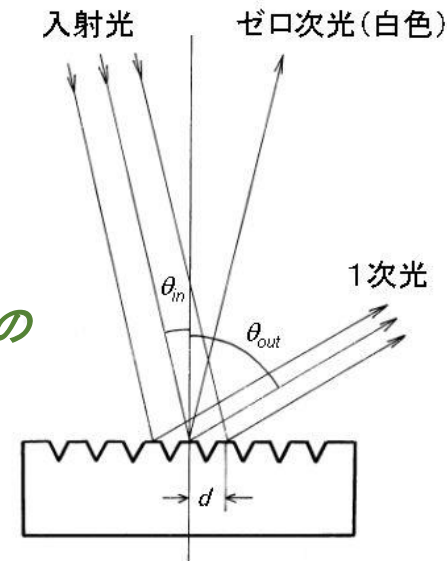


図2.1bに示すように、格子表面での回折により、入射光は波長別に方向を与えられる。式(2.1)において、左辺(=光路差)が波長の整数 m 倍になる方向で強めあう。反射条件を満たす場合には左辺=ゼロとなり、全ての波長で強めあう(ゼロ次光:邪魔な光)。 m は次数と呼ばれる整数。3年実験の回折格子では溝間隔 $d = 1/1200$ mm

$$\text{光路差} = d(\sin \theta_{in} + \sin \theta_{out}) = m\lambda \quad (2.1)$$

ここで、入射角・出射角が法線を挟む場合は逆符号にとる。

図2.1b 回折格子の分光原理
隣溝の回折光が重なり合う



分解能

スリット幅無限小でも

分解能無限大とはいかない(回折が起きる)

レーザー光(デルタ関数)をいれても幅がつく

$\lambda' = \lambda + d\lambda$ のピークが λ の光の

最初のminと重なるまで

2波長の分離ができると考える

(レーリーの基準)

$$d \sin(\theta + \Delta\theta) = m(\lambda + \Delta\lambda) \quad (2.4a)$$
$$\frac{\delta'}{2} = \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta + \Delta\theta) = \pi m + \pi / N$$

これを整理して

回折格子分光器の理論分解能 (resolving power)は・・・なんと溝総数できまる！

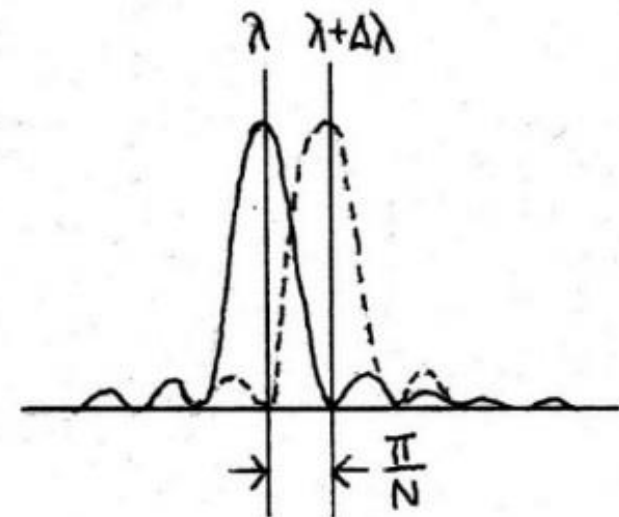
$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (2.4b)$$

ここで λ は波長、 $\Delta\lambda$ は分解可能最小波長差
(しばしば $\Delta\lambda$ を分解能ということがある)

N は溝総数、 m は次数

つまり大きな(高価な)格子ほど高性能
(あたりまえ・・・)

図2.5 レーリーの基準



3年実験の場合、格子幅が50mm、溝数1200/mmなので
 $m=1$ の時 $R=60000$ 、 $\lambda=600\text{nm}$ で $\Delta\lambda=0.01\text{ nm}$ となるはずだが、
実際には諸事情によりここまでの性能はなかなかでない。
(主に収差による) $\Delta\lambda=0.1\text{ nm}$ 程度

式を見ると R をかせぐには2通り

1. 溝数 N でかせぐ(直入射型 実験室ではこれ)
2. 次数 m でかせぐ(エシェル型 天文台ではこれ)

凹面格子

反射率の低い真空紫外で有用
凹面の半径を直径とする円
(ローランド円)上にスリットを並べる

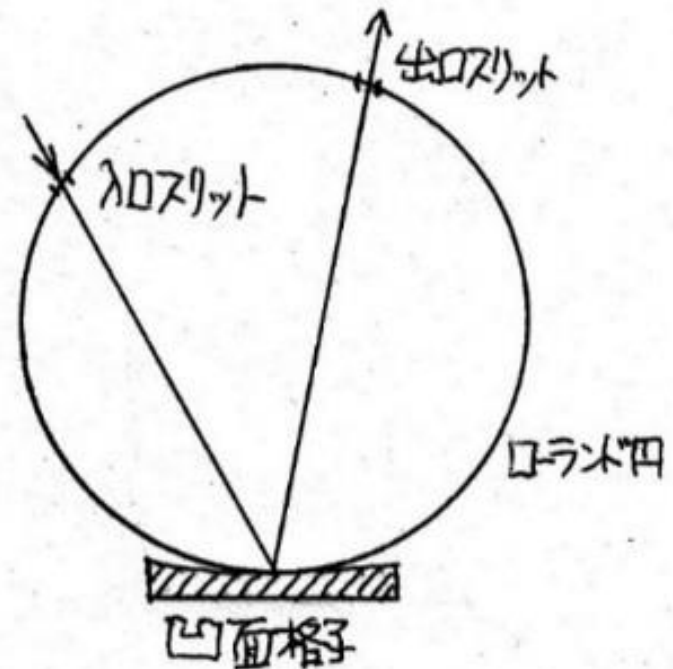
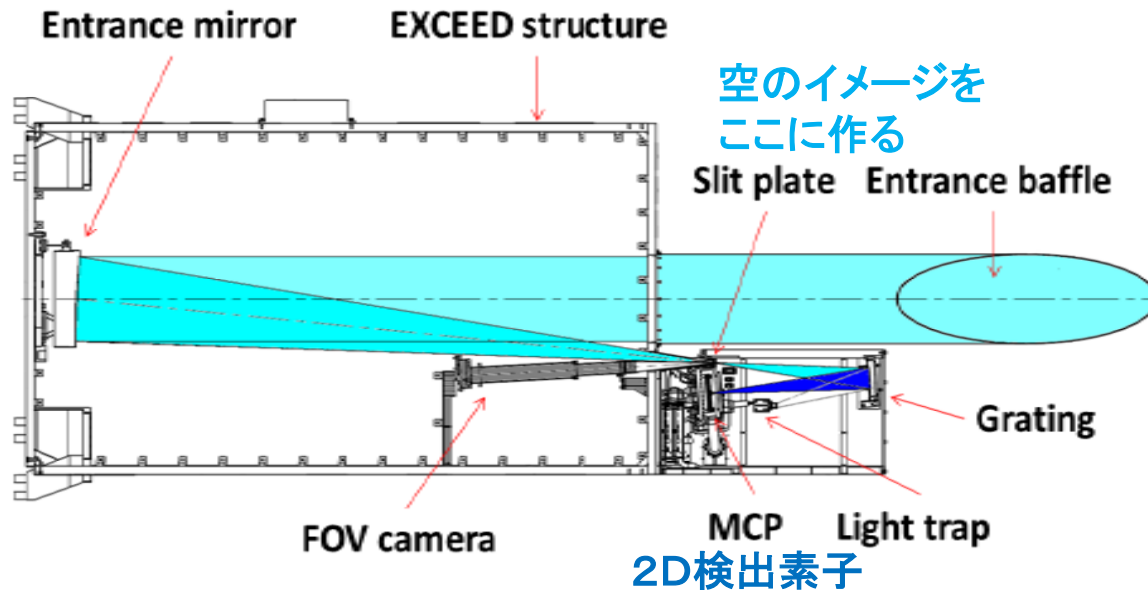


図2.6
凹面格子

例2. 分光撮像

回折格子分光器 + 2D検出素子でスペクトルと位置情報を同時に得る
「ひさきEXCEED」はこの形



ひさきEXCEED光学系 (吉岡 他 2013)

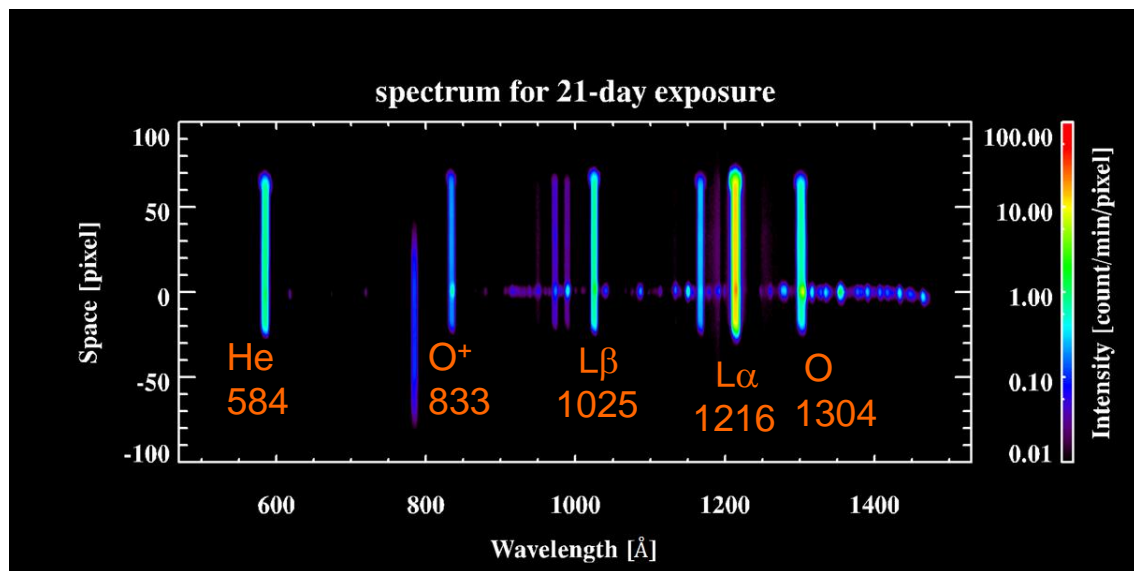
真空紫外低反射率に対するため

凹面格子を使い 反射面は2面しかない

ひさきによる 金星EUV大気光 分光撮像例

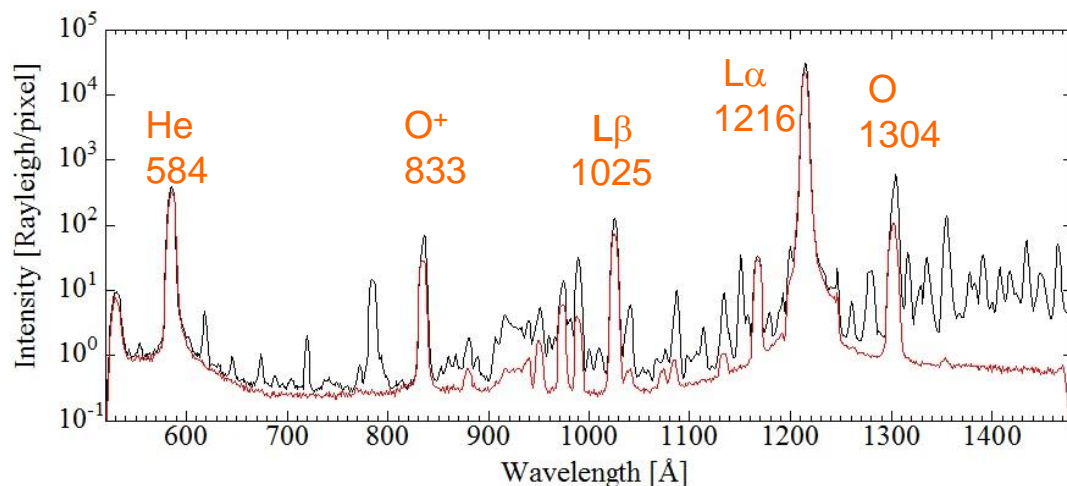
横軸波長・縦軸空間
y = +/-10付近が
金星ディスクの大気光

地球軌道のため地球コロナ線(L α
1216Åなど)混入多数
(y=-20から+70) (奈良 他 2018)



21日積分スペクトル
和(黒) = 地球コロナ(赤) + 金星

金星では組成・高度が違うため
大気光も顔が違う



例3. 魚眼全天単色撮像

魚眼レンズ＋干渉フィルタ＋冷却CCDで全天の2D単色輝度分布が求まる(次頁)

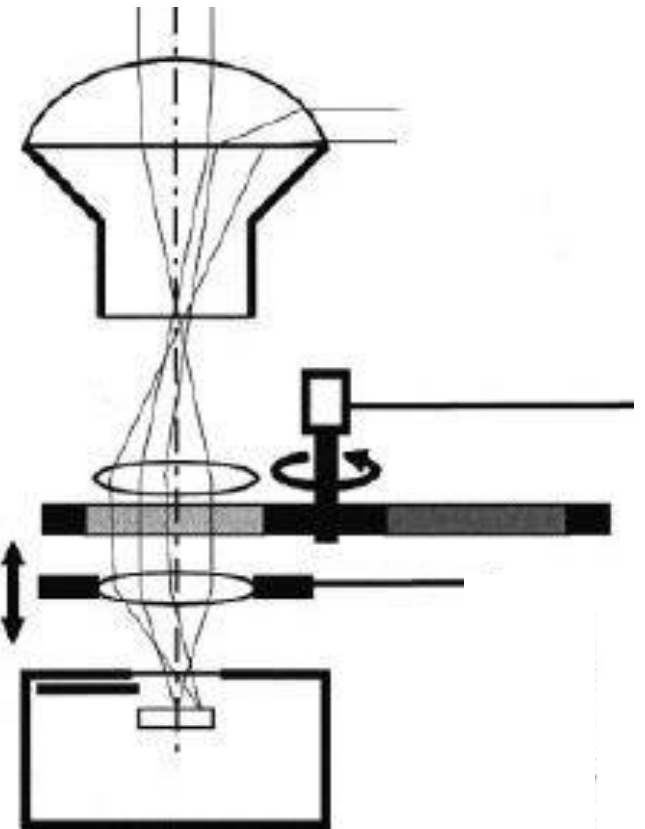
干渉フィルタ特性は入射角依存なので注意

全天単色撮像カメラ
(久保田 他 2002)

魚眼レンズ

フィルター
ターレット

CCDカメラ



小さな全天像をつくり
コリメート(平行光化)後
干渉フィルタを通し
CCDで受ける

単色撮像の例: 重力波による大気光変調

E族(G線OH帯)では水平波長30 km (右上・右下)

F族(R線)では水平波長300 km (左下)

右下が普通の星空
雲みたいなものが大気光

1000倍速くらい

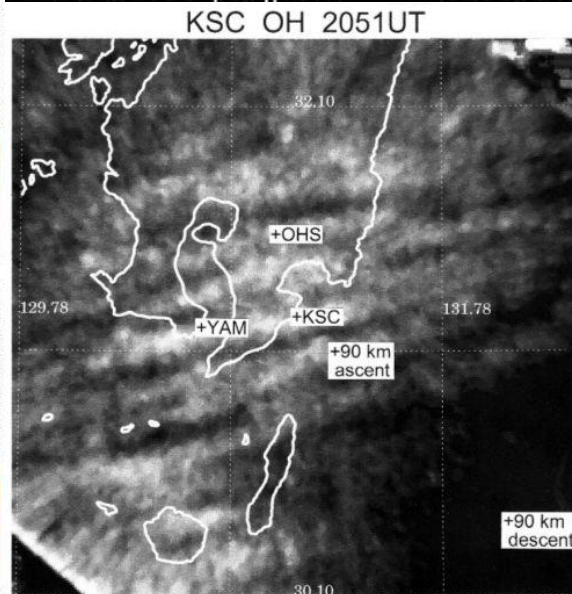
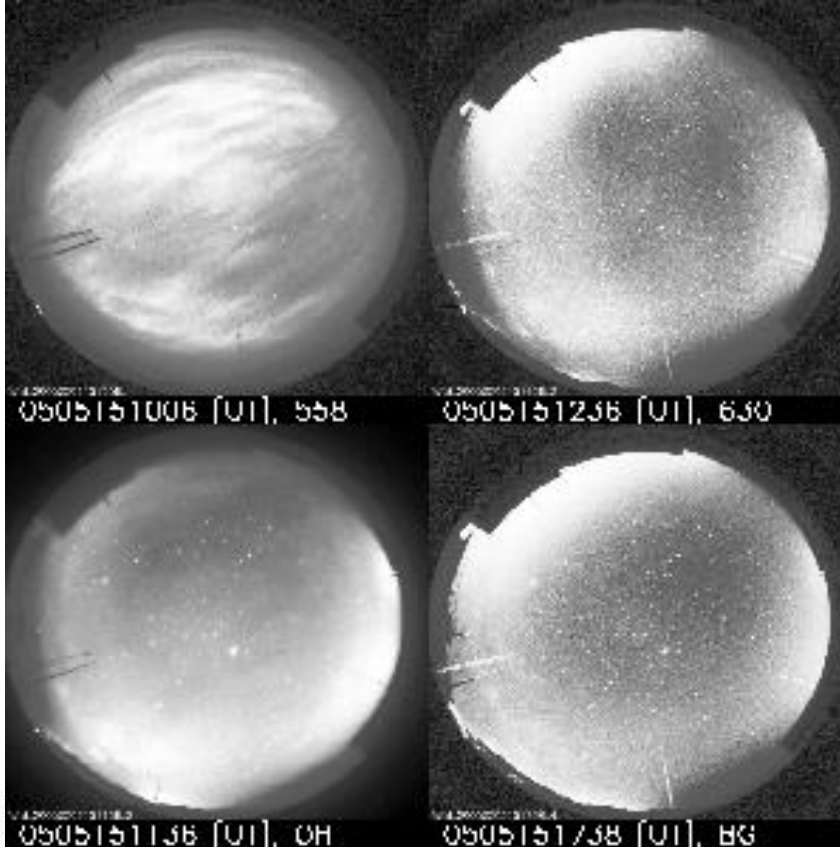
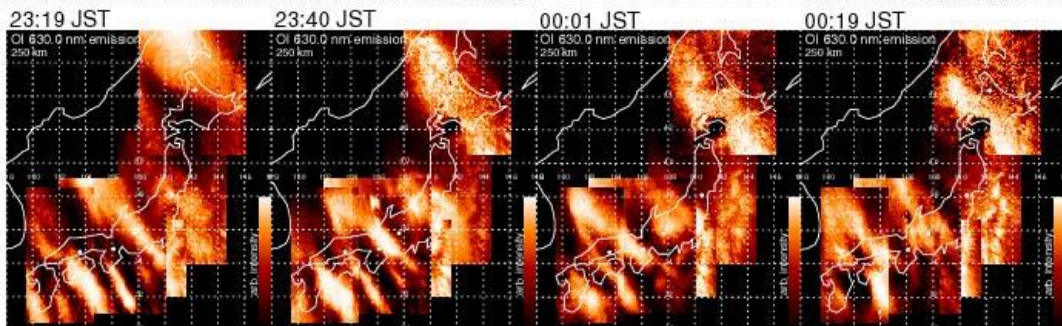
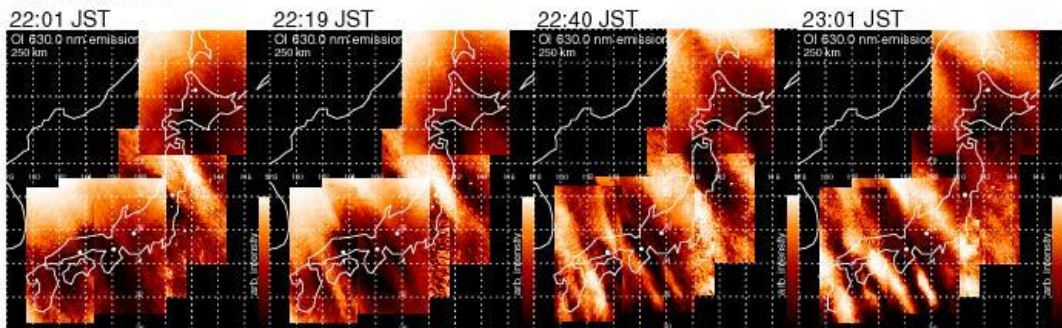
星空単色像

G線	R線
OH帯	星空

日本列島スケールのTID(伝搬性電離層擾乱)に伴う630nm大気光変調

20分毎図: 波長300km西南西移動

OI 630-nm er
22/05/1998



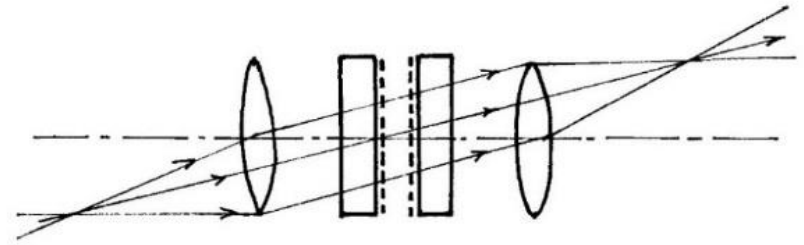
九州上空
投影 30km
波状構造が
みえる

ファブリ・ペロ干渉計

多重光束による干渉

(・・・干渉フィルタはこの仲間)

Fably-Perot(1901)



$$\text{光路差 } \Delta = 2nd \cos i \quad (2.11)$$

波長走査に3方法(気圧走査、間隔走査、回転)

位相差 $\delta = 2\pi\Delta/\lambda$ 振幅 a エネルギー透過率 t

エネルギー反射率 r 合成波振幅 u

$$u = at[1 + re^{-i\delta} + r^2e^{-2i\delta} \dots + r^{N-1}e^{-i(N-1)\delta}]$$

$$= at \frac{1 - r^N e^{-iN\delta}}{1 - e^{-i\delta}} \rightarrow \frac{at}{1 - re^{-i\delta}} asN \rightarrow \infty \quad (2.12a)$$

$$I = |u|^2 = u^* u = \frac{a^2 t^2}{1 + r^2 - 2r \cos \delta} = \frac{a^2 t^2}{(1 - r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)}$$

$$= \frac{a^2 t^2}{(1 - r)^2} \frac{1}{1 + \frac{4r}{(1 - r)^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}} \quad (2.12b) \text{ Airy関数}$$

大気光輝線のように
独立していると楽だが
透過帯が多数あるので要注意

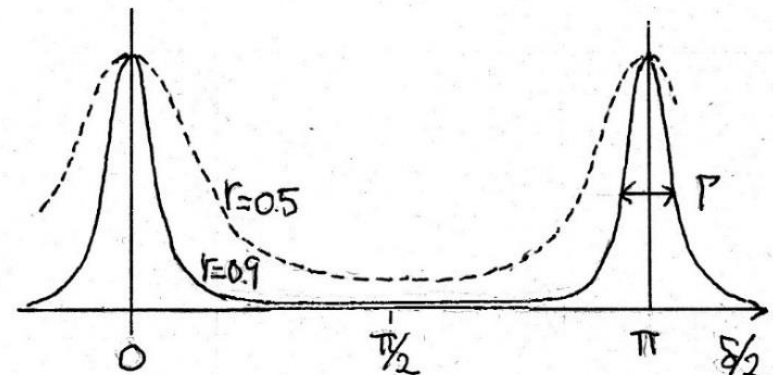
図2. 10 ファブリ・ペロ干渉計

($d \sim 10\text{mm}$)

平行平面内側の反射膜で
多重反射

$\Delta = m\lambda$ ごとにピーク

図2. 12 Airy関数



$$\Gamma = \frac{1-r}{\sqrt{r}}$$

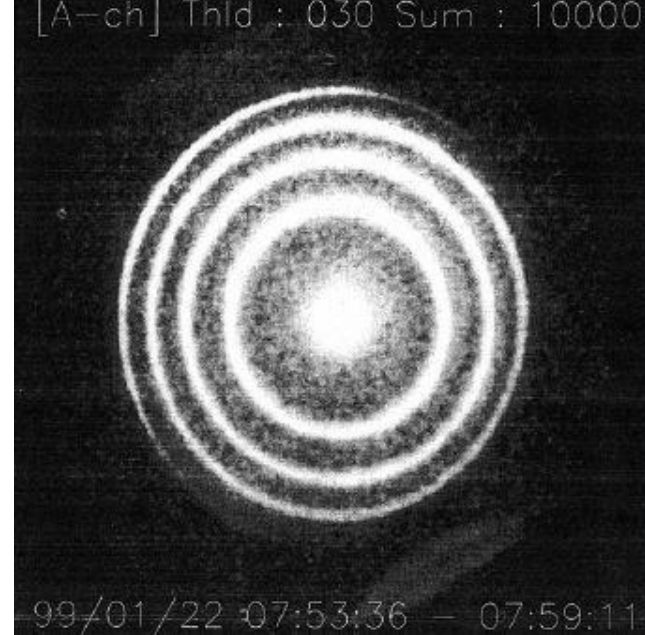
$$N_F = \frac{\pi}{\Gamma} = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r} \quad (2.13)$$

と置くと、 Γ はほぼ半値全幅(次元は位相角)
 フィネス N_F は(間隔/幅)比を与える20-30程度の数
 r を1に近くとるとフィネスを稼げるが暗くなる

例: $d=1\text{cm}$ 、 $\lambda=500\text{nm}$ で次数 $m=2d/\lambda=40000$ と
 大きな数となり $N_F=25$ なら
 分解能 $R = \lambda/\delta\lambda = mN_F = 10^6$ あたりまでいける

表2.1 フィネス

r	N_F
0.95	61
0.90	30
0.85	19
0.80	14



大気光風測定エタロンに
 HeNeレーザー6328Åを
 入射してできたフリンジ
 エアリー関数が見える
 (石井 他 2002)

反射率 r をあげて
 フィネス N_F を大きくしたいが暗くなる
 $N_F=30$ あたりが限度

マイケルソン干渉計

FTIR (Fourier Transform InfraRed) と呼ばれる
 Michelson・Morleyのエーテル実験(1887)が有名
 固定鏡・可動鏡・検出部・・・たったこれだけ

$$\text{光路差} = 2nd \cos i \quad (2.51)$$

n : 空気屈折率、 d : 可動長、 i : 入射角

光路差を変えるには3方法あることが解る

入力がレーザー(デルタ関数)なら d を動かすと
 ($m\lambda$ で強めあい) 出力は \sin (つまりフーリエ変換)
 つまりどんなスペクトルでも
 フーリエ変換される(かなり乱暴説明?)

例1 入カスペクトルがレーザーの時の出力は(フーリエして)
 サイン波インタフェログラム

$$P(\delta) = \int \tilde{\delta}(k - k_0) e^{2\pi i k \delta} dk = e^{2\pi i k_0 \delta} \quad (2.5a)$$

例2 出カインタフェログラムが $\tilde{\delta}$ 関数の時の入力は
 (逆フーリエして) 連続スペクトル

$$B(k) = \int \tilde{\delta}(\delta - 0) e^{-2\pi i k \delta} d\delta = e^0 = 1 \quad (2.5b)$$

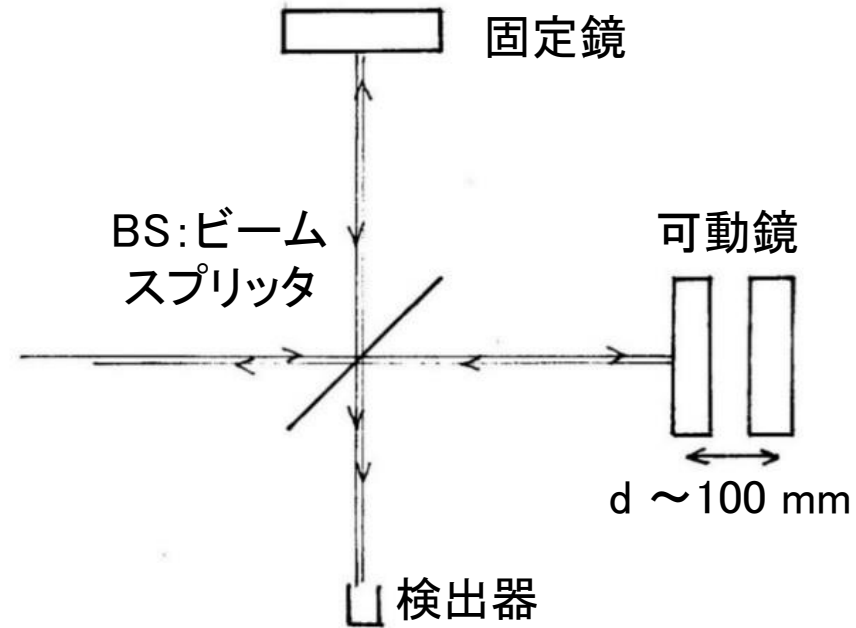


図2.7 マイケルソン干渉計
 光路差のある光束を重ねる

$\tilde{\delta}$ はデルタ関数
 δ は光路差 k は波数
 P はインタフェログラム
 (干渉図形と呼ぶ)
 B はスペクトル

$n=1$ $i=0$ と単純化し波数 k の光の振幅 E と強度 I は

$$E = E_0 \sqrt{R_B} e^{i\phi_{RB}} \sqrt{T_B} e^{i\phi_{TB}} e^{i\phi_M} (e^{-2\pi i l_1 k} + e^{-2\pi i l_2 k}) \quad (2.6a)$$

位相変化 ϕ は左から BS反射 BS透過 鏡反射 光路差 $\delta=l_2-l_1$

$$I = |E|^2 = 2E_0^2 R_B T_B (1 + \cos(2\pi\delta k)) \quad (2.6)$$

$E_0^2 R_B T_B = B$ とし、連続スペクトルなら $B=B(k)$
出力は重ねあわせで

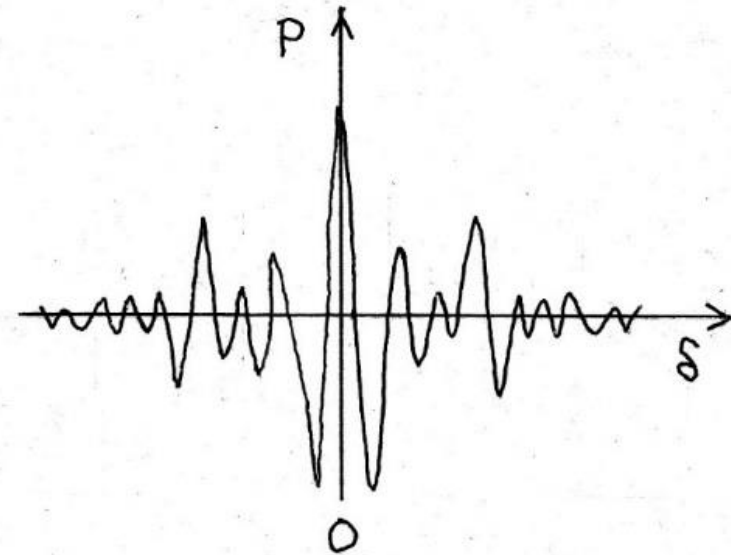
$$I(\delta) = \int_0^\infty 2B(k)(1 + \cos 2\pi\delta k) dk$$

$$I(0) = 4 \int_0^\infty B(k) dk, I(\infty) = I(0)/2 \quad (2.7)$$

$$P(\delta) = I(\delta) - I(\infty) = 2 \int_0^\infty B(k) \cos(2\pi\delta k) dk$$

をインターフェログラム(干渉図形)と呼ぶ

図2.8 インタフェログラム



本当はないが、負側もあるとして $B(-k)=B(k)$ とすると

$$P(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} B(k) e^{2\pi i k \delta} dk \equiv \mathfrak{F}[B(k)] \quad (2.8a) \text{ フーリエ変換}$$

$$B(k) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\delta) e^{-2\pi i k \delta} d\delta \equiv \mathfrak{F}^{-1}[P(\delta)] \quad (2.8b) \text{ 逆フーリエ変換}$$

となって分光ができる

しかし、実際は光路差有限 L なのでどうするか？

有限 L の場合のスペクトル B' はコンボリューション定理

「積のフーリエ変換はフーリエ変換のコンボリューション」を使い
コンボリューション記号を \otimes として

$$B'(k) = 2 \int_0^L P(\delta) e^{-2\pi i k \delta} d\delta = \int_{-\infty}^{\infty} P(\delta) D(\delta) e^{-2\pi i k \delta} d\delta = B(k) \otimes f(k) \quad (2.9a)$$

$f(k)$ は打ち切り関数 $D(d)$ の逆フーリエ変換 (図2.9a 2.9b)

$$f(k) \equiv \mathfrak{F}^{-1}[D(\delta)] = 2L \frac{\sin 2\pi k L}{2\pi k L} \quad (2.9b) \cdots \text{sinc関数という}$$

$D(d)$ は $d < L$ で1、 $d > L$ で0 (図2.9a) の箱型

$f(k)$ にはかなり目立つ副極大があるので

(図2.9b) $D(d)$ ではなく

三角 $A_1(d)=1-|d/L|$ や

$A_2(d)=(1-d^2/L^2)^2$ を使うことがある

アポダイゼーションapodisation(足切り)と呼ぶ

みかけは良くなるが分解能を損する

最良波数純度 $Dk=1/(2L)$ (アポなし) or

$=1/L$ (アポあり)

つまり鏡を1cm動かすと $L=2\text{cm}$ となり

アポなしで $Dk=0.25\text{cm}^{-1}$

つまり δ 関数的幅なしスペクトルを
入射しても右図のように
 $1/L$ 程度の幅がついて測定される

アポダイゼーションをすれば
見かけは滑らかになるが
線幅も増え、情報が増える訳でもない

図2.9a 打ち切り関数

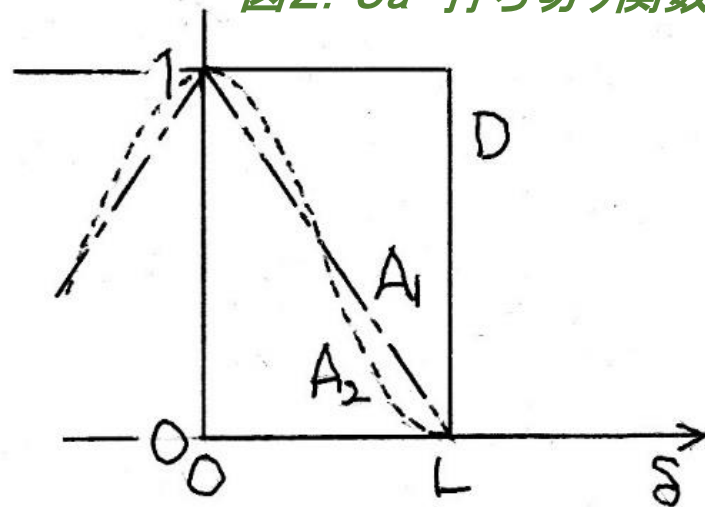
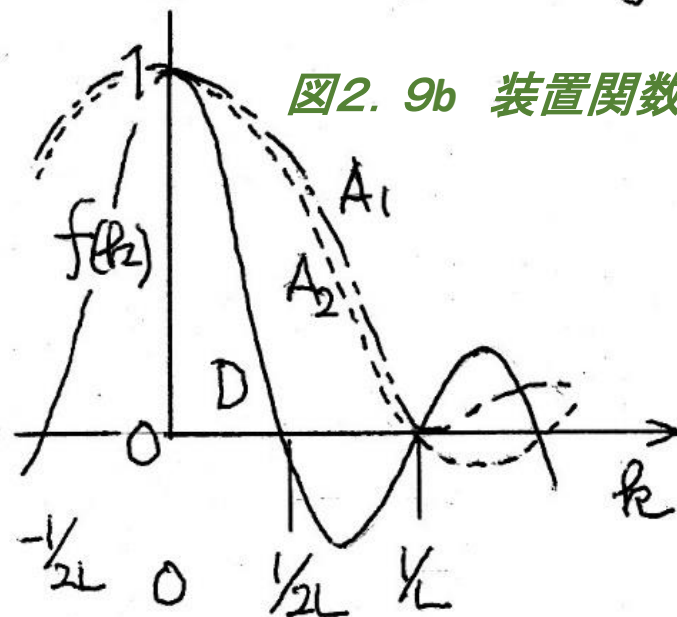


図2.9b 装置関数

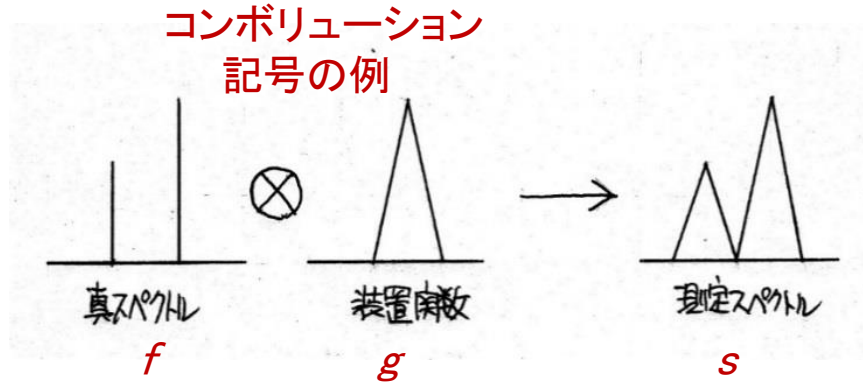


コンボリューション(たたみ込み)演算の例

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau$$

測定スペクトル f 真スペクトル g 装置関数

要するに加重平均



前ページの
 D, A_1, A_2 に相当

実は
物理測定は
みんなこれ

例えば
写真を撮っても
少しボケて
本物とは違う

マイケルソン干渉計観測例

地球熱放射スペクトル(衛星から直下視)

(a)サハラ(b)地中海(c)南極

地表の黒体放射を (松野・島崎1981)

大気が吸収の形に見えるが

実はちょっと違う

南極をみるとCO₂帯が

出っぱっている・・・これは何？

地表より大気が暖いところなる

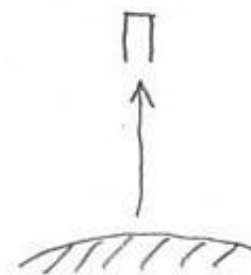
スペクトルの形から

気温高度分布が求まる

$$T = e^{-\tau}$$

$$I = B_s T_s + \int B_d \frac{dT}{dz} dz$$

地表成分 大気成分



天底放射の計算
 T は透過率
 B は黒体関数
 τ は光学厚み

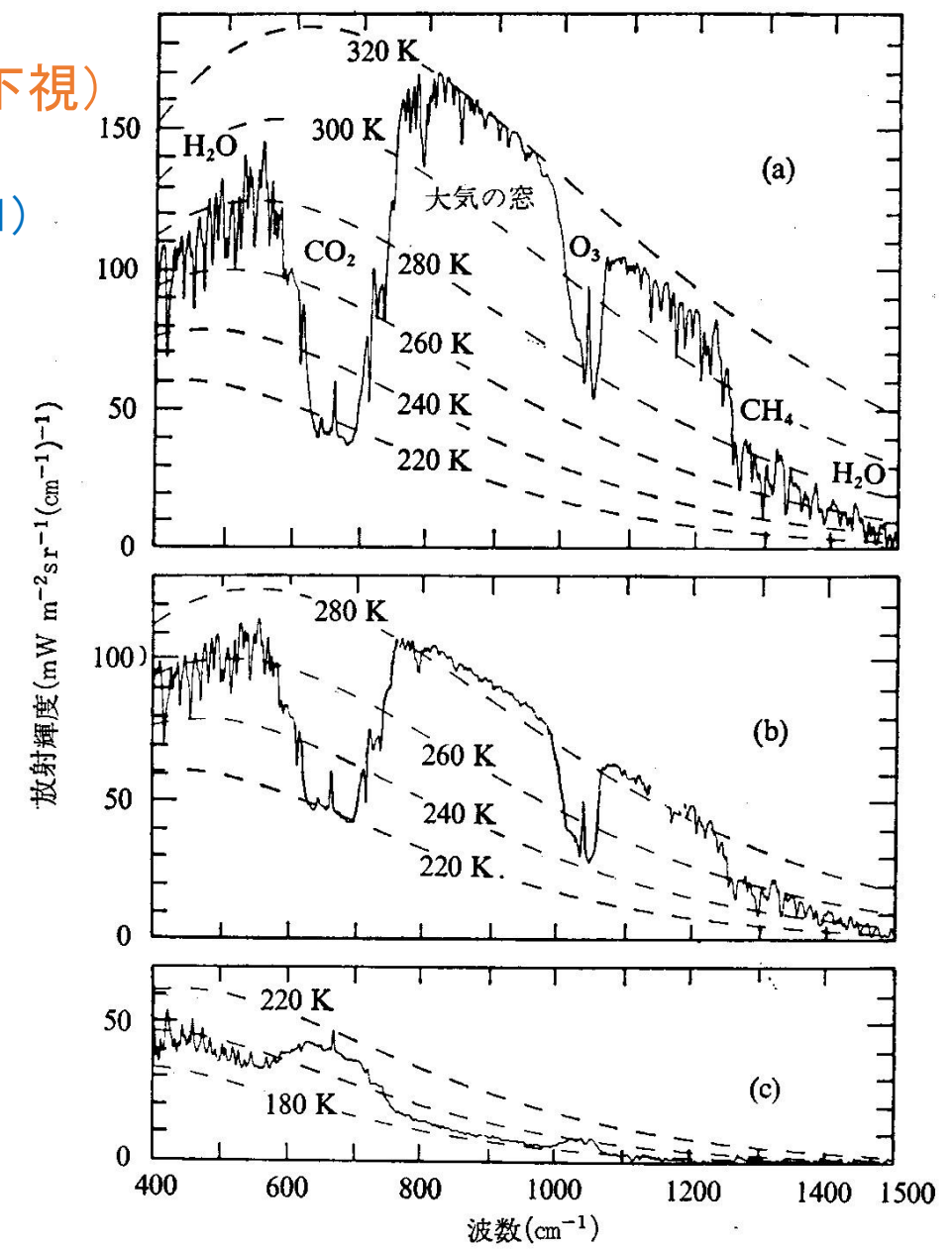


図 12.3 ニンバス 4 号衛星に搭載の赤外干渉分光計で測定した地球および大気からの上向き放射強度。(a) サハラ砂漠, (b) 地中海, (c) 南極. さまざまな温度に対応する黒体放射強度を破線で示す (Hanel et al., 1971 による).

FP(ファブリ・ペロ)干渉計(エタロン)あるいはマイケルソン干渉計など 10^6 以上の高分解能を持つ測器を使って、大気光線の幅・偏移から気温・風を求めることができるが、求まる風は視線方向成分なので例えば45度と135度の2方向測定して合成(鉛直成分無視) 風速ゼロ点設定にも問題あり(630.0 nm など禁制線ランプは作れない)

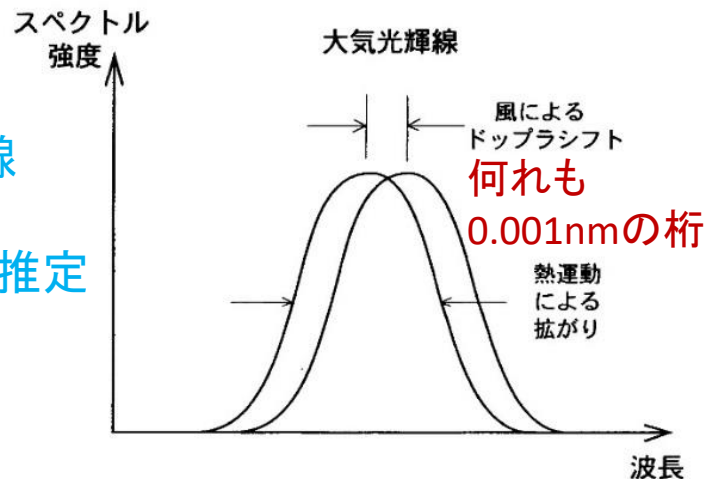
例4. ドップラー撮像

WINDII (wind imaging interferometer)

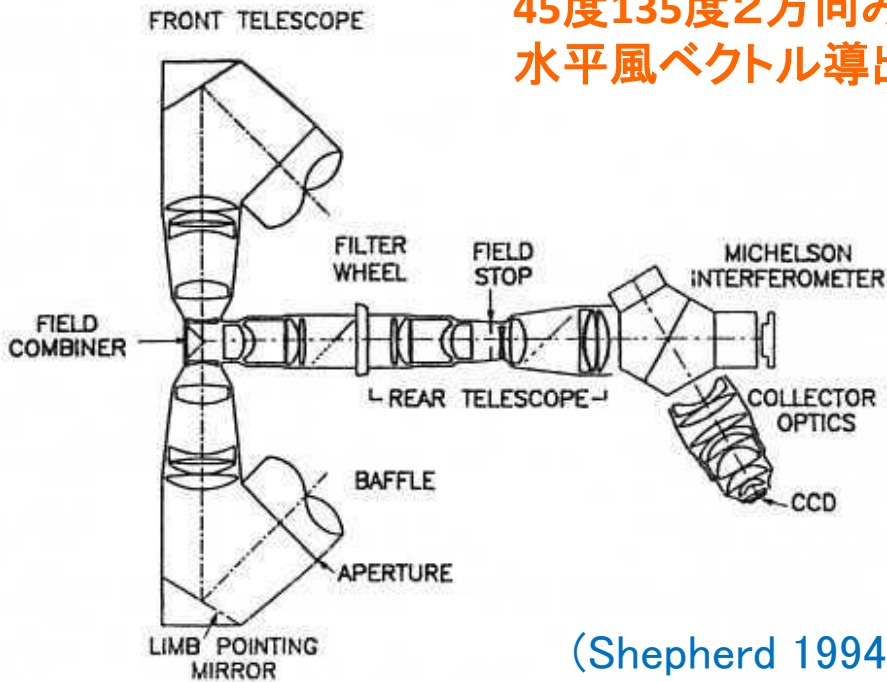
大気光の干渉測定による風・気温
(Doppler Michelson Interferometry)

OH(8,3)732nm・O 557.7nm・630nmで
80-300kmをカバー

大気光輝線
からの
風・気温の推定

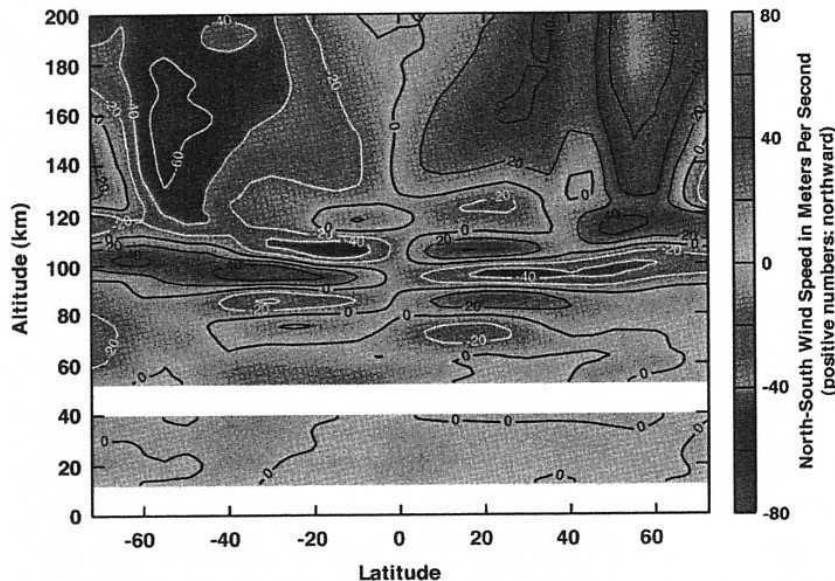


45度135度2方向みて
水平風ベクトル導出



(Shepherd 1994)

東西風に大気潮汐が見えた



WINDII (wind imaging interferometer)は

FTIRのサブセットだが使い方が違う
線幅・シフト測定に特化

気温測定:「フーリエ変換をしなくても
線の太さは包絡線の縮みとして見える」

風測定: 風速30m/sとすると
シフトは 10^{-7} しかない
しかし 10^5 フリンジとれば0.01……測れそう
これもフーリエしないで解析できる

しかし風速の原点をどうとるか?
地球平均はゼロではないだろう

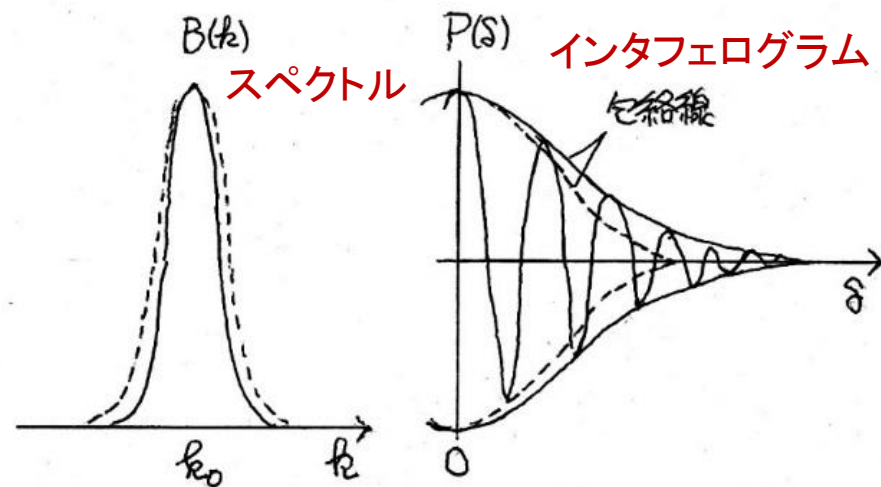


図2. 30 包絡線の伸び縮みで気温定量

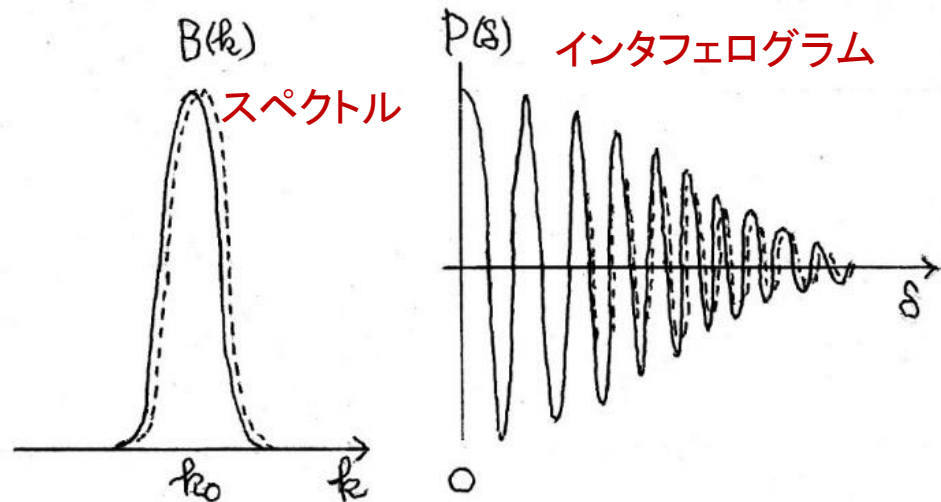
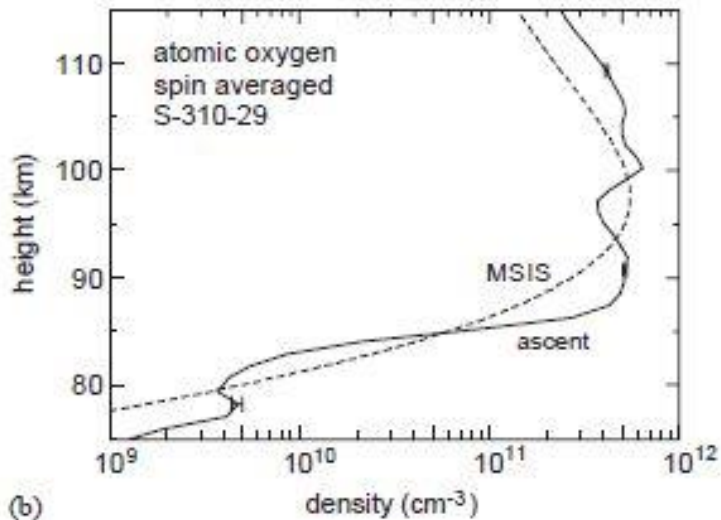
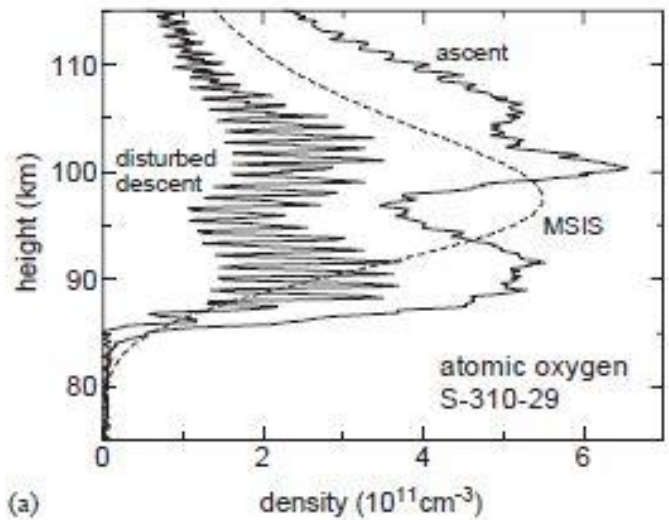
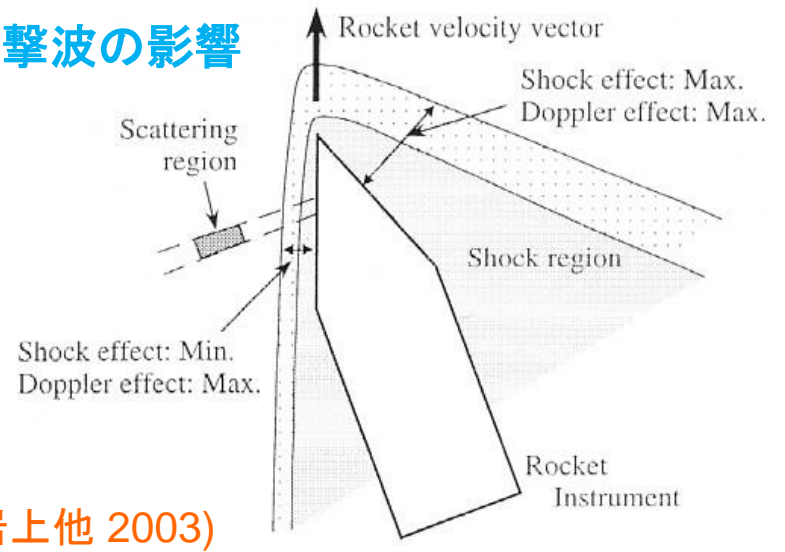


図2. 31 高次フリンジ使ってシフト検出⁰

共鳴線ランプによる酸素原子密度測定
 (分光ではないが大気光解析に必要)
 単純明快な半遠隔測定だが
 衝撃波影響を避けきれない



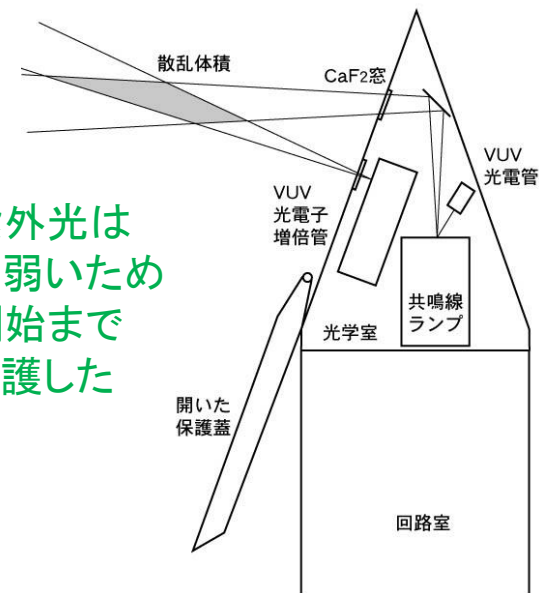
衝撃波の影響



(岩上他 2003)

Fig. 10. The schematic configuration of the rocket observation. The extent of the shock region depends on the angle between the rocket velocity vector and the wedge plane of the instrument

測定



真空紫外光は
 汚染に弱いため
 測定開始まで
 蓋で保護した

動作チェック

