

1: 分光システムの開発要素

- ・分散素子(超低分散用(R=20)、低分散用(R=300))
- ・筐体
 - ・フィルターターレット x3
 - ・分散素子ホルダー x2
 - ・波長較正用光路
 - ・観望用光学系との共存
- ・フィルター類
 - ・ロングパスフィルター(オーダーカットフィルター)
 - ・広帯域フィルター(BVR)
- ・制御ソフト(スリット、フィルター、分散素子交換)

※ レンズ群(コリメーター、再結像系): Howpolの予備を使用。

レンズホルダー: Howpol用の図面を元に製作

2: 開発のタイムスケジュール

~8月末: 分散素子の仕様決定

 超低分散:プリズム、低分散:グリズム に決定

~ 9月末: フィルター発注

9月~10月半ば: 筐体設計(レンズホルダー、フィルターホイール含む)

10月末: 筐体工作の発注

11月~: 制御ソフト開発

1月中に全てのパーツが揃うようにする。

3: 現在の開発状況

・・・分散素子についてはほぼ終了し、9月より筐体設計を開始。

超低分散用素子(プリズム): 発注済み

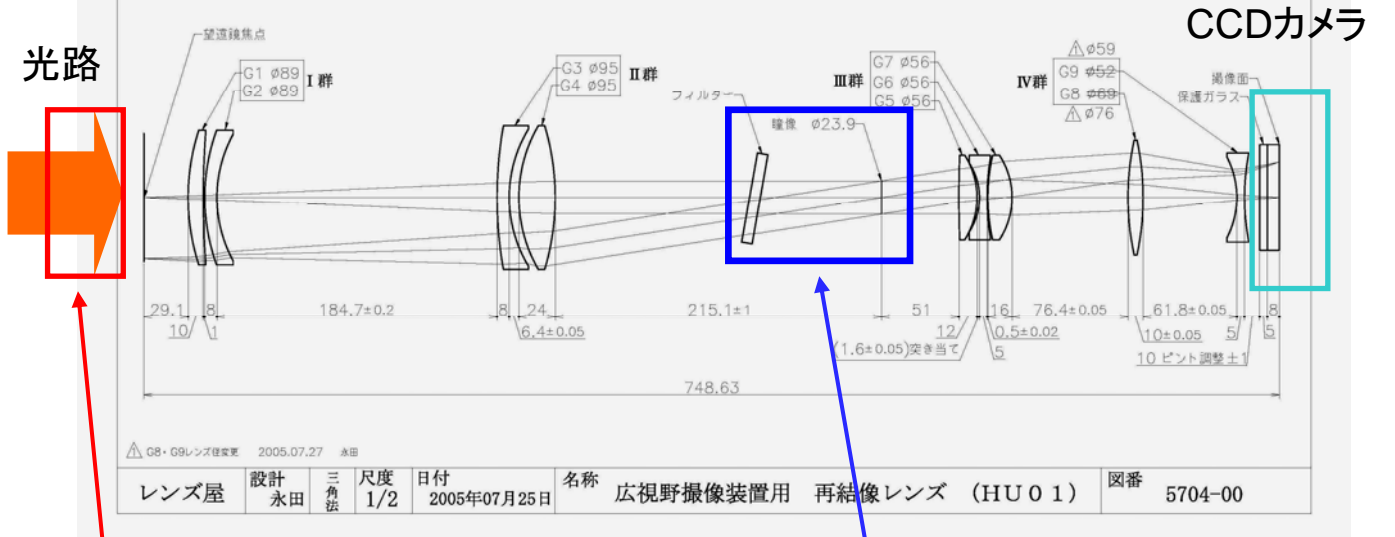
納期: 12月中旬頃 価格: 428,000円

低分散用素子(グリズム): 見積もり回答(9/3)

納期: 3ヶ月 価格: 612,045円

◎ 光学系(Howpol図面)

対象望遠鏡 赤外シミュレータ (新副鏡) RC鏡 D=1540mm F12.2 対応波長 450<λ<1100nm 視野 半面角7.5' イメージサークル φ47.35mm CCD 1画素15μm□ 受光サイズ61.4mm□ 合成F値 6.9 望遠鏡との合成焦点距離 10.6m 撮像面スケール 0.29"/pixel 中央部への想定挿入素子 フィルター VPHグリズム ウォラストンプリズム	80% Encircled Energy φ0.6秒角 (視野全面・プリズム無い場合) Distortion +2.4%(@最大像高+23.68mm) 瞳像の取差 52μm (半面角5') 撮像面への最大入射角 16.2° (@最大像高+23.68mm)	指定公差 指示無き間隔公差 ±0.1 群内相互偏芯公差 I群 ±0.1 (3') II群 ±0.02 (30") III群 ±0.01 (30") IV群 ±0.03 (1') 群間偏芯公差 I群 ±0.5 II群 ±0.5 III群 ±0.1 IV群 ±0.1
--	--	--



ここに、フィルター、分散素子が入る。

フィルターターレット： 少なくとも、2段用意

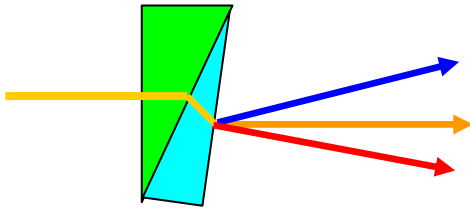
1段： ロングパスフィルター(2種類)、広帯域フィルター(B,V,R)

2段： 超低分散分光素子(プリズム)、低分散分光素子(グリズム)

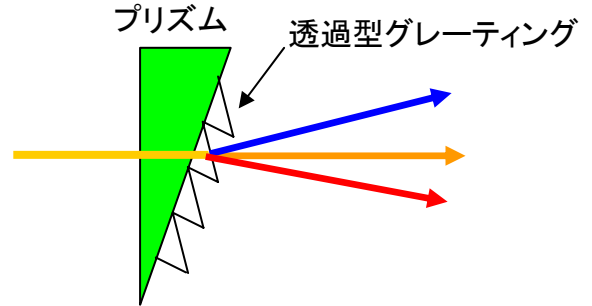
ここに、スリット、波長較正用ランプ・切り替えミラーが入る

4: 超低分散・分散素子の仕様について

a: プリズム2つの組み合わせ



b: 表面レリーフグリズム



利点: R~20-30を達成可能

可視全域でRの変化が小さい
スペクトルになる

欠点: 青側で分散が急激に大きくなる
(屈折率で分散を作る限り避けられないこと。3個の組み合わせでも同じ)

R~20-30の素子が作れない
(市販品のグレーティングを使うことになるが、溝本数の少ない(=分散の小さい)市販品がないため)

プリズムについて:

プリズム: Schott社の16種類のガラス素材を組み合わせ、分散の波長に対する変化が小さく、なおかつ現実的なプリズム頂角となるものを選別。

(16種類の素材の情報はこのまとめの最後に掲載)

◎ 両者を備えたベスト3+1の表(近似式を用いた計算結果、Rc=30)

	分散(dx/dλ)の比(@400nm/800nm)			プリズムの素材
	プリズム頂角 1個目	2個目		
1:	10.6	43.45	32.45	LITHOTEC-CAF2 + LF5
2:	11.2	35.92	25.16	LITHOTEC-CAF2 + F2
3:	11.5	43.68	37.37	N-PK52A + SF2
4:	15.5	44.17	36.84	BK7 + F2 (よく使われるガラスの組み合わせ)

素材の組み合わせとしては、上の2つを候補とする。

◎ 16種類のガラス素材

アッベ数の大きい順に並べてある。

名称	n_d	ν_d
1: LITHOTEC-CAF2	1.43385	95.23
2: N-PK52A	1.49700	81.61
3: BK10	1.49782	66.95
4: PK53	1.52690	66.22
5: BK7	1.51680	64.17
6: PSK53	1.62014	63.48
7: PSK3	1.55232	63.46
8: K7	1.51112	60.41
9: BaK1	1.57250	57.55
10: N-SSK2	1.62229	53.27
11: LF5	1.58144	40.85
12: F2	1.62004	36.37
13: SF2	1.64769	33.85
14: LaSF	1.85025	32.17
15: SF11	1.78472	25.68
16: N-SF66	1.92286	20.88

n_d : $\lambda = 587.6 \text{ nm}$ での屈折率

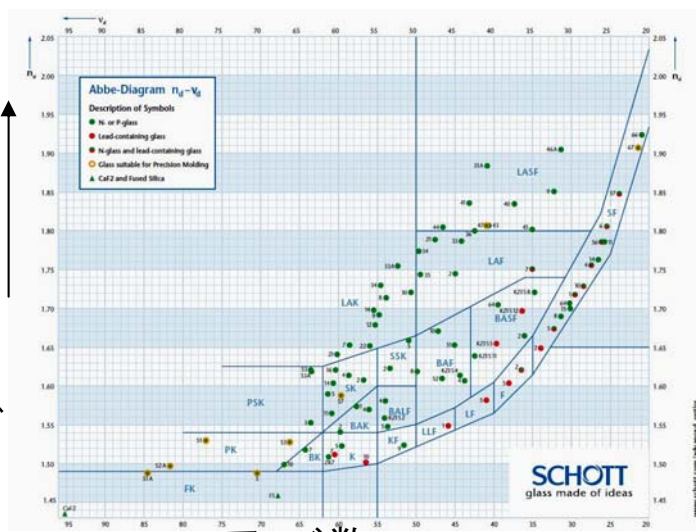
ν_d : アッベ数 $\nu_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C)$

n_F : $\lambda = 486.1 \text{ nm}$ での屈折率

n_C : $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ //

数字が小さいほど、分散が強いことを表す

↑
屈折率



← アッベ数

Schott 社のガラスカタログ
(アッベダイアグラム)

グリズムについて:

グリズム: Newport(旧Richardson Grating Laboratory = RGL)社の透過型グレーティングの中で最も溝本数の少ないグレーティング(N=35g/mm)を用いる。

使用グレーティング:

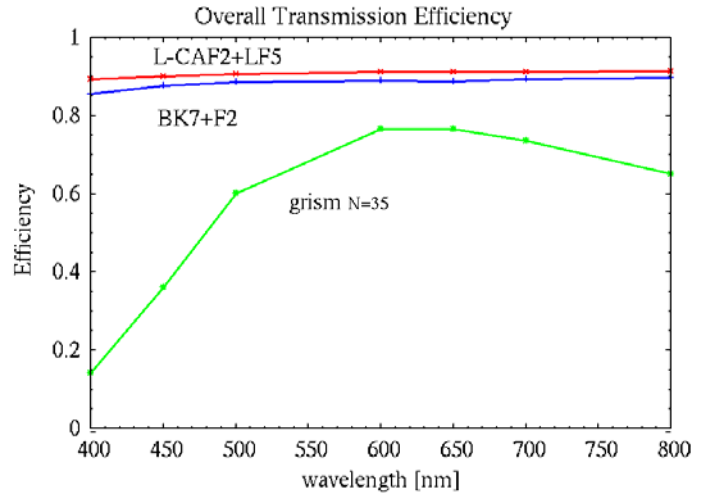
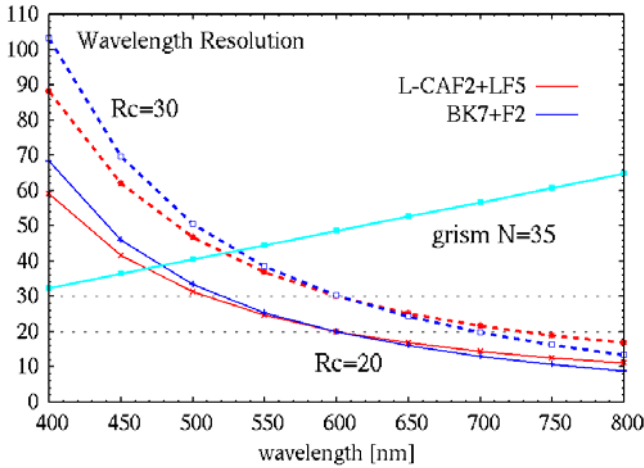
溝本数(N)=35g/mm 溝角度:2.2° 1次のブレイズ波長: 640nm

透過型グレーティングの場合、屈折光=1次の回折光となる波長のこと

プリズムとグリズムでの波長分解能R、透過率Tの違い

波長分解能R(≡ $\lambda / \Delta \lambda$)

素子全体の透過率T



※0 式を厳密に解いた結果

※1 波長分解能: 同じ素材の組み合わせでR=20と30の両方を計算

※2 透過率: 表面透過率+内部透過率(+回折効率)

反射防止膜なしのケース。R=20と30ではほとんど違いはない

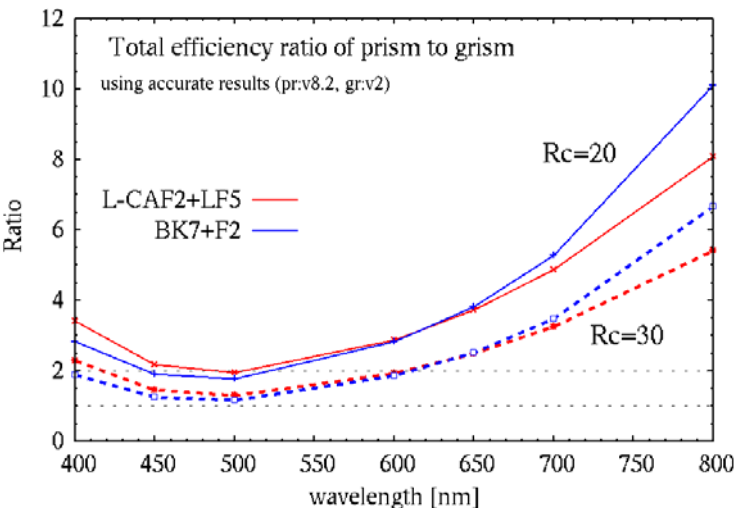


効率を計算してみる。

プリズムとグリズムでの効率(1ピクセルに届く光量)の違い

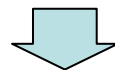
効率の比 (prism/grism)

(※比 = $\{T(p)/T(g)\} / \{R(p)/R(g)\}$)

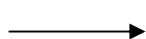


効率の比(1ピクセルに届く光子の比に相当)

R=20,30どちらのケースでも比は可視域全域で1以上(R=20では2以上)



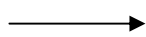
青色域ではプリズムの方が分散が大きいので光は薄められてしまうが、その分透過率の良さでカバーし、効率ではプリズムの方が良くなっている



プリズムの方が良い

(分散は抑えるということで、**R=20**を採用)

4種類の図面(素材の組み合わせ2種類、R=20と30)を作成し、3社(カドミ光学工業、日東光器、応用光研)に見積もりを依頼



2社から回答をもらう

・見積もり結果

OR=20	価格		納期	
	カドミ	日東光器	カドミ	日東光器
BK7 + F2:	436,000	800,000	2ヶ月	2カ月半
CaF2 + LF5:	933,000	1,100,000	3ヶ月	8ヶ月

日東光器に「BK7+F2」の再見積もりを依頼:

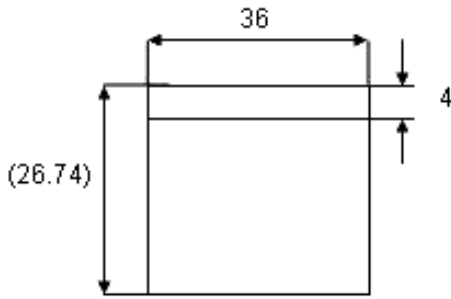
	カドミ	日東光器	カドミ	日東光器
BK7 + F2:	436,000	428,000	2ヶ月	2カ月半



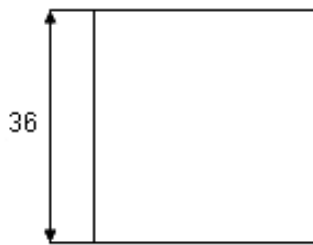
日東光器に発注(8/29)

○超低分散プリズム (R=20, Schott N-BK7 + OHARA S-TIM2) の図面
 $\lambda = 600\text{nm}$ で 直透過、波長分解能R=20を達成

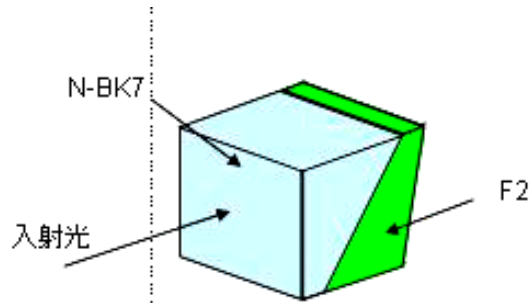
2素子プリズム (R=20)



上面図



入射面図



材料: N-BK7 (Schott社)

F2 (")

寸法公差: $\pm 0.1\text{mm}$

角度公差: $\pm 0.05^\circ$ (3分角)

透過波面精度: $\lambda/4$ (p-v値)以下

透過波長域: 400-800nm

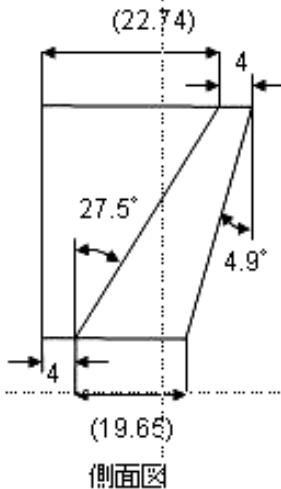
入射面および出射面は、光学研磨を施した後、600nm中心の広帯域単層ARコートを実施すること

側面はつや消し黒塗布などの内面反射防止策を講じること

各素子は接着面厚が一樣になるよう配慮して、接着すること

各素子の頂部には0.5c程度の保護面取りを施すこと

入射図面で見たとときの4つの角付近(36mmφの円よりも外側)は光路外となるため、光学的な不具合は許容できる



側面図

①内の数字の公差は、寸法公差ではなく、角度公差によって決められる。

・スペクトルの結像位置と波長分解能の計算結果

ZEMAX

自作コード

λ nm	SPOT [μ]	位置 [mm]	位置 [mm]	R	ピクセル
400	50.305	-1.032	-1.021	72.60	-64.5
450	23.014	-0.584	-0.578	47.28	-36.5
500	13.732	-0.312	-0.308	33.75	-19.5
550	11.458	-0.132	-0.129	25.50	-8.3
600	12.029	-0.005	-0.003	20.00	-0.3
650	13.715	0.088	0.089	16.09	5.5
700	15.753	0.157	0.158	13.19	9.8
750	17.802	0.211	0.212	10.96	13.2
800	19.711	0.253	0.253	9.18	15.8

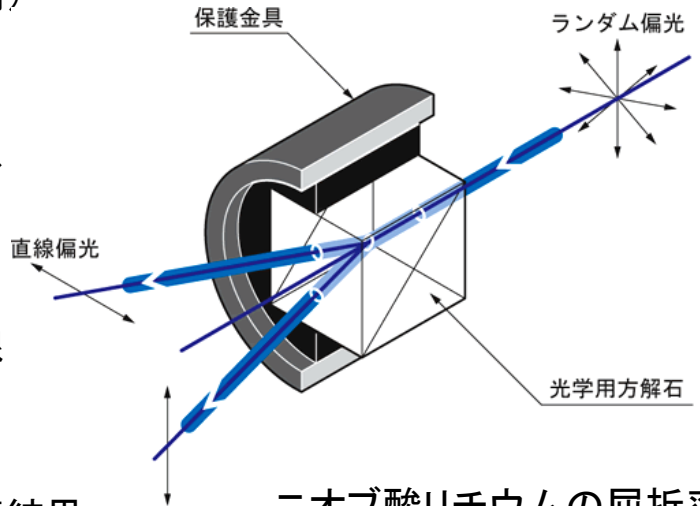
◎ おまけ ウォラストンプリズムの場合：

ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)のウォラストンプリズムで分散R~20のスペクトル (+偏光ビームスプリット) が実現できないか？
 (プリズムが持つ色分散効果を利用)

・ウォラストンプリズムとは？

複屈折性を持つ素材で作ったプリズムを、その光学軸が垂直になるよう配置したプリズム

入射光を2つの互いに直交する直線偏光に分離する効果を持つ。

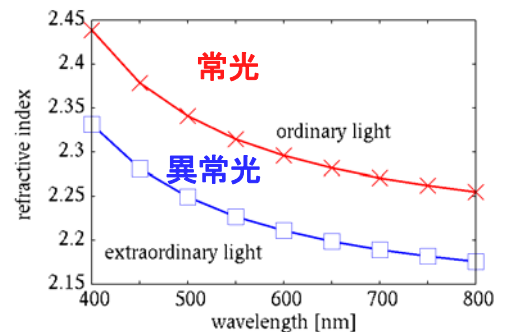


・ZEMAX & 自作コードによる計算結果

結論： 現在のカメラでは無理。

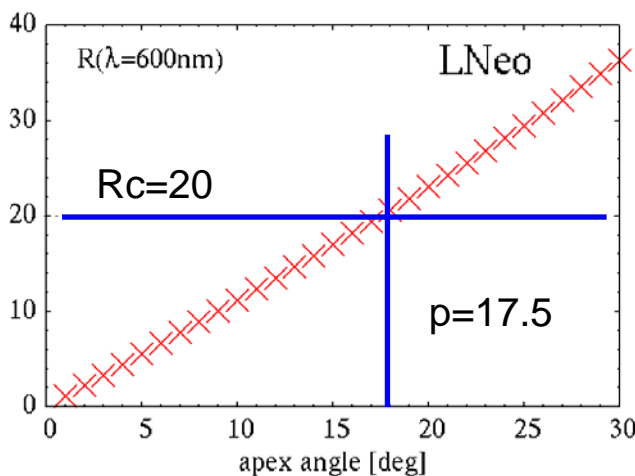
R=20の分散は可能だが 分離角がRに比例して大きくなるため、CCD面に両方のスペクトルが収まりきらなくなる。

ニオブ酸リチウムの屈折率



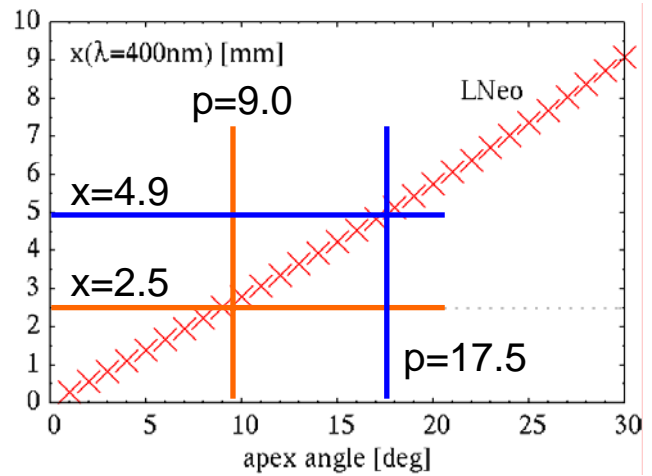
・自作コードの計算結果 (ZEMAXとほぼ一致)

λ = 600nmでの波長分解能R



プリズム頂角 p [°]

λ = 400nmの結像位置x



プリズム頂角 p [°]

5: 低分散用素子(グリズム)

2種類の透過型回折格子を候補とし、650nmでのRと波長カバー範囲を求めた(式を厳密に解いて)。

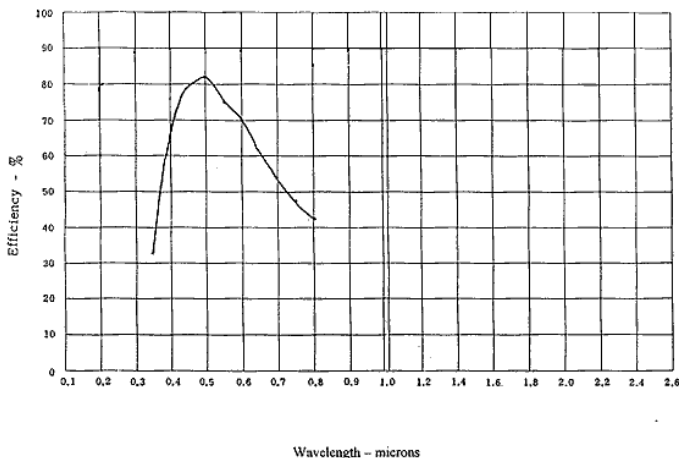
溝本数 本/nm	ブレイズ波長 nm	ブレイズ角 °	波長分解能R (@650nm)	波長カバー範囲 @500pix-CCD	λ /pix nm
200	505	10.0°	313	259nm	0.519
300	580	17.45°	492	165nm	0.331

→ 300本/mmの回折格子では、 $H\alpha$ と $H\beta$ を同時に取得できない。
200本/mmが良いか？

・それぞれの回折格子の効率曲線

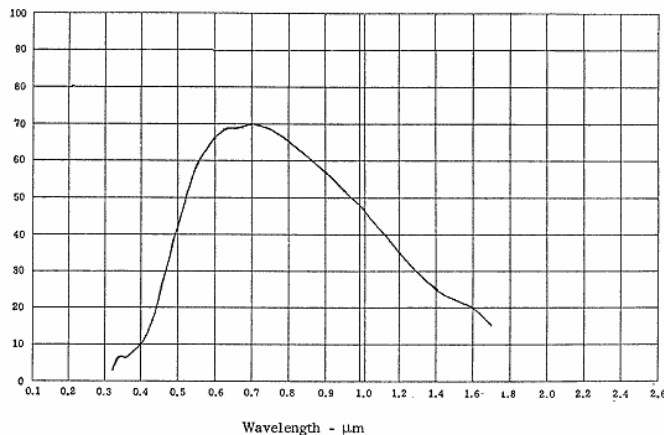
200本/mm

— 45°



300本/mm

Polarized at 45°



$H\alpha$ 付近では、300本/mmの方がわずかに効率が良い(69% vs 60%)が
 $H\beta$ 付近は200本/mmの方が圧倒的に良い(80% vs 35%)。

まとめ(2つの選択肢あり):

○ $H\alpha$ のみに注目し、少しでも分解能をあげる → 300本/mmまたはそれ以上(600本/mm)の溝本数

○ 分散を抑えて、 $H\alpha$ と $H\beta$ の同時取得を優先 → 200本/mmを採用。
(R~数百では輝線輪郭の議論は出来ないから?)

こちらを採用

透過型回折格子の見積もりを2つの代理店に依頼

Newport日本総代理店： 183,540円 納期：6-8週間

スペクトラフィジックス社： 171,948円 納期： "

————→ スペクトラフィジックス社に発注(8/10)

発注後の業者とのメールのやり取りで、グリズム製作も行っていることを知る。
その場合、プリズムに直接レプリカ(回折格子そのもの)を貼り付けるので、基板(10mm)貼り付けがない分薄く出来、しかも光学的により優れたものになる。



グリズムの図面を業者に渡し、見積もりを依頼(8/20)

業者の見積もり回答(9/3):

単層ARコート： 570,045円 納期：3ヶ月

多層ARコート： 上記価格+42,000円

※単層AR： 反射率～2%

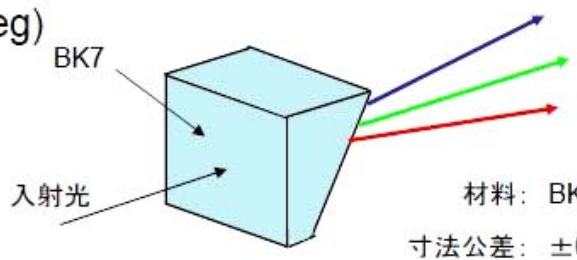
多層AR： 反射率～1%(400-700nm)

○ 低分散グリズム (R=300, Schott N-BK7 + N=200本/mm) の図面

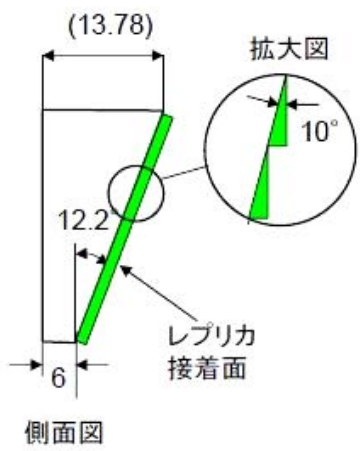
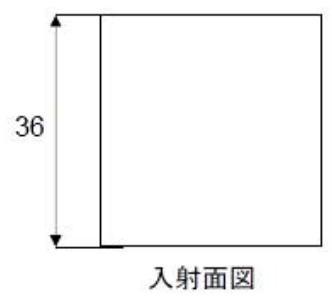
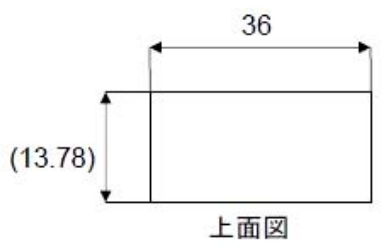
プリズム: 頂角=12.2°

回折格子: 溝本数=200本/mm 溝角度=10° ブレーズ波長=505nm
 $\lambda = 550\text{nm}$ で 直透過、H α での波長分解能R=313を達成

grism(N=200gr/mm, 10deg)



材料: BK7
 寸法公差: $\pm 0.1\text{mm}$
 角度公差: $\pm 0.1^\circ$ (6分角)



透過波面精度: $\lambda/4$ (p-v値)以下(目標値)
 直透過波長: 550nm
 透過波長域: 450-700nm
 グレーティング: 溝本数= 200gr/mm,
 溝角度 = 10°
 (型番: 54-*630R)

入射面は、光学研磨を施した後、550nm中心の広帯域単層ARコートを実施すること

側面はつや消し黒塗布などの内面反射防止策を講じること

頂部には0.5C程度の保護面取りを施すこと

()内の数字の公差は、寸法公差ではなく、角度公差によって決められる。

入射図面で見たときの4つの角付近(30mmφの円よりも外側)は光路外となるため、光学的な不具合は許容できる

・スペクトルの結像位置と波長分解能の計算結果

ZEMAX 自作コード

λ nm	SPOT [μ]	位置 [mm]	位置 [mm]	R	ピクセル	
468	18.801	-2.614	-2.592	222.3	-163.4	He II
486	16.421	-2.018	-2.001	230.7	-126.1	H β
656	21.542	3.419	3.401	309.0	213.7	H α
450	22.733	-3.217	-3.190	214.0	-201.1	
500	15.334	-1.558	-1.545	237.2	-97.4	
550	14.896	0.060	0.064	260.2	-3.8	
600	17.362	1.654	1.648	283.3	103.4	
650	21.057	3.230	3.214	306.2	201.9	
680	23.532	4.171	4.147	320.0	260.7	
700	25.230	4.796	4.767	329.1	299.8	

一度に
 CCDに
 収まる
 波長域

6: 今後の課題:

- ・フィルター類

- ・ロングパスフィルター

2種類購入予定

名前	λ_s	λ_c	λ_p	価格
L38	353	380	430	7,035
GG475	410	475	550	7,035

λ_s : 透過率=0.001%の波長

λ_c : 透過率=50% "

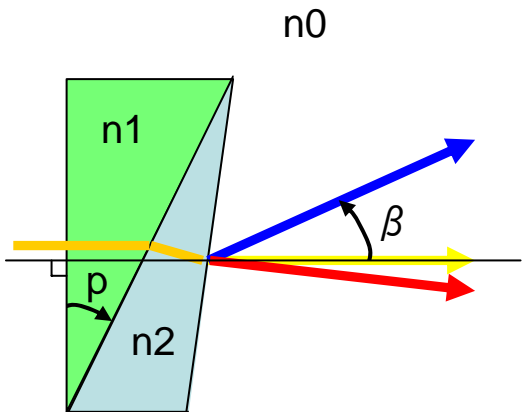
λ_p : 透過率~90%となる最初の波長

- ・広帯域フィルター(BVR) を購入予定

SBIG社製市販品、 1枚34,650(31.7mm) or 62,790(50mm ϕ)

納期: 1週間 or 1ヶ月

補足その1: プリズムの計算式



$$\gamma 1 = p$$

$$\gamma 2 = \arcsin(n1/n2 \times \sin \gamma 1)$$

$$\gamma 3 = \gamma 2 - q$$

$$\gamma 4 = \arcsin(n2/n0 \times \sin \gamma 3)$$

$$\beta = \gamma 4 - (p - q)$$

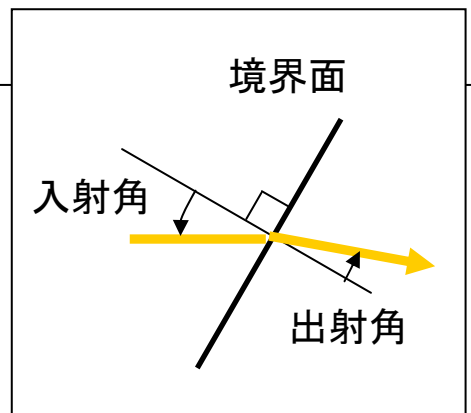
$$\varepsilon(\lambda) \equiv \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\cos \gamma 3}{n0 \cos \gamma 4} \left\{ \frac{\sin p}{\cos \gamma 2} \frac{dn1}{d\lambda} + (\tan \gamma 3 - \tan \gamma 2) \frac{dn2}{d\lambda} \right\}$$

・波長分解能

$$R(\lambda) \equiv \frac{\lambda}{d\lambda} = \lambda \frac{\varepsilon}{d\beta} \stackrel{\text{---}}{=} \frac{\lambda f \varepsilon}{dx} \stackrel{\text{---}}{=} \frac{\lambda f \varepsilon}{M l}$$

$$dx = f d\beta$$

$$dx = M l$$



$\gamma 1, \gamma 2$: プリズム境界面での入射角、出射角

$\gamma 3, \gamma 4$: 出射面での入射角、出射角

p, q : プリズム1, 2 の頂角

β : 入射光に対する出射光の角度

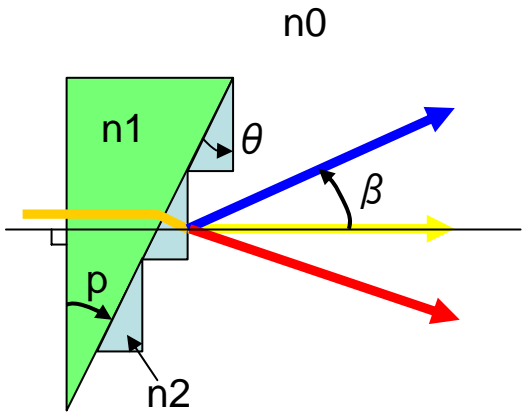
$\varepsilon(\lambda)$: 出射角の波長分散

$n1, n2, n0$: プリズム1, プリズム2, および空気の屈折率(1)

$R(\lambda)$: 波長分解能

f, M, l : 焦点距離(148mm)、 $d\lambda$ のピクセル数(4)、ピクセルサイズ(16 μm)

補足その2: グリズムの計算式



グレーティング方程式:

$$n_1 \sin p - n_0 \sin(\beta + p) = Nm \lambda$$

式変形

$$\beta = \arcsin \left(\frac{n_1 \sin p - Nm \lambda}{n_0} \right) - p$$

微分

$$\varepsilon(\lambda) \equiv \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{-Nm + \frac{dn_1}{d\lambda} \sin p}{n_0 \cos(\beta + p)}$$

・波長分解能

$$R(\lambda) \equiv \frac{\lambda}{d\lambda} = \lambda \frac{\varepsilon}{d\beta} \stackrel{dx = f d\beta}{=} \frac{\lambda f \varepsilon}{dx} \stackrel{dx = M l}{=} \frac{\lambda f \varepsilon}{M l}$$

$$dx = f d\beta$$

$$dx = M l$$

p : プリズム頂角

β : 入射光に対する出射光の角度

$\varepsilon(\lambda)$: 出射角の波長分散

N : 溝本数 (gr/mm)

m : 回折次数

n_1, n_2, n_0 : プリズム, 回折格子, および空気の屈折率(1)

$R(\lambda)$: 波長分解能

f, M, l : 焦点距離(148mm)、 $d\lambda$ のピクセル数(4)、ピクセルサイズ(16 μm)