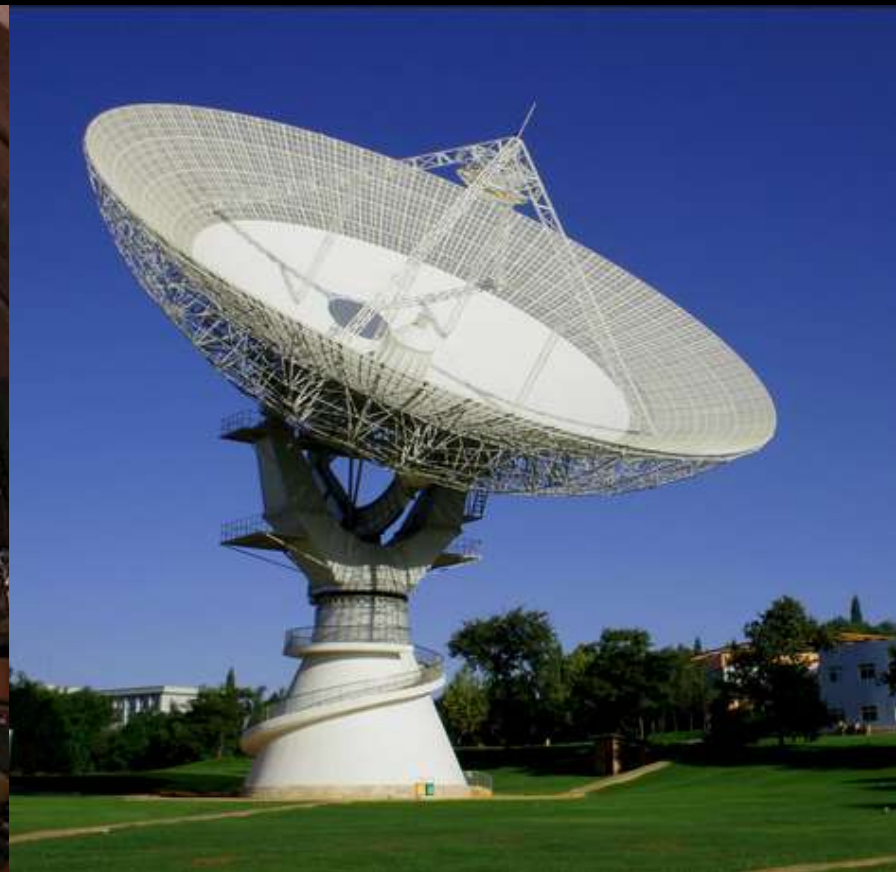


Műszerek és technikák a 19-20. század csillagászatában

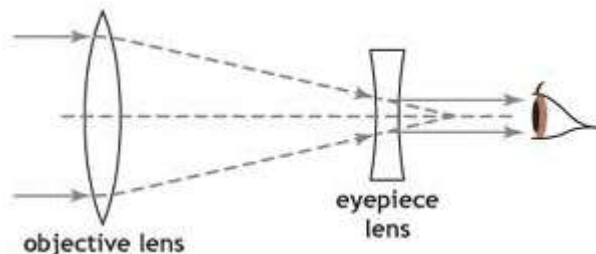


A csillagászat története 2., 2015. április 17.

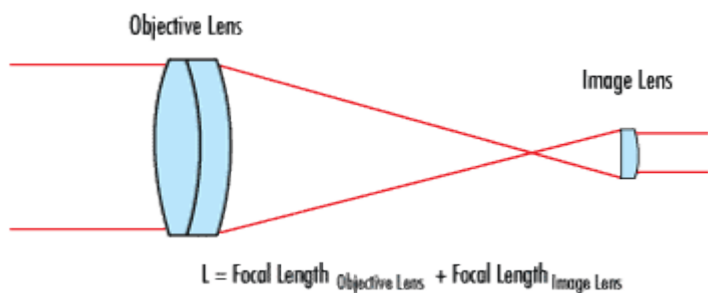
Témák

- Távcsövek
- Observatóriumok
- Asztrofotózás
- Spektroszkópia
- Fotometria
- Egyéb: radiometria, polarimetria, interferometria...
- Rádiócsillagászat
- Egyéb egyéb

A távcsövek rövid előtörténete



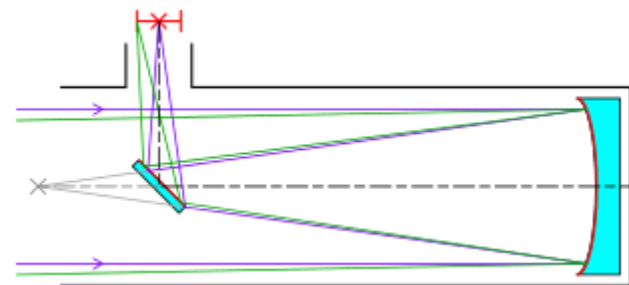
Galilei-távcső (1608)



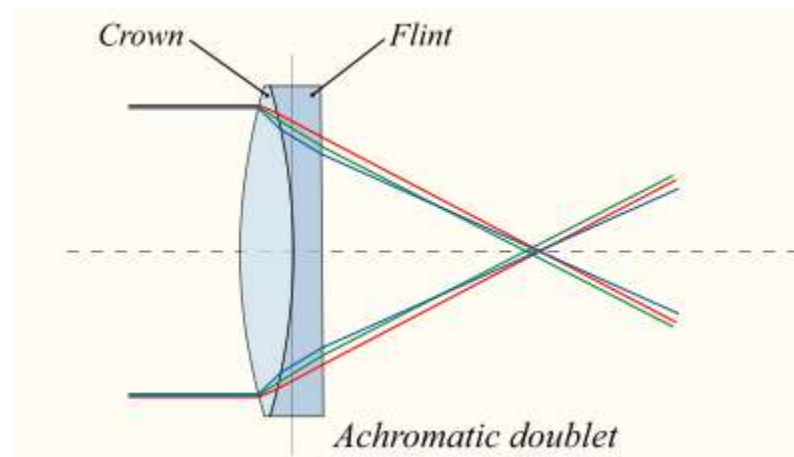
Kepler-távcső (1611)



kromatikus aberráció



Newton-távcső (1668)



akromatikus távcső
(Chester Moore Hall, 1733
→ John Dollond, 1758)

Előjáték: egy speciális távcső...

- szaporodnak a mérési technikák trükkjei és eszközei
- heliométer: félbevágott lencse
 - a lencsék mozgatásával két objektum képét fedésbe hozni
 - igen pontos távolságmérés (nagyon kis szögtávolságokra)
- név: eredetileg a napkorong pontos mérésére tervezték
- történet:
 - 18. sz. közepén feltalálják
 - 1820 körül Joseph von Fraunhofer megépíti az első akromatikusot
 - Bessel híressé teszi...



... és az eredmény: éves parallaxis

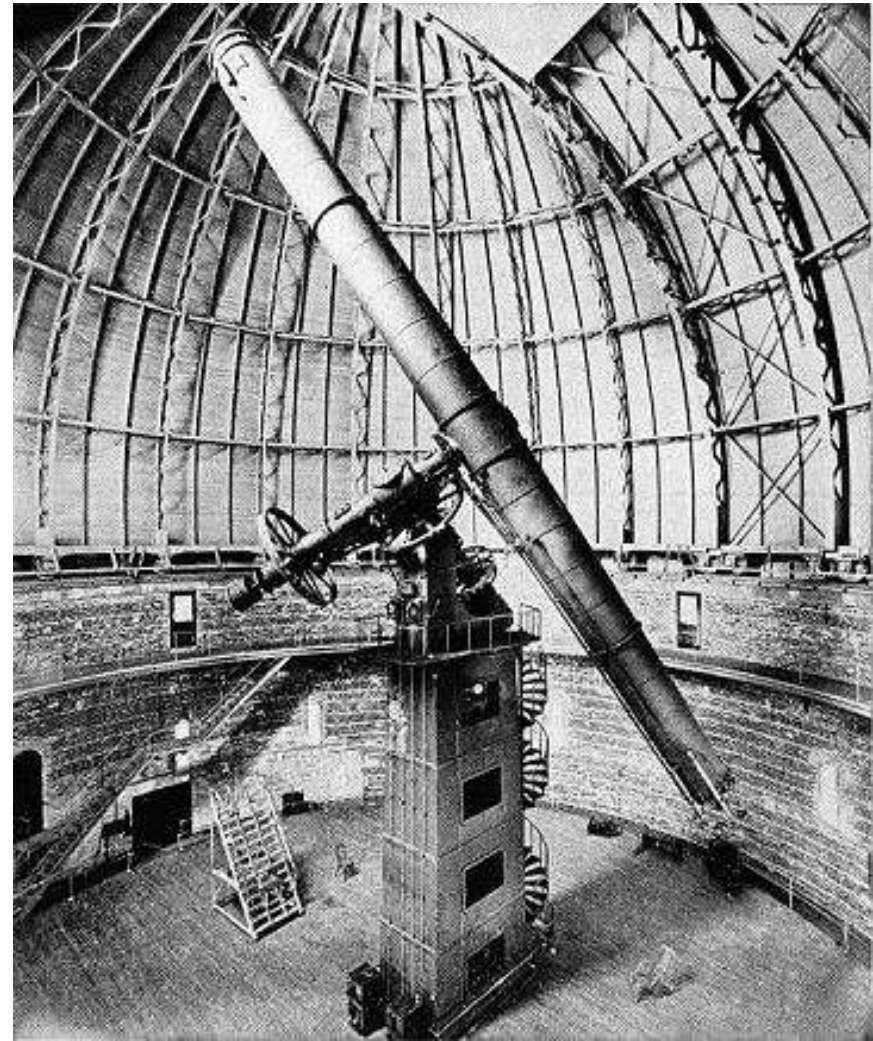
- Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846)
 - a Königsbergi Obszervatórium első vezetője (1810-46)
 - a redukció módszereinek rendszerezője
 - redukálja és publikálja Bradley katalógusát: 3222 csillag (1755-ös évre)
 - saját katalógusok (2): 62 000 csillagra
 - a kor egyik meghatározó észlelőcsillagásza
- parallaxis-mérés:
 - módszer: nem abszolút pozíció, hanem háttércsillagokhoz képest
 - nem a legfényesebb csillagokat nézi, hanem a legnagyobb sajátmozgásúakat → 61 *Cygni* (5"/év)
 - 1838: a csillag évi parallaxisa kb. 1/3 "
 - mások: Thomas Henderson, 1839: α *Centauri* parallaxisa (nagyobb)
Friedrich Struve, 1840: Vega (α *Lyrae*) parallaxisa (kisebb)

Lencsés távcsövek (refraktorok)

- 19. sz.: sok próbálkozás az akromatikus lencsék növelésére (német optika)
- A század során uralkodó a tükrös távcsövekhez képest – előnyei:
 - szebb kép, nagyobb kontraszt, kevesebb utómunka (stabil, időtálló)
- A legfontosabb a század vége felé: 36" (90 cm) (USA, Lick Observatory), 1888 (megj.: " – hüvelyk (2,54 cm))
 - 17 m hosszú cső → ekkora már elég nehézkes
 - Lick egy gazdag üzletember (zongorakészítő), aki \$ 700 000-t ad a Kaliforniai Egyetemnek, hogy építsék meg a legnagyobb távcsövet



- Hogy lepipálja 36 hüvelykeset, a Kaliforniai Egyetem épített egy 40" (1,0 m)-t
 - egy iparmágánás, Charles T. Yerkes pénzéből → Yerkes Observatory, 1897
 - 20 m-es cső, 30 m-es kupola
 - a mai napig a legnagyobb működő
- Valaha volt legnagyobb refraktor:
Párizsi világkiállítás, 1900: 125 cm
 - 60 m hosszú
 - csak bemutató célra készül,
a kiállítás után szétszedik



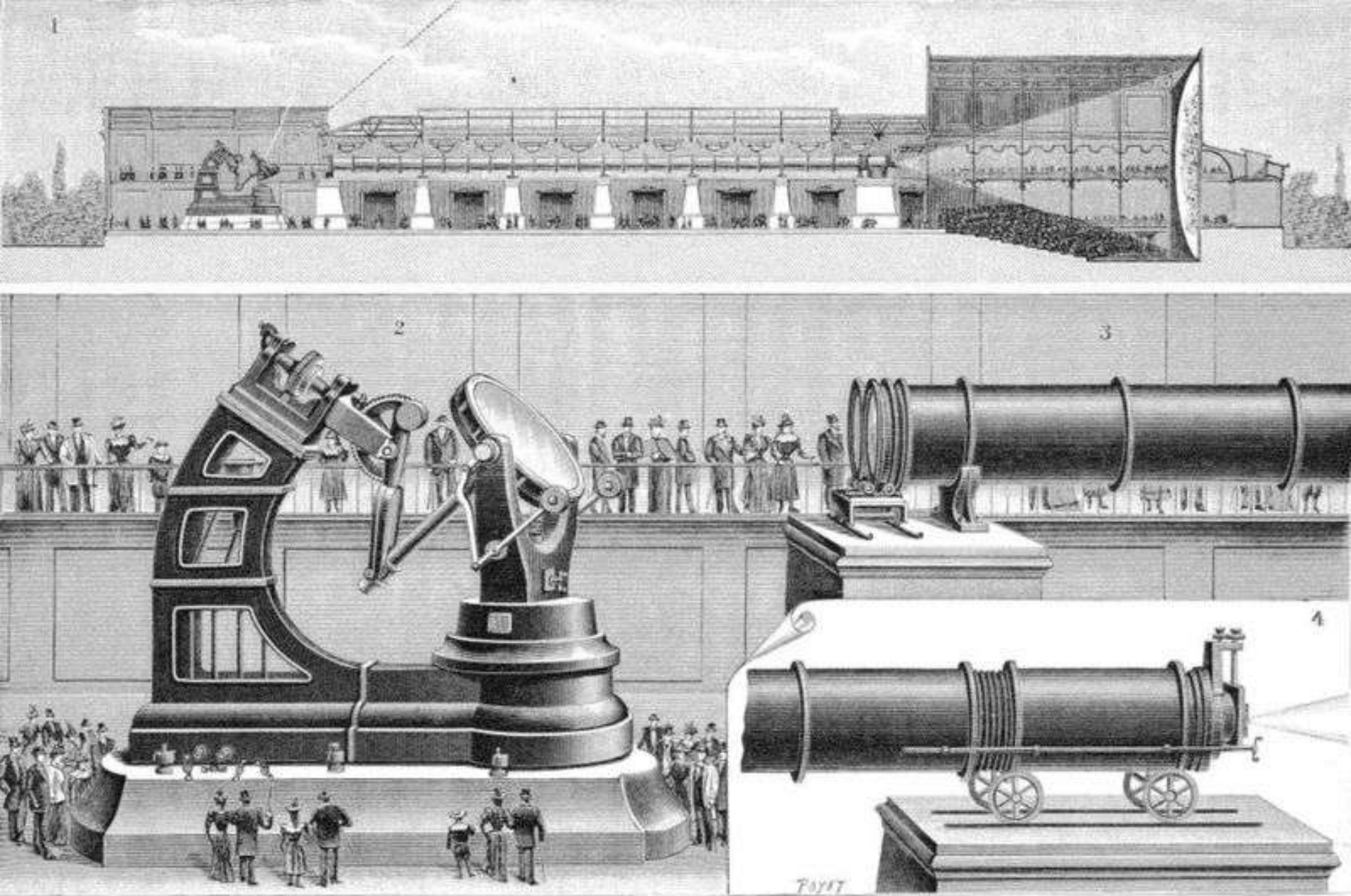
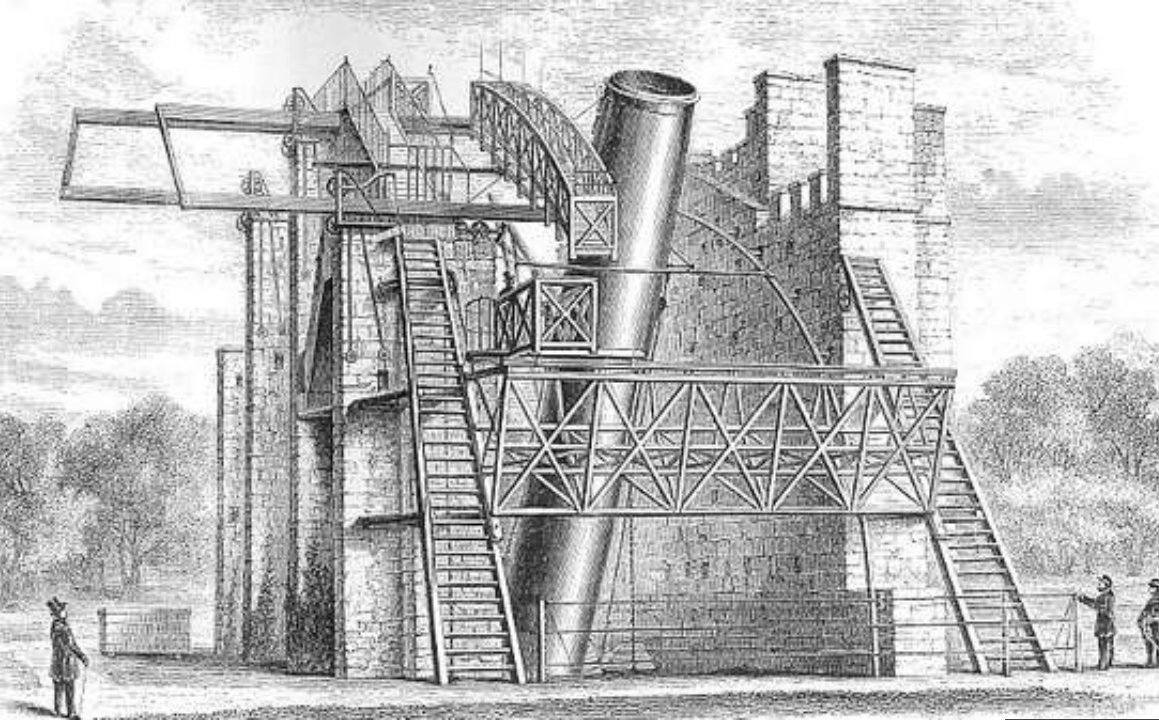


Fig. 3. — Détails de la grande lunette. — 1. Vue d'ensemble. — 2. Le sidérostas. — 3. La lunette. — 4. L'oculaire.

A nagy párizsi refraktor részei

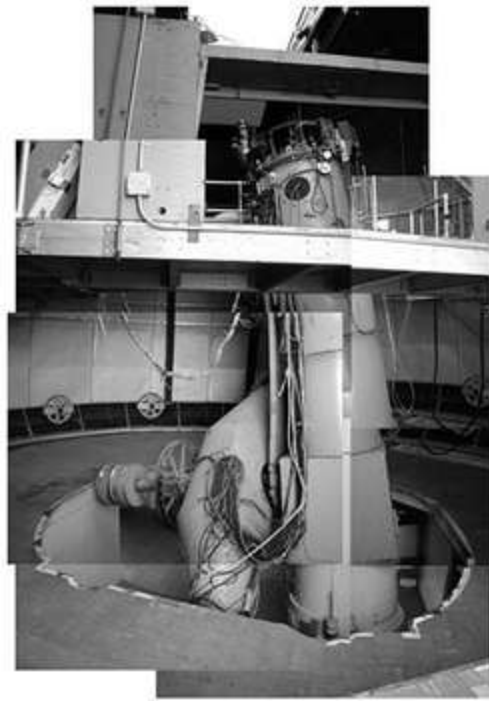
Tükrös távcsövek (reflektorok)

- Eleinte nem olyan elterjedt, mint ma gondolnánk: a tükröt gyakran újra kell csiszolni, mert hamar elhomályosul
 - + nem olyan tiszta a képe, mint a lencsésnek
 - + kevésbé stabil: macerásabb beállítani
- George Biddell Airy, 1827: ezüstözött üvegtükröt javasol
 - ↔ a technológiára még évtizedeket kell várni
 - Karl Steinheil és Léon Foucault ezüstözött parabolatükröket gyárt (1857)
 - ez felviszi a visszaverőképességet 50%-ról (polírozott fém) 90%-ra
 - + lassabban homályosul
- 1870-as évek első, komolyabban használt darabjai:
 - USA, Henry Draper: 28" (70 cm) → első csillagspektrum-fotó
 - Párizs: 47" (120 cm)
 - Anglia: 36" (90 cm)
 - Írország: 72" (1,8 m) – 1845-(1917): a világ legnagyobb („a Parsonstown-i Leviatán”)



← A nagy ír távcső:

- newtoni szerelés
- kupolája sosem volt
- 13 cm vastag tükör
- 16,5 m hosszú cső
- a tükör kb. 3 tonna, az egész 12 tonna
- főleg ködök észlelésére



← Ezzel a 36"-es távcsővel fotózta A.A. Common az Orion-ködöt → 1883-ban, 1 Orion-ködöt → 1883-ban, 1 órás expozícióval

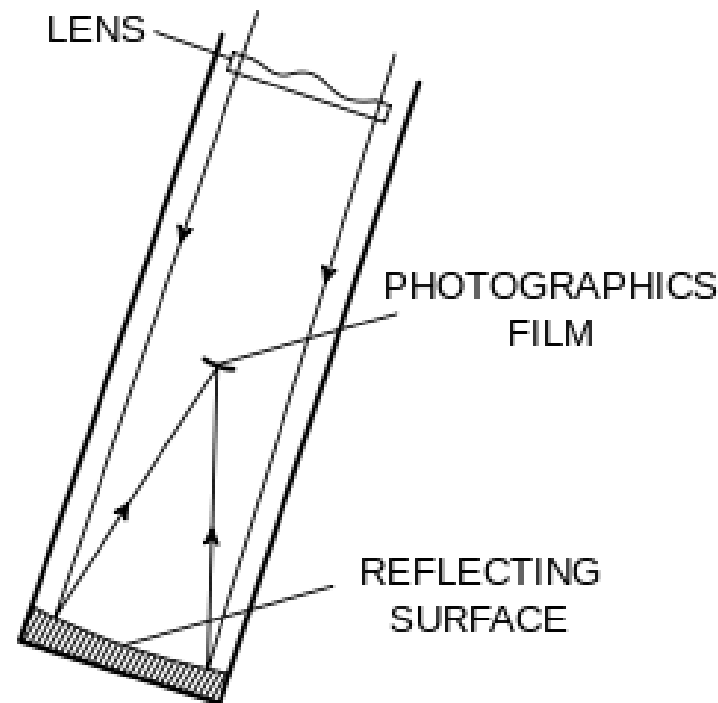


A reflektorok forradalma

- refraktor hátrányai:
 - hosszú cső
 - kisebb fényerő (→ hosszú expozíciós idő)
 - igen drága (akkora üveg megfelelő minőségben)
 - a nagy lencsék már torzulnak ill. sokat szűrnek (főleg alacsony hullámhosszon),
 - nincs tökéletesen akromatikus lencse (milyen tartományra? vizuális? fotó?)
 - rosszabb spektroszkópai célokra (változó fókuszok hullámhossz szerint)
- a 19. sz. végére a fotózás és spektroszkópia igényei miatt a reflektorokra koncentrálnak
- 1931, John Strong: ezüstözés helyett alumínium párologtatása vákuumban
 - 50% több visszatükrözés fotografikus tartományban
 - tartósabb (ritkábban kell felújítani)

A Schmidt-távcső

- hagyományos távcsövek: csak a tengely mentén éles a kép, ettől távolodva erős „kóma” észlelhető
 - a nagy látószögű fotográfia problémás
 - Hale, Palomar-hegy: korrekciós lencse klasszikus newtoni szereléshez
- Bernhard Schmidt, 1930 (Hamburg):
legyen a főtükrör gömbi (nem parabolikus)
+ középre egy kisebb aszférikus üveglemez (korrigálja a szférikus aberrációt)
 - de így a fókusz sík görbült
 - a fotólemezeket hajlítani kell
- első nagyobb: 1948, Palomar-hegy: 72" (1,8 m)
 - 6° x 6° területeket fotóz
 - (→ 1949-58: az égbolt fotografikus felmérése 21 mag-ig)



Csillagvizsgálók a 19. században

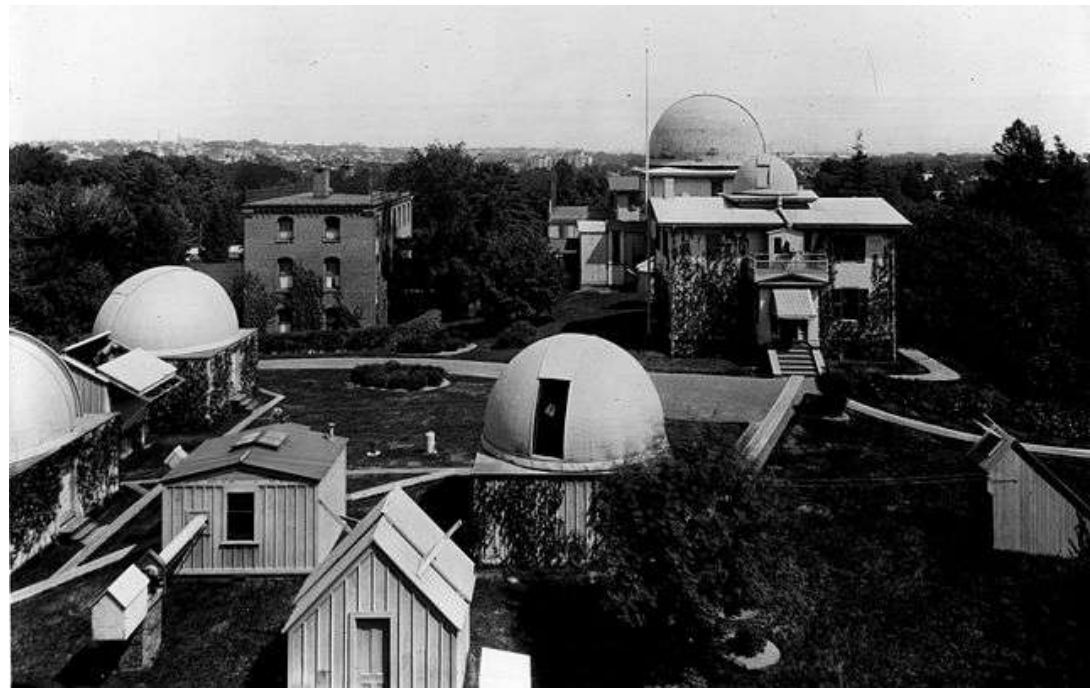
- század eleje: Greenwich, Párizs, Berlin a három fő központ
- sorra alakulnak egyéb helyeken
 - 1820-as évek: Dél-Afrika, Ausztrália → déli félteke
 - majd Oroszország, USA, stb.: felzárkózó országok
 - Európa: Potsdam, Meudon, stb. stb.
- a 19. sz. végére USA veszi át az uralkodó szerepet: legtöbb obszi, legtöbb nagy távcső, stb.
 - óriástávcsövek szerepe: az éghez való hozzáférés anyagi kérdés
 - 20. sz.: a leíró ismeretek nagy része monopóliumokban termelődik
- a helyszín optimalizálása (klíma, magasság) kezd komoly szerepet játszani (pl. Lick Observatory, 1876: 1280 m-en)
- főleg állami támogatás, bár vannak gazdag amatőrök (pl. Lick) + egyetemek

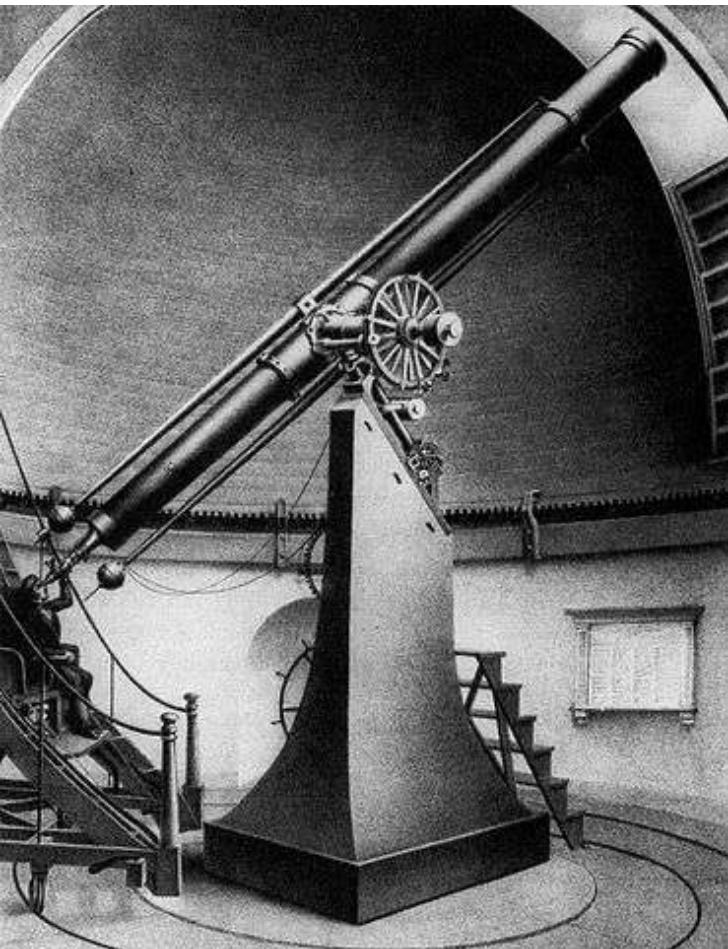


Sydney, 1872

Harvard College Observatory (1839)

- fontos igazgatók: Edward Pickering (1877-1919), Harlow Shapley (1921-52)
- rengeteg támogatás magánszemélyektől
- az összes, onnan látható szabadszemes csillag fényesség-mérése (1884)
+ később bázis Peruban is → minden csillag
- csillagok spektroszkópiai felmérése
- 1920-as évektől: változók és főleg gömbhalmazok változóinak mérése
- 1933: 1,5 m-es tükrös
- rengeteg számítás kell a spektroszkópiához
→ „női komputerek”
→ rengeteg kitűnő női csillagász kezdi itt a pályafutását





Az obszervatórium főműszere



A női komputerek: Pickering „háreme” 1891 körül

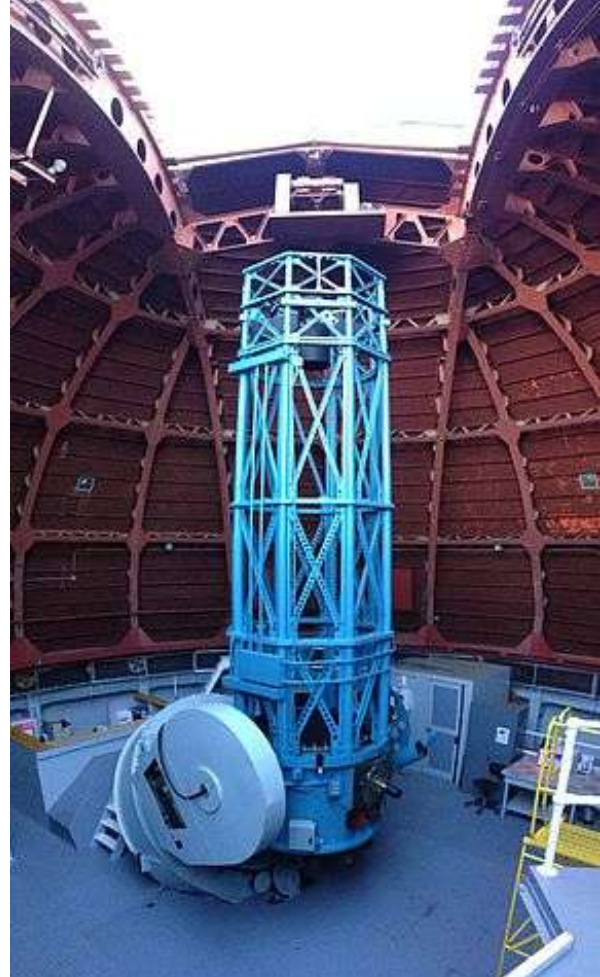
- Pl. Williamina Fleming, Annie Jump Cannon, Henrietta Swan Leavitt, Antonia Maury
- Nekik köszönhető az első Henry Draper katalógus (1890): > 10 000 csillag spektrumklasszifikációja

Mount Wilson (1904)

- George Ellery Hale alapítja
- napmegfigyelő intézetnek indul
 - toronytávcsövek, pl. 150 láb (45 m)
- 1908: 60 hüvelykes (1,5 m) távcső
 - a világon a legjobb
 - 4 különböző szerelés:
 - Newtoni, kétféle Cassegrain, Coudé

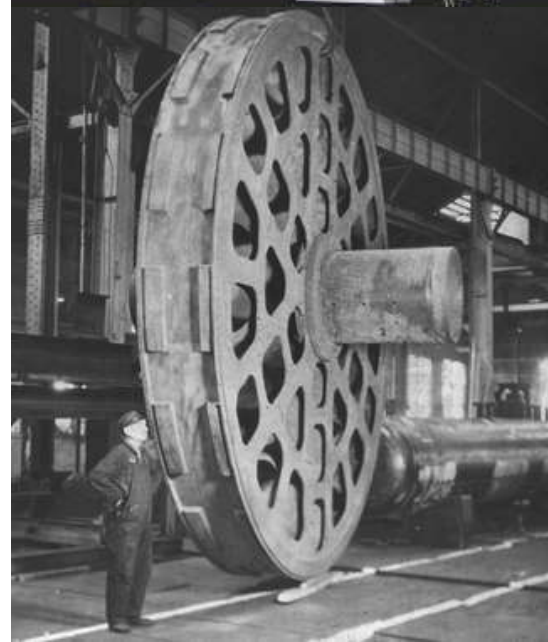


- 1917: 100" (2,5 m): Hooker-távcső
 - 1906: megrendelik az üvegpogácsát Párizsból
 - 1908: megérkezik ↔ nem túl jó minőségű
 - 1910-14: szférikusra csiszolják
 - 1914-16: parabolikusra csiszolják...
- ezeknek köszönhetően ez a világ vezető obszervatóriuma 1948-ig (Palomar): távoli csillagok, csillagködök, a világegyetem szerkezete...
 - 60": spektroszkopikus parallaxis módszere; cepheidák gömbhalmazokban (→ Tejút mérete), IR-ben a Tejút kp-ja, stb.
 - 100": a spirálködök nem a Tejút részei (Hubble), becslés a Hubble-állandóra, I. és II. populációs csillagok az Androméda-galaxisban (Baade), első csillagátmérő-mérés, első bizonyítékok a csillagok és a mágneses tér kapcsolatára
- később a LA-i szmog és fényszennyezés miatt súlytalanná válik (1985: a Hookert leszerelik)



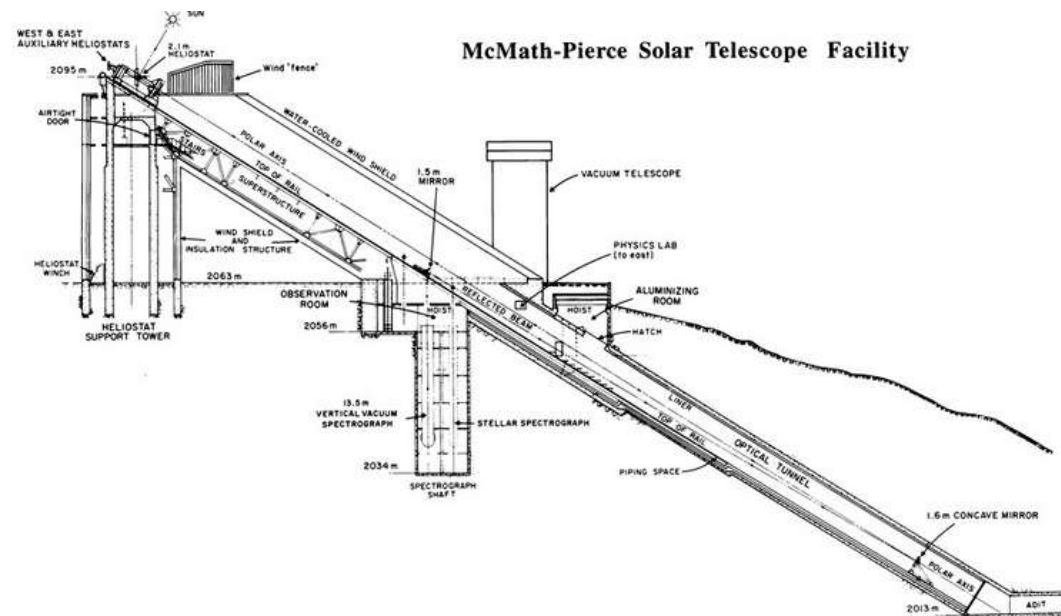
Palomar Mountain (1948)

- ezt is Hale tervezi → alapítványoktól 6 millió dollár egy 200" (5 m) tükörré
- 1943: Palomar-hegy mint helyszín (korábban is felmerült, akkor a logisztika döntött a Wilson-hegy mellett; most a fényszennyezés volt a fő szempont)
- tükör: 1928-tól kezdik (próbák különböző üvegekkel), 1934-ben készíti el a második gyártó
 - 65 tonna Pyrex 1575 fokra hevítve → 1 évig hűl → csiszolás után 15 t
 - 1936: vonaton átszállítják az országon (2 hét)
 - csiszolás: 1936-47
- a 20. sz. második felének fő csillagászati műszere
 - kétszerese a második legnagyobbnak
 - alumínium-gőzölés
 - kis hőtágulású üveg, stb.



Kitt Peak (1958)

- terv, 1953: legyen egy nagy az USA-ban, ahonnan akkor is lehet észlelni, ha Kaliforniában rossz az időjárás
- távcsövek:
- 1958: 16" (40 cm) → 1961: 36" (90 cm) → 1964: 84" (2,1 m) → 1973: **160" (4 m)**
- 1962: a világ legnagyobb naptávcsöve (*McMath Pierce*):
 - 63 h (1,6 m) főtükör egy 180 m mélyen egy É felé mutató aknában
 - 85 cm-es Nap-képet vetít: egy granula 0,4 mm
 - 20 m-es spektrum



MMT – Multi-Mirror Telescope (1979)

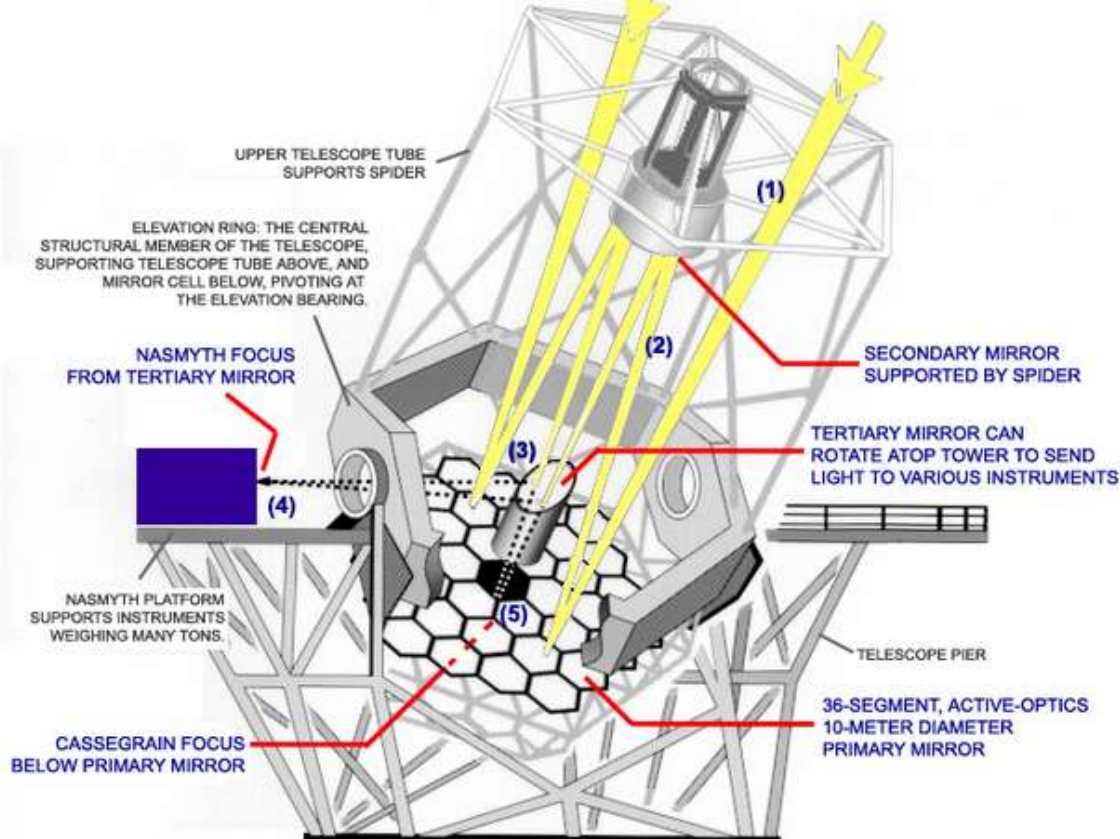
- Arizona: 6 db 70" (1,8 m) tükör → fényerőben egy 170" (4,4 m) tükörnek felel meg
- az első **aktív optikás** távcső: percenként néhány korrekció a tükrök pozíciójában
 - a légköri zavarok csökkenthetők (a stabil tükröknél már ezért nincs értelme tovább növelni a méretet)
 - lézersugarak torzulása alapján korrigálják a képeket egymáshoz
- számítógép-vezérelt azimutális szerelés → egyszerűbb az ekvatoriálisnál



Mauna Kea (1968)

- a cunami (1960) által megroggyantott hawaii gazdaság fellendítésére
- helyszín: Gerard Kuiper, 1964: a hegy 4200 m → normál felhőszint felett
- 1977, Jerry Nelson: aktív optika nem több független tükörrel, hanem egy összefüggő tükörrendszerrel → 10 m-es tükör → 1993-ra készül el
 - hexagonláis rendszer, 36 tükörelem (1,8 m átmérő, 75 mm vastag)
 - 25 nm pontossággal mozgó darabok (a látható fény hullámhossza alatt)
 - ~100 millió dollár az egész (Keck-távcső: a pénz nagy részét a Keck Alapítvány állja)



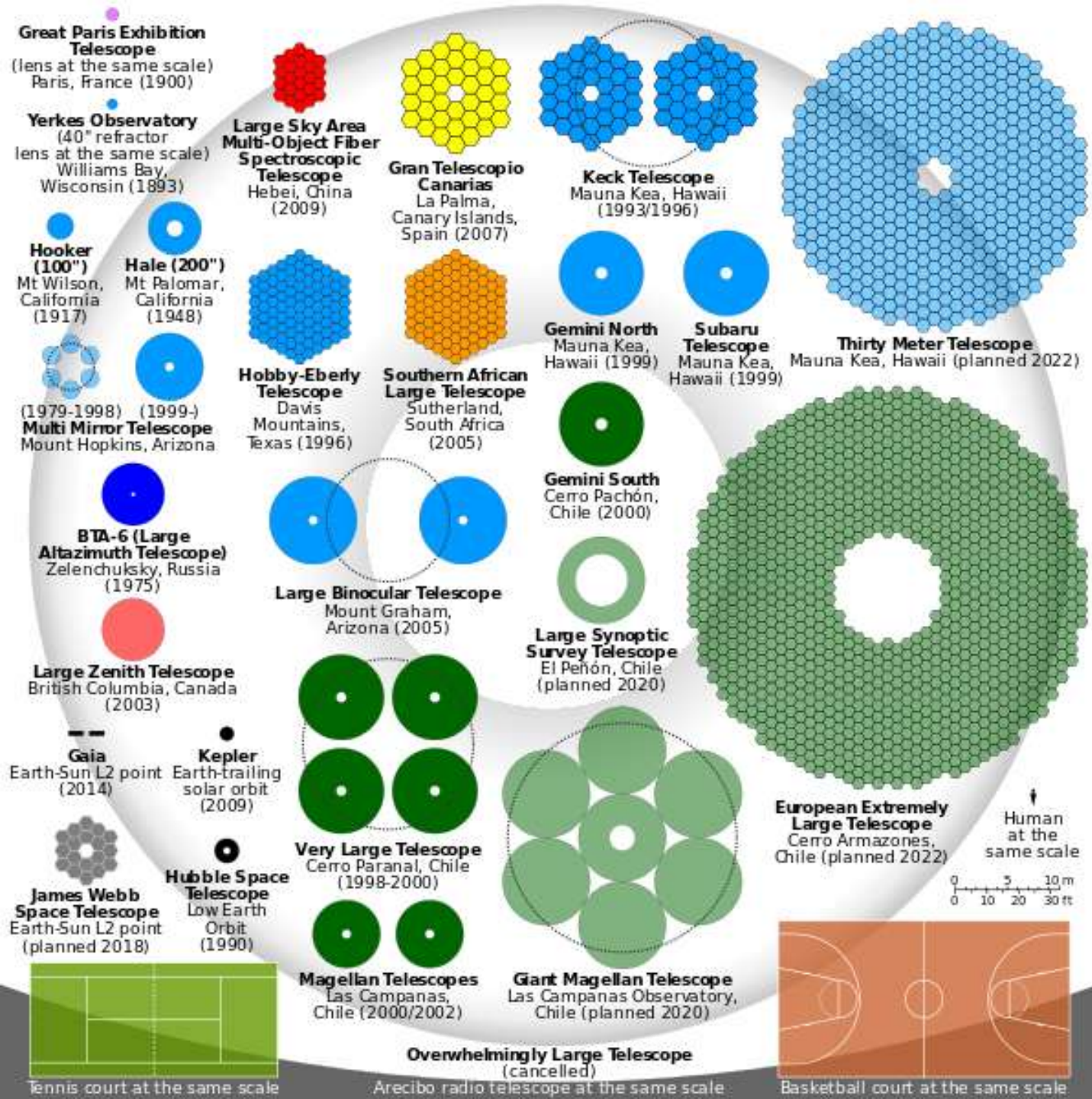


Egyéb távcsövek:

- Keck 2, 1996:
a Keck 1 párja
- Maxwell Telescope,
1984: 15 m-es tányér
(mm alatti észlelés)
- 3,6 m optikai (1979)
- 3,8 m IR (1979)
- Gemini, 2012:
egy 8 m optikai/IR, a
párja Chilében
→ teljes égbolt
- stb. stb.

A világ legnagyobb optikai távcsövei időrendben

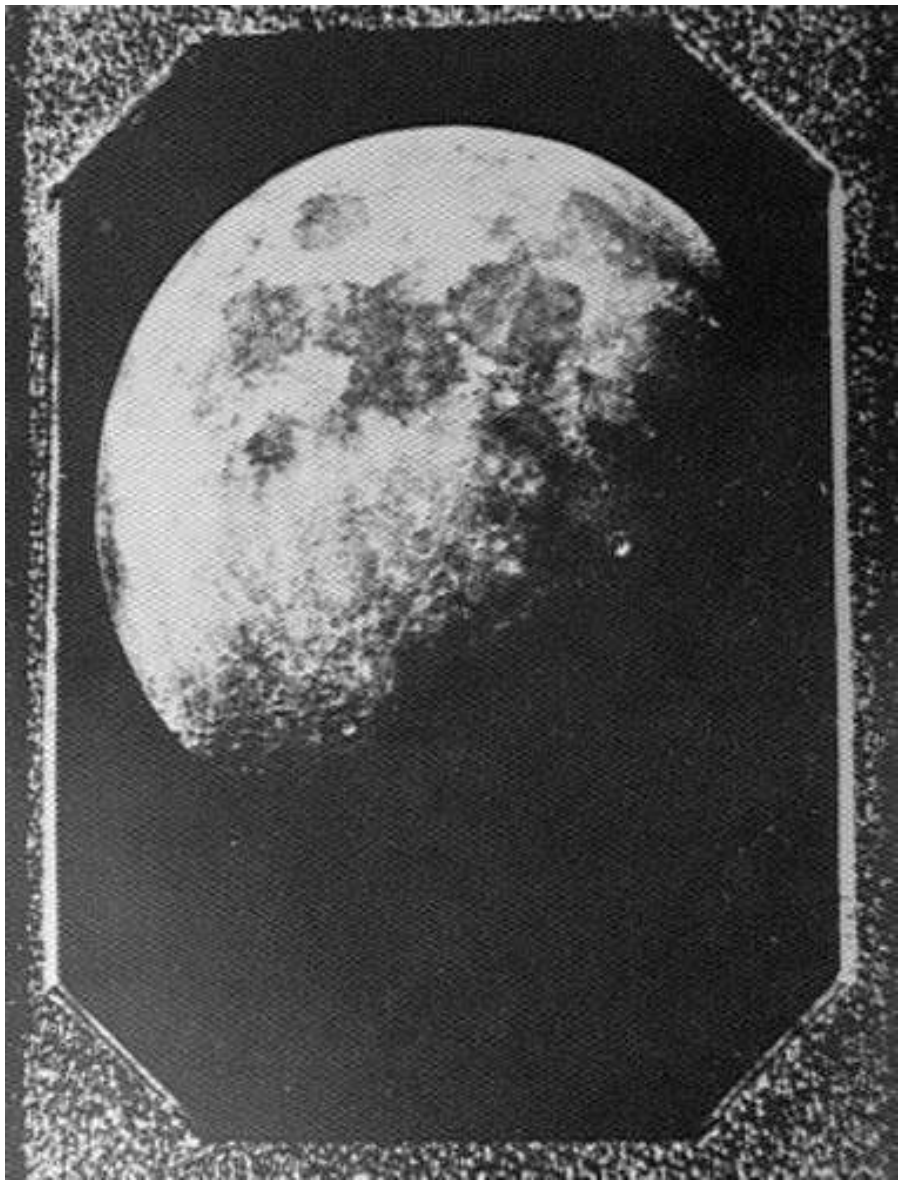
Name	Aperture		Type	Built by	Location	Year
	Meter	Inch				
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10.4 m	409'	Reflector - Segmented,36	Spain (90%), Mexico, USA	ORM, Canary Islands, Spain	2009
Keck 1	10 m	394'	Reflector - Segmented,36	USA	Mauna Kea Observatory, Hawaii	1993
BTA-6	6 m	238'	Reflector	Soviet Union	Zelenchukskaya, Caucasus	1976
Hale Telescope (200 inch)	5.08 m	200'	Reflector	USA	Palomar Observatory, California	1948
Hooker 100-Inch Telescope	2.54 m	100'	Reflector	USA	Mt. Wilson Observatory; California	1917
Leviathan of Parsonstown	1.83 m	72'	Reflector - metal mirror	William Parsons	Birr Castle; Ireland	1845
Herschel 40-foot (126 cm d.) ^[1]	1.26 m	49.5'	Reflector - metal mirror	William Herschel	Observatory House; England	1789–1815
Rev John Michell's Gregorian reflector ^[2]	75 cm	29.5'	Reflector - Gregorian	John Michell	Yorkshire, Great Britain	1780–1789
Father Noel's Gregorian reflector ^[2]	60 cm	23.5'	Reflector - Gregorian	Father Noel	Paris, France	1761
James Short's Gregorian reflector	50 cm	19.5"	Reflector - Gregorian	James Short	Scotland	1750
James Short's Gregorian reflector	38 cm	14'	Reflector - Gregorian	James Short	Scotland	1734
Christiaan Huygens 210 foot refractor	22 cm	8.5"	Refractor - Aerial telescope	Christiaan Huygens	Netherlands	1686
Christiaan Huygens 170 foot refractor	20 cm	8"	Refractor - Aerial telescope	Christiaan Huygens	Netherlands	1686
Christiaan Huygens 210 foot refractor	19 cm	7.5"	Refractor - Aerial telescope	Christiaan Huygens	Netherlands	1686
Hooke's reflector ^[3]	18 cm	7'	Reflector	Robert Hooke	Great Britain	16??
Hevelius refractor	12 cm	4.7'	Refractor	Johannes Hevelius	Gdańsk, Poland	1645
Hevelius Scheiner's helioscope	6 cm	2.3'	Refractor	Johannes Hevelius	Gdańsk, Poland	1638
Galileo's 1620 telescope	3.8 cm ^[4]	1.5'	Refractor	Galileo Galilei	Italy	1638
Galileo's 1612 telescope	2.6 cm ^[4]	1'	Refractor	Galileo Galilei	Italy	1612
Galileo's 1609 telescope	1.5 cm ^[4]	.62'	Refractor	Galileo Galilei	Italy	1609
Hans Lippershey's telescope	? cm	.?'	Refractor	Hans Lippershey	Middelburg, the Netherlands	1608



Néhány nagyobb optikai tükör (és lencse) mérete

Az asztrofotózás kezdeti korszakai

- első asztrofotók: 1840-es évek: **dagerrotípia** (1839, Joseph Nicéphore Niépce és Louis Daguerre) → piszkos munka: jód- és brómgőz, 75°-os Hg) + nem másolhatók a képek + elég kicsi fényérzékenység (→ főleg Nap, Hold)
- 1851, Frederick Scott-Archer (UK): **nedves kolloid** technika: üvegre fotóz, fényérzékenyebb, de max. 15 perc expozíció (utána megszárad) → ezzel lehet csillagfényességet mérni (G. P. Bond): a látszó méret a fényességtől függ
 - Warren De La Rue: fotoheliográf: Nap fotózására gyors záridős gép → 1858-72: ezzel napi szinten fotózza a napfoltokat → 1860, napfogyatkozás: a protuberanciák a Nap (és nem a Hold) része
 - 1863, Rutherford távcsöve: nem az optikai tartományban pontos, hanem a fotográfiaiban → 9 mag. csillagokat 3 perces expozícióval tud fotózni
 - (közjáték: 1871: Vénusz-átvonulás ↔ az eredmény csalódás: nem elég éles a Nap széle → sokan komolytalannak tartják a fotózást ekkor még)



Petzvál József dagerrotípiája a Holdról (1851)



napfoltok, Warren de la Rue, 1861

- 1871: megjelennek a száraz **fotólemezek** → sokkal fényérzékenyebbek, jóval kényelmesebb → ködök, halvány objektumok is fotózhatók
 - 1880-as évek: üstökös-fotók (Jules Janssen (Fr.), Henry Draper (USA))
→ olyan hosszú expozíció még így is, hogy speciális távcsőmozgás kell: az üstököst kövesse, ne a kicsit máshogy mozgó csillagokat
 - 1883: az első díjnyertes köd-fotó (A.A. Common) → jóval gyorsabb (1 óra) és pontosabb, mint az addig szokásos rajzok
 - 1885-1900, David Gill (Dél-Afrika): a D-i ég fotografikus csillagtérképe
→ J. C. Kapteyn (holland) elemzi a fotókat
 - 454 875 csillag pozíciója és fényessége
 - 1887, Párizs: első Asztrografikai Kongresszus
 - cél: az első fotografikus feltérképezés (14 mag-ig) és csillagkatalógus (11 mag-ig) az egész égboltról (*Carte du Ciel*)
 - 18 részre osztott ég, mindegyikért egy csillagvizsgáló felel, és ugyanolyan távcsővel (35 cm refraktor) fotóz
 - 1891, Hale: spektroheliográf: a Nap fénye egy adott hullámhosszon lefotózható (a fotólemez megfelelő mozgatásával a spektroszkópban)

Az asztrofotózás diadala

- 1863, Lewis Rutherford (USA): az első, fotózásra optimalizált távcső
- 1886: Paul és Prosper Henry (Párizs): fantasztikus felvétel a Fiasztúkról kis (35 cm) távcsővel
- elterjed az ekvatoriális szerelés és az óragép: hosszú expozíciók
- eleinte egyre nagyobb lencséket építenek erre a célra(pl. 1893, Meudon:
33 + 24" (85 + 60 cm)
→ máig a legnagyobb kettős refraktor

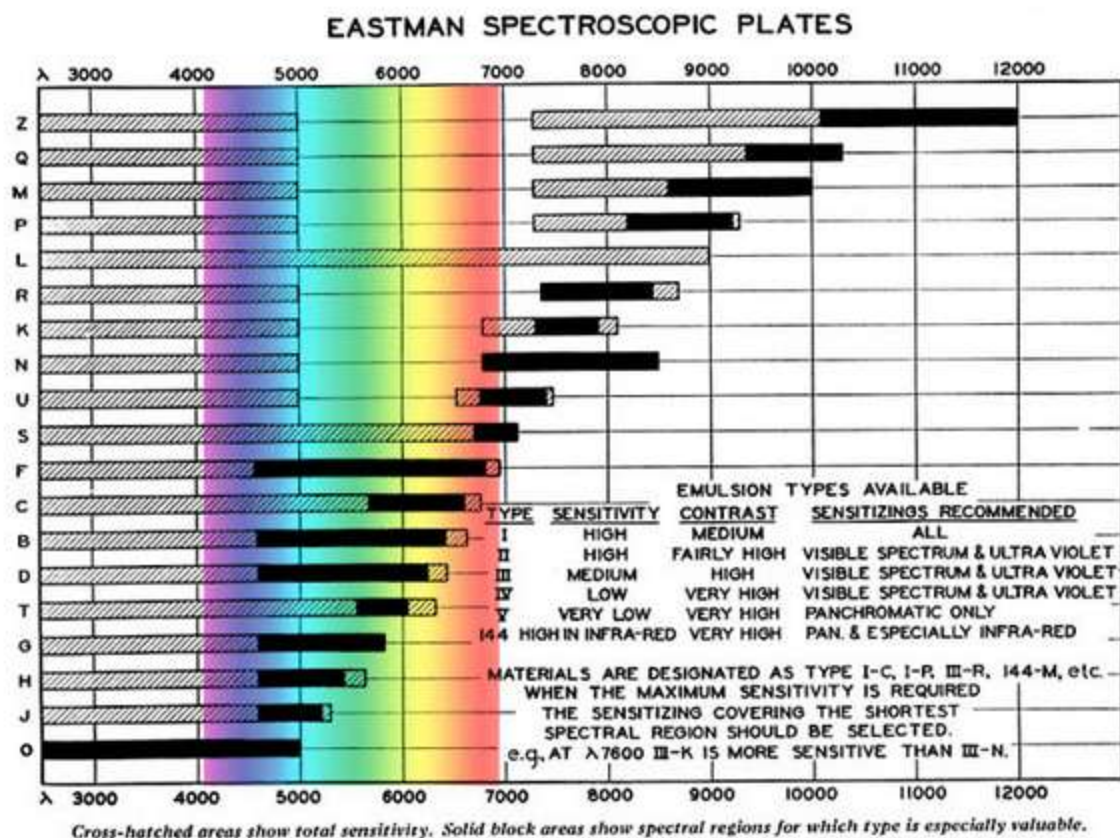
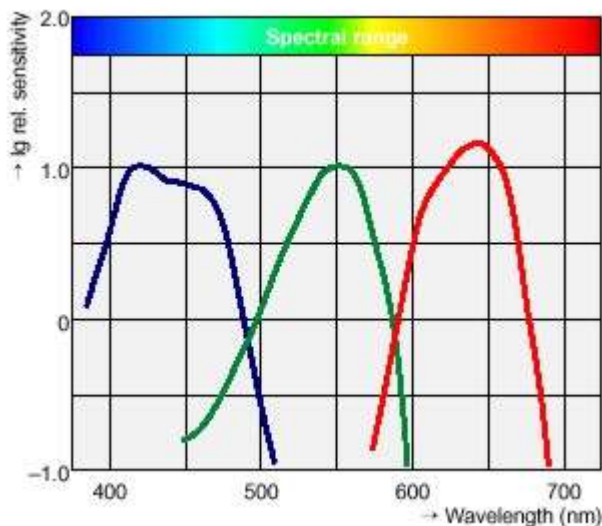
„bár néhány részlet elveszik a nagyítás során, elegendő marad ahhoz, hogy megmutassa: egy olyan kor felé közeledünk, amikor a fotográfia megadja azt az eszközt, amivel maga egyedülálló módján rögzíthetjük egy köd alakját és részeinek relatív fényességét, még hozzá jobban, mint amire a legkifinomultabb kézi rajz képes.”
(Andrew Ainslie Common)



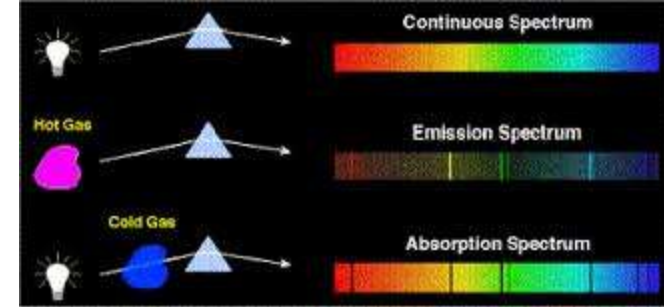
Emulziók spektrális érzékenysége

- 1890: még mindig nem teljesen világos, hogyan függ össze a csillag képe az intenzitással
 - egyik lehetőség: a mérettel arányos (Bond) \leftrightarrow nehéz mérni: hol a széle?
 - vagy a kép sűrűsége: Bunsen-Roscoe törvény: a képsűrűség egyenesen arányos az érkező fény mennyiségével és az expozíciós idővel: $I \times t$ (amíg az emulzió nem telítődik) \rightarrow 1 mag-val halványabb csillag 2,512-szer annyi ideig exponálva ugyanakkora képet ad
 - 1896: a *Carte du Ciel* program úgy határoz, egyik módszer sem elég megbízható \rightarrow az egyes csillagvizsgálókra bízta a kérdést
- Karl Schwarzschild (Bécs), 1899: ha a fotólemezeket kicsit kiveszik a fókuszsíkból, minden csillag képe egyforma nagy, de különböző sűrűségű lesz \rightarrow ez mikrofotométerrel mérhető
 - a B-R törvény nem érvényes kis intenzitás esetén: $I \times t^P$ a helyes, ahol P az emulziótól függ (kb. $0,6 < P < 1$)

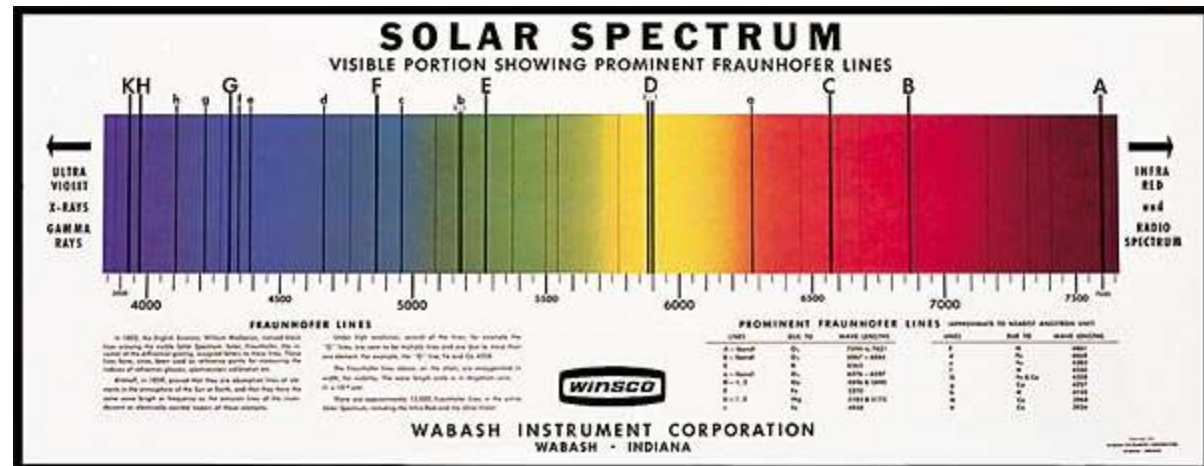
- különböző hullámhosszakra különböző emulziók érzékenyek
 első lemezek: kék (480 nm) → zöldrészékeny: 1884 → színhelyes (látáshoz hasonló színű, pánkromatikus): 1904 → infravörös: 1919 (820 nm) → még infravörösebb: 1934 (1350 nm)
 - az első fototávcsövek kékre voltak optimalizálva, később a távcsövek optimalizációját a célobjektumok (célfunkciók) által diktált tartományra végzik



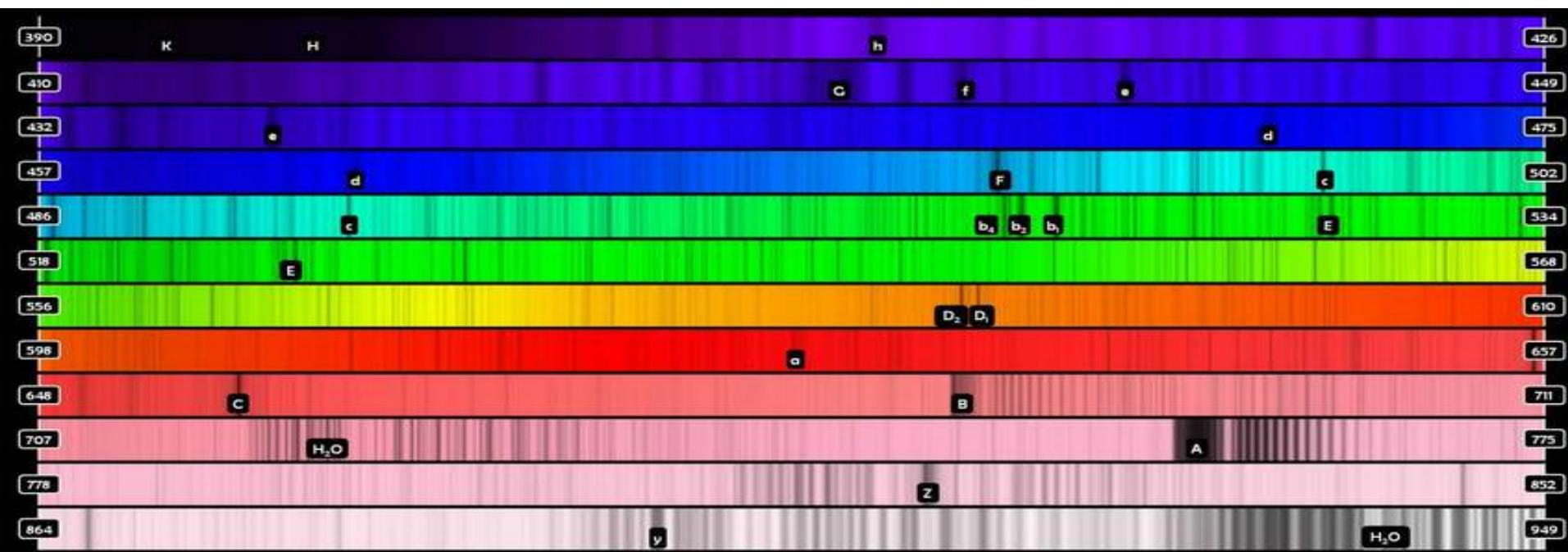
A spektroszkópia kezdetei



- Joseph Fraunhofer (München):
 - különböző üvegek törésmutatóját vizsgálja (akromatikus lencsék miatt)
 - láng mint fényforrás: fényes vonalak a spektrumban
 - Nap mint fényforrás: sötét vonalak → ezzel sokkal pontosabban mérhet törésmutatókat
 - 1814-től a spektroszkópia lehetőségeit vizsgálja: mik a sötét vonalak? (távcsővel, prizma helyett diffrakciós ráccsal)
 - a vonalakat A-tól H-ig osztályozza
- 1849, Léon Foucault: a D (kettős) abszorpciós vonal a Nap spektrumában megegyezik egy laboratóriumi ívfény emissziós vonalával



- 1859, Gustav Kirchhoff és Robert Bunsen, Heidelberg:
 - minden gáznemű elem rá jellemző fényes vonalakat mutat; míg a folyadékok és szilárd anyagok spektruma folytonos
 - ha a folytonos spektrumú fény hideg gázon halad át, elnyeli annak fényét bizonyos hullámhosszakon
 - ha ugyanez a fény forró gázon halad át, akkor ugyanezek a vonalak fényesen fognak megjelenni
 - Kirchhoff, 1859-62: több ezer Fraunhofer-vonalat kimér a Nap spektrumában, és azonosítja forró gázok emissziós vonalaival



A spektroszkópia fejlődése

- 1868, Anders Jonas Ångström: diff. rácsot használ (Kirchhoff prizrát)
→ ez lineáris hullámhossz-skálát eredményez (→ egység: 10^{-10} m)
- 1863, Angelo Secchi: csillagok spektrális osztályozása (lásd később)
+ William Huggins: azonosít egy csomó vonalat a csillagokban → ugyanazon elemekből épülnek fel, mint a Föld vagy a Nap
- később: mindenféle technikai újítások (prizmák vagy rácsok anyaga, objektív és prizma sorrendje, stb.)
 - Edward Pickering, 1890: több mint 10 000 csillag spektruma (egyszerre többet tud fotózni: prizma az objektív elé) → mennyiségi forradalom
 - Henry Rowland, 1882: konkáv rács → sokkal jobb felbontás → minőségi forradalom (1888: 20 000 vonalat fotóz a Nap spektrumában)
- 1900 körül: nagy refraktoros spektrográfok (Meudon: 62 cm, Potsdam: 80 cm)
↔ lencsés szerelések: a fény kb. 1%-a hasznos fotografikus tartományban:
 - fényelnyelés, tükröződés, szórás a távcső és a spektrográf optikájában
 - nincs teljes akromatikusság (csak két tartományra lehet élesíteni)
 - nagyon keskeny rések: így lehet éles vonalakat előállítani
- lassan átveszik az uralmat a nagy reflektorok (rácsokat kell fejleszteni)

A spektroszkópia elmélete

- 1885, Johann Balmer (Svájc): a hidrogén 4 látható vonalának hullámhossza:

$$\lambda = 364.56 \times \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ nanometres} \quad (n = 3, 4, 5 \text{ vagy } 6)$$

→ a később felfedezett vonalakra is stimmel

- 1890, Johannes Rydberg (svéd): pontosabb formula, kicsit bonyolultabb
↔ mi produkálja ezeket??? mi a fizikája?
- hogy néz ki az atom?
 - 1900, Max Planck: energia-hőmérséklet-hullámhossz összefüggés ideális feketetestre: az energia diszkrét egységekben nyilvánul meg
 - 1911, Ernest Rutherford: atommodell – pozitívan töltött atommag + negatívan töltött keringő elektronok
 - 1913, Niels Bohr: az elektronok csak konkrét energiaértékeket képviselhetnek, ezek között diszkrét az átmenet → az ilyenkor kibocsátott/elnyelt energia az állapotok energiakülönbségével azonos, és ez arányos a hullámhosszal
 - ebből már levezethetők Balmer és Rydberg formulái

A Nap korai spektroszkópiája

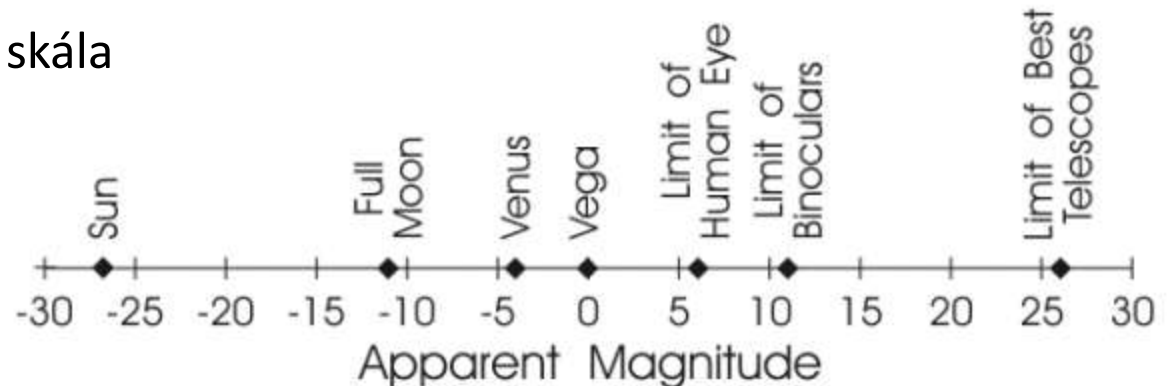
- 1866, Norman Lockyer (UK): a napfoltokból jövő fény vonalai szélesebbek
→ mozgásban van az anyag
- 1868, Jules Janssen, napfogyatkozás: protuberancia spektruma → forró H-gáz
+ a fogyatkozás vége után is látható marad → nappal észlelhető
- 1868, Lockyer: elnevezi a sárga vonalért felelős ismeretlen elemet *hélium*nak
↔ még évtizedekkel később is vitatott (1895-ig: ekkor megtalálják a Földön is)
- 1870, napfogyatkozás: totalitáskor egy-két másodpercig nem abszorpciós,
hanem fényes emissziós vonalak láthatók, ugyanazokon a helyeken
→ hűvösebb réteg a felszín felett („megfordító réteg”)
- 1890-re a legtöbb vonalat kimérik → Σ 34 elem
(Henry Rowland, 1896: 20 000 vonalat katalogizál)
- 1920-as évek: főleg H és He alkotja
→ 1938, Hans Bethe és Carl von Weizsäcker:
standard napmodell...



A magnitúdó-skála a fotometria előtt

- Hipparkhosz, i.e. 2. sz.: 1.től 6-ig skála „ránézésre”
 - a 19. sz. elején még mindig kb. itt tartanak \leftrightarrow ki kell terjeszteni a halványabb (csak távcsöves csillagokra): mi alapján?
 - 1862, F. W. A. Argelander: 300 000 csillag szemmel becsült fényessége
- Mérési kísérletek:
 - Herschel: kell a fényesség mérése a térbeli eloszlási becslésére
 - \rightarrow 2 egyforma távcsővel 2 különböző csillag, és az egyiket addig sötétíti, míg egyformának látszanak (\rightarrow tört magnitúdók)
 - 1834, John Herschel, „asztrométer”: a Hold fényét egy pontba gyűjti
 - \rightarrow ehhez méri a csillag fényét \leftrightarrow nem következetes eredmények: rosszul számítja a Hold fényességváltozását (egyenletes felületnek veszi)
 - Karl Steinheil (német), fotométer hasonló módszer: két csillag fényét egymás mellé vetíti (nem fókuszával), azokat hasonlítja össze
 - 1861, J.K.F. Zöllner (Lipcse): a csillagokat egy mesterséges csillaghoz (világító lyuk) méri, az intenzitást polarizáló prizmákkal variálja
 - \rightarrow albedó-mérések, fényesség (pl. Napé 620 000-szerese a teliholdénak)

- 1879, Pickering: valódi csillaghoz kell mérni, a műcsillag nem élethű
 - átépít egy meridiánműszert (Harvard Meridián Fotométer): egyszerre figyeli a célcsillagot és a Sarkcsillagot
 - 1884, Harvard Fotometrikus Katalógus: 4260 csillag intenzitása
 - ↔ 1911, Herzprung: a Sarkcsillag változó (többtized mag.) → hibák
- Az elméleti háttér:
 - Karl Steinheil , Theodore Fechner: a szem logaritmikusan érzékeli az intenzitás-különbségeket
 - egy mag. különbség kb. 2,2-2,8-szoros intenzitás-különbséget jelent
 - 1856, Norman Pogson (UK): legyen a szám 2,512: 5 mag. különbség éppen 100-szoros intenzitás
 - ehhez módosítani kell néhány fényes csillag adatát: 1 mag. alá menni (pl. Szíriusz: -1,46)
 - ez lesz a standard skála



A bolygók fotometriája

- 19. sz. vége: Gustav Müller, Paul Kempf (Potsdam): bolygók albedója és fázisegyütthatója (fényességváltozás beesési szög függvényében)

		<u>Albedo</u>	<u>Phase coefficient</u>
– magasabb albedó: fényesebb felszín	Moon	0.17	0.025
	Mercury	0.07	0.037
– magasabb fázisegyüttható: durvább felszín	Venus	0.59	0.013
	Jupiter	0.56	0.015

- (a Vénusz és a Jupiter feltehetőleg felhős, a Merkúr Hold-szerű)
 - (Szaturnusz: gyűrű nélkül mint Jupiter, gyűrűvel a f.e.h. 0,044 → szemcsés)
 - (1923, N. Barabashev: a Hold f.e.h-ja mindenütt kb. egyforma → a lapos síkok is töredezettek)
- 20. sz.: az űrkorszakig az egyik legfontosabb módszer a felületek vizsgálatában

A csillagok fotometriája

- 1890: a Pickering-féle felmérés 20 000 csillagra 9,5 mag-ig
- 1885-1905, Müller és Kempf (Potsdam): Zöllner-fotométerrel minden csillag 7,5 mag-ig: több mint 14 000 csillag; 0,07 mag. hibaátlag
- 20. sz. eleje, Joel Stebbins: küszöböljük ki az emberi szemet

→ szelén-detektor (a kristályos szelén fényre változtatja ellenállását)

→ 1910: az Algol másodlagos minimumát kiméri (0,06 mag. különbség)

+ kb. ugyanekkor, németek: fotoelektromos cellák (fényre elektron lép ki)

→ időben jóval stabilabbak

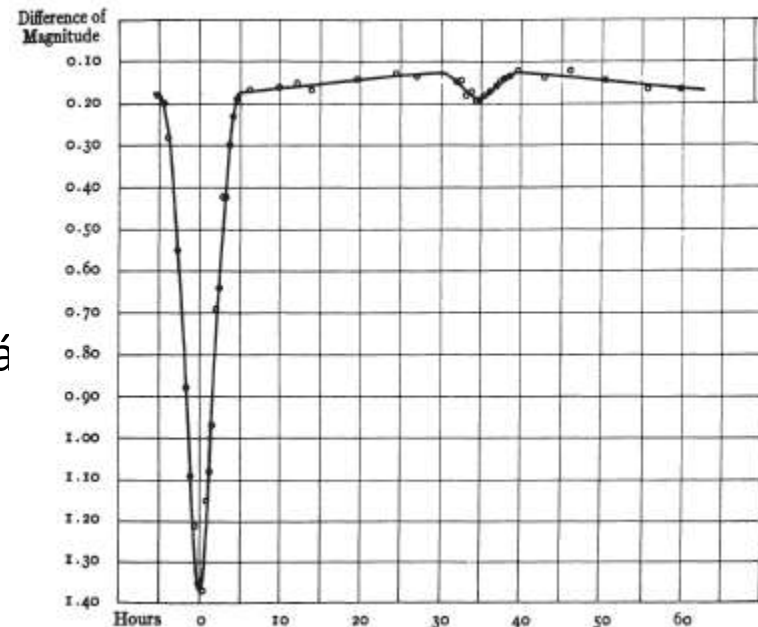
– 30-as évek: technikai újítások (erősítő az á anyagok)

→ 1937: 0,002 mag. pontosság

→ fedési kettősök fénygörbéje mérhető

→ 1960: egy 23 mag. csillag 0,005

pontossággal mérhető a palomari távcsővel (teljes éjszakás expozícióval)



A fotometria és a színek

- 1893, Wilhelm Wien: egy feketetest sugárzásának maximuma fordítottan arányos az abszolút hőmérsékletével → a csillagok színe a hőmérsékletükről árulkodik → mérni kell
 - első módszer: összevetni a csillag fényességét vizuálisan és fotografikusan
színindex: $CI = I_p - I_v$ (Schwarzschild, 1899)
→ ezt használja majd Ejnar Hertzsprung (1911)
 - 20. sz. eleje: a sugárzási görbe egészét próbálják figyelni: először vizuálisan, aztán fotocellával
 - 1953, Harold Johnson és W. W. Morgan: UBV-rendszer: ultraibolya, kék és látható mérése, rendszeren standardizálva
- 1910, *International Solar Union* (Schwarzschild): a fényességet színekre is normálni kell → fehér csillagok vizuális és fotografikus magnitúdója azonos 5,5 és 6,5 mag. között
 - a gyakorlatban standard csillagokhoz hasonlítással megy a besorolás (pl. Északi Pólusi Sorozat: Edward Pickering, 1912: 96 csillag a pólus körül, 4-től 21 mag-ig → később erre épülő, egyre pontosabb standardok)

Radiometria

- 19. század: durva eszközök → kb. a Hold hőmérsékletét lehet becsülni
- 1869-72: a Hold sugárzása részletesen: 700 nm alatti hullámhosszú fényt veri vissza, és 1 μ m fölött hősugároz
 - nappali és éjjeli hőm. közti különbség kb. 300 K, igen gyorsan változik
 - a Nap hőmérséklete nem becsülhető: nem ismertek ilyen magas hőm. viszonyok

- 20. sz. eleje: érzékeny detektorok (pl. hőelektromos)

→ a bolygók ismert hőmérsékletei
1927-ben:

	<u>Maximum (K)</u>	<u>Minimum (K)</u>
Mercury	670	
Venus	330	250
Moon	340	100
Mars	280	170
Jupiter	140	
Saturn	120	
Uranus	70	

- 1960-as évek: üreges radiométerek – hőegyensúlyban tartott fekete üreg: a bemenő sugárzás meghatározható (a kilépő sugárzás és a hőegyensúlyt fenntartó energiabefektetés különbsége)

Polarimetria

- 1924, Barnard Lyot (Meudon): forradalmian pontos polarizáció-mérések
→ a visszavert fény polarizációjának változása a beesési szög függvényében:
0,2% pontos
 - Hold, Merkúr: vulkáni hamu; Vénusz: már a felhők felett visszaverődik;
Mars: homokos felszín (időnként porviharral)
- 1943, Yngve Öhman (svéd): a Hold felszínének különböző részei (komoly technikai újításokkal)

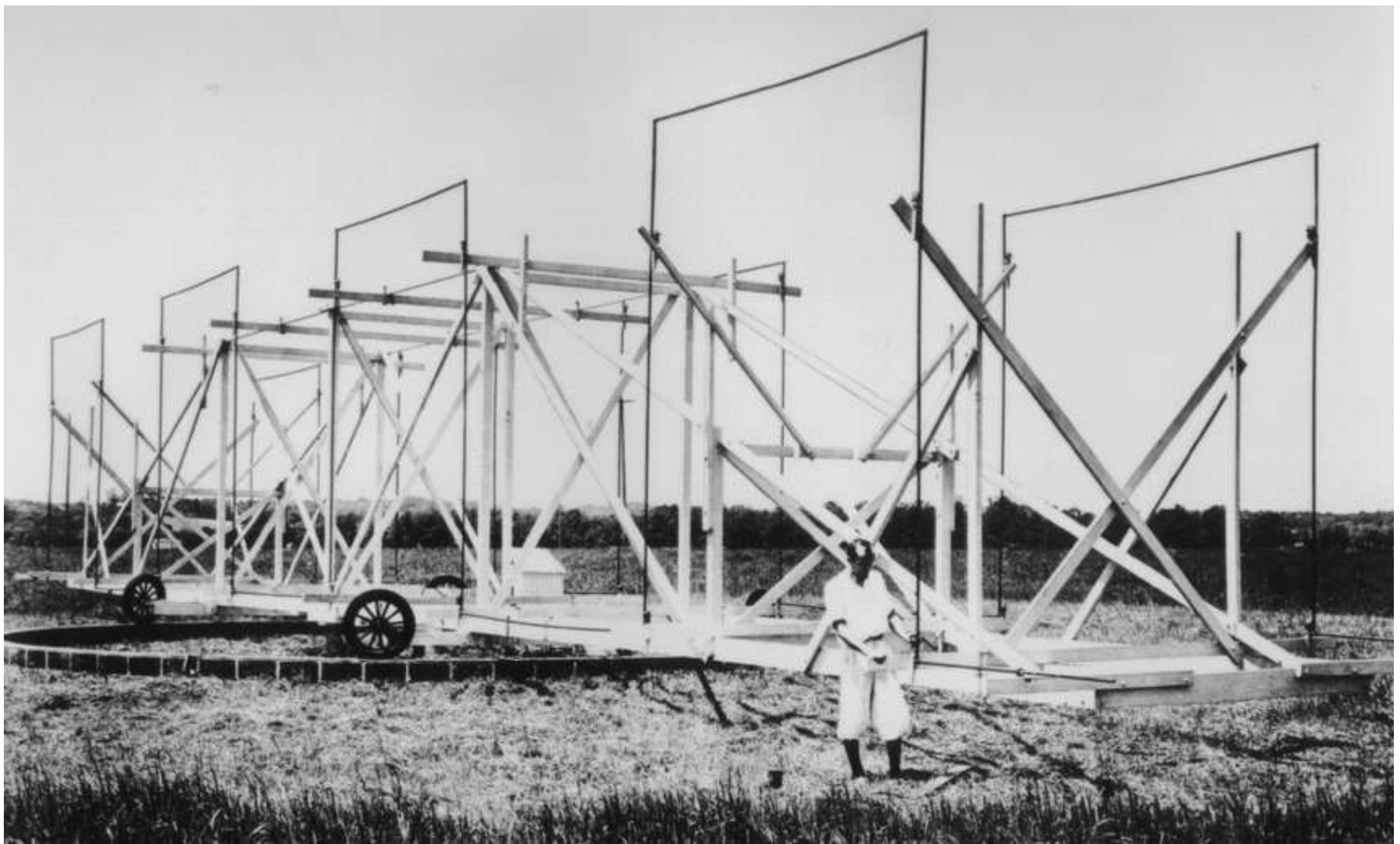
Michelson-interferométer

- 1868, Armand Fizeau: kvázi-pontszerű égitestek átmérője: interferencia-helyek figyelése a fókusz síkban két apertúra lassú mozgása közben
- 1881, Albert A. Michelson: a Jupiter legnagyobb holdjainak átmérője
- 1920: Michelson készít egy interferométert a 100"-es Wilson-hegyi távcsőhöz
→ első sikeresen kimért csillag: Betelgeuse: 0,047" átmérő

A rádiócsillagászat úttörői

- 1932, Karl Jansky: 20,5 MHz-en ($\lambda = 14,5$ m) nézi az égbolt zaját: iránya van
 - nem a Napból jön, mert 23h 56m-es periódus: sziderikus nap
 - emiatt szerinte nem is lehet csillag eredetű: más mechanizmus
 - 1 év elemzés: a forrás a Tejútban: *vagy* a kp, *vagy* amerre a Nap mozog

↔ a kortársak teljesen figyelmen kívül hagyják: komolytalan eszközök
- Grote Reber (a kivétel): próbálja ezt detektálni magasabb frekvencián is:
 - 3300 MHz, 910 MHz: semmi → nem feketetest-sugárzás
 - 1938: 160 MHz-en ($\lambda = 1,9$ m) van effektus, és 480 MHz-en is
 - kirajzolódik a Tejút szerkezete, fényes központi maggal, de nem felel meg a fényes csillagok v. spirálködök eloszlásának
 - szerinte: elektronok fékezési sugárzása okozza
 - 1950, Karl Kiepenheuer (német): ez a galaxis mágneses terében spirálózó elektronok szinkrotron-sugárzása
 - többség (pl. Oort): optikailag halvány, itt fényes csillagok

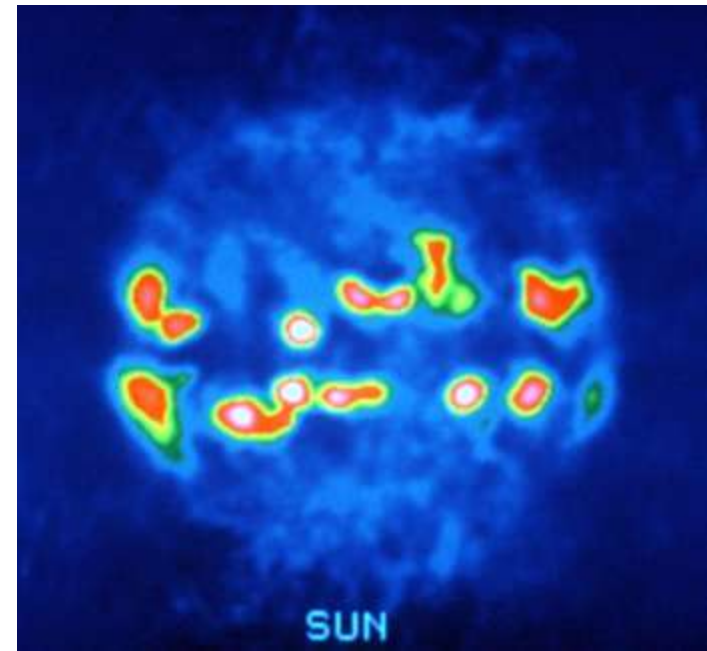


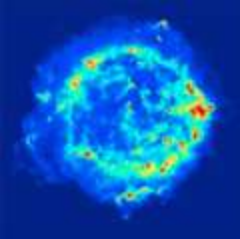
Jansky ezzel a „körhintával” detektálta az égbolt rádiózajait egy éven át:

- 1) közeli viharok zaja
- 2) távoli viharok zaja
- 3) ismeretlen eredetű halk, állandó sistergés

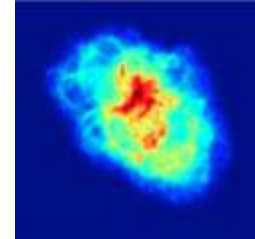
A Nap rádiósugárzása

- már Thomas Edison próbálta kimérni (1890), de csak a 2. VH-ban sikerül:
- 1942: a németek blokkolják az angol légvédelmi radarokat (zavaró sugárzás)
→ ezt vizsgálva találnak egy 4,2 m-es sugárzást, amit hajnali támadásnak vélnek K-ről, pedig csak a Nap feltettét jelzi
 - ráadásul ez az aktivitás egybeesik egy nagyobb napkitörés és egy nagy napfolt megjelenésével
- 1945-től, ausztrálok: módszeres mérések:
 - a Nap 1,5 m-es sugárzása korrelál a napfoltciklussal (napfolt-összterület)
 - a korona hőm-e millió K-es nagyságrendű (→ 1941-ben hasonló derül ki a korona spektrumából)
 - Michelson-típusú rádió-interferométerek: a kitörések nem az egész Napból, hanem speciális területekről jönnek



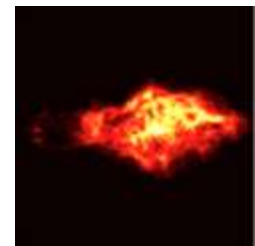
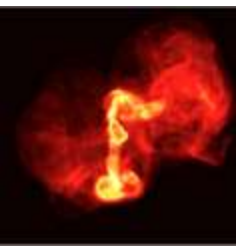


Egyéb rádióforrások



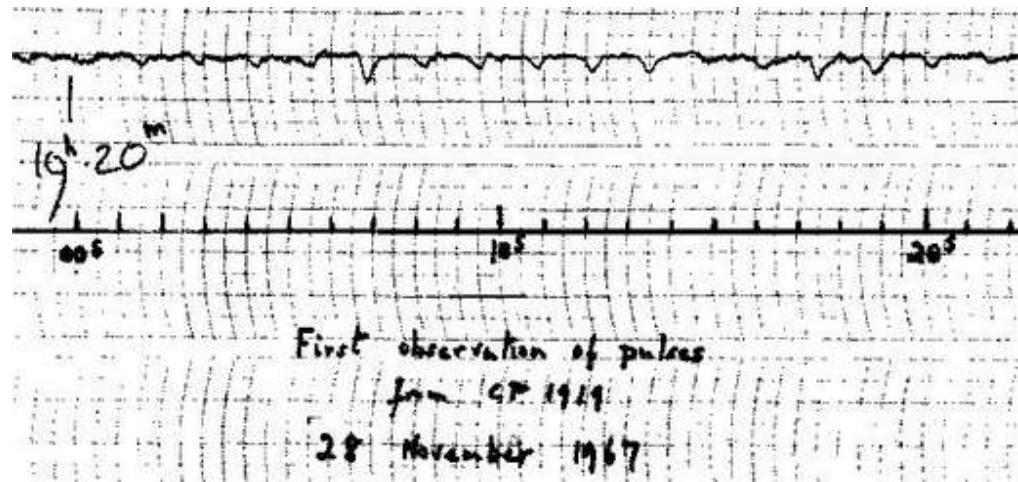
A háború után módszeresebb vizsgálatok más forrásokra →

- 1946, angolok: Cygnus A → pár mp-es periódussal fluktuál (↔ 1950: ezt a légkör ionoszférája okozza)
+ Cassiopeia A (újra)felfedezése
- ausztrálok: a Cygnus A igen kicsi (< 8')
+ újabb források: Taurus A, Centaurus A, Virgo A → 1° pontos mérések
 - Tau A azonosítható a Rák-köddel → 1054-es szupernóva maradványa
 - Cen A azonos az NGC 5128-as galaxissal
 - Vir A azonos az M87 elliptikus galaxissal
- 1950: feltérképezik az Androméda-galaxist, sugároz-e rádióban
→ halvány sugárzás 10-szer nagyobb területről, mint a galaxis optikai képe
- 1951: a palomari távcsővel keresik a forrásokat optikaiban → Cyg A: egy 16 mag. galaxis??? → későbbi mérések egyre inkább galaxisokhoz kötik őket
 - 1950, I. Cambridge-i katalógus: 50 É-i (+ 22 D-i) forrás
 - 1955, II. C.K.: 1936 forrás ↔ a többsége téves
 - 1962, III. C.K.: kb. 500 forrás



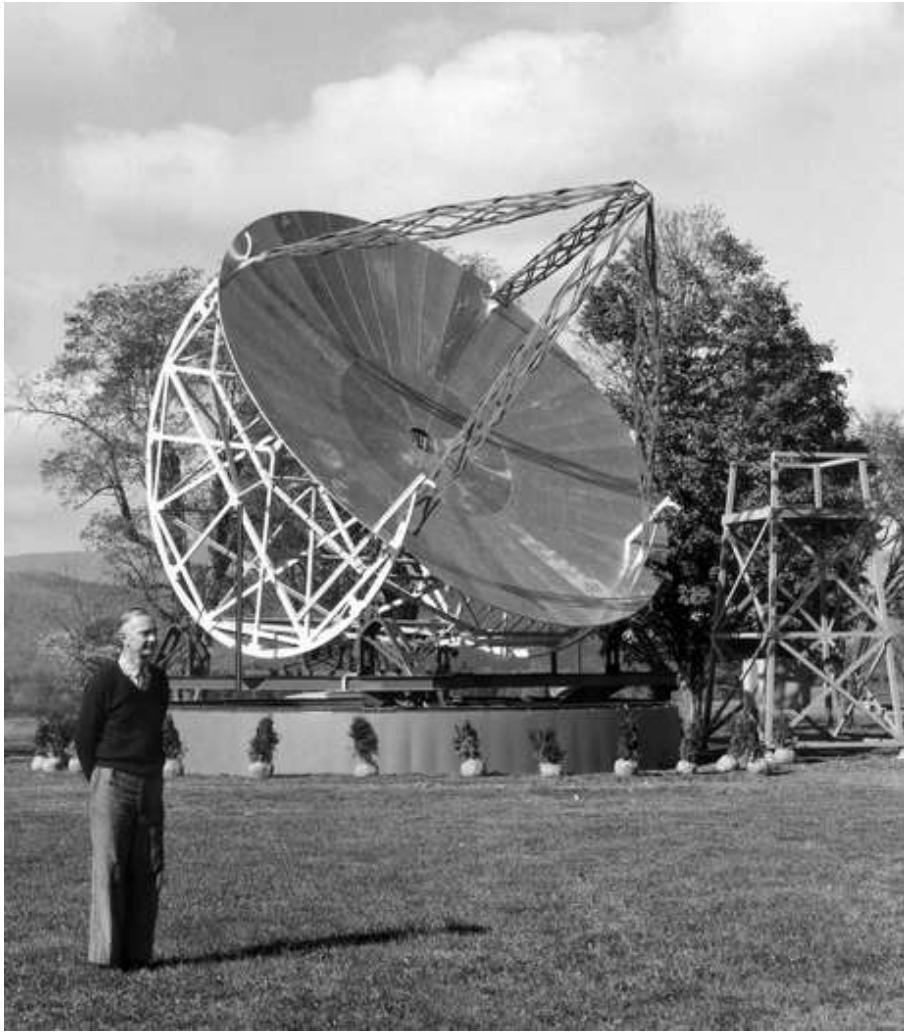
A rádiócsillagászat felnőttkora

- Az 50-es években válik a rádiócsillagászat a csillagászat rendes részévé: pontos mérések → optikailag azonosítható források → vizsgálható
- 21 cm-es vonal:
 - 1944, Jan Oort: milyen színeképvonallal térképezhető fel a Tejút?
 - H. C. Van de Hulst (holland): a H-gáz spinátmenete (proton és elektron párhuzamos/ellentétes spinje között) 21 cm-es sugárzást generál
 - 1951: több helytől detektálják
- 1956, Arno Penzias, Robert Wilson: mikrohullámú háttérsugárzás → az Ősrobbanás maradványa
- 1950-es évek vége: kvazárok (szó: 1964) → rejtvény a szakmának
- 1967, Jocelyn Bell, Anthony Hewish: pulzárók („kis zöld emberkék”)
- stb...



Rádiótávcsövek kezdetben

- jóval nagyobb hullámhossz → nem kell olyan precíz eszköz, de nagy kell: rövidebb hullámhosszakrtányér, hosszabbakra elegendő a drótszerkezetek is
- 1932, Karl Jansky: 30 m hosszú, 20 perces periódussal forog (20,5 MHz)
- 1937, Grote Reber: 10 m-es parabolatányér (160-3300 MHz)
 - „tranzittávcső”: csak függőlegesen billenthető → D-re néz
- háború: erős fejlődés a területen → utána jelentős központok (Hollandia, Ausztrália, Anglia)
- 1957, Manchester: Jordell Bank 75 m-es forgatható
 - eredetileg m-es hullámhosszra tervezik, ezért dróthálós lemez
 - de közben felfedezik a 21 cm-es sugárzást → tömör tányér készül
 - egyik első dolga a Szputnyik 1 követése → komoly piaca lesz (+ hasonló: 1961, Ausztrália: Parkes-távcső (65 m))



Grote Reber a távcsöve előtt



a Jordell Bank

Korai interferométerek

A rádiótávcsövek felbontása rossz (fordítva arányos a hullámhosszal)

→ ötlet: több helyen észlelni, ezek képét interferáltatni

→ a felbontás a detektorok szeparációjától függ
(az érzékenység pedig a detektorok összfelületétől)

- ausztrálok, 1947: egy interferométerrel vetik össze a távcsőre eső sugárzást a tenger felszínéről visszaverődővel
- angolok: két, 300 m-re levő tányér jeleit vetik össze
- 1970, Hollandia (*Westerbork Synthesis Radio Telescope*):
12 db 8 m-es tányér 1,6 km hosszú vonal mentén felfűzve:



Tányérantennák

- 1954: *American National Radio Astronomy Observatory*
 - 1959: 25 m-es tányér ($\lambda > 2$ cm)
 - 1962: 91 m-es tranzittávcső ($\lambda > 20$ cm)
(1988: összeomlik)
 - 1965: 45 m-es forgatható tányér ($\lambda > 2$ cm)
 - 10 m-es milliméteres távcső → Kitt Peak hegyre: itt már számít a légkör
- 1963, Puerto Rico, Arecibo: 300 m-es fix tányér egy mélyedésben
(mert: a műholdak ionizációs nyomait tudja követni
↔ közben kiderül, hogy ehhez tizedekora is elég lett volna)
 - eleinte drótháló ($\lambda > 50$ cm), de a 70-es években 38 000 mozgatható elemből folytonos felszín (→ $\lambda > 6$ cm)
- 1968, Bonn: a világ legnagyobb forgatható tányérja: 100 m
→ az antenna képes követni a tányér torzulásait → $\lambda > 8$ mm



← A bonni rádiótávcső



↑ A 300 lábnyi NRAO távcső ↓



← Az Arecibo-i távcső

Nagy interferométerek



- 1974-81, Új-Mexikó: VLA, *Very Large Array*:
 - 27 db 25 m-es parabolatányér,
20 km hosszú sugarak mentén
Y alakban
→ ezzel egy 27 km széles tányér nagyítását lehet elérni
 - $22 \text{ cm} > \lambda > 1,3 \text{ cm}$
- 60-as évek: nagy szeparációjú detektorok
 - 1965, USA: 130 km távolságra → 0,02" felbontás 1,3 cm-es hullámhosszra
 - 1967: atomórákkal pontosabban szinkronizálhatók
→ nem kell instant adatösszevetés
 - 20. sz. vége: legyen a földgolyó a szeparáció maximuma
→ szögmásodperc tízezred részénél pontosabb

Egyéb egyéb

- Egyéb tartományok (UV, IR, X, γ , stb.)
- neutrínók
- gravitációs hullámok

- CCD, képalkotási és képfeldolgozási eszközök

- űrtávcsövek, szondák, stb.

- ...