

Astrofizyka II

Spektroskopia

Ogólna budowa spektrografu

Budowa spektrografu

Podstawowe składniki spektrografu:

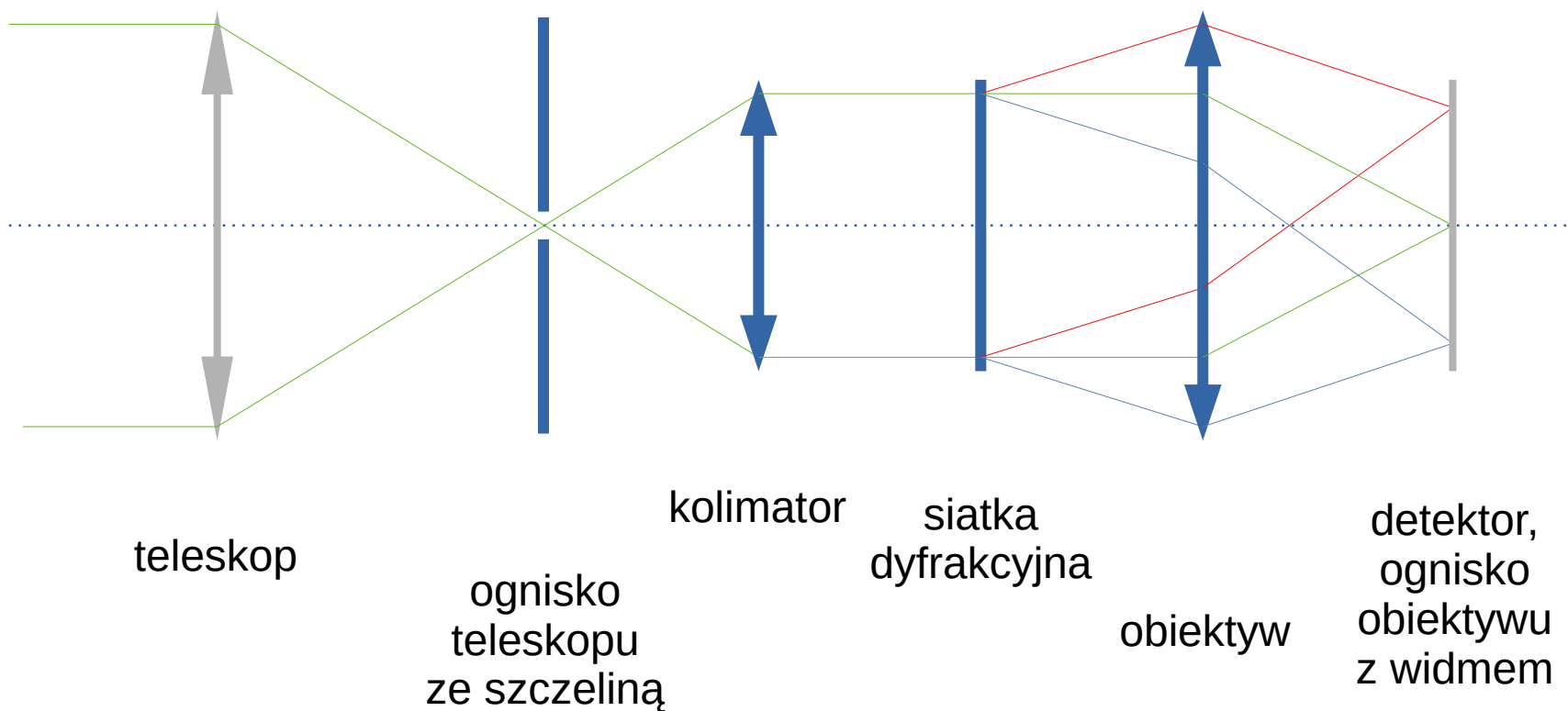
- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. teleskop | zbiera i skupia światło na szczelinie |
| 2. szczelina | wycina fragment obrazu w teleskopie |
| 3. kolimator | formuje wiązkę równoległą |
| 4. element dyspersyjny | rozszczenia światło |
| 5. obiektyw | skupia wiązki równoległe w obrazu szczeliny |
| 6. kamera | rejestruje widma |

Najważniejsze dodatkowe elementy wspomagające spektrograf:

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. guider („śledzik”) | utrzymuje wybrany obiekt na szczelinie |
| 2. lampy kalibracyjne | pozwalają określić długości fali światła |
| 3. stabilizacja | zmniejsza błędy pomiarów długości fali światła |

Budowa spektrografu

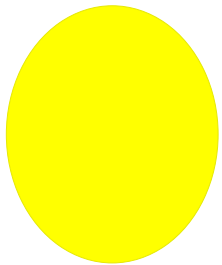
Schemat ogólny wraz z przebiegiem promieni światła



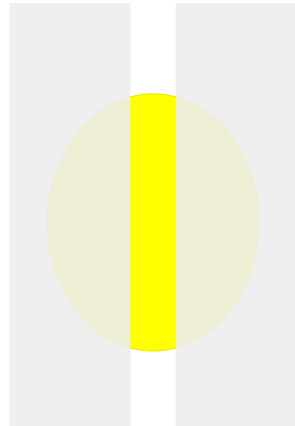
Budowa spektrografu

Obraz widma na kamerze spektrografu

Obraz obiektu
w teleskopie:



Obraz obiektu
przez szczelinę:



Widmo
monochromatyczne
w spektrografie,
który ma powiększenie
x1:



Widmo
polichromatyczne
w spektrografie,
który ma powiększenie
x1:



Spektrograf to urządzenie, które rejestruje **obraz szczeliny** oświetlonej od spodu przez obraz obserwowanego obiektu.

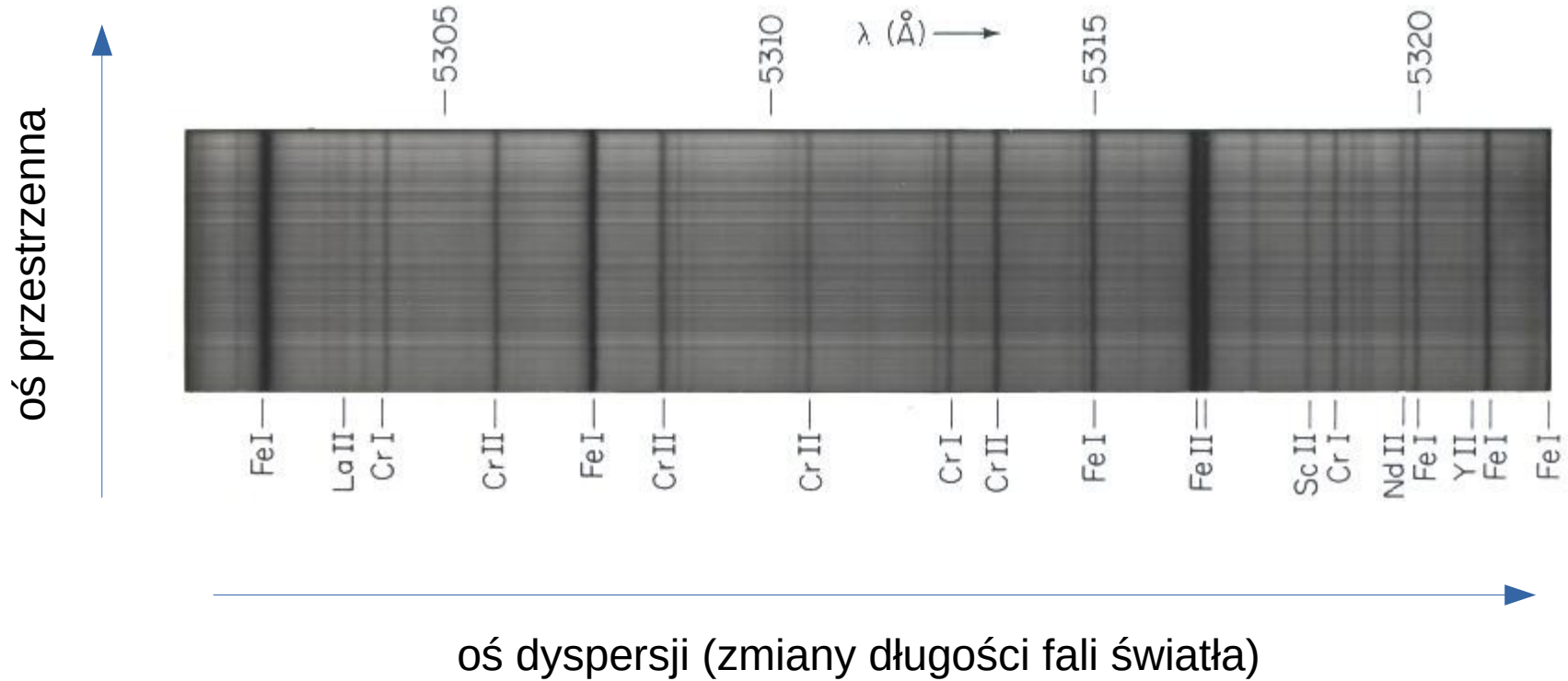
W każdej długości fali obraz ten jest przesunięty względem pozostałych.

W efekcie dostajemy złożenie nieskończonej liczby obrazów szczeliny, które tworzą widmo obiektu.

Obraz obiektu spleciony jest z funkcją PSF teleskopu (seeing, dyfrakcja, wady optyczne itp.) a obraz szczeliny z funkcją PSF spektrografu (dyfrakcja, wady optyczne).

Budowa spektrografu

Obraz widma - przykłady



Fragment widma Słońca, Mt. Wilson Observatory (<http://stars.astro.illinois.edu>)

Budowa spektrografu

Obraz widma - przykłady

Pliki FITS w folderze z prezentacją.

Budowa spektrografu

Dispersja

Budowa spektrografu

Pojęcie dyspersji

Dyspersja (łac. dispersio – rozproszenie, rozsypka, zamieszanie):

(1) zależność prędkości fazowej światła (czyli wsp. załamania światła) od długości fali światła w danym ośrodku

$$\frac{dn}{d\lambda}$$

(2) zdolność rozszczepiająca danego przyrządu optycznego

$$\frac{d\theta}{d\lambda}$$

Obydwie definicje są ze sobą powiązane:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{dn} \frac{dn}{d\lambda}$$

Budowa spektrografu

Dyspersja kątowa i liniowa

Dyspersja kątowa (ang. angular dispersion) – zmiana długości fali światła w stosunku do zmiany kąta światła wychodzącego z elementu dyspersyjnego.

$$\frac{d\theta}{d\lambda} \quad [rad/A]$$

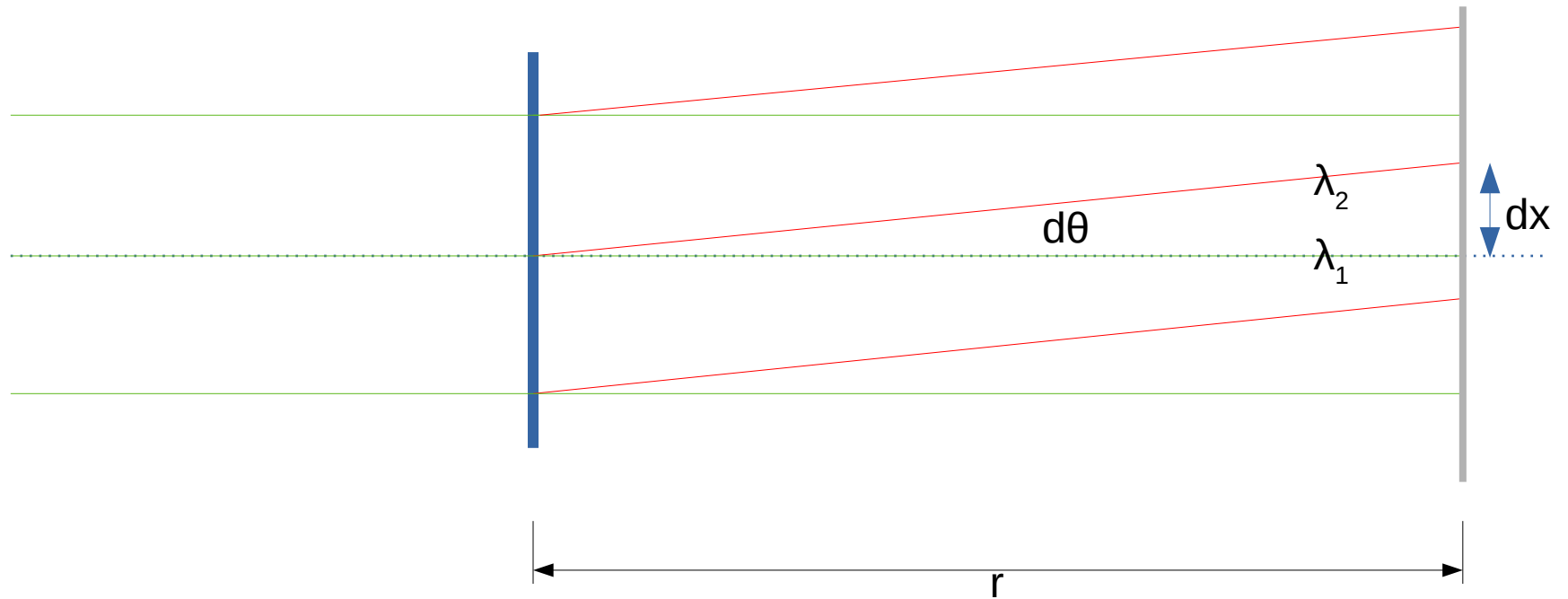
Dyspersja liniowa (ang. linear dispersion) – zmiana długości fali światła w stosunku do zmiany pozycji promienia światła wychodzącego z elementu dyspersyjnego na ekranie (detektorze) umieszczonym w odległości r .

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} r \quad [mm/A]$$

Odwrotność dyspersji liniowej [A/mm] nazywa się skalą widma P albo skalą płyty (ang. spectrum scale, plate factor).

Budowa spektrografu

Dyspersja kątowa i liniowa



$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} r$$

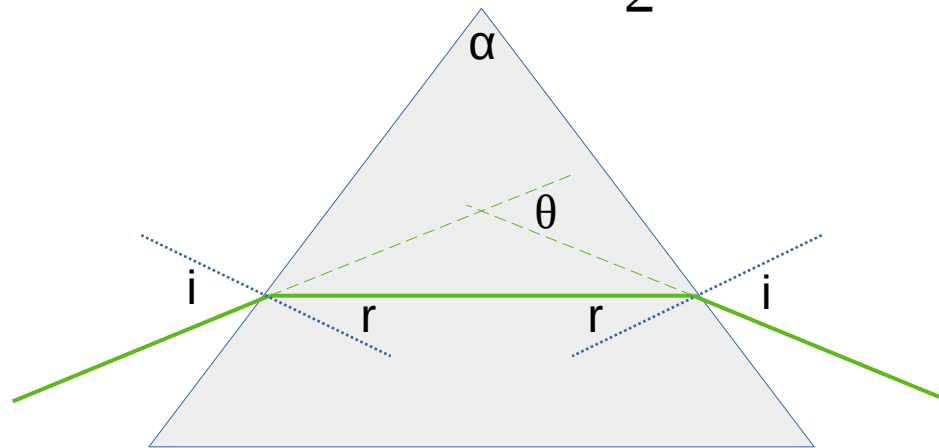
Budowa spektrografu

Dyspersja pryzmatu

Dyspersja (zdolność rozszczepiania) pryzmatu zależy od:

- kąta łamiącego pryzmatu (rośnie wraz ze wzrostem kąta),
- względnego współczynnika załamania światła szkła z którego jest zbudowany pryzmat (rośnie wraz ze wzrostem współczynnika).

$$n = \frac{n_{prism}}{n_0} = \frac{\sin \frac{1}{2} (\alpha + \theta)}{\sin \frac{1}{2} \alpha}$$



$$\frac{d\theta}{d\lambda} = 2 \operatorname{tg} \left(\frac{1}{2} \frac{\alpha}{\alpha + \theta} \right) \frac{dn}{d\lambda}$$

Rozdzielczość spektrografu

Liczba Abbego

Liczba Abbego jest przybliżoną miarą dyspersji (zależności n od λ) zdefiniowaną trzech długości fali światła odpowiadających liniom Fraunhofera:

C – 656.3 nm (linia H)

D – 589.3 nm (linia Na)

F – 486.1 nm (linia H)

$$V_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Im mniejsza liczba Abbego V tym wyższa dyspersja (zdolność rozszczepiająca).

Na podstawie liczby Abbego klasyfikuje się szkła optyczne.

Rozdzielczość spektrografu

Diagram Abbego

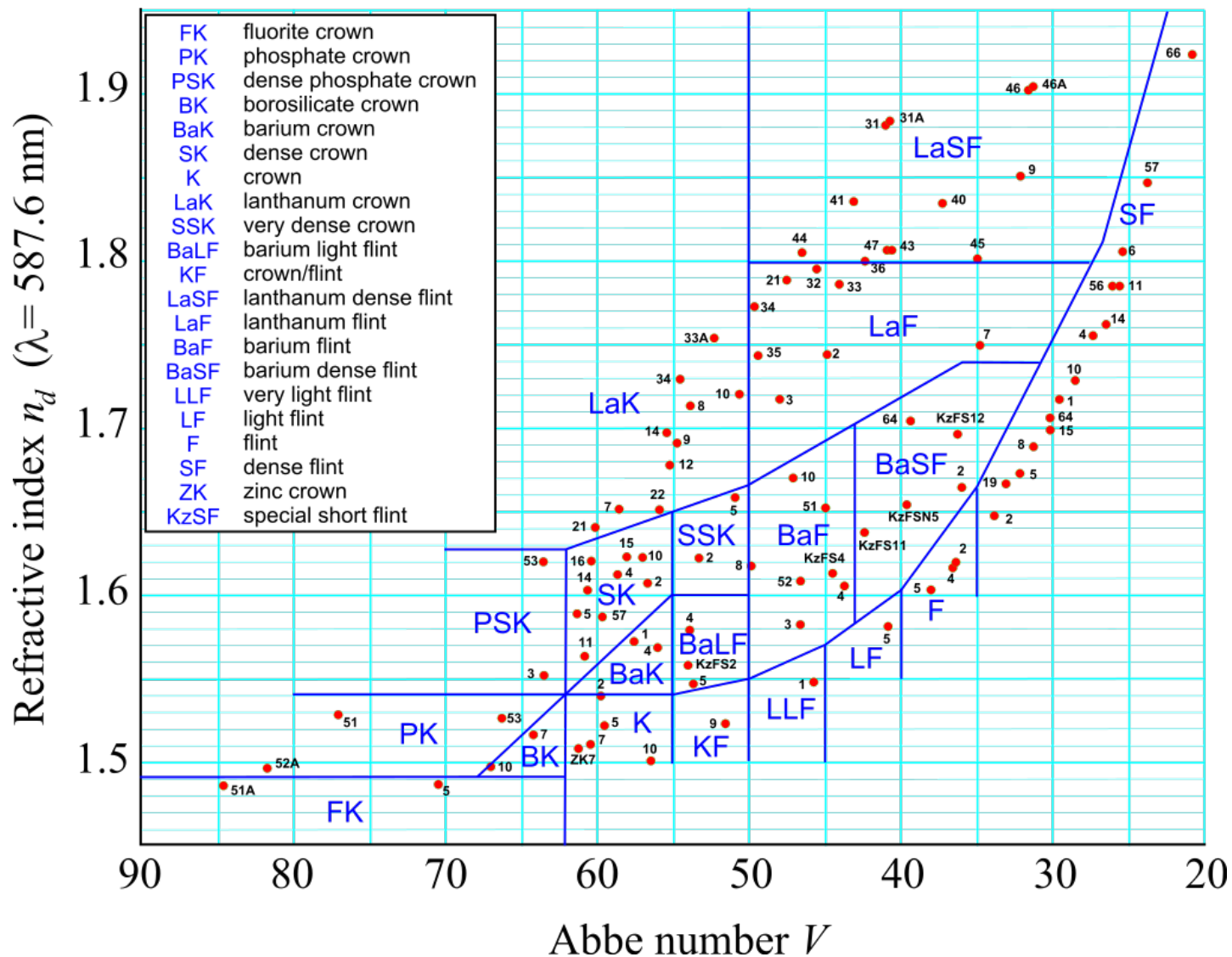


Diagram Abbego dla różnych gatunków szkła. Ang. crown = kron – duża zawartość tlenku potasu, ang. flint = flint – szkło z dużą zawartością tlenków ołowiu (en.wikipedia.org).

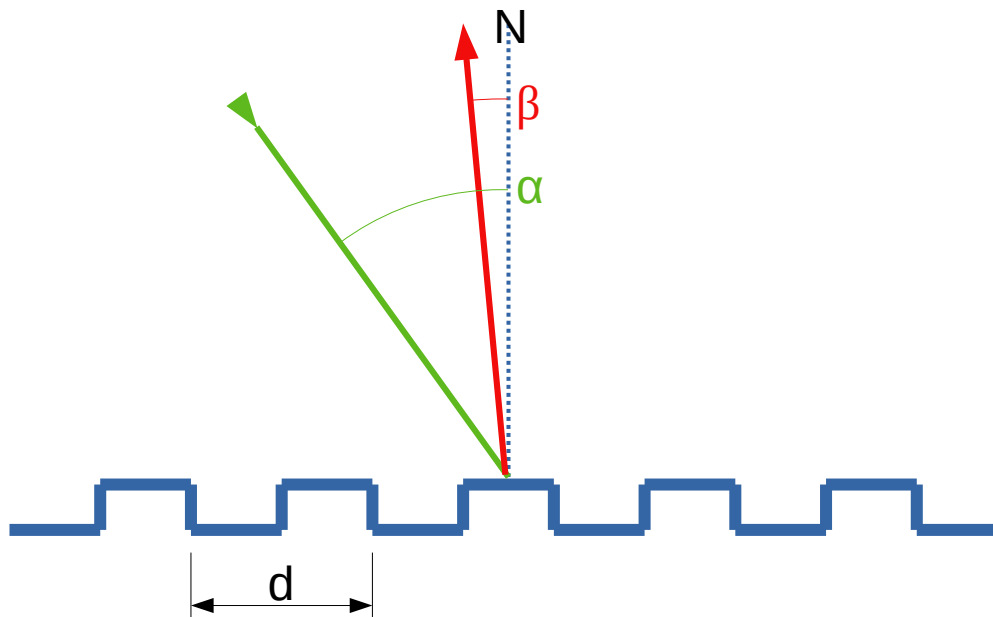
Budowa spektrografu

Dyspersja siatki dyfrakcyjnej

Dyspersja (zdolność rozszczepiania) siatki zależy od:

- rzędu widma (rośnie wraz ze wzrostem numeru rzędu),
- stałej siatki (rośnie wraz ze spadkiem stałej siatki),
- kąta odbicia (rośnie wraz ze wzrostem kąta odbicia światła od siatki).

$$n\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$$



$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{n}{d \cos\beta}$$

Budowa spektrografu

Dyspersja a rozdzielczość

Maksymalna rozdzielczość widma w spektrografie jest bezpośrednio zależna od wypadkowej dyspersji wszystkich elementów dyspersyjnych.

W praktyce może być ona jednak ograniczona innymi elementami optycznymi lub mechanicznymi spektrografu, a nawet wadami optycznymi (chromatic coma) samej siatki/pryzmatu.

Budowa spektrografu

Rozdzielczość spektrografu

Budowa spektrografu

Rozdzielczość spektrografu

Spektroskopowa zdolność rozdzielczą określa najmniejszą różnicę w długości fali światła $\Delta\lambda$ przy której dwie monochromatyczne linie widmowe o tym samym natężeniu są rejestrowane jako osobne.

Zwykle podawana jako tzw. moc rozdzielcza (ang. resolving power) R :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

Jeśli dysponujemy elementem dyspersyjnym o aperturze A w którym kąt odchylenia światła zależy od długości fali jak $d\theta/d\lambda$ (dyspersja kątowna) to maksymalna dyfrakcyjna rozdzielczość spektrografu jaką można uzyskać w oparciu o ten element wynosi:

$$R_{diff} = A \frac{d\theta}{d\lambda}$$

Wynika to z kryterium Rayleigha (dyfrakcyjny limit rozdzielczości kątownej):

$$\Delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{A} \quad \rightarrow \quad d\theta \simeq \frac{\lambda}{A} \quad \rightarrow \quad A \frac{d\theta}{d\lambda} \simeq \frac{\lambda}{d\lambda}$$

Budowa spektrografu

Rozdzielczość spektrografu

$$R_{diff} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = A \frac{d\theta}{d\lambda}$$

Maksymalna (dyfrakcyjna) zdolność rozdzielcza spektrografu zależy od:

- apertury elementów optycznych w spektrografie
- stopnia rozszczepienia światła przez element dyspersyjny (dyspersji)

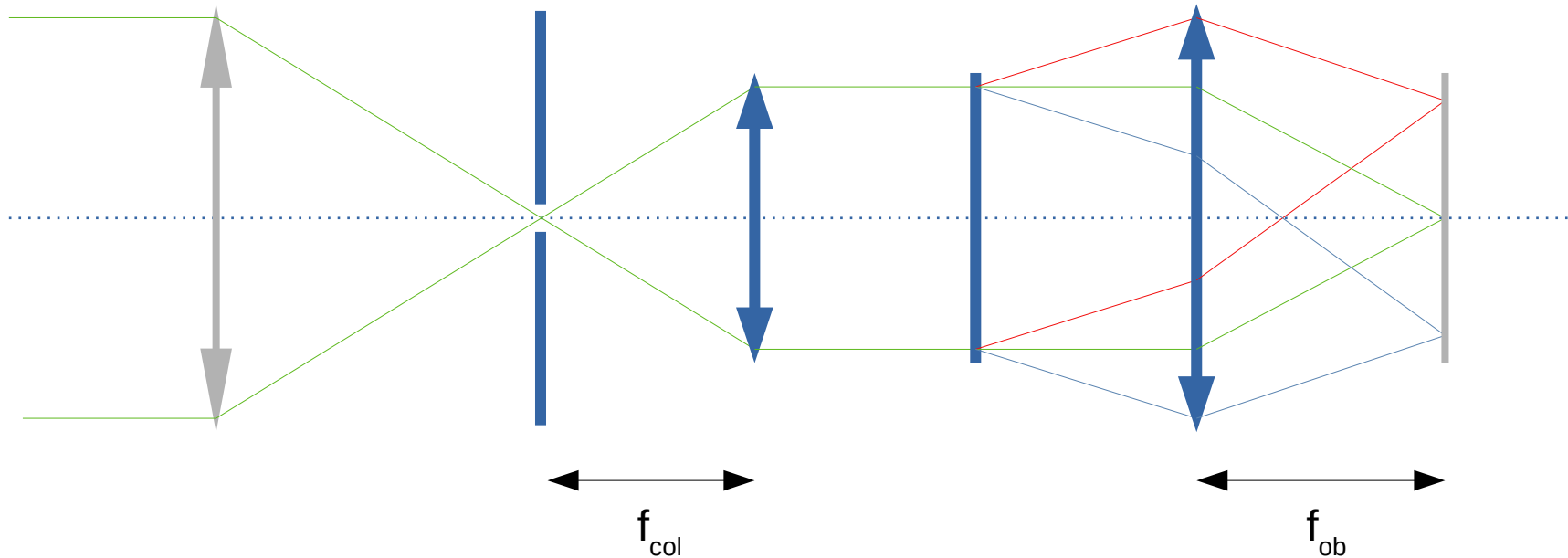
Ta zależność jest uniwersalna, nie zależy od tego czy spektrograf jest pryzmatyczny czy z siatką dyfrakcyjną.

W astronomii zwykle spektrografy nie zbliżają się do teoretycznej zdolności rozdzielczej i są ograniczone przez:

- **szerokość szczeliny**
- parametry kolimatora, teleskopu, obiektywu
- błędy śledzenia
- wady optyczne
- gięcia, zmiany temperatury, ciśnienia
- źle dobrany rozmiar piksela kamery

Rozdzielczość spektrografu

Rozmiar szczeliny



Rozmiar szczeliny d_s przekłada się na rozmiar obrazu szczeliny d_o tak:

$$\frac{d_o}{d_s} = \frac{f_{ob}}{f_{col}}$$

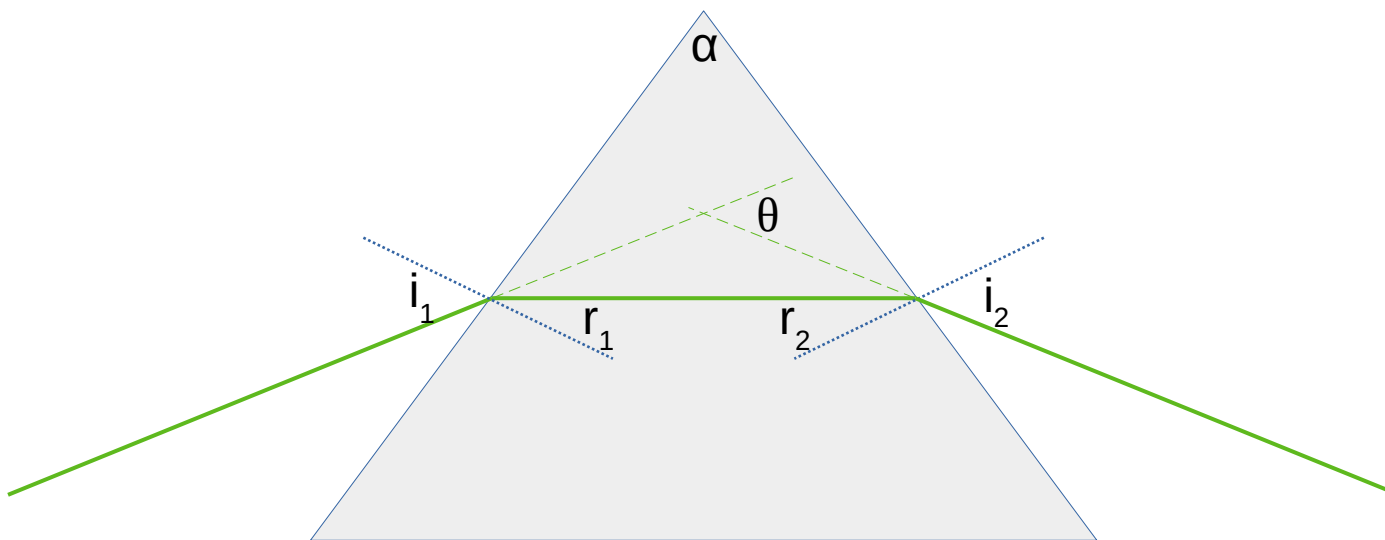
Gdy zmniejszymy d_o wówczas zobaczymy drobniejsze detale w widmie.

Jakie są pozytywne i negatywne konsekwencje zmniejszania d_o ?

Jaki jest limit zmniejszania d_o ?

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu



Kąt odchylenia θ wyraża się wzorem:

$$\theta = (i_1 - r_1) + (i_2 - r_2)$$

Ponieważ α wynosi $r_1 + r_2$, więc:

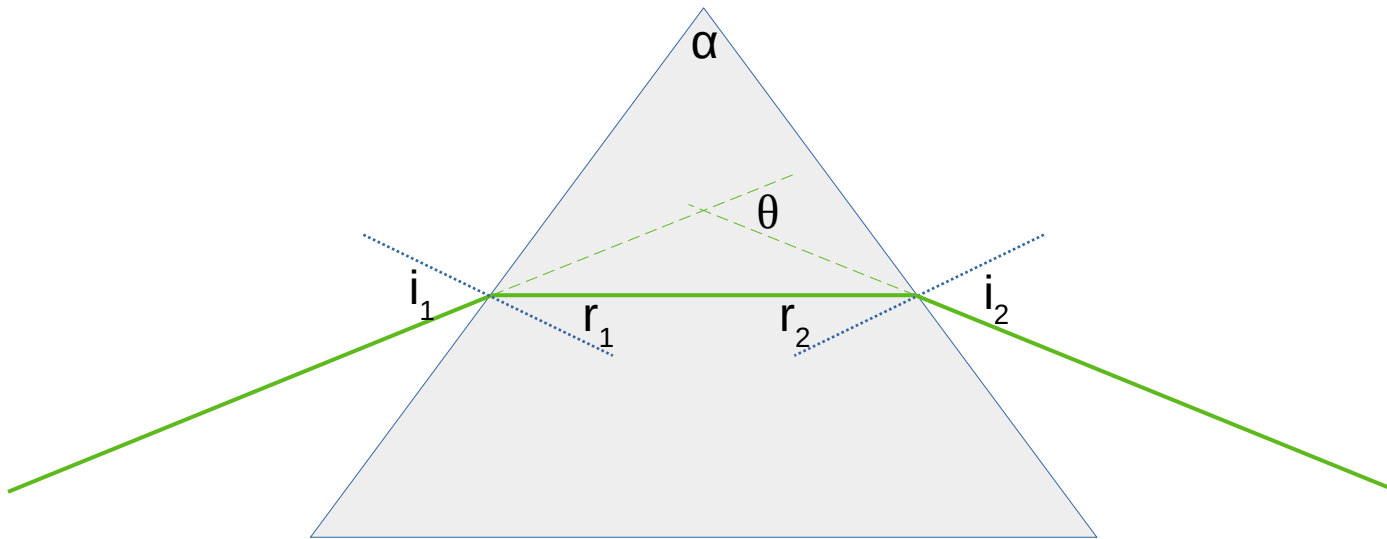
$$\theta = i_1 + i_2 - \alpha$$

Minimalne odchylenie światła uzyskiwane jest gdy $i_1 = i_2$ oraz $r_1 = r_2$ więc:

$$\theta = 2i - \alpha \quad \alpha = 2r$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu



Z prawa Snelliusa mamy $\sin(i) = n \sin(r)$ więc:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

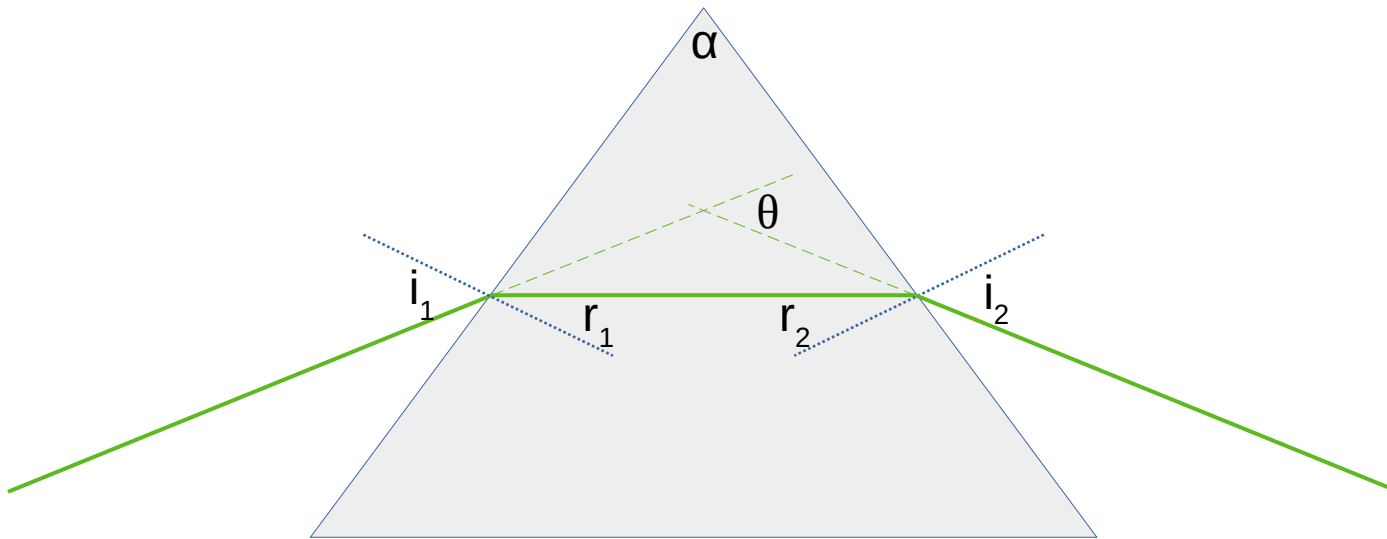
Dyspersja kątowna pryzmatu może być rozpisana jako:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{dn} \frac{dn}{d\lambda}$$

Więc musimy teraz wziąć pochodną z pierwszego równania po $d\theta$.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu



$$\frac{dn}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \sin i \sin^{-1} r = \cos i \frac{di}{d\theta} \sin^{-1} r - \sin^{-2} r \frac{dr}{d\theta} \sin i$$

Ponieważ dla minimalnego odchylenia światła mamy: $\theta = 2i - \alpha$ $\alpha = 2r$

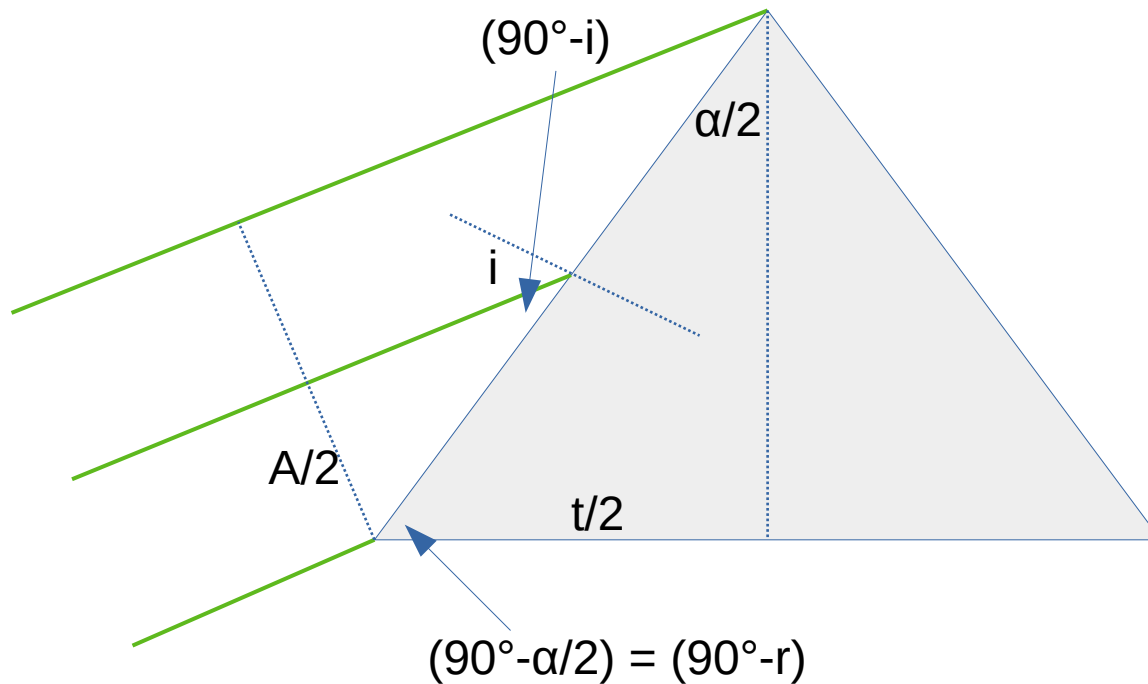
$$\frac{di}{d\theta} = \frac{1}{2} \qquad \frac{dr}{d\theta} = 0$$

Co daje:

$$\frac{dn}{d\theta} = \frac{\cos i}{2 \sin r} \qquad \frac{d\theta}{dn} = \frac{2 \sin r}{\cos i}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu



Teraz wprowadzamy wiązkę światła o średnicy A oświetlającą całą ścianę pryzmatu i rozmiar podstawy pryzmatu t .

Z prostej trygonometrii dostajemy: $\frac{t}{A} = \frac{2 \sin r}{\cos i}$ $\frac{t}{A} = \frac{2 \sin r}{\cos i} = \frac{2 \sin i}{n \cos i} = \frac{2 \operatorname{tgi}}{n} \approx 2$

Co w połączeniu z wyprowadzonym poprzednio daje:

$$\frac{d\theta}{dn} = \frac{2 \sin r}{\cos i} = \frac{t}{A} \qquad \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{t}{A} \frac{dn}{d\lambda} \qquad R_{\text{diff}} = A \frac{d\theta}{d\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda}$$

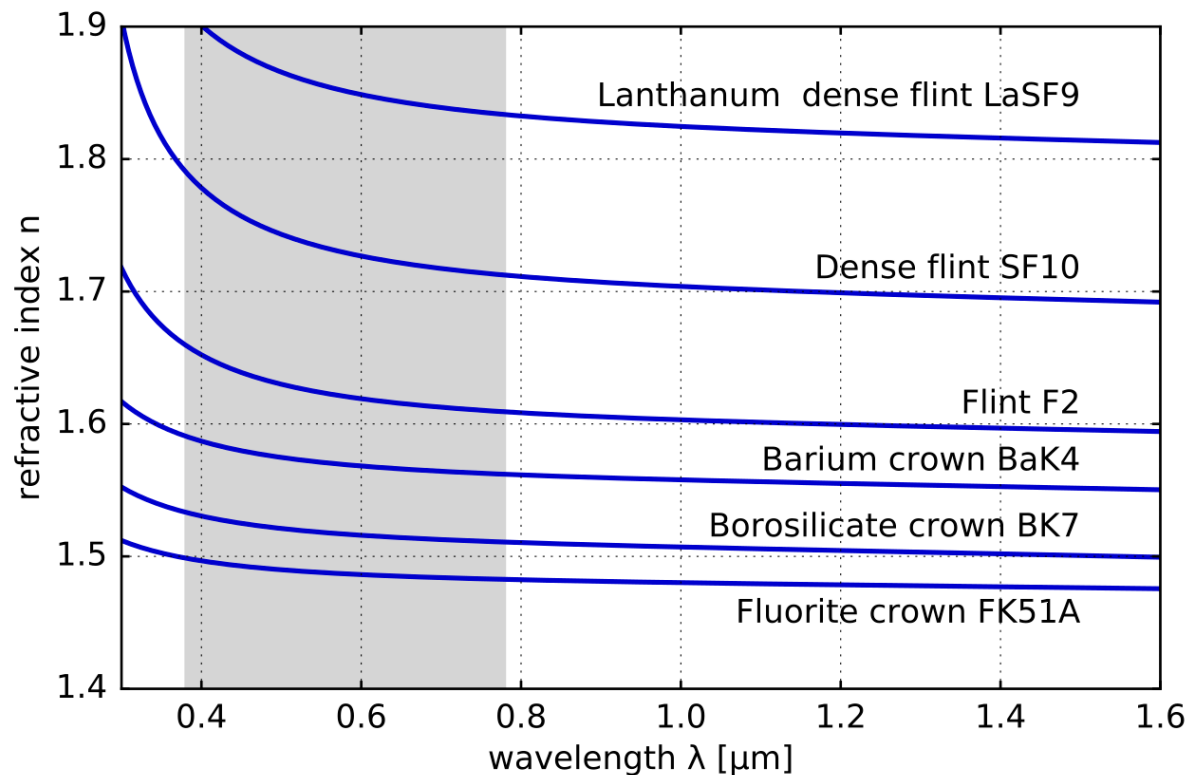
Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu

$$R_{diff} = t \frac{dn}{d\lambda}$$

Rozdzielczość spektrografu pryzmatycznego zależy od dwóch czynników:

1. Rozmiaru podstawy pryzmatu t .
2. Przebiegu zależności współczynnika załamania światła od długości fali.



Przebieg współczynnika załamania światła dla różnych gatunków szkła (en.wikipedia.org)
Generalnie współczynnik załamania rośnie wraz z gęstością szkła.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu

$$R_{diff} = t \frac{dn}{d\lambda}$$

Typowa wartość $dn/d\lambda$ to ok. 10^3 cm^{-1} co daje $R \sim 10^4$ dla pryzmatu o rozmiarze podstawy $t = 10 \text{ cm}$.

Z tego względu dla osiągnięcia znacznie większych rozdzielczości typu $R \sim 10^6$ stosuje się siatki dyfrakcyjne.

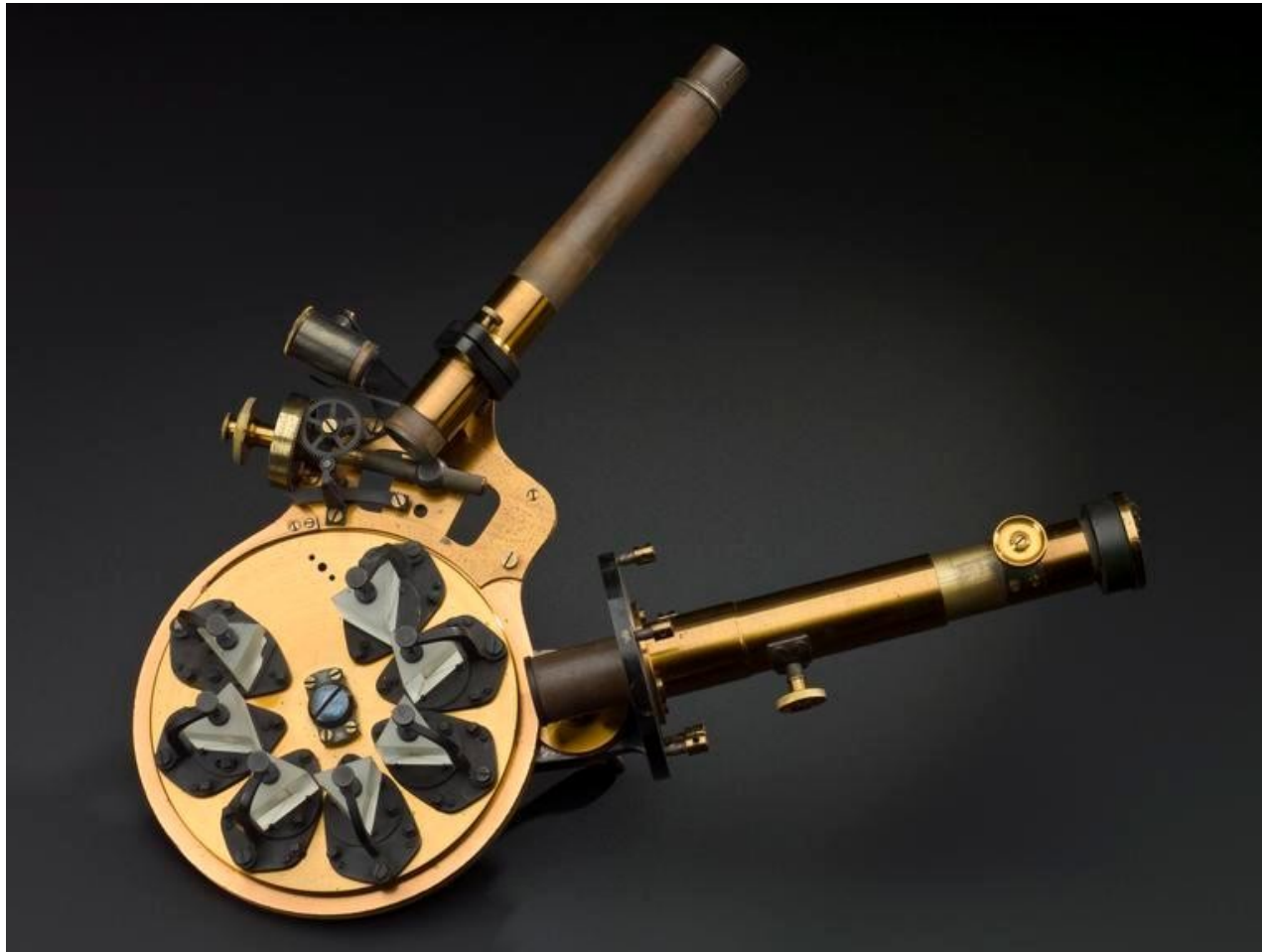
Można też łączyć pryzmaty ze sobą, wówczas rozdzielczość spektroskopowa jest sumą rozdzielczości poszczególnych pryzmatów.
W przypadku gdy pryzmaty są z tego samego szkła mamy:

$$R_{diff} = \left(\sum_i t_i \right) \frac{dn}{d\lambda}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu

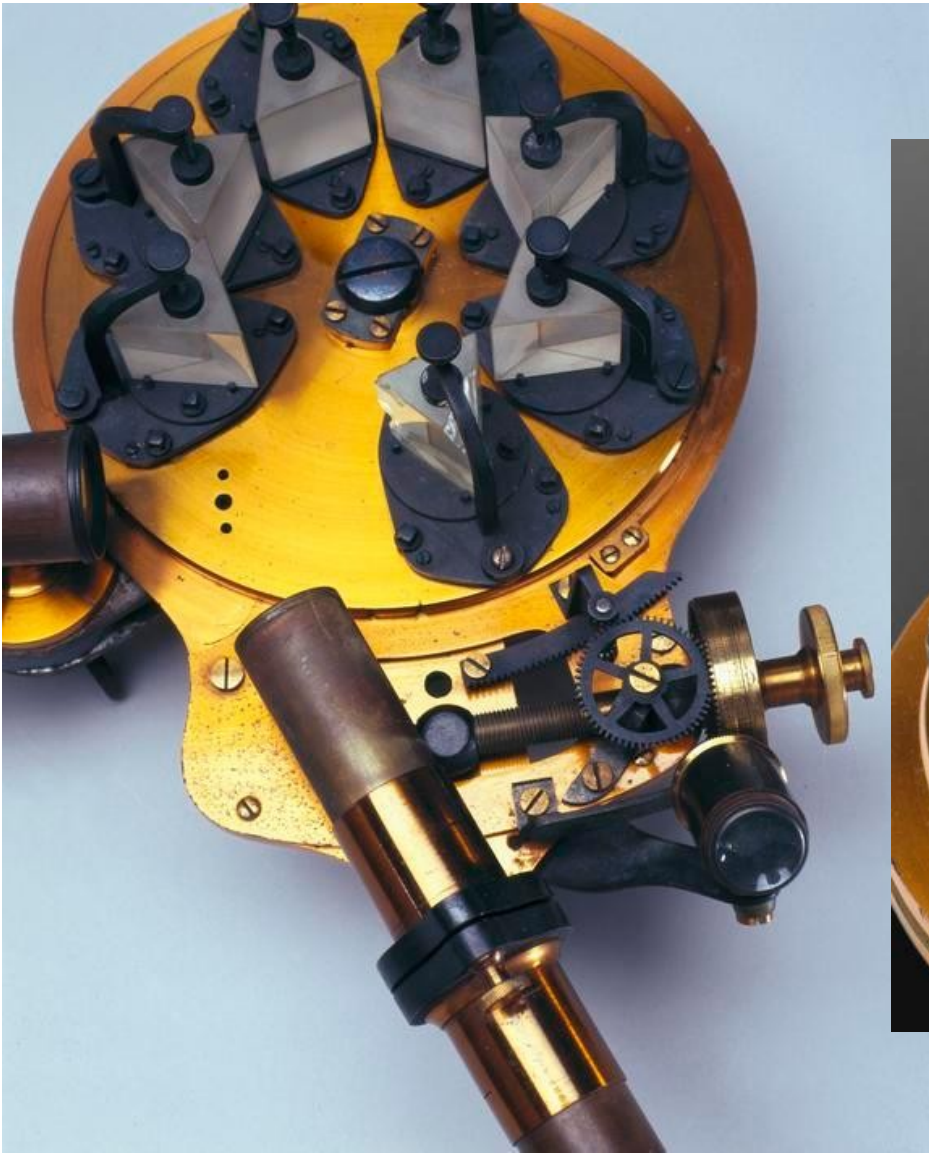
$$R_{diff} = \left(\sum_i t_i \right) \frac{dn}{d\lambda}$$



Spektroskop wykonany przez Johna Browninga dla Sir Normana Lockyera w 1868r
(collection.sciencemuseumgroup.org.uk).

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość pryzmatu



Spektroskop wykonany przez Johna Browninga dla Sir Normana Lockyera w 1868r.

Rozdzielczość spektrografu

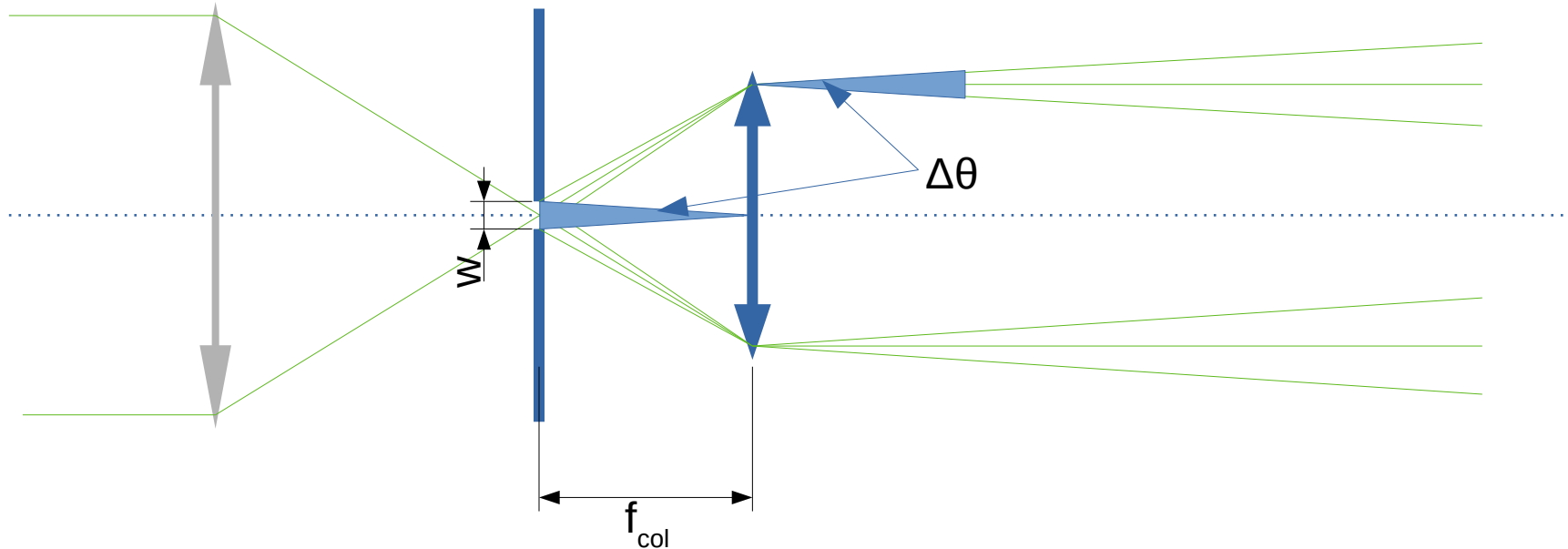
Rozdzielczość pryzmatu



Spektroskop wykonany przez Johna Browninga dla Sir Normana Lockyera w 1868r.

Rozdzielczość spektrografu

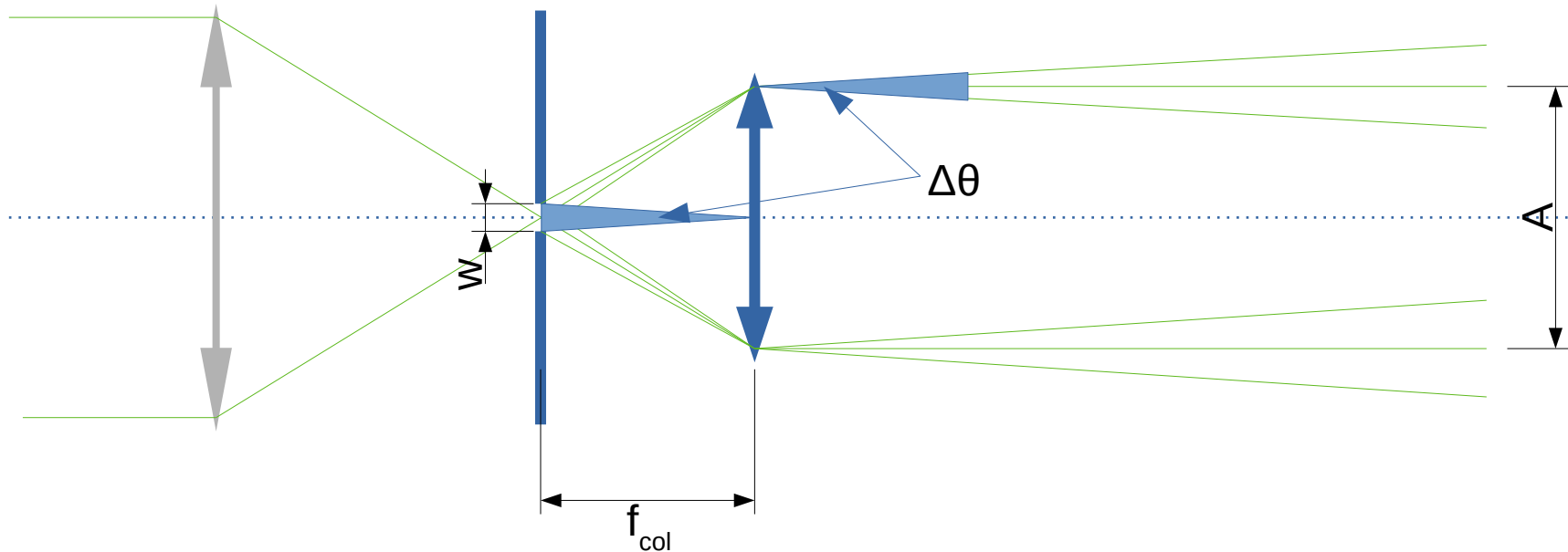
Rozdzielczość ze względu na szczelinę



Szerokość szczeliny w sprawia, że szczelina nie jest punktowym źródłem światła, a to oznacza, że wiązka za kolimatorem nie jest idealnie równoległa. To oczywiście rozciąga obraz dodatkowo i sprawia, że rozdzielczość spektrografu jest zawsze gorsza od limitu dyfrakcyjnego.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę



Kąt o jaki rozwarta jest wiązka równoległa jest identyczny jak kąt pod jakim widać szczelinę z kolimatora:

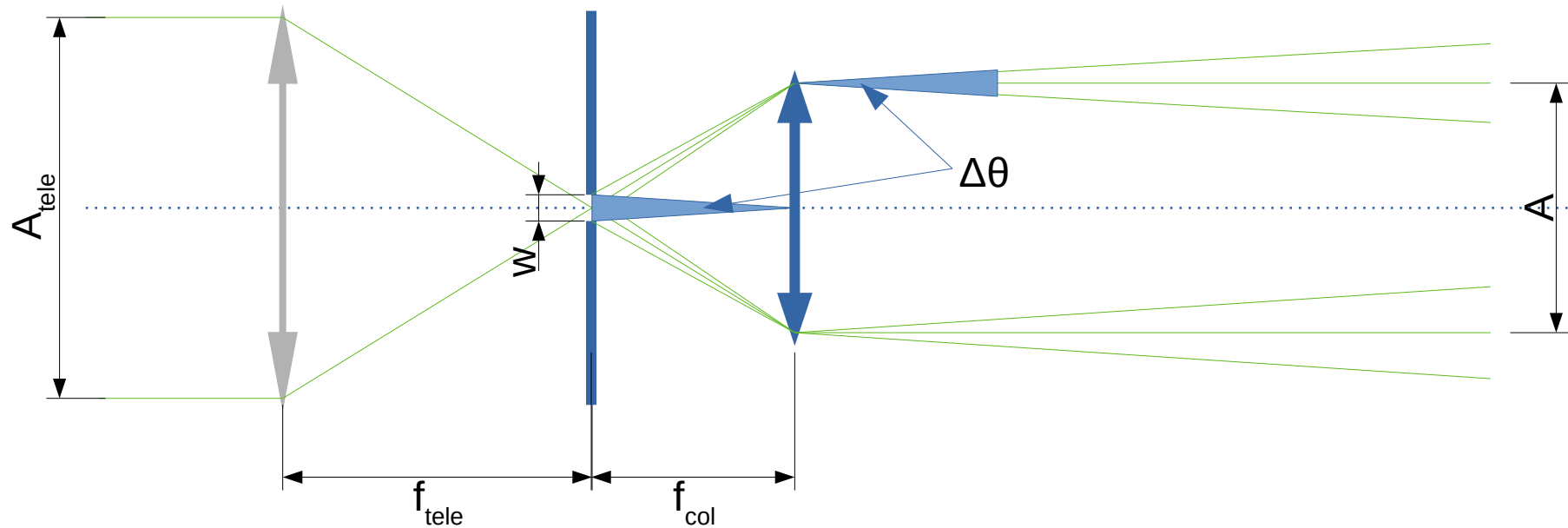
$$\Delta \theta = \operatorname{atan} \left(\frac{w/2}{f_{col}/2} \right) \simeq \frac{w}{f_{col}}$$

Jak rozmycie kątowe przekłada się na zmianę długości fali? O tym mówi dyspersja:

$$R_{diff} = A \frac{d\theta}{d\lambda} \quad \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{R_{diff}}{A} \quad \Delta \lambda = \Delta \theta \frac{d\lambda}{d\theta} \quad R_{slit} = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{R_{diff} \lambda}{A \Delta \theta}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę



Rozdzielczość „szczelinowa” (ang. slit limited resolution) wynosi więc

$$R_{slit} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = R_{diff} \frac{\lambda f_{col}}{w A} = R_{diff} \frac{\lambda}{w} N_{col}$$

gdzie N_{col} jest światłością kolimatora

Ponieważ światłość teleskopu i kolimatora są „identyczne” więc mamy również:

$$R_{slit} = R_{diff} \frac{\lambda}{w} N_{tele}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość spektrografu pryzmatycznego

Jaką wartość ma wyrażenie:

$$\frac{\lambda}{w} N_{col} = ?$$

Znacznie mniejszą niż 1, a więc zgodnie ze wzorem na rozdzielczość mamy:

$$\frac{R_{slit}}{R_{diff}} = \frac{\lambda}{w} N_{col} \ll 1$$

Dopóki więc szerokość szczeliny nie jest porównywalna z długością fali światła rozdzielczość spektrografu określa głównie szczelina, a dyfrakcja jest pomijalna.

Rozdzielczość dyfrakcyjna i „szczelinowa” sumują się odwrotnościami:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{slit}} + \frac{1}{R_{diff}}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość spektrografu pryzmatycznego

Rozdzielczość „szczelinowa” spektrografu pryzmatycznego wynosi więc:

$$R_{slit} = t \frac{dn}{d\lambda} \frac{\lambda}{A} \frac{f_{col}}{w}$$

ponieważ

$$\frac{t}{A} = 2 \frac{\sin i}{\cos r} \approx 2$$

dostajemy

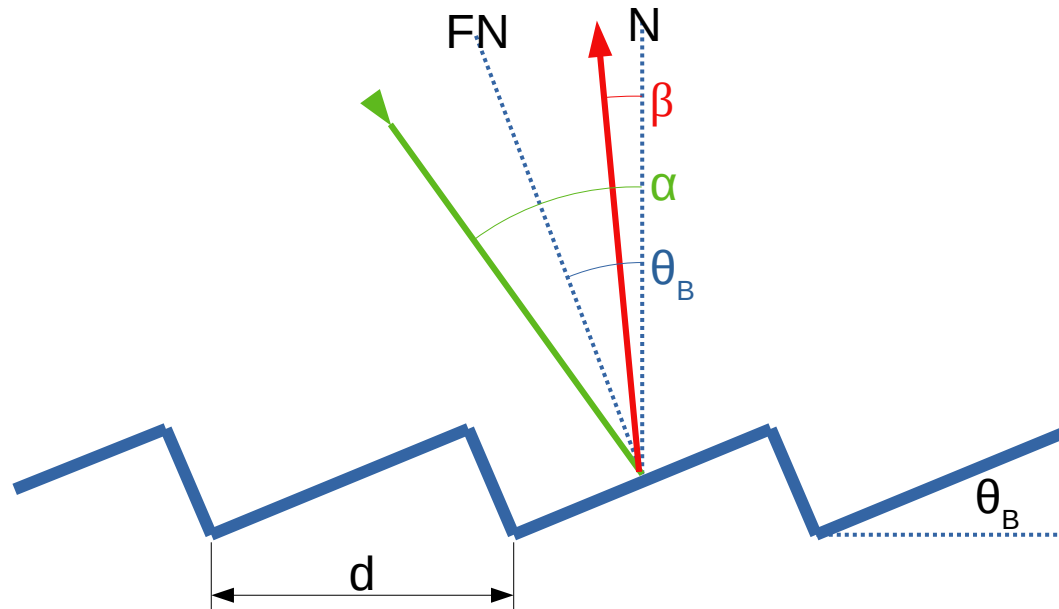
$$R_{slit} \approx 2 \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{col}}{w}$$

A więc rozdzielczość „szczelinowa” spektrografu pryzmatycznego zależy od następujących czynników:

- dyspersji – czyli własności samego pryzmatu
- długości fali światła
- odwrotności rozmiarów kątowych szczeliny widzianej z kolimatora, a więc od rozmiaru szczeliny i ogniskowej kolimatora

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej



Równanie siatki dyfrakcyjnej w płaszczyźnie prostopadłej do siatki i do nacięć:

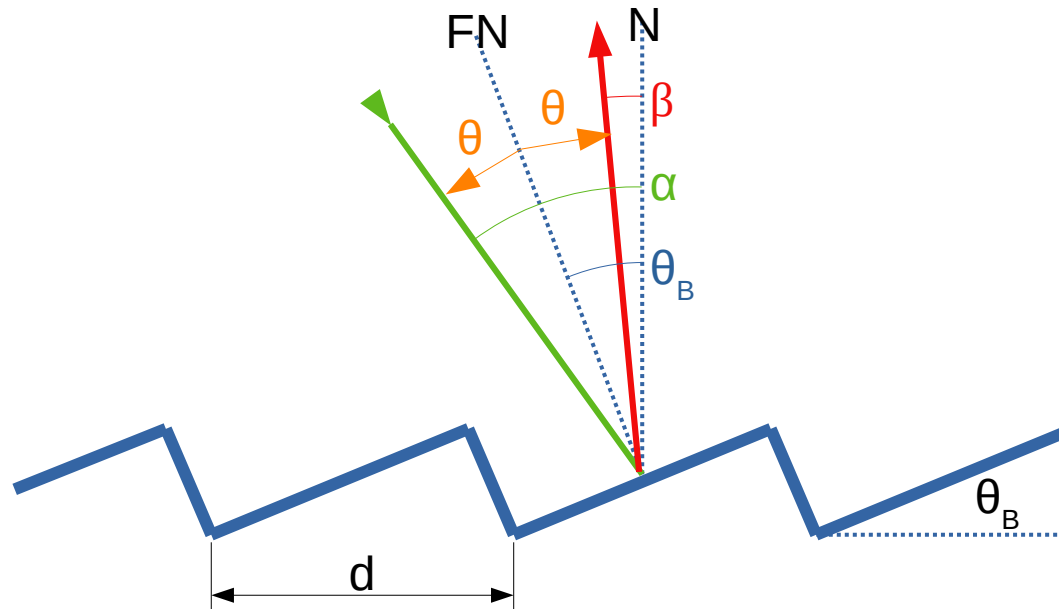
$$n \lambda = d (\sin \alpha + \sin \beta)$$

Gdy promienie padają pod kątem γ do płaszczyzny normalnej:

$$n \lambda = d \cos \gamma (\sin \alpha + \sin \beta)$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej



Zakładamy $\gamma=0$ (co zwykle jest bardzo bliskie prawdy)
oraz konfigurację quasi-Littrowa w której kąt padania
i odbicia są do siebie podobne i różnią się tylko o niewielki kąt $\theta \ll 1$:

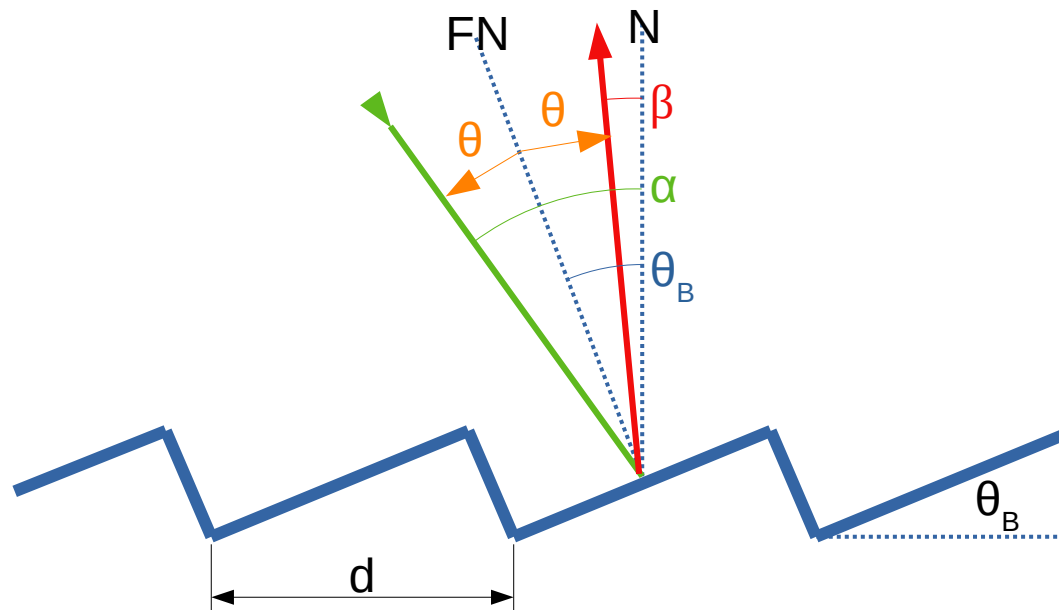
$$\alpha = \theta_B + \theta \qquad \beta = \theta_B - \theta$$

Równanie siatki upraszcza się do:

$$n \lambda = 2 d \cos \gamma \sin \theta_B \cos \theta \simeq 2 d \sin \theta_B$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej



Obliczmy pochodną po długości fali (dyspersję siatki) dla $\gamma=0$:

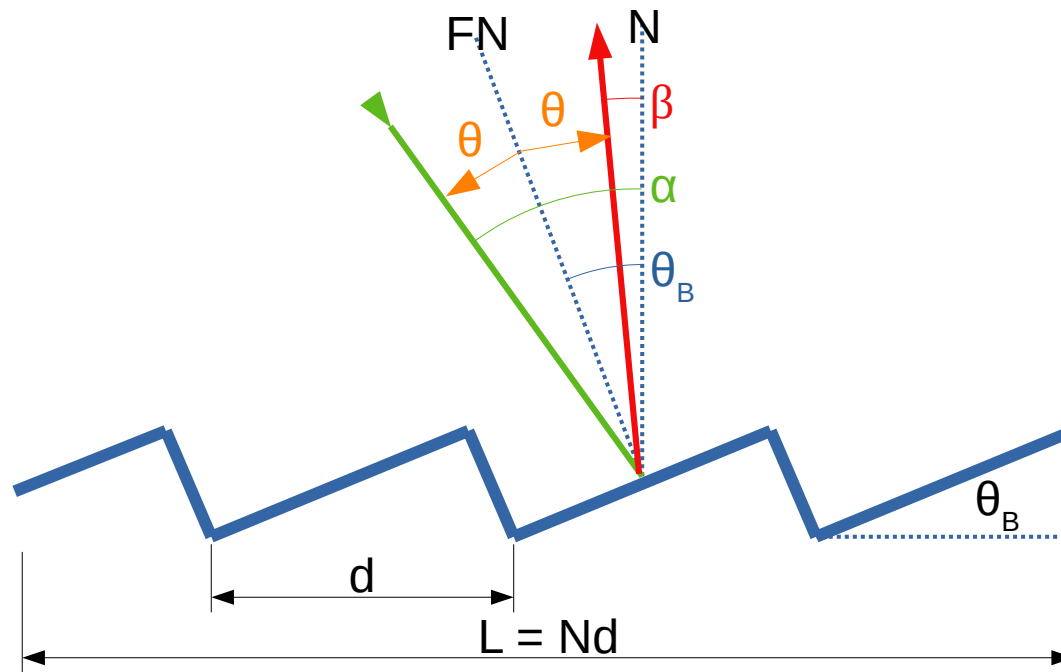
$$n \frac{d\lambda}{d\lambda} = 0 + d \frac{d}{d\lambda} \sin \beta \qquad n = d \cos \beta \frac{d\beta}{d\lambda}$$

W konfiguracji quasi-Littrowa mamy więc:

$$n\lambda \simeq 2d \sin \theta_B \qquad \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2 \tan \theta_B}{\lambda}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej



W konfiguracji quasi-Littrowa mamy więc dla siatki od długości L :

$$R_{diff} = A \frac{d\beta}{d\lambda} = L \cos \beta \frac{n}{d \cos \beta} = L \frac{n}{d} = N n$$

gdzie n jest rzędem widma, a N liczbą nacięć na całej siatce

Alternatywnie można łatwo wyprowadzić:

$$R_{diff} = 2L \frac{\sin \theta_B}{\lambda}$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość siatki dyfrakcyjnej

$$R_{diff} = N n = 2 L \frac{\sin \theta_B}{\lambda}$$

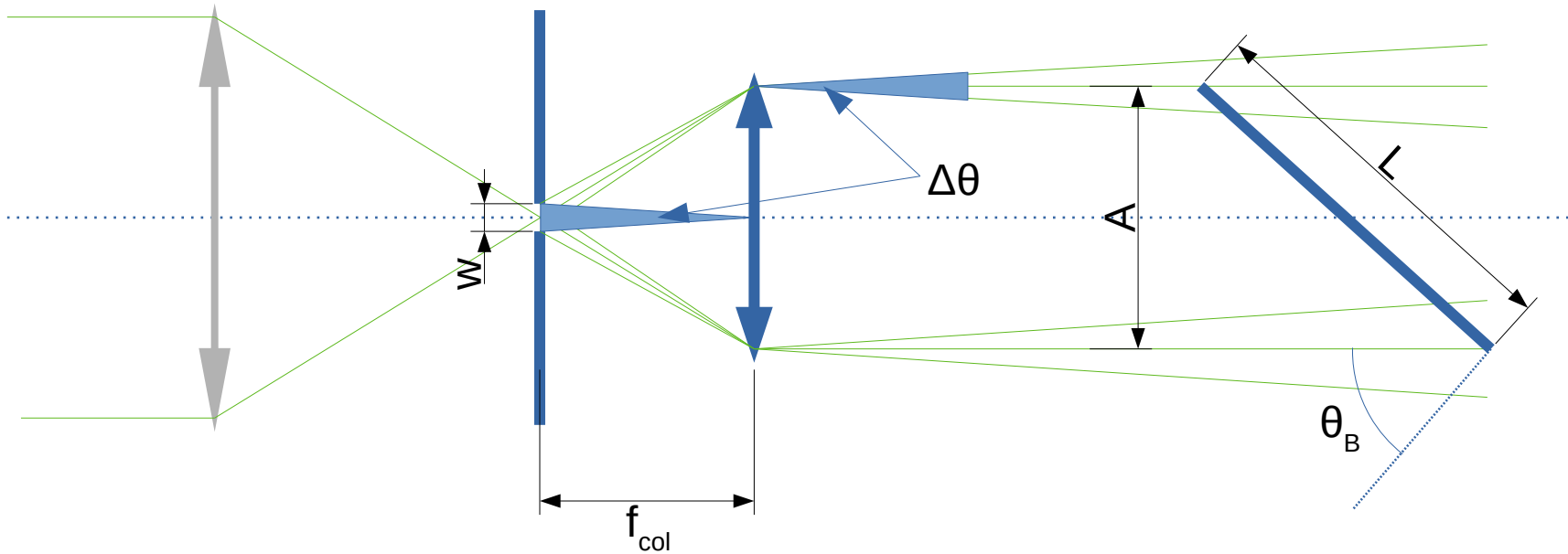
Jak widać rozdzielczość dyfrakcyjna spektrografu bazującego na siatce dyfrakcyjnej nie zależy od ilości nacięć na milimetr na siatce! Zależy m. in. od rozmiaru siatki i kąta odbicia światła.

Jakie są limity w „wyduszaniu” wysokiej rozdzielczości z siatki?

Równanie to jest m. in. konsekwencją zasady nieoznaczoności Heizenberga, im dłuższa siatka, tym gorzej określona jest pozycja odbijającego się od niej fotonu, tym lepiej więc może być określony wektor pędu (kąt ruchu) fotonu.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę



Analogicznie jak poprzednio przy pryzmacie możemy wyprowadzić:

$$R_{slit} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = R_{diff} \frac{\lambda}{A \Delta\theta} = R_{diff} \frac{\lambda f_{col}}{w A}$$

$$R_{slit} = 2 L \frac{\sin \theta_B}{\lambda} \frac{\lambda f_{col}}{w A} = 2 \frac{f_{col}}{w} \operatorname{tg} \theta_b$$

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

$$R_{slit}^{gr} = 2 \operatorname{tg} \theta_b \frac{f_{col}}{w}$$

Można również wyprowadzić inne zależności, ze względu na powiązanie parametrów kolimatora i teleskopu (ale tu już tego nie robimy).

Rozdzielczość „szczelinowa” siatki ponownie zależy więc od

- kąta błysku (maksymalny praktyczny $\operatorname{tg} \theta_b = 4$)
- odwrotności rozmiaru kąowego szczeliny widzianej z kolimatora

Ponownie jest też znacznie niższa niż rozdzielczość dyfrakcyjna.

W porównaniu do rozdzielczości ograniczonej szczeliną dla pryzmatu pojawia się nowa zależność od rozmiaru i kąta odbicia światła od siatki, a znika zależność od dyspersji i długości fali światła.

$$R_{slit}^{pr} = 2 \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{col}}{w}$$

Rozdzielczość spektrografu

Porównanie siatki i pryzmatu

$$R_{slit}^{gr} = 2 \operatorname{tg} \theta_b \frac{f_{col}}{w} \qquad R_{slit}^{pr} \approx 2 \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{col}}{w}$$

Zakładając tę samą szczelinę rozdzielczości w przypadku ograniczonym szczeliną dla spektrografu pryzmatycznego i siatkowego wynoszą:

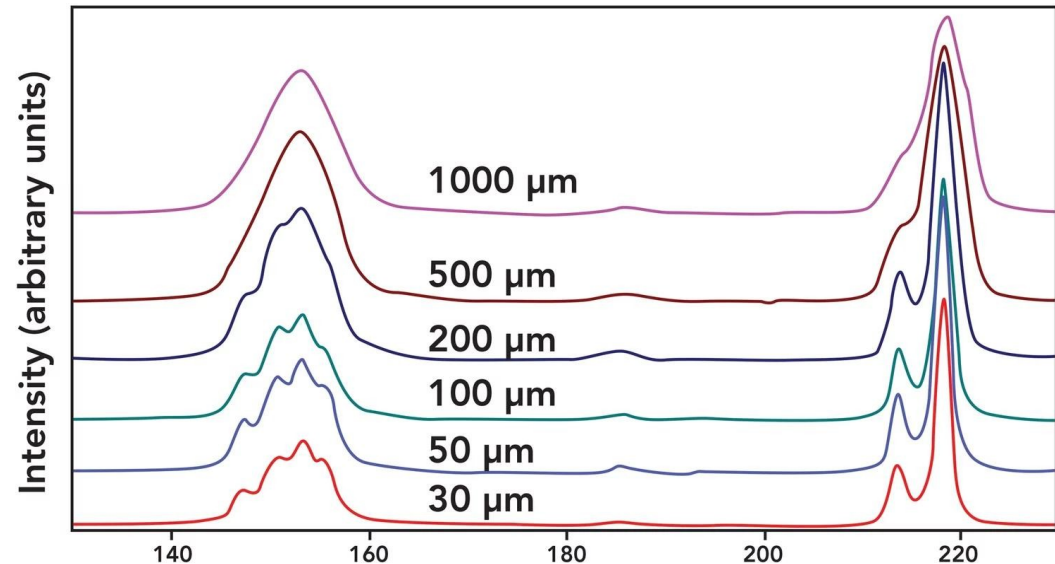
$$\frac{R_{slit}^{pr}}{R_{slit}^{gr}} = \frac{\lambda \frac{dn}{d\lambda}}{\operatorname{tg} \theta_B}$$

Wg. Pierra Jacquinota (1954) dla wszystkich popularnych gatunków szkła, optycznych długości fali i kątów odbicia światła przewaga siatki wynosi od 5 do 100 razy. Praca ta przyczyniła się do odejścia od stosowania pryzmatów w obserwacjach astronomicznych.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

$$R_{slit} \propto \frac{1}{w}$$



Szerokość szczeliny pełni kluczową rolę w rozdzielczości spektrografów astronomicznych. Jeśli jednak rozmiar szczeliny będzie mniejszy niż rozmiar obrazu badanego obiektu, pojawią się straty światła, które znacznie obniżają ilość światła wprowadzaną do spektrografu, a przez to mogą uniemożliwić obserwacje słabych obiektów.

Możliwości zmniejszenia rozmiaru szczeliny bez utraty światła dają dwie techniki:

- optyka adaptacyjna
- image slicer (krajalnica obrazu)
- matematyczne metody dekonwolucji

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

Optyka adaptacyjna



Obraz w teleskopie bez (z lewej) i z (z prawej) optyką adaptacyjną.

Optyka adaptacyjna pozwala znacznie zmniejszyć rozmiar obiektu przez co można zastosować węższe szczeliny, albo wpuścić więcej światła z tą samą szczeliną. Dotyczy to tylko obiektów gwiazdowych, nie działa dla obiektów rozciągniętych.

Przykładowo teleskop o średnicy 10m ma dyfrakcyjną zdolność rozdzielczą na poziomie 0.01", a zdolność rozdzielczą ze względu na seeing na poziomie 1". Zastosowanie optyki adaptacyjnej pozwala więc zmniejszyć obraz 100x, co pozwala zastosować bezstratnie 100x węższą szczelinę i uzyskać 100x wyższą rozdzielczość widma bez strat światła.

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

Image slicer (krajalnica obrazu)



Obraz w teleskopie bez (z lewej) i z (z prawej) krajalnica obrazu.

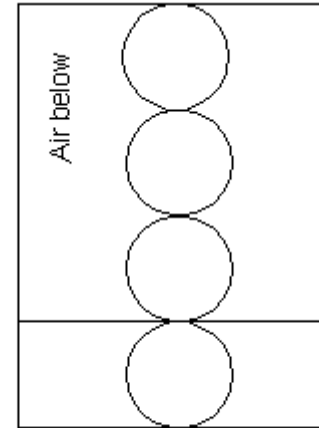
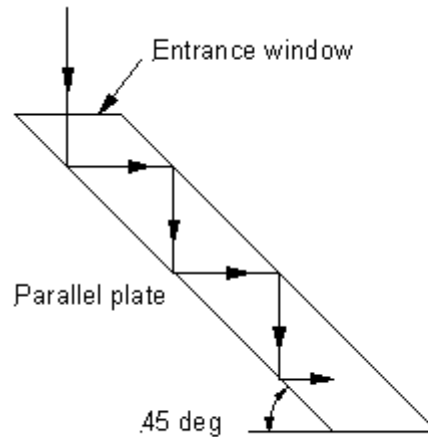
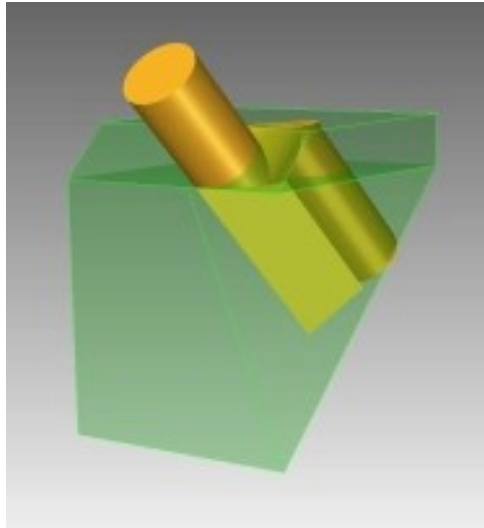
Image slicer (krajalnica obrazu) pozwala zmienić kształt obrazu na węższy, ale o tej samej powierzchni. W efekcie więcej światła może być wpuszczone przez szczelinę o tej samej szerokości, lub może być zastosowana mniejsza szczelina. Zachowanie powierzchni oznacza ten sam kąt zbieżności wiązki (stałe etendue) co sprawia, że nie trzeba dokonywać modyfikacji innych części spektrografu. Zwykle można zyskać kilka razy wyższą rozdzielczość.

Skutkiem zastosowania krajalnicy obrazu jest również grubsze widmo (szersze w osi przestrzennej) co sprawia, że zajmuje więcej pikseli kamery. W efekcie zwiększenie ilości światła jest częściowo niwelowane przez zwiększenie sumarycznego szumu odczytu.

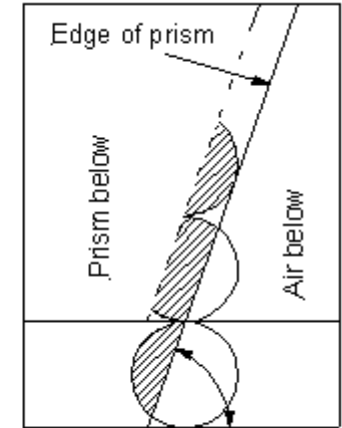
Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

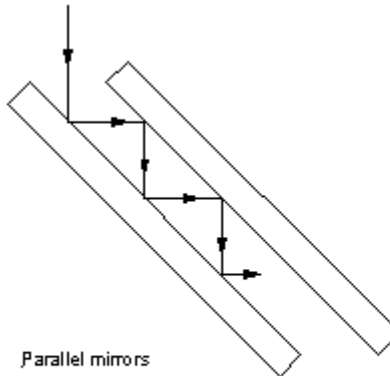
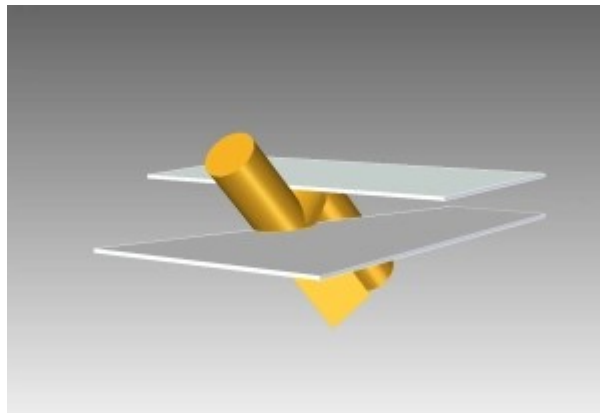
Image slicer (krajalnica obrazu)



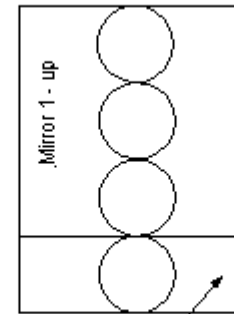
Entrance window



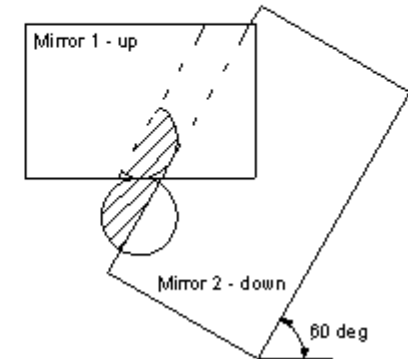
70.53 deg



Parallel mirrors



Mirror 2 - down



80 deg

Klasyczna krajalnica obrazu typu Bowen-Walraven jest zbudowana z dwóch pryzmatów i bardzo cienkiej szyby pomiędzy nimi. Kosztuje co najmniej 10000 Euro. Alternatywą jest krajalnica zbudowana z dwóch lusterek za ok 300 Euro (Avila i in., 2009).

Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

Image slicer (krajalnica obrazu)

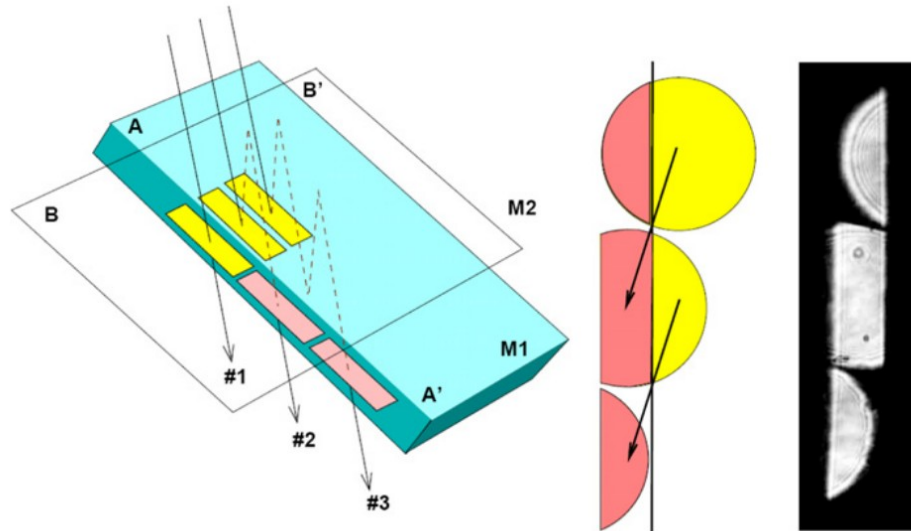


Image slicer od spektrografu CHIRON w obserwatorium CTIO (Schwab i in., 2011).

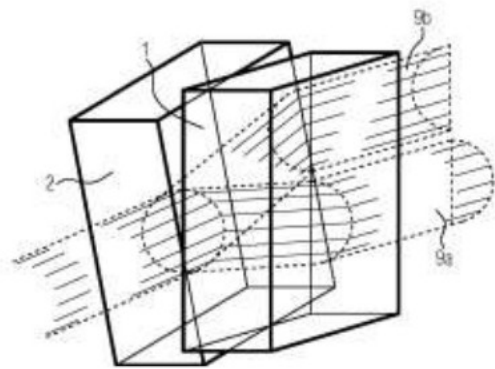
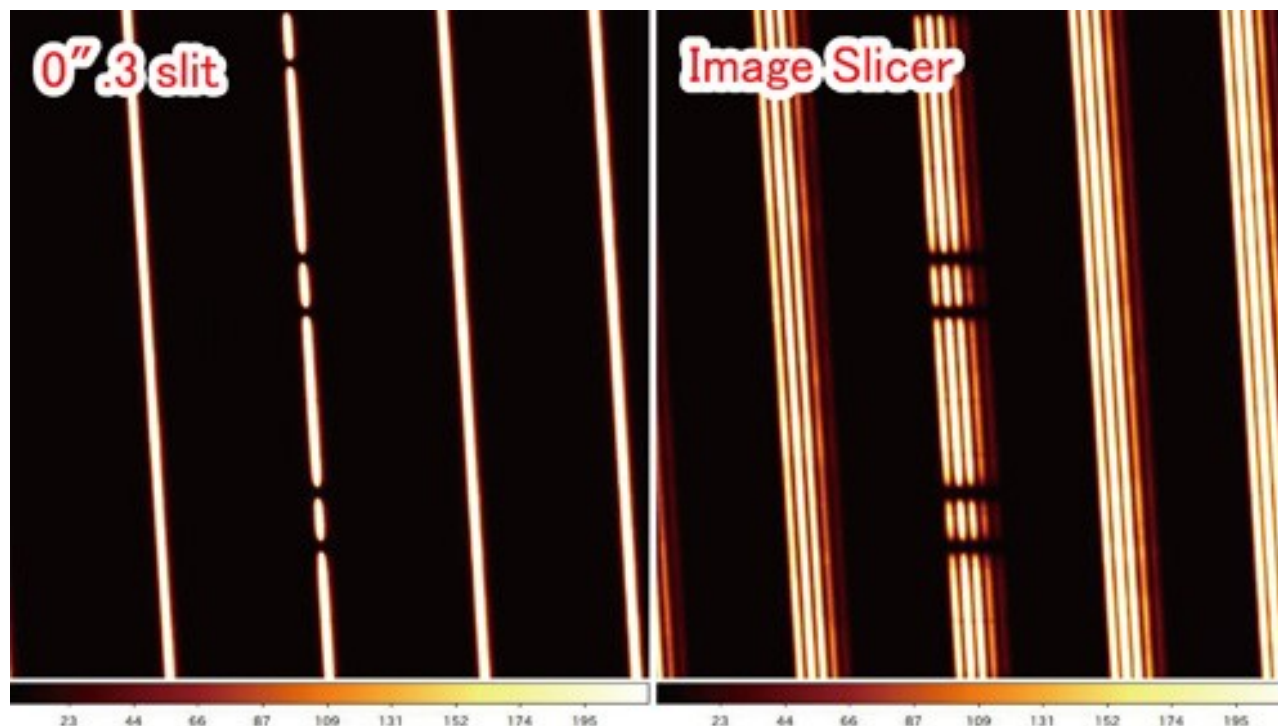


Image slicer zbudowany z dwóch kostek szklanych, prototyp i przykłady działania dla obrazów o rozmiarach $100\mu\text{m}$ i $50\mu\text{m}$ (Avila i in., 2012).

Rozdzielczość spektrografu



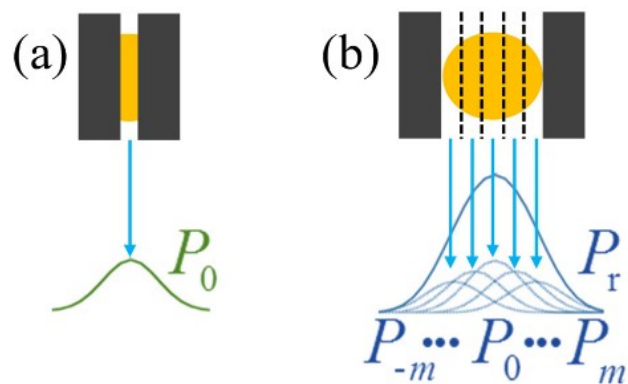
	IS #1	IS #2	IS #3
Slice pattern	0".3×5	0".45×3	0".2×3
Spectral resolution	R=110,000	R=80,000	R=165,000
Type	Bowen-Walraven type		Bowen-Walraven type + Focal Length Corrector
Entrance opening	φ1".5 circle	1".35×1".35 square	0".6×1".45 rectangle
Elongation along slit length	7".9 ($\lambda > 5,000\text{\AA}$ for red settings, $\lambda > 4,000\text{\AA}$ for blue settings)	5".2 ($\lambda > 3,800\text{\AA}$ for red settings, $\lambda > 3,600\text{\AA}$ for blue settings)	5".5 ($\lambda > 4,000\text{\AA}$ for red settings, $\lambda > 3,600\text{\AA}$ for blue settings)
Material	Fused quartz w/AR-coating		
Efficiency	> 83% (@4,000 ~ 7,000Å)	> 93% (@3,800 ~ 8,000Å)	> 73% (@4,000 ~ 8,000Å)

Przykład widma z pojedynczą, wąską szczeliną i widma z krajalnica.
Teleskop SUBARU, spektrograf HDS (www.naoj.org).

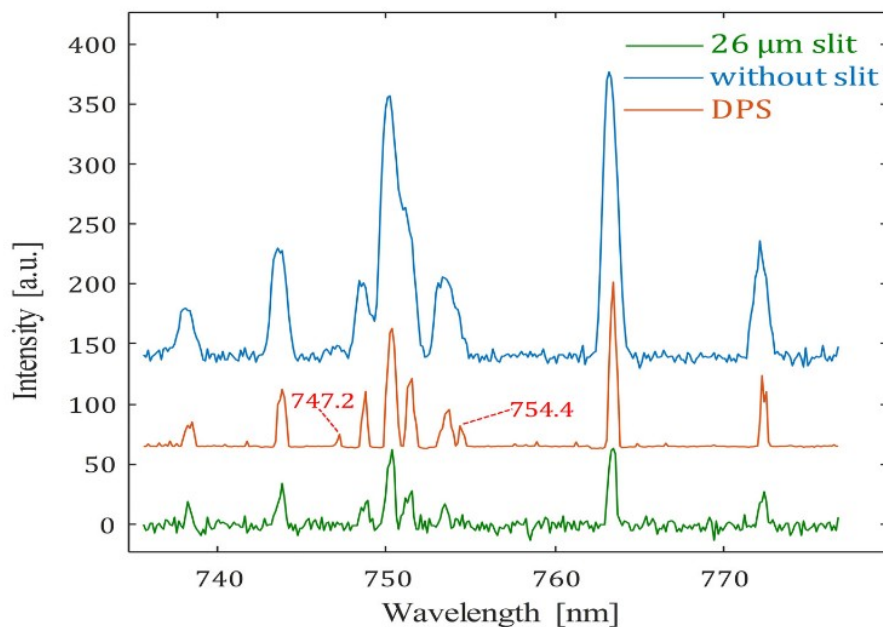
Rozdzielczość spektrografu

Rozdzielczość ze względu na szczelinę

Digital Projection Slit (cyfrowa szczelina)



Szeroka szczelina może być traktowana jak zbiór wąskich szczelin (Ma i in., 2017).



Przykład działania metody DPS (Ma i in., 2017).

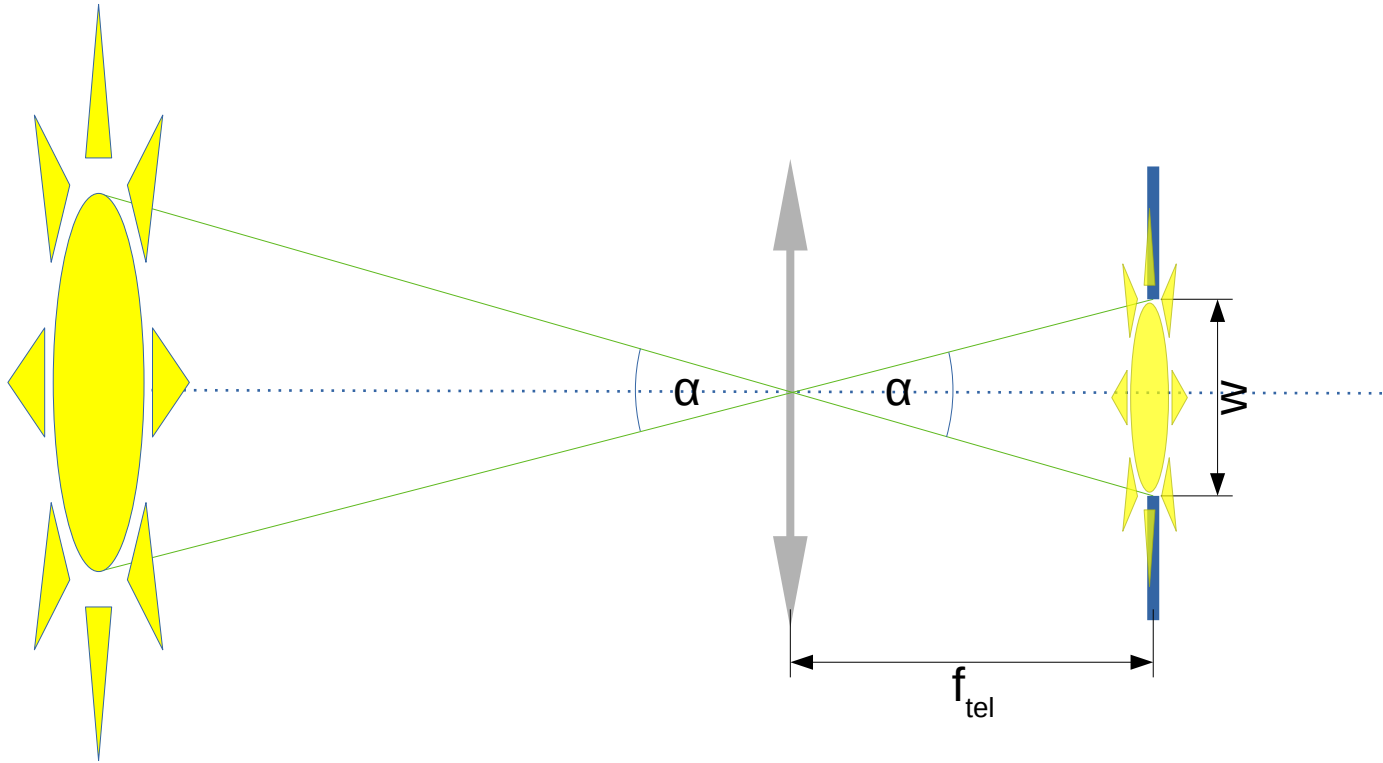
Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Skala obrazu w teleskopie w zależności od średnicy, ogniskowej, światłości i seeingu.



$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{w}{2f_{tel}}$$

$$\alpha [rad] = \frac{w}{f_{tel}} = \frac{w}{N_{tel} D_{tel}}$$

Minimalny rozmiar szczeliny, dla którego nie będzie silnych strat światła wynika z limitu dyfrakcyjnego danego teleskopu:

$$w_{min} = FWHM_{Airy} f_{tel} \simeq \lambda \frac{f_{tel}}{D_{tel}}$$

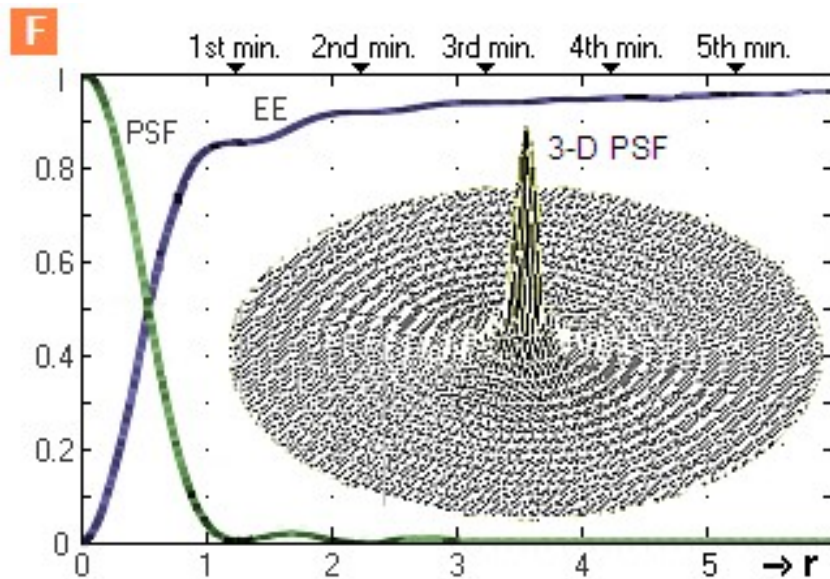
Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Ogniskową teleskopu można zawsze skrócić lub wydłużyć w dość szerokim zakresie parametrów, co wpływa na rozmiar obrazu (skalę obrazu w ognisku, na szczelinie).

Jednocześnie jednak zmienia się zbieżność wiązki – etendue nie może zmaleć!

Zakładając idealny dyfrakcyjny obraz gwiazdy w teleskopie rozkład energii wraz z odległością od środka obrazu wynosi:



	$r [\lambda/D]$	I	EE	FWHM
1 max	0	1	0	0
1 min	1.22	0	0.838	2.36
2 max	1.63	0.0175	0.867	3.16
2 min	2.23	0	0.910	4.32
3 max	2.68	0.0042	0.922	5.20
3 min	3.24	0	0.938	6.29

FWHM dysku Airy wynosi prawie dokładnie $1.03\lambda/D$
(www.telescope-optics.net)

Parametry dla kołowego PSF.

Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Stosując szczelinę prostokątną o szerokości $w = A \times \text{FWHM}_{\text{Airy}}$ przepuszczamy następujący ułamek światła (dla punktowego obrazu dyfrakcyjnego):

$$I = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} \int_{x=-w/2}^{x=w/2} \left(\frac{2 J_1(\pi \sqrt{x^2 + y^2})}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}} \right)^2 dx dy$$

$w = 1 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.697$
$w = 2 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.886$
$w = 3 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.919$
$w = 4 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.946$
$w = 5 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.956$
$w = 6 \times \text{FWHM}$	$EE = 0.966$

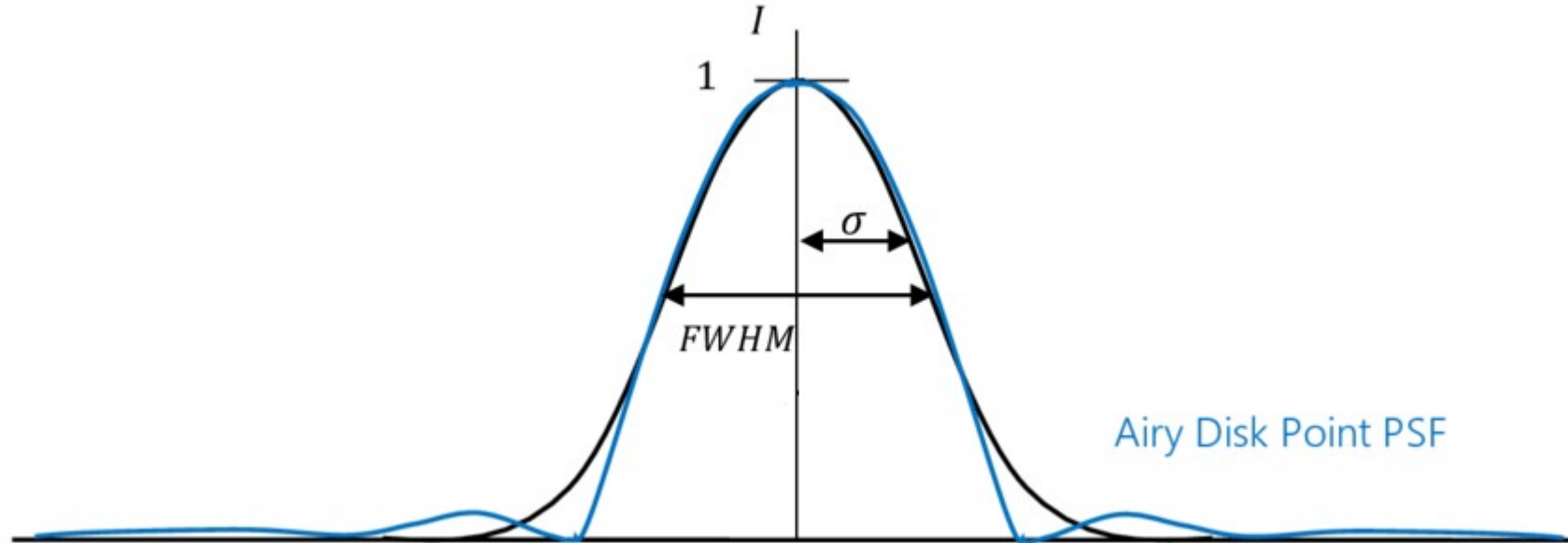
Minimalny możliwy rozmiar szczeliny (skala obrazu) wynika z limitu dyfrakcyjnego, jednak dla większości teleskopów kąt α przy obserwacjach pojedynczej gwiazdy odpowiada poziomowi aktualnego seeingu, czyli $\alpha_{\text{FWHM}} = 1-3''$, a więc szerokość szczeliny dla 1 FWHM wynosi:

$$w_{1 \text{ FWHM}} = \alpha f_{\text{tel}} = (5-15) \cdot 10^{-6} f_{\text{tel}} = 5-15 \left(\frac{f_{\text{tel}}}{1 \text{ m}} \right) \mu\text{m}$$

Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Zakładając że obraz gwiazdy jest rozmyty przez seeing gausowski, transmisja światła przez szczelinę wychodzi podobne do obrazów dyfrakcyjnych dla $FWHM \sim 1$, ale straty są mniejsze dla $FWHM > 2$.



Porównanie profili Gaussa i Airy (James Seyforth 2016)

Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu

Rozmiar szczeliny decyduje więc nie tylko o rozdzielczości większości spektrografów.

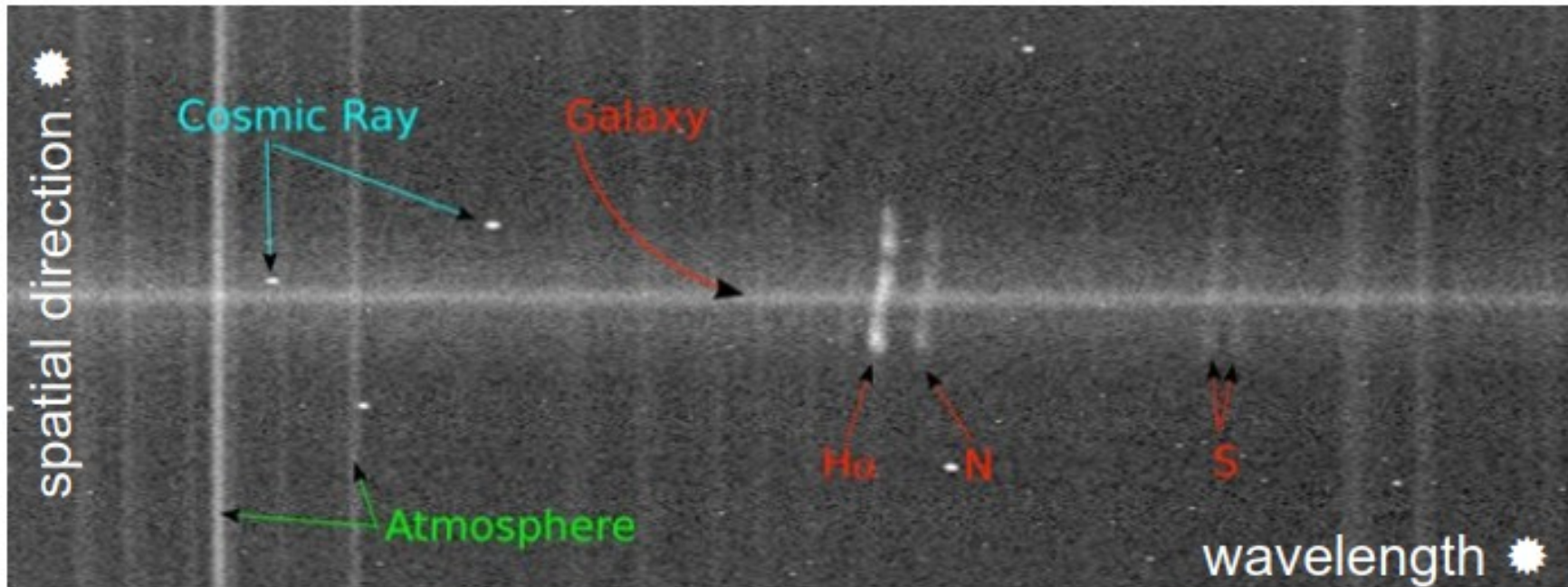
Jest również istotnym parametrem wpływającym na:

- straty światła na wejściu do spektrografu
(im. mniejsza szczelina tym większe)
- zanieczyszczenie światła obiektu światłem tła nieba
(im. większa szczelina tym większe)

Spektroskop o wysokiej czułości, wymagający większych rozmiarów szczeliny ma więc obniżoną rozdzielczość i widmo obiektu wymieszane z widmem nieba.

Budowa spektrografu

Obraz w teleskopie i szczelina spektrografu



Widmo galaktyki (van Boekel & Dullemond, 2015).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

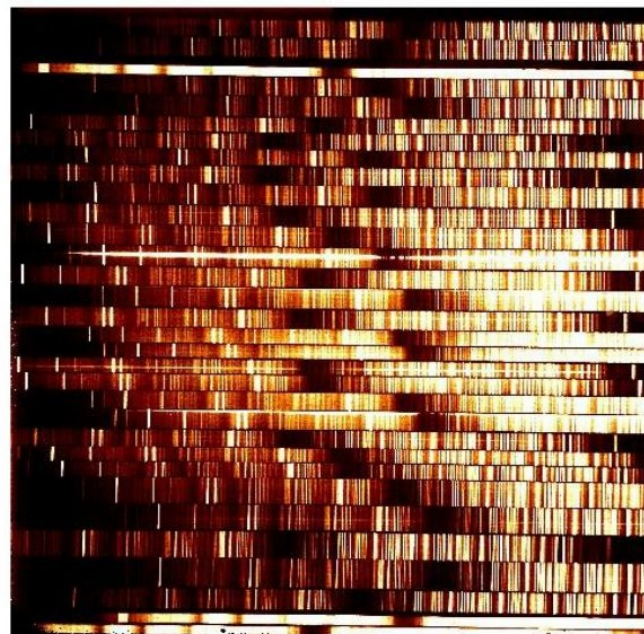
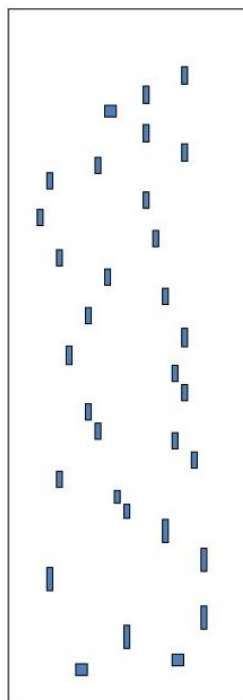
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Szczelina klasyczna – pojedyncza lub wielokrotna



Szczelina 50µm spektrografu
Shelyak Alpy (www.shelyak.com)

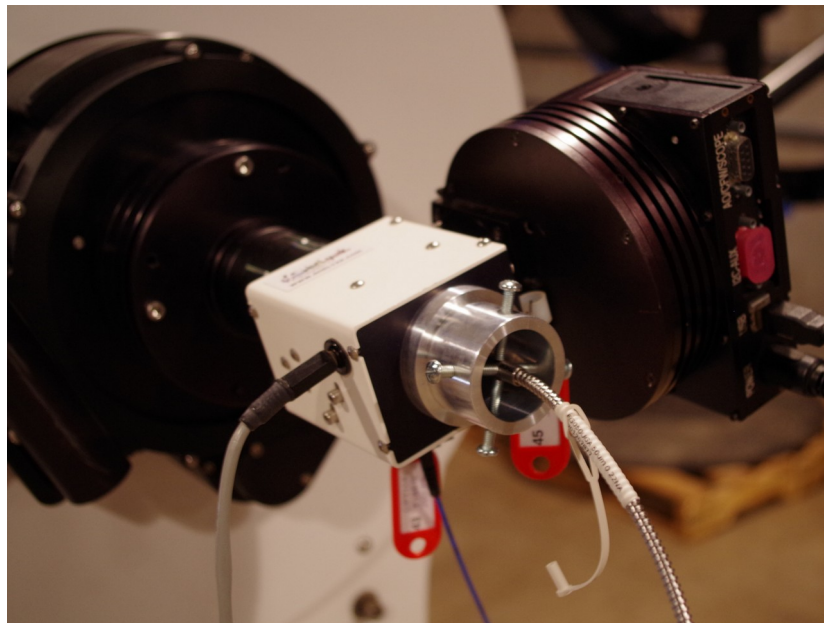
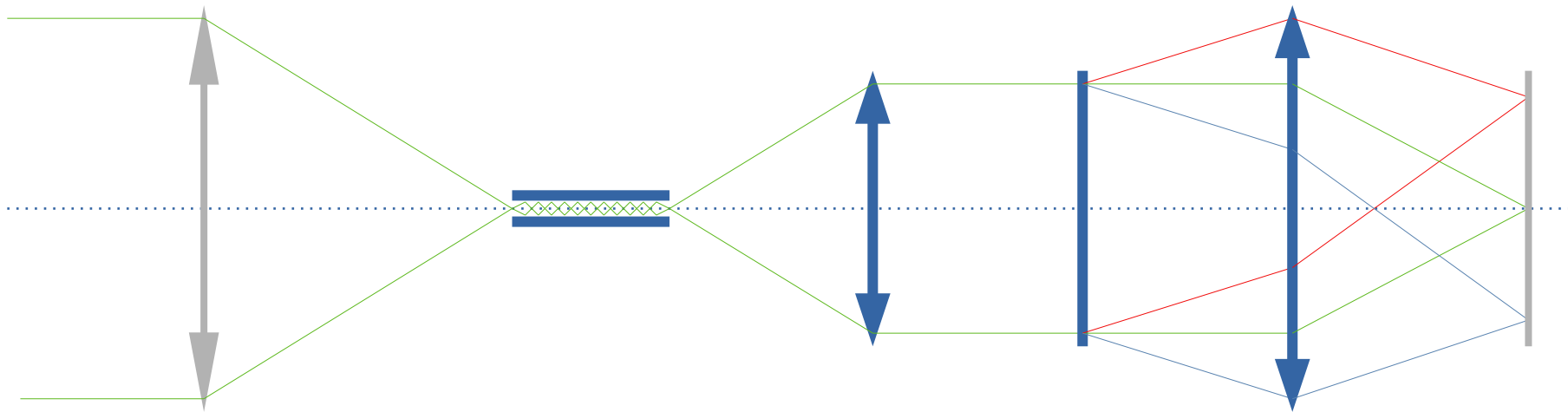


Układ szczelin i przykładowe widmo ze spektrografu Flamingos
(Gemini South spektrograf NIR).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Światłowód pojedynczy



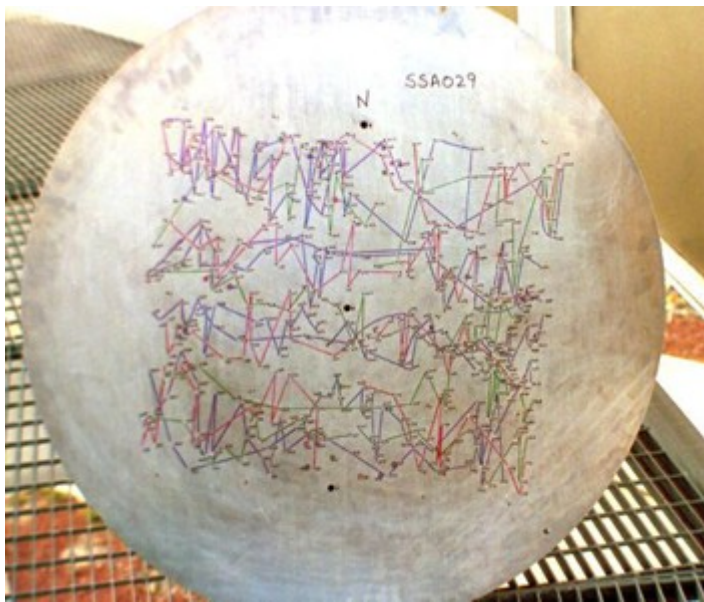
Światłowody przyłączone w teleskopie PST2.

Więcej detali o zaletach i wadach światłowodów będzie w dalszej części wykładu.

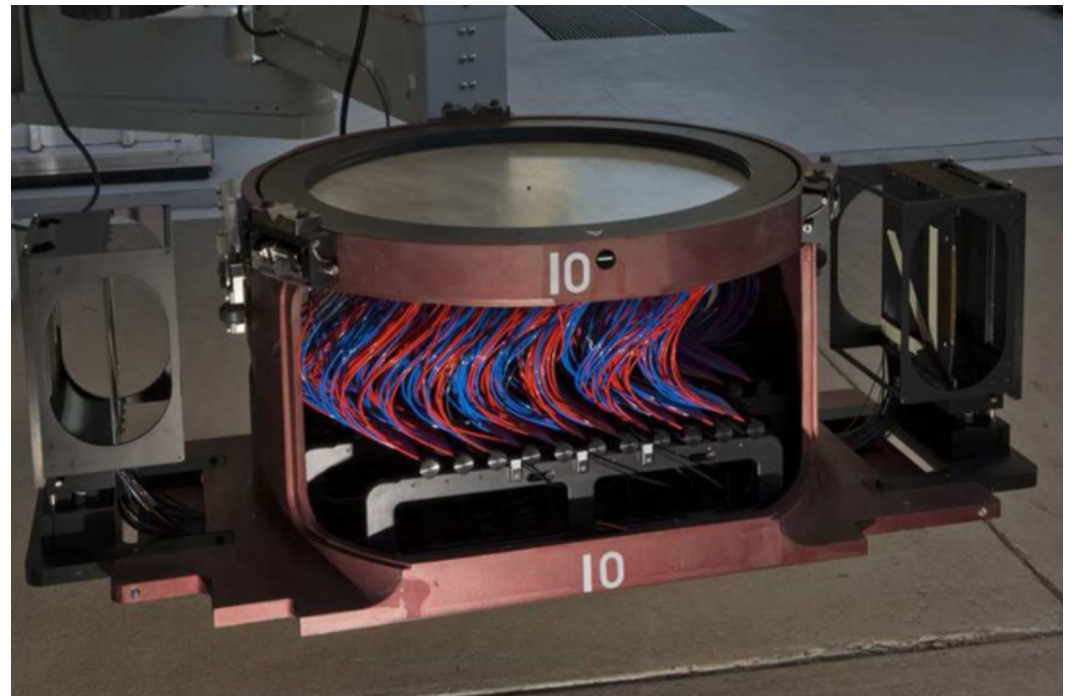
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Światłowód wielokrotny



Płyta mocująca światłowody (<http://www.sdss3.org>)



Szczeliny światłowodowe SDSS (Smei i in., 2013).
Średnica światłowodu 180 μ m, skala rozmiaru 3".

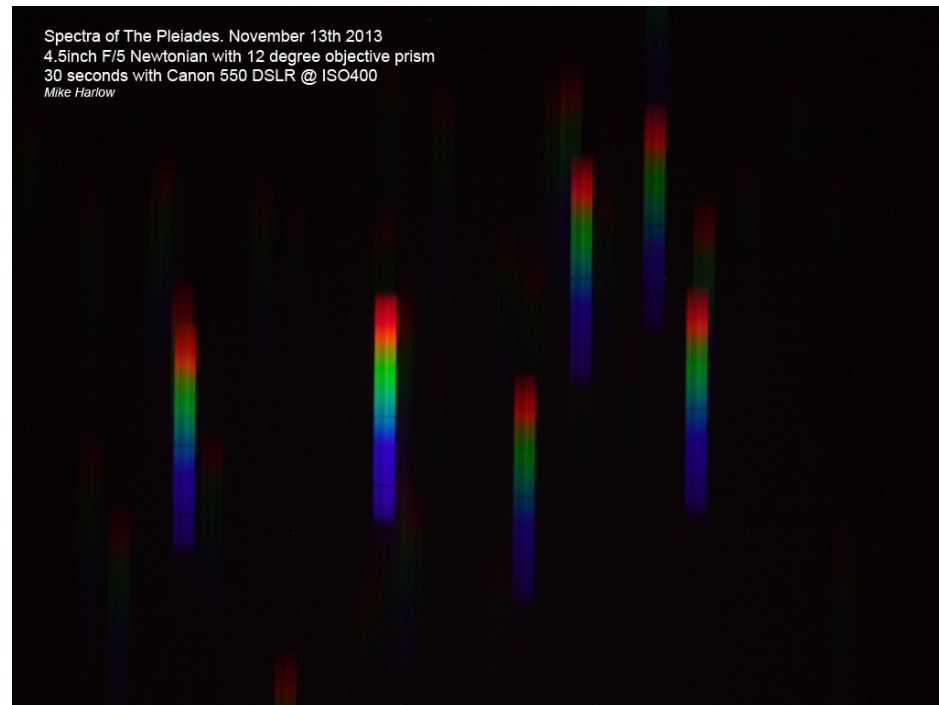
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografii

Brak szczeliny – spektrografy bezszczelinowe



Pryzmat obiektywowy na teleskopie 11 cm do pokazów nieba Ipswich, UK, Orwell Astronomical Society (<http://www.oasi.org.uk>).



Zdjęcie Plejad przez teleskop z pryzmatem obiektywowym (<http://www.oasi.org.uk>).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia wieloobiektowa



Cztery metody na równoczesne otrzymanie w jednym teleskopie, widm różnych obiektów w polu widzenia:

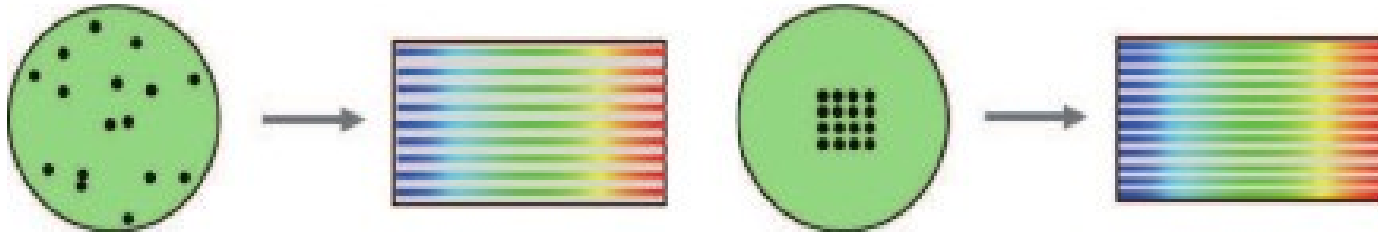
A. pryzmat obiektywowy – wszystkie obiekty w polu widzenia, niska rozdzielczość, widma mogą się nakładać wzajemnie jeśli obiekty są ułożone wzdłuż osi dyspersji. Nakładaniu można przeciwdziałać obracając pryzmat.

B. spektrograf wieloszczelinowy – wybrane obiekty w polu widzenia, wyższa rozdzielczość, ale nadal możliwe nakładanie. Nakładaniu można przeciwdziałać obracając szczeliny i nacinając szczeliny tylko dla niektórych obiektów.

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia wieloobiektowa



Cztery metody na równoczesne otrzymanie w jednym teleskopie, widm różnych obiektów w polu widzenia:

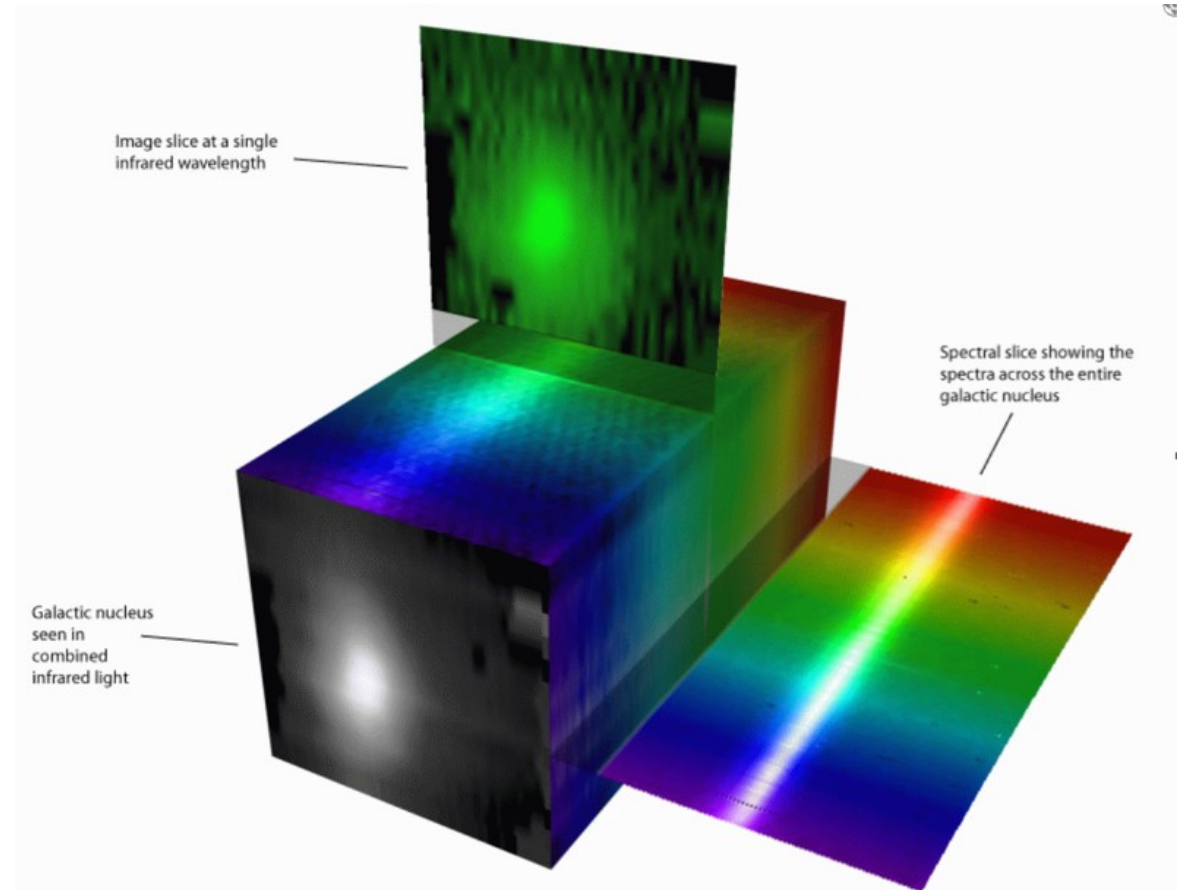
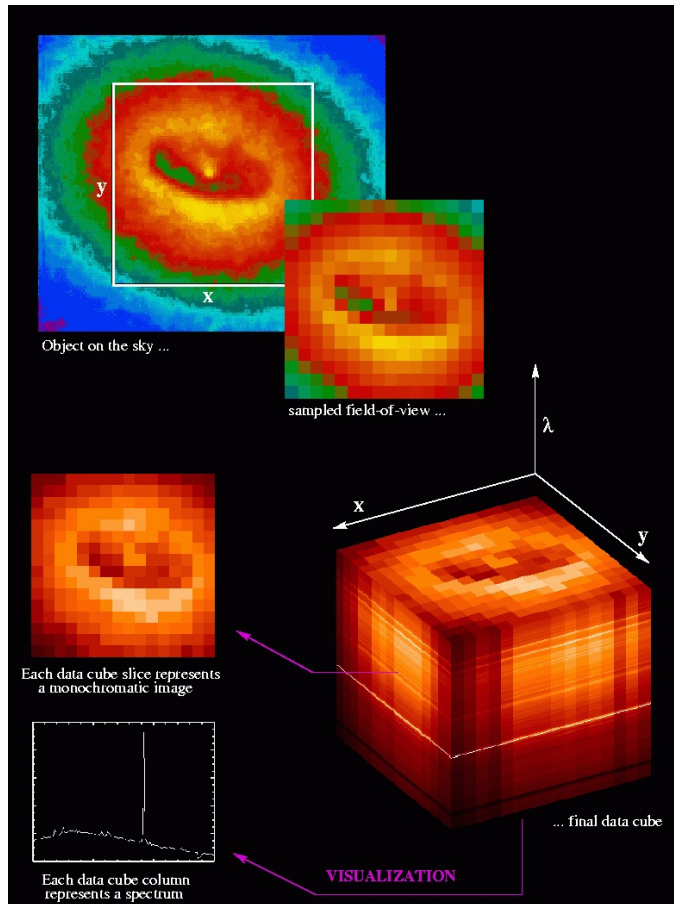
C. spektrograf wieloświatłowodowy – wybrane obiekty w polu widzenia, średnia rozdzielczość, pozycja widm na zdjęciu nie powiązana z pozycją widm, znika problem nakładania się widm.

D. spektrograf integralny (3D) – widma z wszystkich sektorów obrazu pokrywających część pola widzenia teleskopu, średnia rozdzielczość, korzystne dla obiektów rozciągniętych, niekorzystne dla punktowych gdyż sektory nie są dopasowane do pozycji na niebie.

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)



Spektroskopia integralna – ilustracja działania (M. Roth 2002).

Obraz dzielony jest na sektory i z każdego sektora otrzymujemy widmo.
Obraz pokrywany jest w sposób ciągły (integralny), a nie punktowy.

Budowa spektrografu

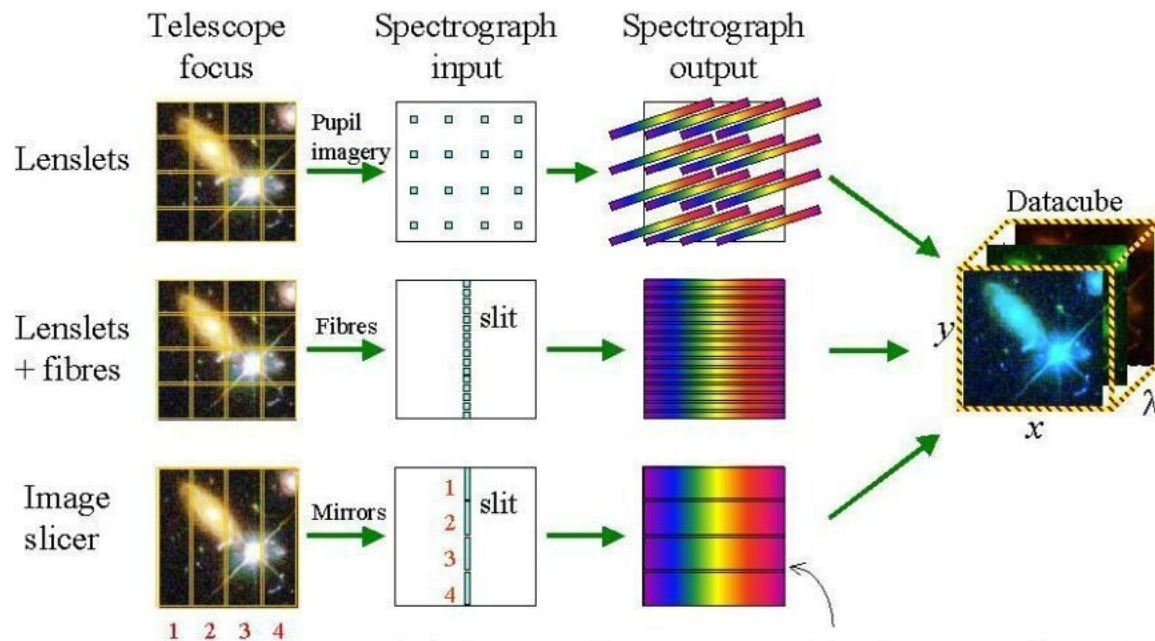
Rodzaje szczelin w spektrografii

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

Spektrograf integralny dzieli obraz w polu widzenia teleskopu na sektory za pomocą:

- krajalnicy obrazu (image slicer)
- matrycy soczewek (lenslet array)
- światłowodów

Diverse field spectroscopy – wybieralne sektory obrazu



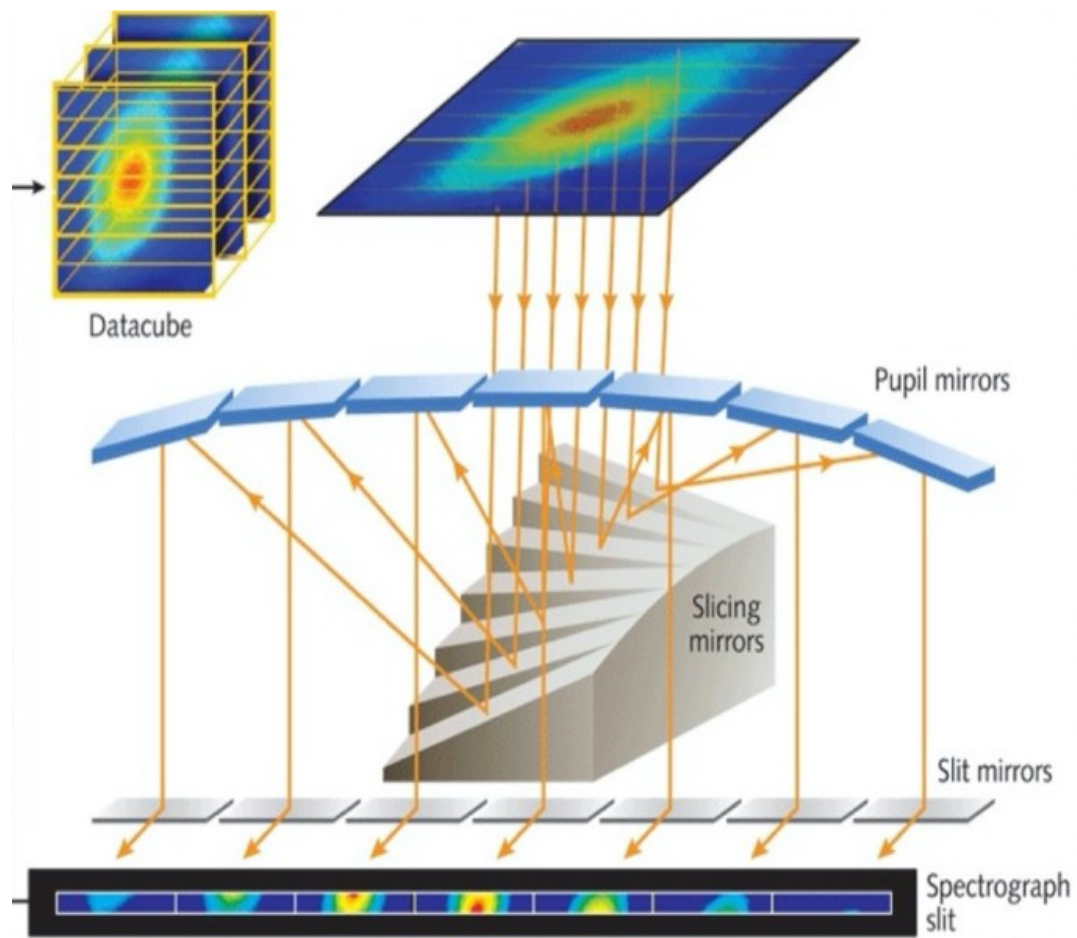
Spektroskopia integralna – trzy sposoby podziału obrazu na sektory (www.dur.ac.uk).

Po angielsku każdy sektor nazywany jest spaxel (spatial element „pixel”).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

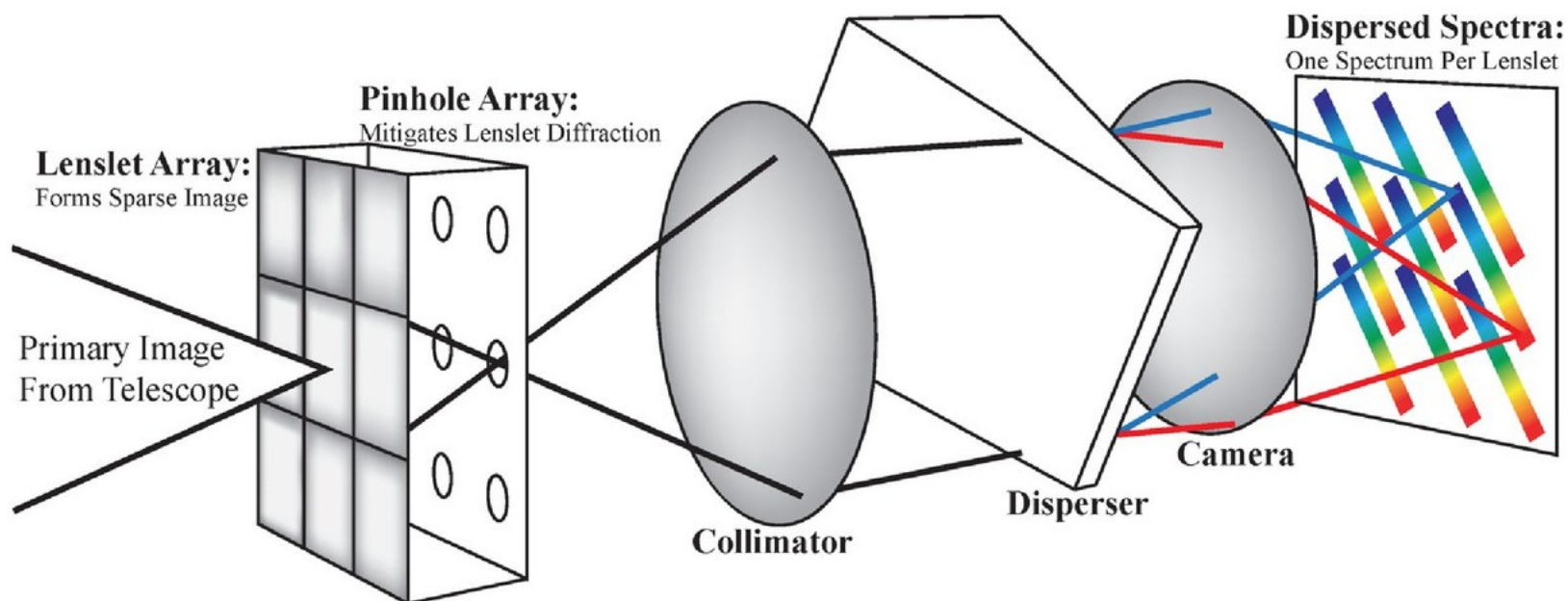


Spektroskopia integralna – image slicer (jwst-docs.stsci.edu).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

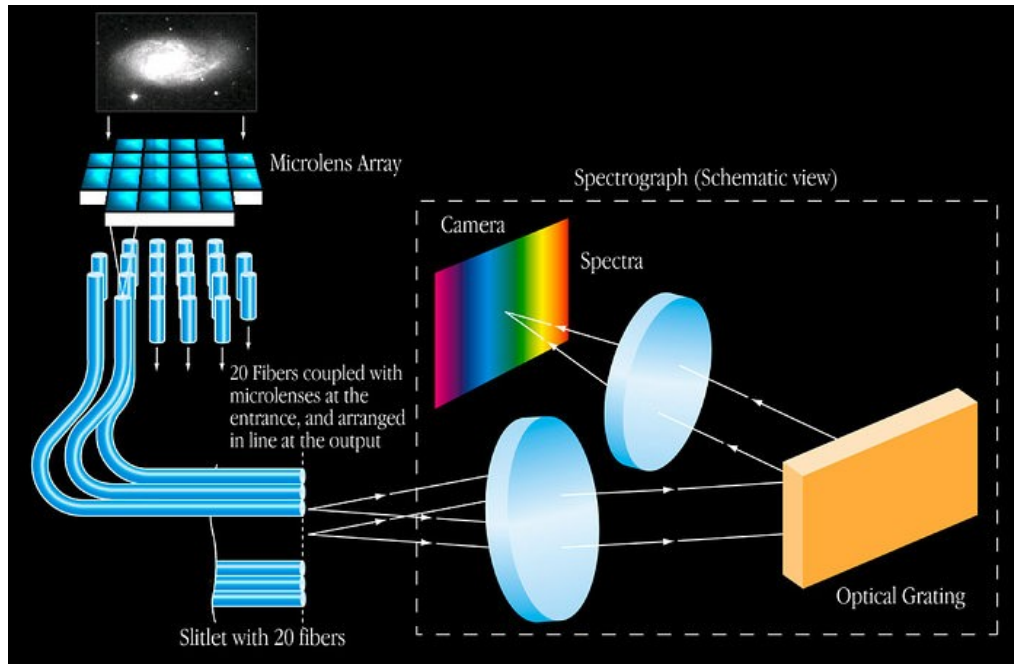


Spektroskopia integralna – lenslet dla 2.4m teleskopu kosmicznego WFIRST (Rizzo i in., 2017).

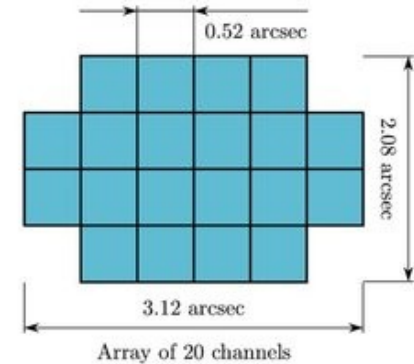
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

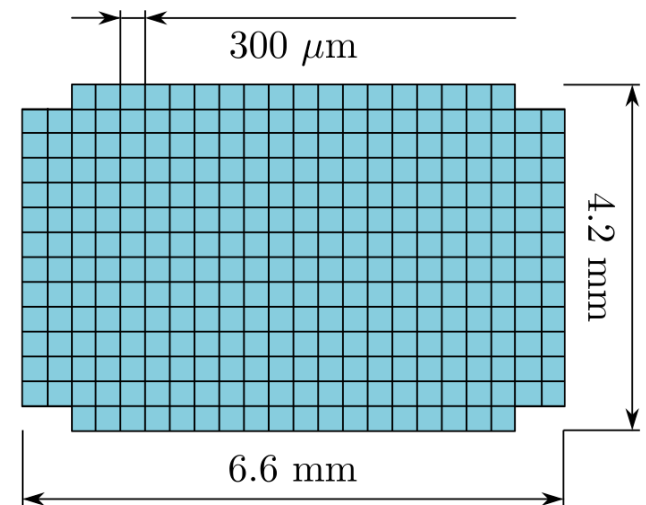
Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)



Lenslet + fibers instrumentu VIMOS ESO (www.eso.org).



Sektory IFU GIRAFFE (<http://ifs.wikidot.com>).



Array of 22 × 14 channels

Sektory IFU FLAMES (<http://ifs.wikidot.com>).

Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

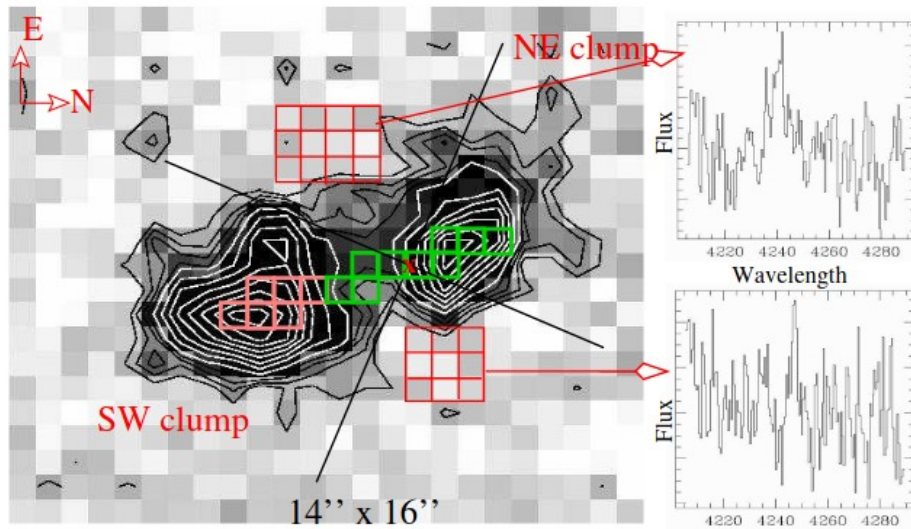


Figure 1. Ly α image of MRC 2104–242 . Contours correspond to $\sim 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 60, 70, 80, 90$ and 100 % of the maximum contour value. Pixels marked in green and pink colours were used to extract the spectra in Fig. 2. Ionization cones with an opening angle of 90° and a vertex at the radio core position (red 'x') are shown (black lines). The spectra of two intercone regions (red squares) are also shown. Ly α is detected in both cases.

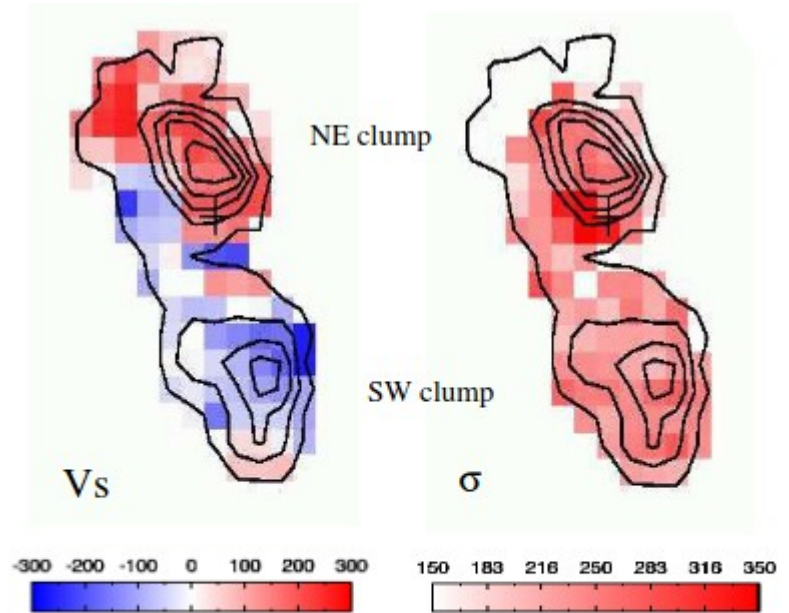


Figure 3. Overlay of the VIMOS Ly α intensity contours of the quiescent gas (i.e., components NE and SW) with the Ly α velocity field (left) and line width σ (right). The position of the radio core is indicated with a cross. Zero velocity corresponds to a redshift $z = 2.490$. The velocity field appears symmetric and ordered, suggesting either rotation or radial flows.

VLT VIMOS (Visible Multiobject Spectrograph) obserwuje galaktykę na $z=2.5$ z użyciem 1600 sektorów – przykładowe wyniki (Villan-Martin i in., 2002).

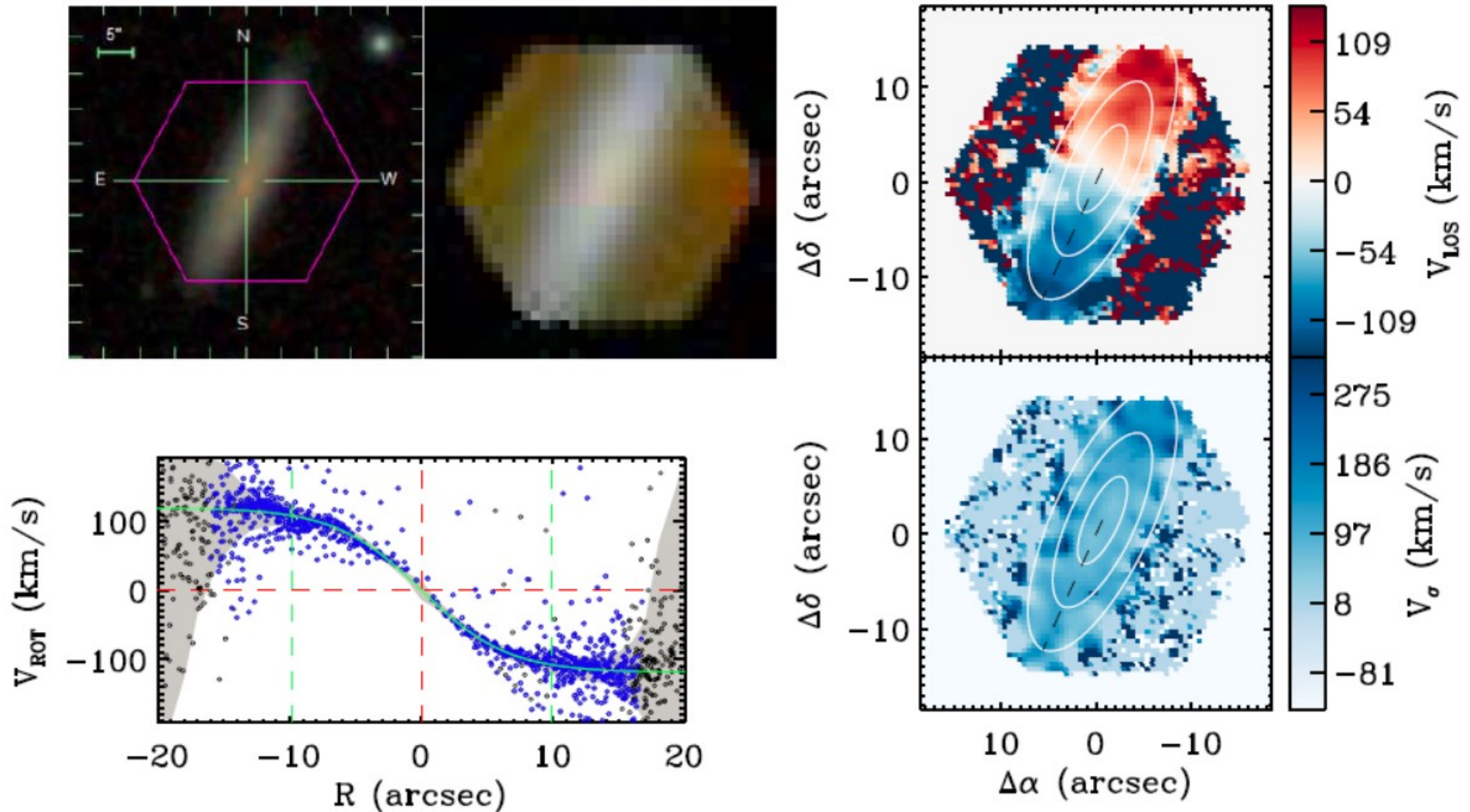
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

8341-12701

χ^2 : 1.13, V_{sys} : 7089.2, V_{amp} : -127.1, R_{damp} : 6.6, ϕ : 155.3, θ : 69.7, 0.7, 1.4, 1,



SDSS-IV MaNGA krzywa rotacji galaktyki (Villan-Martin i in., 2002).

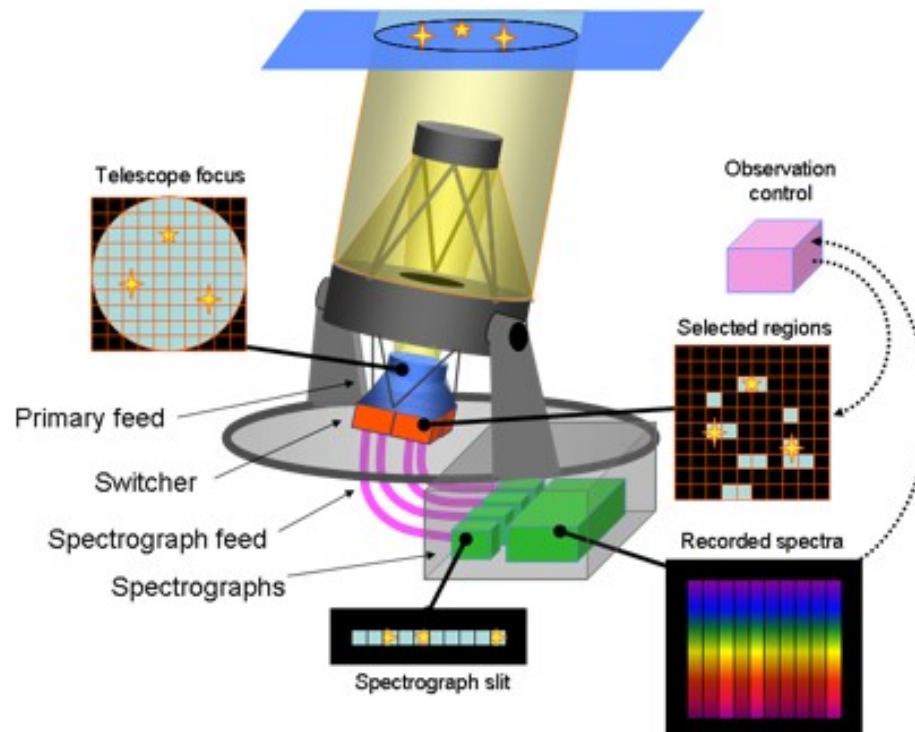
Budowa spektrografu

Rodzaje szczelin w spektrografie

Spektroskopia integralna (ang. integral field spectroscopy)

Diverse field spectroscopy to nazwa spektroskopii integralnej w której można dowolnie, automatycznie zmieniać układ sektorów obrazu które mają dawać widmo.

Funkcjonalnie przypomina połączenie spektroskopii wieloświatłowodowej i integralnej. Daje możliwość wygodnego wyboru miejsc na niebie których widmo nas interesuje.



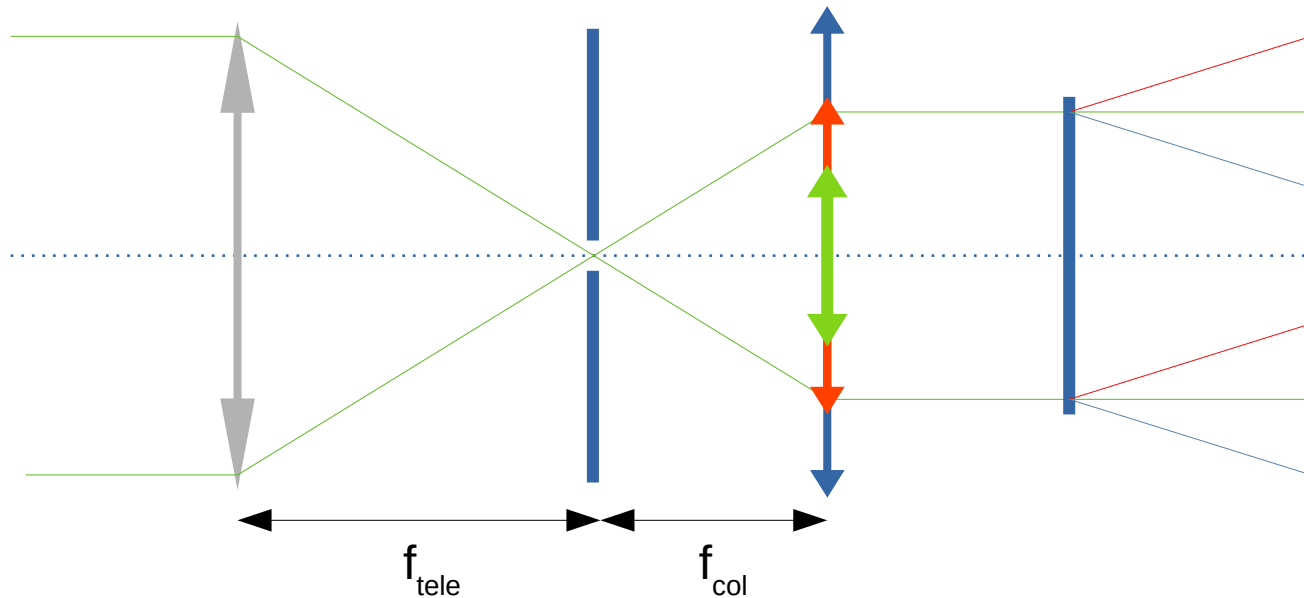
Diverse field spectroscopy – schemat ideowy (www.dur.ac.uk).

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator



Kolimator ma zadanie uzyskać wiązkę równoległą z wiązki rozbieżnej wychodzącej ze szczeliny (lub światłowodu). Aby to osiągnąć szczelina (lub końcówka światłowodu) musi znajdować się w ognisku kolimatora.

Kolimator powinien mieć światłosiłę identyczną lub mniejszą niż teleskop, W przeciwnym wypadku pojawią się straty światła, gdyż nie obejmie całej wiązki światła wychodzącej ze szczeliny.

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator

Kolimator soczewkowy czy zwierciadlany:

Soczewkowy:

mniejsze straty światła, ale wprowadza aberrację chromatyczną

Zwierciadlany osiowy:

straty światła ze względu na konieczność wprowadzenia światła w ognisku,
z zwierciadło paraboliczne praktycznie nie ma wad optycznych,
powłoki odblaskowe mogą być nieco mniej efektywne
niż soczewki antyodblaskowe

Zwierciadlany pozaosiowy:

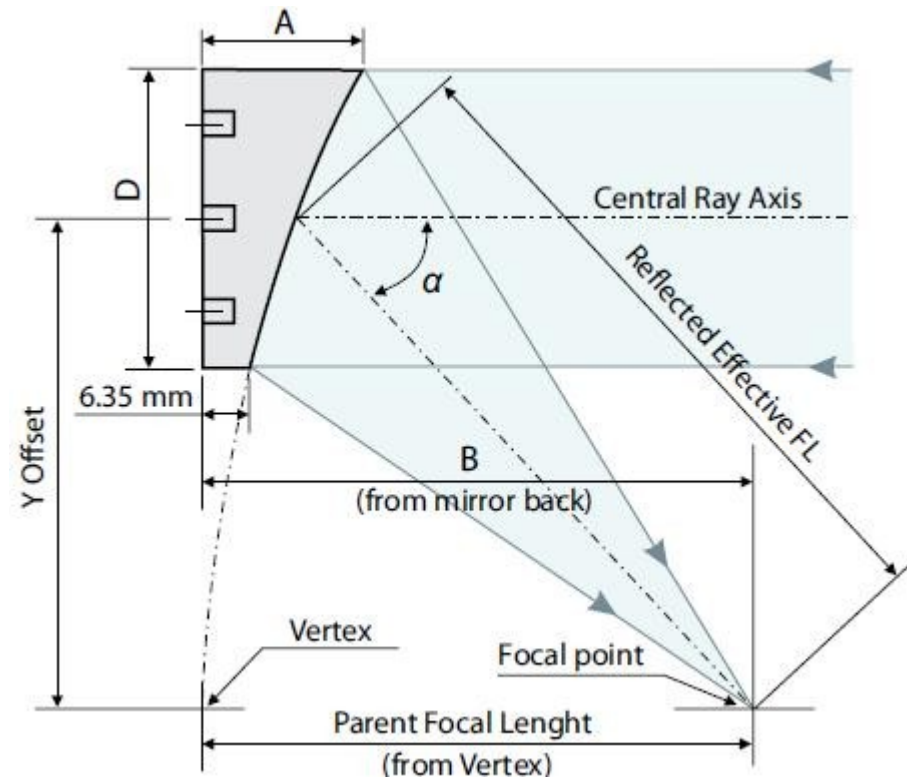
jak zwierciadlany ale bez problemu z przesłanianiem

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator



Paraboliczne zwierciadła pozaosiowe
(www.specialtycomponents.com).



Schemat działania i podstawowe parametry
parabolicznego zwierciadła pozaosiowego
(www.standaphotonics.com).

Paraboliczne zwierciadła pozaosiowe mają dwie ogniskowe:

1. ogniskowa paraboli której kształt opisują
2. odległość od środka zwierciadła do ogniska

Zwykle (osiowe) zwierciadła mają te dwa parametry identyczne.

Budowa spektrografu

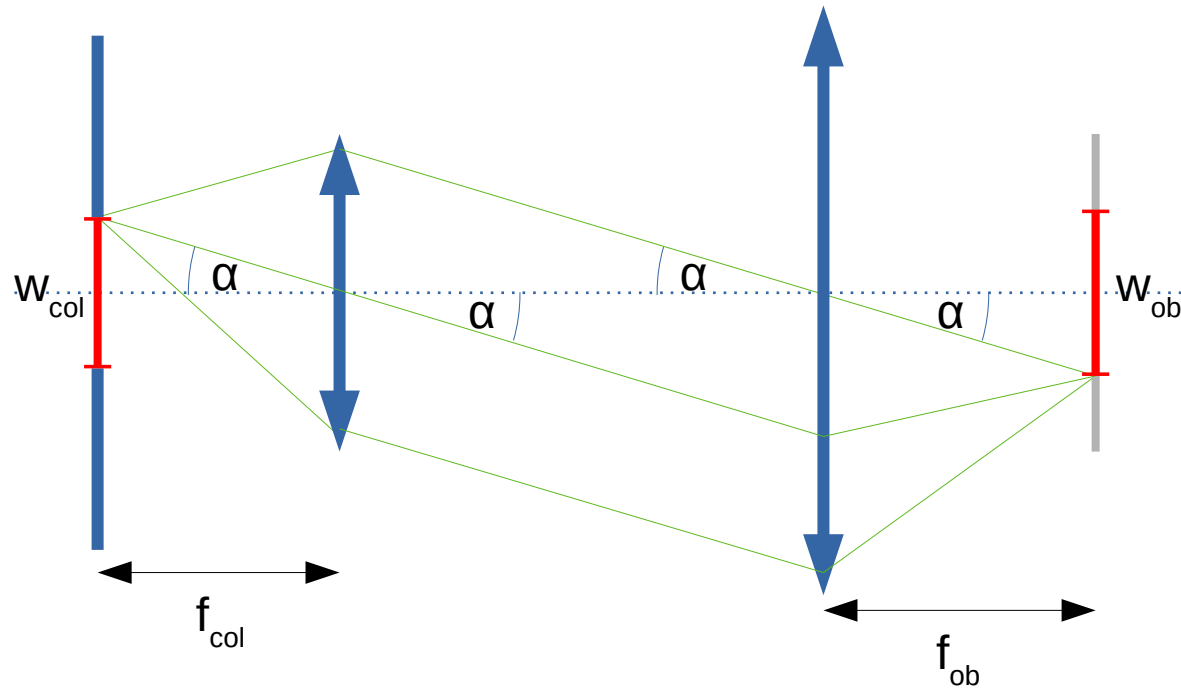
Szczelina spektrografu a kolimator



Produkcja zwierciadeł pozaosiowych na wyspecjalizowanej tokarce CNC
(www.thorlabs.com).

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator



Ogniskowa kolimatora wpływa na powiększenie P obrazu szczeliny i rozmiar oraz rozdzielczość całego widma w kamerze spektrografu.

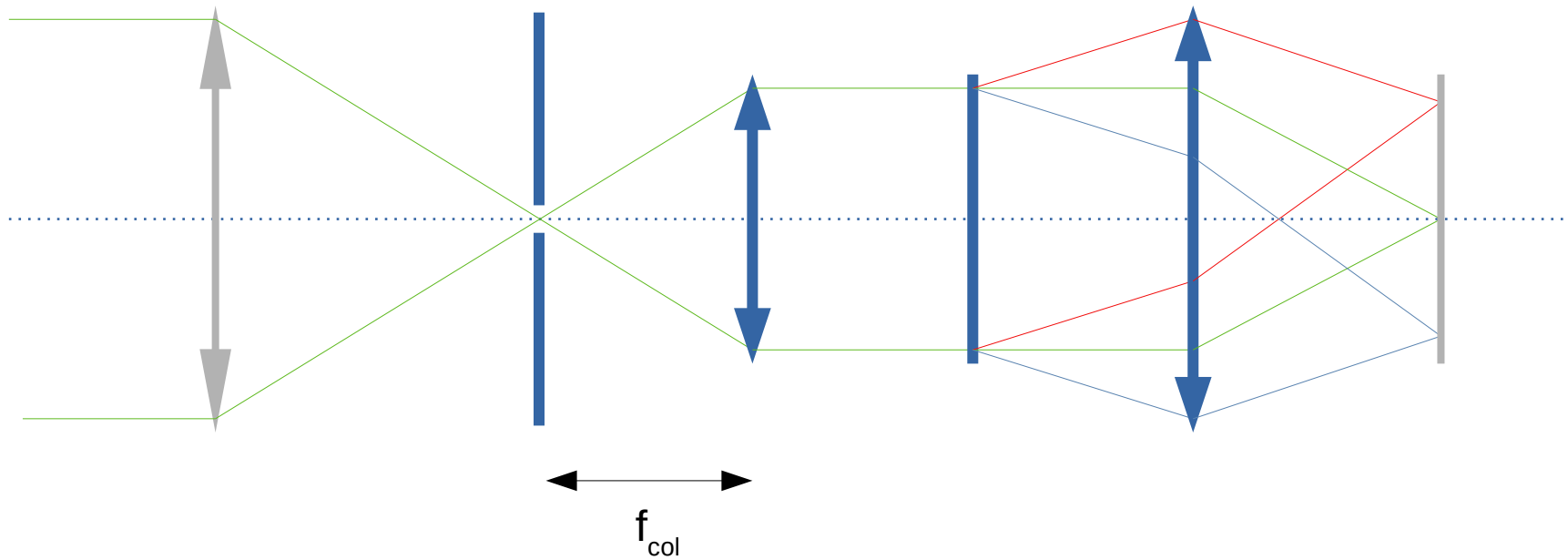
$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{w_{col}}{f_{col}} = \frac{w_{ob}}{f_{ob}}$$

$$P = \frac{w_{ob}}{w_{col}} = \frac{f_{ob}}{f_{col}}$$

Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator

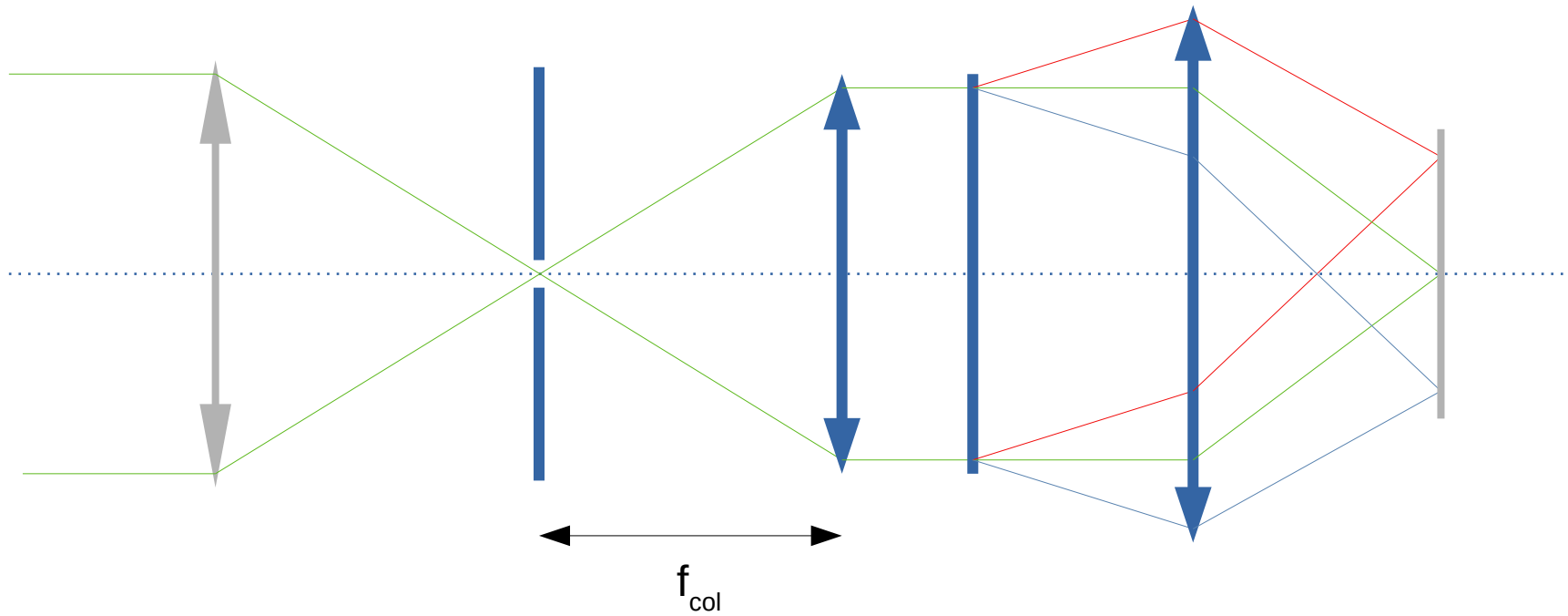
Jakie zmiany powoduje wydłużenie ogniskowej kolimatora?



Budowa spektrografu

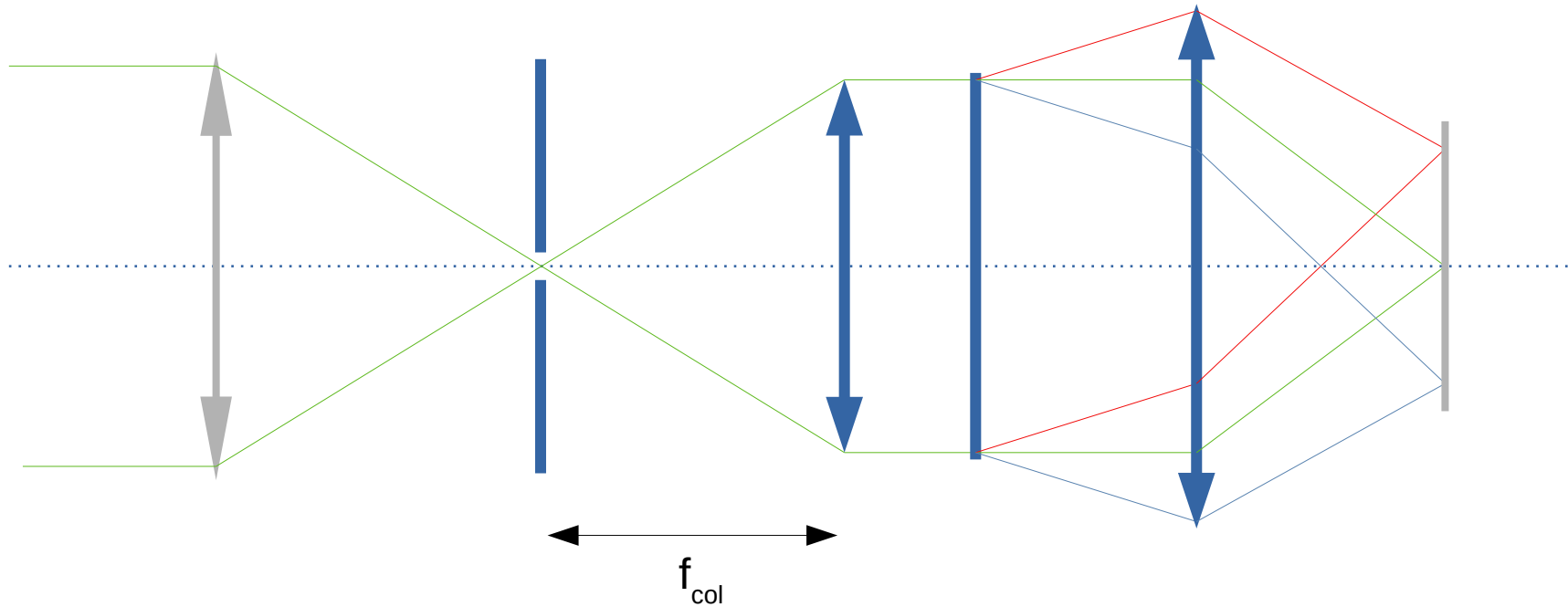
Szczelina spektrografu a kolimator

Jakie zmiany powoduje wydłużenie ogniskowej kolimatora?



Budowa spektrografu

Szczelina spektrografu a kolimator



Wydłużenie ogniskowej kolimatora powoduje:

- konieczność zastosowania kolimatora o większej aperturze (co może oznaczać też dłuższą ogniskową kolimatora i zmniejszenie powiększenia obrazu szczeliny na kamerze)
- większą średnicę wiązki równoległej
- konieczność zastosowania większego elementu dyspersyjnego
- konieczność zastosowania obiektywu o większej aperturze (co może oznaczać też dłuższą ogniskową obiektywu i zwiększenie powiększenia obrazu szczeliny na kamerze)
- zmniejszenie obrazu szczeliny w kamerze
- zwiększenie rozdzielczości szczelinowej i dyfrakcyjnej spektrografu

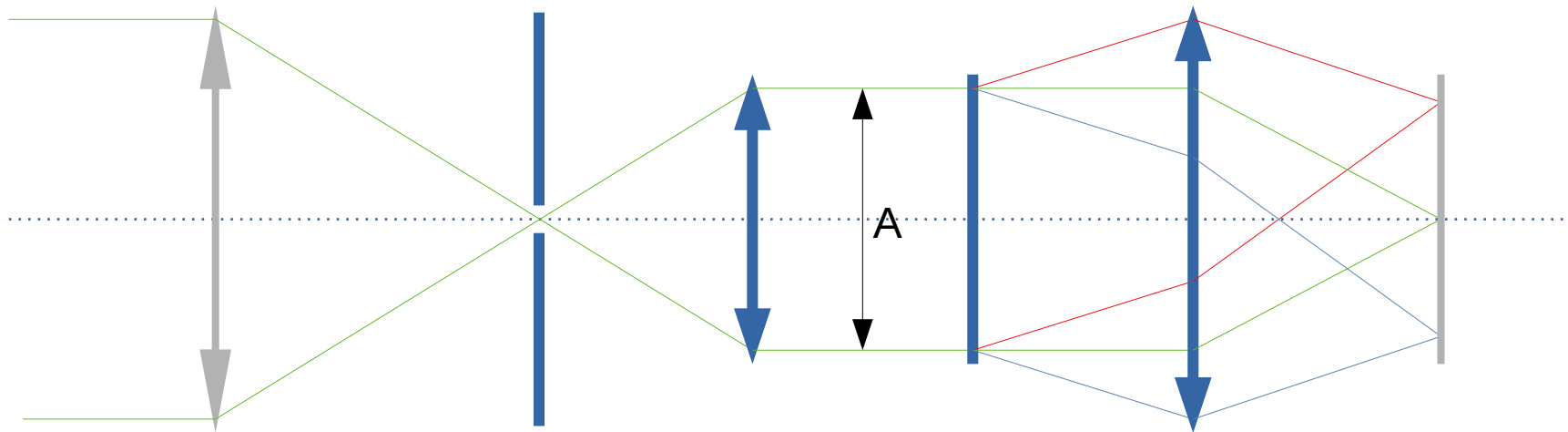
Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny

Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny

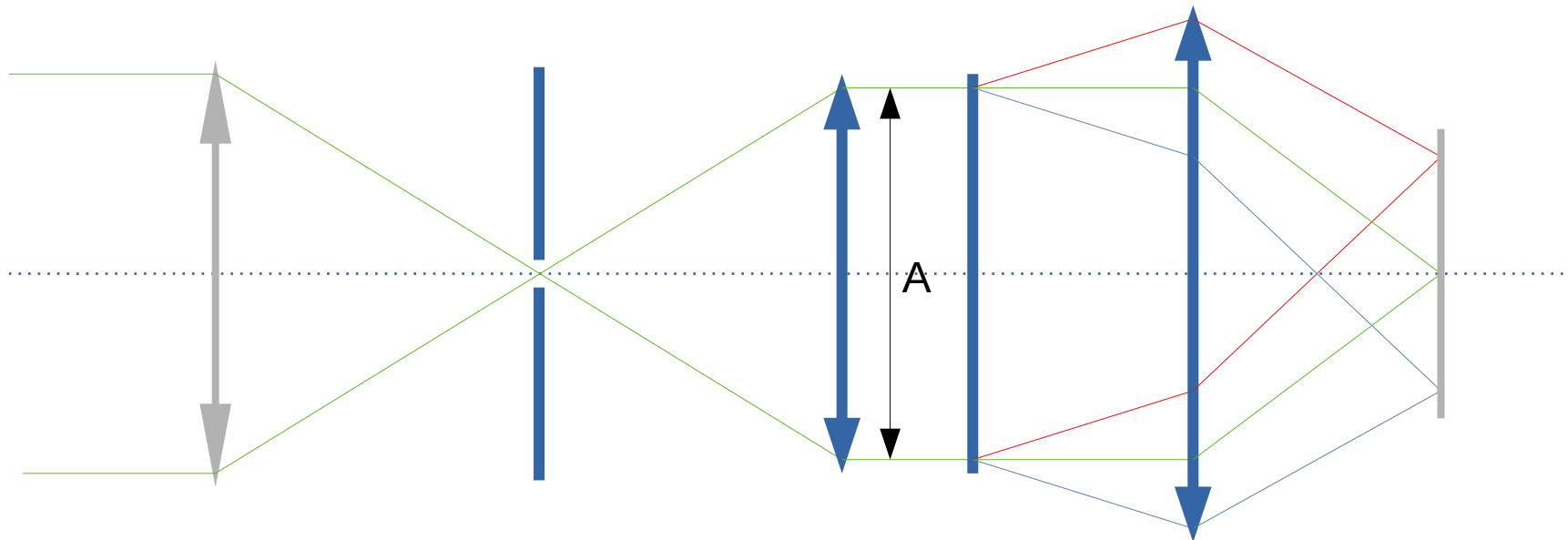
Jakie zmiany powoduje zmiana średnicy skolimowanej wiązki światła?



Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny

Jakie zmiany powoduje zmiana średnicy skolimowanej wiązki światła?

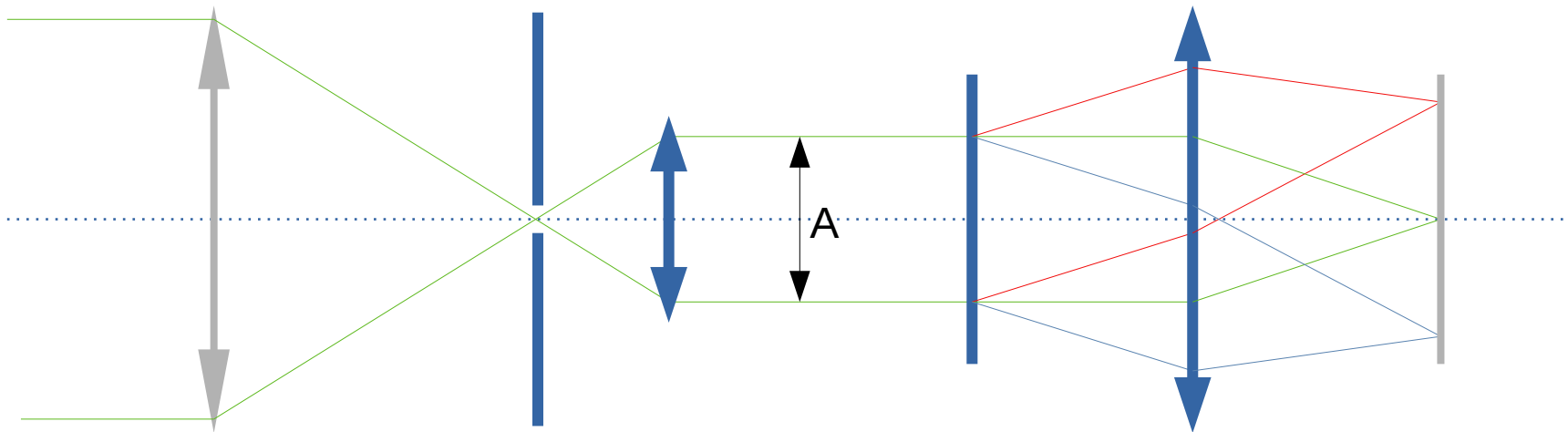


Im większa apertura A skolimowanej wiązki światła tym potrzeba większej siatki/pryzmatu oraz obiektywu (lub pojawią się straty światła), a także maleje powiększenie spektrografu (przy stałej światłosile kolimatora) i rośnie jego rozdzielczość szczelinowa oraz dyfrakcyjna.

Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny

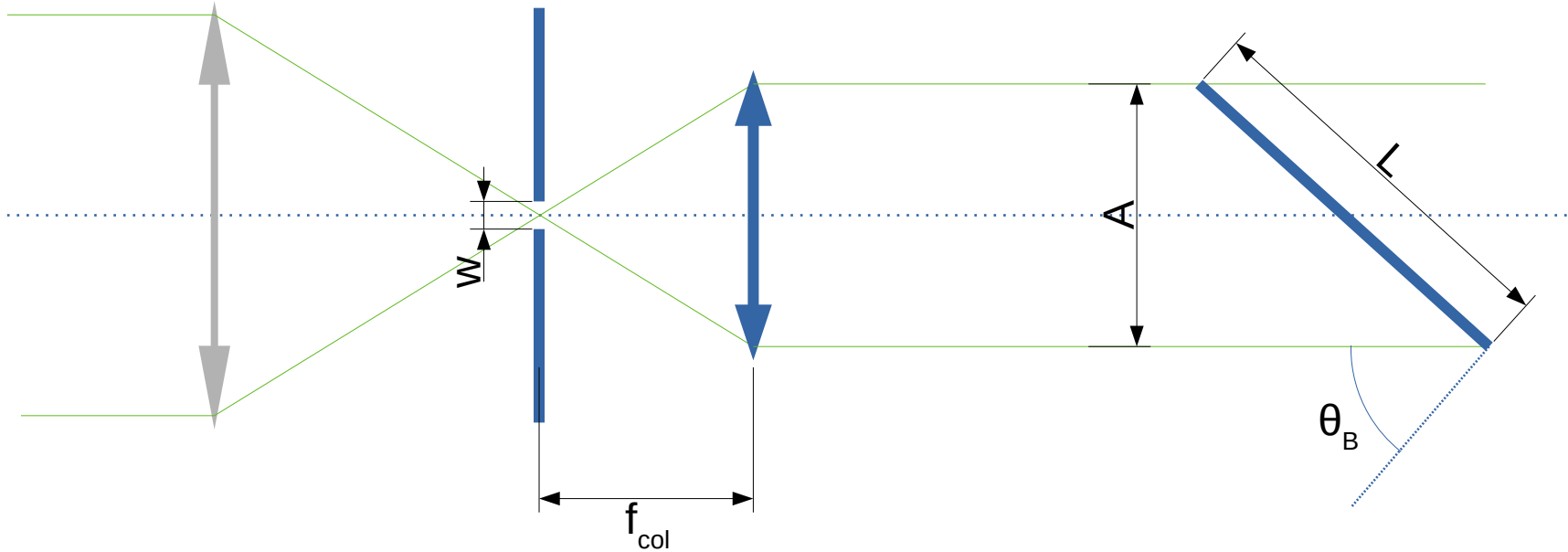
Jakie zmiany powoduje zmiana średnicy skolimowanej wiązki światła?



Im mniejsza apertura A skolimowanej wiązki światła tym mniejszy fragment siatki/pryzmatu jest wykorzystywany. W efekcie spektrograf działa tak jakby miał mniejszą siatkę/pryzmat.

Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny



$$R_{slit}^{gr} = \frac{2 L \sin \theta_B f_{col}}{w A}$$

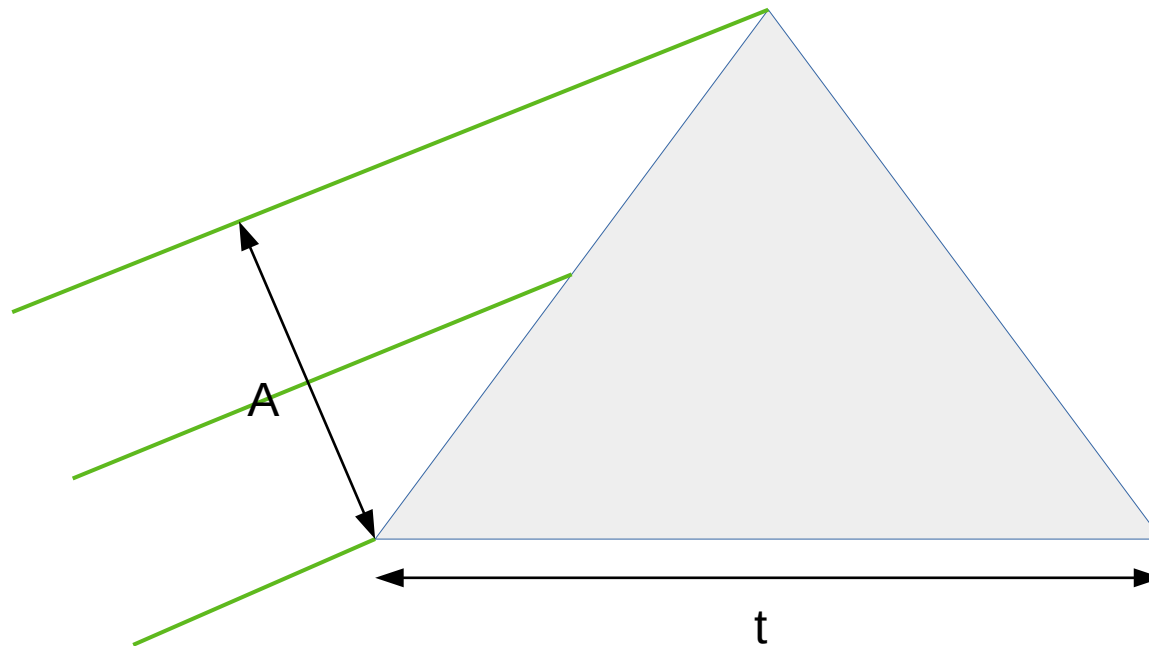
$$R_{diff}^{gr} = N n = 2 L \frac{\sin \theta_B}{\lambda}$$

Oświetlenie siatki a rozdzielczość spektrografu:

- rozdzielczość dyfrakcyjna siatki zależy od L , a L maleje liniowo wraz z A
- rozdzielczość „szczelinowa” siatki zależy od L/A więc nie zmienia się (o ile zmiana średnicy kolimatora nie zmienia również jego f_{col})

Budowa spektrografu

Kolimator a element dyspersyjny



$$R_{slit}^{pr} = t \frac{dn}{d\lambda} \frac{\lambda}{A} \frac{f_{col}}{w}$$

$$R_{diff}^{pr} = A \frac{d\theta}{d\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda}$$

Oświetlenie pryzmatu a rozdzielczość spektroskopu:

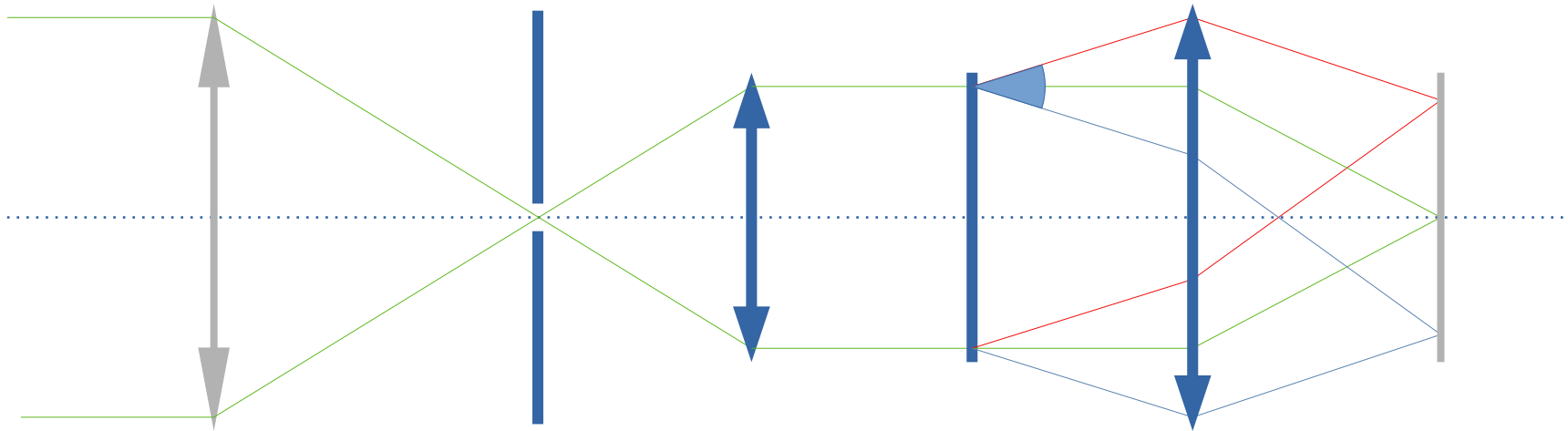
- rozdzielczość dyfrakcyjna pryzmatu zależy od t , a efektywne t maleje wraz z A
- rozdzielczość „szczelinowa” pryzmatu zależy od t/A więc nie zmienia się (o ile zmiana średnicy kolimatora nie zmienia również jego f_{col})

Budowa spektrografu

Element dyspersyjny i obiektyw

Budowa spektrografu

Element dyspersyjny i obiektyw



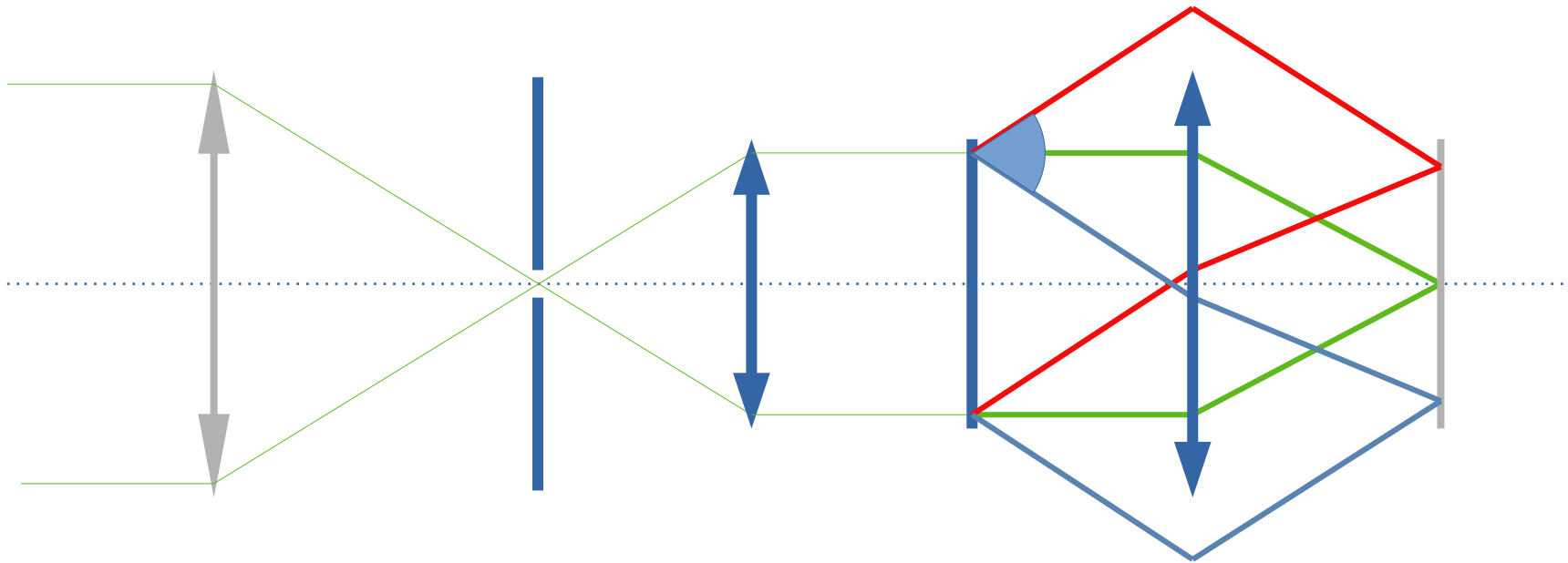
Rozbieżność wiązki światła po rozszczepieniu:

Im silniejsza dyspersja tym większa rozbieżność wiązki, co oznacza konieczność stosowania obiektywów o większej aperturze oraz szerszym polu widzenia lub potencjalne straty światła.

Warto pamiętać, że przekrój wiązki światła po rozszczepieniu nie jest kołowy, co utrudnia dopasowanie obiektywu.

Budowa spektrografu

Element dyspersyjny i obiektyw



Rozbieżność wiązki światła po rozszczepieniu:

Im silniejsza dyspersja tym większa rozbieżność wiązki, co oznacza konieczność stosowania obiektywów o większej aperturze oraz szerszym polu widzenia lub potencjalne straty światła.

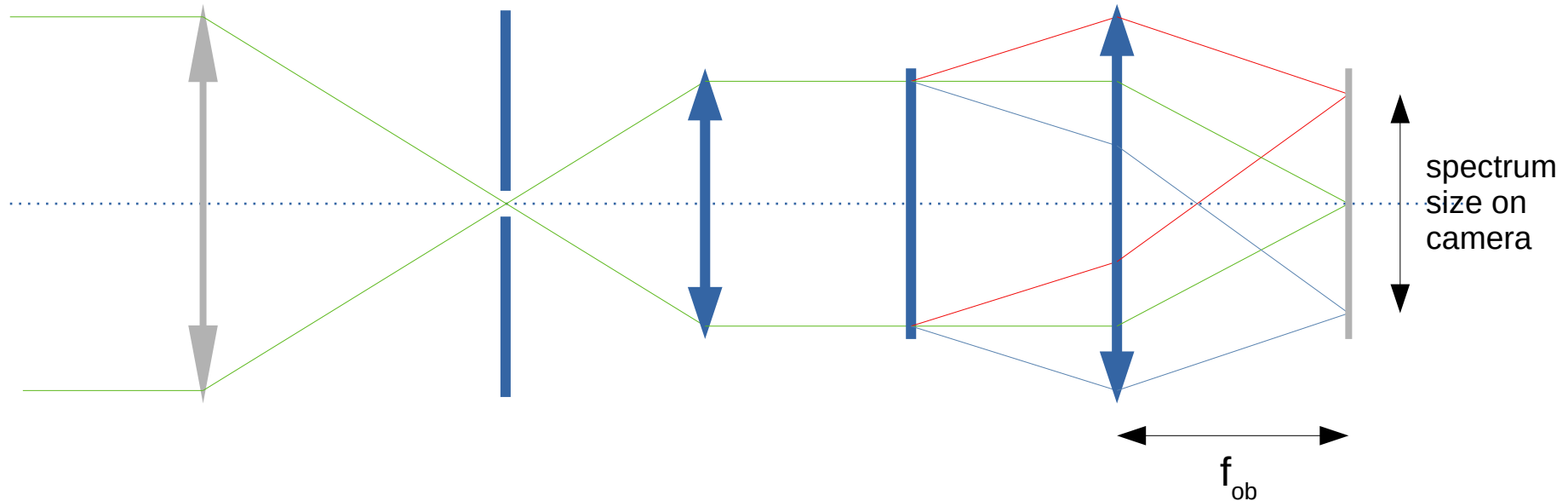
Warto pamiętać, że przekrój wiązki światła po rozszczepieniu nie jest kołowy, co utrudnia dopasowanie obiektywu.

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera



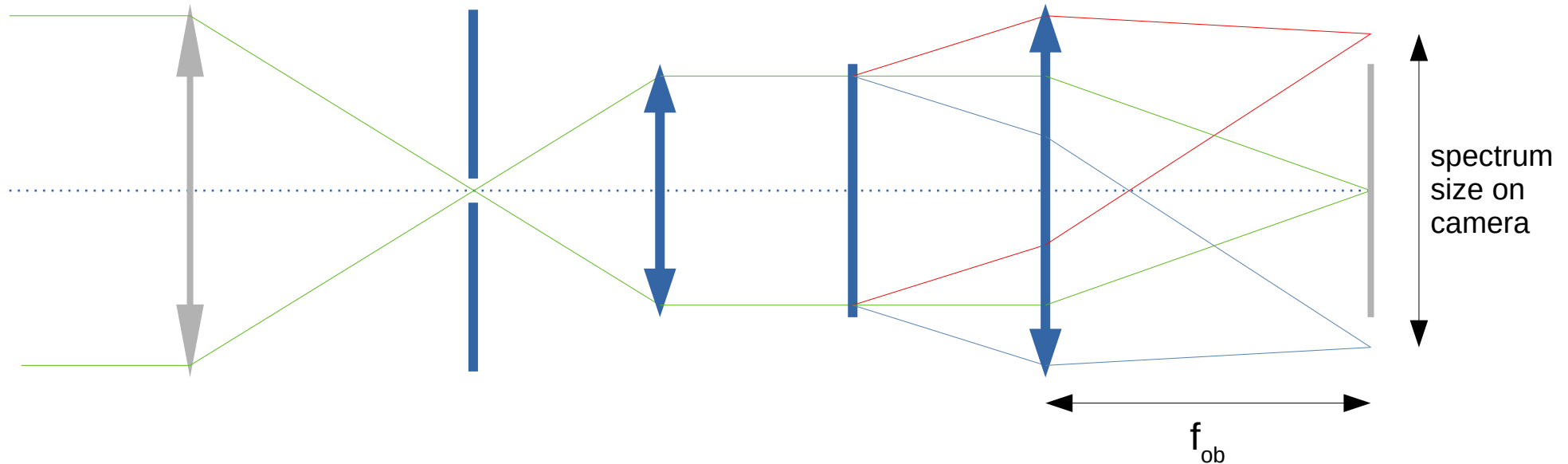
Zwiększenie ogniskowej obiektywu zwiększa rozmiar widma na kamerze.
Wymaga to kamery z większym chipem i większymi pikselami (albo binning).

Zmniejszenie ogniskowej obiektywu zmniejsza rozmiar widma na kamerze.
Można zastosować kamerę z mniejszym chipem, ale są dwa problemy:

1. Zmniejsza się światłosiła $N=f_{ob}/A_{ob}$, a trudno zbudować obiektyw o bardzo małym N i dzięki temu zachować odpowiednią średnicę, by nie było strat światła.
2. Potrzeba kamery o mniejszych pikselach, a te nie mogą być dowolnie małe.

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera



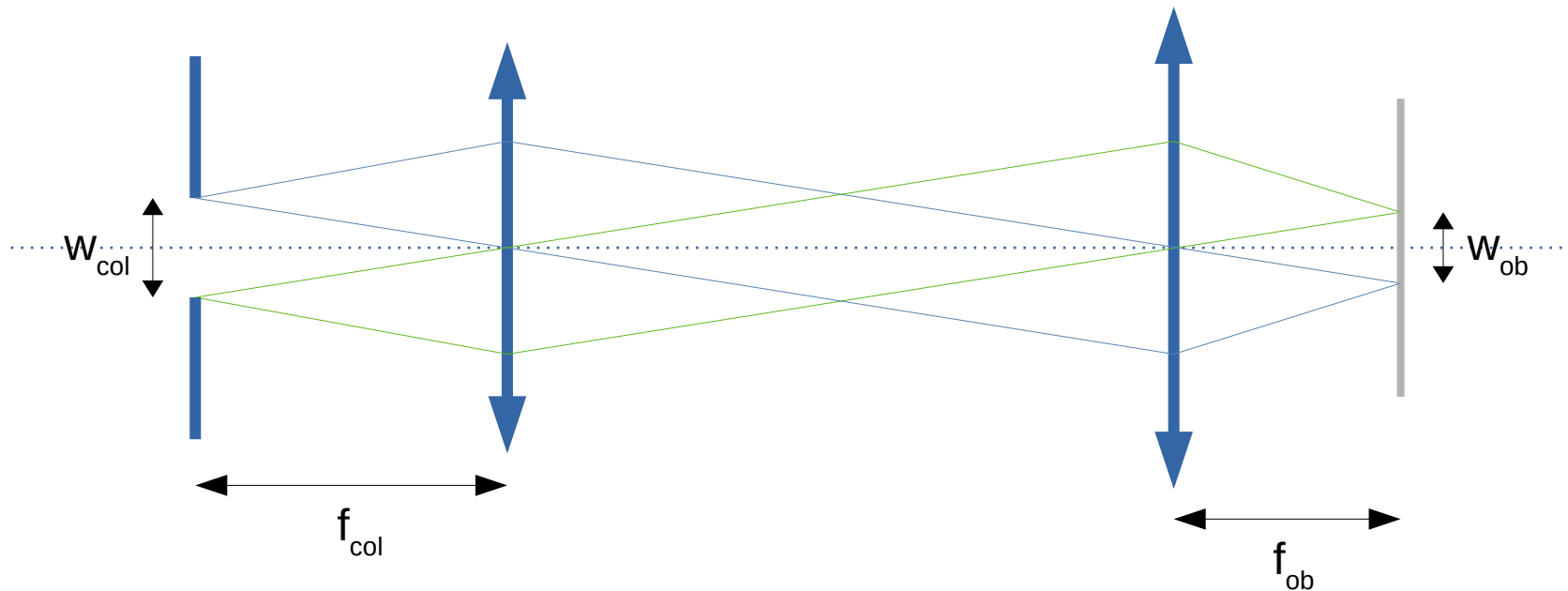
Zwiększenie ogniskowej obiektywu zwiększa rozmiar widma na kamerze.
Wymaga to kamery z większym chipem i większymi pikselami (albo binning).

Zmniejszenie ogniskowej obiektywu zmniejsza rozmiar widma na kamerze.
Można zastosować kamerę z mniejszym chipem, ale są dwa problemy:

1. Zmniejsza się światłość $N=f_{ob}/A_{ob}$, a trudno zbudować obiektyw o bardzo małym N i dzięki temu zachować odpowiednią średnicę, by nie było strat światła.
2. Potrzeba kamery o mniejszych pikselach, a te nie mogą być dowolnie małe.

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera



Większość spektrografów astronomicznych ma rozdzielczość ograniczoną rozmiarem szczeliny. Najmniejsze detale w widmie mają więc rozmiar na kamerze równy rozmiarowi obrazu szczeliny:

$$W_{ob} = \frac{f_{ob}}{f_{col}} W_{col}$$

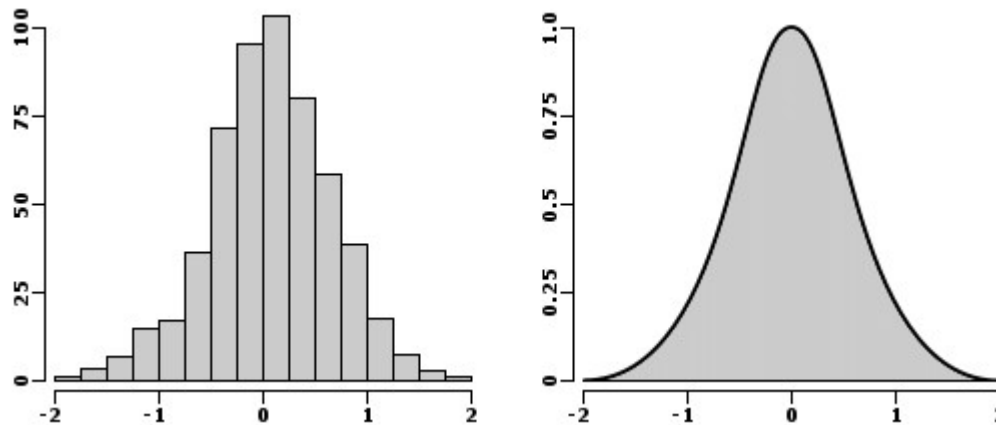
Kamery trzeba dobierać tak by piksel był odpowiedni w stosunku do w_{ob} .
Jaki piksel jest więc odpowiedni?

Budowa spektrografu

Próbkowanie obrazu

Rejestracja dowolnego obrazu w kamerze cyfrowej wiąże się zawsze z przekształceniem sygnału ciągłego (nieskończonej liczby punktów obrazu) w sygnał dyskretny (skończona liczba pikseli).

Zbyt mała liczba pikseli nie pozwoli zarejestrować "wszystkich" detali.

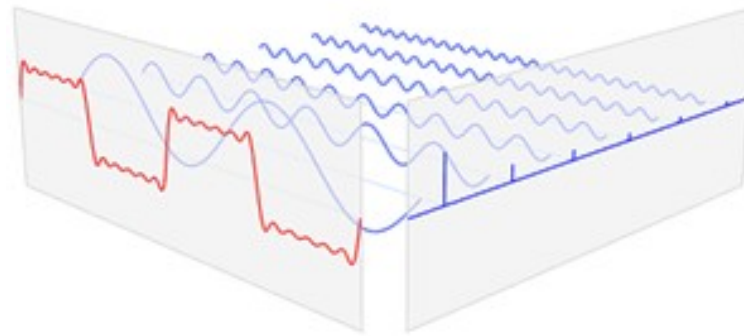


Funkcja dyskretna (z lewej) jest przybliżeniem funkcji ciągłej (z prawej) (Gauthier 2017).

Najmniejsze detale w widmie mają rozmiar obrazu szczeliny.
Jaki powinien być rozmiar pikseli w stosunku do rozmiarów szczeliny?

Budowa spektrografu

Próbkowanie obrazu



Transformacje Fouriera funkcji czerwonej (en.wikiperia.org)

Każdą funkcję ciągłą da się przekształcić w dyskretny ciąg funkcji trygonometrycznych. Najmniejsze detale funkcji ciągłej można wtedy zdefiniować jako funkcje trygonometryczne o najwyższej częstotliwości.

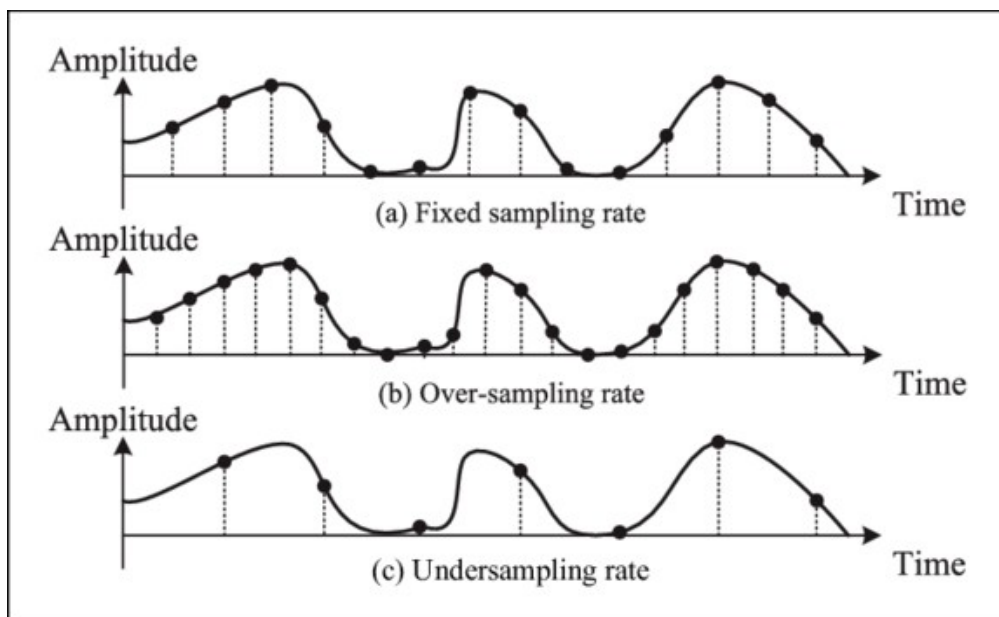
Twierdzenie Nyquista-Shannona:

Funkcję ciągłą można **bezstratnie** (z zachowaniem wszelkich informacji które funkcja ciągła zawiera) przekształcić w funkcję dyskretną, jeśli jest od próbkowana z dostatecznie gęstym próbkowaniem.

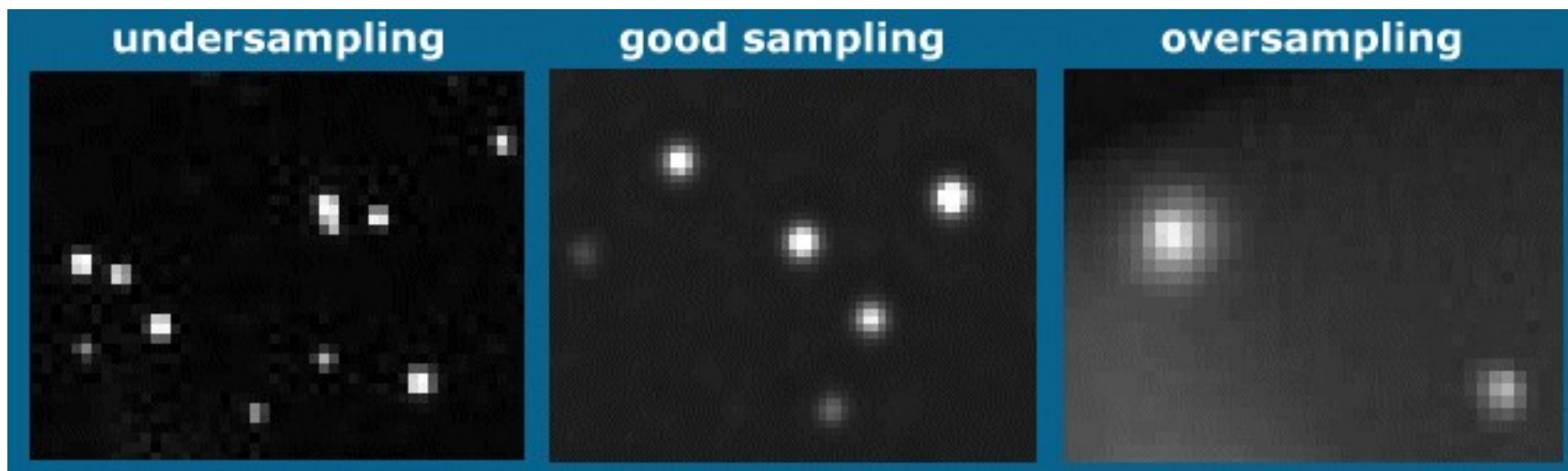
Jeśli funkcja $f(x)$ nie zawiera wyższych częstotliwości w swoim widmie Fouriera niż B , wówczas może być w sposób bezstratny i kompletny przestawiona za pomocą funkcji dyskretnej określonej na punktów x próbkowanych w odstępach co $1/(2B)$.

Budowa spektrografu

Próbkowanie obrazu



Próbkowanie funkcji z różnym krokiem (częstotliwością) (www.themusictelegraph.com).



Zdjęcia nieba = próbkowanie obrazu gwiazd (<http://www.sbig.de>).

Budowa spektrografu

Próbkowanie obrazu

Częstotliwość Nyquista zdefiniowana w oparciu o rozmiar najmniejszych detali T_s :

$$f_N = \frac{1}{2T_s}$$

Próbkowanie z częstotliwością (gęstością punktów) wyższą niż częstotliwość Nyquista nie daje dodatkowych informacji o reprezentowanej funkcji – nadpróbkowanie (oversampling).

Próbkowanie z częstotliwością (gęstością punktów) niższą niż częstotliwość Nyquista powoduje utratę informacji o reprezentowanej funkcji – niedopróbkowanie (undersampling).

W praktyce więc optymalne jest, by piksel kamery miał rozmiar w_{pix} równy połowie najmniejszych detali które chcemy zobrazować:

- w przypadku obrazowania – połowa PSF rejestrowanego obrazu
- w przypadku spektroskopii – połowa rozmiaru obrazu szczeliny w_{ob}

$$w_{ob} = 2 w_{pix}$$

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera

$$\frac{W_{ob}}{f_{ob}} = \frac{W_{col}}{f_{col}}$$
$$R_{slit}^{gr} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2 \operatorname{tg} \theta_b \frac{f_{col}}{w_{col}}$$
$$R_{slit}^{gr} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2 \operatorname{tg} \theta_b \frac{f_{ob}}{w_{ob}}$$

$$w_{ob} = 2 w_{pix}$$

$$w_{pix} = \operatorname{tg} \theta_b \frac{f_{ob}}{R_{slit}^{gr}}$$

Skala widma (ang. pixel scale) w kamerze spektrografu: $\Delta\lambda/w_{pix}$

$$\frac{\Delta\lambda}{w_{pix}} = \frac{\lambda}{\operatorname{tg} \theta_b f_{ob}}$$

Jak widać skala widma w spektrografie z siatką jest zmienna, w każdym punkcie widma jeden piksel kamery obejmuje inny zakres długości fali światła.

Budowa spektrografu

Obiektyw i kamera

$$\frac{w_{ob}}{f_{ob}} = \frac{w_{col}}{f_{col}}$$

$$R_{slit}^{pr} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2 \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{col}}{w_{col}}$$

$$R_{slit}^{pr} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2 \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{ob}}{w_{ob}}$$

$$w_{ob} = 2 w_{pix}$$

$$w_{pix} = \frac{dn}{d\lambda} \lambda \frac{f_{ob}}{R_{slit}^{pr}}$$

Skala widma (ang. pixel scale) w kamerze spektrografu: $\Delta\lambda/w_{pix}$

$$\frac{\Delta\lambda}{w_{pix}} = \frac{d\lambda}{dn} \frac{1}{f_{ob}}$$

Jak widać skala widma w spektrografie z pryzmatem też jest zmienna, ale tym razem wynika to ze zmiennej dyspersji w szkle.

Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

Rozdzielczość: $R = \lambda / \Delta\lambda$

Zakres widmowy: $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$

Wydajność kwantowa / przepustowość: QE

Stabilność: $\Delta\lambda$ / dobę lub $\Delta\nu$ / dobę

Typ spektrografu

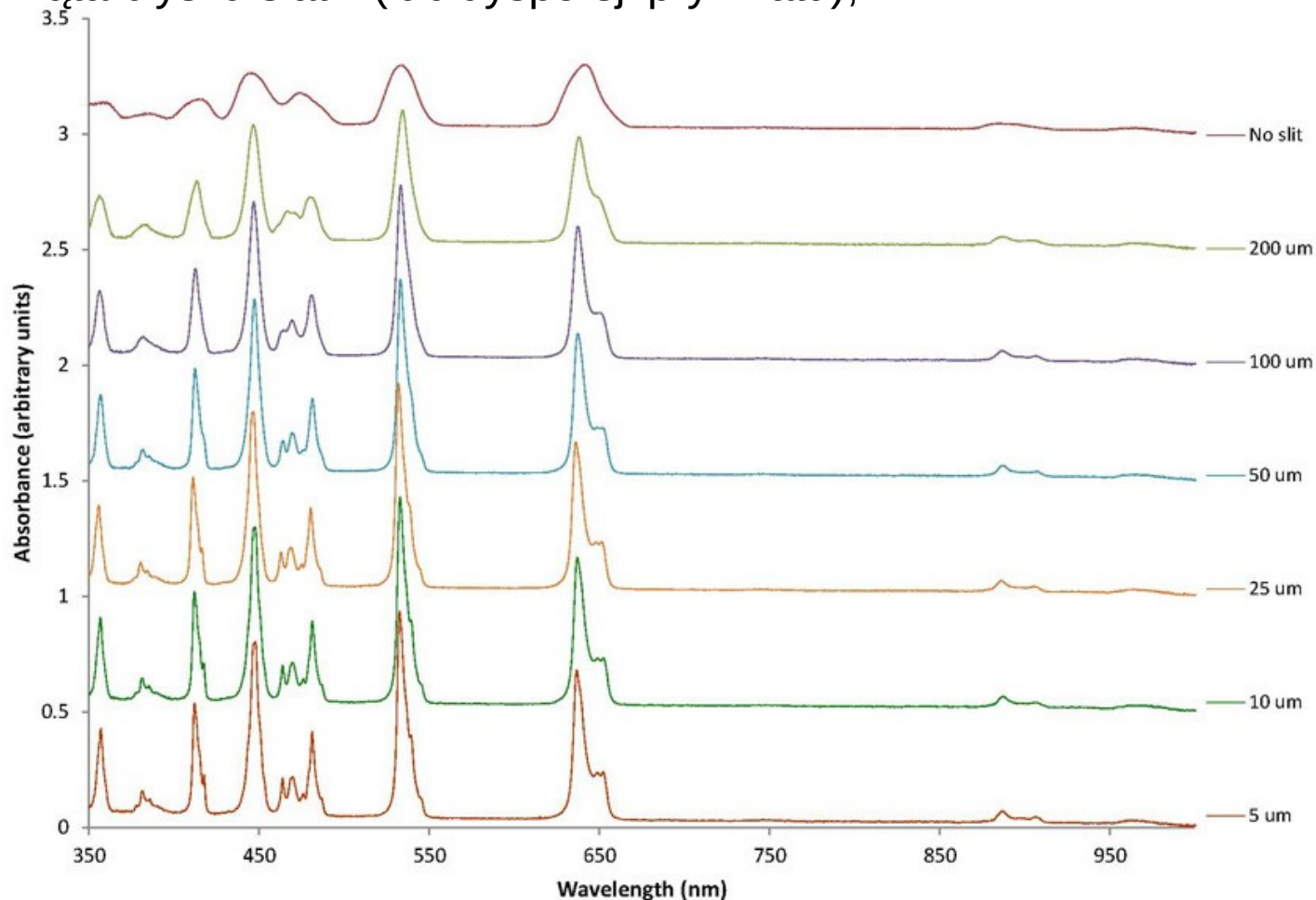
Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

$$\text{Rozdzielczość: } R = \lambda/\Delta\lambda$$

Rozdzielczość spektrografu zależy przede wszystkim od:

- szerokości szczeliny (która jest powiązana z rozmiarem obrazu);
- ogniskowej kolimatora (która jest powiązana z parametrami teleskopu);
- kąta błysku siatki (lub dyspersji pryzmatu);



Zmiana rozdzielczości widma w zależności od szerokości szczeliny (www.oceaninsight.com).

Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

$$\text{Zakres widmowy: } \Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$$

Wydajność kwantowa: QE

Zakres widmowy i QE zależy od:

- transmisji atmosfery ziemskiej;
- odbijalności i transmisji elementów optycznych w teleskopie;
- odbijalności i transmisji elementów optycznych w spektrografie;
- krzywej czułości detektora (kamery);

Wydajność kwantowa (transmisja/przepustowość) spektrografu
(ang. light throughput lub quantum efficiency/QE)

zależy dodatkowo od:

- szerokości szczeliny;
- rozmycia obrazu obserwowanego obiektu
(seeing, AO, wady optyczne, błędy śledzenia)

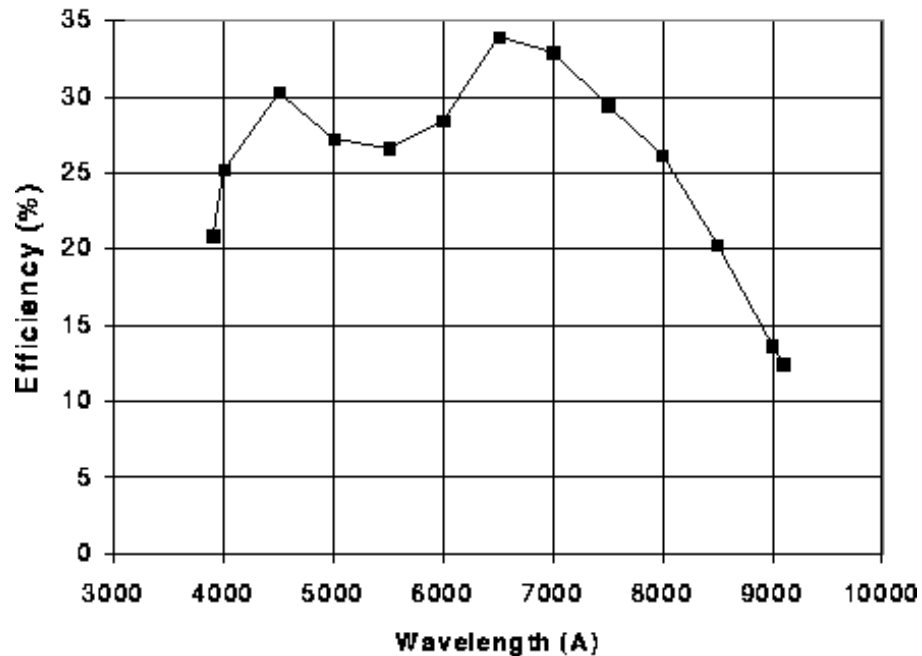
Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

$$\text{Zakres widmowy: } \Delta\lambda = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$$

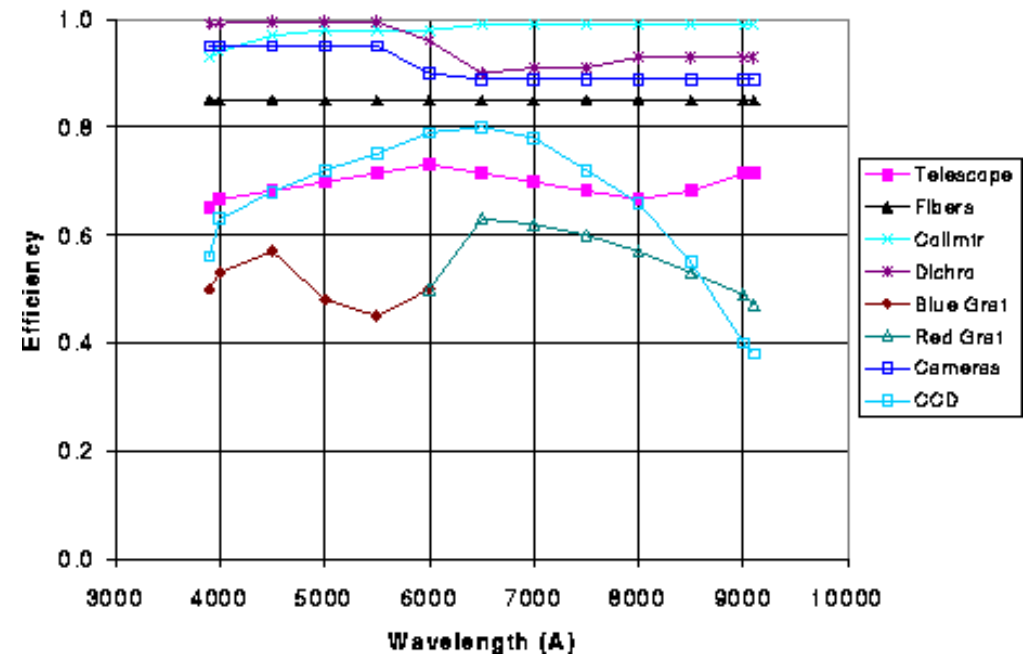
Wydajność kwantowa: QE

SDSS Spectrograph Throughput



Wydajność spektrografu SDSS, bez uwzględnienia kamery
(www.astro.princeton.edu).

Component Efficiency

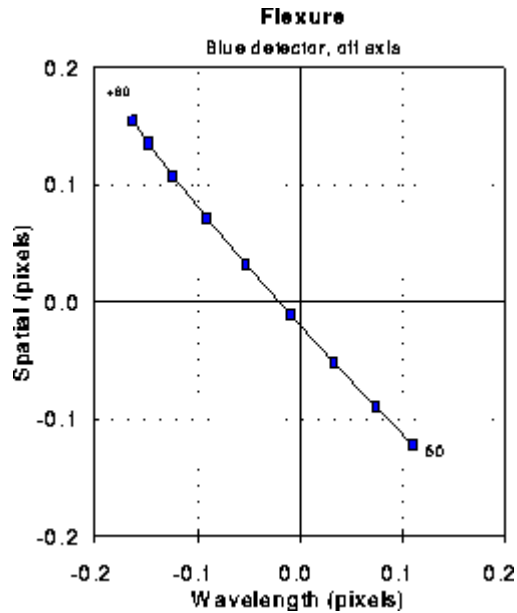


Składowe wydajności spektrografu SDSS
(www.astro.princeton.edu).

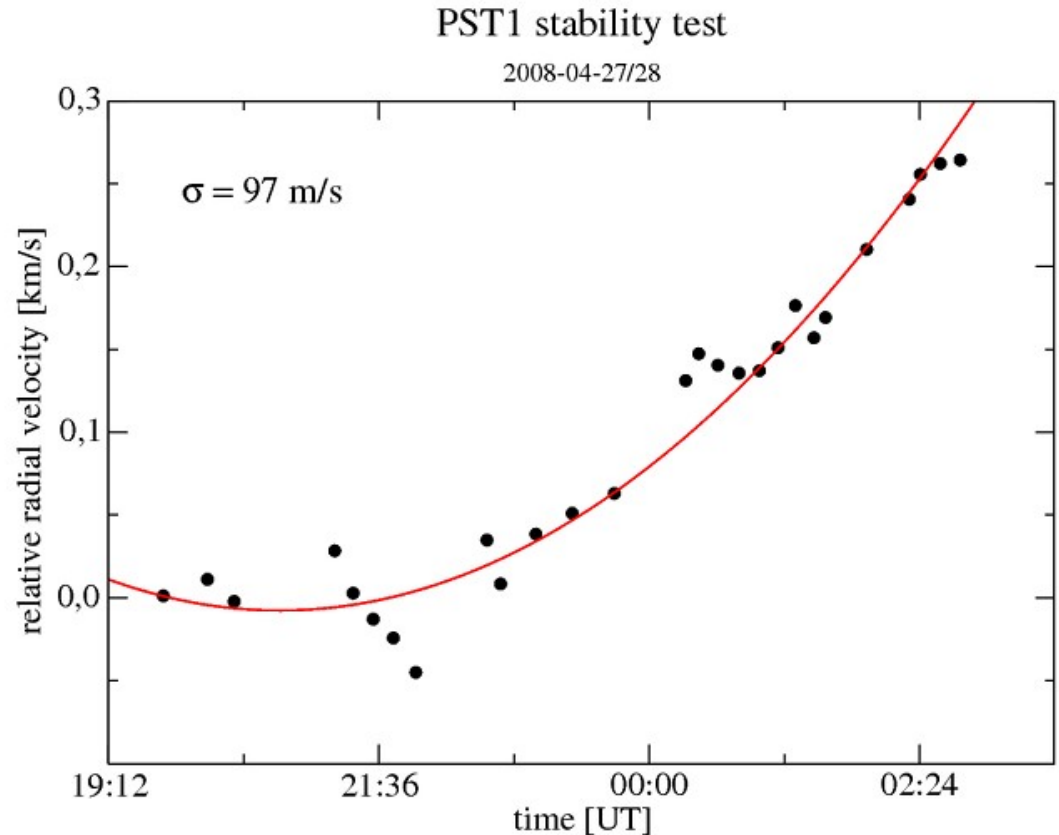
Budowa spektrografu

Podstawowe parametry spektrografu

Stabilność: $\Delta\lambda$ / dobę



Stabilność spektrografu SDSS,
ze względu na gięcia mechaniczne
(www.astro.princeton.edu).



Stabilność spektrografu zależy od:

- zmian temperatury i ciśnienia wewnątrz spektrografu;
- **zmian oświetlenia szczeliny spektrografu;**
- gięć mechanicznych spektrografu;
- stabilności lampy kalibracyjnej (źródła światła używanego jako odniesienie);

Budowa spektrografu

Funkcja celu - optymalizacja

Budowa spektrografu

Funkcja celu, kosztu (ang. merit function)

Optymalizacja jedno-kryterialna

Poszukiwanie ekstremum funkcji celu, która wyraża tylko jedno kryterium.

Przykładem funkcji celu jest suma kosztów produkcji.
Innym przykładem jest suma kwadratów odchyleń.

Optymalizacja wielo-kryterialna

Poszukiwanie ekstremum funkcji celu, która wyraża kompromis pomiędzy różnymi kryteriami.

Przykładem są koszty produkcji i koszty zwrotów gwarancyjnych.
Innym przykładem czas pracy i moc silnika raketowego (impuls właściwy).

Budowa spektrografu

Funkcja celu, kosztu (ang. merit function)

W spektroskopii astronomicznej występuje wiele parametrów, które mogą posłużyć jako kryteria w optymalizacji budowy spektrografu.

Optymalizacja transmisji światła T i rozdzielczości R ,
przykładowa funkcja celu M :

$$M = T^2 R^{0.4}$$

Gdy stosujemy szczelinę węższą niż obraz gwiazdy w teleskopie wówczas:

$$M \approx w R = w^2 \left(\frac{f_{col}}{w} \right)^{0.4} = w^{1.6} f_{col}^{0.4}$$

Limity stosowania powyższej funkcji M :

Jeśli szczelina zbliży się szerokością do długości fali światła wówczas transmisja będzie maleć, ale rozdzielczość przestanie rosnać (limit dyfrakcyjny).

Jeśli szczelina będzie większa niż obraz gwiazdy wówczas ani transmisja ani rozdzielczość nie będą się zmieniać.

Budowa spektrografu

Funkcja celu, kosztu (ang. merit function)

Optymalizacja stabilności spektrografu $\Delta\lambda$, transmisji T i rozdzielczości R , przykładowa funkcja M :

$$M = \Delta \lambda^{-1} T R$$

Jedną z metod zwiększenia stabilności spektrografu jest zastosowanie światłowodu zamiast klasycznej szczeliny.

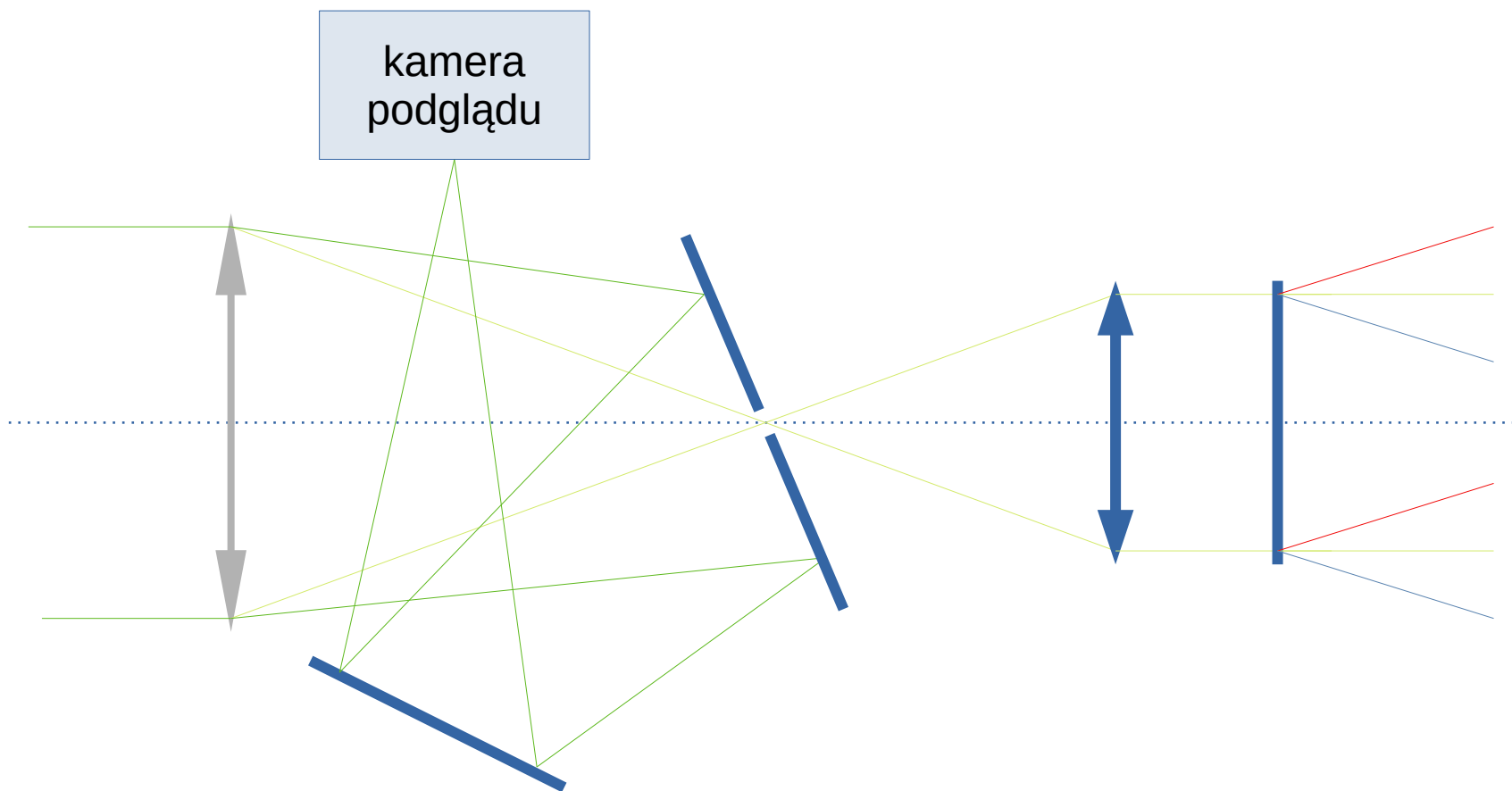
Jednak wówczas pojawiają się straty światła, gdyż szczelina przepuszcza wszystkie długości fali, a światłowód jak każde szkło częściowo je pochłania.

Budowa spektrografu

Niezbędne akcesoria

Budowa spektrografu

Guider = śledzik

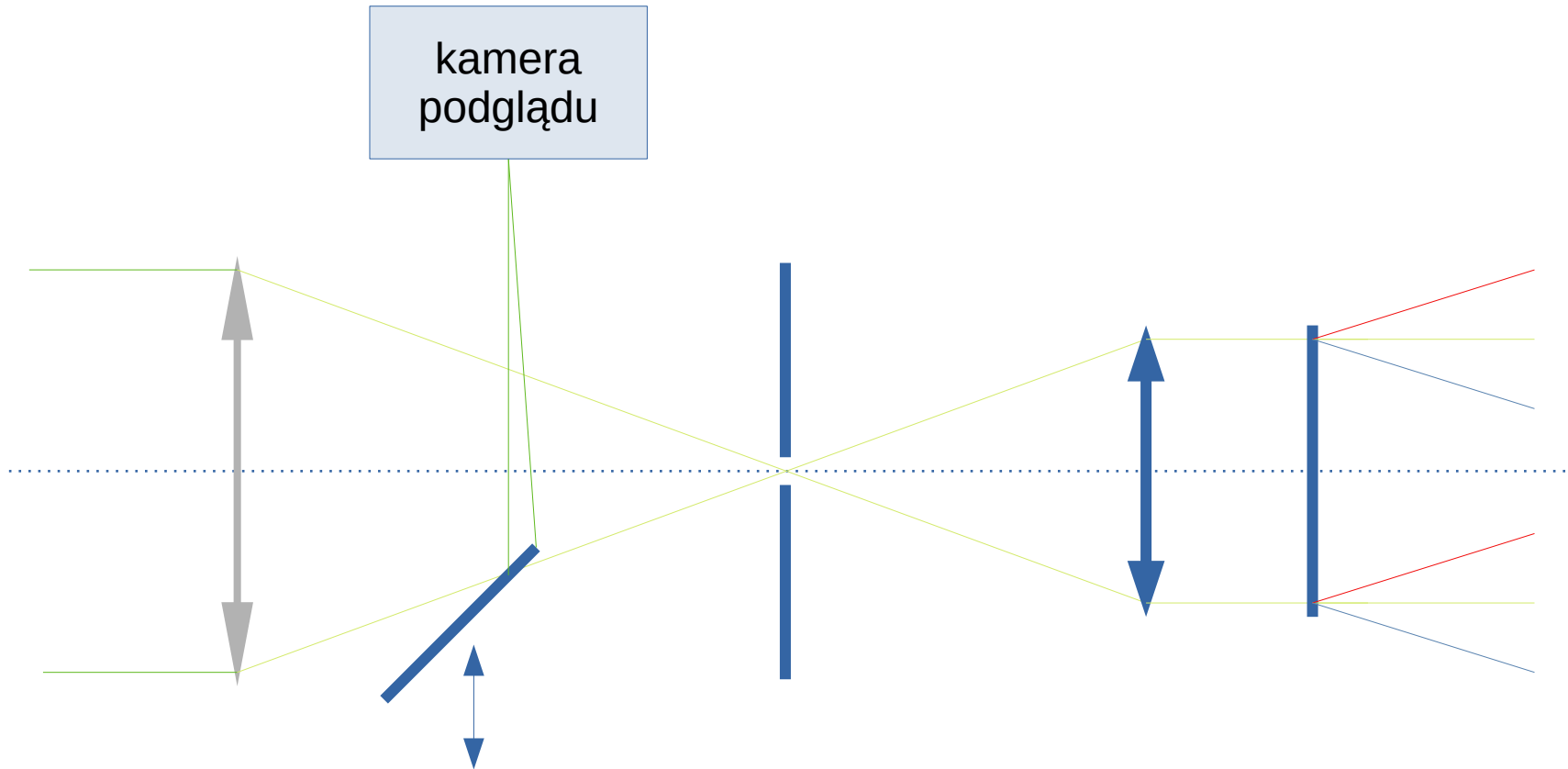


Przykładowy układ optyczny pomiędzy teleskopem a spektrografem.

Śledzik (ang. guider) rozdziela światło z teleskopu na wiązkę wchodzącą do spektrografu oraz wiązkę skierowaną do kamery podglądu (guidera).

Budowa spektrografu

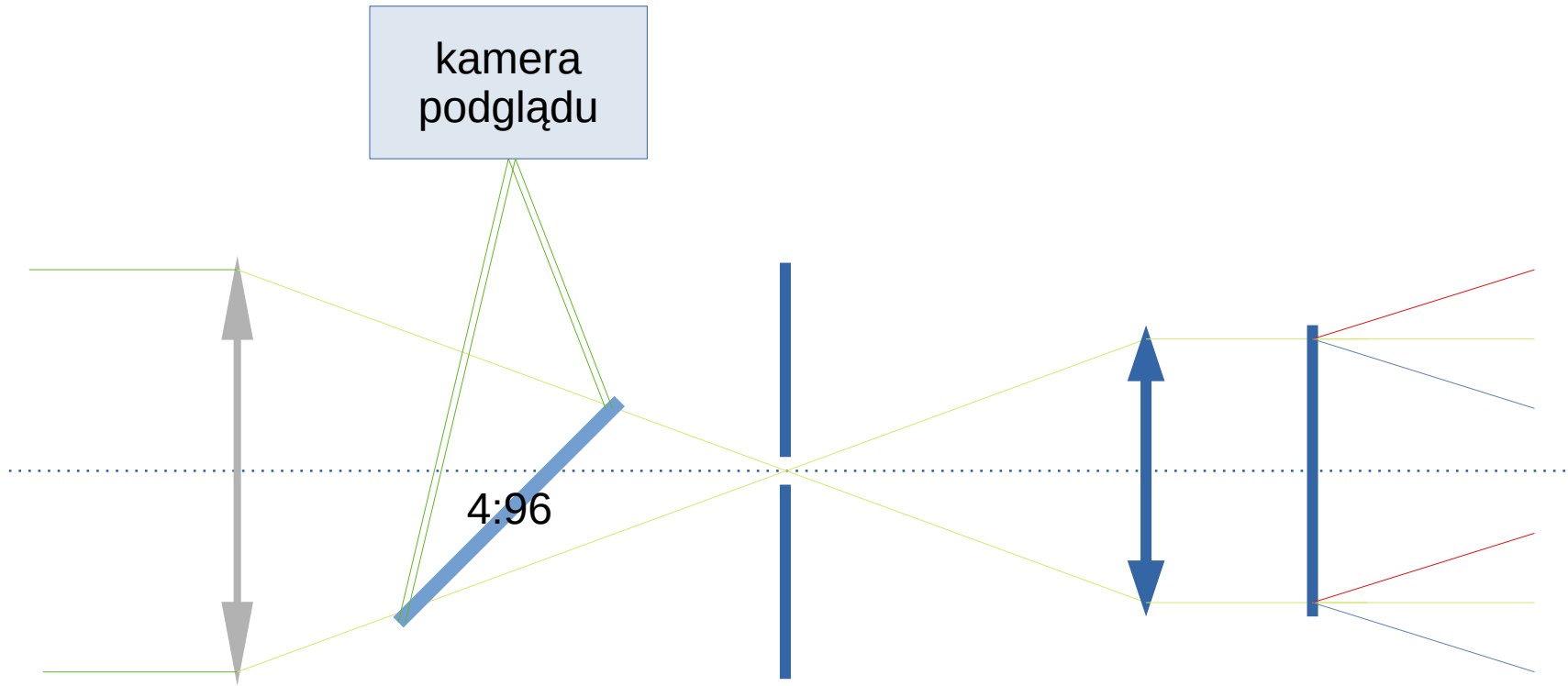
Guider = śledzik



PST1.

Budowa spektrografu

Guider = śledzik

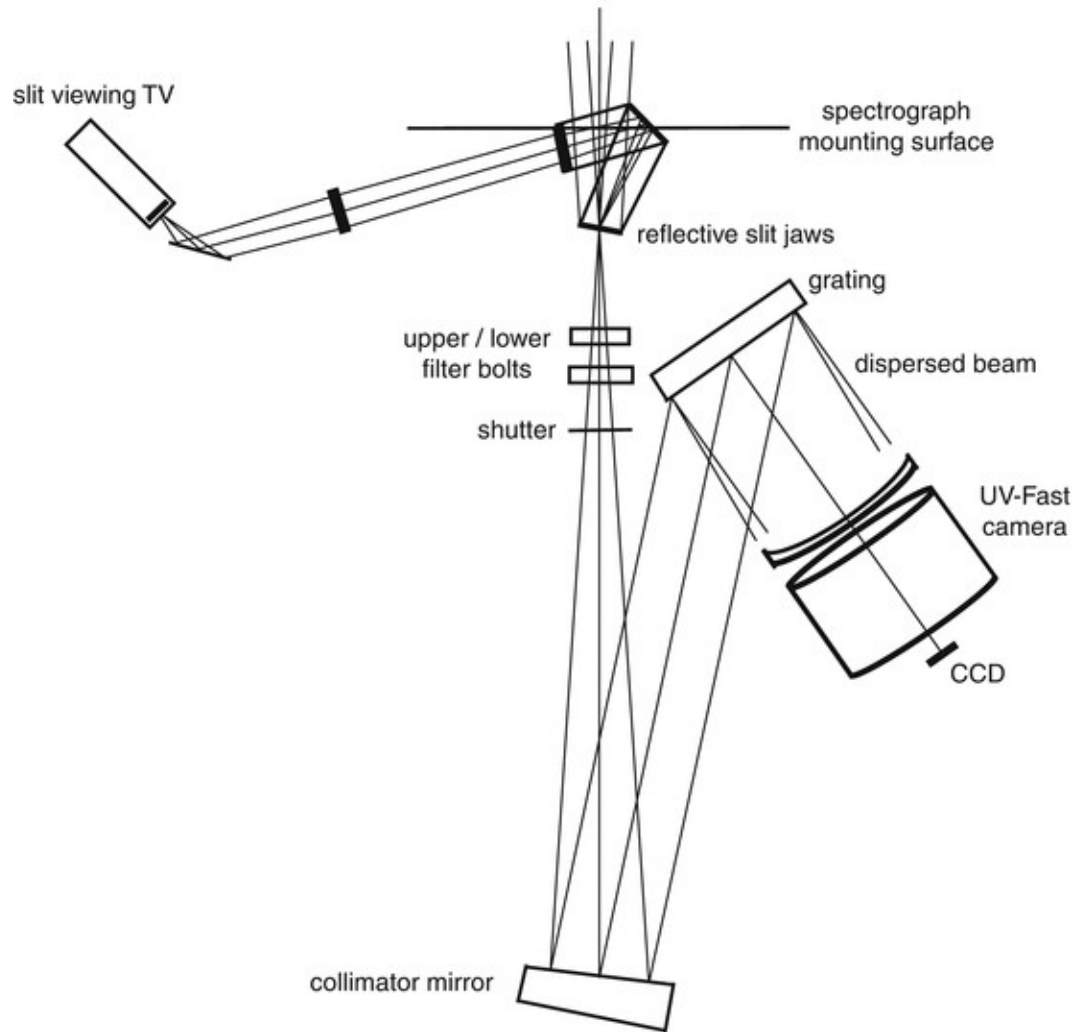


PST1 – pierwsze testy.

Budowa spektrografu

Guider = śledzik

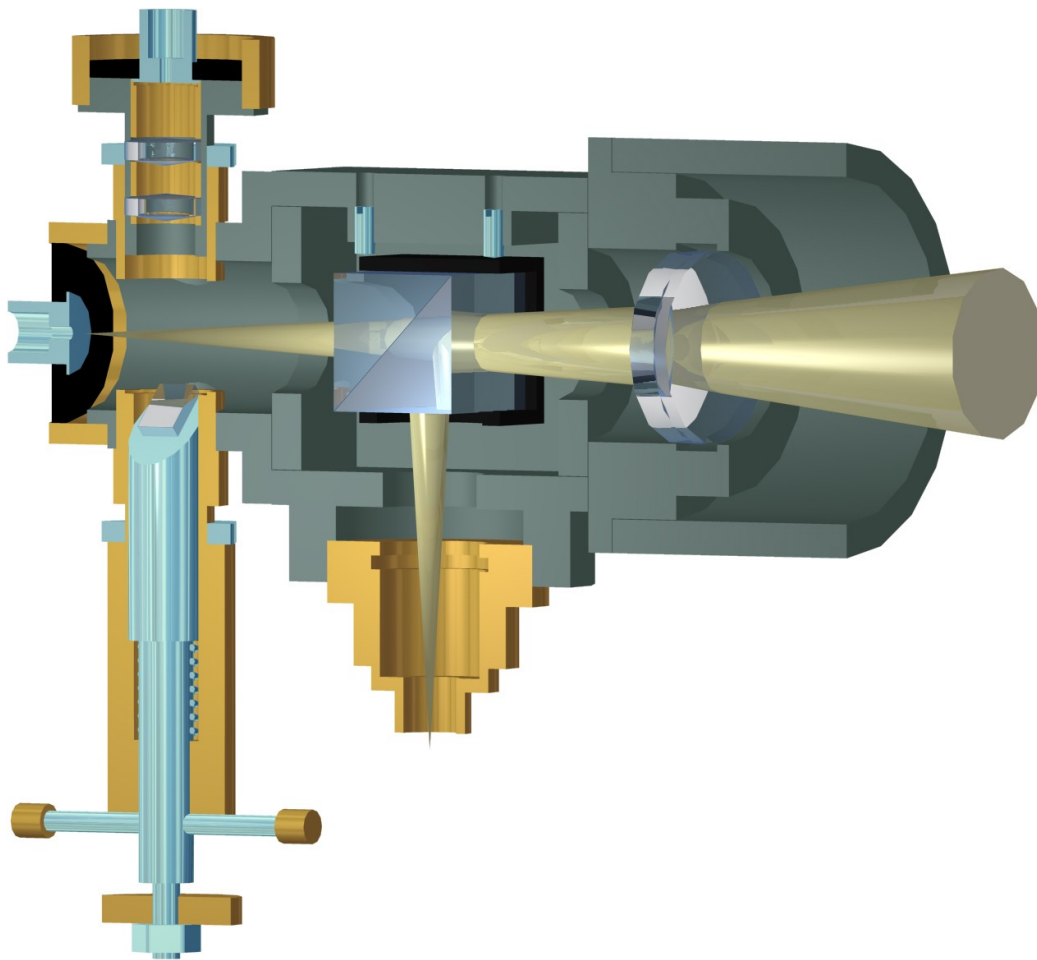
4-Meter Telescope - RC Spectrograph
Optical Diagram



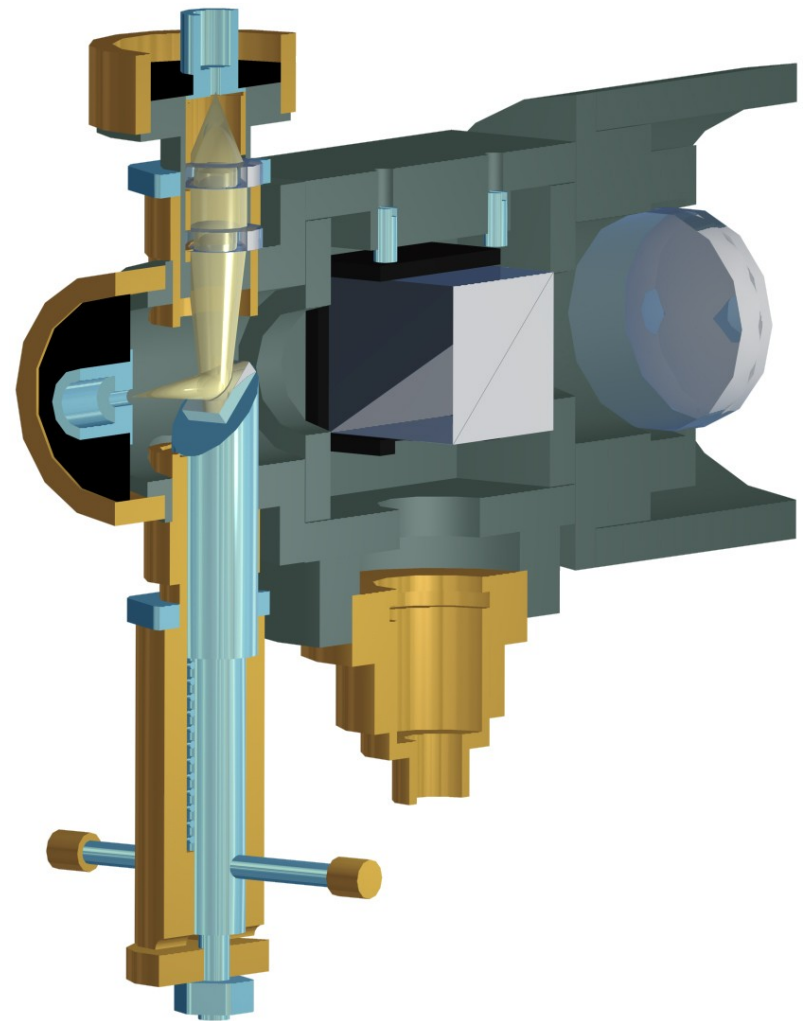
Schemat spektrografu na 4m teleskopie
(Planets, Stars and Stellar Systems, Oswald & Bond 2013).

Budowa spektrografu

Guider = śledzik



Śledzik w trybie obserwacji
(<http://94.210.220.244/Spectrograph.htm>).

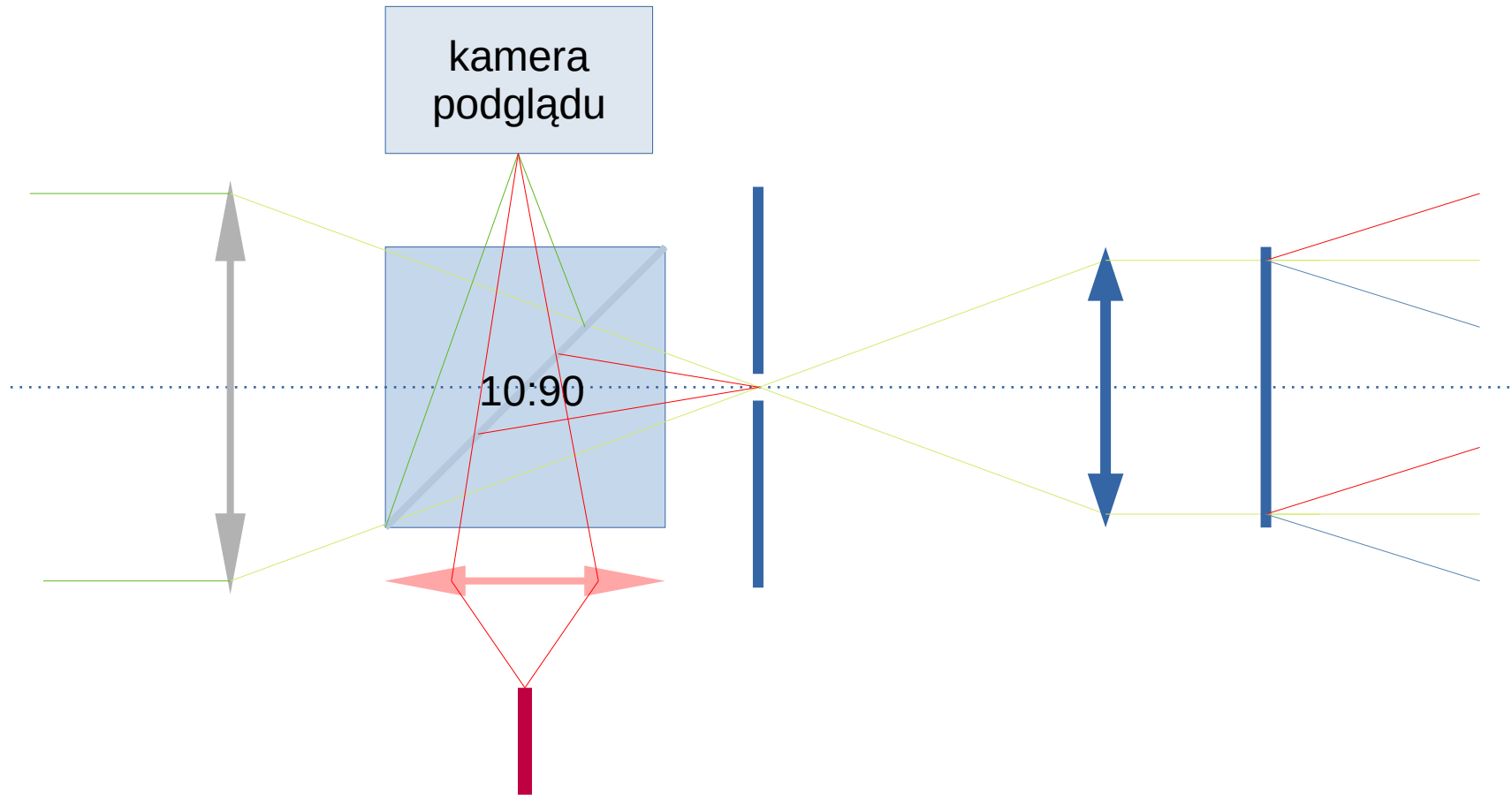


Śledzik w trybie kalibracji
(<http://94.210.220.244/Spectrograph.htm>).

Dodatkową funkcją guidera jest często możliwość wprowadzenia w spektrograf wiązki światła pochodzącej z lamp kalibracyjnych.

Budowa spektrografu

Guider = śledzik



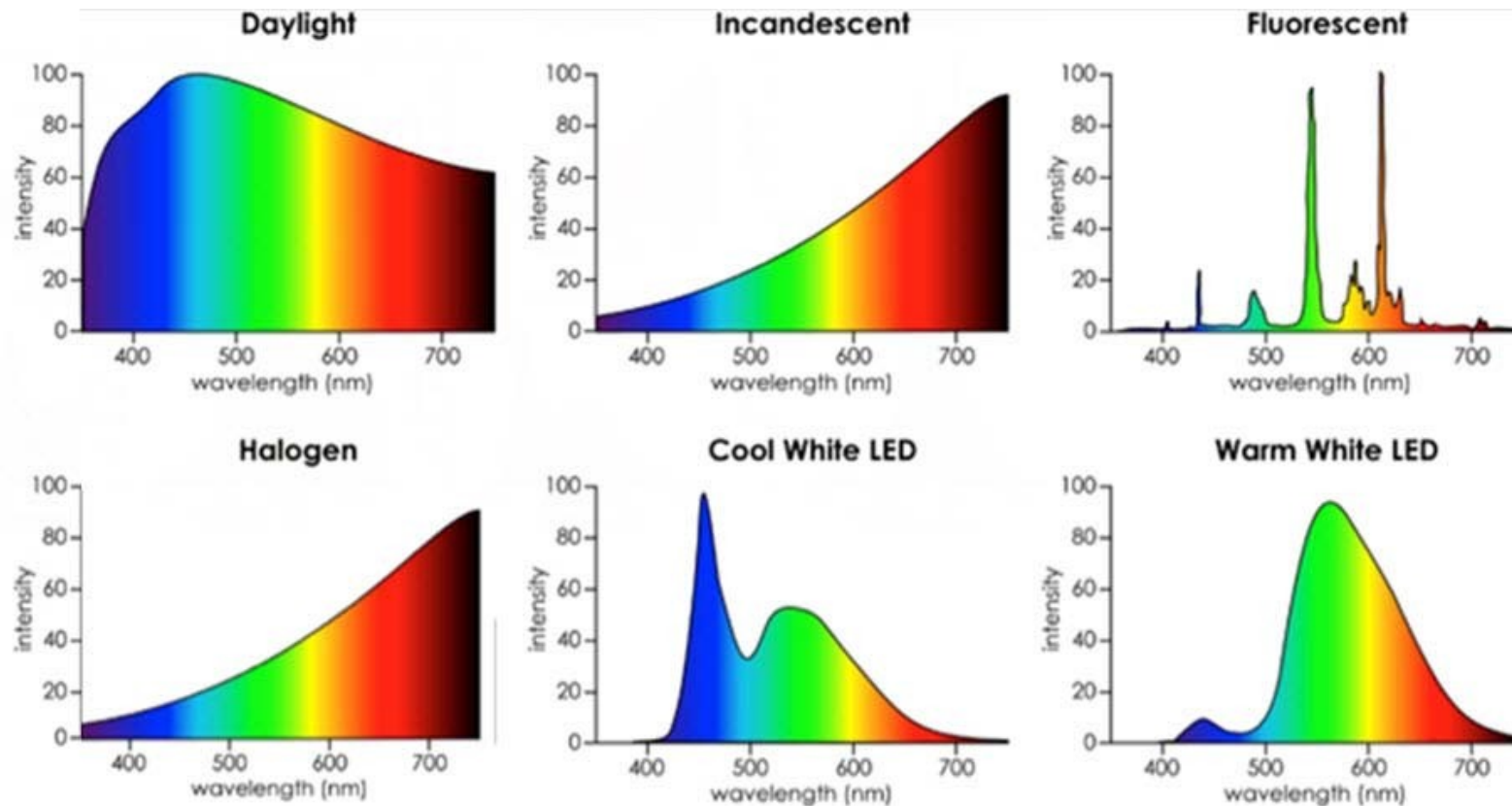
Śledzik projektu KK.

Budowa spektrografu

Lampy kalibracyjne

1. Lampa dająca widmo ciągłe (lampa „flatowa”)

Lampa klasyczna, halogenowa lub LEDowa.



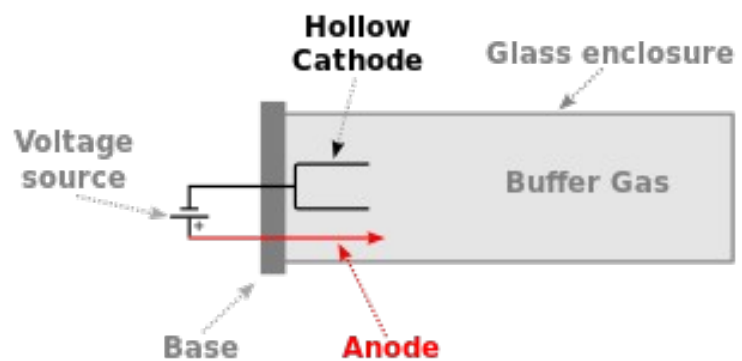
Widmo różnych źródeł światła ciągłego (z wyjątkiem widma dziennego)
(physics.stackexchange.com).

Budowa spektrografu

Lampy kalibracyjne

2. Lampa dająca widmo emisyjne (lampa kalibracyjna)

Lampa gazowa z zimną katodą z otworem (ang. HCL, hollow cathode lamp)



Schemat lampy typu HCL
(wikipedia.org)

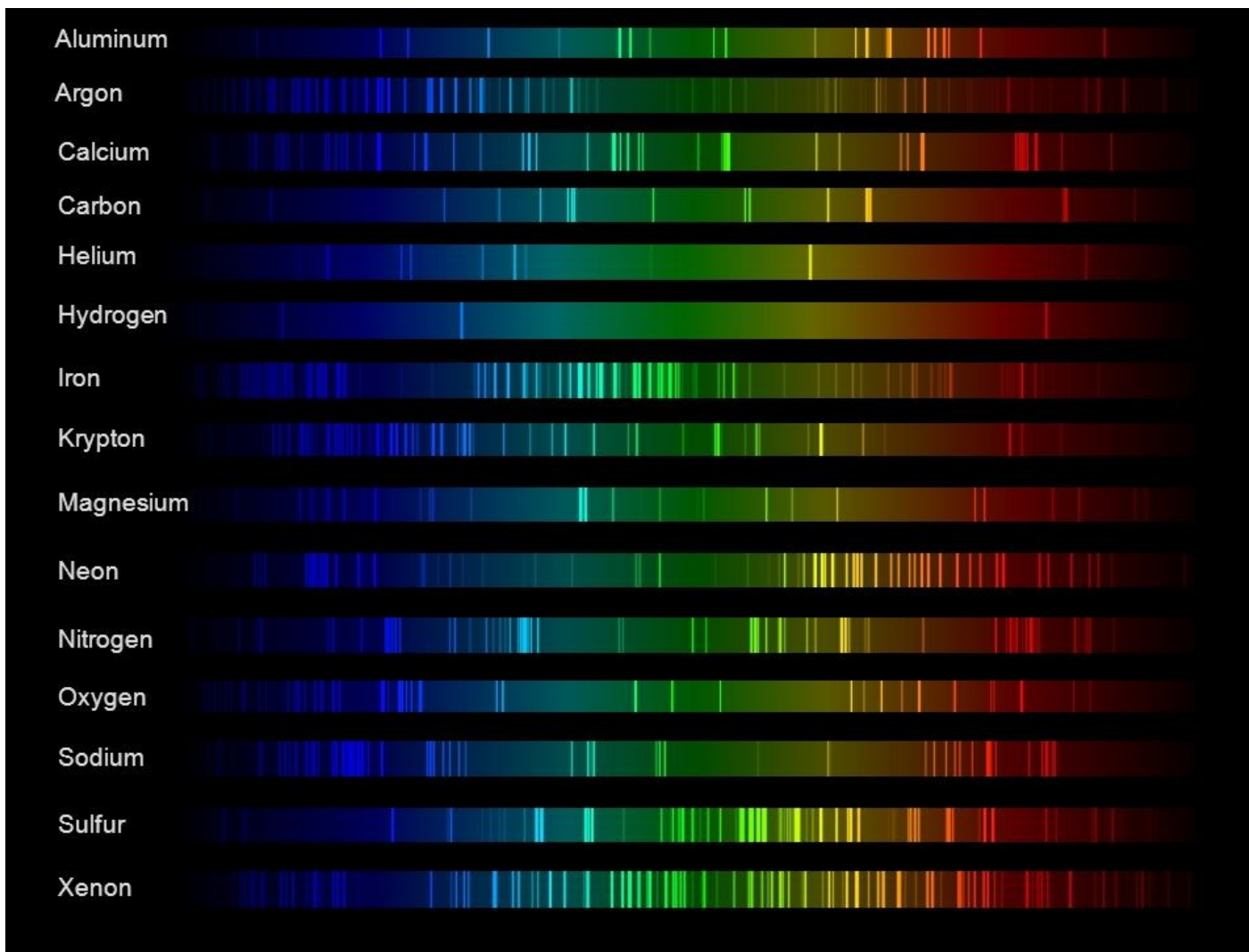


Lampa gazowa typu HCL (lab-training.com)

Budowa spektrografu

Lampy kalibracyjne

2. Lampa dająca widmo emisyjne (lampa kalibracyjna)



Przykładowe widma lamp gazowych (www.pixelsham.com).

Budowa spektrografu

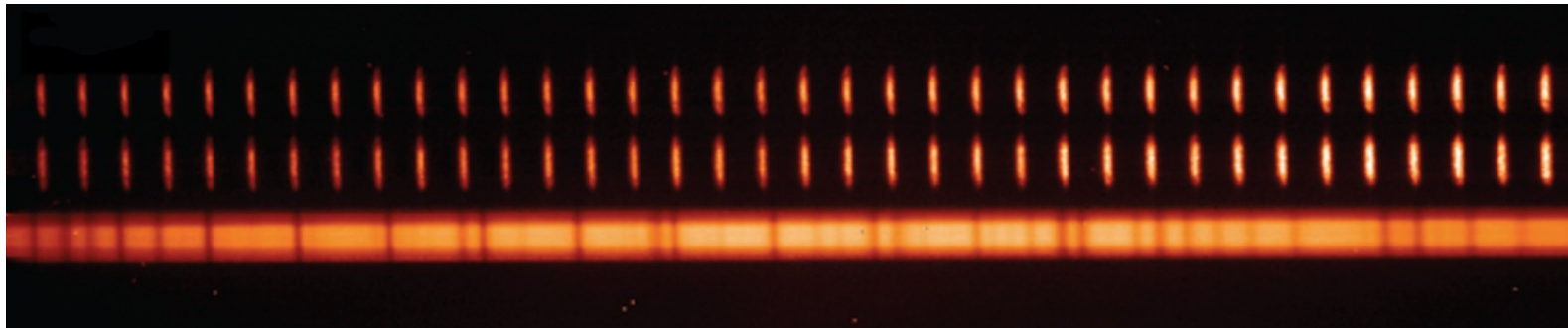
Lampy kalibracyjne

2. Lampa dająca widmo emisyjne (lampa kalibracyjna)

Grzebień częstości optycznych (ang. laser frequency comb)

Laser femtosekundowy, dzięki emisji bardzo krótkich impulsów (rzędu 10^{-15} s) posiada znacznie szerszy zakres częstotliwości niż zwykły laser.

Dodatkowo nie jest to emisja ciągła tylko dyskretna, wielu linii emisyjnych oddalonych od siebie o stałą różnicę częstotliwości.



Widmo gwiazdy oraz grzebienia częstości.
Grzebień ten bywa nazywany w astronomii astrocomb.
Widmo grzebienia jest regulowane z bardzo dużą dokładnością
za pomocą zmiany częstotliwości impulsów sterowaną
za pomocą zegarów atomowych (www.nist.gov).

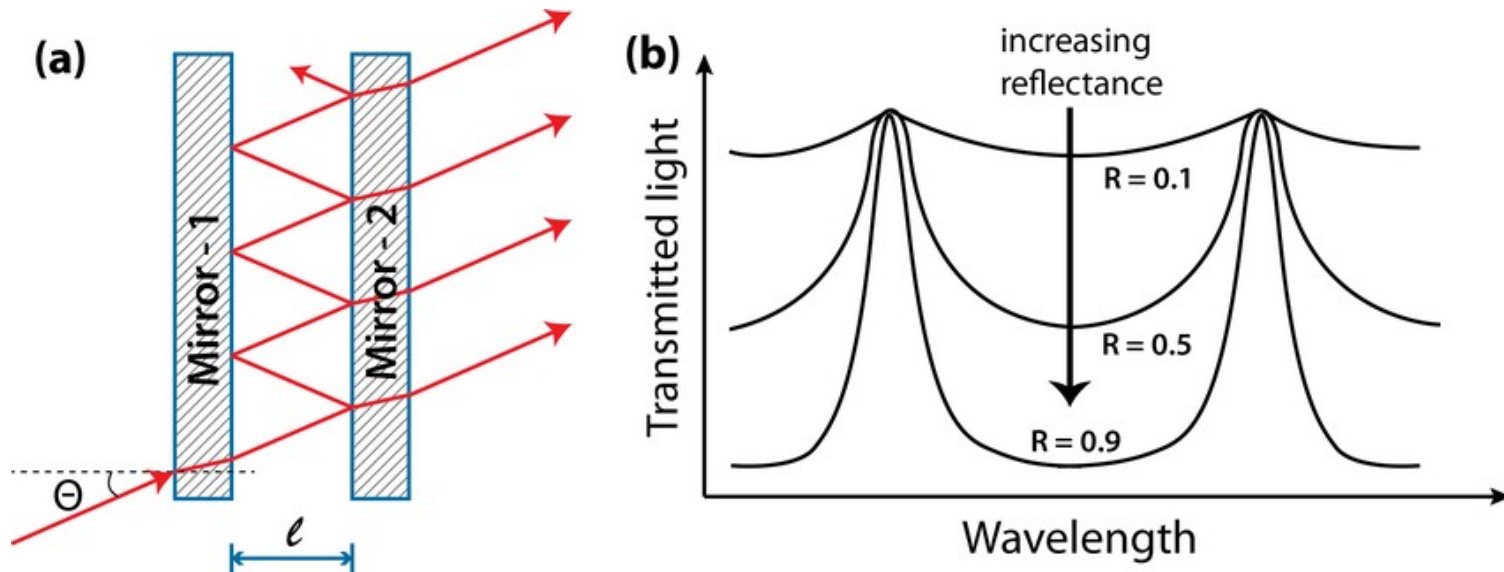
Budowa spektrografu

Lampy kalibracyjne

2. Lampa dająca widmo emisyjne (lampa kalibracyjna)

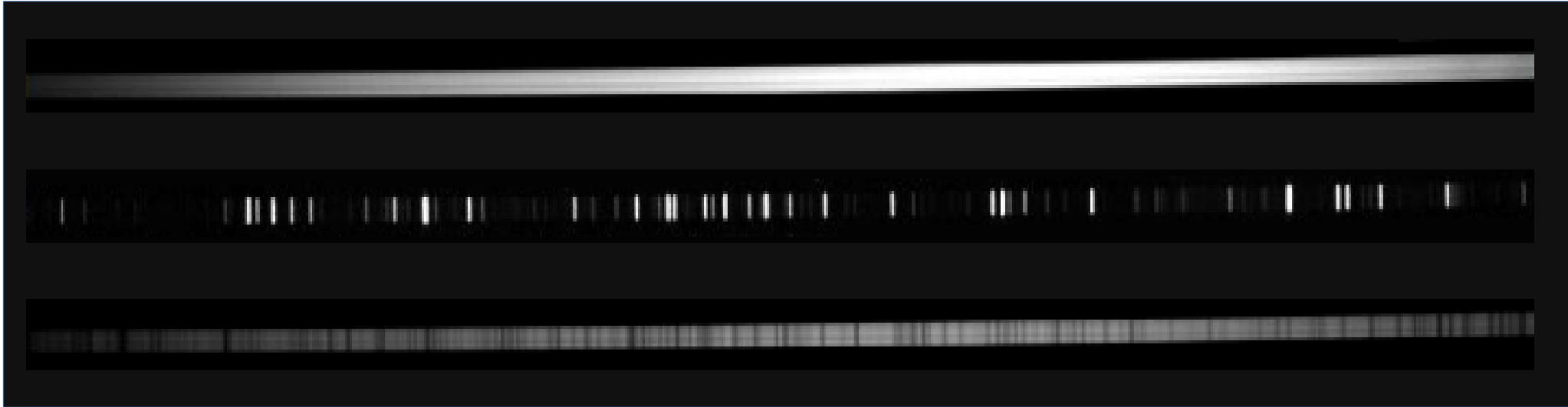
Etalon / interferometr Fabry-Perot

Dwa lustra półprzepuszczalne tworzą optyczną komorę rezonacyjną, która transmituje jedynie długości fali: $n \lambda = 2 l \cos(\theta)$



Budowa spektrografu

Lampy kalibracyjne



Przykład widm kalibracyjnych w spektrografie szczelinowym (BACHES spectrograph manual).

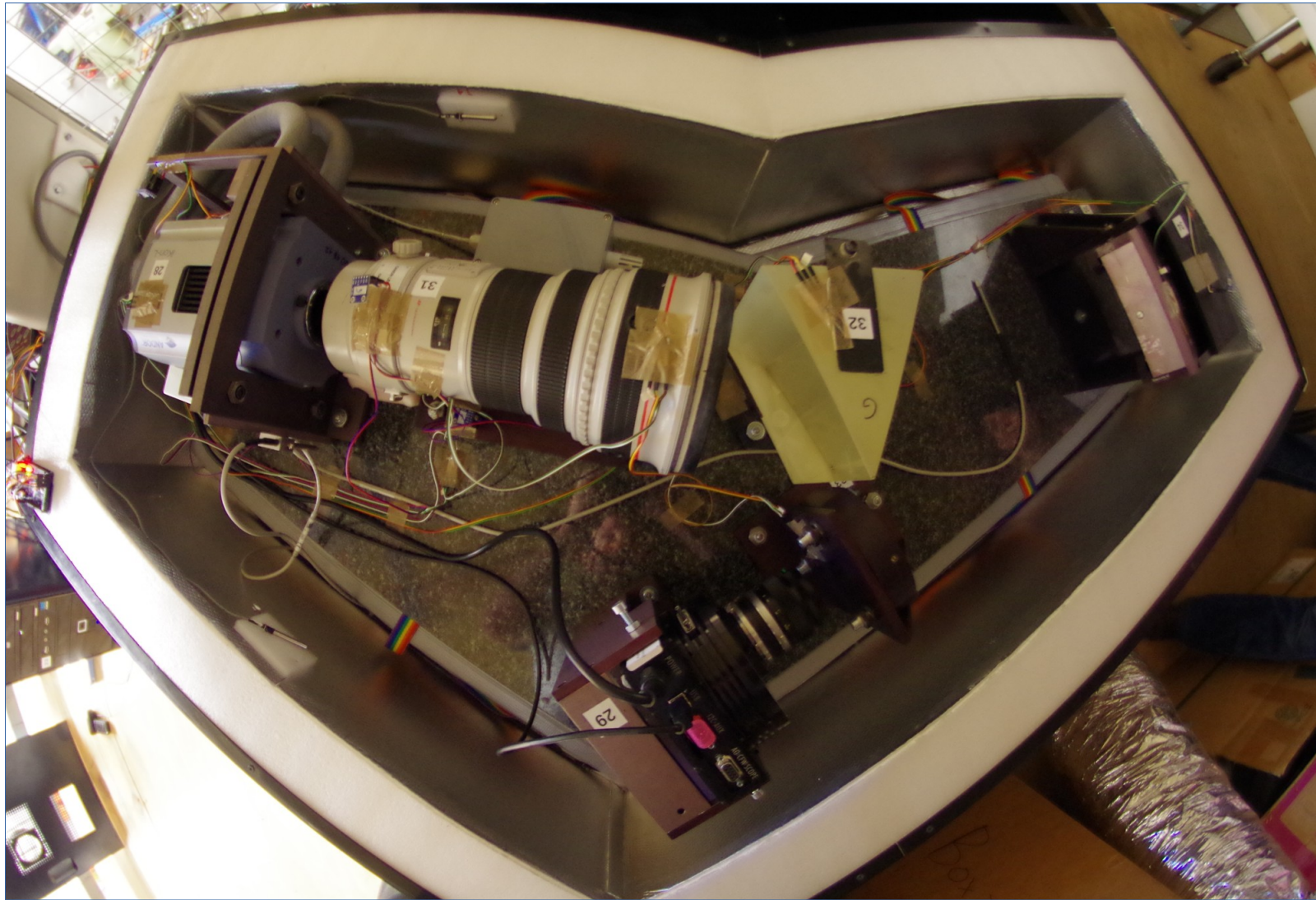
Lampy flatowe (wypłaszczające) służą do analizy zmian czułości spektrografu. Zmiany natężenia sąsiednich pikseli widma lampy flatowej mogą być przypisane niedoskonałościom spektrografu, gdyż stosowane źródło światła daje widmo ciągłe. Widma te używa się do redukcji obserwacji spektroskopowych i ich korekty.

Lampy kalibracyjne służą do określenia skali długości fali światła. Znając dokładną pozycję linii widmowych w kamerze oraz ich długość fali światła można przypisać poszczególnym pikselom w kamerze odpowiadającą im długość. Na tej podstawie tworzy się funkcję przyporządkowującą współrzędnym pikselowym długość fali $\lambda(x_{\text{pix}})$.

Budowa spektrografu

Stabilizacja

Stabilizacja termiczna spektrografu RBT/PST2



Budowa spektrografu

Stabilizacja

Stabilizacja termiczna spektrografu RBT/PST2

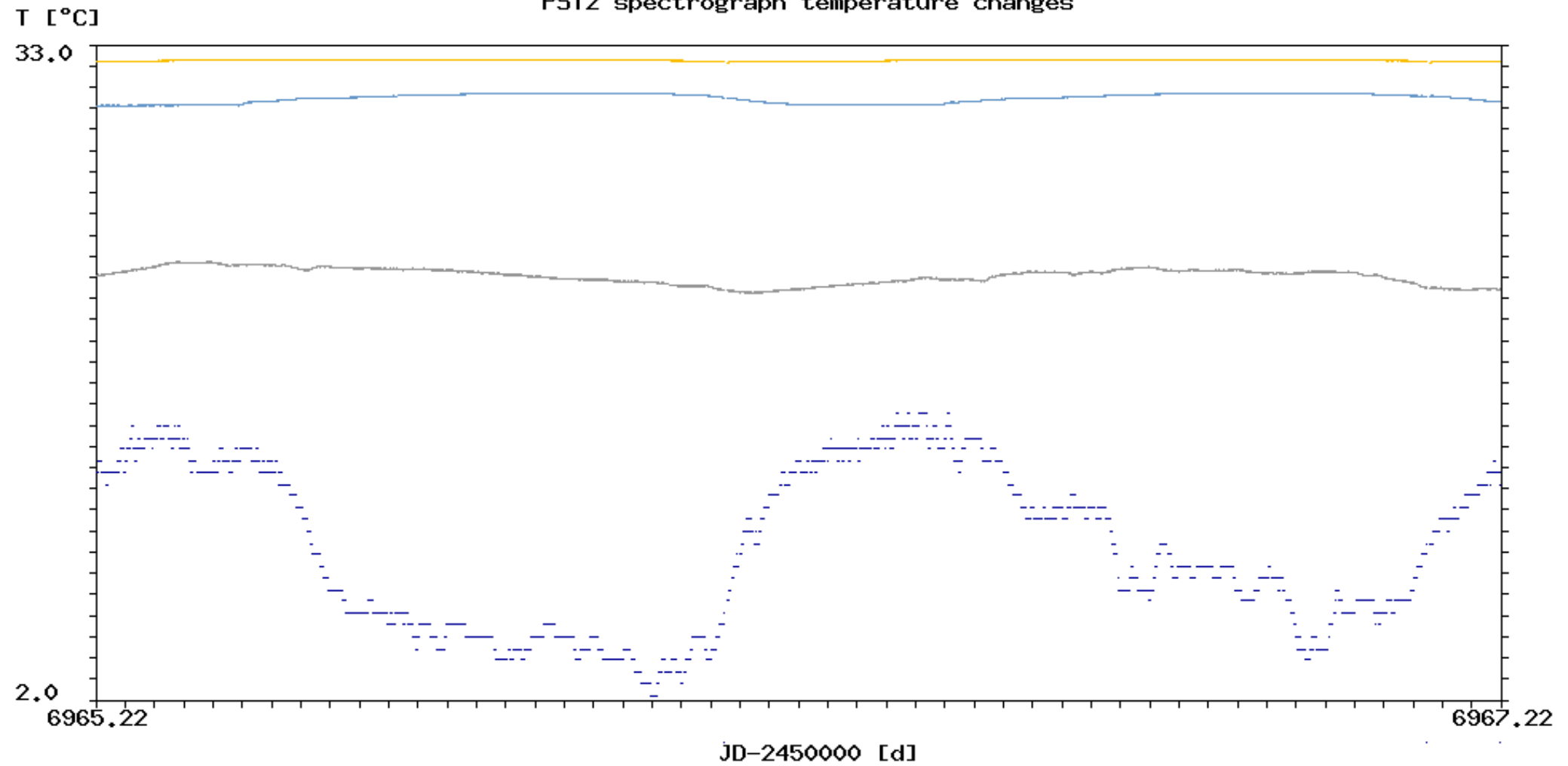


Budowa spektrografu

Stabilizacja

Stabilizacja termiczna spektrografu RBT/PST2

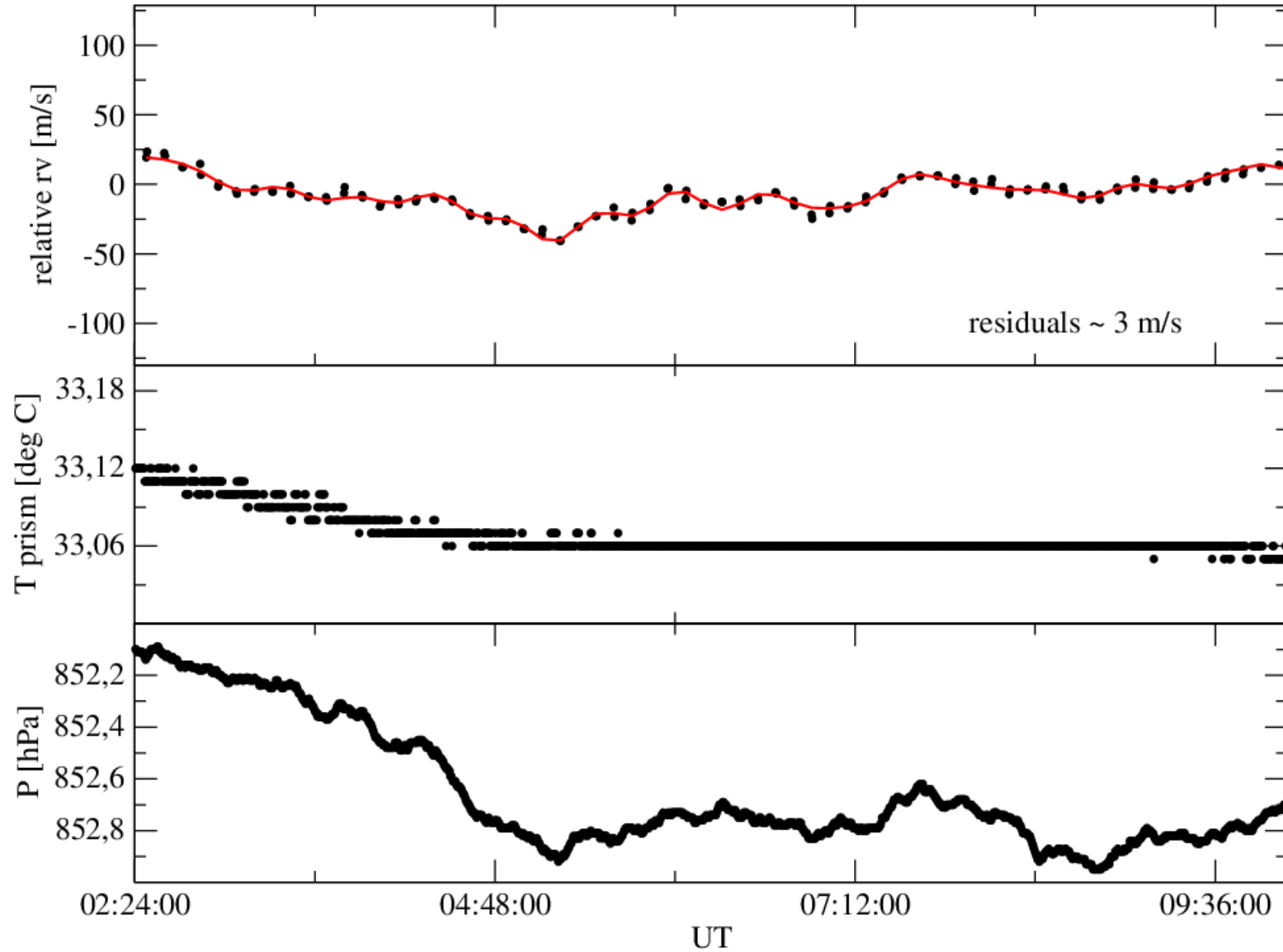
PST2 spectrograph temperature changes



Budowa spektrografu

Stabilizacja

Stabilizacja termiczna spektrografu RBT/PST2



Budowa spektrografu

Stabilizacja

Analiza źródeł niestabilności spektrografu RBT/PST2

Maksymalny błąd szczeliny: 8000 m/s

Typowy błąd szczeliny (zakładam ~10% maksimum): 800 m/s

Stabilizacja światłowodem okrągłym (8x near filed, 21x far field, Halverson i in. 2015)

Pomiary całodobowe lampy Th-Ar: $\sigma \sim 13$ m/s / dobę

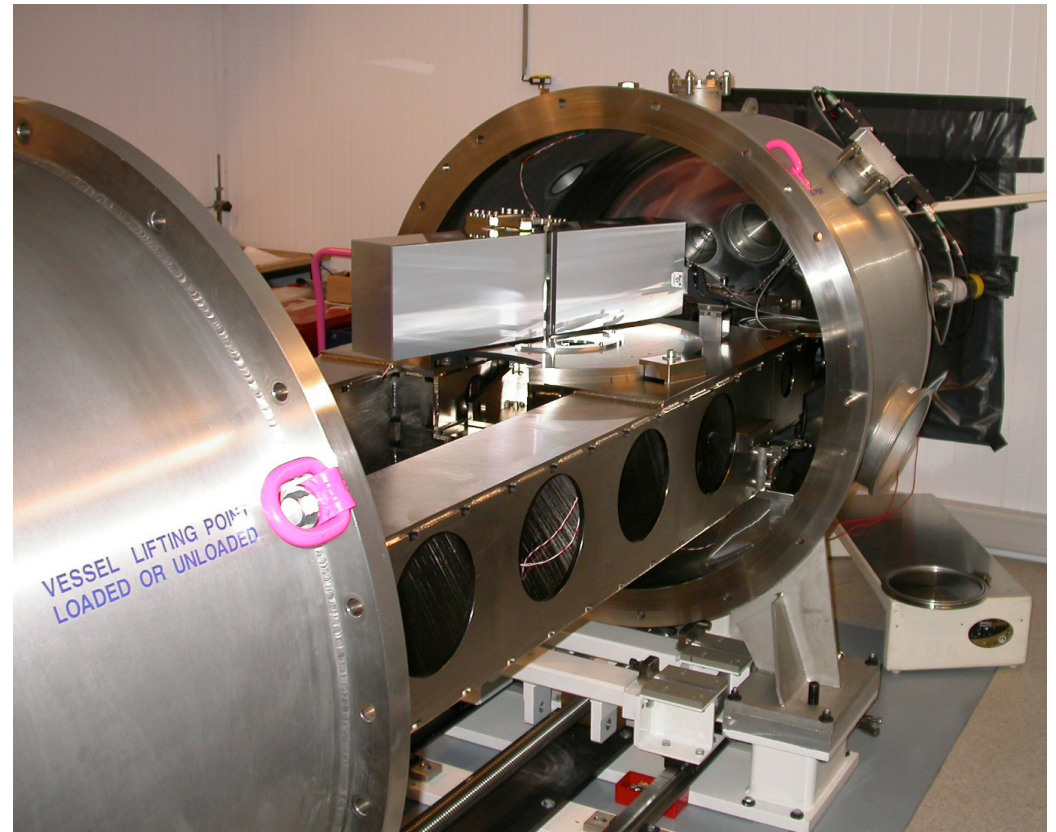
Pomiary kolejnych widm Th-Ar: $\sigma \sim 3$ m/s

Nierównoczesny Th-Ar:	3 m/s / widmo
Brak stabilizacji ciśnienia:	15 m/s / dobę
Nierównomierne oświetlenie szczeliny:	40 m/s / widmo

Budowa spektrografu

Stabilizacja

Komora próżniowa

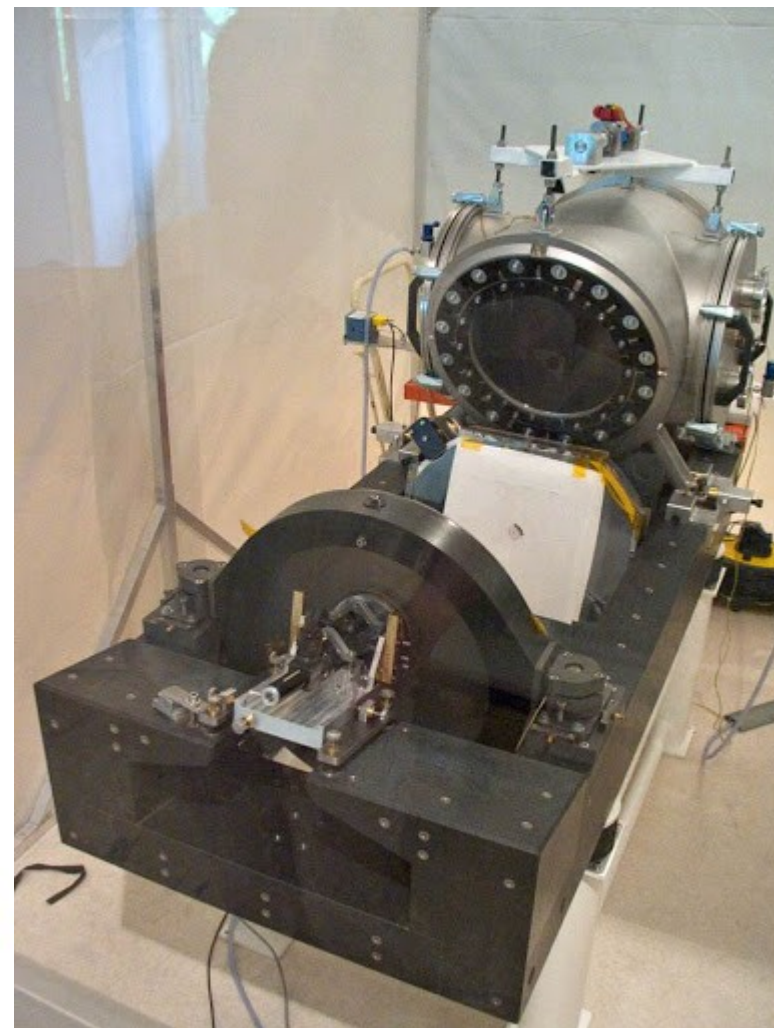
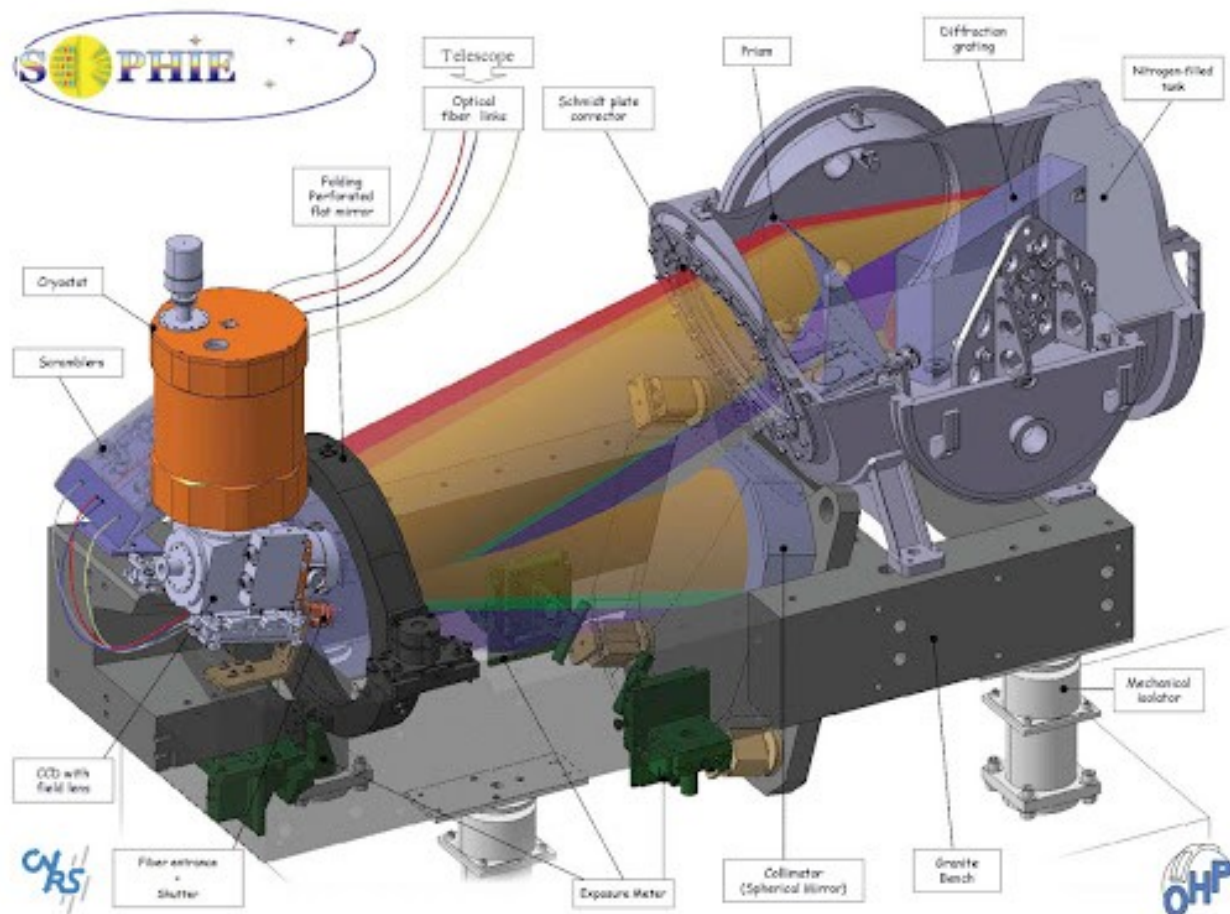


Komora próżniowa spektrografu HARPS
(High Accuracy Radial velocity Planet Searcher).

Budowa spektrografu

Stabilizacja

Komora próżniowa



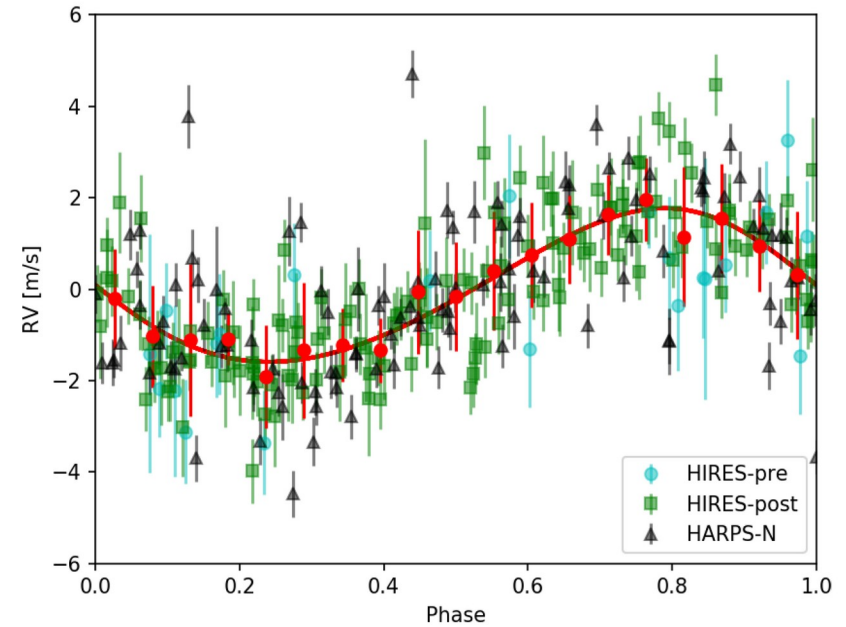
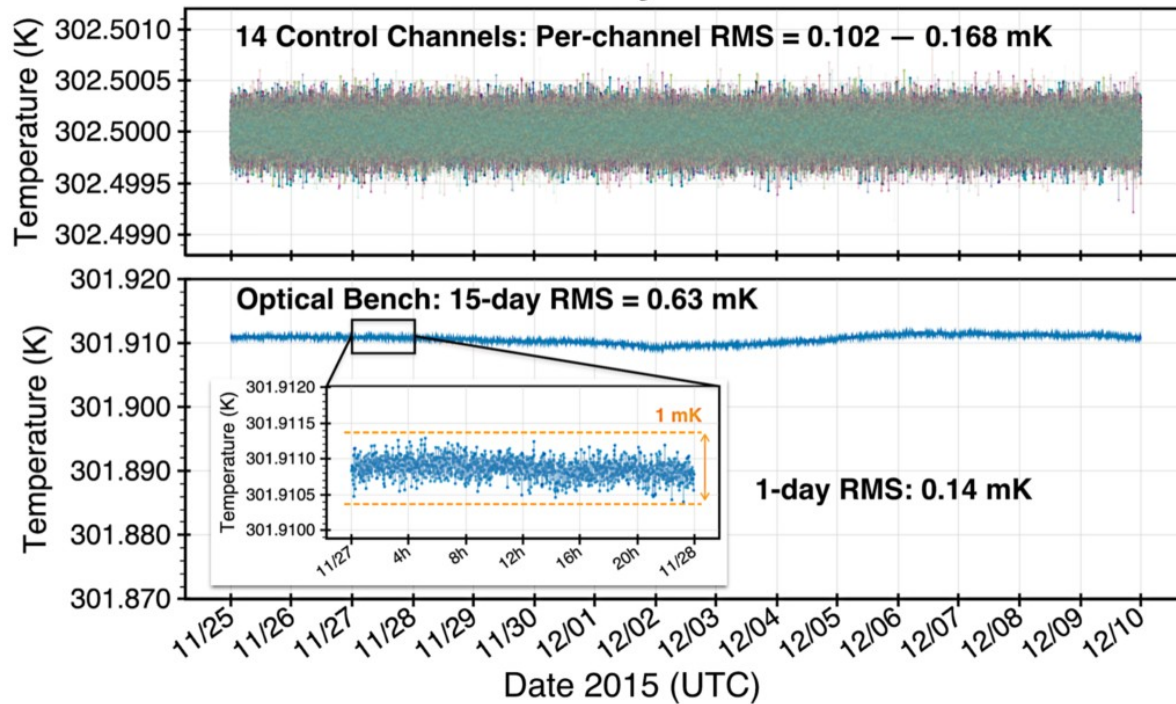
Komora próżniowa spektrografu SOPHIE
(Spectrographe pour l'Observation des Phénomènes des Intérieurs stellaires et des Exoplanètes).

Budowa spektrografu

Stabilizacja

Komora próżniowa

Warm HPF Stability Demonstration



Stabilność termiczna spektrografu HPF: Habitable Zone Planet Finder na teleskopie HET. Stabilność RV: 1.5 m/s (hpf.psu.edu).

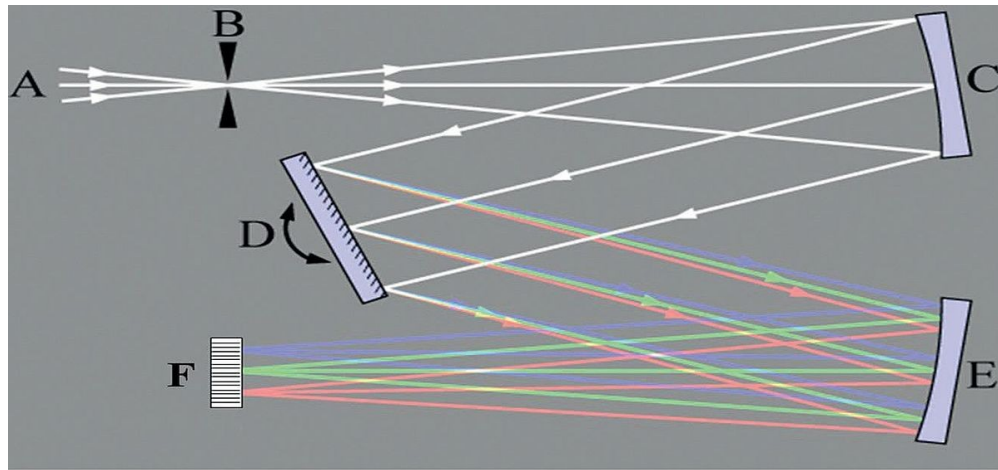
Przykładowe obserwacje zmian RV spowodowanych obecnością planety pozasłonecznej.

Budowa spektrografu

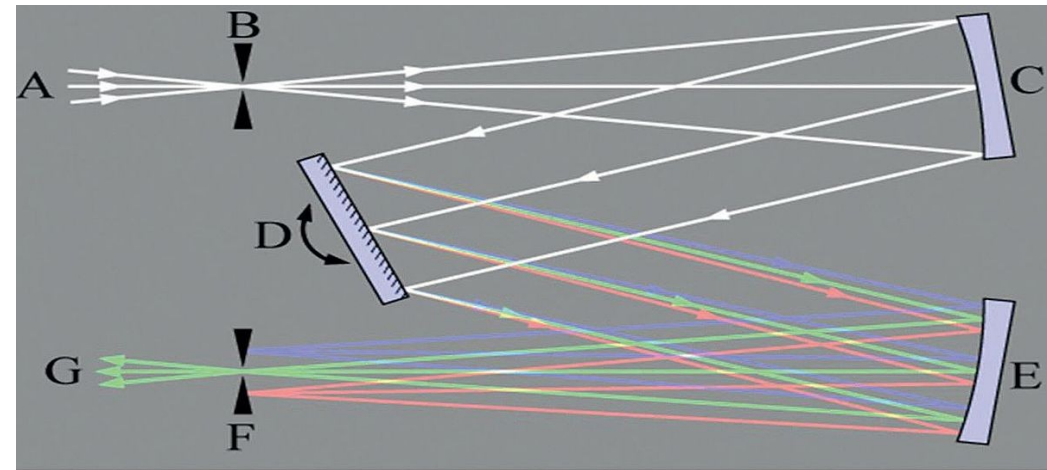
Typy i ciekawe komplikacje

Typy spektrografów

Spektrograf a monochromator



- A. Incoming light source
- B. Entrance slit
- C. Collimating mirror
- D. Grating on turret
- E. Focusing mirror
- F. Multichannel detector

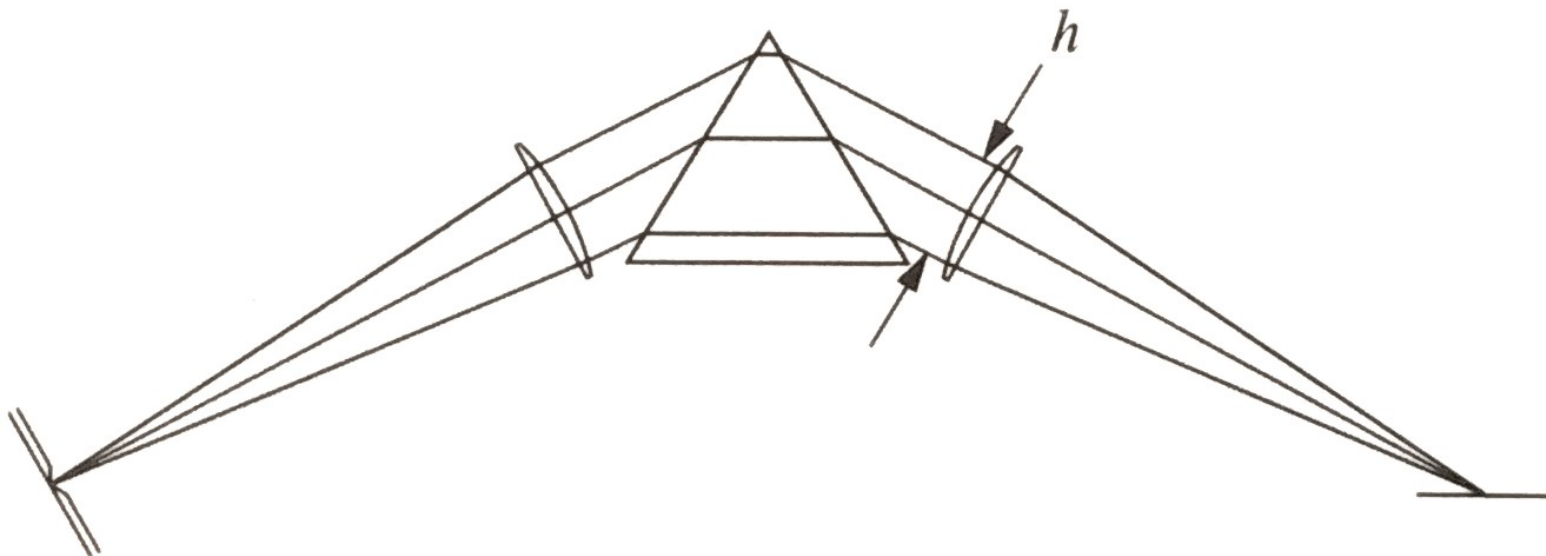


- A. Incoming light source
- B. Entrance slit
- C. Collimating mirror
- D. Grating on turret
- E. Focusing mirror
- F. Exit slit
- G. Single channel detector

Porównanie spektrografu i monochromatora (www.horiba.com).

Typy spektrografów

Spektrograf Kirchoff i Bunsen

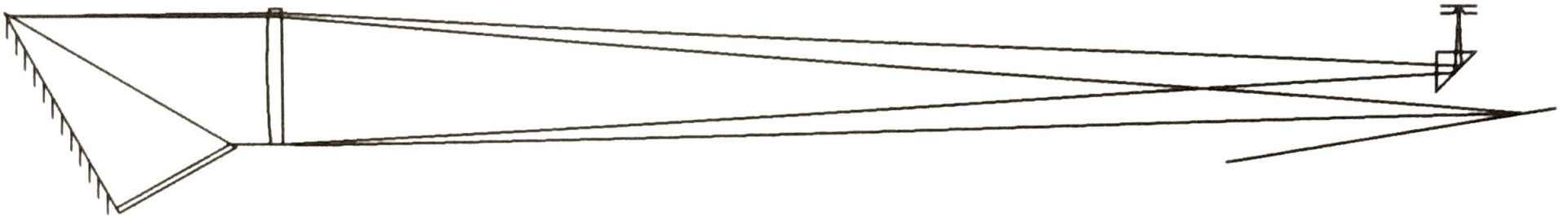


Schemat spektrografu Kirchoff i Bunsen (John James 2007).

Klasyczna konstrukcja spektrografu pryzmatycznego.

Typy spektrografów

Spektrograf pryzmatyczny Littrowa



Schemat spektrografu Littrowa (John James 2007).

Układ Littrowa oznacza, że droga światła padającego i opuszczającego element dyspersyjny jest niemal taka sama.

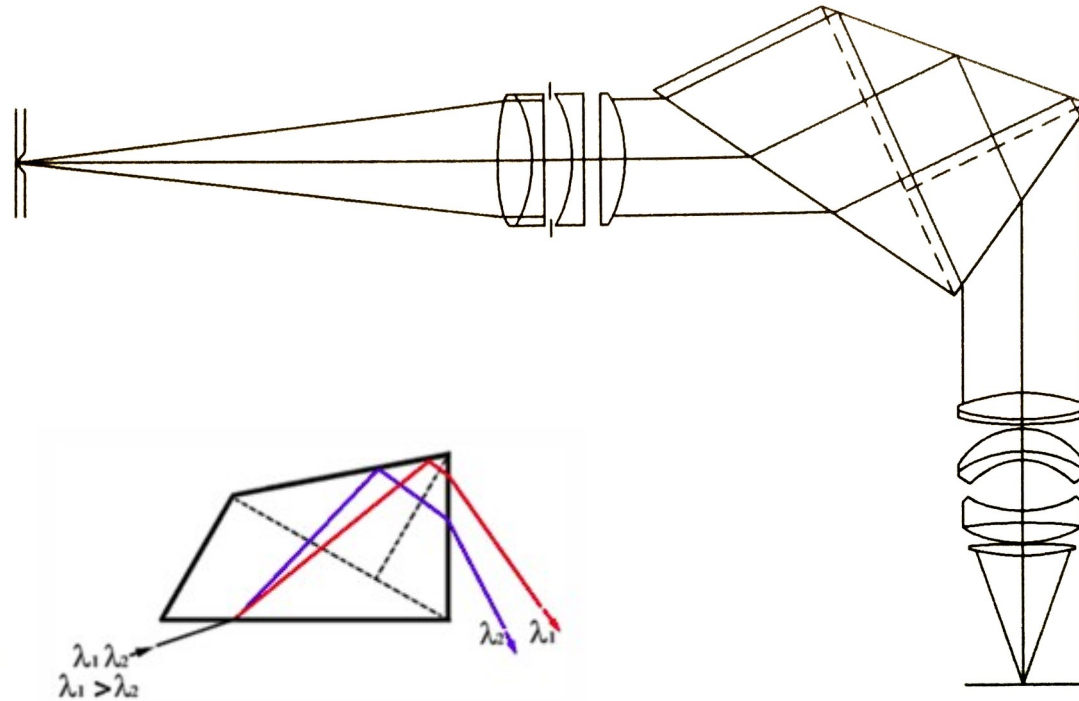
Skonstruowany z pryzmatu 30° - 60° - 90° z lustrem (pryzmatu Littrowa).

Stanowił najdoskonalszą konstrukcję lat 50-tych XX wieku.

Pozwalał osiągnąć limit dyfrakcyjny i rozdzielczość ok $R \sim 40000$ w UV.

Typy spektrografów

Spektrograf Pellin-Broca

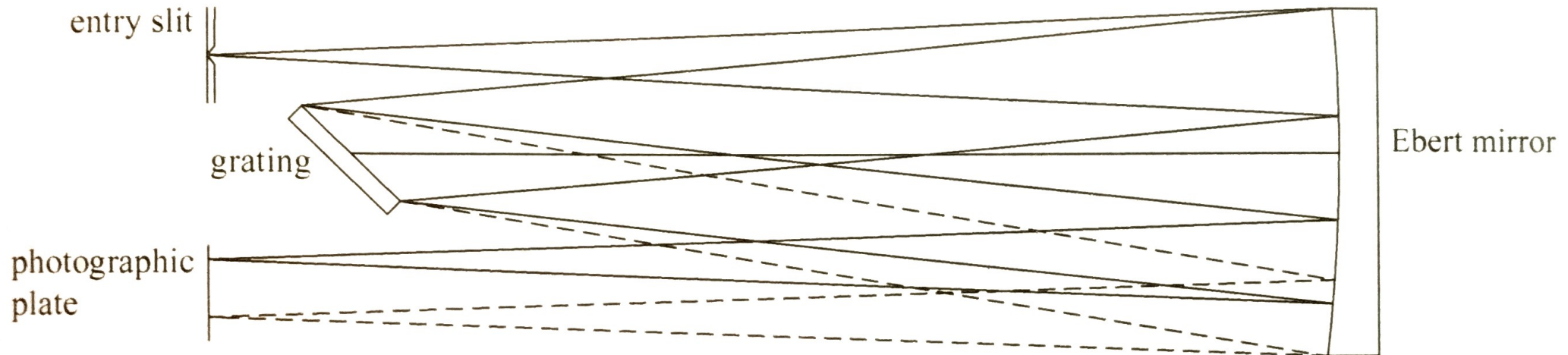


Schemat spektrografu Pellin-Broca (John James 2007).

Pryzmat typu Pellin-Broca jest połączeniem 3 pryzmatów. Dwa rozszczepiają światło, trzeci pełni funkcję lustra. Posiada stały kąt odchylenia (ang. constant deviation prism) danej długości fali światła, niezależnie od kąta padania światła. Pozwala zmieniać długość fali światła przez obrót samego pryzmatu, często stosowany w monochromatorach.

Typy spektrografów

Spektrograf Ebert-Fastie



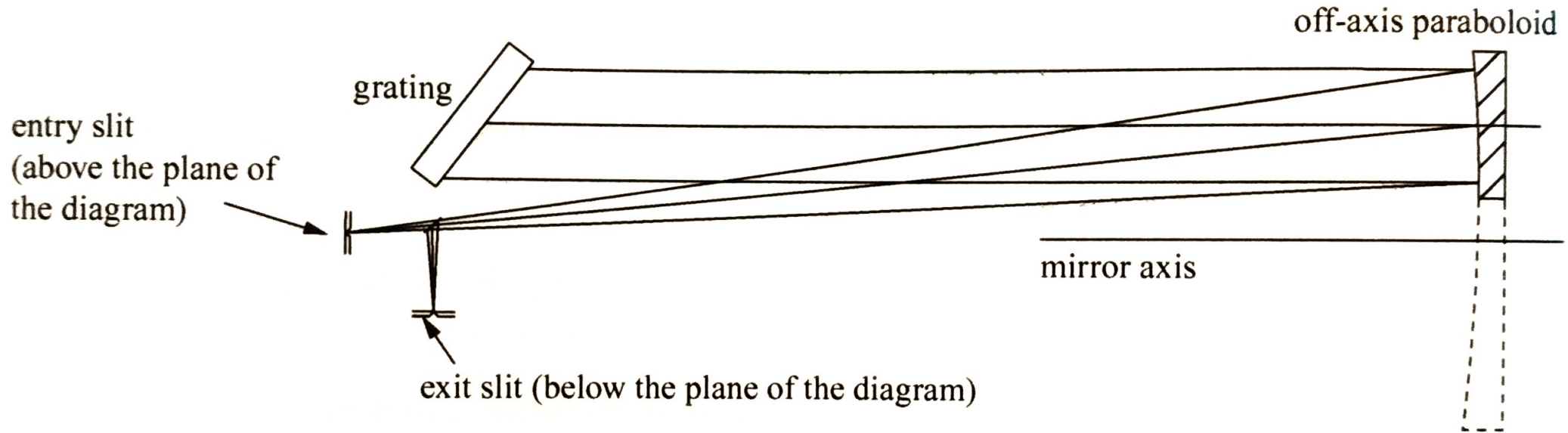
Schemat spektrografu Ebert-Fastie (John James 2007).

Pierwszy w pełni achromatyczny spektrograf (Ebert, 1889).

W znacznym stopniu redukuje aberracje optyczne, ale jest trudny w kolimacji.

Typy spektrografów

Spektrograf siatkowy Littrowa

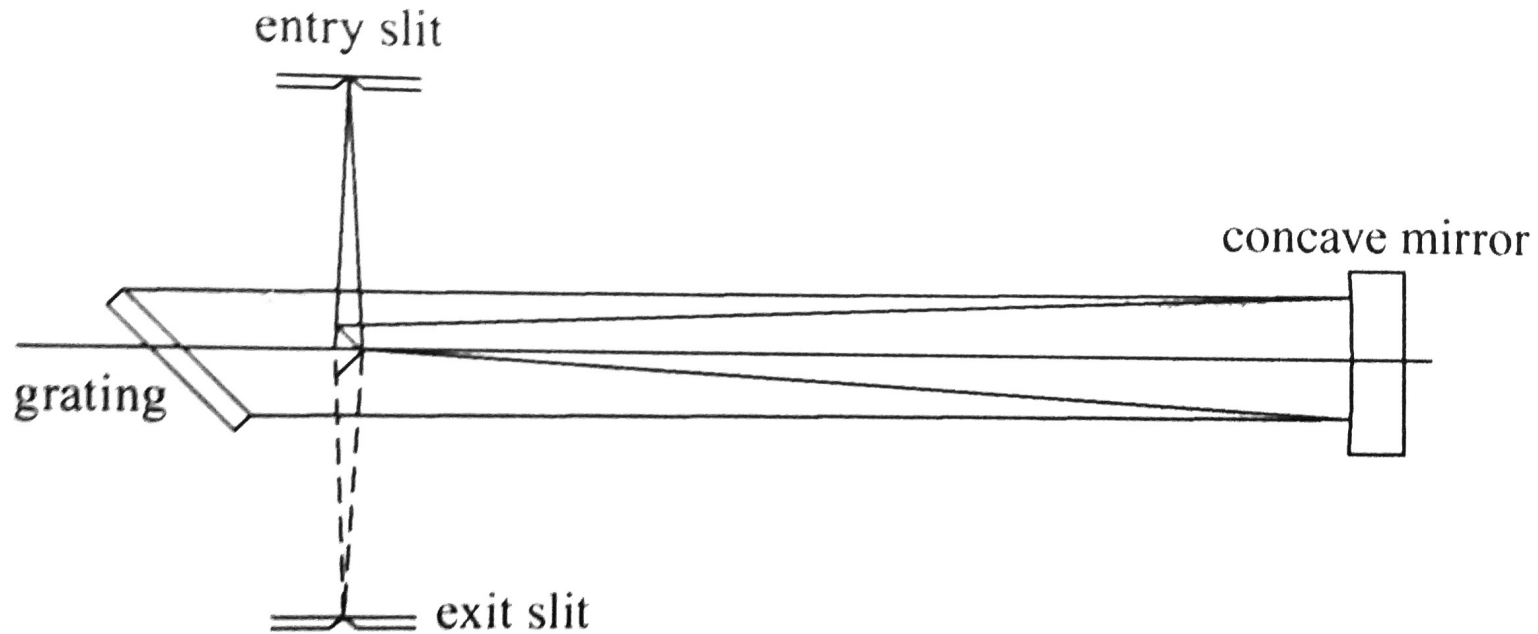


Schemat spektrografu Littrowa z siatką dyfrakcyjną (John James 2007).

Achromatyczny wariant spektrografu Littrowa bazujący jedynie na elementach optycznych odbijających światło.
Szczelina wejściowa jest ponad płaszczyzną ilustracji.
Jak każdy Littrow posiada astygmatyzm.

Typy spektrografów

Spektrograf Pfundta

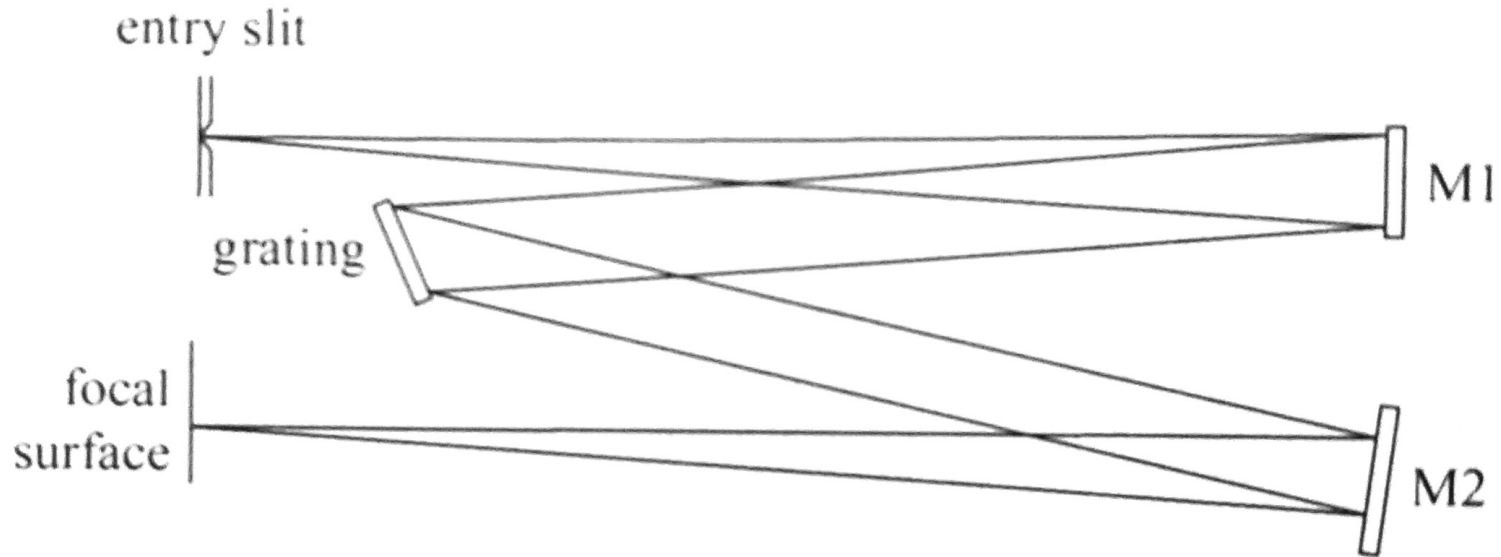


Schemat spektrografu Pfundta (John James 2007).

Można go rozpatrywać jako wariant spektrografu Ebert-Fastie. Jest to również układ zbliżony do teleskopu Newtona, tylko zamiast lustra wtórnego są 2 pryzmaty. Dobry jako monochromator, tani, ale posiada wady optyczne (astygmatyzm) przy używaniu do szerokich zakresów widmowych.

Typy spektrografów

Spektrograf Czerny-Turner

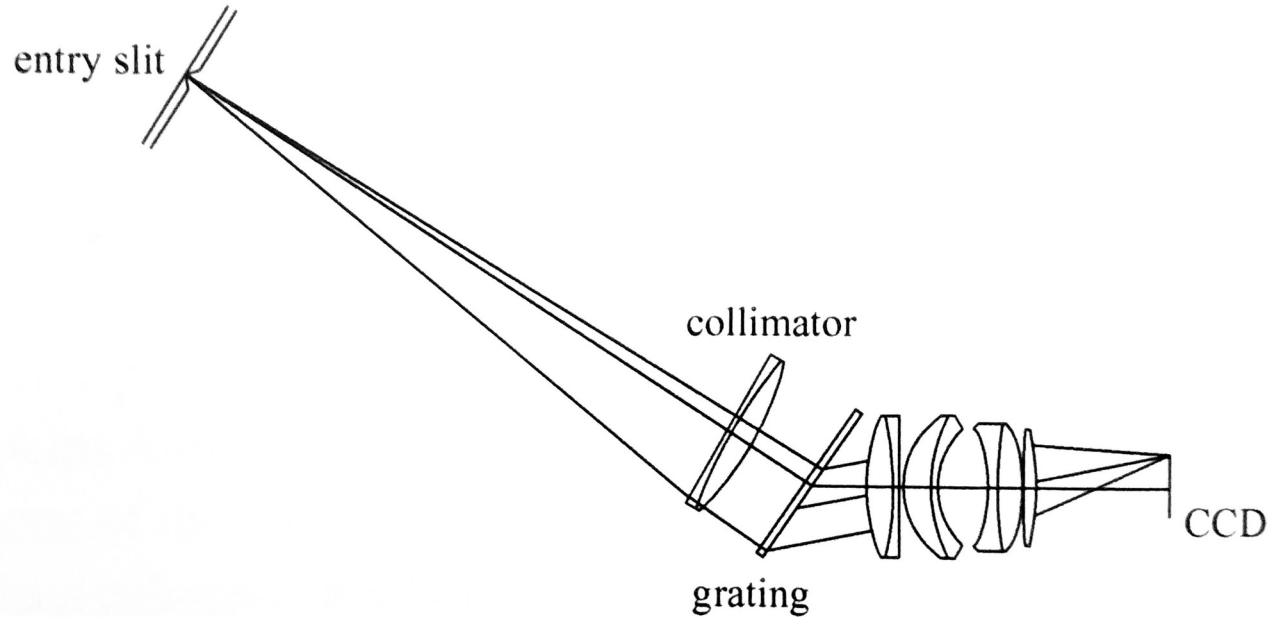


Schemat spektrografu Czerny-Turner (John James 2007).

Najpopularniejszy układ spektrografu z płaską siatką dyfrakcyjną. Odpowiednie dobranie lusterek kolimatora i kamery oraz całego układu pozwala zredukować wady optyczne praktycznie do zera.

Typy spektrografów

Spektrograf z siatką transmisyjną

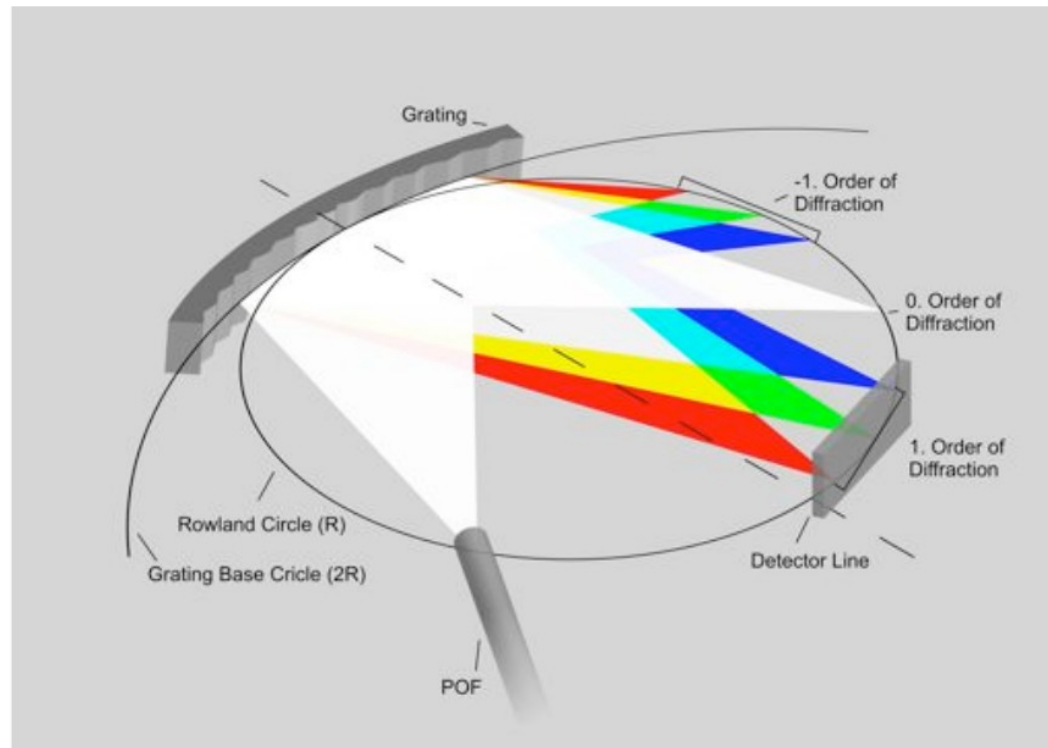


Przykład spektrografu z siatką transmisyjną (John James 2007).

Siatki transmisyjne mogą być zwykłe lub holograficzne. W obydwu przypadkach wprowadzają wewnętrzne odbicia i refrakcję światła, czego można uniknąć stosując siatki odbiciowe.

Budowa spektrografu

Spektrograf Rowlanda



Schemat spektrografu Rowlanda (Fisher, 2010).

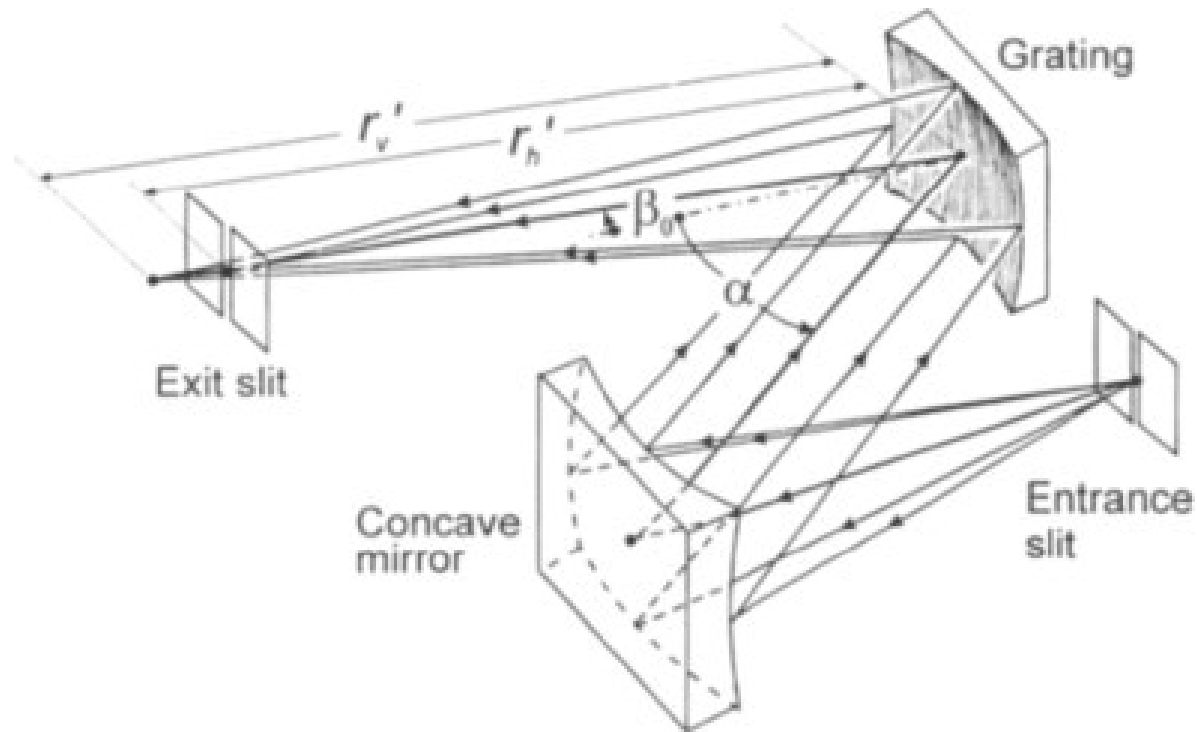
Siatka dyfrakcyjna Rowlanda: sferyczna siatka na bazie kuli o promieniu $2R$, gdzie R jest promieniem Rowlanda – promieniem koła na którym trzeba umieścić szczelinę i detektor.

Zalety: mniej elementów optycznych, mniej strat światła

Wady: bardziej skomplikowana siatka, wady optyczne

Budowa spektrografu

Spektrograf Wadswortha



Wklęsła siatka dyfrakcyjna jest oświetlona skolimowaną wiązką światła. Pozwala to zredukować wady optyczne spektrografu Rowlanda (Koike, 1999).

Budowa spektrografu

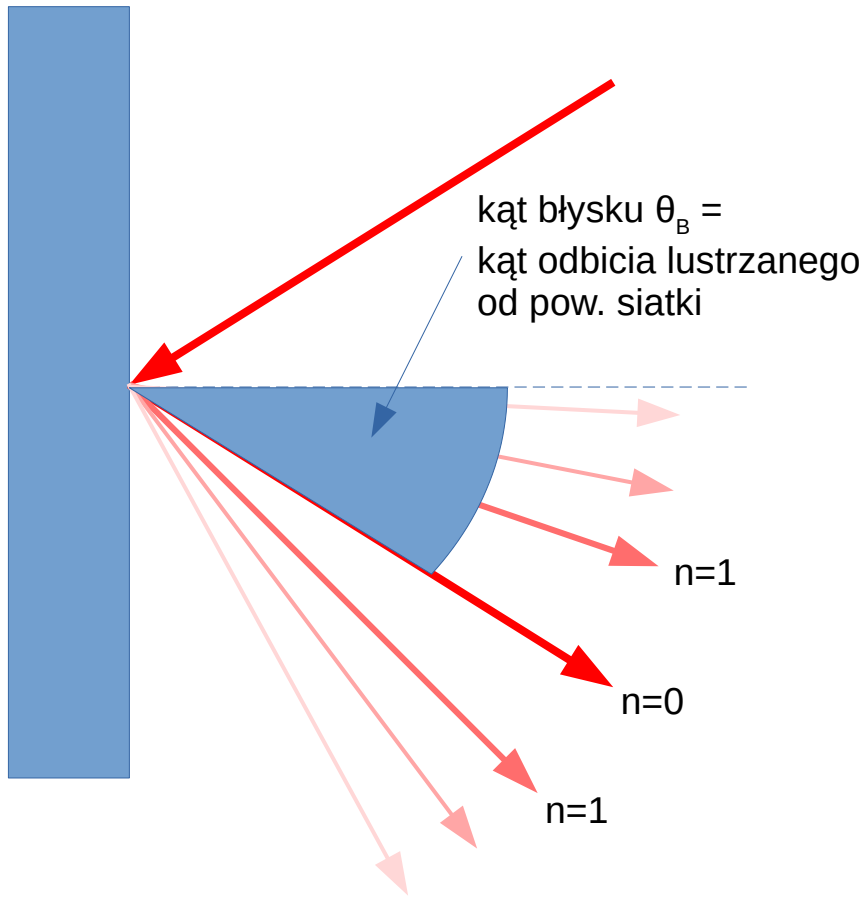
Spektrograf echelle



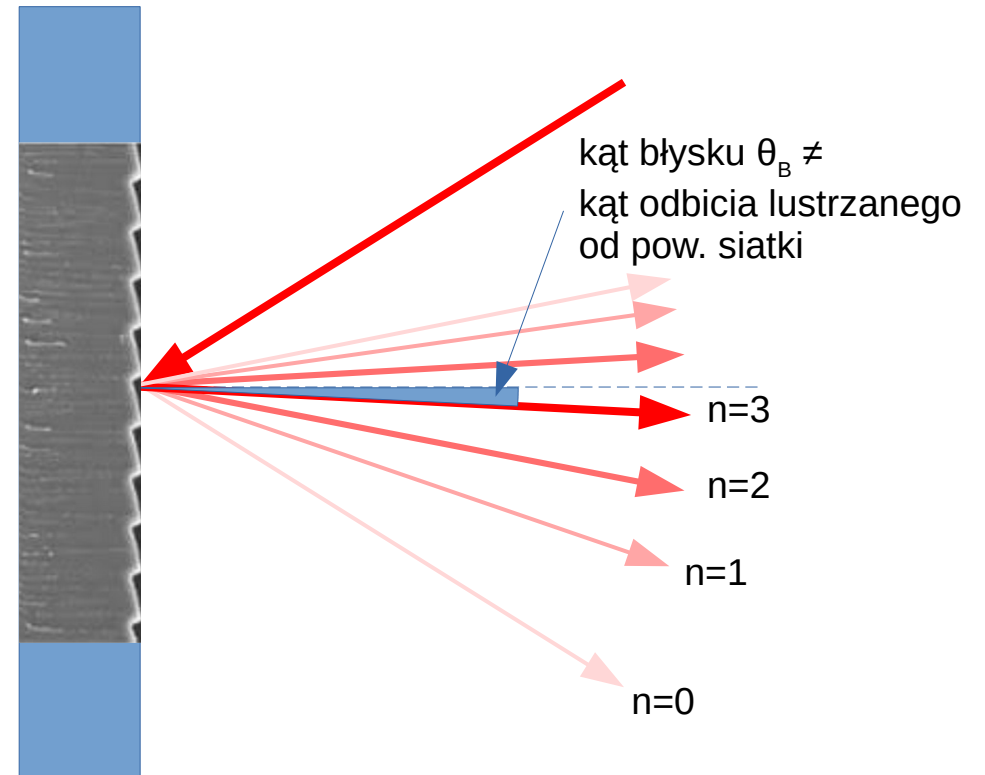
Echelle to po francusku drabina. Nazwa się przyjęła pomimo, że podstawy tego typu spektrografów opracował amerykańczyk Michelson i nazwał „echelleon” (1898), a potem rozwinęli Japończycy Nagaoka i Mishima (1923).

Budowa spektrografu

Siatka dyfrakcyjna z nielustrzanym błyskiem



Zwykła siatka dyfrakcyjna odbiciowa
(ang. non-blazed grating).



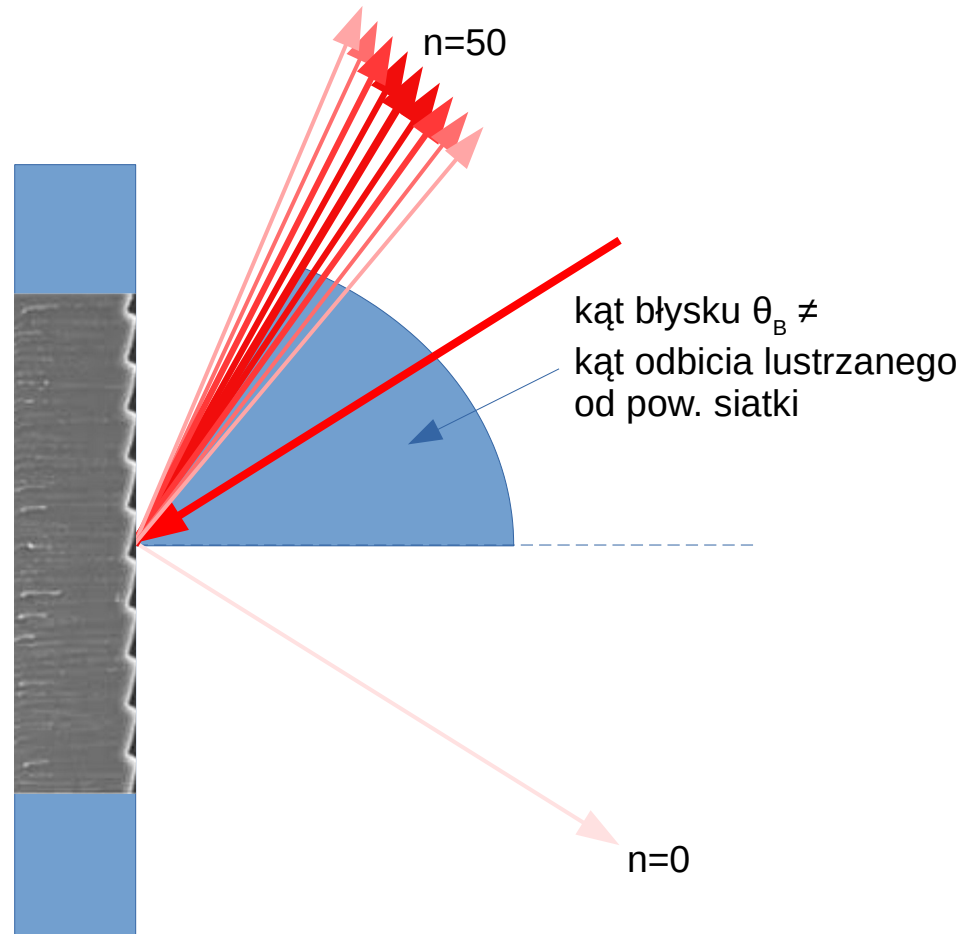
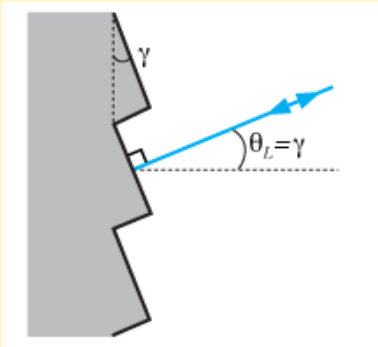
Siatka dyfrakcyjna odbiciowa
z nielustrzanym błyskiem
(ang. blazed grating).

Na rysunkach siatka oświetlona światłem monochromatycznym, różnice w natężeniu światła oznaczone są odcieniami czerwieni.

Budowa spektrografu

Siatka dyfrakcyjna typu echelle

Na marginesie jeśli:
kąt padania
= kąt odbicia
= kąt błysku
to mamy
konfigurację
Littrowa.

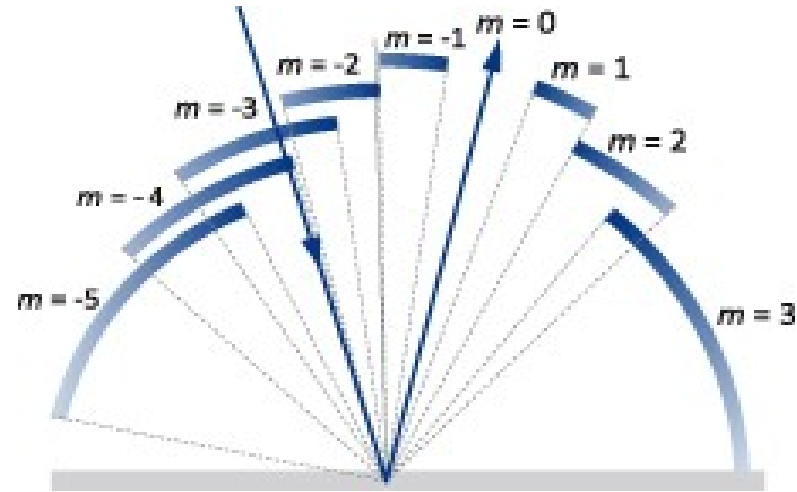
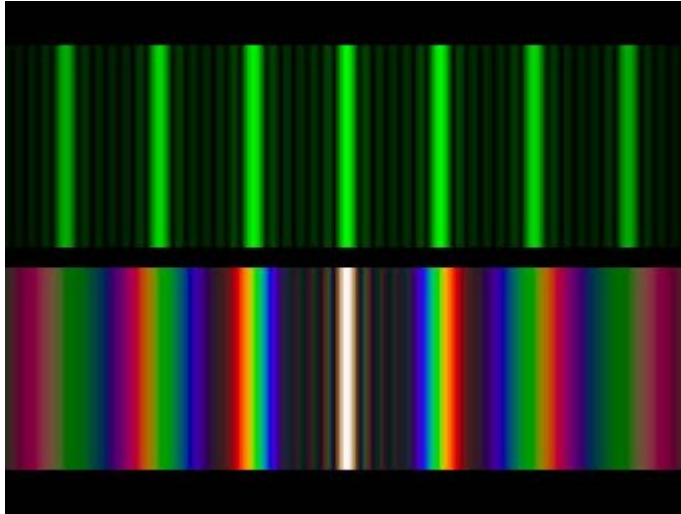


Siatka dyfrakcyjna o dużym kącie błysku nielustrzanego θ_B
dobranym tak by większość światła trafiała do wysokich rzędów dyfrakcji/widma (ang. echelle grating).

Kąty odbicia pomiędzy wysokimi rzędami różni się mniej niż między niskimi.
Dlatego siatka echelle z błyskiem produkuje więcej rzędów widma niż zwykła siatka
(z błyskiem lub bez). Może być nawet kilkadziesiąt rzędów widma jednocześnie.

Budowa spektrografu

Free spectral range



Polichromatyczne i monochromatyczne widmo z siatki dyfrakcyjnej (Soskind, 2011).

Widma kolejnych rzędów są coraz silniej rozszczepione (rośnie dyspersja) co sprawia, że wraz ze wzrostem rzędu widma w coraz większym stopniu nakładają się na siebie.

Wolny zakres widma (ang. free spectral range) jest różnicą w długości fali światła odbitego pod tym samym kątem z sąsiednich rzędów widma.

Jest to zakres w którym w nakładających się rzędach nie powtarzają się te same λ .

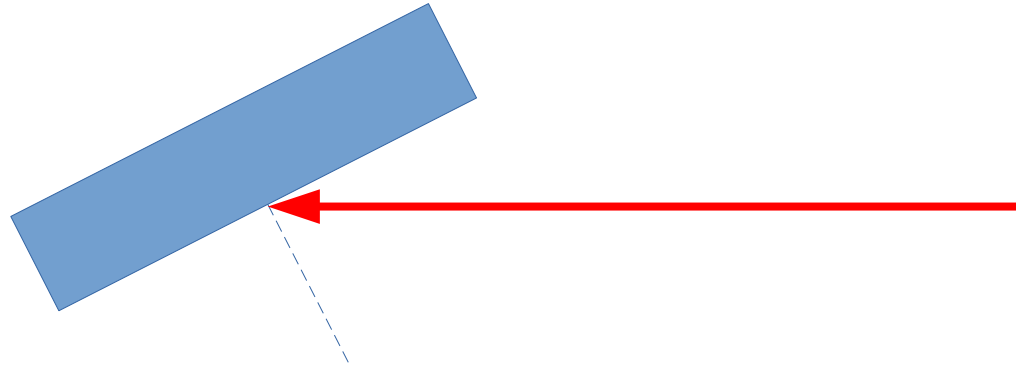
$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_{(m+1)}}{m}$$

Budowa spektrografu

Siatki echelle typu R2 i R4

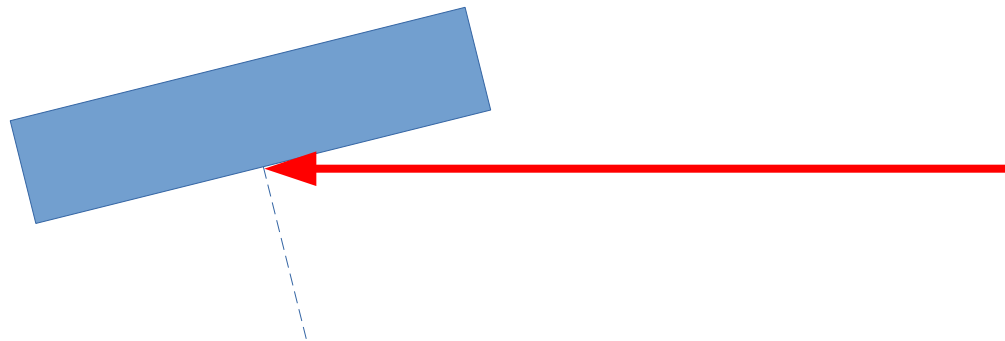
Siatka echelle o kącie błysku dla którego $\text{tg } \theta_B = 2$ oznaczana jest zwykle jako R2.

$$\theta_B = 63.4^\circ$$



Siatka echelle o kącie błysku dla którego $\text{tg } \theta_B = 4$ oznaczana jest zwykle jako R4.

$$\theta_B = 76.0^\circ$$

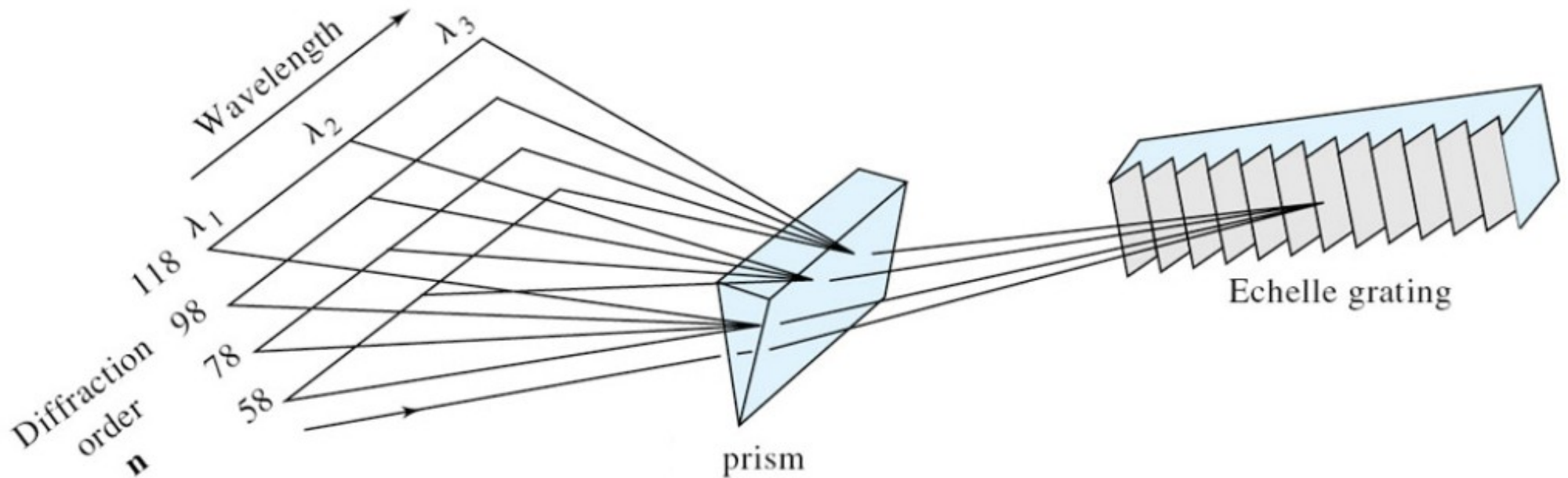


Wynika to z zależności rozdzielczości spektrografu od $\text{tg } \theta_B$: $R_{slit}^{gr} = 2 \text{tg } \theta_b \frac{f_{col}}{w}$

Budowa spektrografu

Siatka dyfrakcyjna typu echelle + pryzmat

Element dyspersyjny (ang. disperser) i prostopadły element dyspersyjny (ang. cross-disperser).

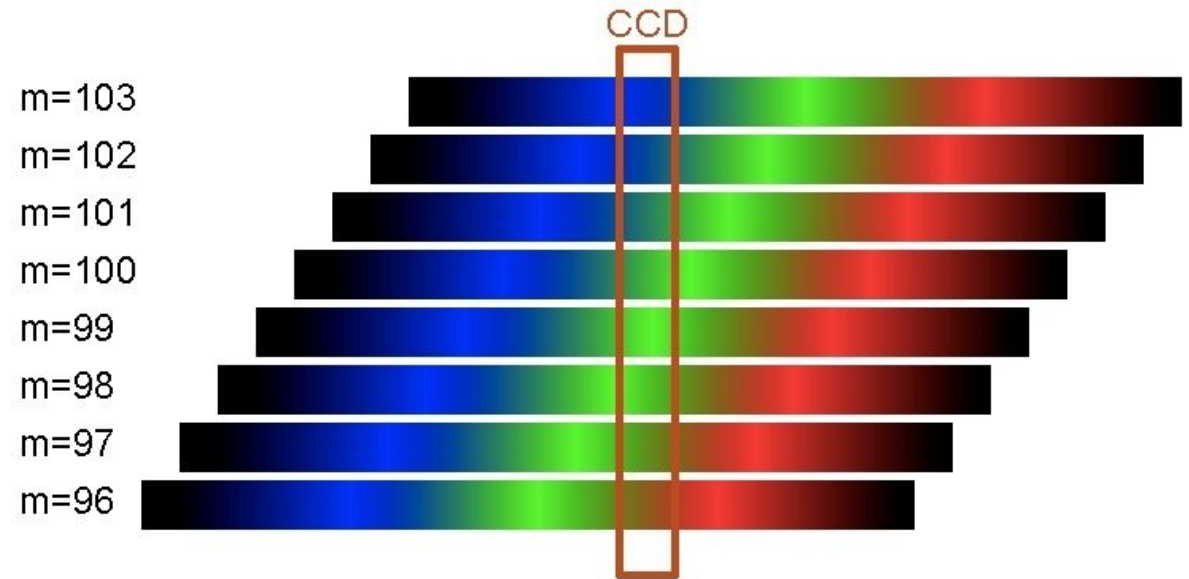
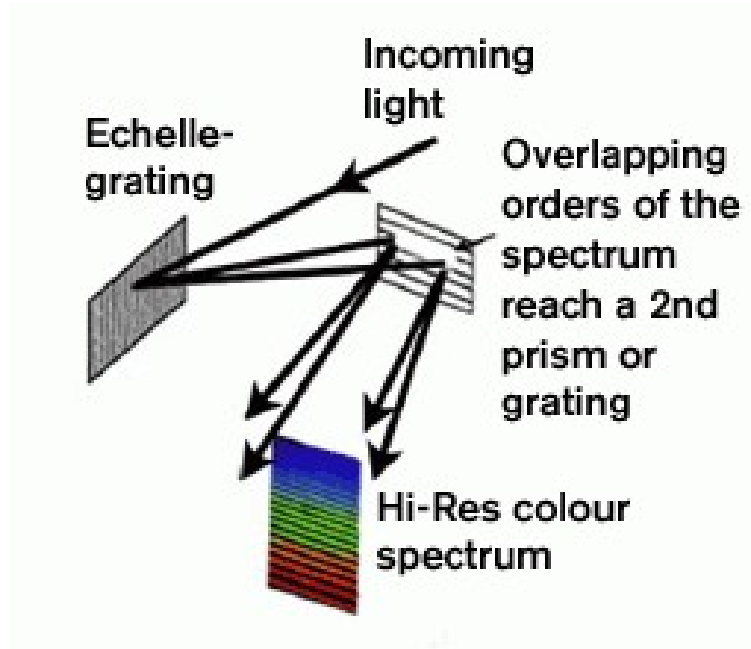


Połączenie siatki echelle z pryzmatem (www2.chemistry.msu.edu).

Krosdysperser pozwala oddzielić od siebie nakładające się widma wysokiego rzędu siatki echelle. Może być pryzmatem lub siatką.

Budowa spektrografu

Spektrograf typu echelle



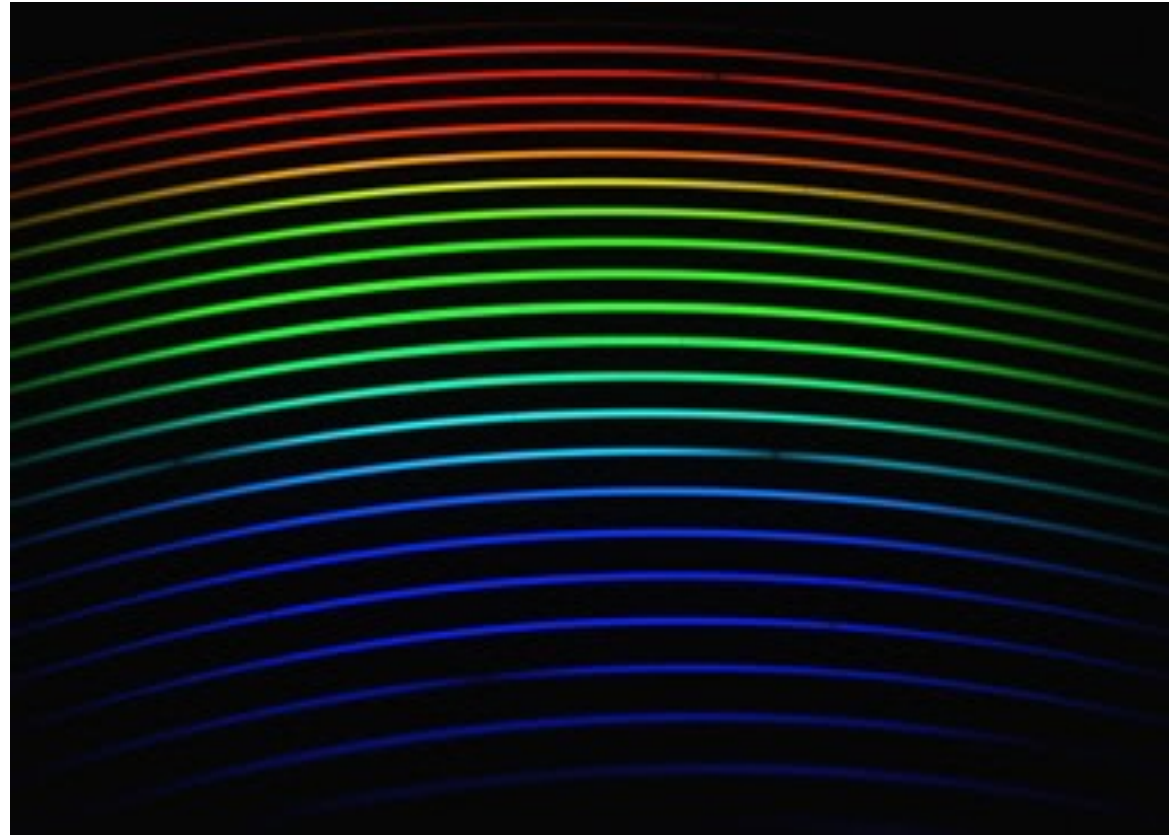
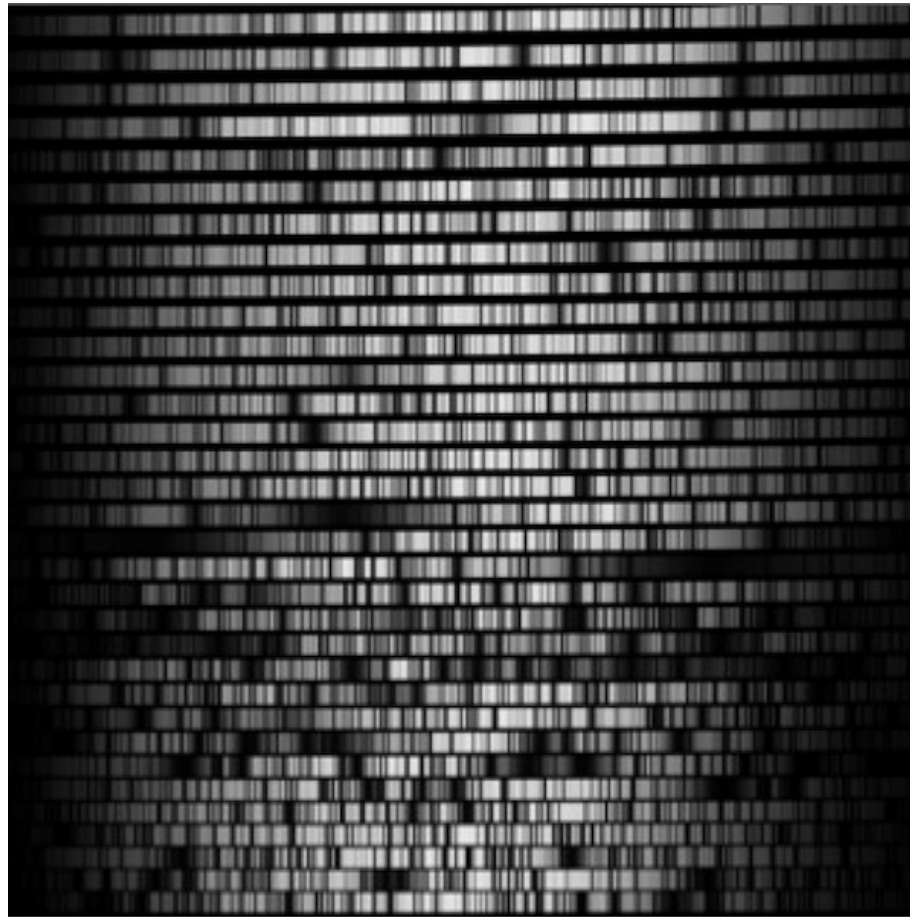
Without cross dispersion: different wavelength ranges overlap.
With cross dispersion: You get multiple short spectra.

Schemat spektrografu typu echelle (planewave.com).

Widmo echelle składa się z krótkich widm (rzędów), które odpowiadają kolejnym rzędom widma siatki dyfrakcyjnej.

Budowa spektrografu

Spektrograf typu echelle



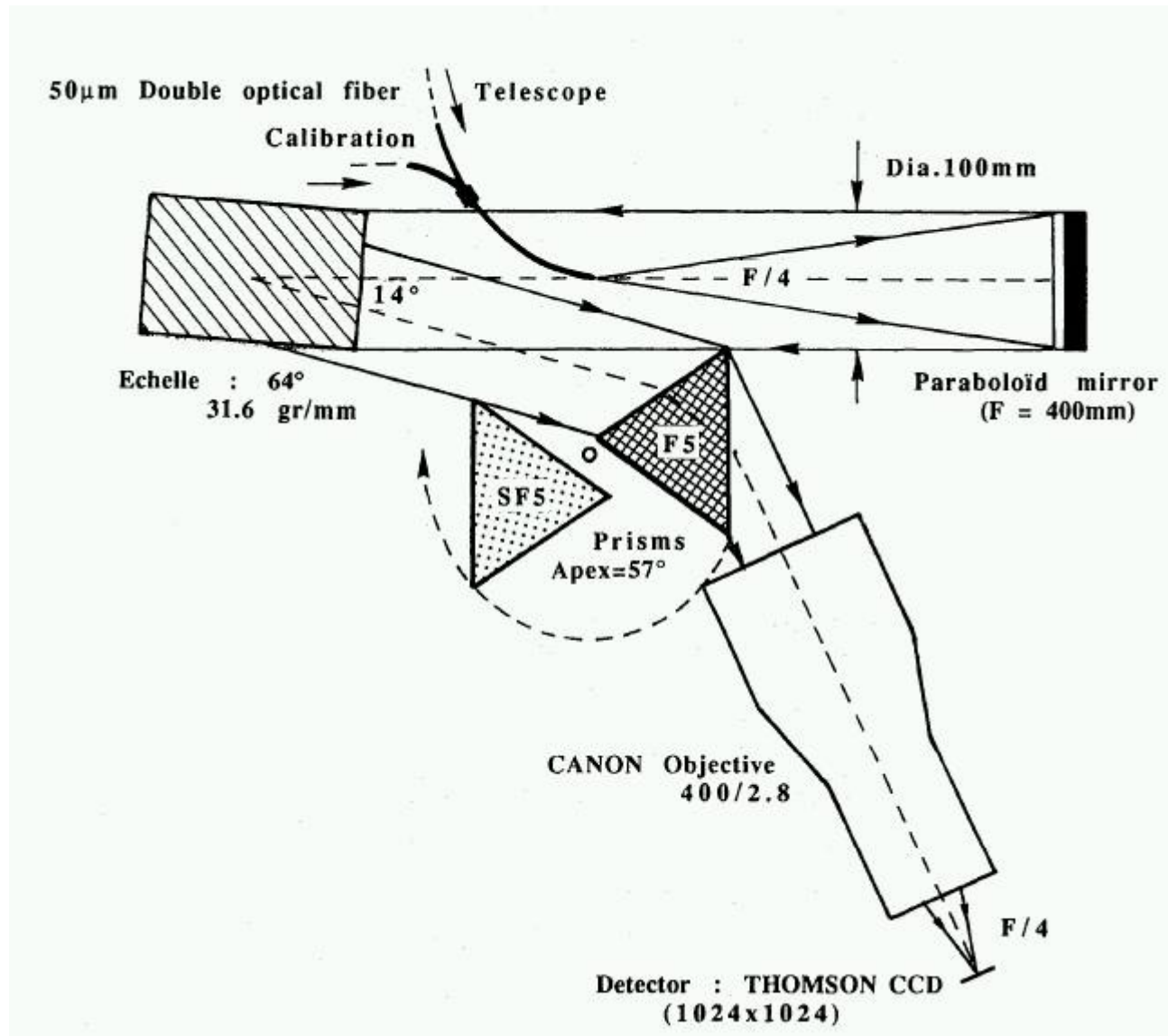
Przykłady widm typu echelle:

z lewej – widmo gwiazdy późnego typu ze spektrografu szczelinowego (www.comsol.com).

z prawej – Vega ze spektrografu $R=8000$, zasilanego światłowodem (<http://www.astrosurf.com>).

Budowa spektrografu

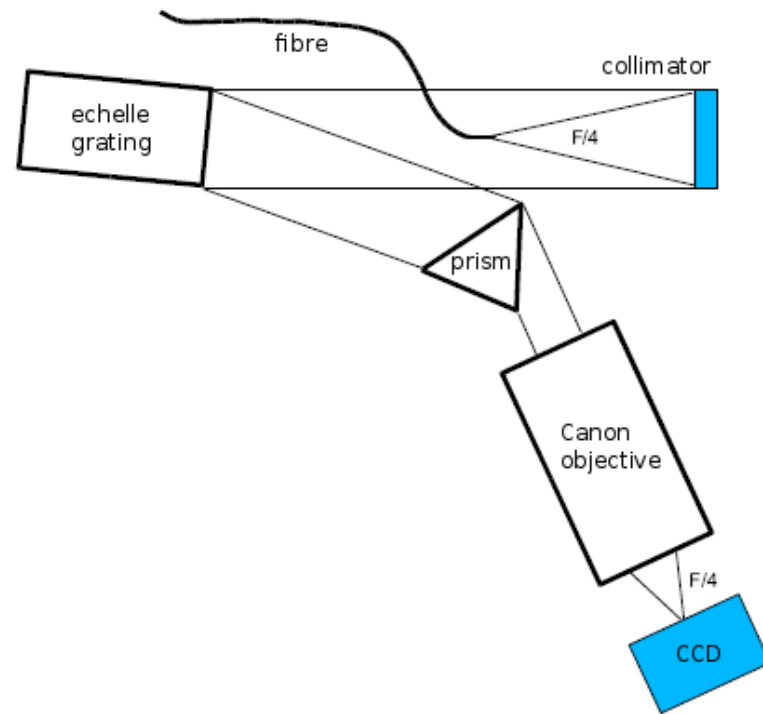
Spektrograf typu echelle



Schemat spektrografu MUSICOS (Baudrand i Bohm, 1992).

Budowa spektrografu

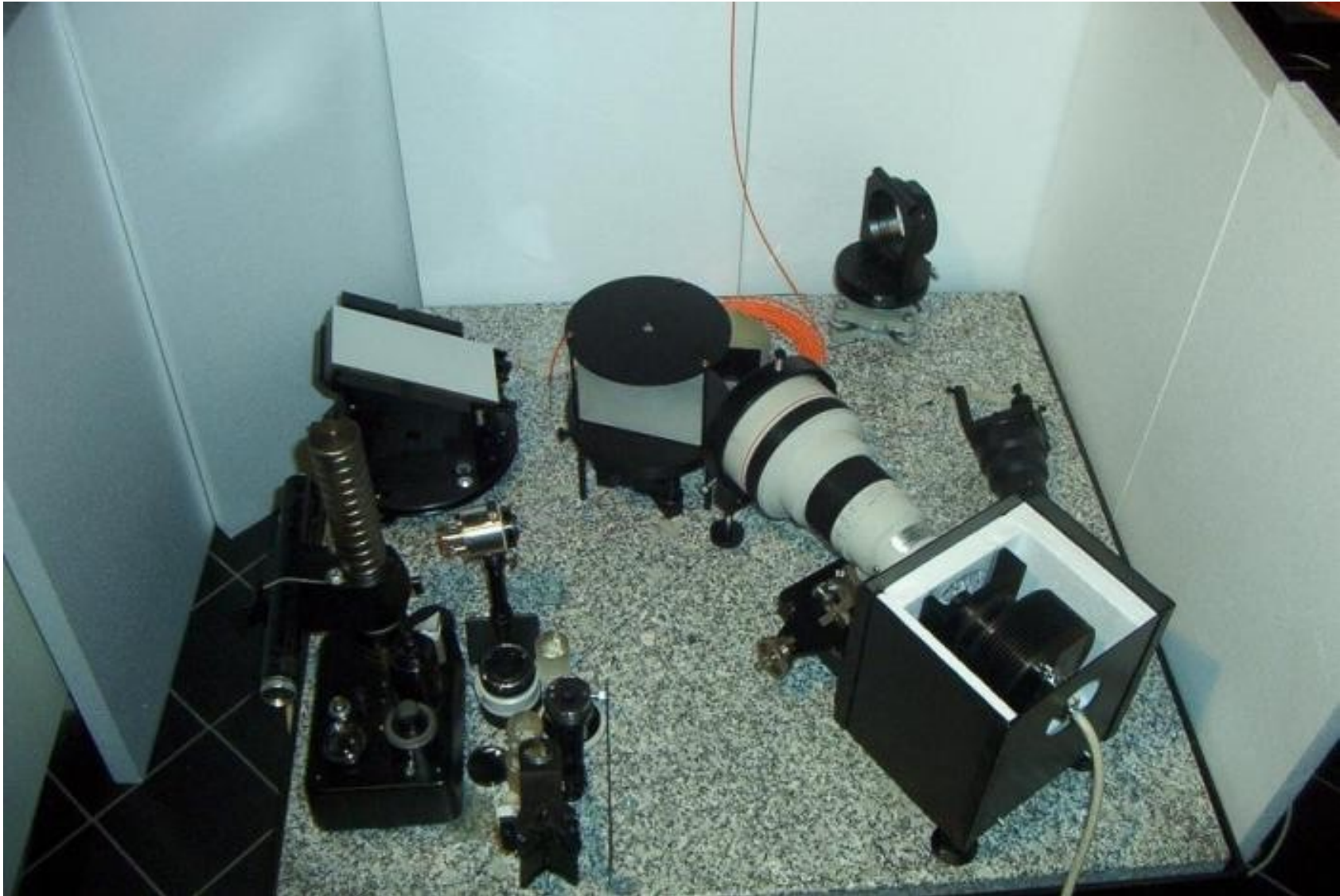
Spektrograf typu echelle



Schemat spektrografu PST1.

Budowa spektrografu

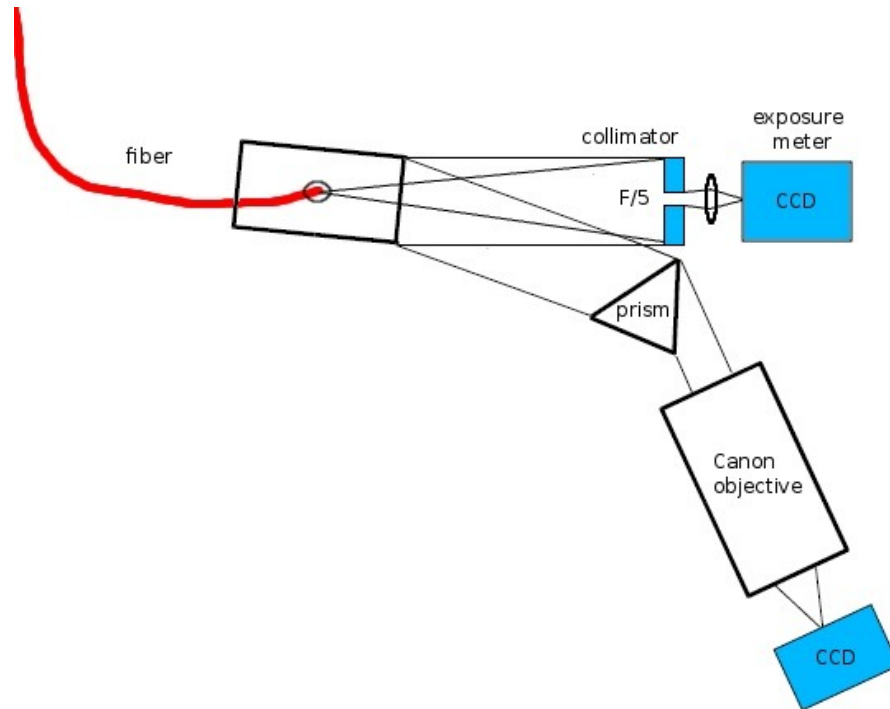
Spektrograf typu echelle



Spektrograf echelle PST1.

Budowa spektrografu

Spektrograf typu echelle



Schemat spektrografu RBT/PST2.

Budowa spektrografu

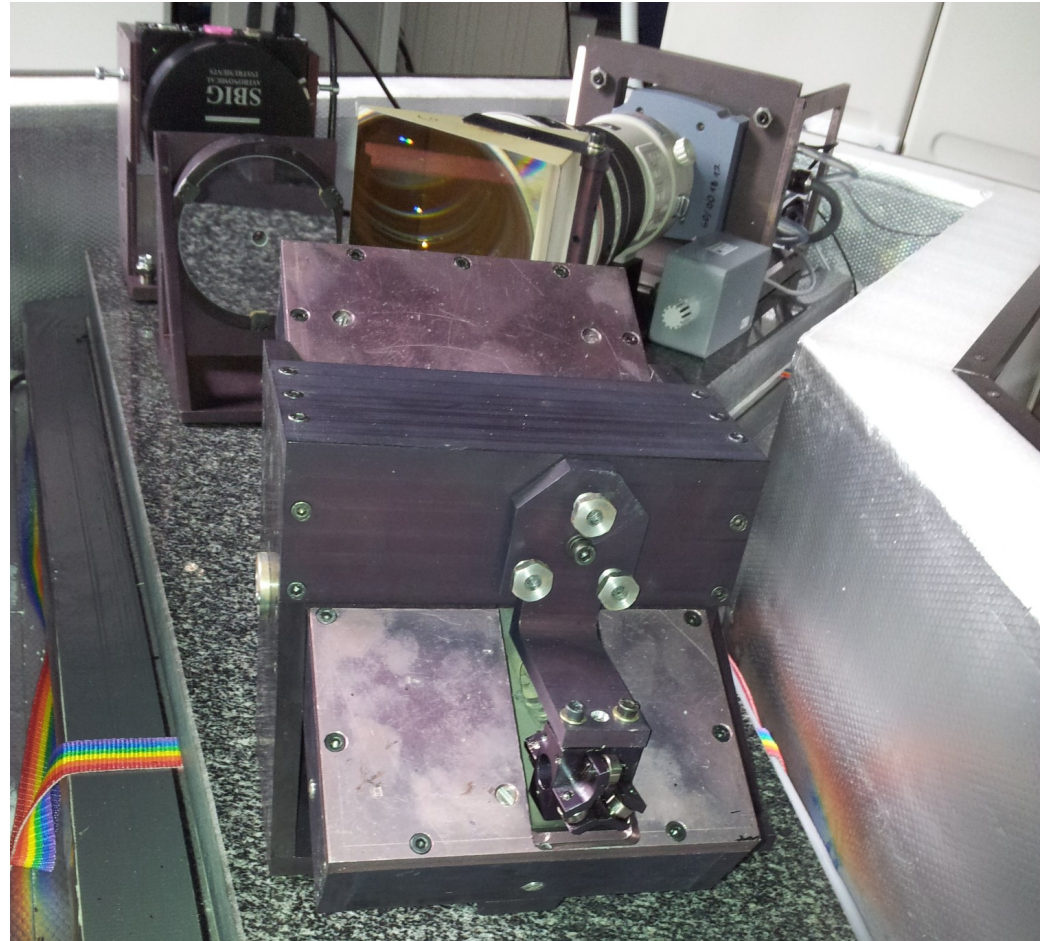
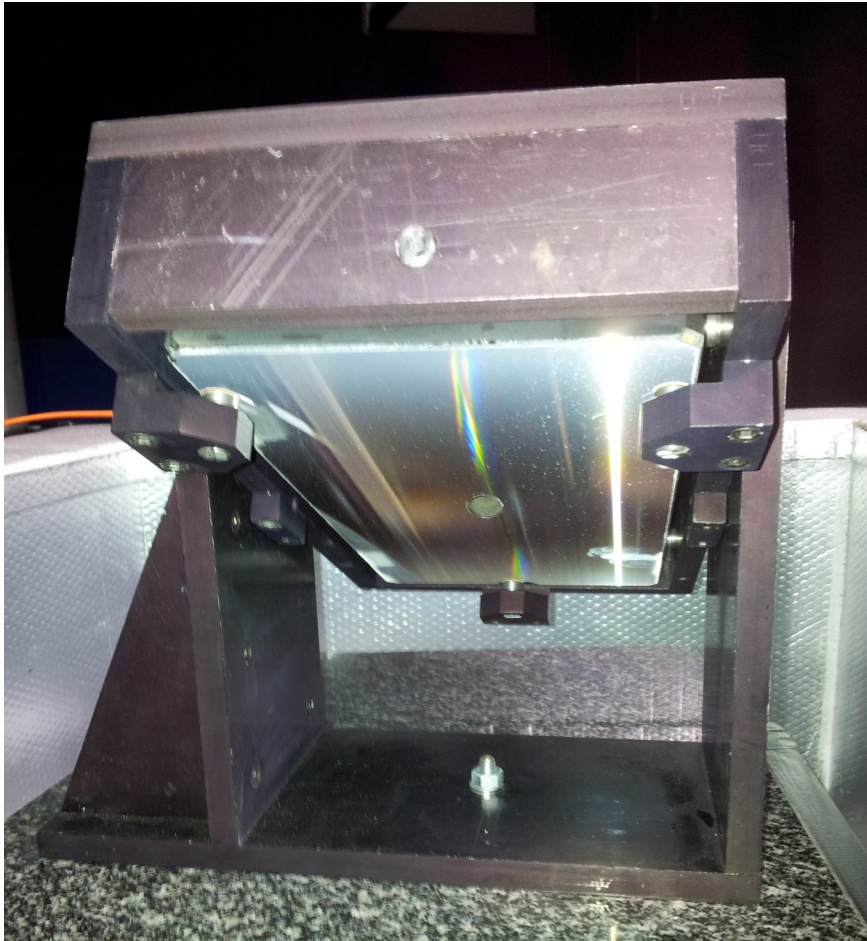
Spektrograf typu echelle



Spektrograf echelle RBT/PST2.

Budowa spektrografu

Spektrograf typu echelle



Spektrograf echelle RBT/PST2.

Budowa spektrografu

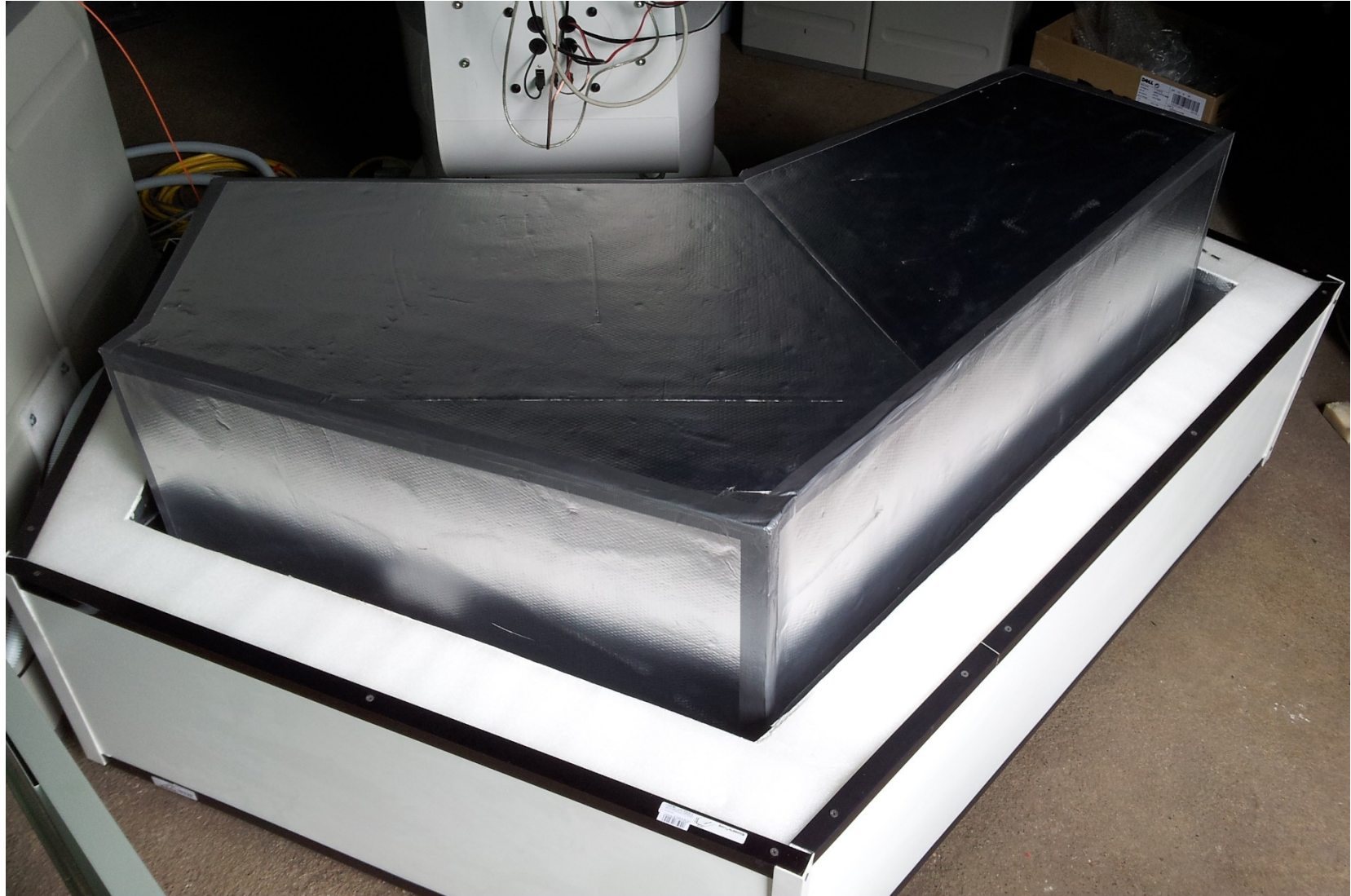
Spektrograf typu echelle



Spektrograf echelle RBT/PST2.

Budowa spektrografu

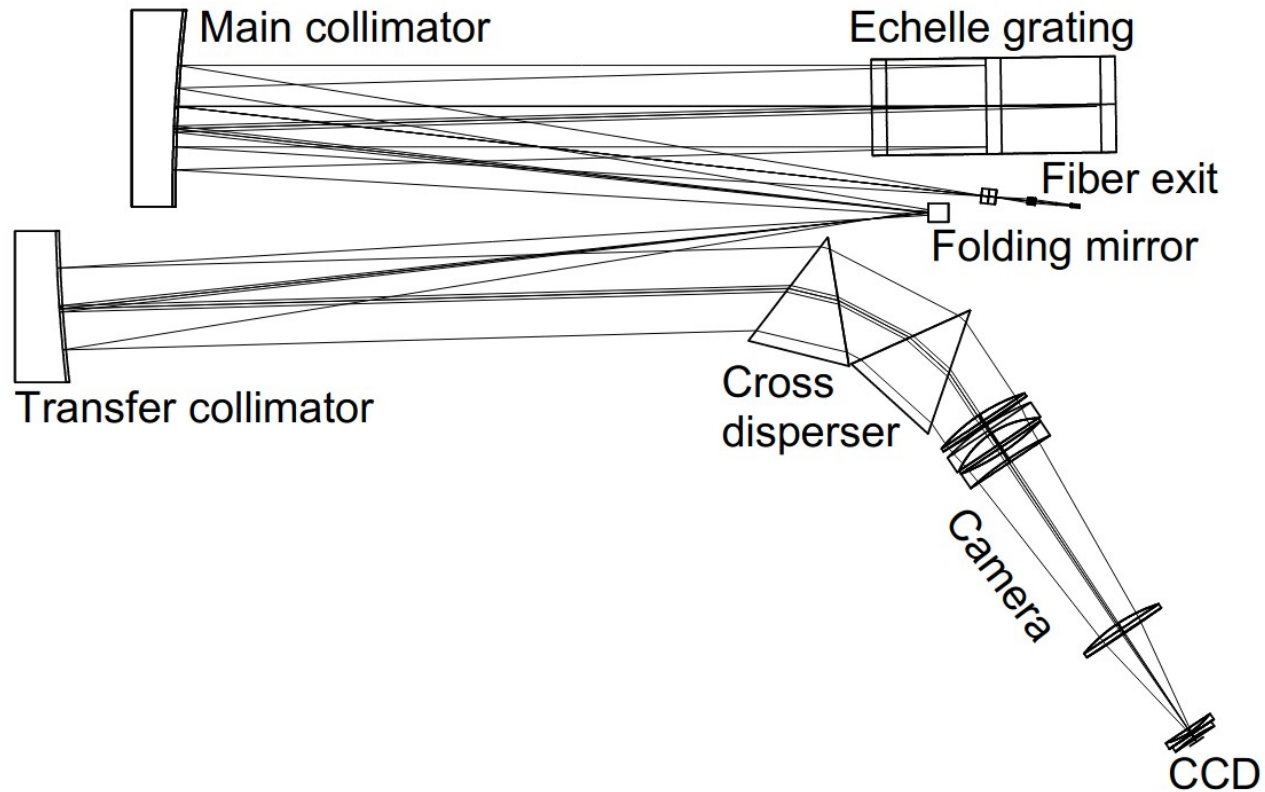
Spektrograf typu echelle



Spektrograf echelle RBT/PST2.

Budowa spektrografu

Układ białej źrenicy



Schemat spektrografu echelle HERMES (na 3.9m AAT) wykorzystującego układ białej-źrenicy (de Cuyper i in., 2007).

Układ białej źrenicy (ang. white-pupil design) wymaga zastosowania dwóch kolimatorów, ale pozwala zmniejszyć aperturę pryzmatu i kamery oraz może pomóc zredukować rozmiar spektrografu i jego wady optyczne.

Budowa spektrografu

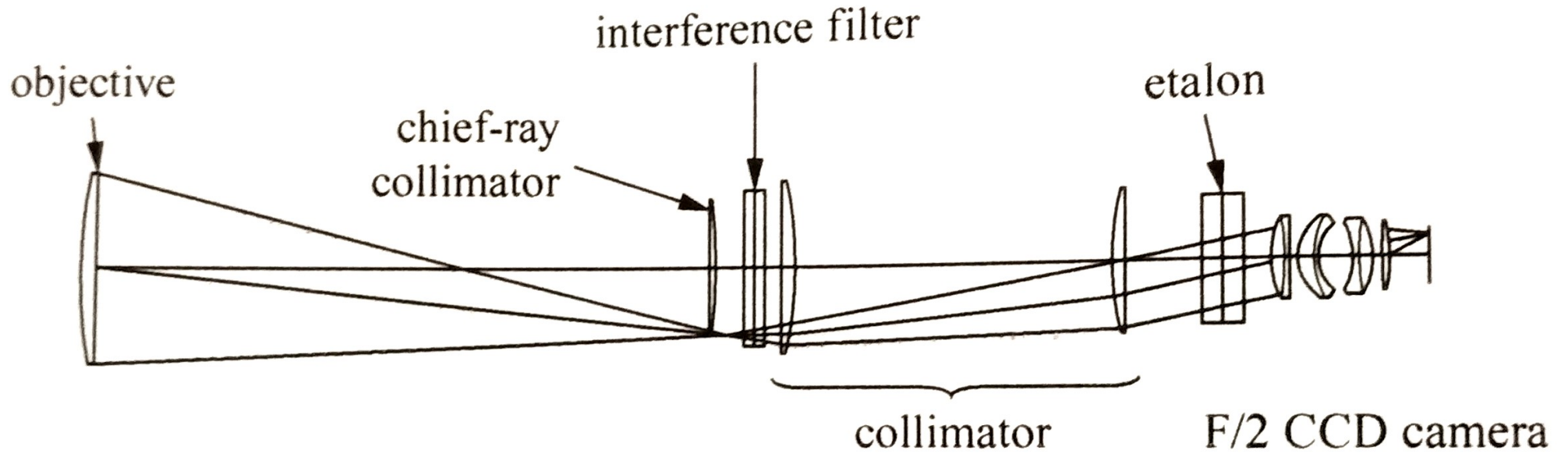
Spektrograf typu echelle

Wady spektrografów typu echelle:

- drogie i bardziej skomplikowane,
- mają niższą efektywność kwantową (dużo elementów optycznych),
- wysoka rozdzielczość w połączeniu z szerokim zakresem widmowym,
- widmo złożone z równoległych fragmentów lepiej pasuje do kamer CCD.

Budowa spektrografu

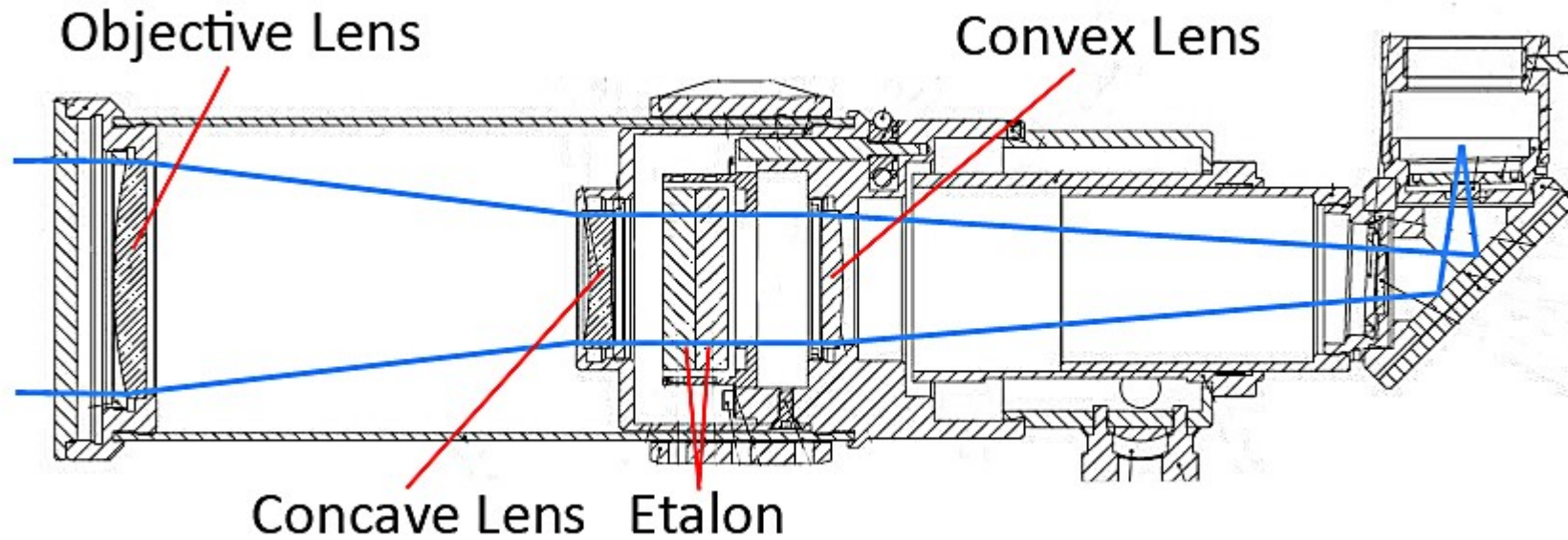
Spektrograf Fabry-Perot



Przykład spektrografu z etalonem Fabry-Perot (John James 2007).

Budowa spektrografu

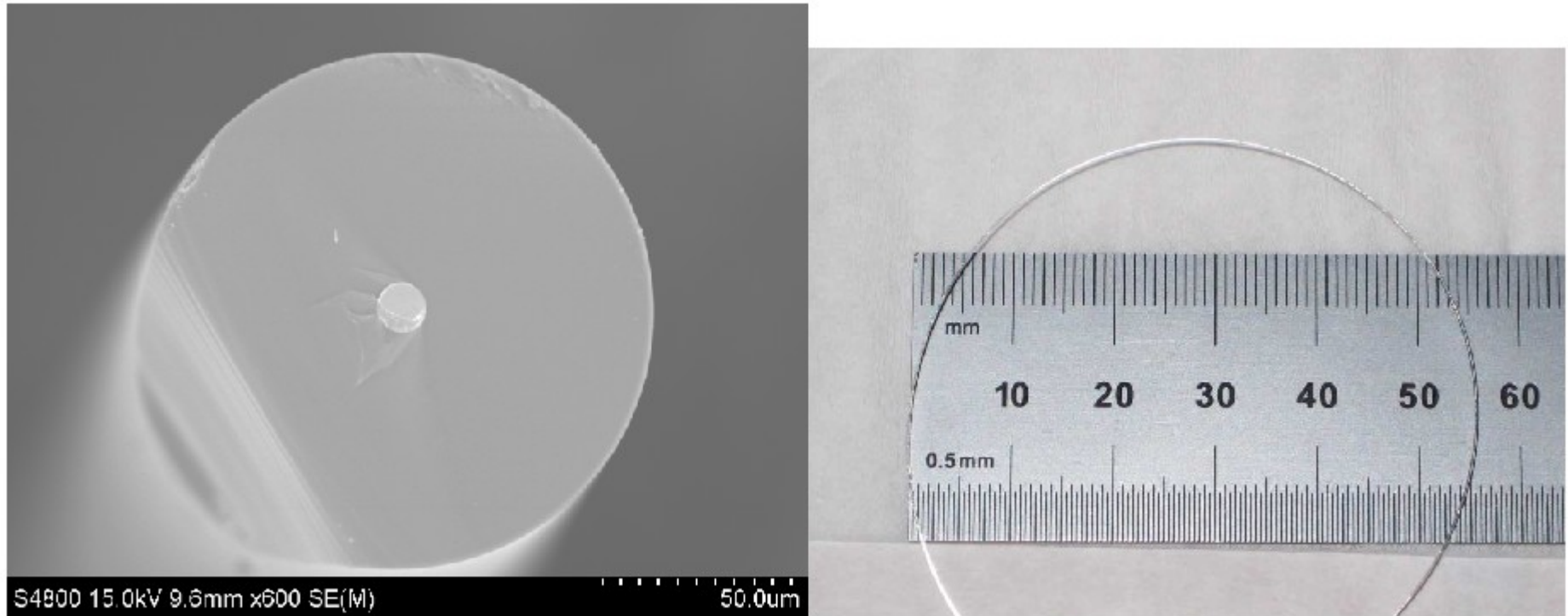
Spektrograf Fabry-Perot



Schemat teleskopu słonecznego (Ian Morrison www.ianmorrison.com).

Budowa spektrografu

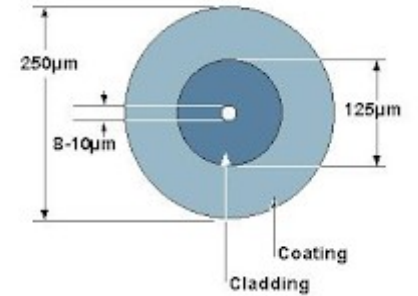
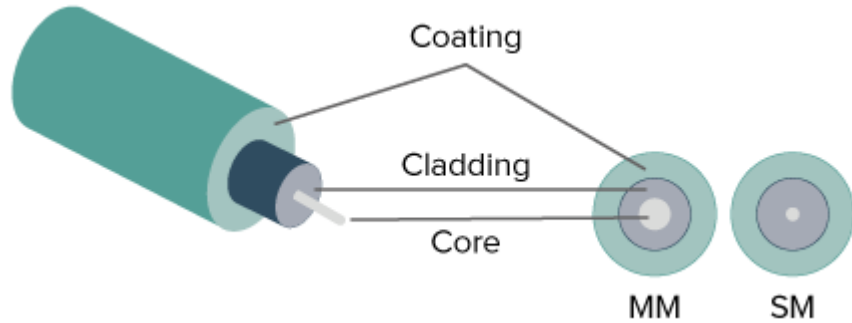
Światłowód



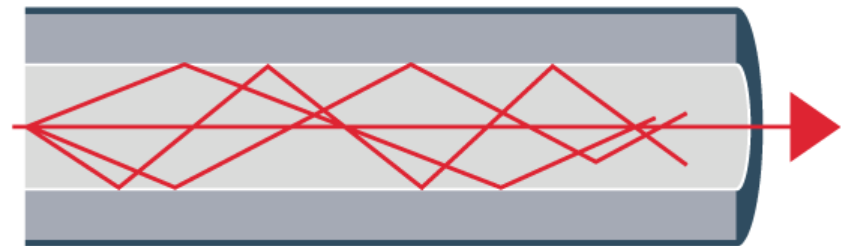
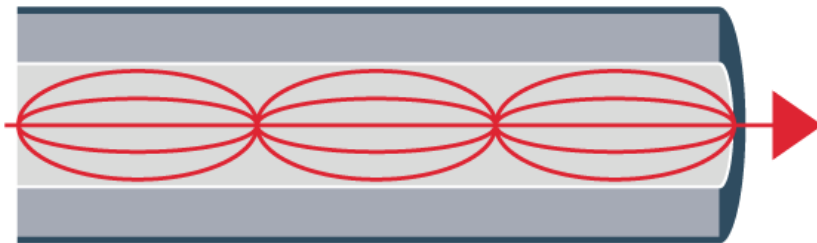
Obraz rdzenia i włókna światłowodu w mikroskopie elektronowym (Ballato i in., 2009).

Budowa spektrografu

Światłowód



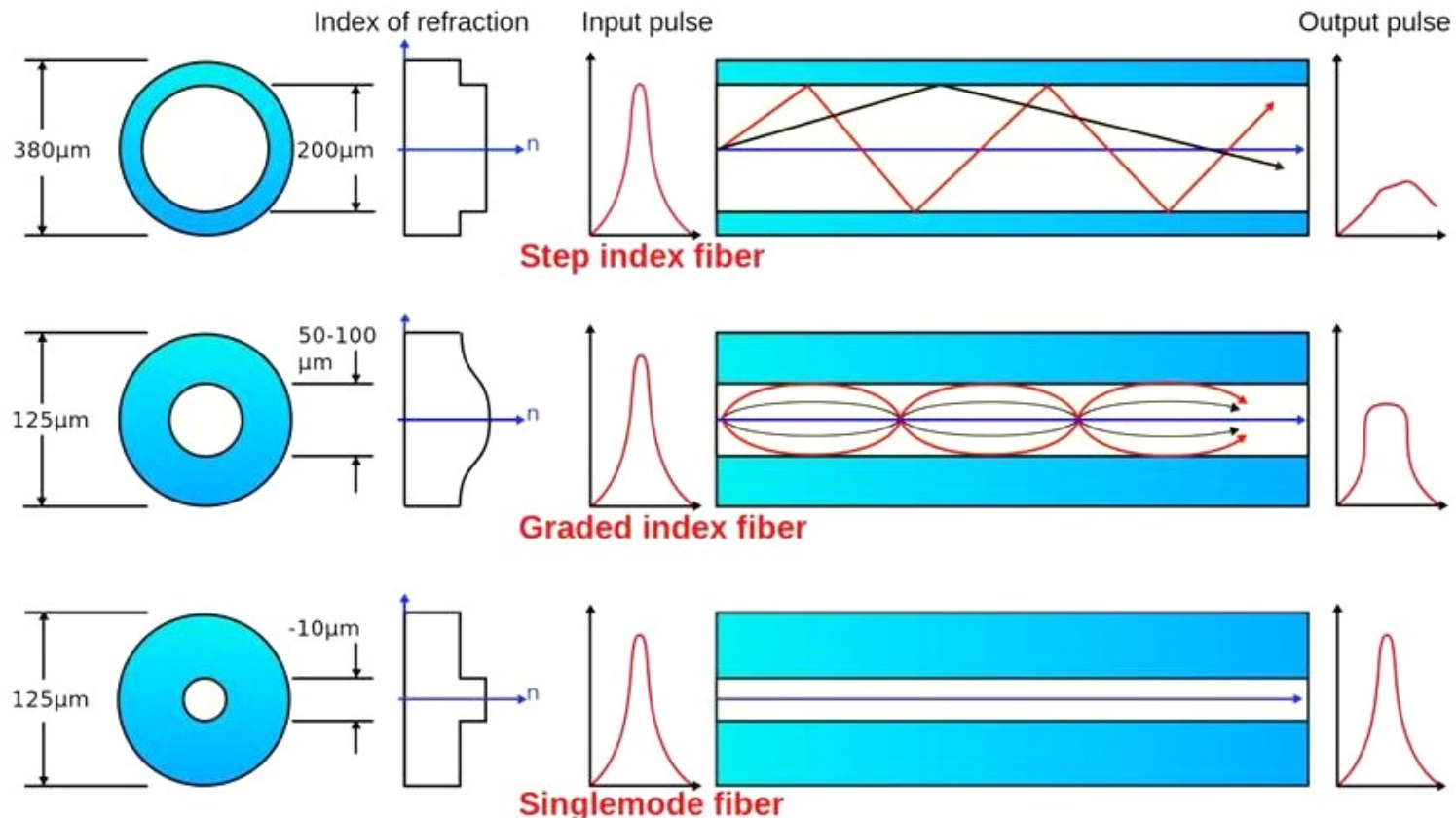
Rdzeń, płaszcz (izolacja) i osłona światłowodu wielomodowego (MM) i jednomodowego (SM) (www.smartoptics.com).



Gradient index and step-index (www.smartoptics.com).

Budowa spektrografu

Światłowód



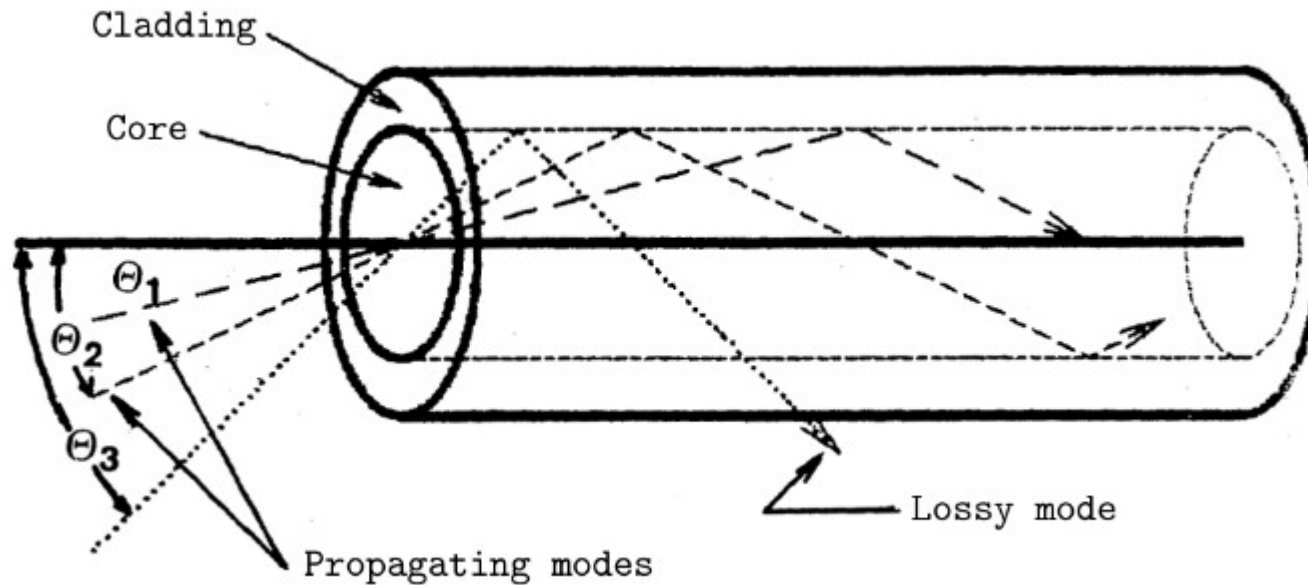
Światłowód jednomodowy, wielomodowy skokowy i łagodny
(Classification of Optical Fibers Step Index Graded Index Optical Fibers, youtube.com).

Światłowód jednomodowy transmituje światło bez zniekształceń (pomijając pochłanianie). Wiązka wchodząca jest taka sama jak wychodząca.

Światłowód jednomodowy ma średnicę na tyle bliską z długością fali światła, że nie można go przybliżać optyką geometryczną, tylko trzeba traktować jako falowód i rozwiązywać równania Maxwella.

Budowa spektrografu

Światłowód

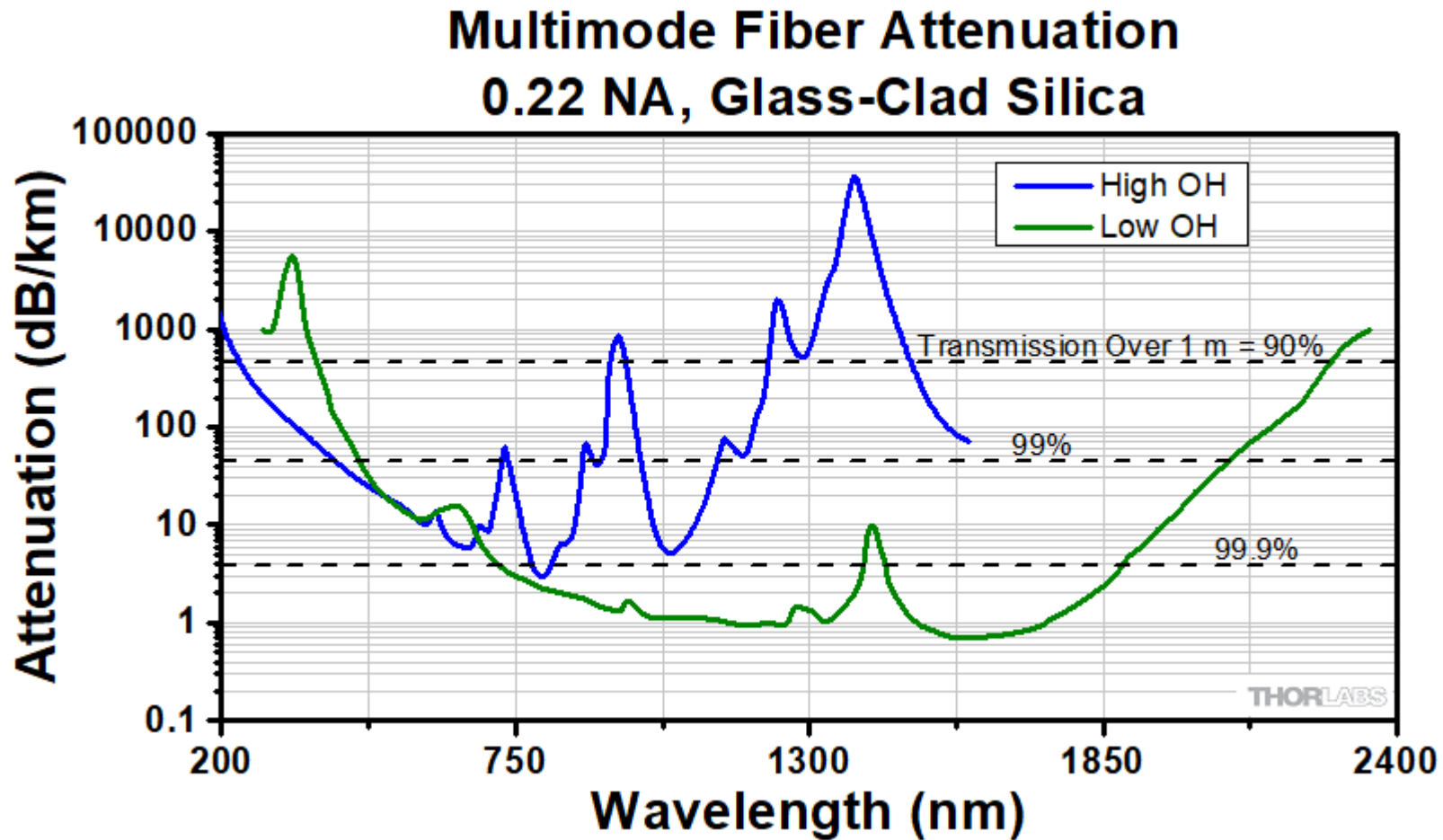


Mody propagujące i nie propagujące się w światłowodzie
(Assen, 2011).

Światłowód jednomodowy w przybliżeniu akceptuje tylko promienie prostopadłe, światłowód wielomodowy może akceptować promienie w szerszym zakresie kątów padania do powierzchni czołowej światłowodu.

Budowa spektrografu

Światłowód

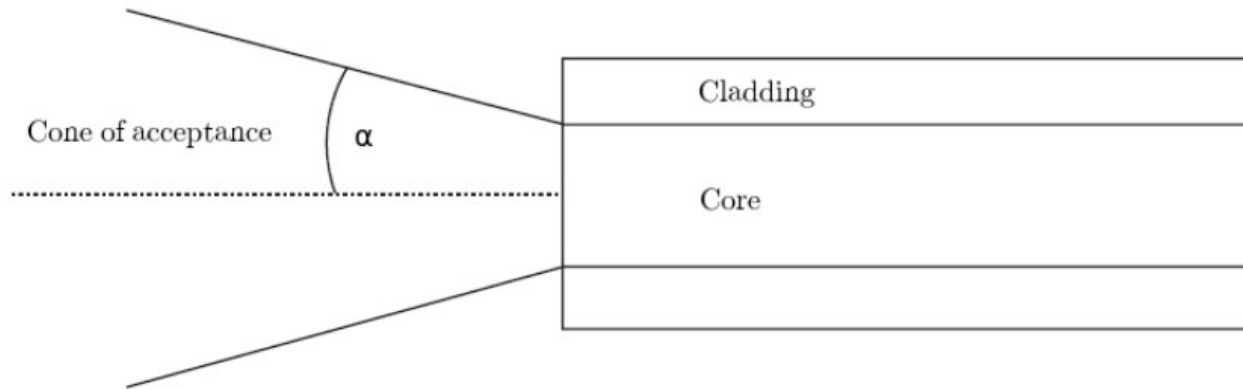


Pochłanianie światła w światłowodzie wielomodowym (www.thorlabs.com).

Transmisja światłowodu o czystym rdzeniu krzemowym (najpopularniejszy typ) zależy od jego czystości - zawartości jonów OH^- w krzemie.

Budowa spektrografu

Światłowod

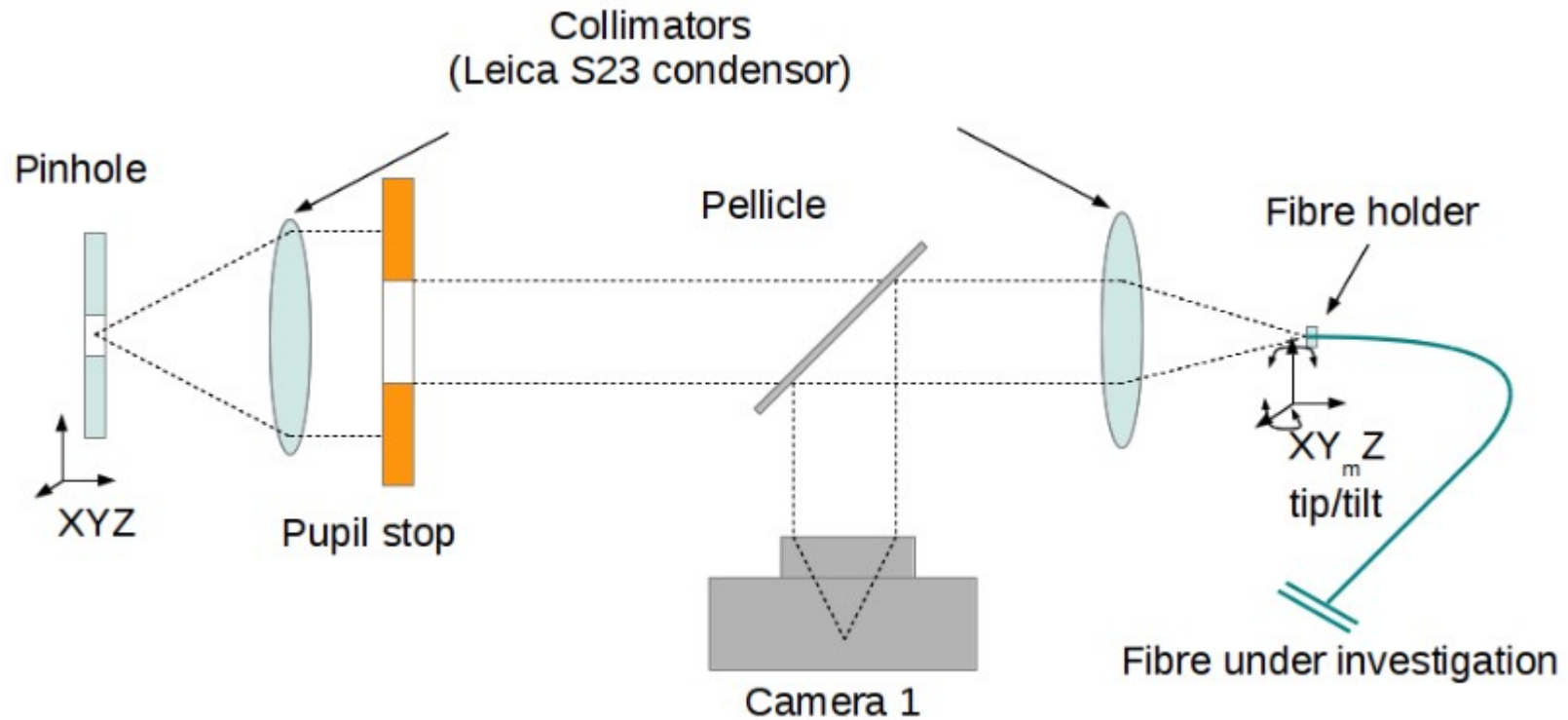


Apertura numeryczna NA określa maksymalną rozwartość stożka α_{max} wiązki światła która może zostać wprowadzona do światłowodu.

$$NA = n_{pow} \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_{rdzeń}^2 - n_{płaszcz}^2}$$

Budowa spektrografu

Światłowód

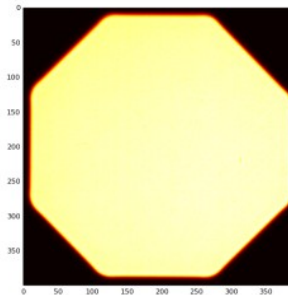
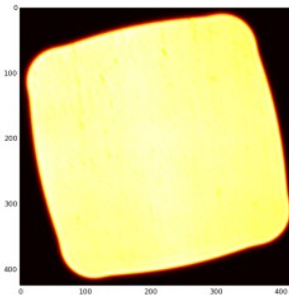
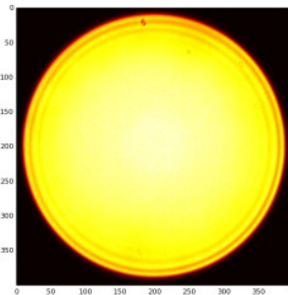
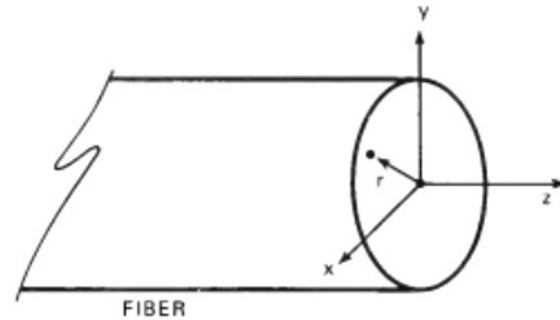
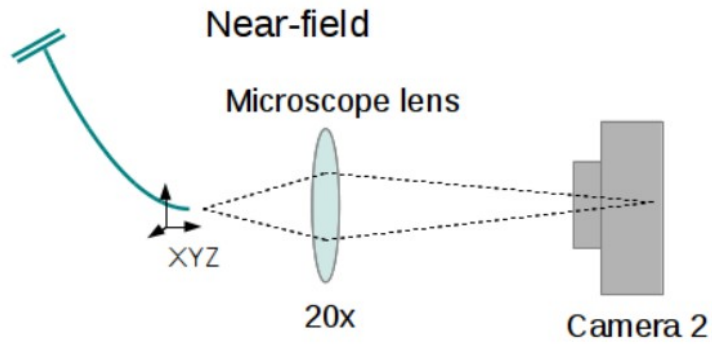


Testowanie transmisji światła w światłowodzie (Sturmer et al. 2015).

Od strony teleskopu do światłowodu wprowadzany jest zbieżny stożek światła. Aby sprawdzić jaka wiązka wychodzi prowadzi się testy eksperymentalne.

Budowa spektrografu

Światłowód

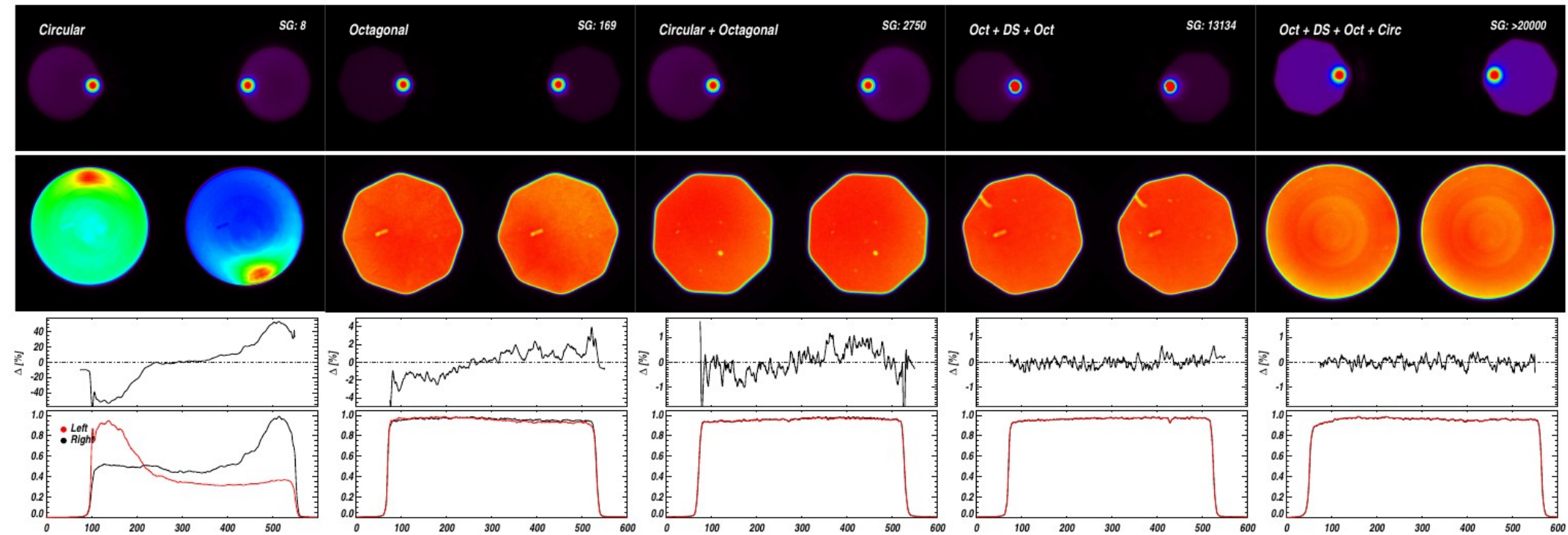


Analiza rozkładu światła na końcówce światłowodu (ang. near-field), zakładając idealne równomierne oświetlenie z drugiej strony światłowodu (Sturmer et al. 2015).

Budowa spektrografu

Światłowód

Testy różnych światłowodów i ich kombinacji.

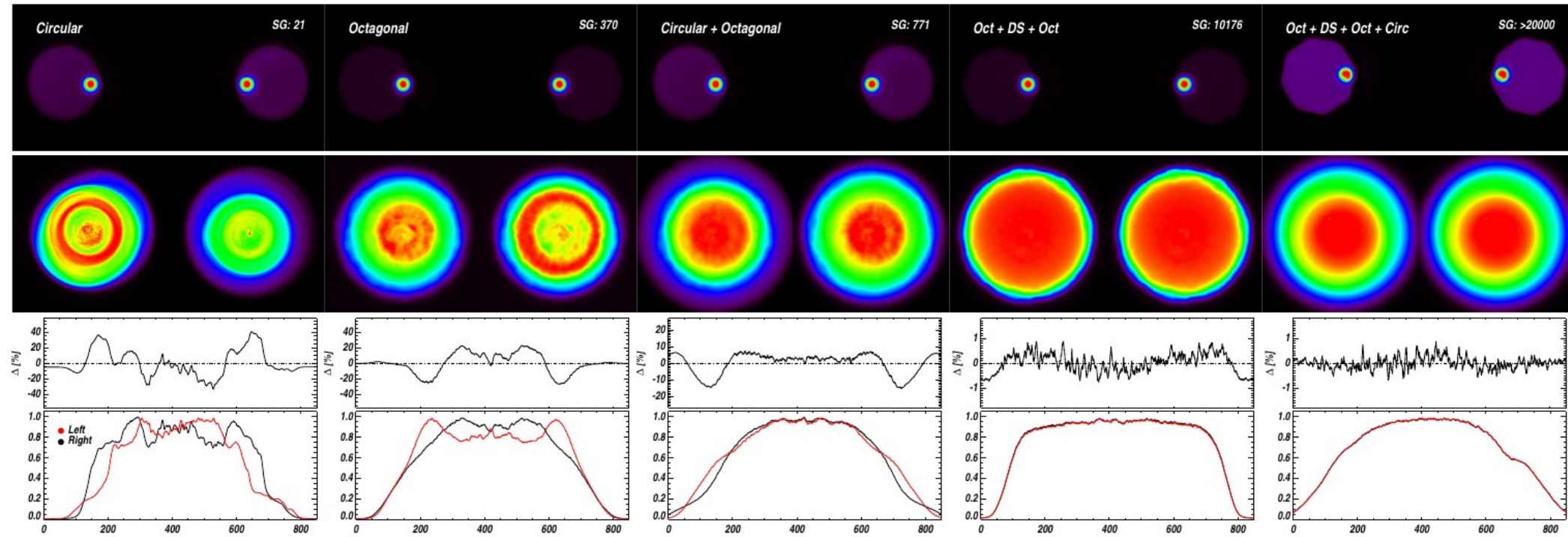


Rozkłady natężenia światła na końcówce światłowodu przy skrajnie nierównomiernym, punktowym oświetleniu brzegu końcówki wejściowej (Halverson i in. 2015).

Budowa spektrografu

Światłowód

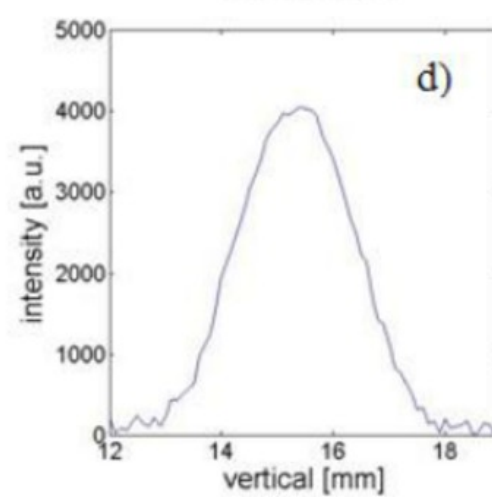
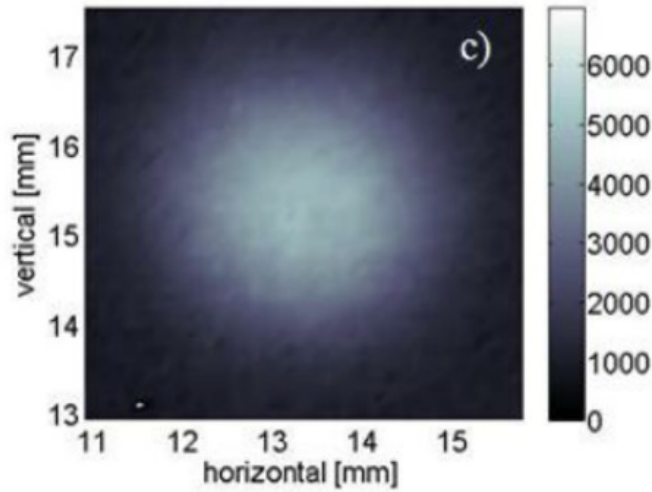
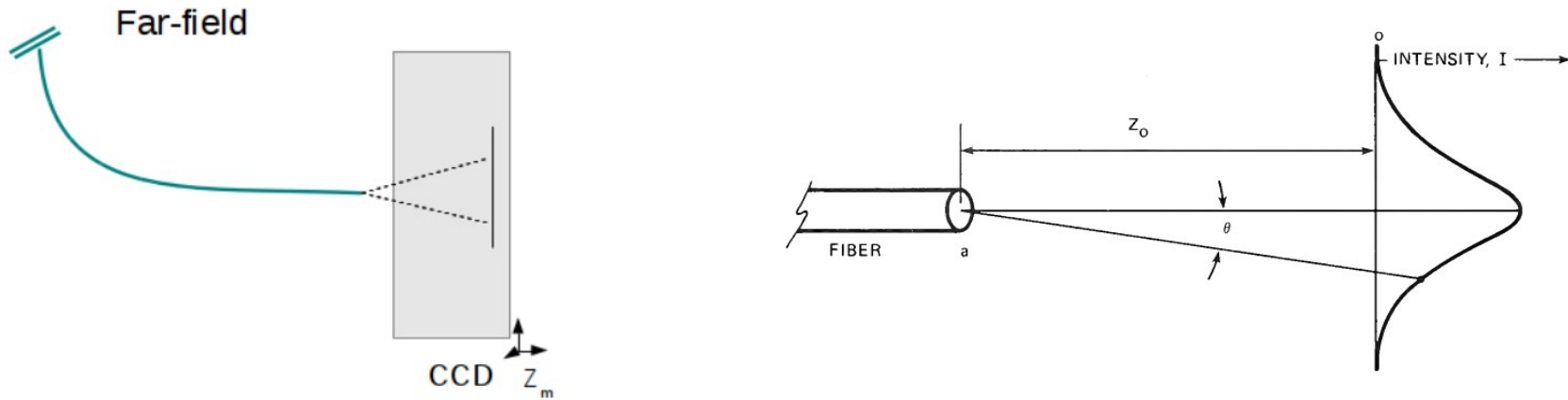
Testy różnych światłowodów i ich kombinacji.



Rozkłady natężenia światła wiązki światła wychodzącej ze światłowodu, przy skrajnie nierównomiernym oświetleniu końcówki wejściowej (Halverson i in. 2015).

Budowa spektrografu

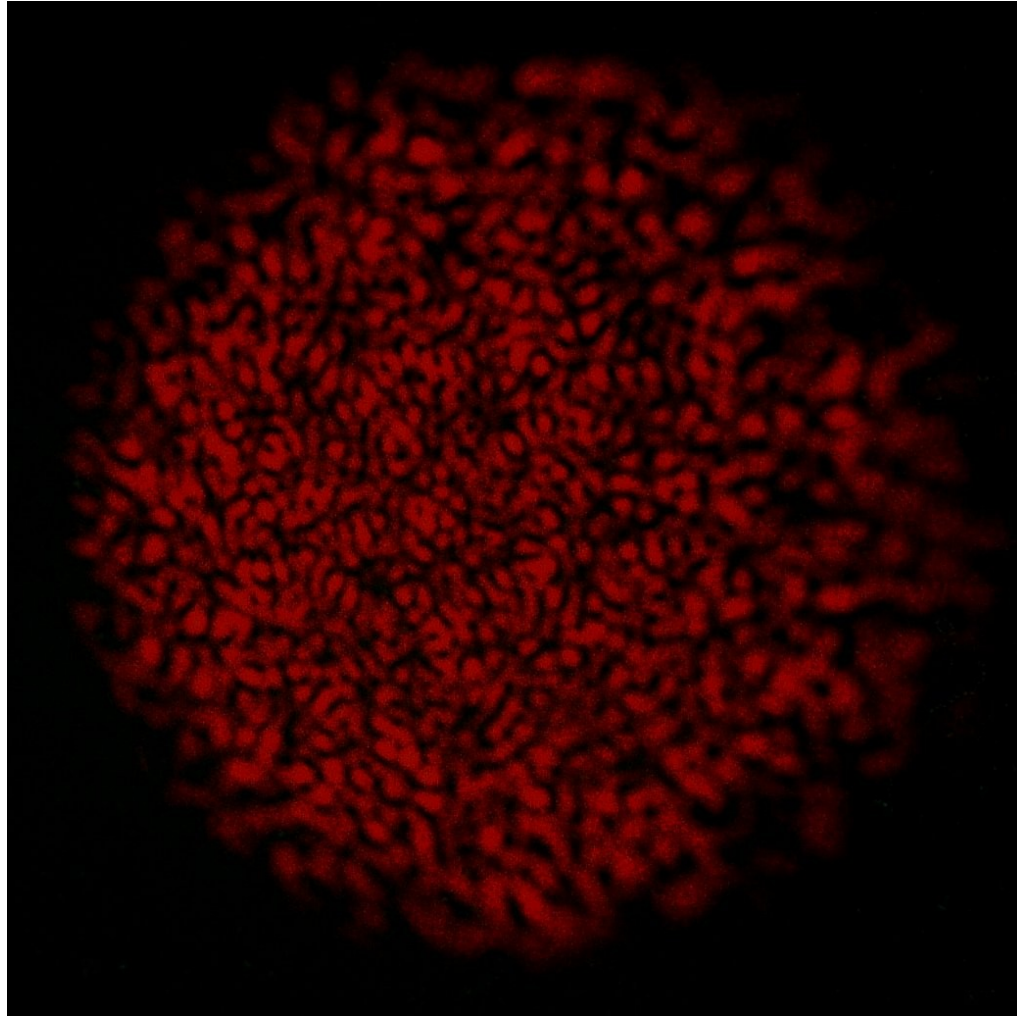
Światłowód



Analiza rozkładu światła na ekranie oświetlonym przez światłowód (ang. far-field), zakładając idealne równomierne oświetlenie z drugiej strony światłowodu (Sturmer et al. 2015), (Kim i Franzen, 1981), (Urich et al. 2012).

Budowa spektrografu

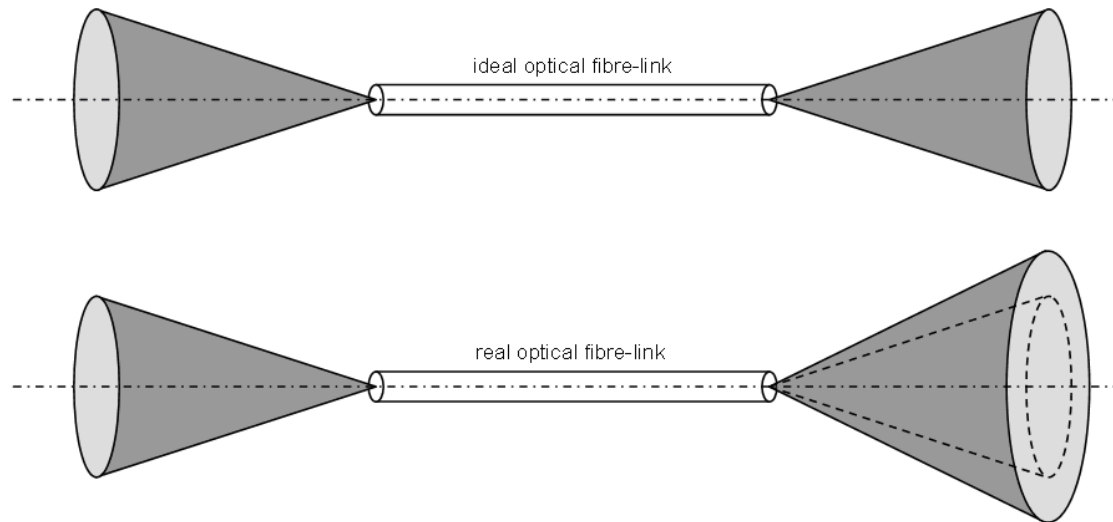
Światłowód



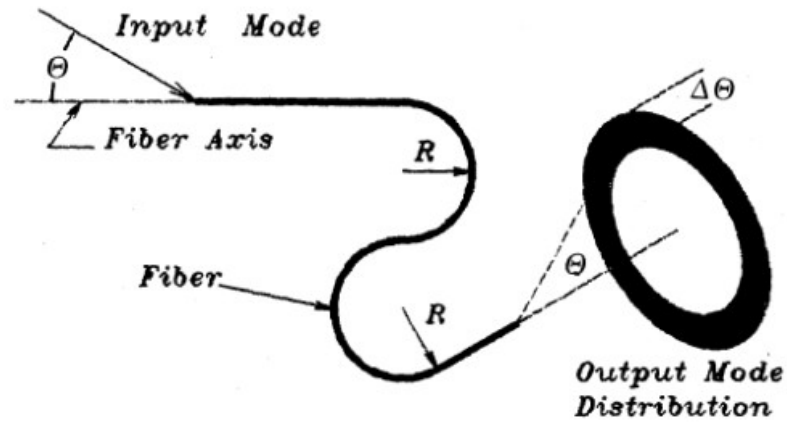
Rozkład światła laserowego wychodzącego ze światłowodu (far-field) z widocznymi plamkami interferencyjnymi (wikipedia.org).

Budowa spektrografu

Focal Ratio Degradation (FRD)



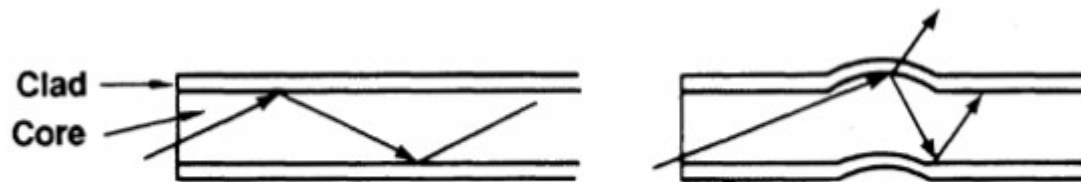
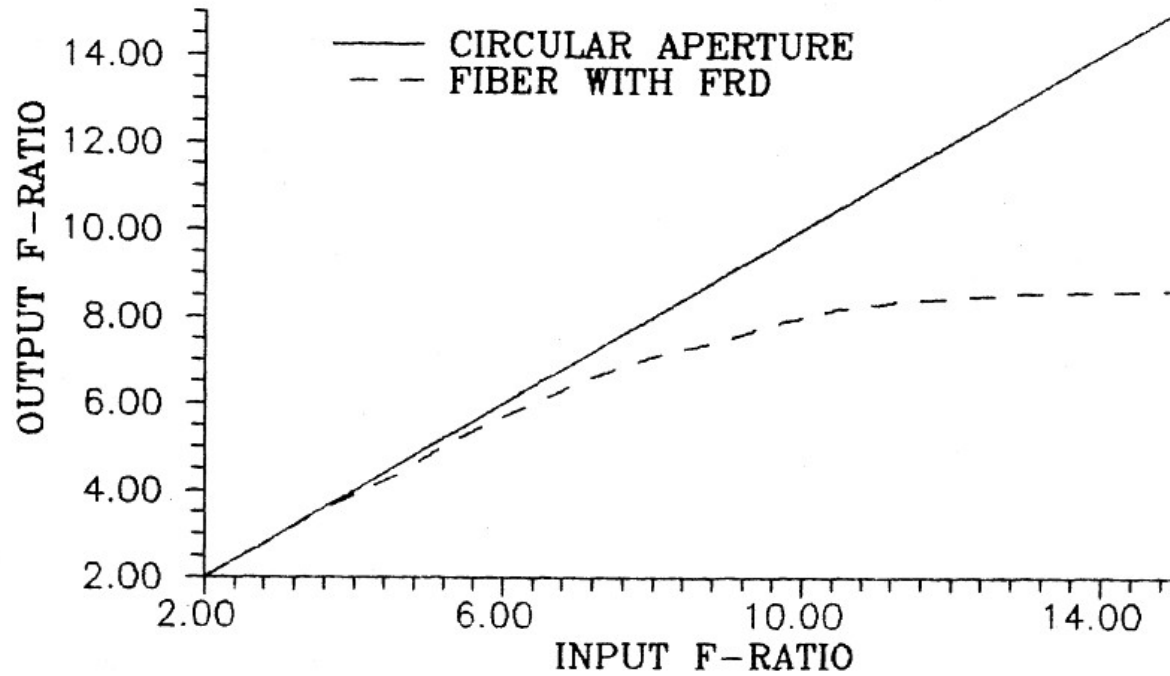
Degradacja światłości w światłowodzie (Feger, Goodwin & Poppett).



Degradacja światłości to niezachowanie kąta padania na wyjściu (Ramsey, 1988).

Budowa spektrografu

Focal Ratio Degradation (FRD)



Przyczyną degradacji światłości są m.in. niedoskonałości w produkcji światłowodów (Ramsey, 1988).

Budowa spektrografu

Światłowód

Własności światłowodu ważne dla obserwacji astronomicznych:

- dobra transmisja światła w zakresie widzialnym i podczerwonym,
- zdolność do zachowania rozkładu kątów promieni wiązki wchodzącej,
- degradacja światłości,
- stosunkowo dobra równomierność świecenia końcówki światłowodu (near-field),
- stosunkowo dobra równomierność oświetlenia kolimatora i siatki (far-field),
- stożek wejścia światłowodu (NA) powinien być większy niż stożek światła dostarczany przez teleskop,
- najlepsze byłyby światłowody jednomodowe, ale te miałyby ogromne straty światła.

Budowa spektrografu

Komórki jodowe



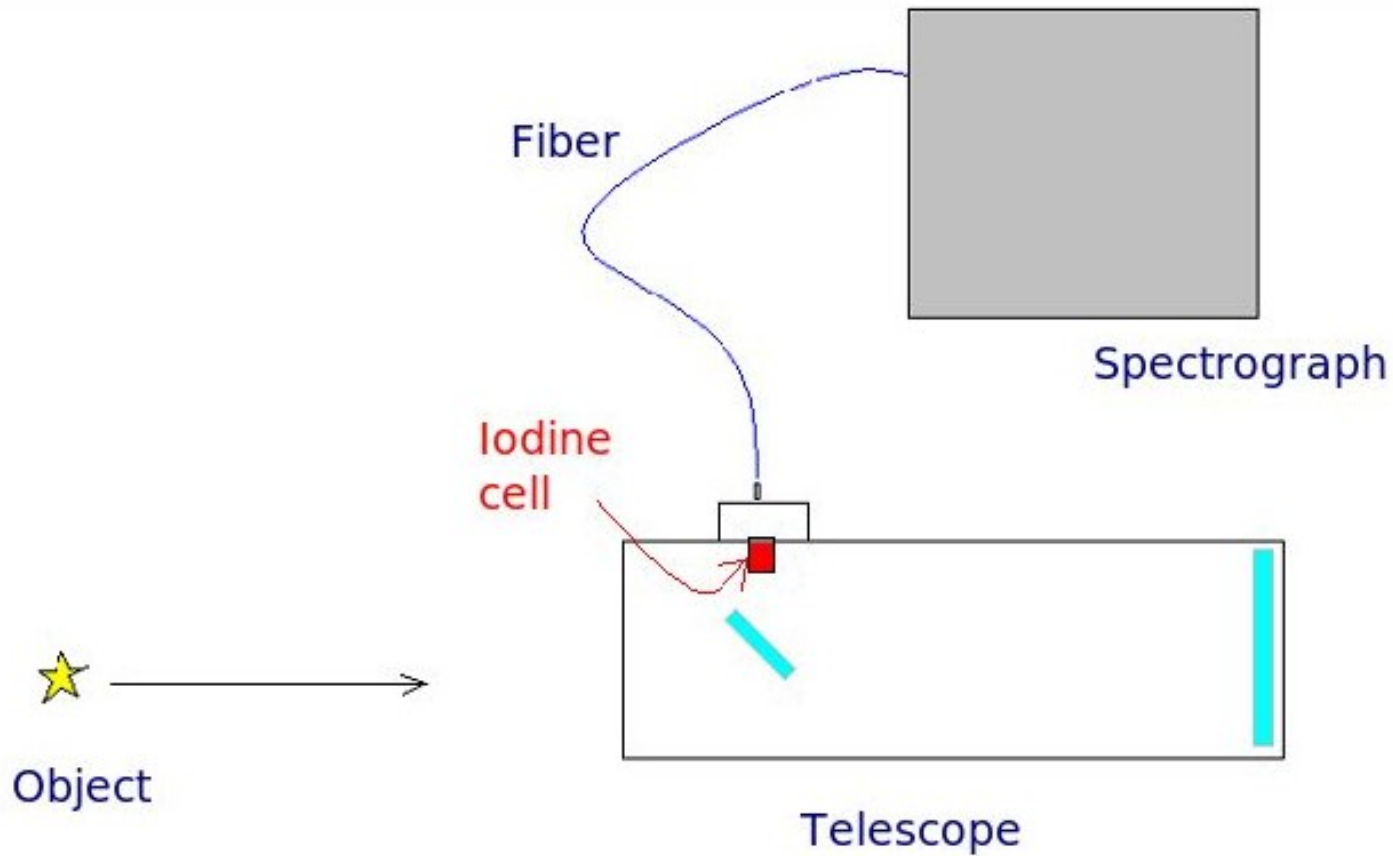
Komórka jodowa przed dodaniem jodu
(exoplanets.astro.yale.edu).



Komórka jodowa z jodem i obudową grzewczą
(innssi.com/iodine-cell/).

Budowa spektrografu

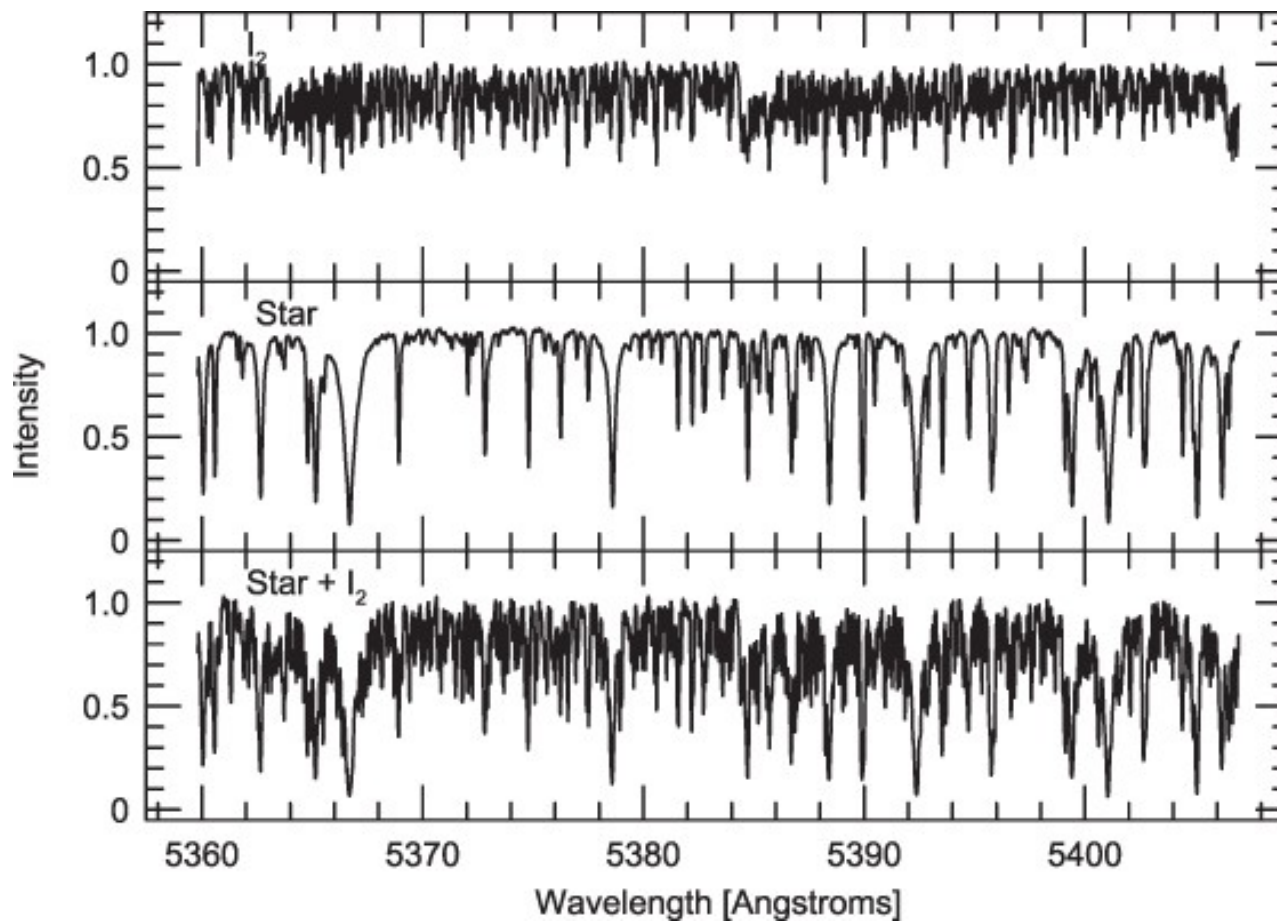
Komórki jodowe



Teleskop PST1 z komórką jodową.

Budowa spektrografu

Komórki jodowe



Widmo jodu, gwiazdy i gwiazdy + jodu
(Hatzes, 2019).