

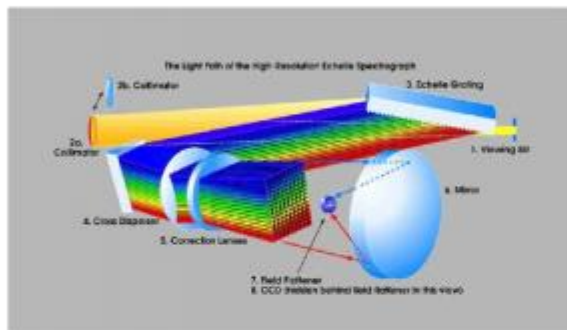
可視広帯域高分散分光器

http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamura/HDS/

岩室 史英 (京大宇物)

●可視高分散分光器

通常の可視高分散分光器 [Keck HIRES](#) の例)

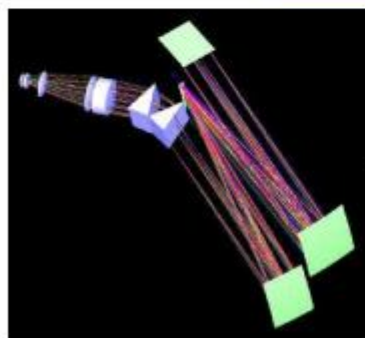


クロスディスペルザにも回折格子を使用するため、

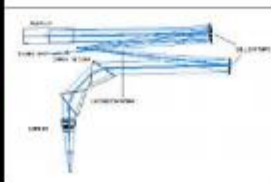
- ダイクロミックミラーで2つに分けないと、広い波長帯を一度に観測できない
- 波長帯の端で効率が低下する

などの欠点がある。

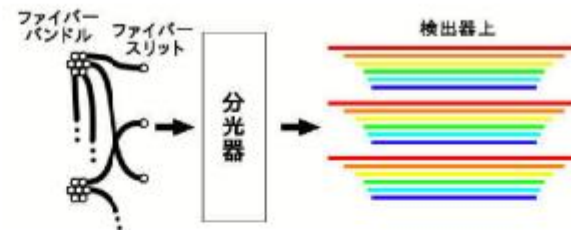
クロスディスペルザをプリズムにすると [CFHT ESPaDOnS](#) [Caltech CARMENES](#) の例)



のようにかなりのサイズのプリズムが必要になる。



ファイバーで雑散スリットをつければクロスディスペルザの分散は小さくて済むはず。

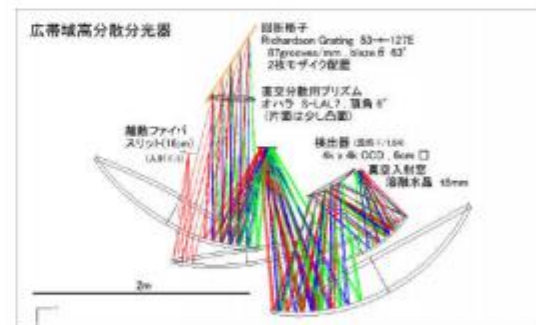


但し、この場合は検出器上での軸上色収差を広い波長範囲で0にしなくてはならないため、反射光学系で構成する必要がある。

●3.8m 望遠鏡用可視相対高分散分光器

以下の条件で設計した。

- 原則として lyconic 反射面のみ
- 回折格子は大面積マスターが既に存在するパラメータを用いる
[Richardson Gratings 53.12TE](#)
- 検出器サイズは $4\text{m} \times 4\text{m}$, $15\mu\text{m}$ pixel (6m \times) を仮定
- 波長分解能は最大で10万pixel以上
- 結像精度はほぼ全域で 2pixel 以内
- CCD 直前の入射窓は溶融水晶 $\phi 8\text{mm}$ を仮定

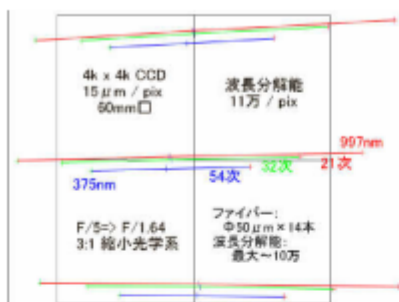


設計手順は、

- [近赤外分光器](#)
- CCD 直前の入射窓は無い状態で設計
- 回折格子のパラメータを徐々に変化させて最適解の変化を追う
- CCD 周辺でのビーム引き出し量を確保し、かつ結像精度をあまり悪化させない範囲内で、撮位置やカメラ系のパワーを変更して可能な限りの縮小光学系にする
- クロスディスペルザプリズムの最適な材質を選んで再度最適化
- 最も良い解が決まったら CCD 直前に入射窓を加え、軸上色収差をキャンセルするために、プリズムの片面に若干のパワーを与えて再度最適化

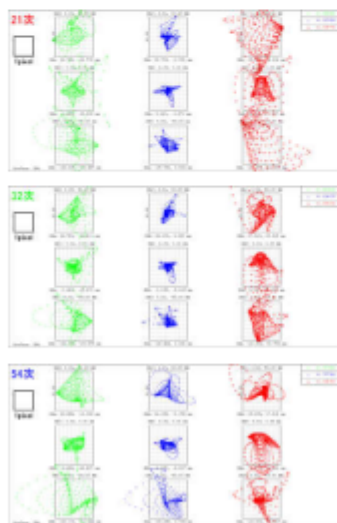
その結果、F/5 → F/1.64の3.1倍小光学系ができた。

検出器上でのフォーマットは以下の通り。



- スペクトルは21次~54次までを使用(実際はもう少し外まで使える)
- スペクトルの間隔は94μm~104μm (1ユニットの幅は3mm)
2本のファイバーで1ユニットとしたかったが、プリズムの分散を上げられず断念)
- 1天体を7本のファイバーで受け、2天体同時分光が可能
- φ50μmのファイバーを用いた場合は最大波長分解能は約10万、
φ100μmのファイバーの場合は波長分解能は約5万
(OPTRAN WFのポリイミドジャケットかな)
- 720nm (29次)までは連続したスペクトルが得られるが、それより長波長では周期的に観測できない部分が現れる

以下、上図*+*位置でのスポット図(21次の両側のスポットは検出器外)



Zemax ファイル

一応理解は出たが、少しでも設計から外れるとすぐに波長分解能が落ちるので、波長分解能10万のモードは全てうまく行った場合しか達成できない。ファイバーはφ100μmとφ50μmの2種類を準備しておき、通常は太い方を使うことになると思う。

また、2mサイズでF/1.64の光学系は温度変化に非常に敏感で、鏡の検査方法や光学調整も相当難しい事が予想されるので、よく考えないといけない。

例えば...

- CCDカメラマウント部はピエゾでほんの少し上下左右にオフセットがつけられるようにして、露出ごとに1/2pixel分ずらして何となく1pixel以下の情報が読めないか、もしくは1pixelサイズが5μmのCCDも準備しておいて、CCD部分を交換する波長分解能10万モードのため。
- 光学調整はほぼ全てリモートでできるようにして、スポットサイズの判定から光学調整を全て自動化し、調整スクリプトが1週間程度夜を問わず走り続けて調整を完了させるようにする(人間が頑張れば頑張るほど恒温槽内部の環境は乱れるので)。
- biconic mirrorの検査法は要検討。単に点光源からの斜入射ビームでチェックできれば最も楽なのだが...

●調整に必要な精度など

個々の光学素子の位置を±0.1mm、角度を±0.02°ずつずらして像サイズへの影響を調べた。
+、-での影響の違いはほとんどないが、悪い方の数値を以下にまとめる。

Optics	Z	X	Y	θx	θy	θz	備考
初期値	0.0040						
Mirror #1	0.0044	0.0040	0.0044	0.0140	0.0041	0.0040	
Prism	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040	0.0041	
Grating	0.0040	0.0040	0.0040	0.0065	0.0040	0.0040	
Mirror #2	0.0071	0.0040	0.0040	0.0090	0.0050	0.0055	
Mirror #3	0.0136	0.0041	0.0040	0.0045	0.0048	0.0040	
Mirror #4	0.0152	0.0041	0.0057	0.0360	0.0068	0.0041	横ずれは角度で相殺可
Mirror #5	0.0095	0.0060	0.0059	0.0153	0.0050	0.0040	
Mirror #6	0.0261	0.0063	0.0066	0.0298	0.0203	0.0040	横ずれは角度で相殺可

●波長分解能10万バージョン

上記の設計案に以下のコンセプトを追加。

- 回折格子をR4 (ブレース角 [Richardson Gratings 53*-425E](#))に変更
- Littrow 入射に近づけるため、コリメータと第1カメラミラーを共通化
- プリズム片面に軸外しの高次補正項を入れる(シュミットプレートのような感じ)
- CCDは画素9μmの10k x 10kのもの [STA1600DD](#)を用いる
(2015.9.4 現在、販売はNタイプのみで、CCD 12%、読み出し回路 44 [Dewar](#) やシャッターも含めたカメラシステムは350ks程度との事)
- CCD入射窓は厚さ12mmの溶融水晶
- ファイバーコア径は50μmと100μmの2種

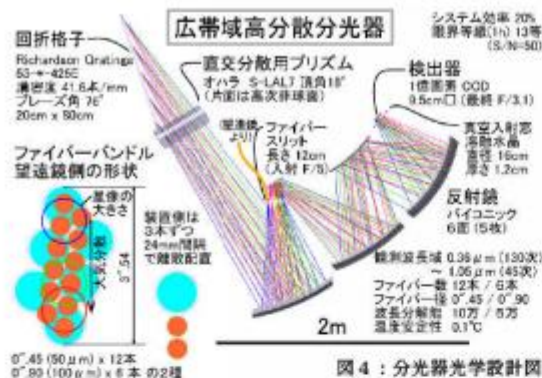


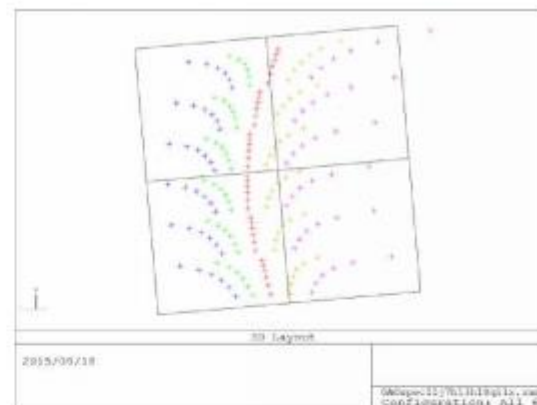
図4：分光光学設計図

Zemax ファイル



概要：

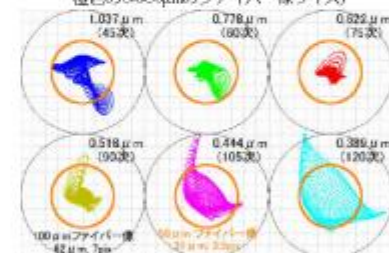
スリット・コリメータ間距離 $L = 840\text{mm}$
 ファイバーコア径 $s = 50\mu\text{m}$ (100 μm)
 ブレース角 $\theta = 75.9^{\circ}$
 波長分解能 $R = 2L/s \tan\theta = 2 \times 840 / 0.05 \times 4 = 134,400$ (67,200)
 入射F比 $F = 5$
 ビーム径 $\phi = L/F = 840/5 = 168\text{mm}$
 回折格子に7 $^{\circ}$ で入射するので、 $168/\cos 7^{\circ} = 880\text{mm}$
 回折格子サイズは200x800なので、両端5%ずつはみ出る面積的には1%強)
 スリット長 120mm
 光学系縮小率 0.62
 スリット像 120 x 0.62 = 74mm
 CCDサイズ 9 μm x 10 μm = 90mm x 15mm ずつ6縦に割り振る
 1エレメント 50 μm x 0.62 = 31 μm = 3.4 pixel
 格子溝本密度 41.59本/mm
 ブレース波長 $\lambda = 1000/41.59 \times 2^{\circ} \sin\theta = 46.65268\mu\text{m}$
 中心波長 最大 $\lambda/45 = 1.0367\mu\text{m}$, 最小 $\lambda/130 = 0.3589\mu\text{m}$
 プリズム頂角 18 $^{\circ}$
 オーダー間隔 120 μm (45次) ~ 250 μm (130次)
 短波長側ではオーダー間隔が広がるため、スポットサイズが大きくても問題ない



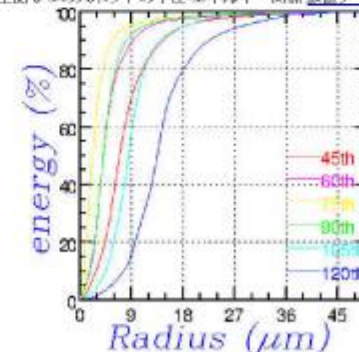
45次, 60次, 75次, 90次, 105次, 120

左翼スポット図 中央スポット図 右翼スポット図

オーダーと波長対応表 Zemax ファイル

下から2番目のグループ中央付近の6つのスポット
橙色のものは50 μm のファイバー像サイズ

上記6つのスポットの半径-エネルギー関係 数値データ



問題点・確認すべき点

- プレズ角75.9°の回折格子に79°で入射させた時の効率低下
OSOLVERで計算時間24
[75.9°で入射させたときの効率](#)
[79°で入射させたときの効率](#)
2割ほど効率が落ちるようだが、仕方がないか..

銀とアルミの反射率比較

検出器 (STA1600LN) コーティング

- CCD入射窓の大気圧による変形量(CCD周辺での像質低下が起こる
[円板の最大たわみを計算するサイト](#)で計算すると..

全面等分布荷重

p: 1013hPa = 0.1013 N/mm²

t: 12mm

R: 80mm

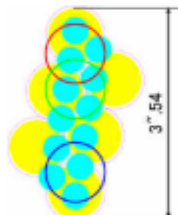
E: 73GPa = 73000 N/mm²

v: 0.17

最大たわみ 26.47μm → 曲率半径に換算すると 80²/2/0.02647 = 1.2e5 mm

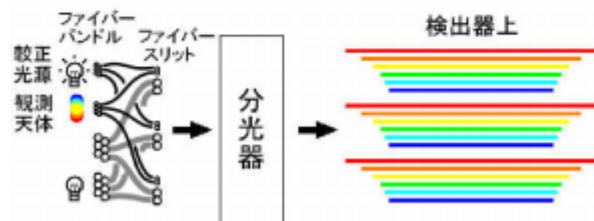
Zemaxで確認したら像質悪化は0.3%だった(厚さ半分だと3%悪化)

- 入射スリット形状(相当狭い所に、ややカーブさせて配置するので)
- プリズム材質 S-LAL7の製造できる最大サイズ
- 必要な調整精度(F3カメラなので、ちょっとはマンカも)
- 大気分散は天頂角45°で2"以上(0.38-1.0μm)となることに注意
12本(6本のファイバーによるバンドルは縦長にし、大気分散方向が変化しないようにPAを回転させながら観測するのがいいかも。

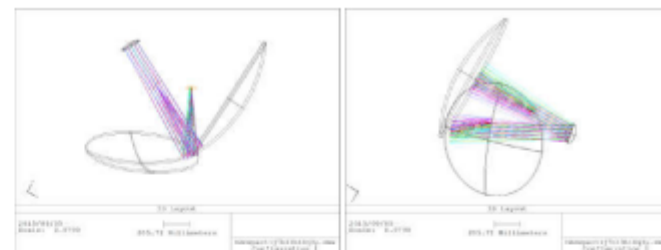


右図は、50μmファイバー12本のバンドルで seeing 1", 天頂角 45°の場合の大気分散との比較。背後にあるのが100μmファイバー6本のバンドルの場合。

- ファイバーは全てターゲットに合わせたまま、露出の間に別の波長校正用ファイバー6本を光らせて短い露出を行い、校正フレームとする手もある。

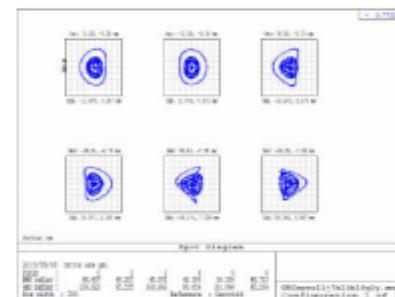


プリズム表面での反射光を集めることで、ファイバースリットの光量モニターをする事が可能。但し、もう一枚バイコニック鏡が必要になる事と、配置がかなり立体的になる事が難点。



左)上面図、右)側面図

ビーム内に結像してしまうが、小ミラーで個々に反射して、それぞれをレンズ付きCMOSカメラでモニタする。もっと安い鏡でも光は集まるが、スポットサイズが2mm近くになる。バイコニック鏡で集光しても、スポット径は100μm、球面鏡だと2mmサイズになる。



他の高分散分光器との比較

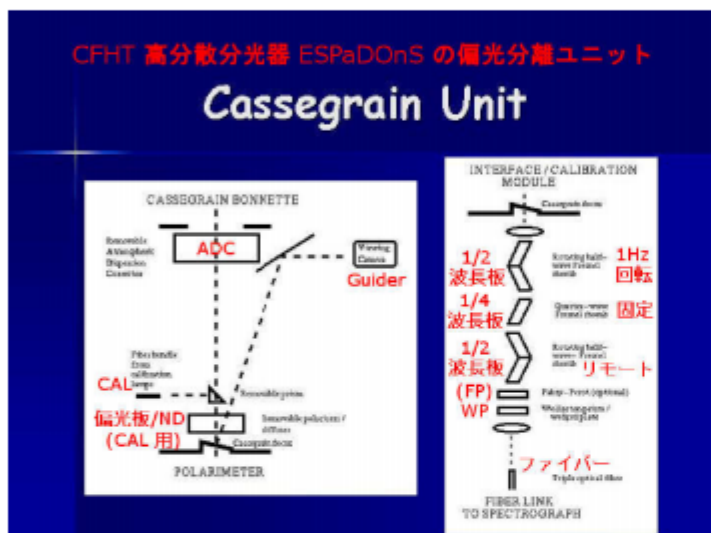
名称	口径	分解能	波長域割合	CCD	Slit
LBT/PEPSI	8.4mx2	12万	390-1050nm(1/3)	10kx10kx2台	φ1".5 (⇒ 5 slices)
GTC/HORUS	10.2m	5万	380-800nm(5/6)	4kx4k	φ1".3 (⇒ ? slices)
Keck/HIRES	10m	8.4万	360-1000nm(1/3)	2kx4kx2台	0".4x1"
Subaru/HDS	8.3m	10万	360-1050nm(1/5)	2kx4kx2台	0".3x2"
VLT/UVES	8.2m	11万	300-1100nm(1/2)	2kx4kx3台	1".5x2" (⇒ 5 slices)
Gemini/bHROS	8.2m	15万	400-1000nm(1/20)	2kx4k	φ0".9 (⇒ 7 slices)
MMT/MAESTRO	6.5m	9.3万	315-985nm(1/1)	4kx4k	0".3x1"
Magellan/MIKE	6.5m	7.4万	335-930nm(1/1)	2kx4kx2台	0".35x5"
京大高分散	3.8m	10万	360-1050nm(1/1)	10kx10k	φ0".45x12
CFHT/ESPaDOnS	3.6m	6.8万	369-1048nm(1/1)	2kx4.5k	φ1".6 (⇒ 3 slices)
La Silla/HARPS	3.6m	12万	380-690nm(1/1)	2kx4kx2台	φ1"x2
TNG/HARPS-N	3.6m	12万	380-690nm(1/1)	2kx4kx2台	φ1"x2
GAHA/CARMENES	3.5m	9.5万	520-1710nm(1/1)	4kx4k+NIR	φ1".5 (⇒ 2 slices)
Lick/Hamilton	3.0m	6万	350-1000nm(1/1)	2kx2k	1".2x2"

●偏光ユニットの考察

偏光ユニットを考える際に注意すべき点

- 波長域が広い (レンズ系色収差、波長板の色特性)
- ファイバーに入れる (相対光量の安定性)
- ADCは必須になる

この3点だけでも1~2%レベルで安定させるのは直感的にもかなり難しく、これを既にも実現している装置が、CFHT ESPaDOnSで、波長分解能は7万弱。



フレネルロムを使うことで位相板の波長特性を抑え、そのうちの1つを1Hzで等速回転させることで直線偏光成分を均一化させて円偏光成分の測定精度を高めている。この分光器は、1本のファイバーのアパーチャが1.6あり、同じサイズのピンホールをカセグレン焦点に置いて、リレー光学系でファイバー上にピンホール像を結像させることでファイバーに光を導入している。マウナケアのシーイングサイズはアパーチャに比べて十分に良いため、光量の安定性が確保できているものと思われるが、シーイングサイズよりもファイバー径が小さい3.8μ

ESPaDOnS known technical issues

- 透過率が予定の80%
これはどこでも普通にある話で、まあ良くやっている方だと思う。
- 偏光モード間のクロストーク
リレー光学系のレンズホルダーが熱収縮して、レンズにストレスがかかった事が原因で、これを改善することで解決した、とある。また、ファイバー分光器では、光量の安定性が確保できないため、連続光の偏光測定精度は予定通りダメだとも書いてある。レンズ系に関しては、"curing glue" が原因で再度悪化とか、ADC がかなりクロストークに寄与しているとかの記述がトップページにある。
- CCD 周り
ノイズが大きいとか、温度安定性がイマイチとか色々あったようだが、1つずつ改善されたらし

い。

- 温度安定性
室内の温度変化は事前の予想より良かったそうだが、温度変化の影響が予想よりも大きいらしく、冷凍容器内の液体窒素の蒸発による量の変化が影響しているのではないかと推測している。

とにかく、この部分のユニットがかなりトラブルの原因を作っていた印象。ESPaDOnS に関してもう少し詳しい情報を集める必要があると思う。

●バイコニックミラーの検査方法

- 変則フォーコートテスト
- 逐次三点法

[ここまでのまとめプレゼン](#)

iwamuro@kusastro.kyoto-u.ac.jp