

Astrofizyka II

Spektroskopia

# Podręczniki

David Emerson „Interpreting astronomical spectra” 1997

John James „Spectrograph Design Fundamentals” 2007

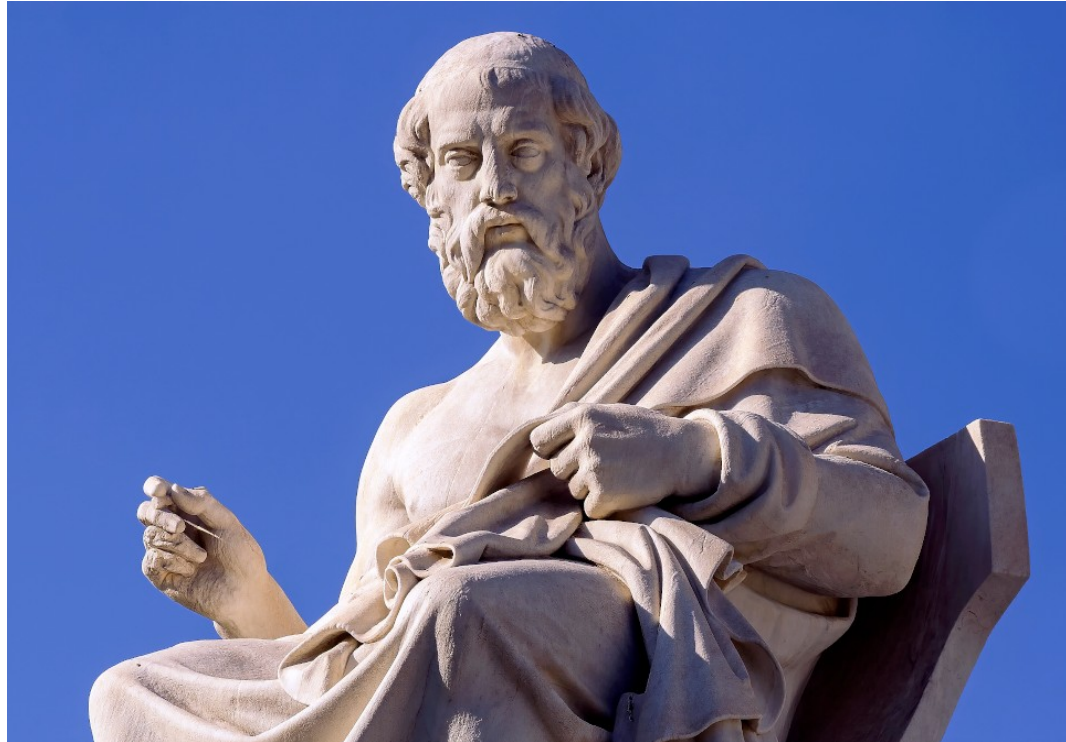
Immo Appenzeller „Introduction to Astronomical Spectroscopy” 2013

John Hearnshaw „Astronomical spectrographs and their history” 2009

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

Do czasów Kartezjusza (1590-1650) wszyscy filozofowie i badacze koncentrowali się przede wszystkim na próbie wyjaśnienia w jaki sposób ludzie widzą przedmioty.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Pomnik Platona w Atenach (Edgar Serrano)

Demokryt (460-370 p.n.e.) uważał, że widziany przez oczy obraz powstaje w powietrzu pomiędzy przedmiotem a okiem.

Epikur (341-270 p.n.e.) uważał że widzimy przedmioty dzięki ciągłemu wysyłaniu przez nie atomów, które docierają do oka. Ciała jednak nie maleją bo inne atomy wypełniają puste miejsca.

Platon (428-328 p.n.e.) uważał, że widzenie polega na wysyłaniu promieni z oczu na zewnątrz, które działają jak czułki.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Ptolemeusz (Selenografia, Heweliusz)

Euklides (365-270 p.n.e.) uważał, że „światło” rozchodzi się z oczu stożkowo i rozważał geometryczne efekty związane ze zmianą perspektywy wraz ze zmianą odległości od widzianych przedmiotów.

Heron z Aleksandrii (10-70 n.e.) podzielał poglądy Euklidesa ale uważał że światło/widzenie rozchodzi się wzdłuż linii. Dodatkowo przyjął zasadę, że światło porusza się po najkrótszej linii z czego wyprowadził prawo „kąta padania = kąta odbicia”.

Ptolemeusz (90-168 n.e.) również popierał model emisji promieni, wersję liniową, a dodatkowo prowadził wiele eksperymentów i analizując zjawisko refrakcji odkrył prawo załamania światła (ale tylko przybliżenie dla małych kątów).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Alhazen (Selenografia, Heweliusz)

Ibn-Sahl (940-1000) perski matematyk i fizyk z Bagdadu, sformułował pełne prawo załamania światła ok. 600 lat przed Snelliusem (1580-1626) od którego dziś je nazywamy.

Alhazen (właściwie Abu Ali Hasan Ibn al-Hajsam) (965-1040) napisał 7 tomowe dzieło (Optyka) w którym wykazał eksperymentalnie niezgodność modelu emisji i przyjął że światło nie powstaje w oczach lecz w niektórych przedmiotach. Wynalazł kamerę obskura! Obliczył wysokość atmosfery ziemskiej na 15km na podstawie analizy załamania promieni Słońca podczas brzasku.

Robert Grosseteste (1175-1253) biskup Lincoln, analizował tęczę twierdząc, że nie można jej wyjaśnić samym odbiciem światła. Podał też bardzo przybliżone prawo załamania światła (kąta załamania = połowie kąta padania).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Pomnik Teodoryka w Freiburgu (wikimedia.org)

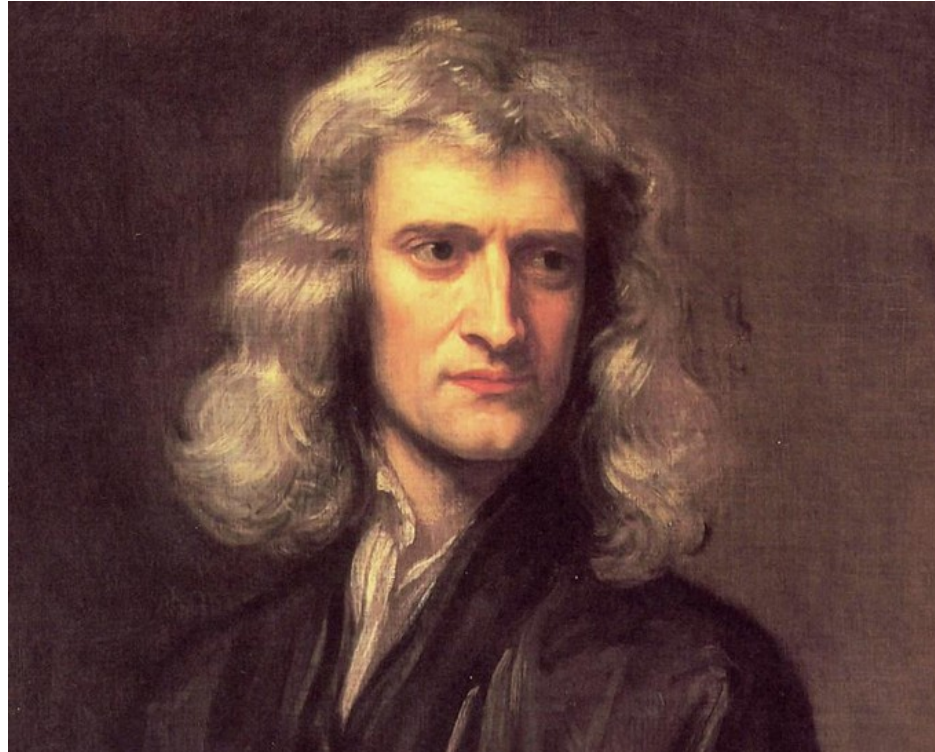
Teodoryk z Freibergu (1250-1310) niemiecki dominikanin oraz niezależnie od niego Kamal al-Din al-Farisi (1267-1319), muzułmański badacz przeprowadzili liczne eksperymenty wyjaśniające że **tęcza** powstaje przez odbicie i załamanie światła. Wyjaśnił również odwrócenie kolorów w tęczy wtórnej, badał bieg światła w soczewkach.

Rene Descartes (1590-1650), francuski filozof, opracował poprawne prawo odbicia i załamania światła niezależnie od Snelliusa (którego prace nie ukazały się za jego życia). Jako pierwszy w Europie opublikował prawo załamania w Dioptryce (1637).

Willebrord Snellius (1580-1626), duński astronom, profesor Uniwersytetu w Leiden odkrył prawo załamania światła w 1621, ale nigdy go nie opublikował.

Jan Kepler (1571-1630), niemiecki astronom i astrolog, opracował niepoprawne prawo załamania w 1604 w dziele: Suplement do Witelona (Paralipomena ad Vitellonem). Bazował na niedokładnych pomiarach Witelona, polskiego mnicha (1230-1314).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

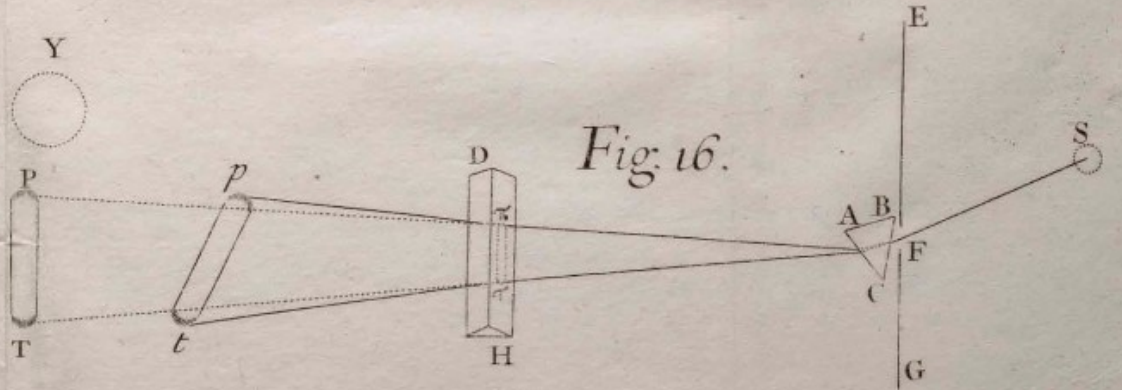
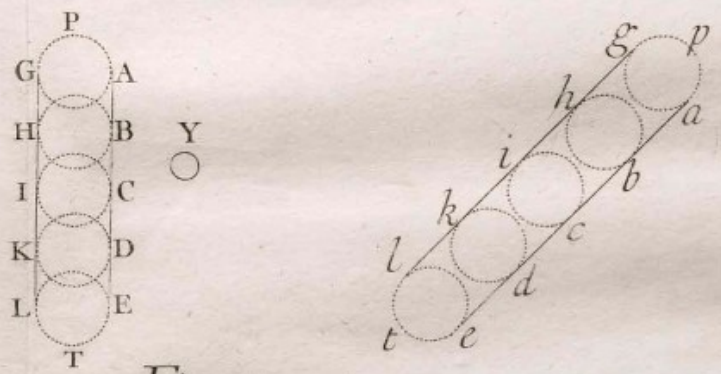
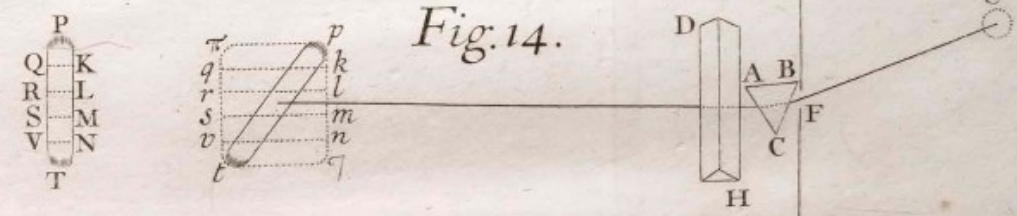
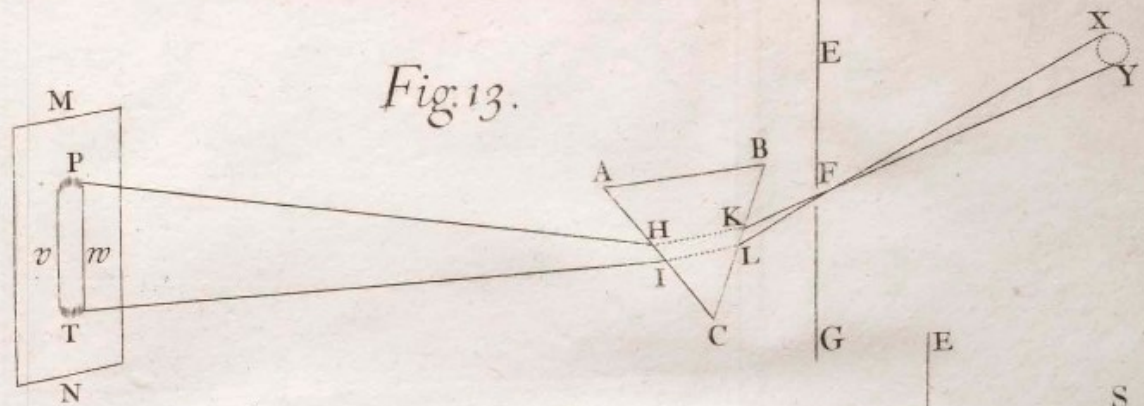


Isaac Newton (Godfrey Kneller, 1689)

Isaac Newton (1642-1722), angielski fizyk i alchemik, w słynnym dziele Optyka zawarł podstawy optyki geometrycznej oraz **spektroskopii** z użyciem pryzmatu.

Niestety ze względu na zastosowanie kołowej szczeliny rozdzielczość widmowa nie była wysoka i nie pozwoliła Newtonowi uzyskać ze światła słonecznego linii widmowych, a jedynie barwy.





a b c d e f t  
 p o o o o o t  
 g h i k l m

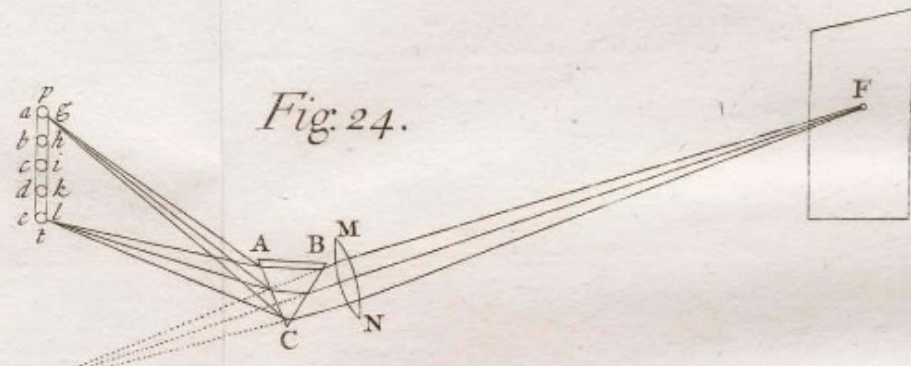


Fig. 24.

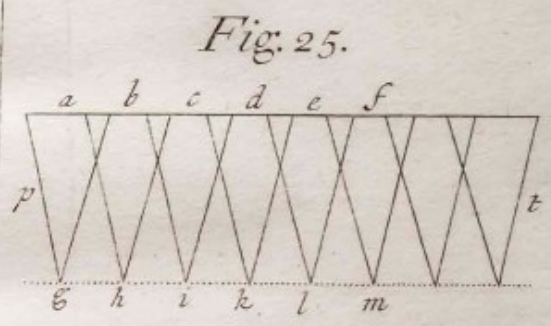


Fig. 25.

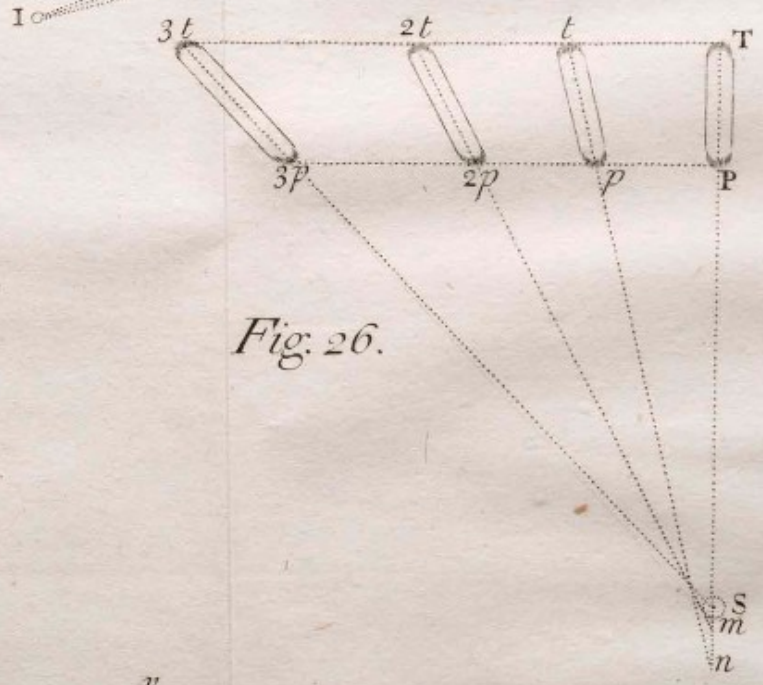


Fig. 26.



Fig. 27.

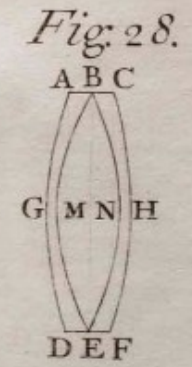


Fig. 28.

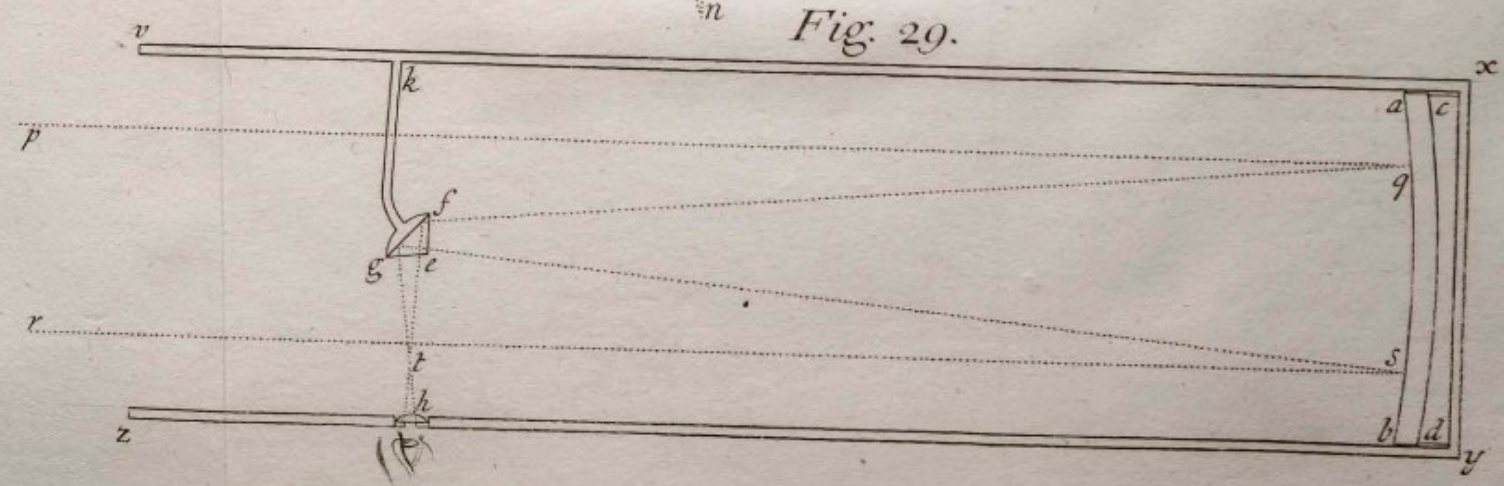


Fig. 29.

(Newton, 1704)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



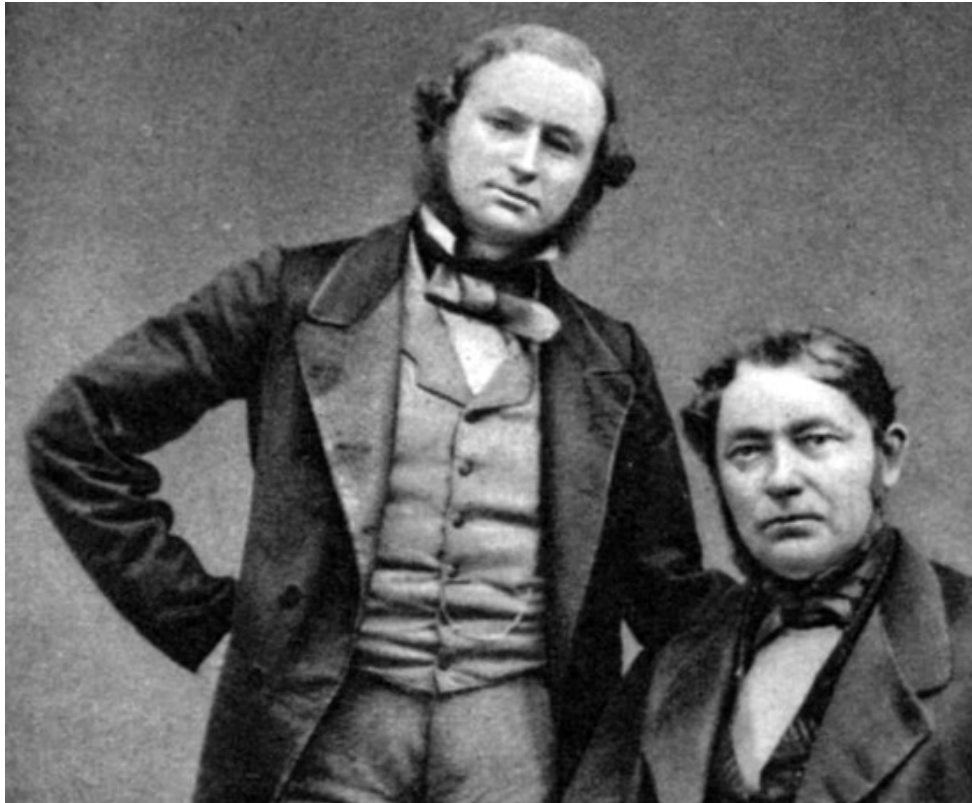
Joseph von Fraunhofer (grawer Christiana Gottloba Scherffa ok. 1816)

William Wollaston (1766-1828), angielski chemik, powtórzył eksperyment Newtona z pryzmatem, soczewką i Słońcem, ale użył wąskiej szczeliny dzięki czemu zobaczył coś co zinterpretował jako przerwy pomiędzy barwami.

Joseph Fraunhofer (1787-1826), bawarski fizyk, użył niewielkiej lunety zamiast patrzeć przez spektrograf gołym okiem. To pozwoliło mu dostrzec >500 linii widmowych. Oprócz pryzmatu używał też siatki dyfrakcyjnej zbudowanej z metalowych drucików, a później siatek nacinanych na płaskie lustra.

To dało mu możliwość pomiaru długości fali na której znajdują się linie! Zbudował też pryzmat obiektywowy i obserwował widma jasnych gwiazd. Zauważył, że widmo Wenus jest identyczne jak Słońca, ale Syriusz ma zupełnie inne linie widmowe.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



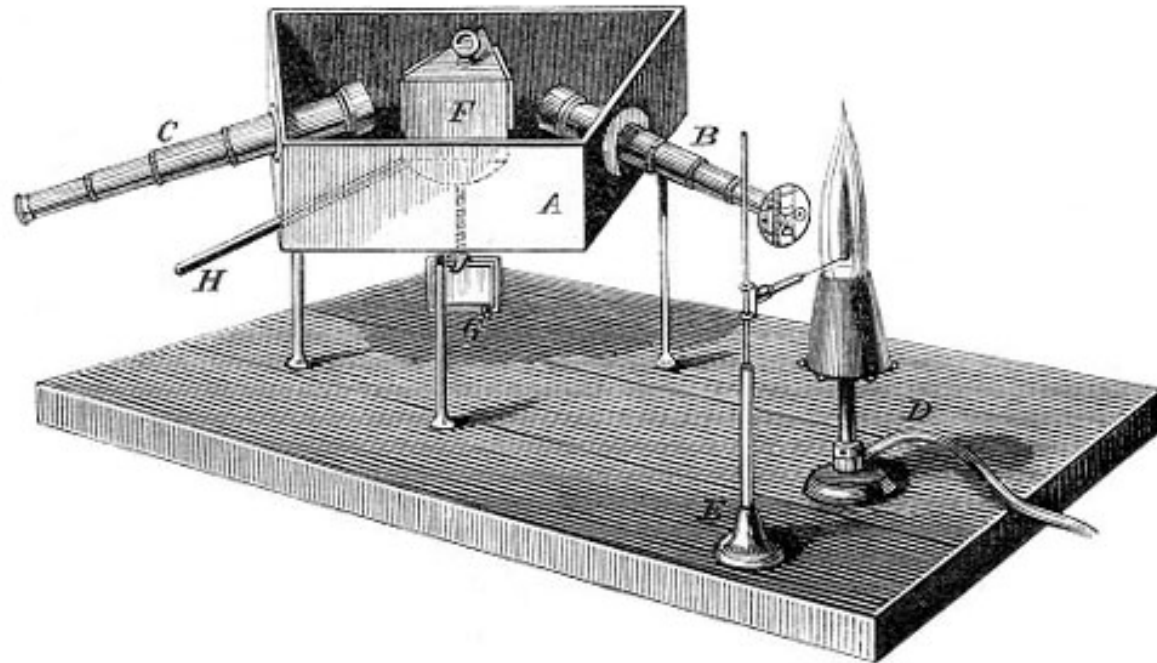
Kirchhoff i Bunsen ok roku 1860 (fotografia, auto nieznany)

Gustav Kirchhoff (1824-1887), niemiecki fizyk i Robert Bunsen (1811-1899), niemiecki chemik opracowali w 1859 metodę analizy widmowej. Jako pierwsi badali widma laboratoryjnie porównując je do widm gwiazd. Zauważyli że wiele linii słonecznych można w ten sposób powiązać i dostrzegli możliwość prowadzenia analizy składu chemicznego gwiazd.

Badania te uważa się za punkt startowy wizualnej spektroskopii astronomicznej.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Spektroskop laboratoryjny Kirchhoffa i Bunsena (Kayser, 1900)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Angelo Secchi

Angelo Secchi (1818-1878), włoski jezuita, odkrył spikule słoneczne, wykonał ręczne rysunki 4000 widm, zaproponował pierwszy system klasyfikacji gwiazd (5 klas). Na podstawie analizy widmowej odkrył również gwiazdy węglowe. Konstruktor wielu spektrografów astronomicznych.

Fig. 1. (*1<sup>st</sup> type: Sirius, Vega, Alaiir, Regulus, etc.*)

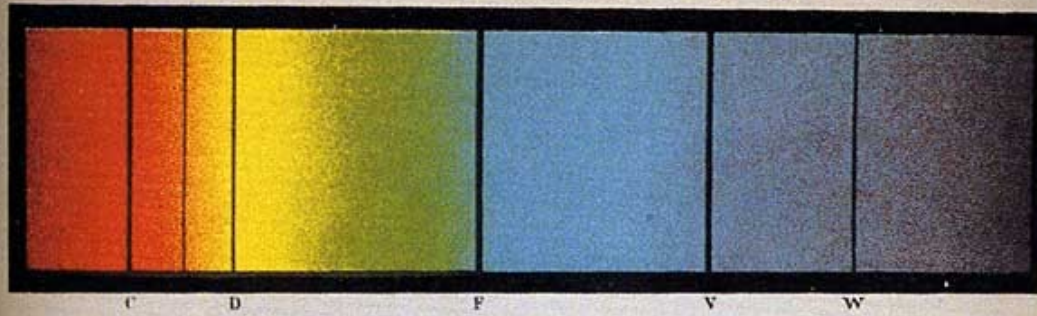


Fig. 2. (*2<sup>rd</sup> type: Sun, Pollux, Arcturus, Procyon, etc.*)

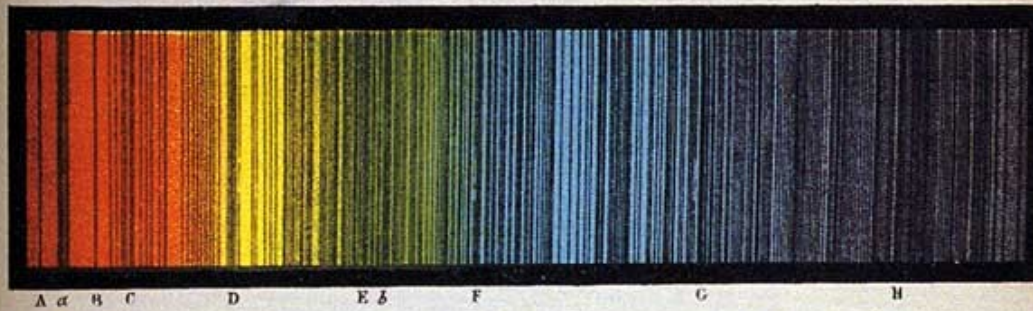


Fig. 3. (*3<sup>rd</sup> type:  $\alpha$  Hercules,  $\beta$  Pegasus,  $\alpha$  of Orion, Antares, etc.*)

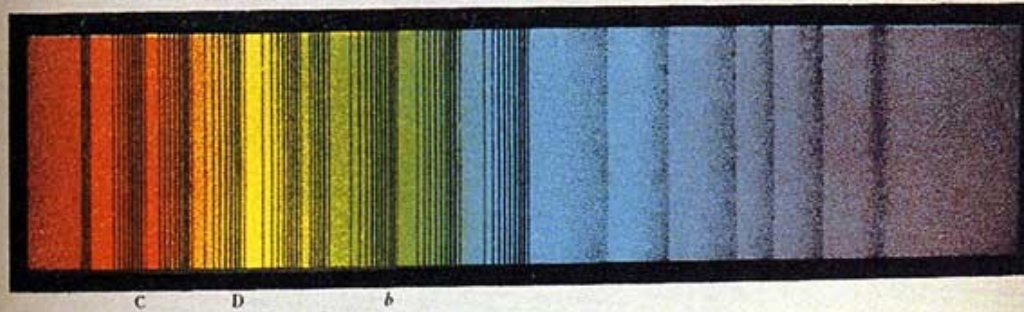
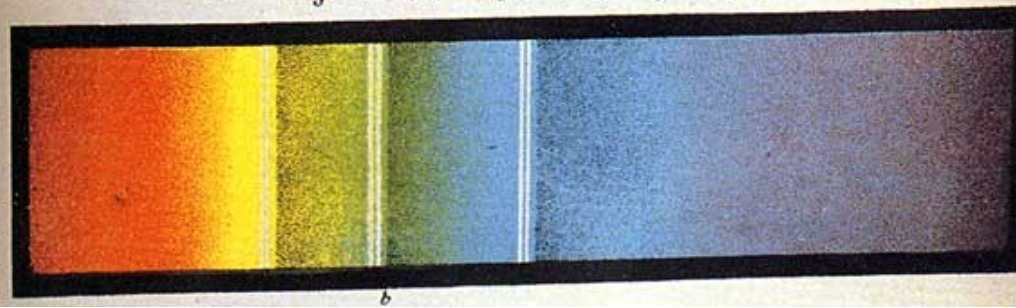
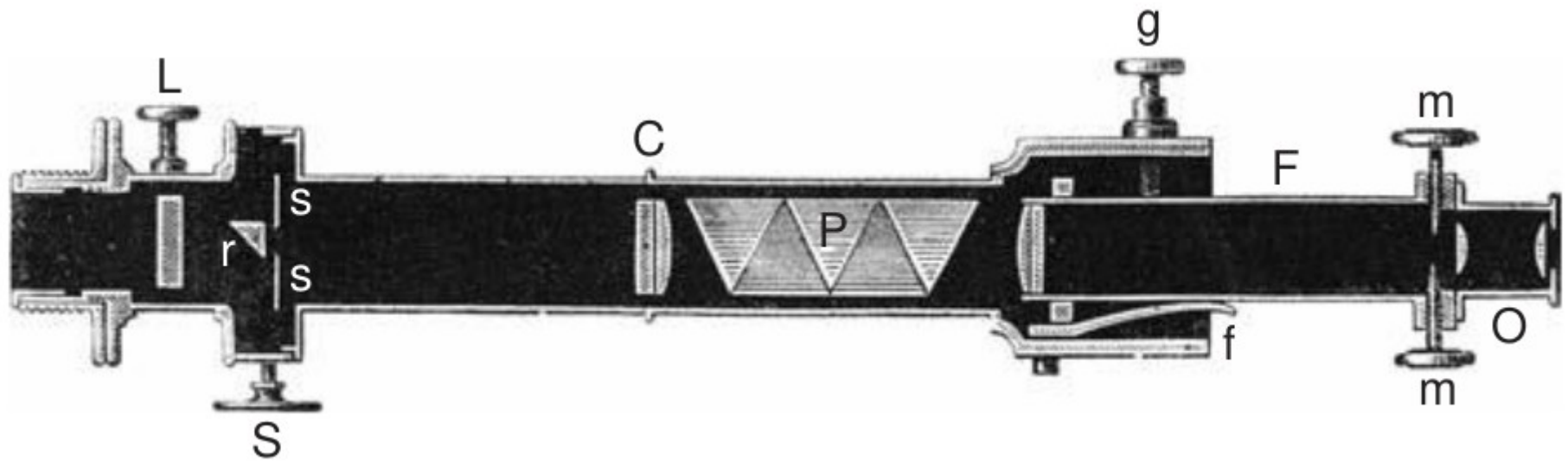


Fig. 4. (*4<sup>th</sup> type: 15<sup>c</sup> of Schjellerup.*)



System Secchiago  
(Secchi, 1870).  
W podpisie rys. 2  
jest literówka :)

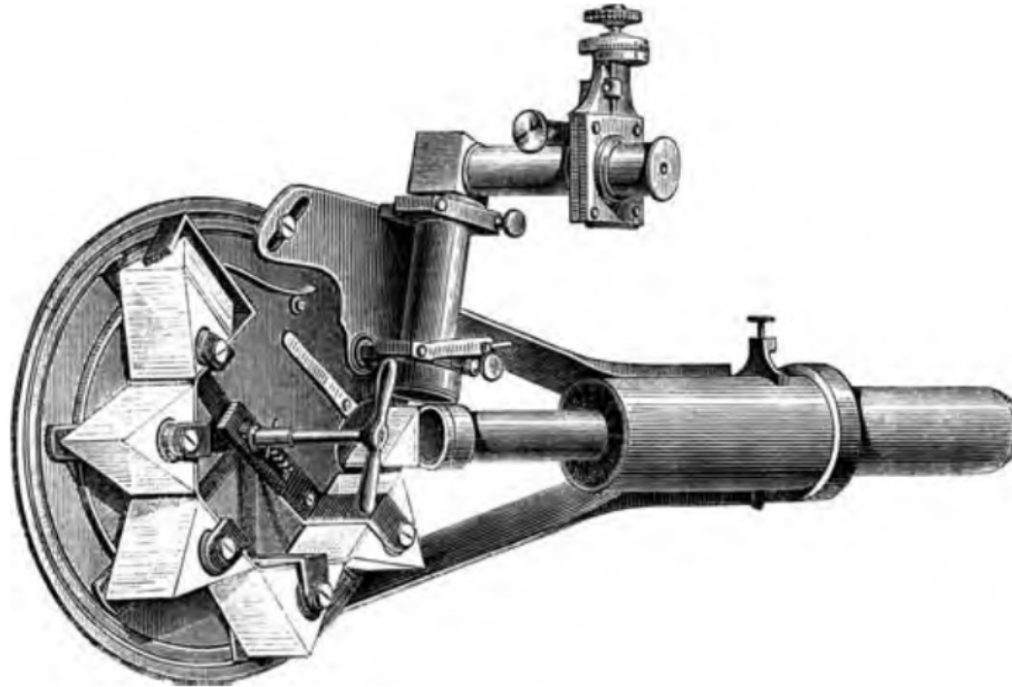
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Przykładowy spektroskop widzenia prostego z roku 1862 autorstwa Angelo Secchi,  
3 pryzmaty ze szkła crown 2 pryzmaty ze szkła flint (Hearnshaw, 2009)

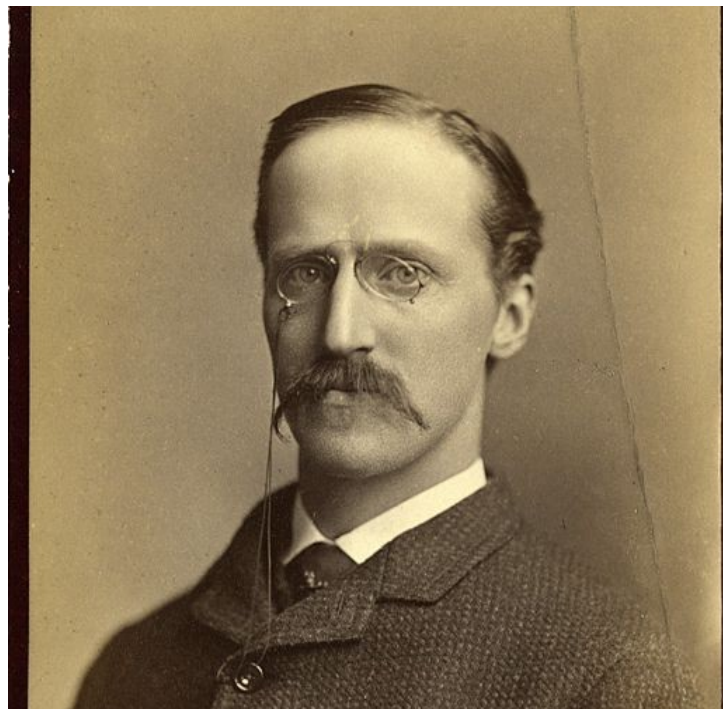


# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Przykładowy instrument z lat 1870 autorstwa Angelo Secchi,  
4 i pół pryzmatu, podwójne przejście światła (Hearnshaw, 2009)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



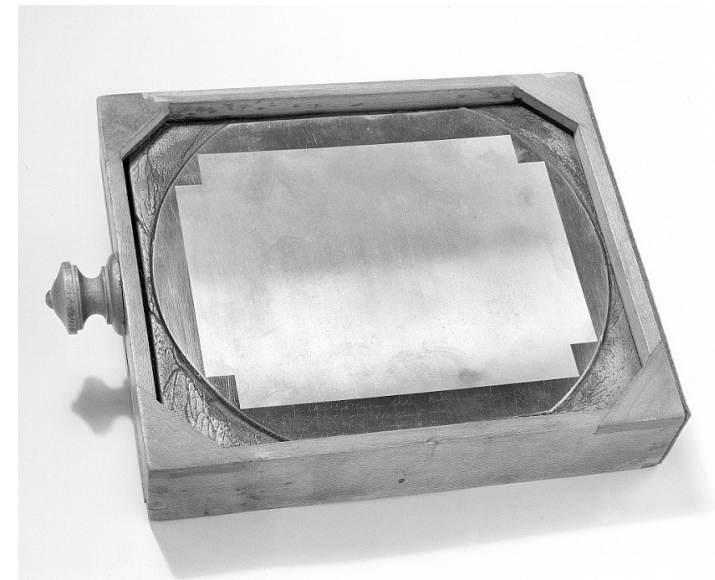
Henry Rowland w 1887 (prabook.com)

Henry Augustus Rowland (1848-1901), amerykański fizyk z John Hopkins University, skonstruował maszynę do wytwarzania najlepszych siatek dyfrakcyjnych na świecie, w dodatku również na wklęsłych powierzchniach, stworzył obszerny katalog linii widmowych Słońca. Przyczynił się do wzrostu zainteresowania siatkami dyfrakcyjnymi w spektroskopii astronomicznej.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



„Ruling engine” Rowlanda (Chhe, 2009)  
Umożliwiał nacinanie nawet 800 linii na milimetr.

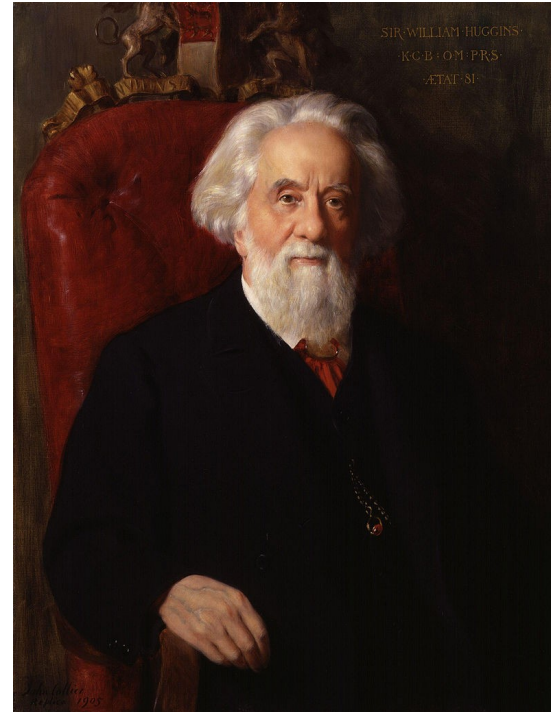


Jedna z pierwszych wklęsłych siatek dyfrakcyjnych Rowlanda z roku 1882, promień krzywizny 64 cale (National Museum of American History)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Margaret Lindsay Huggins  
(autor nieznany)




Sir William Huggins  
(obraz Johna Colliera, data nieznana)

Margaret i William Huggins (1848-1915, 1824-1910), angielscy miłośnicy astronomii, w prywatnym obserwatorium pod Londynem wykonali pierwsze obserwacje spektroskopowe mgławicy planetarnej i pokazali, że ma zupełnie inne widmo (emisyjne) niż galaktyki, które w tamtym czasie były też określane mgławicami. W 1899 wydali fotograficzny atlas widm „An Atlas of Representative Stellar Spectra” pokrywający zakres od 330nm do 486nm ( $H_{\beta}$ ).

Problem natury mgławic spiralnych został rozwiązany ostatecznie dopiero w 1920r, gdy Edwin Hubble (1889-1953) zmierzył odległość do cefeidy w M31.





AN ATLAS OF  
REPRESENTATIVE  
STELLAR SPECTRA

FROM  $\lambda$  4870 TO  $\lambda$  3300

TOGETHER WITH

A DISCUSSION OF THE EVOLUTIONAL ORDER OF THE STARS, AND THE  
INTERPRETATION OF THEIR SPECTRA. PRECEDED BY A SHORT  
HISTORY OF THE OBSERVATORY AND ITS WORK

BY

SIR WILLIAM HUGGINS, K.C.B.

COMMANDER OF THE BRAZILIAN ORDER OF THE ROSE

HON. D.C.L. OXFORD; HON. LL.D. CAMBRIDGE, EDINBURGH, DUBLIN, AND ST. ANDREWS

HON. PH.D. LEYDEN

F.R.S., HON. F.R.S.E., F.R.A.S.

*Correspondant de l'Institut de France (Académie des Sciences); Foreign Member della Reale Accademia dei Lincei, Roma; Corresponding Member der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften; Foreign Member Regia Scientiarum Societas, Upsala; Foreign Member Königl. Boehmische Gesellschaft der Wissenschaften, Prag; Correspondent Königl. Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen; Foreign Member Royal Society of Denmark, Copenhagen; Foreign Member Philosophical Society, Lund, Sweden; Hon. Member Società degli Spettroscopisti Italiani, Roma; Hon. Member Société Astronomique de France; Hon. Member Royal Irish Academy, Dublin; Foreign Member American Academy Arts and Sciences, Boston; Hon. Member Philosophical Society, Philadelphia; Hon. Member Royal Society New South Wales, Sydney; Hon. Member Manchester Literary and Philosophical Society; Hon. Member Astronomical and Physical Society of Toronto.*

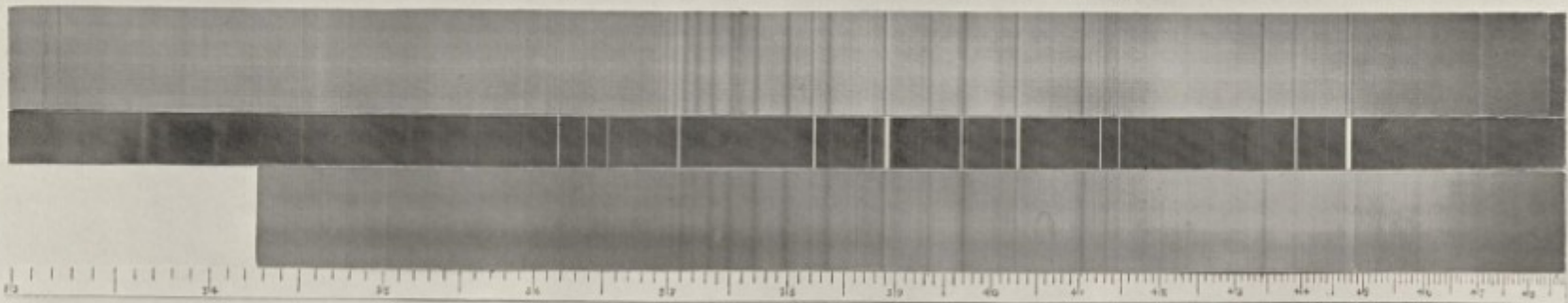
AND

LADY HUGGINS

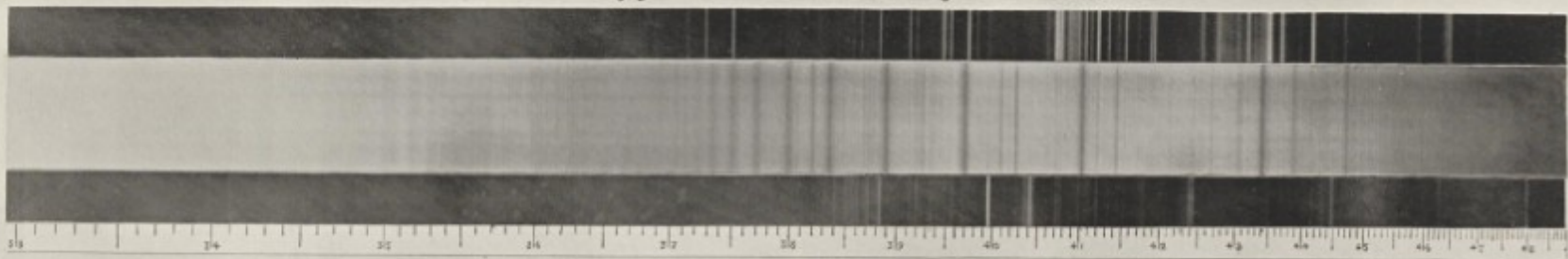
SUN



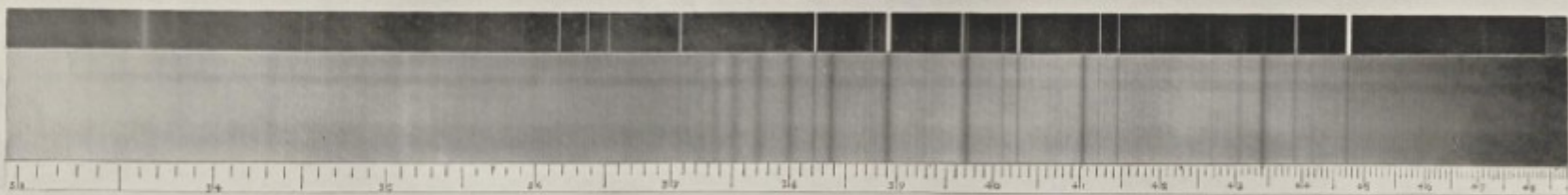
$\beta$  LYRÆ [1898 Aug 11<sup>th</sup>] - Helium -  $\beta$  LYRÆ [1897 Aug 14<sup>th</sup>]



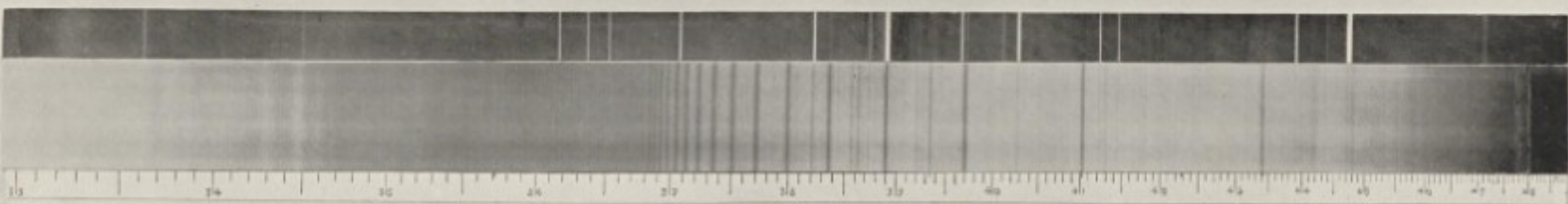
Oxygen - BELLATRIX - Nitrogen



Helium & BELLATRIX

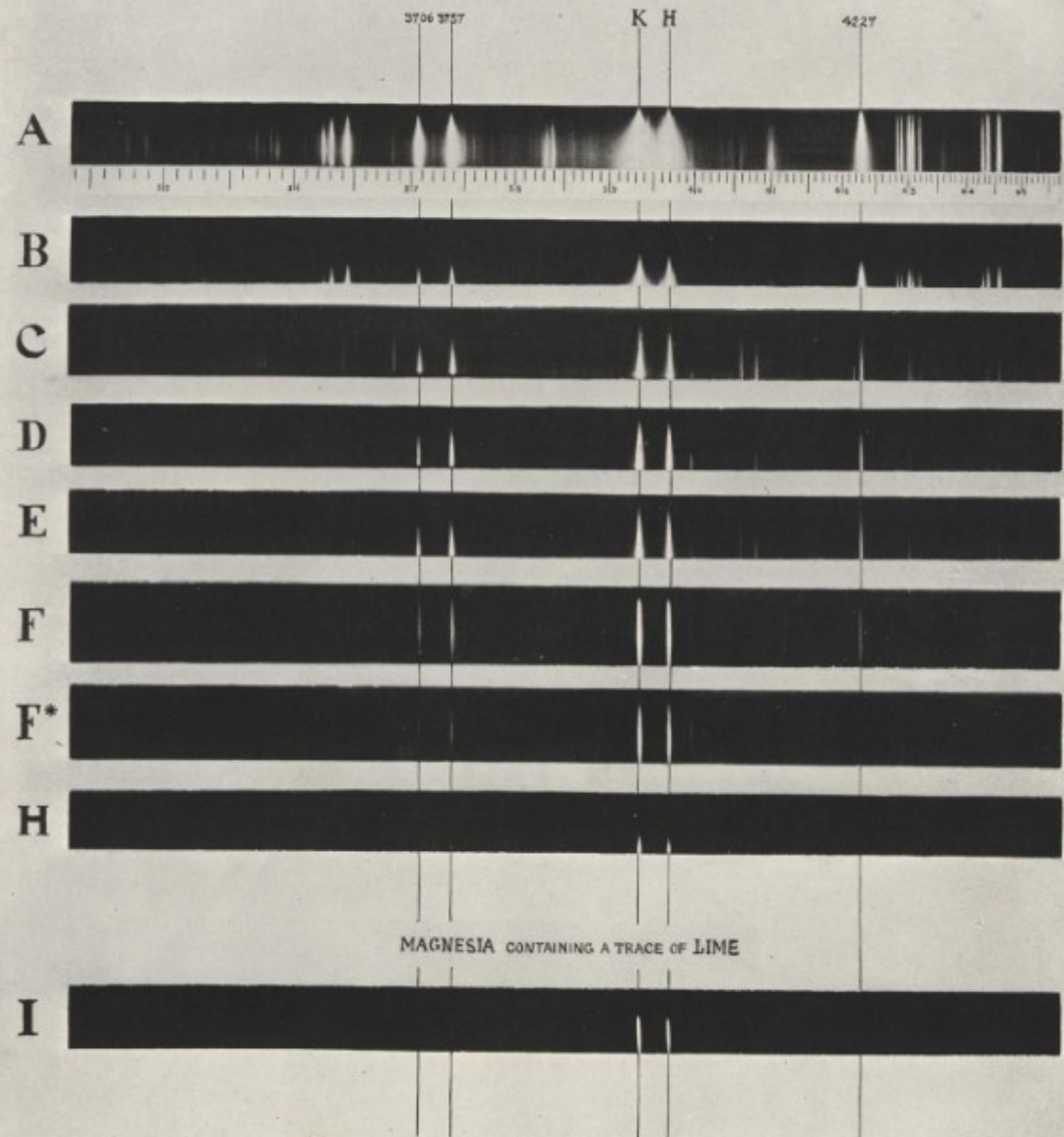


Helium and RIGEL



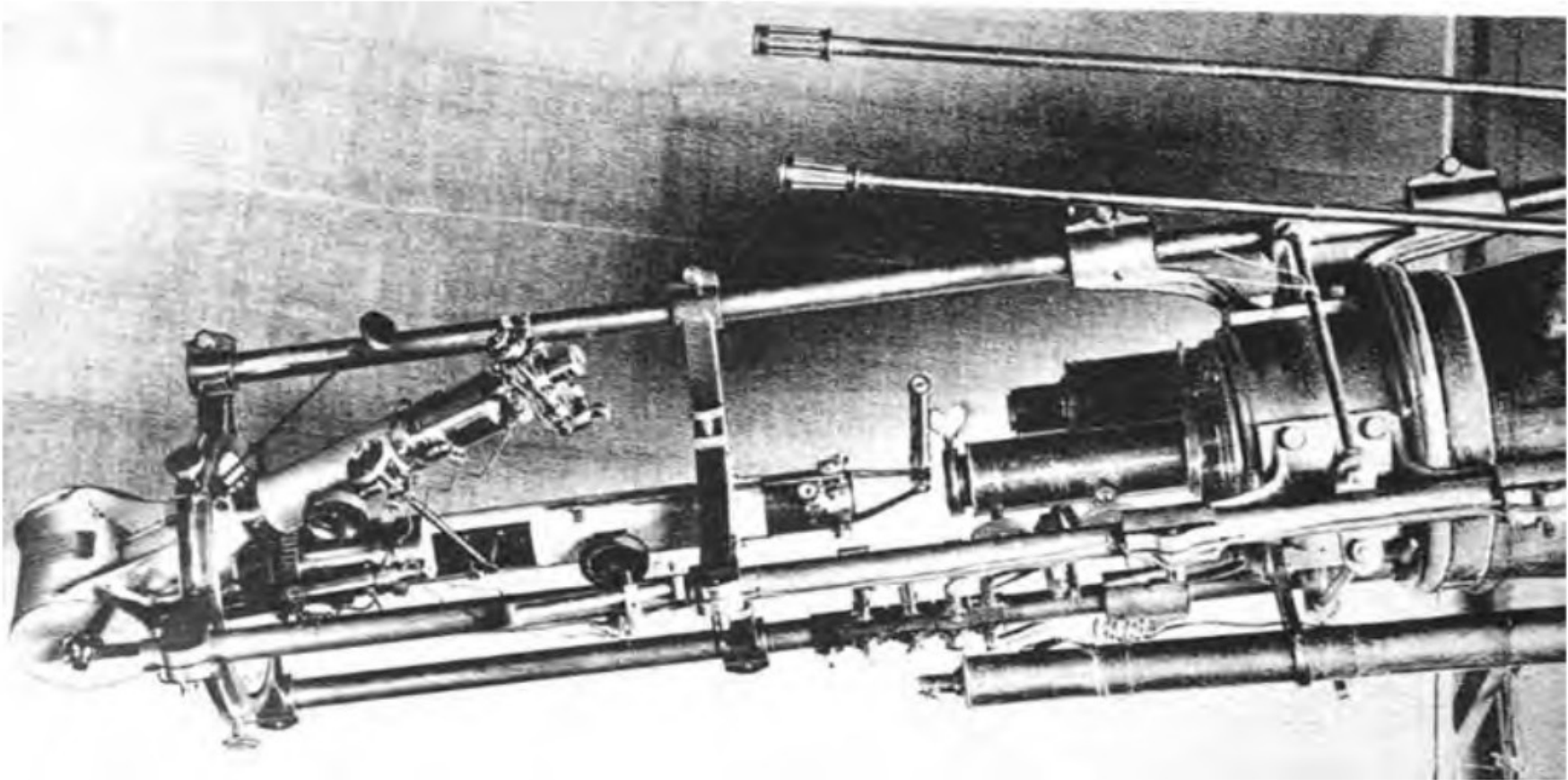
# SPARK SPECTRA

SHEWING EFFECT OF DENSITY ON THE RELATIVE INTENSITIES OF THE LINES OF CALCIUM



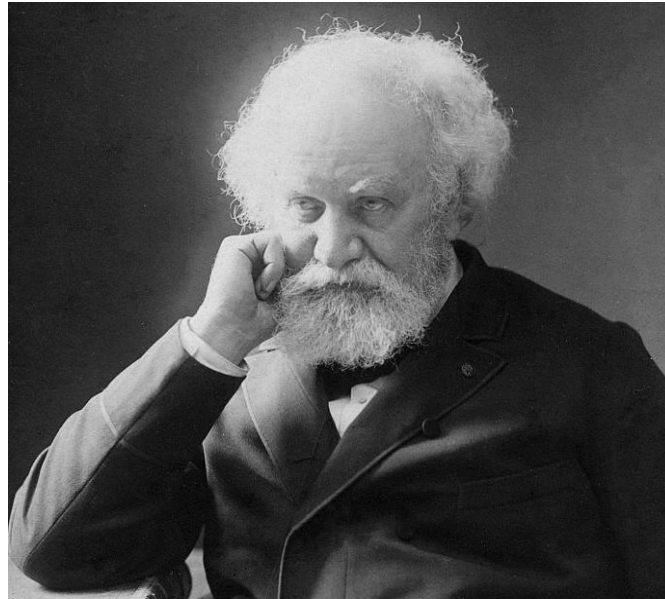


# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Spektrograf Hugginsów zbudowany przez Troughton i Simms w 1975, mógł używać pryzmatu (z podwójnym przejściem) lub siatki Rowlanda (Hearnshaw, 2009)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Jules Jansen ok. 1895r (autor nieznany, wikimedia.org)

Jules Jansen (1824-1907), francuski astronom, zaobserwował podczas obserwacji spektroskopowych Słońca w czasie zaćmienia w 1868 nieznaną linię emisyjną o długości 587.5 nm.

Wykazał też spektroskopowo gazową naturę słonecznej chromosfery. W tym samym roku niezależnego odkrycia tej samej linii widmowej dokonał Joseph Norman Lockyer (1836-1920), a razem z Edwardem Franklandem (1825-1899) doszli do wniosku, że jest to nieznany na Ziemi pierwiastek.

W 1881 roku udało się dostrzec ślady helu na Ziemi (też spektroskopowo). W 1895 pierwszy raz udało się wyizolować hel z minerału zwanego Cleveite.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Henry Draper (szkic, wikisource.org)

Henry Draper (1837-1882) amerykański lekarz, miłośnik astronomii, w roku 1872 uzyskał pierwsze użyteczne widmo gwiazdy innej niż Słońce na kliszy fotograficznej (Vega). Na jego cześć nazwano katalog gwiazd zawierający klasyfikację widmową 225300 gwiazd (wydany w 1918-24).

Od tego momentu rozpoczęła się epoka spektroskopii fotograficznej.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Teleskop Henrego Drapera w Obserwatorium UMK w Piwnicach (Piotr Majewski)  
Został on ufundowany przez żonę Drapera po jego śmierci dla Obserwatorium Harwardzkiego.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

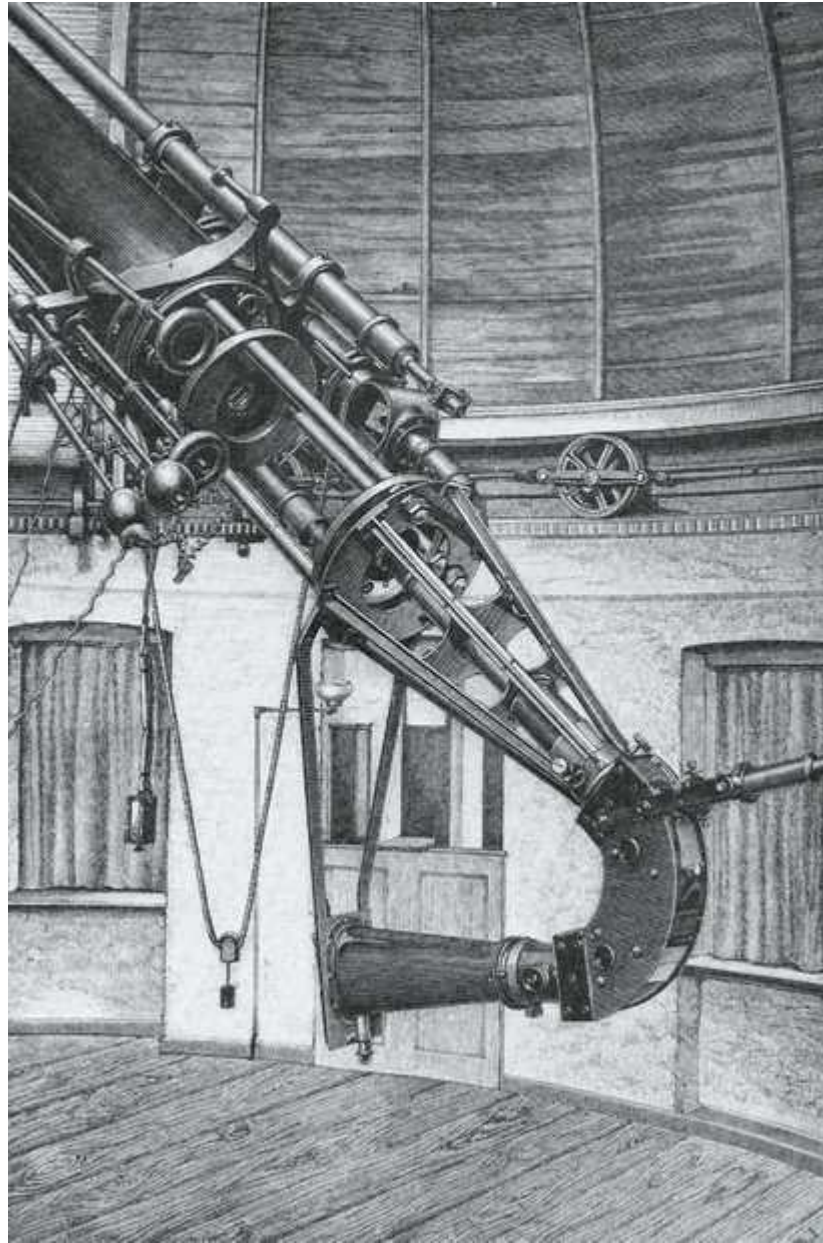


Hermann Carl Vogel (Hector Macpherson, 1905)

Hermann Carl Vogel (1841-1907), niemiecki astrofizyk, dyrektor wiodącego wówczas obserwatorium w Poczdamie, wykonał pierwsze pomiary prędkości radialnych dla Słońca w 1871r. Odkrył zmiany prędkości radialnych niektórych gwiazd, współodkrył gwiazdy spektroskopowo podwójne. Rozpoczął w 1873r pierwszy duży przegląd spektroskopowy jasnych gwiazd, najpierw wizualny, potem fotograficzny.

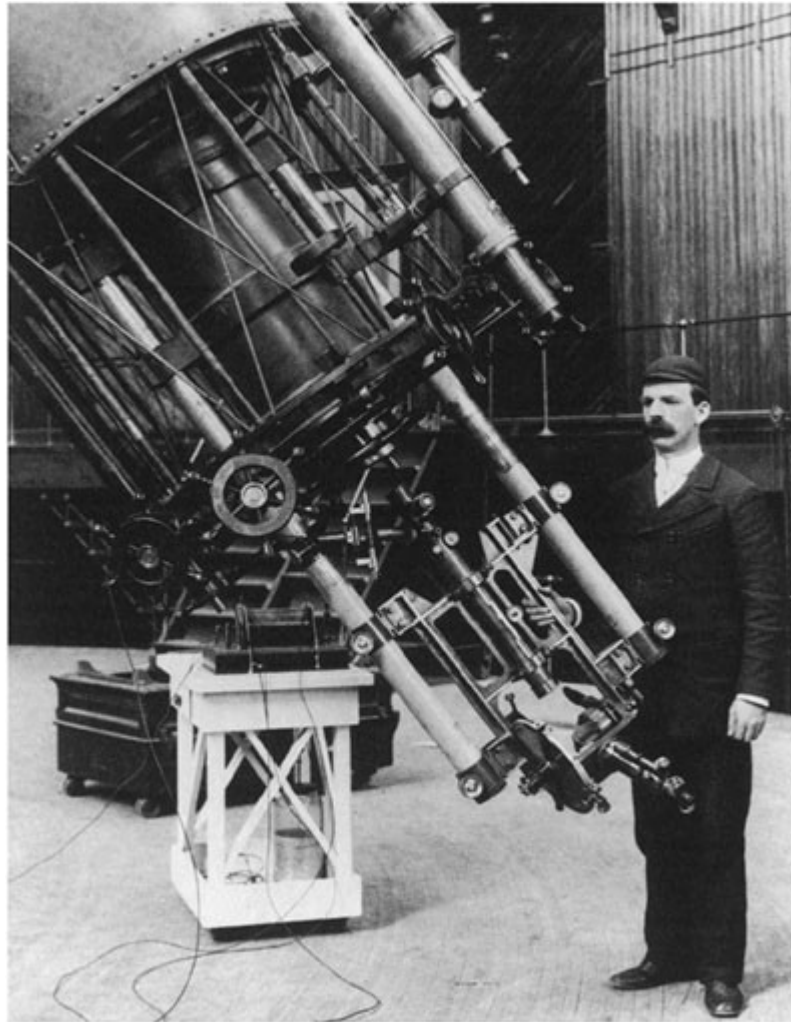


# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Spektrograf fotograficzny Vogel'a w Poczdamie  
wyposażony w dwa pryzmaty i szukacz  
(Catchers of the light, Stefan Hughes, 2013)

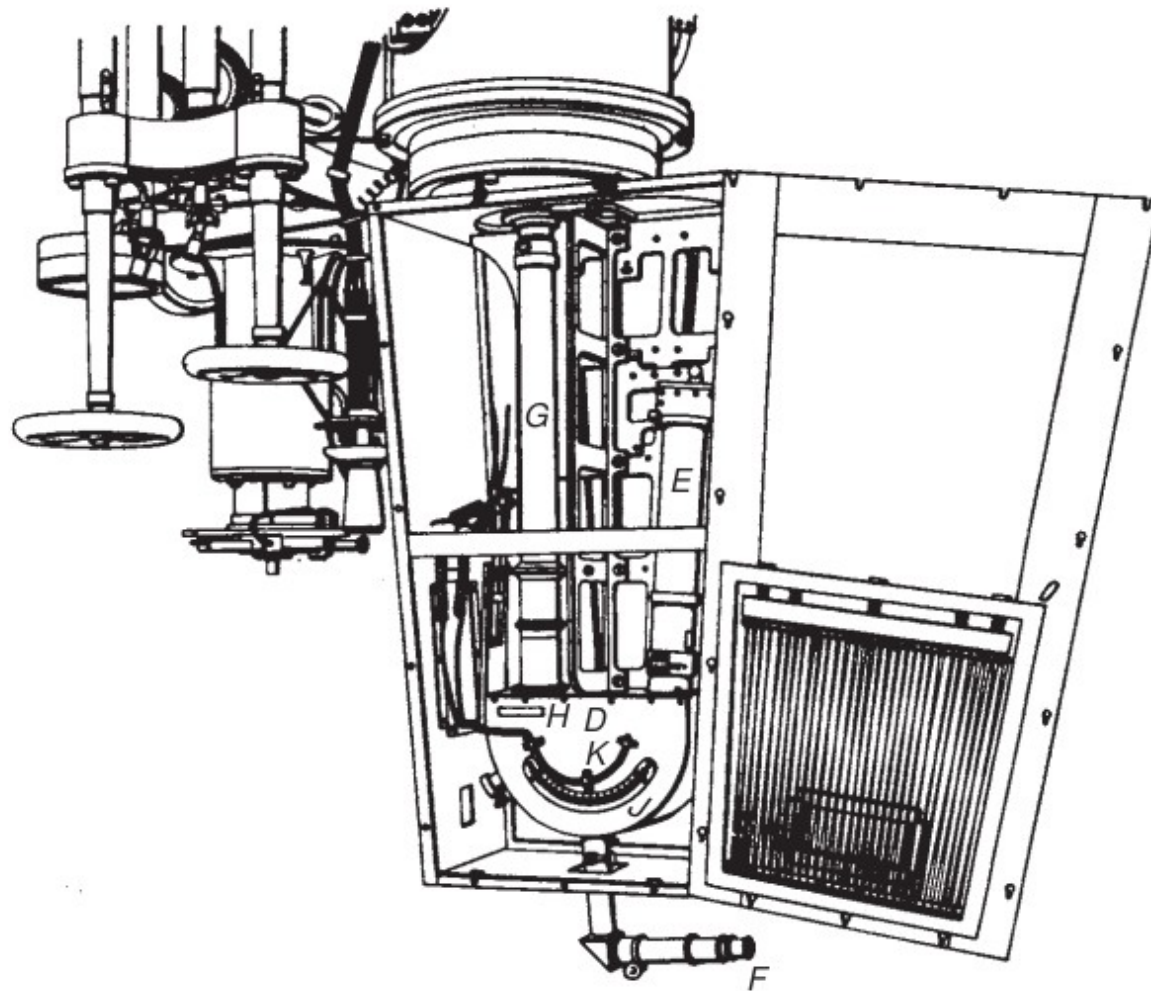
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



William Campbell (Mary Lea Shane Archives, Lick Observatory)

William Wallace Campbell (1862-1938), amerykański astronom, dyrektor Obserwatorium Licka, był jednym z pierwszych astronomów, który dostrzegł wagę termicznej stabilizacji spektrografów pryzmatycznych (siatkowe były mniej czułe na zmiany).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Jeden z pierwszych stabilizowanych spektrografów w Poczdamie.  
Obudowa spektrografu jest wyposażona w grzałkę elektryczną zbudowaną z 20m srebrnego drutu oraz termostat.  
Osiągnano stabilność lepszą niż 1 °C (Hearnshaw, 2009).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Edward Pickering (obraz Sarah Putnam, 1911)

Edward Charles Pickering (1846-1919), amerykański astronom, dyrektor Harvard College Observatory, opublikował w 1890r katalog widm pt: Draper Catalogue of Stellar Spectra. Była to kontynuacja pracy rozpoczętej przez Drapera, który wykonał kilkaset zdjęć widm gwiazdowych.

Widma były wykonywane przez Pickeringa i współpracowników na teleskopie Drapera ufundowanym przez wdowę po Henrym Draperze.

Pierwsze wydanie katalogu zawierało 10351 gwiazd sklasyfikowanych na basie systemu Secciego, ale z bardziej szczegółowym podziałem na podklasy od A do N + O, P, Q, autorstwa Williaminy Fleming (1857-1911).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

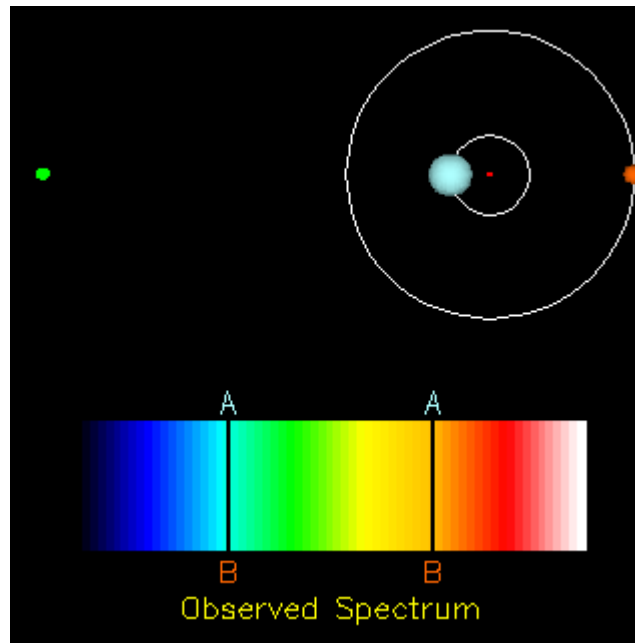


Annie Jump Cannon w roku 1922 ([www.brittanica.com](http://www.brittanica.com))

Edward Pickering i Annie Cannon (1863-1941), amerykańscy astronomowie, korzystając z bogatego zbioru widm uporządkowali je w jednowymiarowy system klasyfikacji Harwardzkiej: OBAFGKM.

System ten stał się podstawą współczesnego systemu klasyfikacji dwuwymiarowej Morgan-Keenan (MK, 1943).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Pierwsze odkryte układy gwiazd spektroskopowo podwójnych

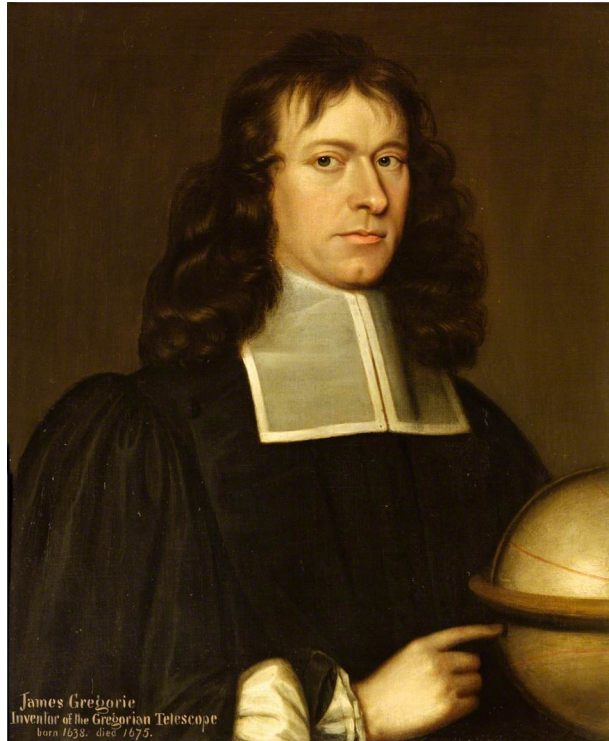
**Mizar** – 08.1889 – Edward Charles Pickering z Harvardu.  
Mizar jest jednocześnie pierwszym wizualnym układem podwójnym (odkrytym prawdopodobnie w 1650r), a spektroskopowo podwójny okazał się jeden z jego składników.

**Algol** – 11.1889 – Hermann Carl Vogel z Poczdamu.  
Algol był już od 1782r znany jako gwiazda zaćmieniowa.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Siatki dyfrakcyjne



James Gregory (portret Johna Scougala)

James Gregory (1638-1675) szkocki astronom, wynalazca teleskopu typu gregorego, pierwszy badacz (o którym wiemy), który zwrócił uwagę na zjawisko dyfrakcji światła słonecznego na ptasich piórach.

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

If ye think fit, ye may signify to Mr. Newton a small experiment, which (if he know it not already) may be worthy of his consideration. Let in the sun's light by a small hole to a darkened house, and at the hole place a feather, (the more delicate and white the better for this purpose,) and it shall direct to a white wall or paper opposite to it a number of small circles and ovals, (if I mistake them not,) whereof one is somewhat white, (to wit, the middle, which is opposite to the sun,) and all the rest severally coloured. I would gladly hear his thoughts of it.

Fragment listu Jamesa Gregorego do Johna Collinsa (1625-1683) z 13 maja 1673. Collins był szkockim matematykiem, który intensywnie korespondował z największymi naukowcami tamtych czasów: Newtonem, Leibnitzem i innymi. Z książki „Correspondence of Scientific Men of the Seventeenth Century” 1841, autorzy: Stephen Peter Rigaud i bp. Stephen Jordan Rigaud.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Kolibier na tle Słońca (Christian Spencer, [www.thisiscolossal.com](http://www.thisiscolossal.com))

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Siatki dyfrakcyjne

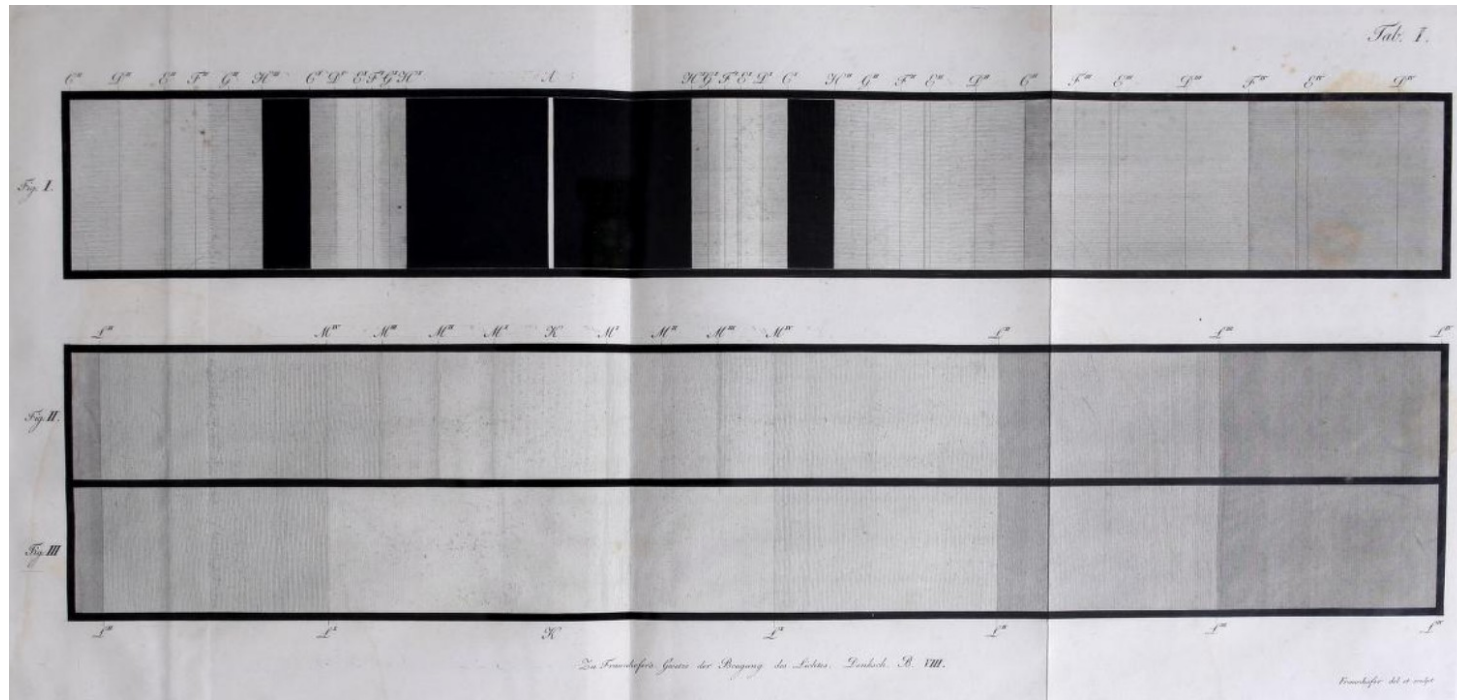


Thomas Young (portret Henrego Briggsa, 1822)

David Rittenhouse (1732-1796) amerykański astronom oraz Thomas Young (1773-1829) angielski fizyk byli pierwszymi, którzy badali zastosowanie siatki dyfrakcyjnej w analizie światła słonecznego. Rittenhouse badał siatkę transmisyjną z włosów naciągniętych na ramkę. Young pomierzył kąty odbicia dla 4 pierwszych rzędów widma i długości fal światła słonecznego.

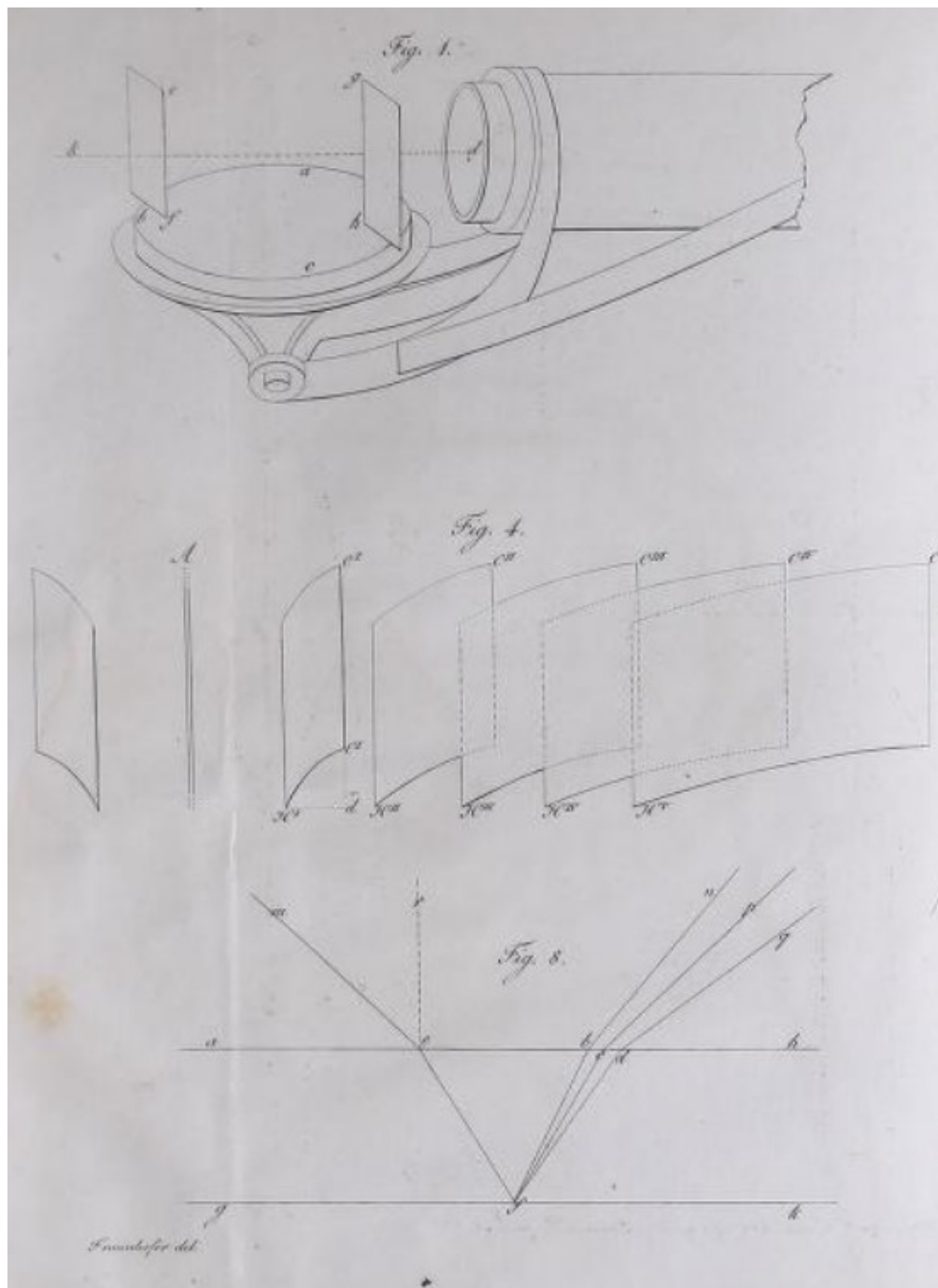
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Siatki dyfrakcyjne



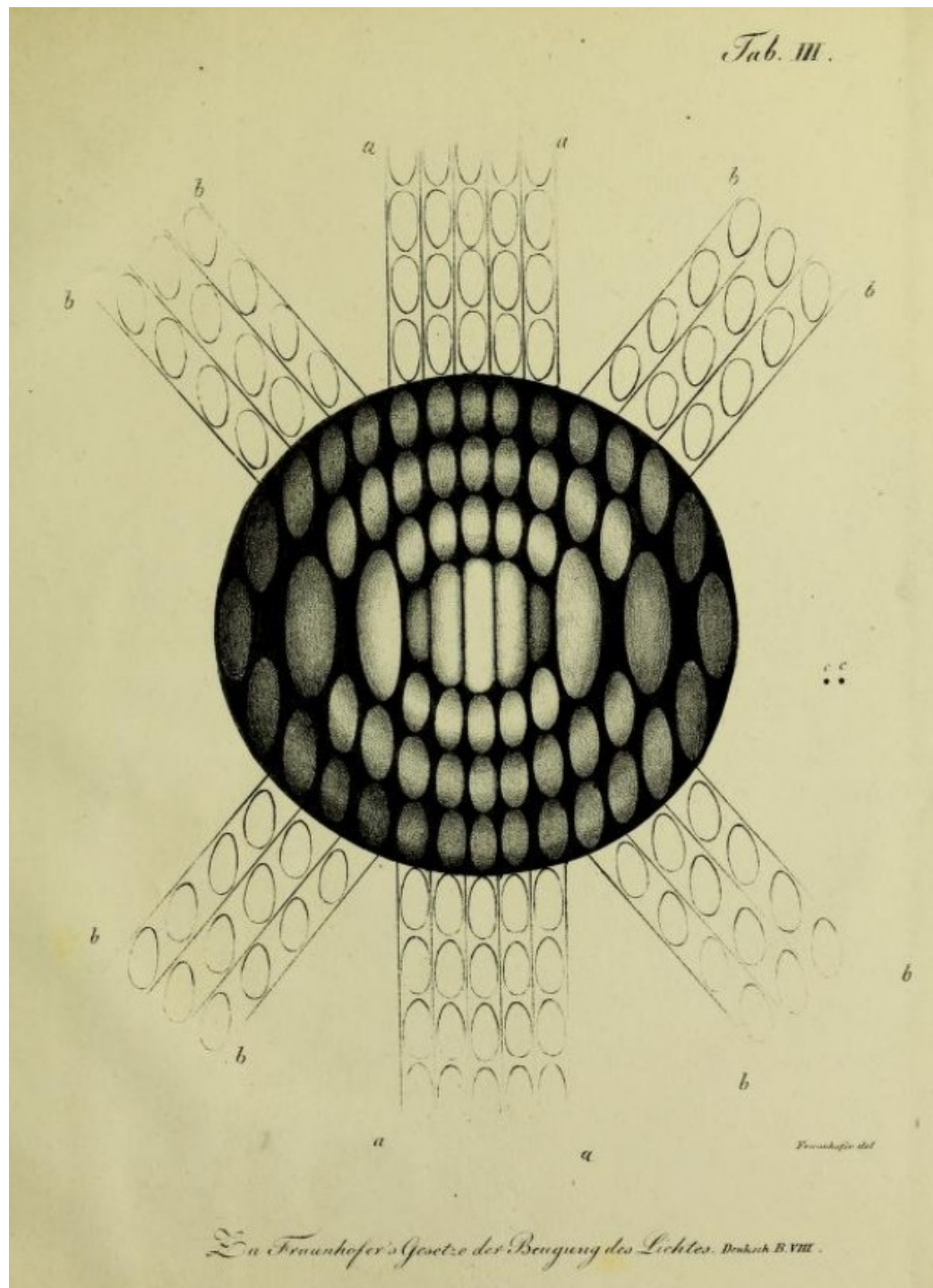
Linie Fraunhofera w widmie Słońca (Fraunhofer, 1822)

W latach 1820 Fraunhofer zauważył, że można uzyskać więcej światła na niezerowym rzędzie widma poprzez asymetryczne nacinanie linii w siatce dyfrakcyjnej. Niestety badania te nie były kontynuowane. Częściowo dlatego, że mikroskopy w tamtych czasach nie były w stanie dostrzec nacięć na siatkach dyfrakcyjnych. Siatki były wtedy wykonywane „w ciemno”, bez możliwości kontroli jakości nacinanych szczelin inaczej niż tylko poprzez analizę widm po wykonaniu siatki. Siatka dyfrakcyjna Fraunhofera miała ponad 300 linii na mm.



„Modyfikacja światła poprzez wzajemne działanie i dyfrakcję promieni oraz ich prawa” Fraunhofer (1822)





„Modyfikacja światła poprzez wzajemne działanie i dyfrakcję promieni oraz ich prawa” Fraunhofer (1822)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Pokaz siatki dyfrakcyjnej oferowanej w serwisie [www.amazon.ca](http://www.amazon.ca).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Siatki dyfrakcyjne

W kolejnych latach XIX wieku Friedrich Adolph Nobert (1806-1881), Lewis Morris Rutherford (1816-1892) oraz Henry Rowland (1848-1901) konstruowali coraz doskonalsze maszyny do produkcji siatek dyfrakcyjnych. Pod koniec XIX wieku wykonywano już siatki mające setki linii na mm.

Miały one jednak liczne problemy:

- błędy okresowe śrub napędowych powodowały powstawanie „duchów” w widmach
- wytworzenie śruby dobrej jakości było trudne i trwało miesiącami
- znalezienie dobrego diamentu było bardzo trudne i wymagało wiele prób i testów
- zrobienie jednej siatki trwało wiele dni (jeśli się udało)
- bardzo trudno robi się siatki na szkle  
(łatwiej w metalu – np. ze stopu miedzi z cyną – speculum)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Siatki dyfrakcyjne

Albert Abraham Michelson (1852-1931), amerykański fizyk (urodzony w Strzelnie), opracował na początku XX wieku interferometryczny układ kontroli maszyn wyrabiających siatki dyfrakcyjne – dzięki czemu wyeliminowane zostały problemy z niedoskonałą mechaniką urządzeń.

Robert Wood (1868-1955) z John Hopkins University przeprowadził w 1910r udane eksperymenty z siatką nacinaną asymetrycznie diamentem o profilu V, które pozwoliły na skoncentrowanie większości światła w jednym rzędzie. Od tego czasu siatki odbiciowe, błyskowe, stały się bardzo popularne.

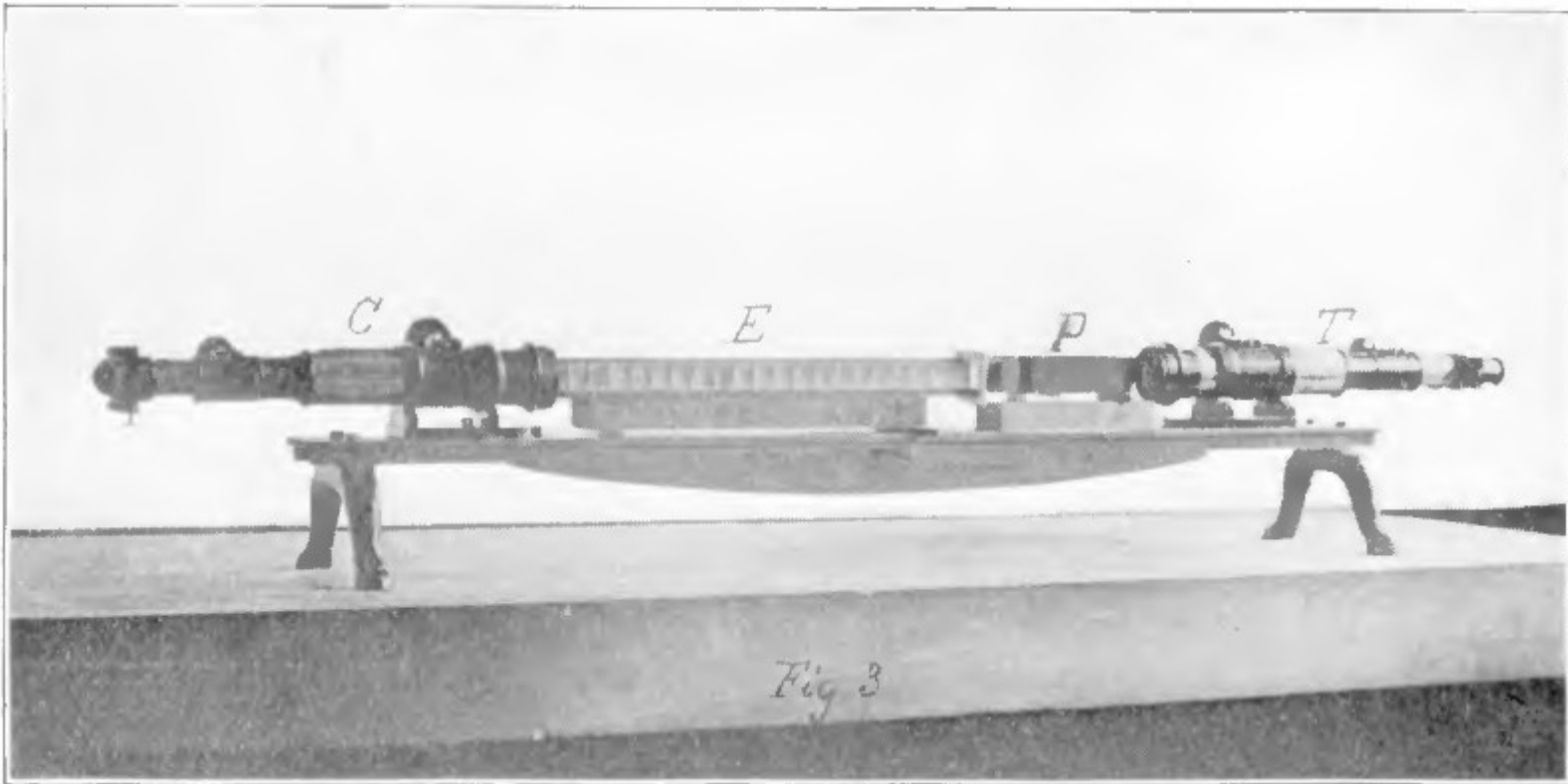
Ważnym udoskonaleniem procesu produkcji było również opracowanie metod replikacji siatek. Wiele osób próbowało różnych technik (pierwszy był Lord Rayleigh), np. pokrywanie siatki mokrym żelazem który po wyschnięciu stanowił replikę. Jednak dopiero kopie z wykorzystaniem żywic epoksydowych w latach 50-tych XX wieku otworzyły drogę do powszechnie dostępnych, tanich, błyskowych siatek dyfrakcyjnych.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Spektrograf echelle

Albert Michelson (1852-1931) eksperymentował z siatką dyfrakcyjną o niewielu liniach na mm ale używaną w bardzo wysokim rzędzie. W pracy „The echelon spectrograph” (1898) zaprezentował prototyp w którym każdy „ząbek” siatki był wykonany w płycie szklanej o grubości 18mm!

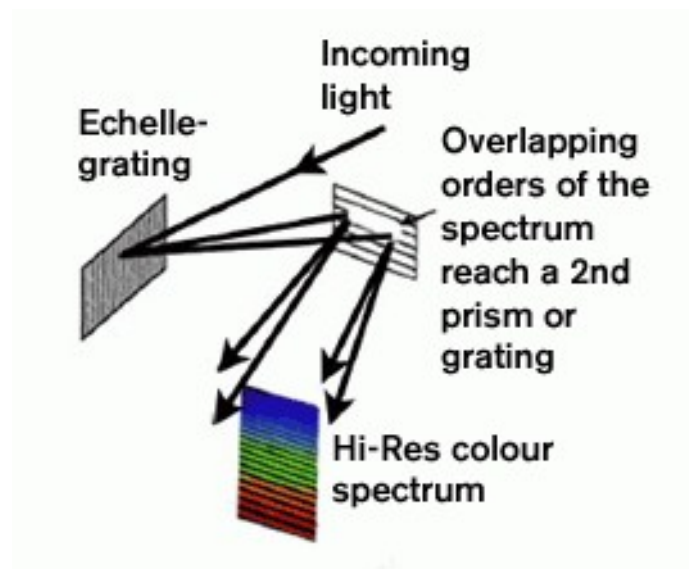


Prototyp siatki dyfrakcyjnej typu echelle (Michelson 1898)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Spektrograf echelle

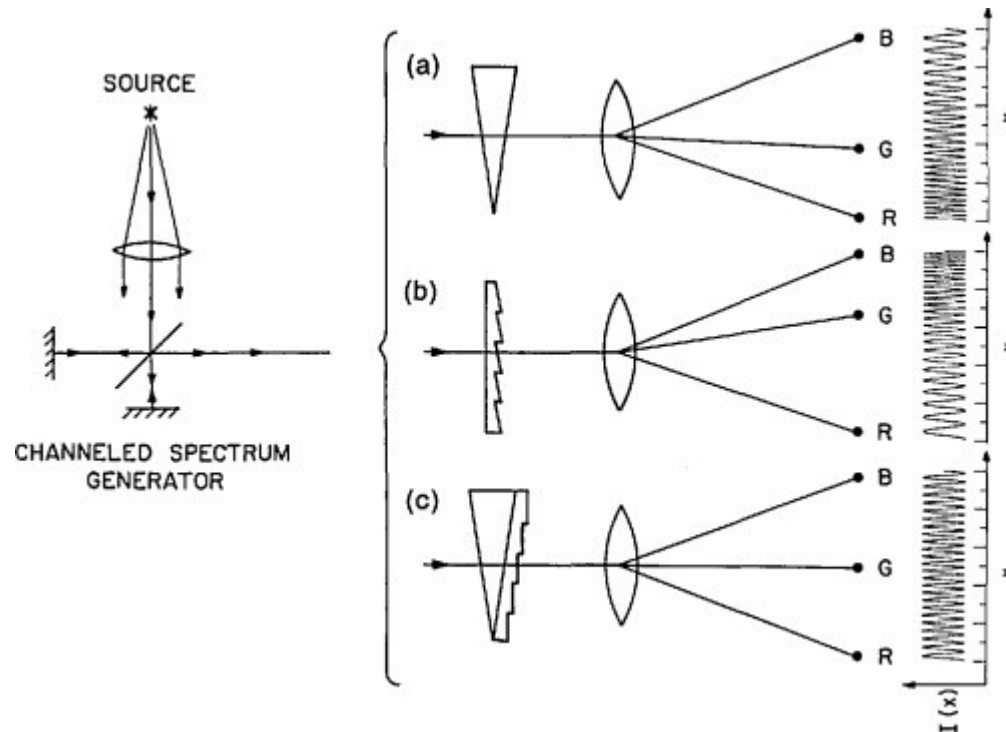
Hantaro Nagaoka (1865-1950) i Tokushichi Mishima (1893-1975) opracowali w 1923 pierwszą współczesną konstrukcję spektrografu z siatką typu echelle. Połączyli w niej siatkę echelle z drugą siatką odbiciową, wklęsłą (typu Rowlanda) aby uzyskać rozdzielone rzędy widm z pierwszej siatki. W ten sposób możliwe stało się otrzymywanie widm jednocześnie o wysokiej rozdzielczości i szerokim zakresie.



([www.baader-planetarium.com](http://www.baader-planetarium.com))

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Gryzm (ang. grism)

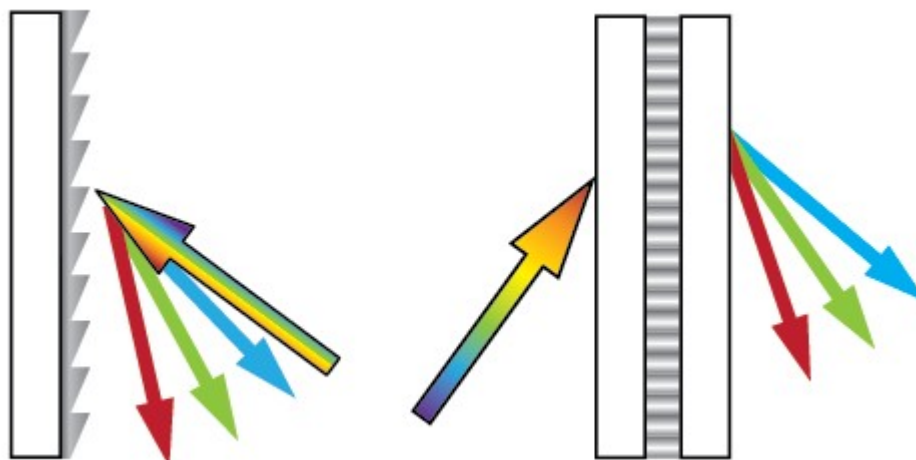


(Traub, 1990)

- Odpowiednie połączenie pryzmatu z siatką dyfrakcyjną daje możliwość:
1. uzyskania widma bez odchylenia toru światła dla centralnej długości fali
  2. uzyskanie niemal równej rozdzielczości widma w szerokim zakresie

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Volume phase holographic grating



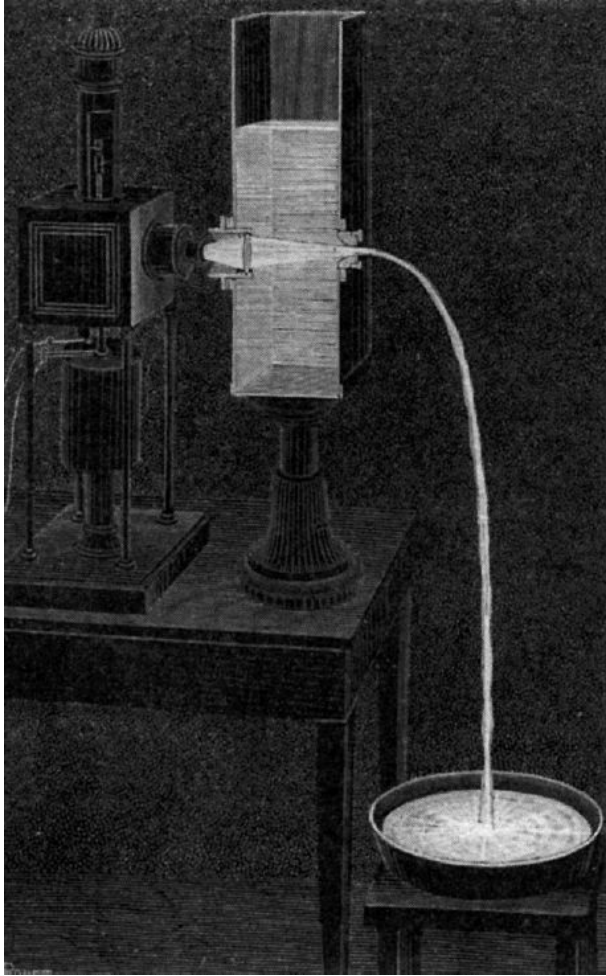
(wasatchphotonics.com)

Volume phase holographic grating (siatka holograficzna) jest rodzajem siatki dyfrakcyjnej, które pojawiły się w latach 90-tych (?) Siatki te tworzą widma dzięki cienkiej warstwie przezroczystego materiału, w której różne fragmenty mają różne współczynniki załamania. Manipulując grubością materiału i/lub rozkładem współczynnika załamania można uzyskać ciekawe własności, takie jak zwiększoną efektywność siatki w danym zakresie oraz uniezależnienie efektywności od polaryzacji światła.



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Światłowód

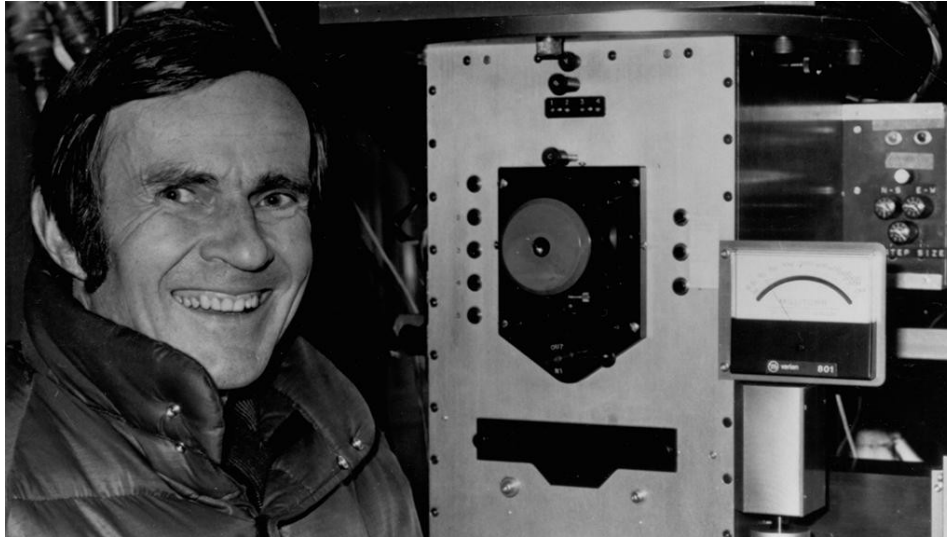


Już w XIX wieku używano wygiętych prętów szklanych do prowadzenia światła podczas operacji chirurgicznych.

Demonstracja metody transmisji światła w strumieniu wody (Daniel Colladon, 1842)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Światłowód



Krzysztof Serkowski (archiwum Uniwersytetu w Arizonie)

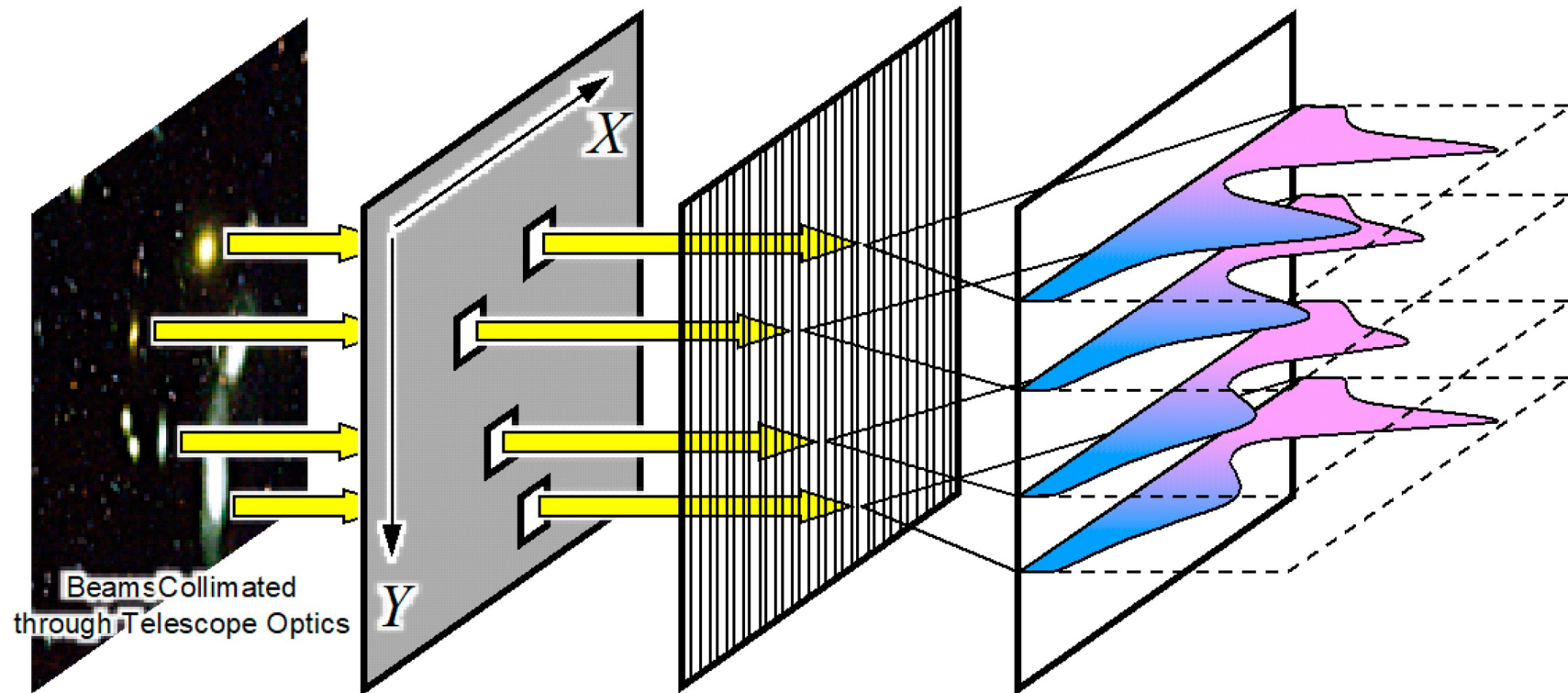
Pierwszy raz zastosował światłowód w spektroskopie astronomicznym w 1979r Krzysztof Serkowski (1930-1981), polski astronom który wyemigrował do USA i zajmował się m.in. konstrukcją spektrografów do poszukiwań planet pozasłonecznych z komórką gazową, Fabry-Perot oraz z użyciem światłowodów. Twórca empirycznego prawa polaryzacji Serkowskiego, dotyczącego polaryzacji światła gwiazd przez materię międzygwiazdową.

Użycie światłowodu ma ważne zalety:

- spektrograf nie musi wisieć na teleskopie
- światłowód ma własność mieszania światła
- pozwala zwiększyć dokładność pomiaru prędkości radialnej

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

Multi Object Spectroscopy MOS  
multislit spectroscopy

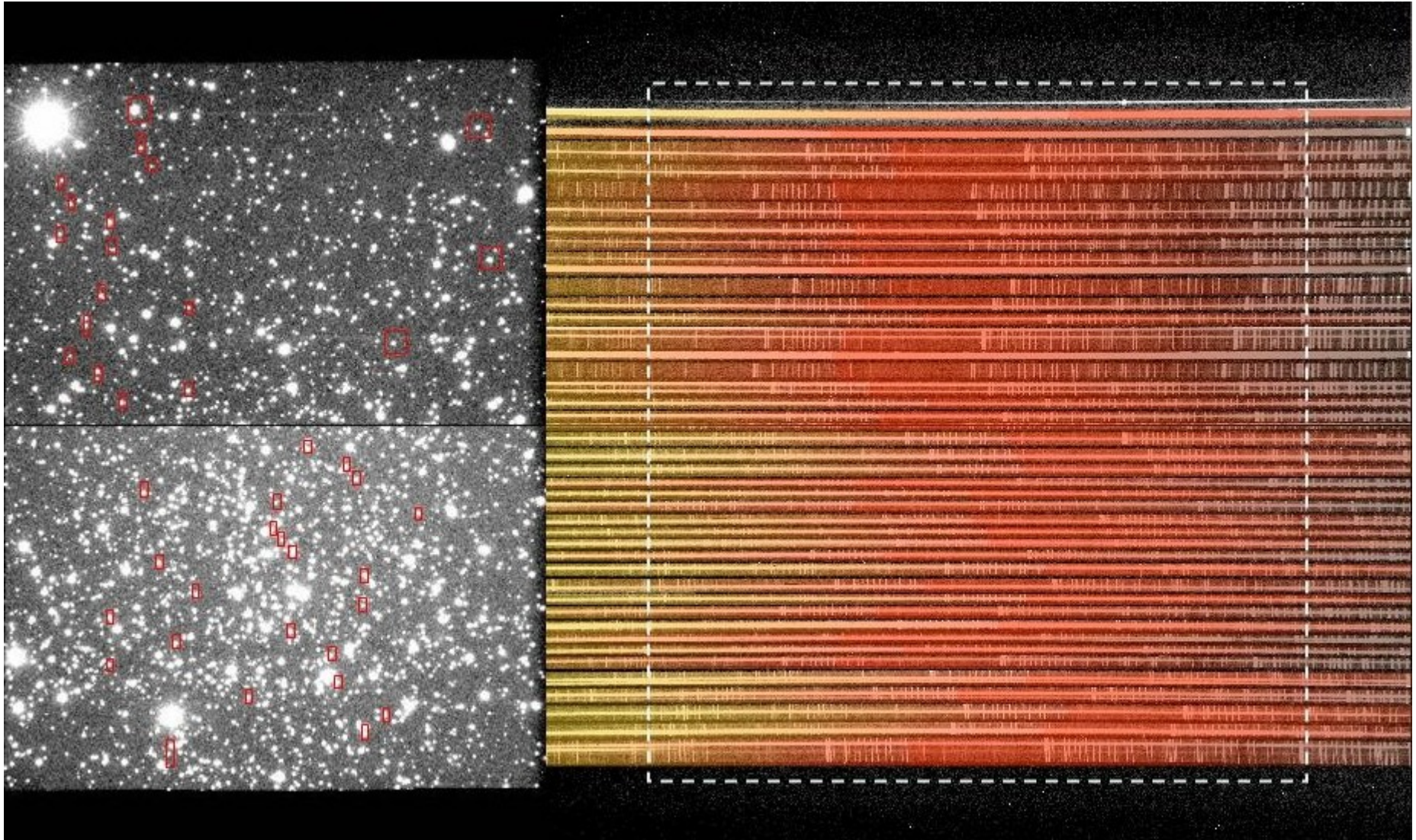


(Liu et al., 2020)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Multislit spectroscopy



Przykład obserwacji za pomocą Low Resolution Imaging Spectrometer na teleskopie Keck I. Pionowe linie emisyjne to linie tła nieba. Część niebieska i czerwona są rozdzielone za pomocą płytki dichroic beamsplitter ([www2.keck.hawaii.edu](http://www2.keck.hawaii.edu))



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

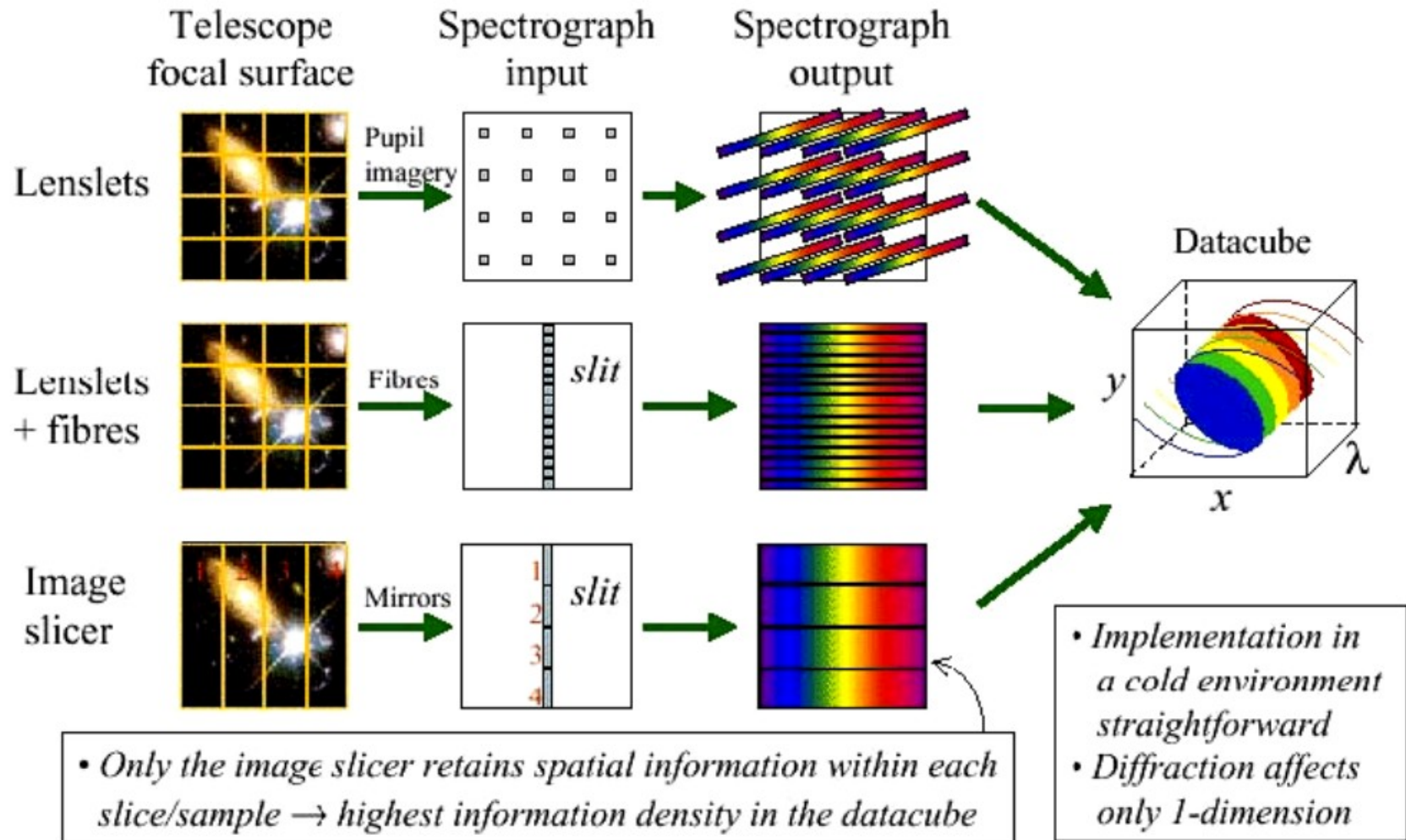
## Multifiber spectroscopy



320 światłowodów w kartridżu Sloan Digital Sky Survey ([www.sdss3.org](http://www.sdss3.org))

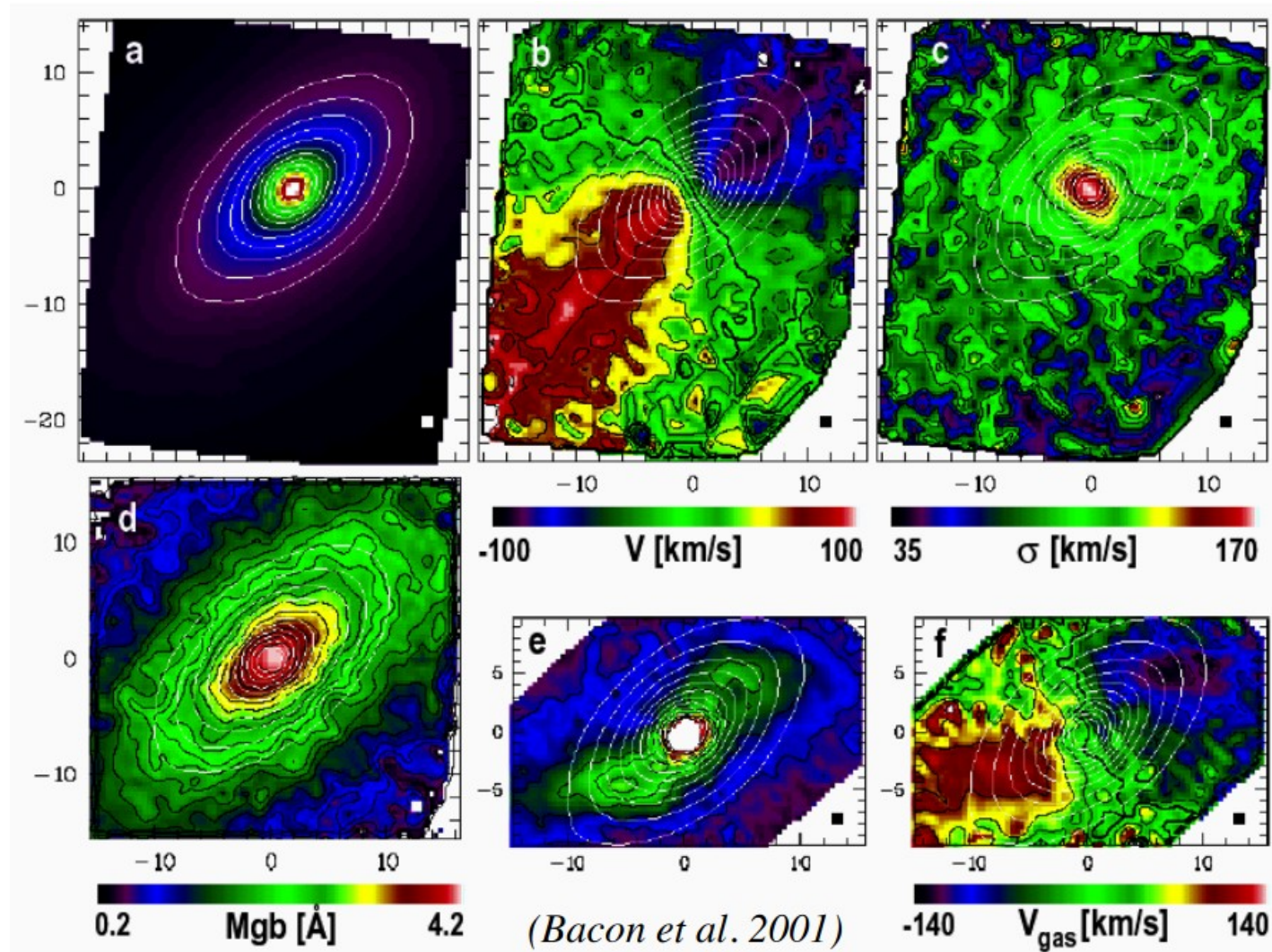
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Integral field units (3D spectroscopy)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Integral field units (IFU)



Przykład widma z instrumentu SAURON na WHT (Bacon et al., 2001)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

Spektroskopia/obrazowanie wąskopasmowe, Fabry-Perot

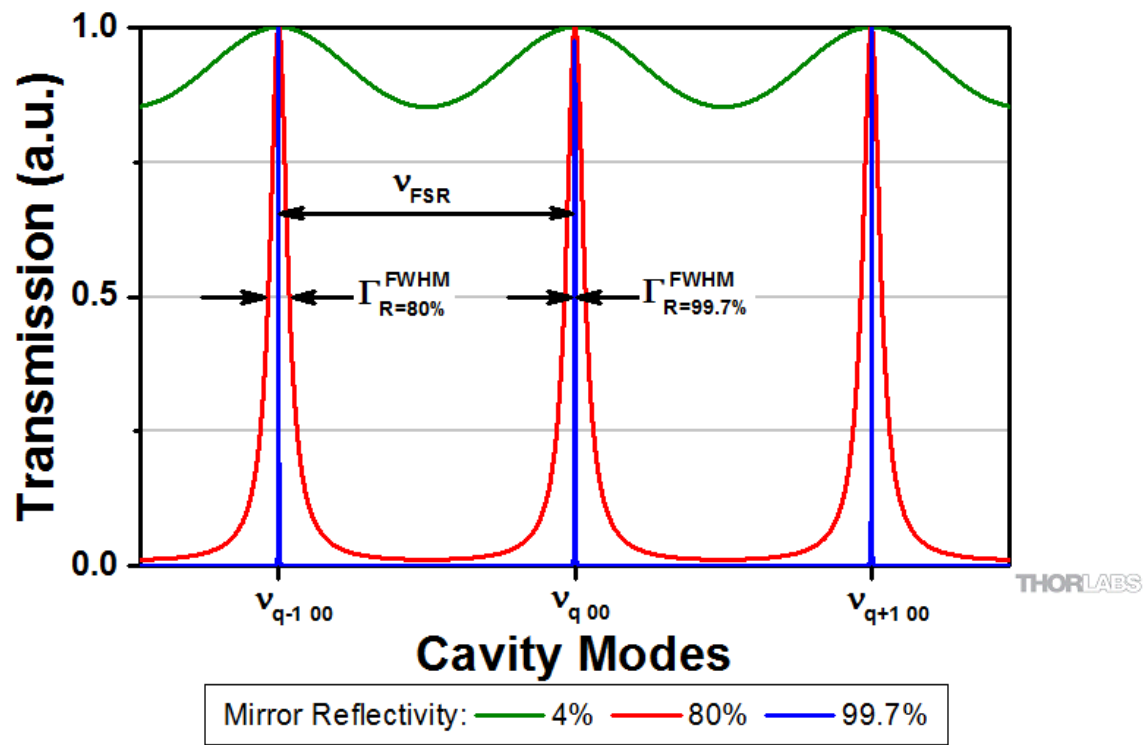
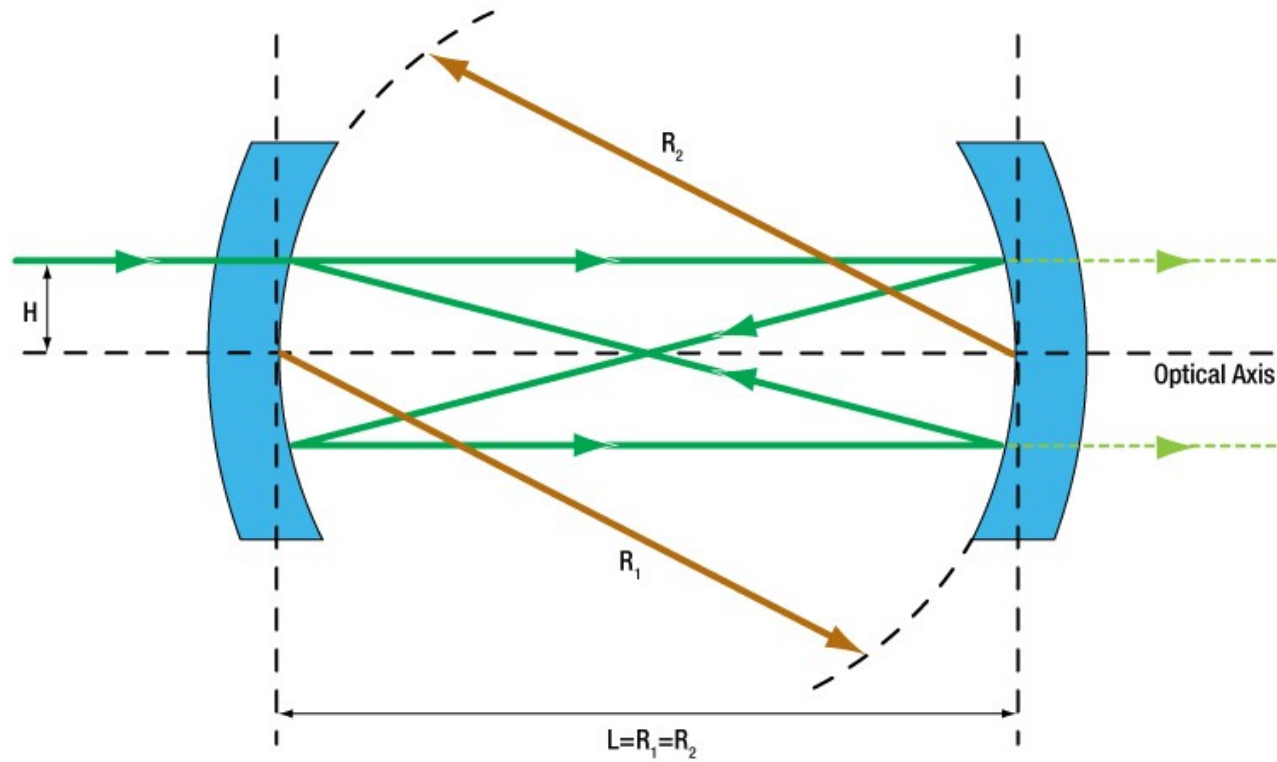


Charles Fabry  
(American Institute of Physics)



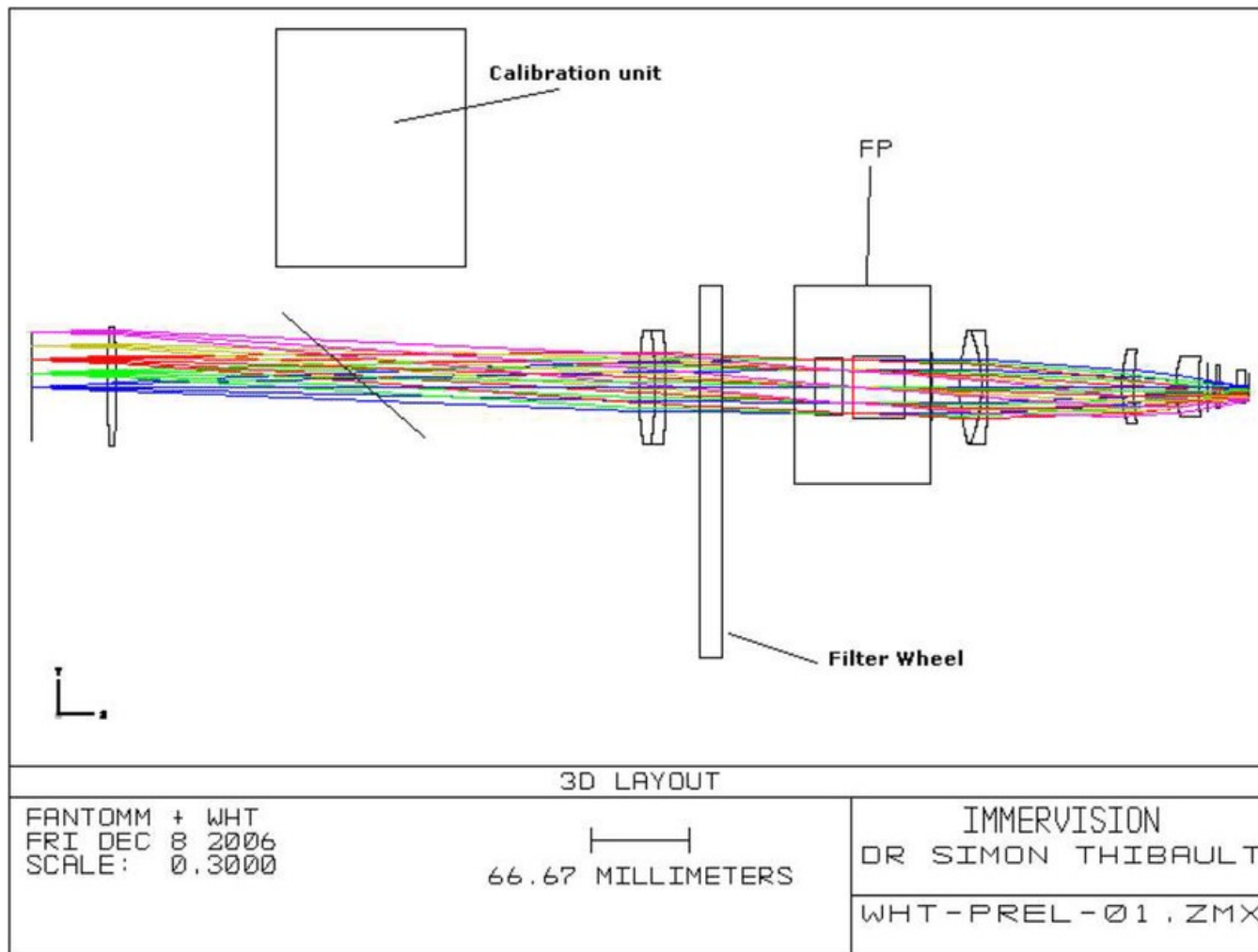
Alfred Perot  
(Eugene Pirou przed 1900)

Francuscy fizycy Maurice Paul Auguste Charles Fabry (1867-1945) oraz Jean-Baptiste Alfred Pérot (1863-1925) opracowali w 1899r interferometr Fabry-Perot lub etalon. Jest on powszechnie stosowany do precyzyjnej kontroli długości fali światła.



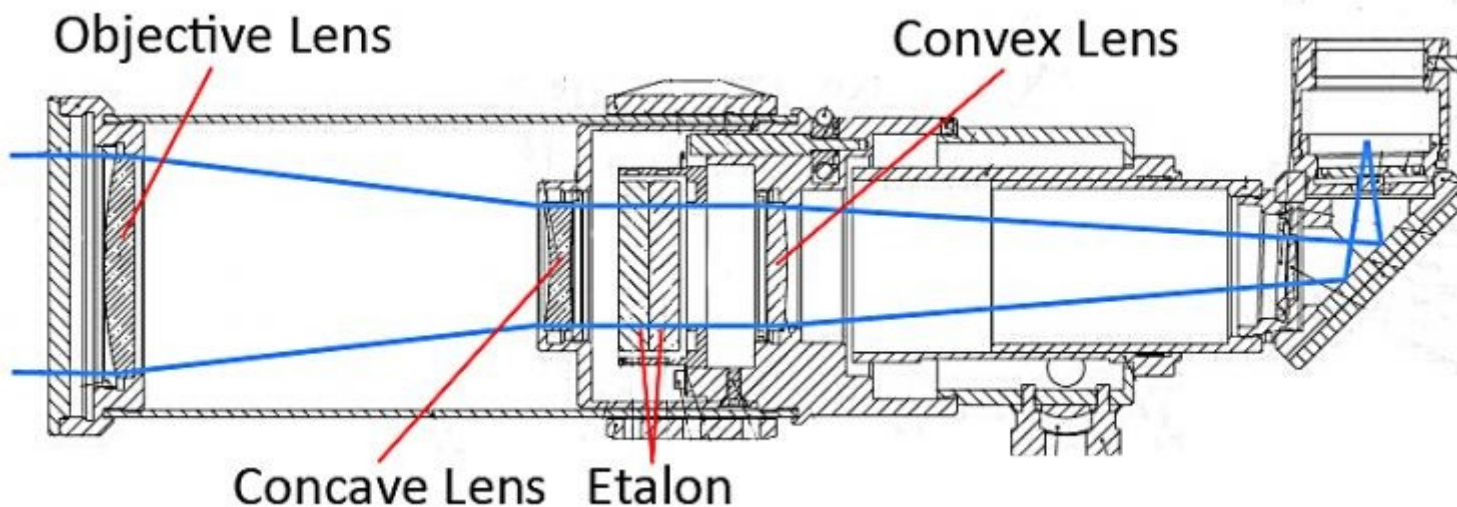
Transmisija F-P  
(thorlabs.com)





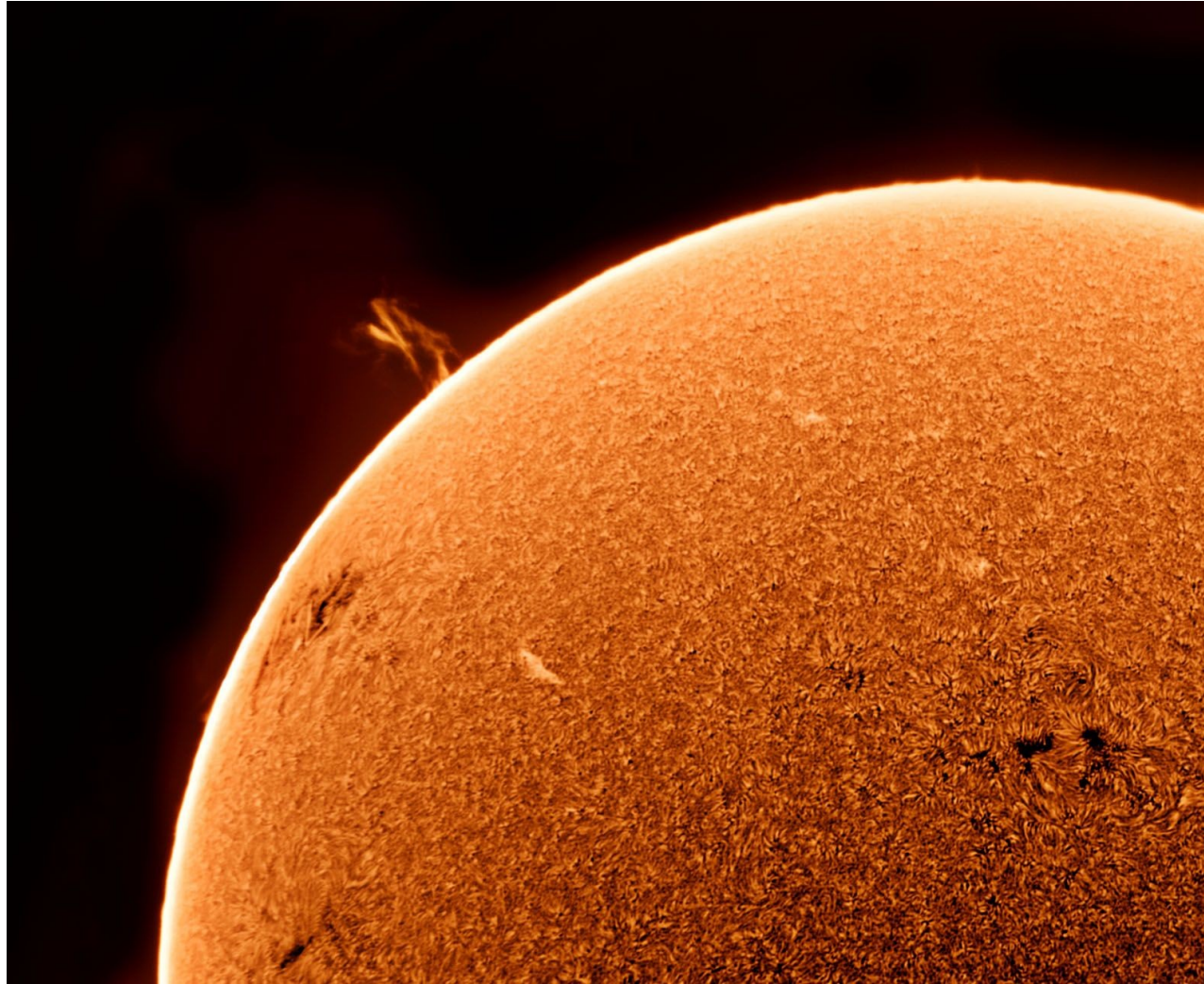
GhaFaS – skanujący spektrometr Fabry-Perot na Teleskopie Williama Hershela (Hernandes i in. 2008).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Teleskop słoneczny pracujący w linii H alpha (szerokość pasma ok  $0.7\text{\AA}$ )  
jest przykładem wykorzystania interferometru (etalonu) Fabry-Perot (Ian Morison, [www.ianmorison.com](http://www.ianmorison.com)).

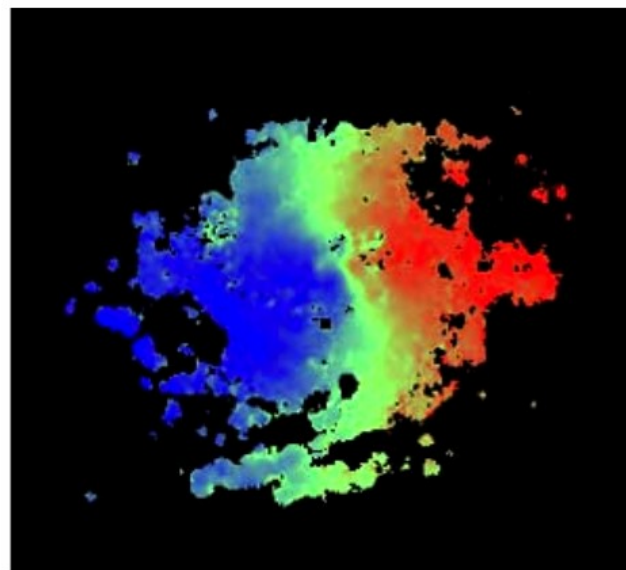
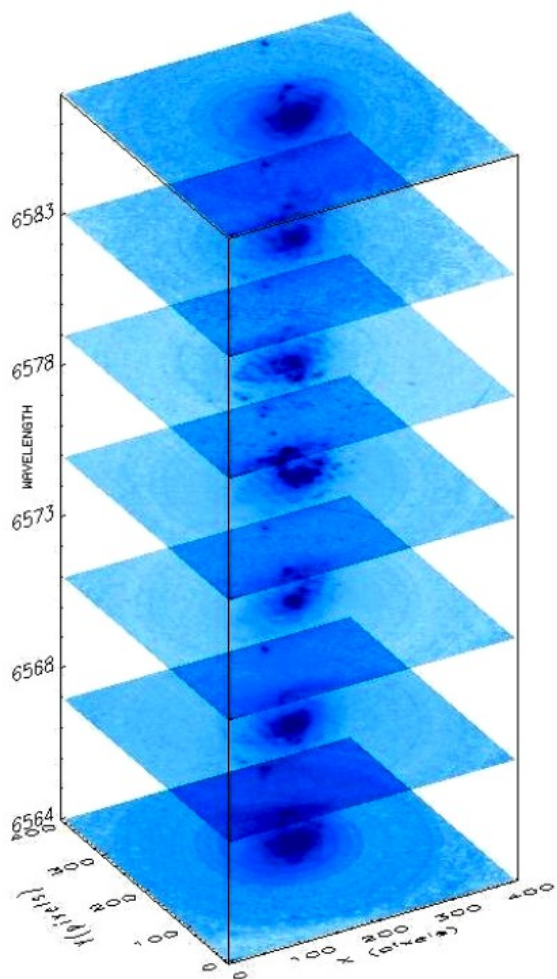
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej



Przykładowe zdjęcie Słońca z teleskopu słonecznego firmy Lunt ([luntsolarsystems.com](http://luntsolarsystems.com)).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Spektroskopia/obrazowanie wąskopasmowe, Fabry-Perot



Przykład danych z instrumentu Fabry-Perot (z lewej), mapa prędkości radialnych (z prawej)  
(George Djorgovski, [sites.astro.caltech.edu/~george/](http://sites.astro.caltech.edu/~george/))

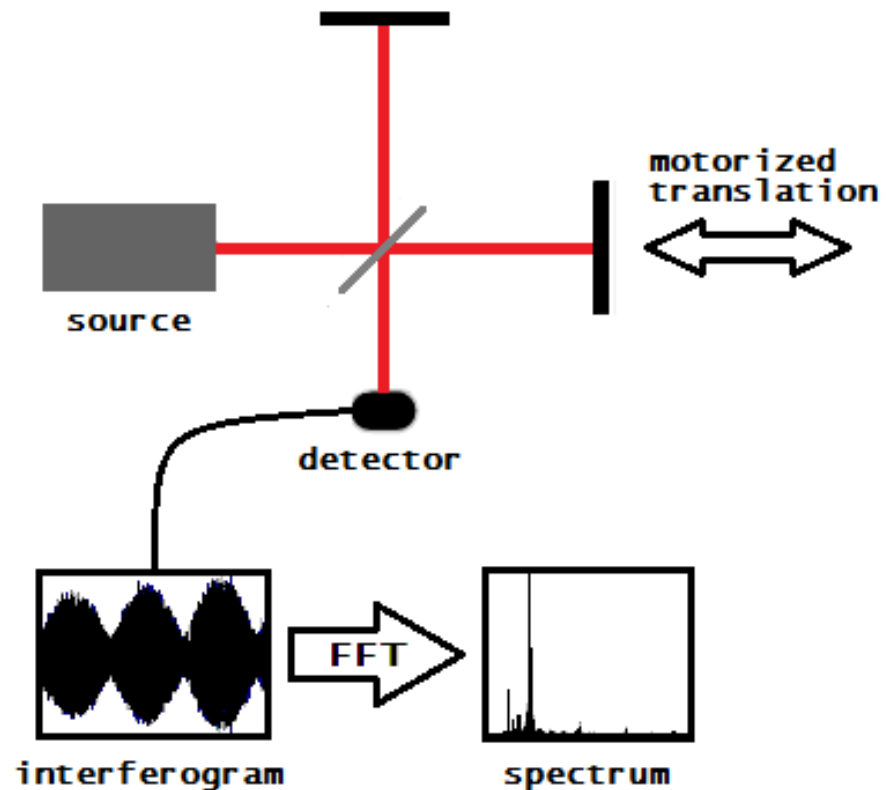
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Fourier transform spectroscopy (Michelson Interferometer)



Albert Abraham Michelson (1852–1931)  
Pierwszy Amerykanin, który otrzymał  
Nagrodę Nobla w Fizyce w 1907r  
za precyzyjne instrumenty optyczne i  
badania spektroskopowe oraz metrologiczne  
([en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)).

Ciekawostka: narodził się w Strzelnie.

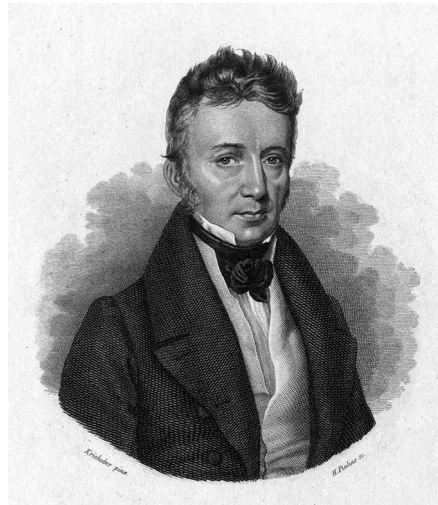


Schemat ilustrujący zasadę działania  
spektroskopu furierowskiego ([en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)).



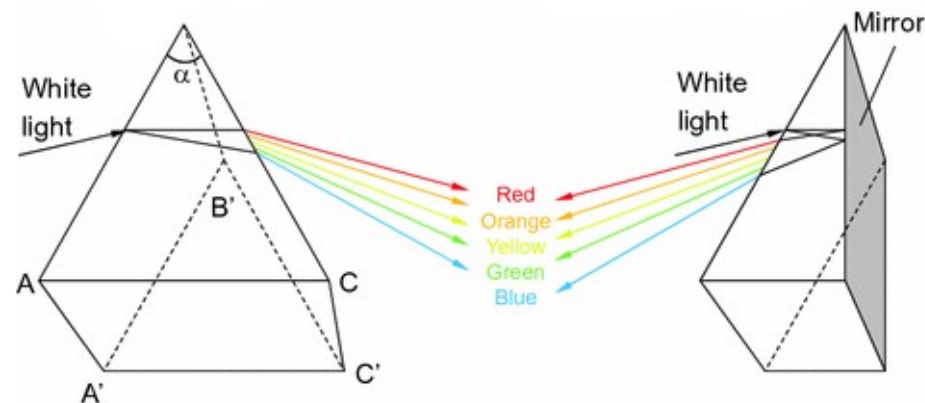
# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Konfiguracja Littrowa



Joseph von Littrow (z książki Littrowa z 1836 Physische Astronomie)

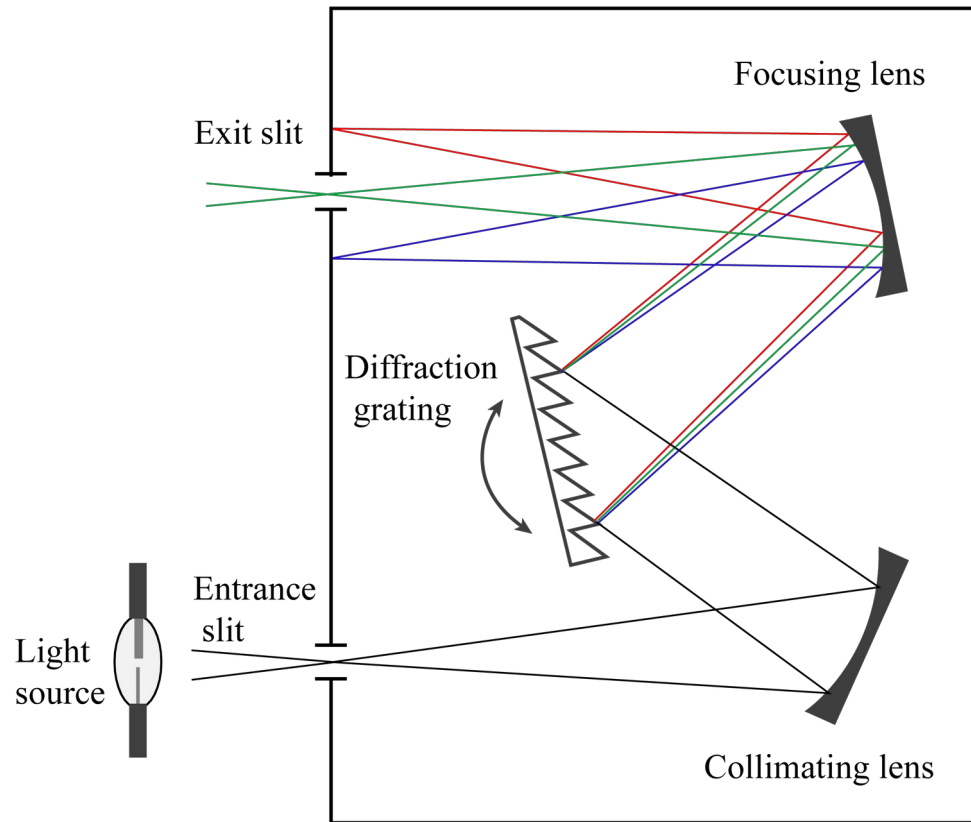
Josephe von Littrow (1781-1840), austriacki astronom, wieloletni dyrektor Obserwatorium Wiedeńskiego, wynalazł pryzmat Littrowa oraz powszechnie dziś używaną konfigurację Littrowa w spektroskopach.



Porównanie zwykłego pryzmatu i pryzmatu Littrowa (Lu, Fu 2018, Optical Spectral Measurement)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Monochromator



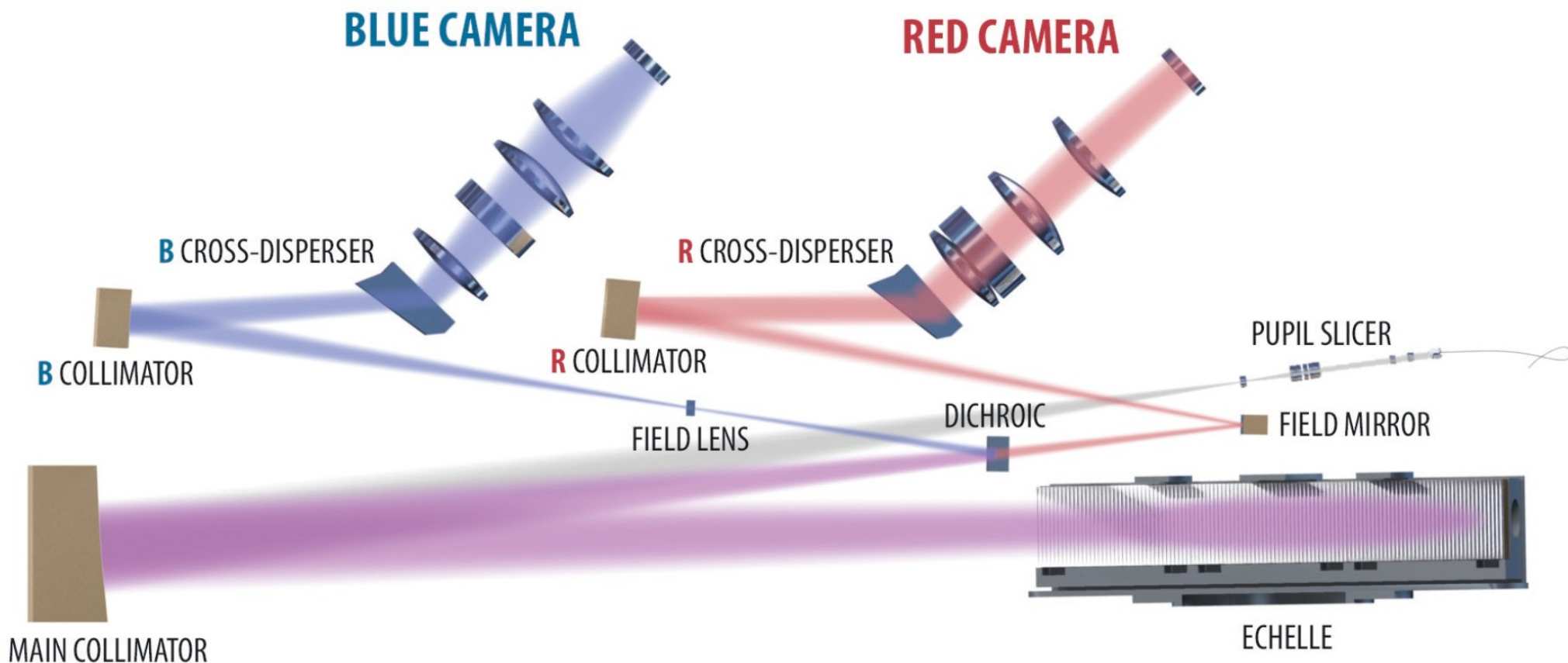
Schemat monochromatora typu Czerny-Turner (autor: Sobarwiki, commons.wikimedia.org)

Monochromator – urządzenie analizujące wybraną długość (wąski przedział długości fal).

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## ESPRESSO

Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations



Schemat jednego z najdokładniejszych spektroskopów astronomicznych dedykowanego do pomiarów prędkości radialnych (ESO)

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

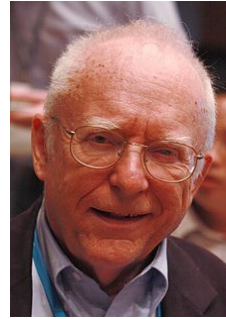


Fragment widma uzyskanego za pomocą spektrografu ESPRESSO (ESO)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

## Laser frequency comb

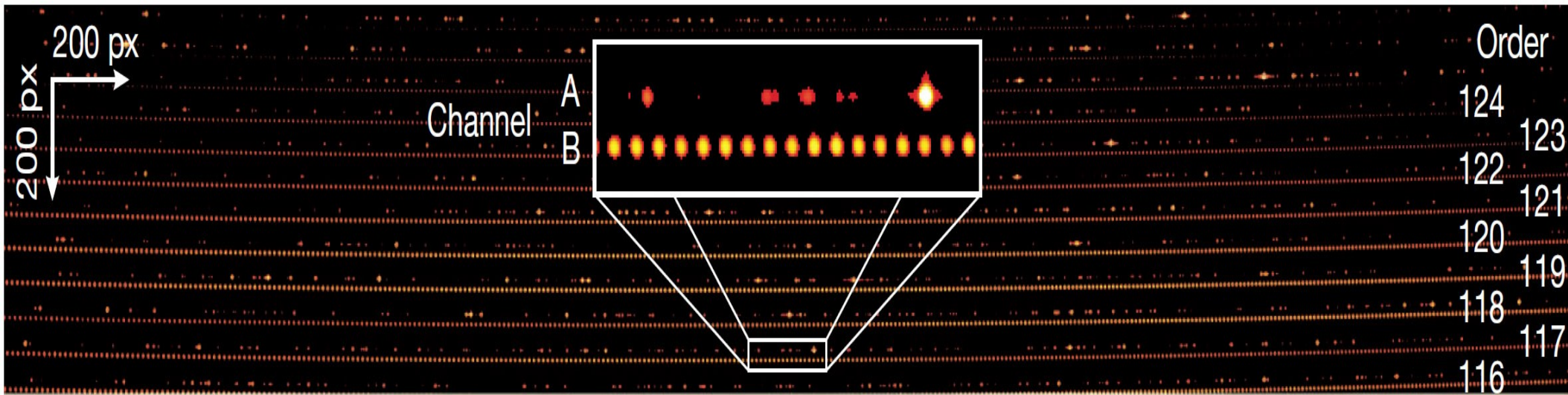


John Lewis  
Hall



Theodor  
Wolfgang  
Hänsch

$\frac{1}{2}$  Nagrody Nobla 2005 z fizyki  
za rozwój spektroskopii laserowej



Astro-comb i lampa Th-Ar na wspólnym widmie spektrografu HARPS  
(<http://www2.mpg.mpg.de/~haensch/astro/combs.html>)



# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

Interferometric planet finder

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

HARPS, Elodie

# Skrócona historia spektroskopii astronomicznej

Space spectroscopy