Észlelési technikák és csillagok állapothatározói

Bevezetés a csillagászatba 3.

Muraközy Judit

Debreceni Egyetem, TTK

2026. 10. 13.

Miről lesz szó a mai órán?

Észlelési fázistér paraméterei

Észlelési technikák:
– távcsövek típusai (optikai, röntgen, rádió)
– távcsövek szerelései
– távcső felbontása, légkör korlátozó hatása és korrekciója
– spektrális felbontás, spektrográfok
– detektorok

Csillagok állapothatározói

Paraméterek

Információforrások az Univerzumról: elektromágneses sugárzás, részecskesugárzás, neutrínósugárzás, gravitációs hullámok

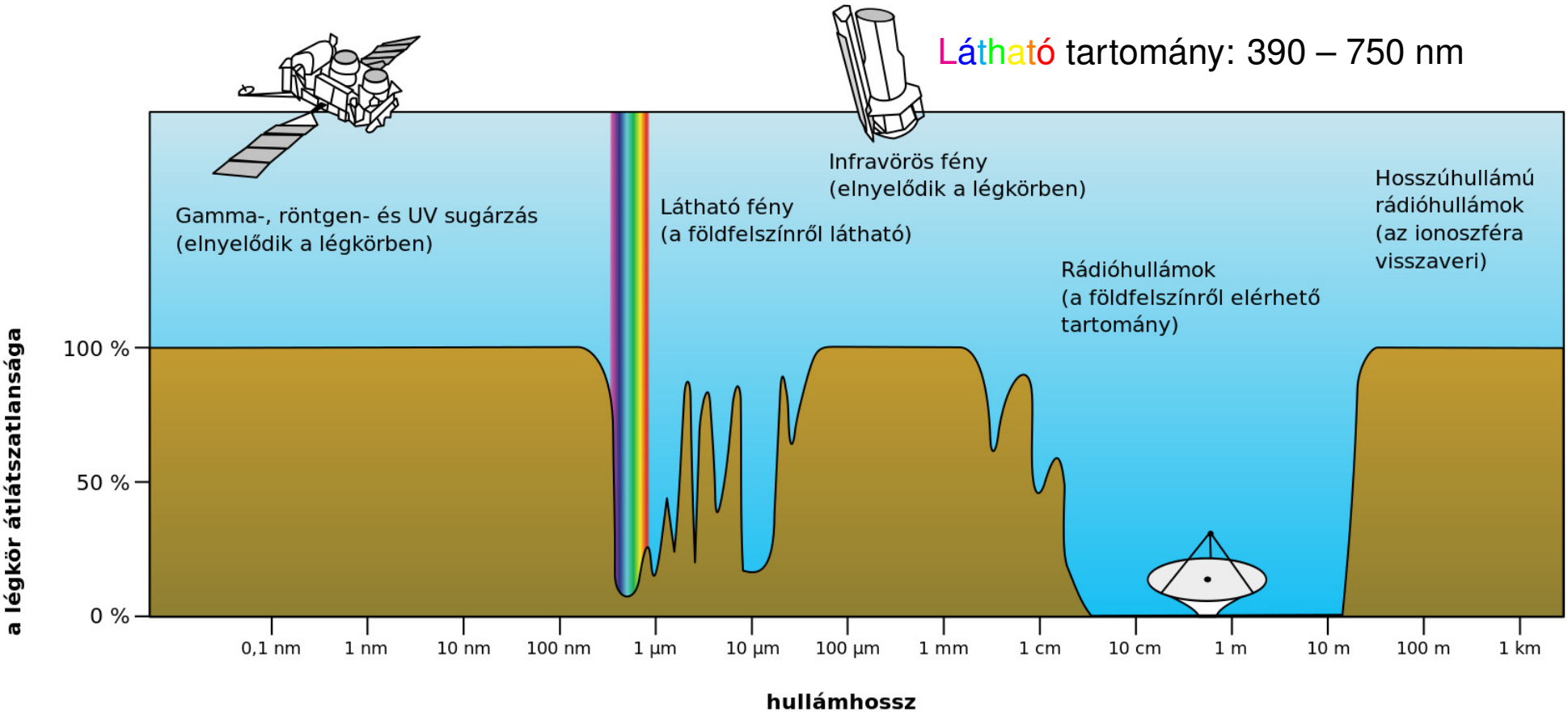
Eszköz az Univerzum-feltérképezés teljességének áttekintésére:

ÉSZLELÉSI FÁZISTÉR
5-dimenziós paramétertér az elektromágneses sugárzás információtartalmának leírására, melyet a következő adatok határoznak meg:

1. Hullámhossz-tartomány (energiatartomány)
2. Térbeli felbontás
3. Spektrális felbontás
4. Időbeli felbontás
5. Polarizáció

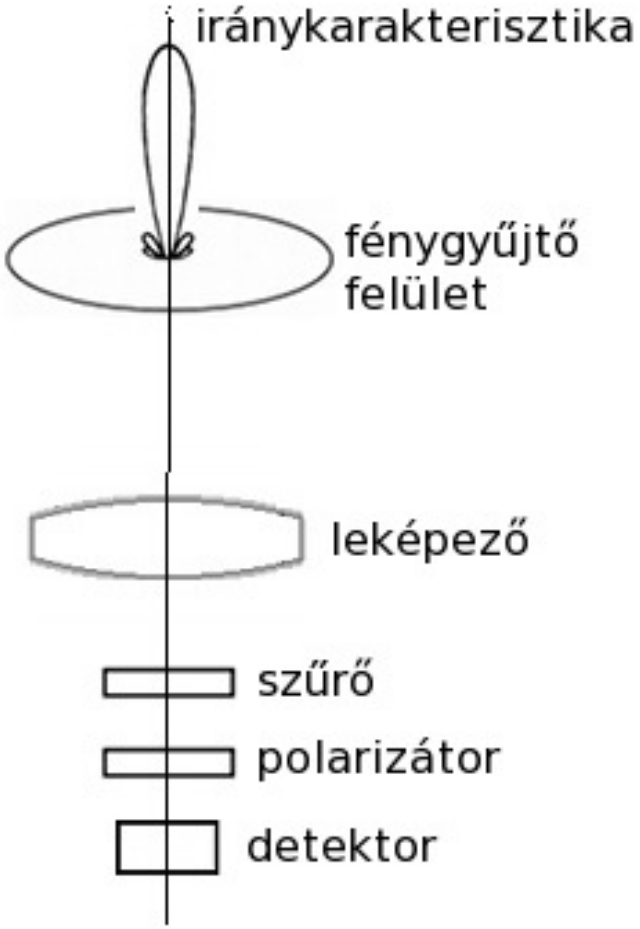
A jövőben talán a neutrínósugárzásra, illetve a gravitációs hullámokra is alkotható észlelési fázistér.

Hullámhossz-tartomány (energiatartomány)



- Rádiótartomány: leghosszabb hullámoktól 1 mm-ig (pulzár, kvazár, galaxis, molekulafelhő)
- Infravörös tartomány: 1 mm-től 750 nm-ig (alacsony T-jű obj., porfelhők, bolygók, aszteroidák)
- Ultraibolya tartomány: 1 nm$<\lambda<$ 300 nm (nagy T-jű obj., szupernóva, kvazár, napkitörés)
- Röntgen tartomány: $\lambda<$ 1 nm
- Gamma tartomány: legkisebb hullámhosszak

Elektromágneses sugárzást észlelő teleszkóp általános sémája



Tkp. az objektív felülete. Átmérője szabja meg a felbontást, területe a fénygyűjtő képességét (light gathering power).

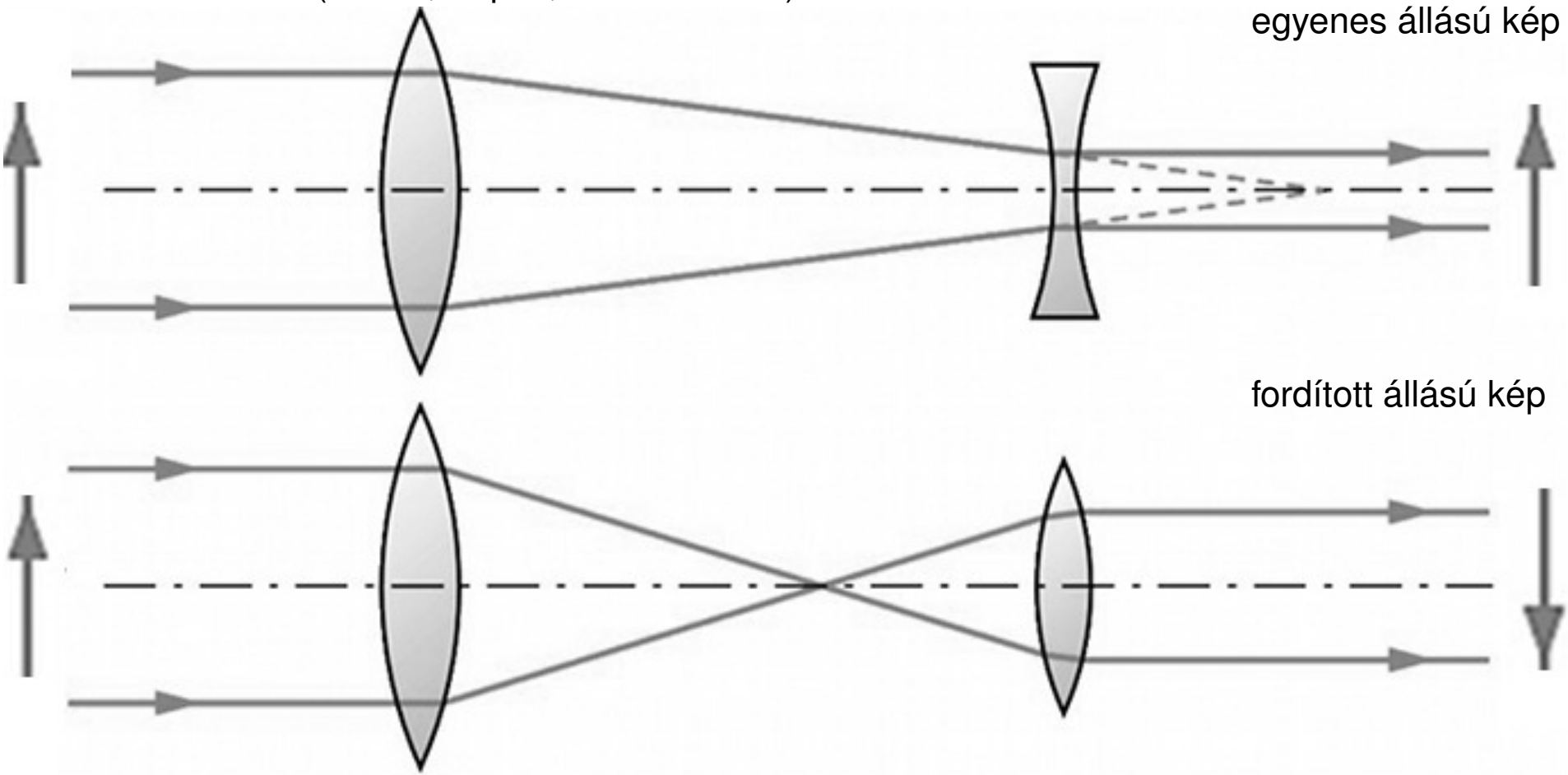
Optikai rendszerekben az ’objektív’, rádiótávcsövekben az antennatányér .

A hullámhossz-tartomány kiválasztására szolgál.
Mágneses méréseknél lehet szerepe.

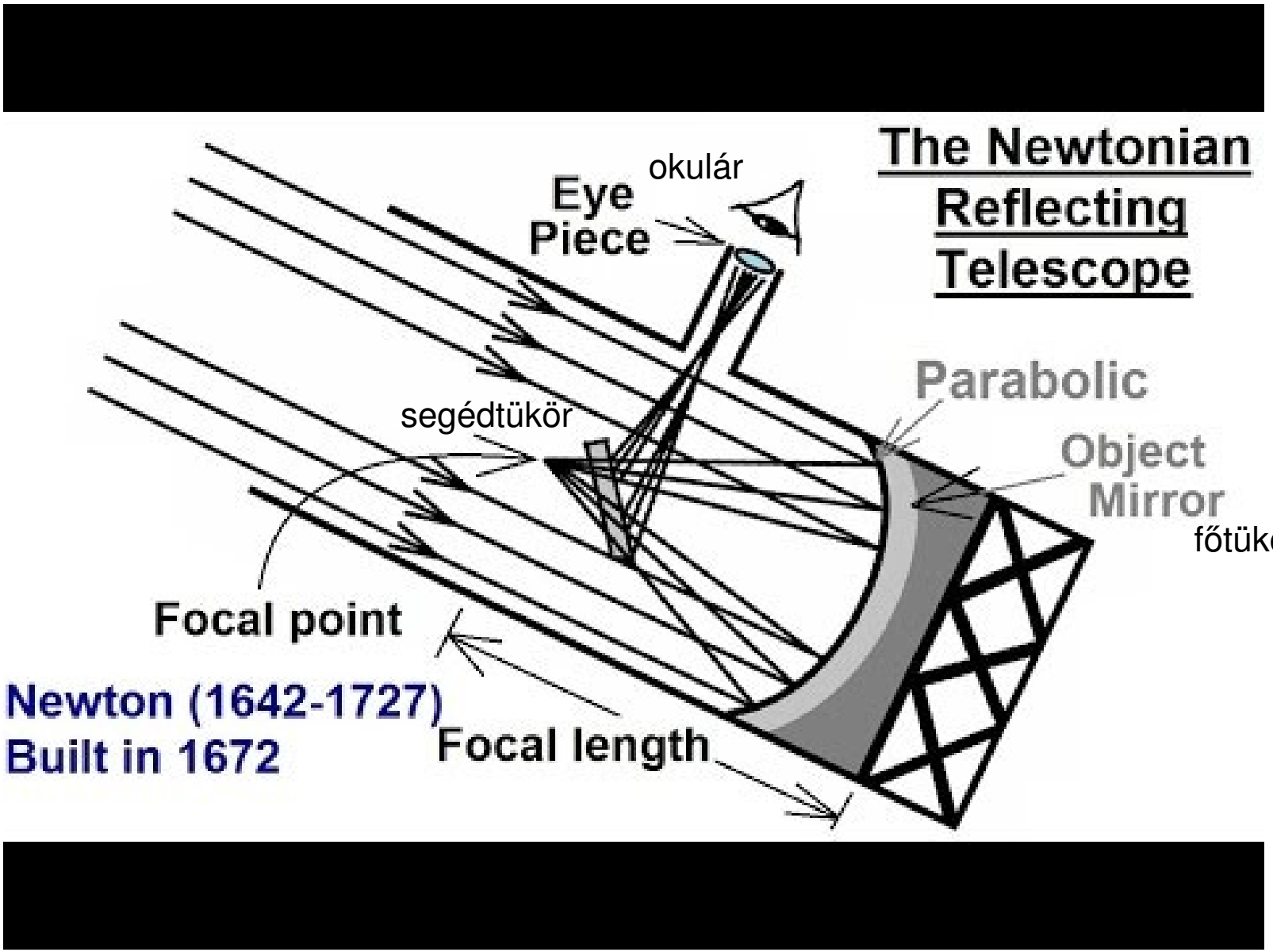
Spektrális, térbeli, időbeli felbontása fontos!

Látható tartomány – refraktorok

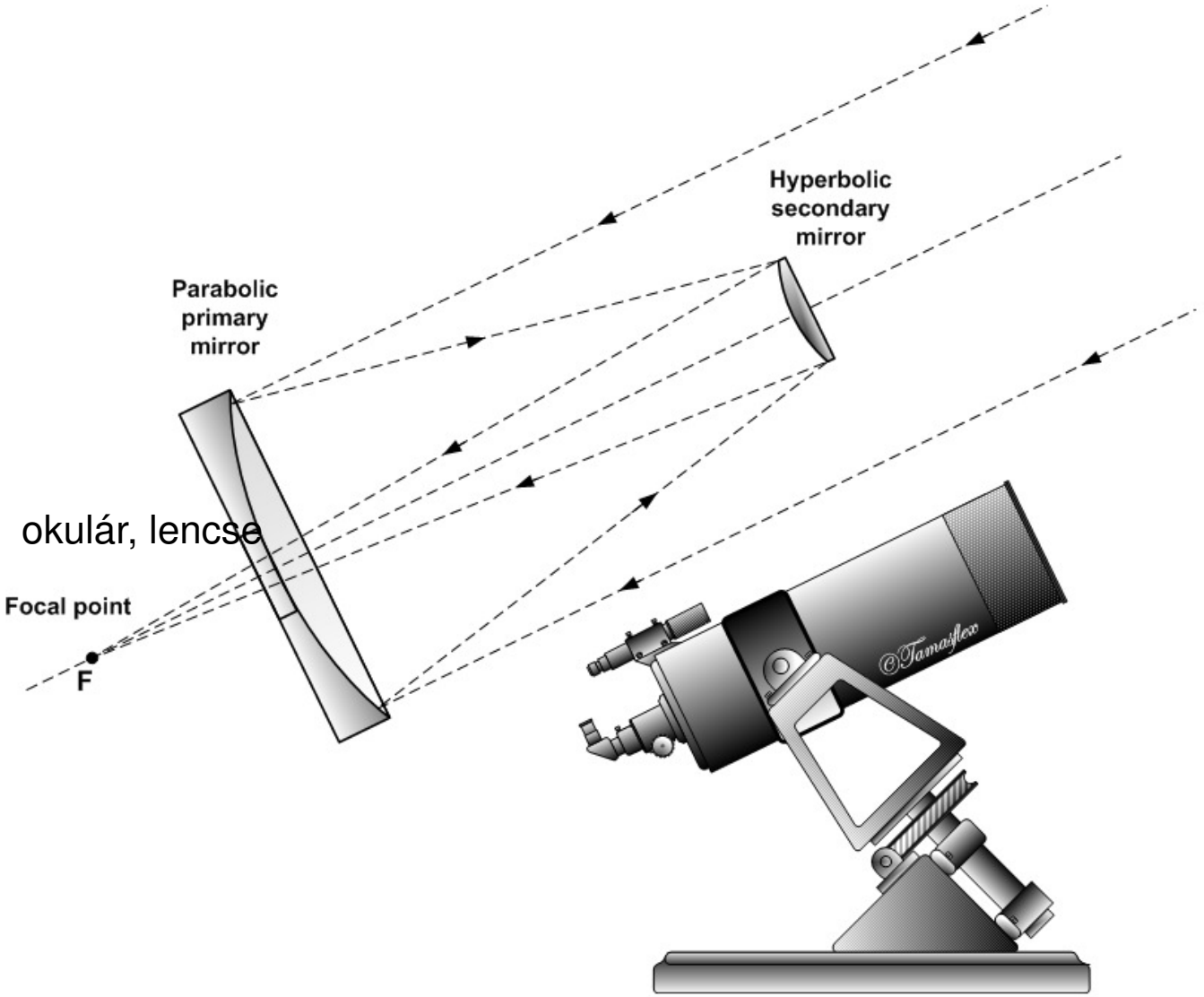
Az első refraktorok (Galilei, Kepler, 1600-as évek)



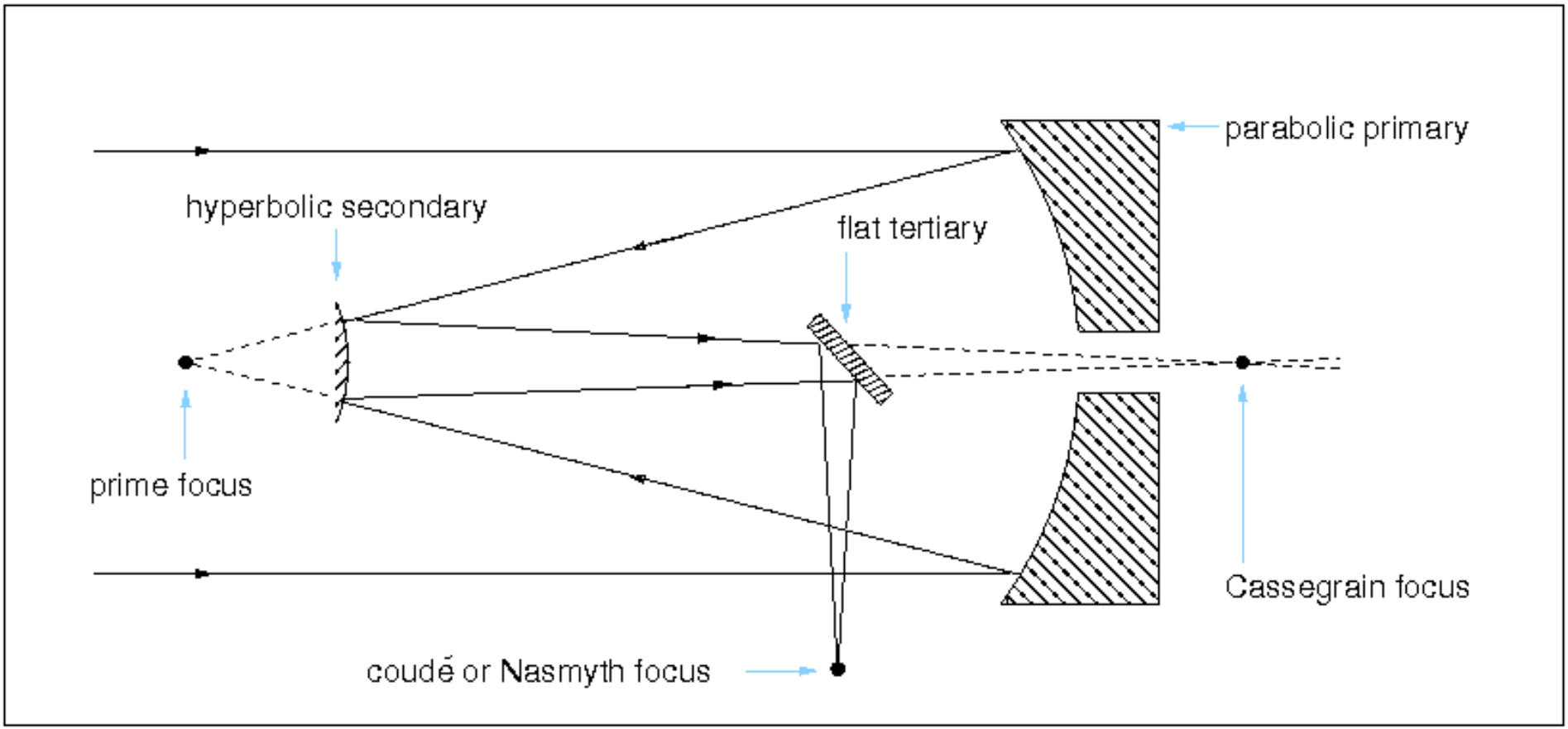
Látható tartomány – reflektorok Newton távcső



Cassegrain távcső



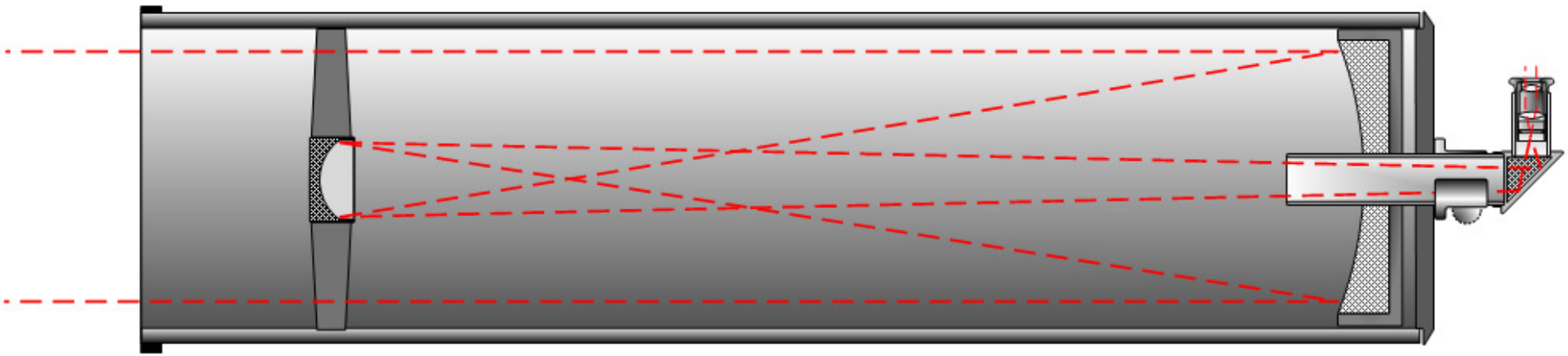
Coudé távcső



Newton és Cassegrain keveréke

hajlított segédtükör = fókusznyújtó hatás (kis tubus)

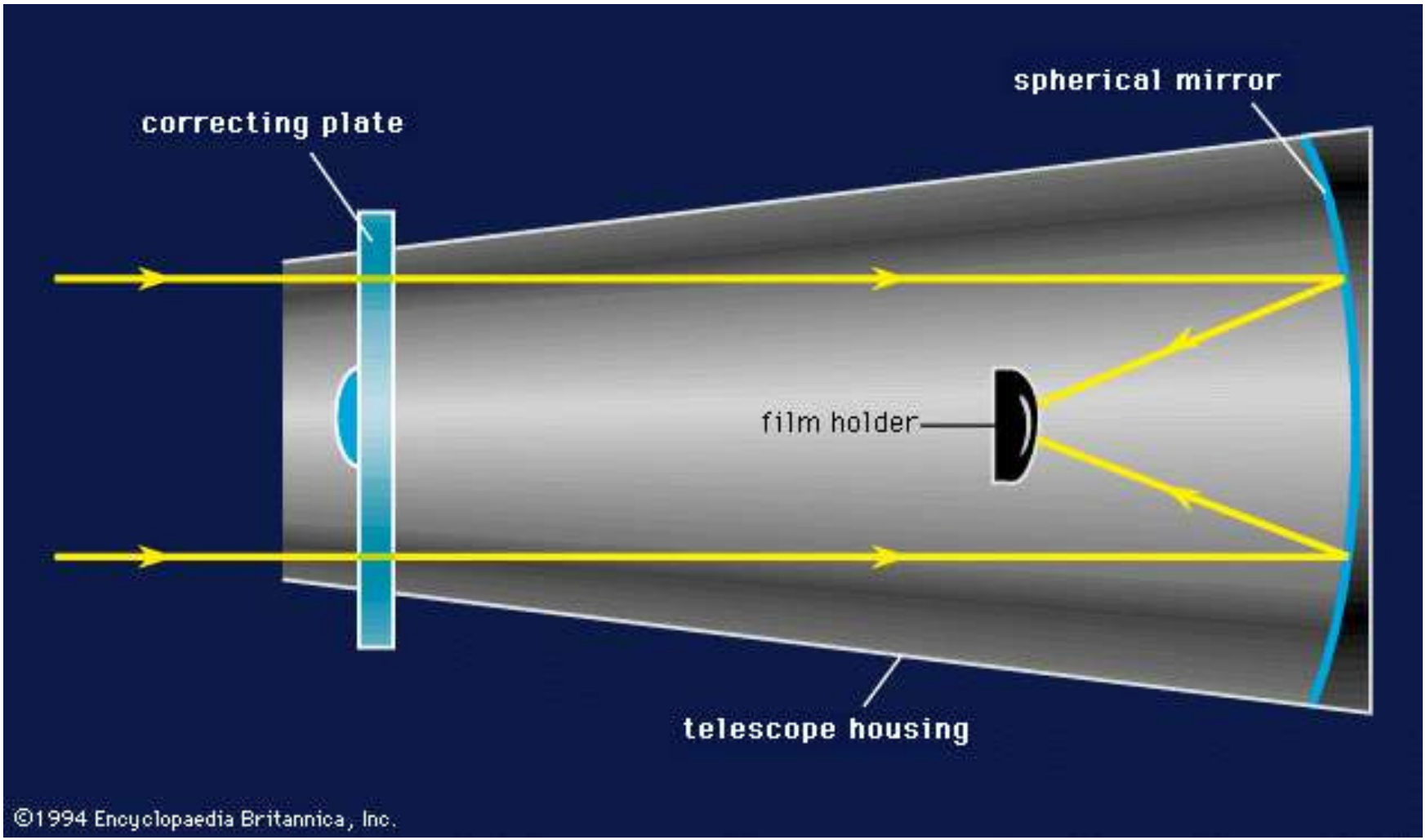
Gregory távcső



a segédtükör egy két fókuszú homorú tükör

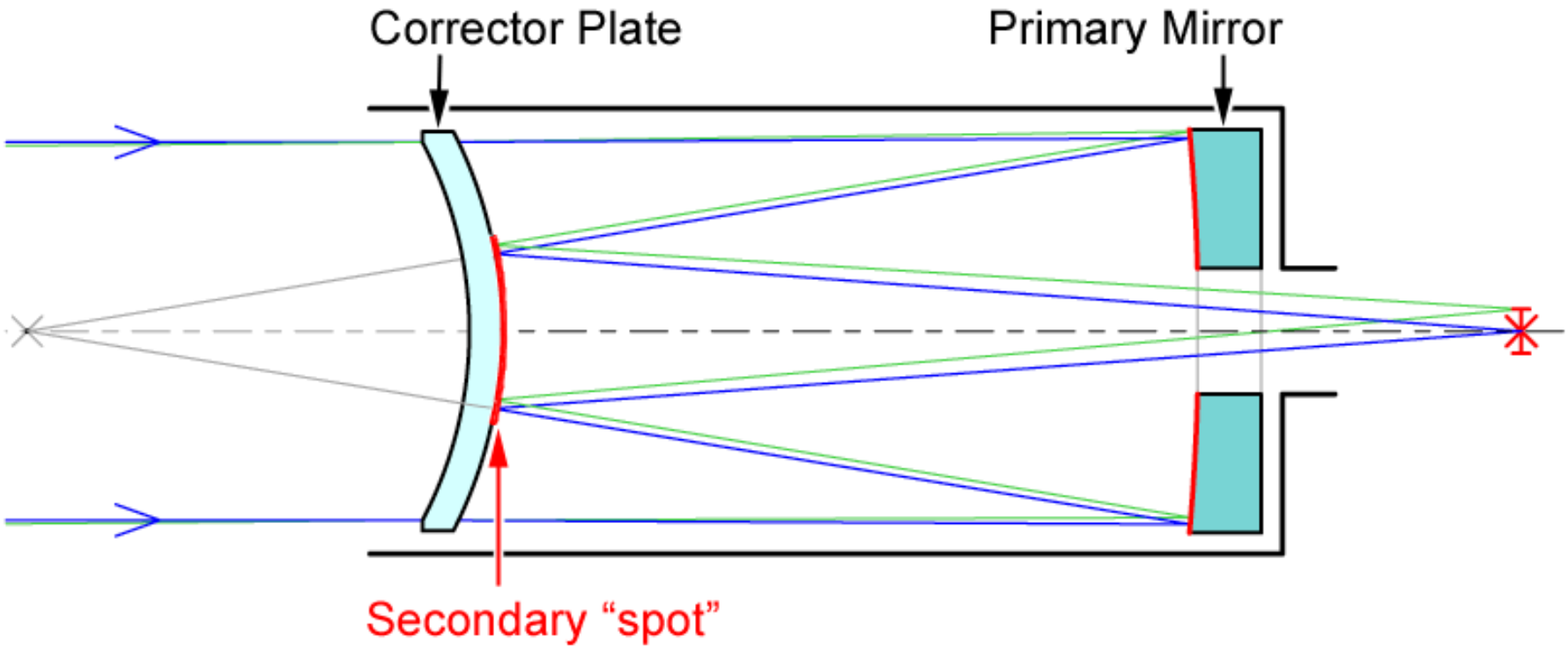
a kép a fő- és segédtükör közös fókuszpontjában áll elő,
melyet a segédtükör áttükröz a második fókuszpontba

Schmidt távcső



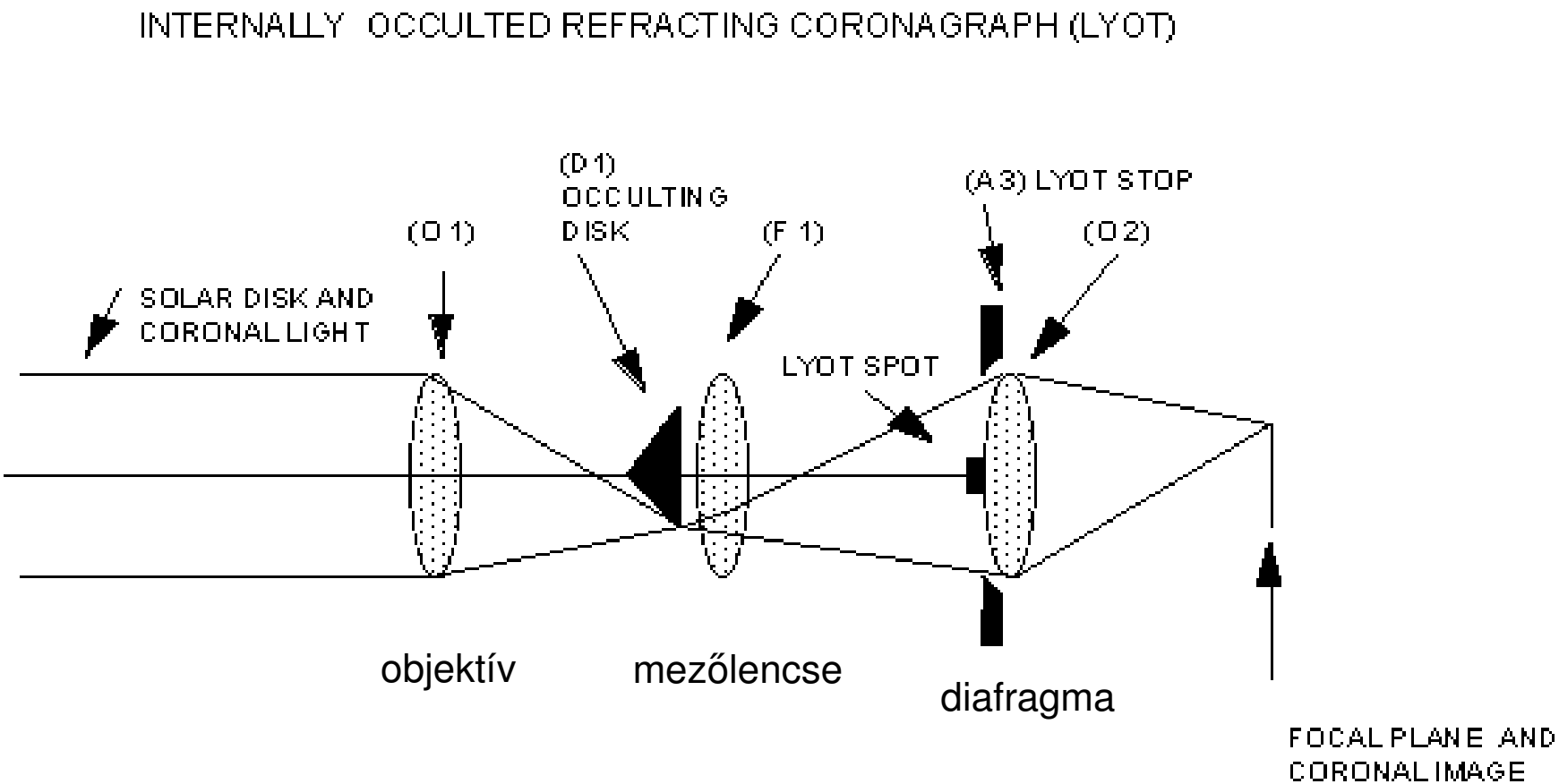
dedikáltan fotografikus észlelésekre
katadioptrikus távcső (fénytörés, fényvisszaverés)

Makszutov távcső



negatív görbületű meniszkusz (szférikus aberrációja ellenkező előjelű, mint a főtükröé)

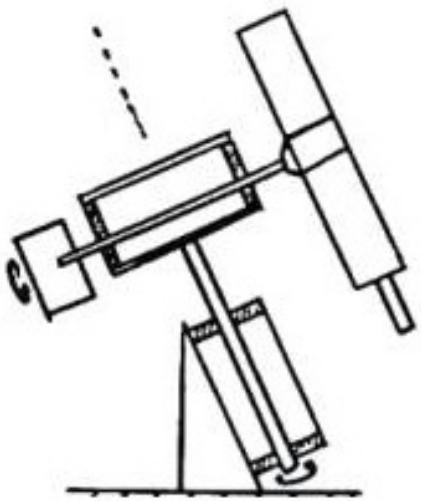
Koronográf – Napfizikai távcső



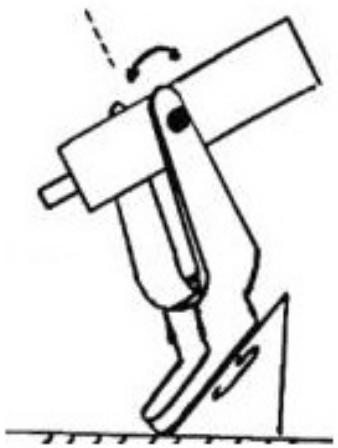
szórt fény minimalizálására

Távcsőszerelések

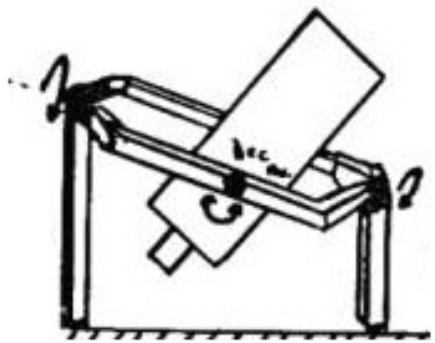
Parallaktikus, vagy ekvatoriális szerelések: a távcső két, egymásra merőleges (rektaszcenzió, deklináció) tengely körül forgatható. A rektaszcenziótengely a Föld forgástengelyével párhuzamos.



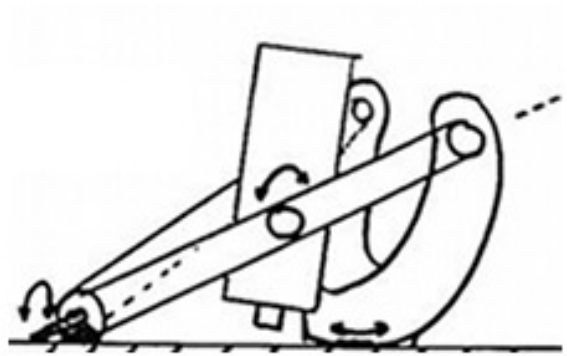
német



villás



angol

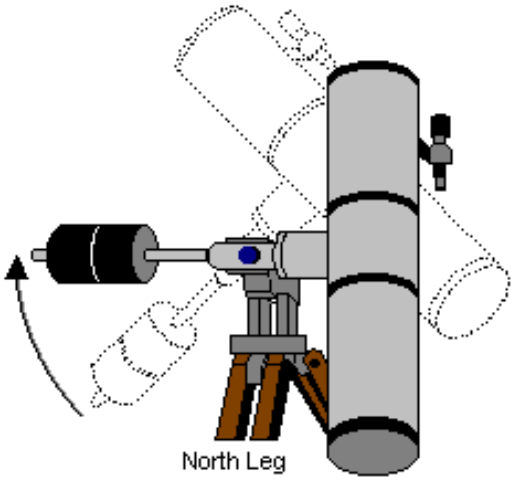


patkó

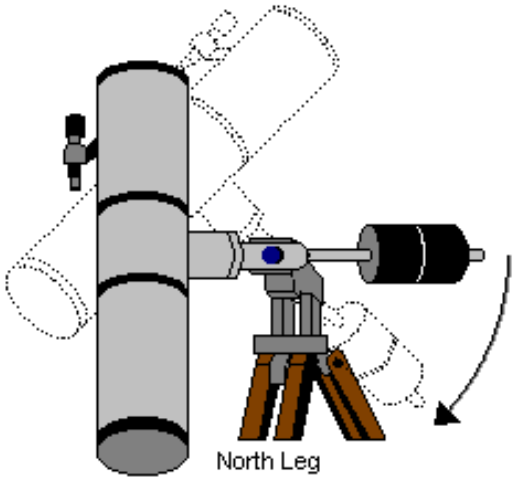
hármas funkció: alátámasztás; remegés minimalizálása; égitestek beállítása, követése

Távcsőszerelések – Parallaktikus

Német szerelés: a távcső és ellensúly a rektaszcenziótengely két oldalán



Viewing objects East of the Meridian



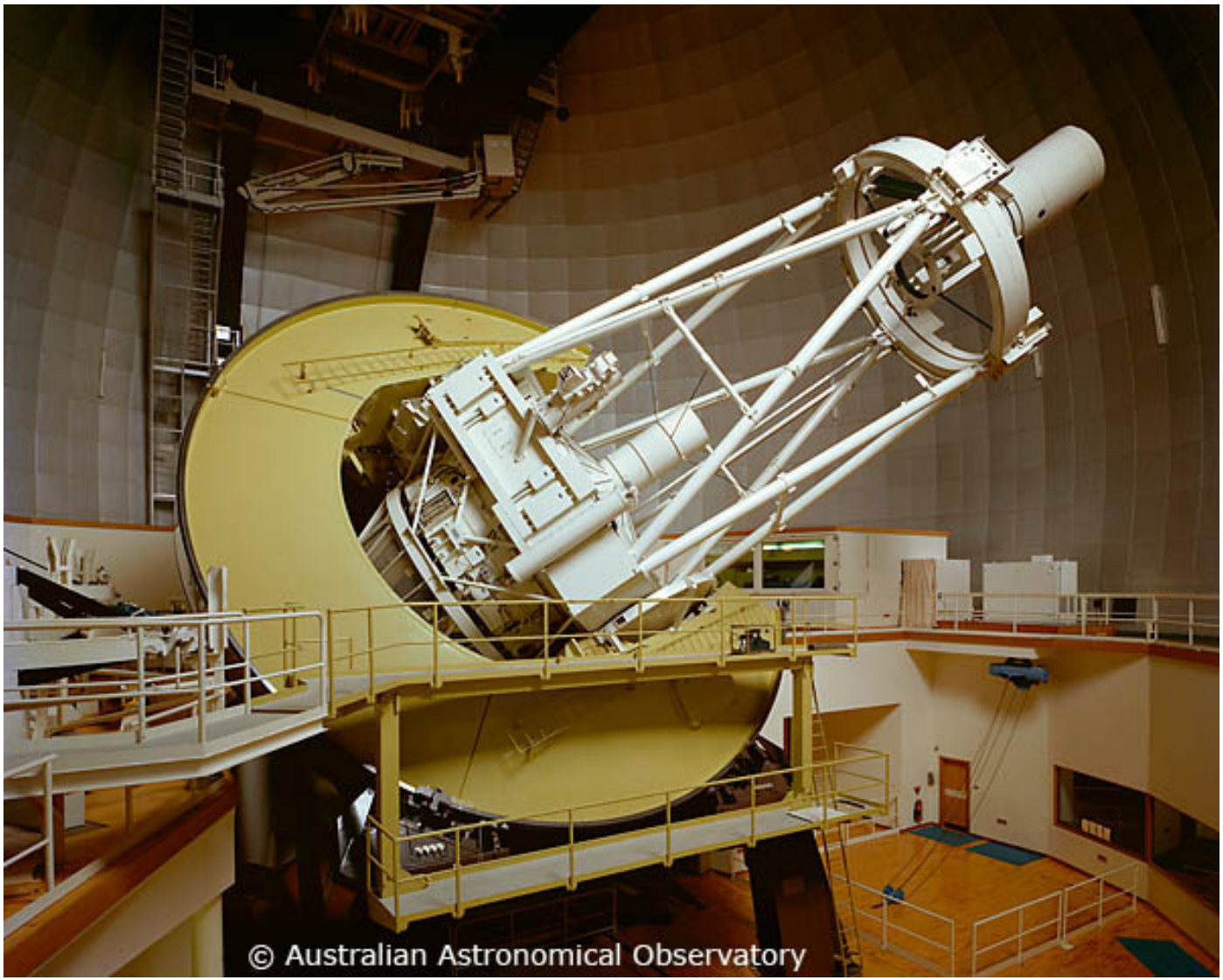
Viewing objects West of the Meridian

a volt gyulai Konkoly-távcső



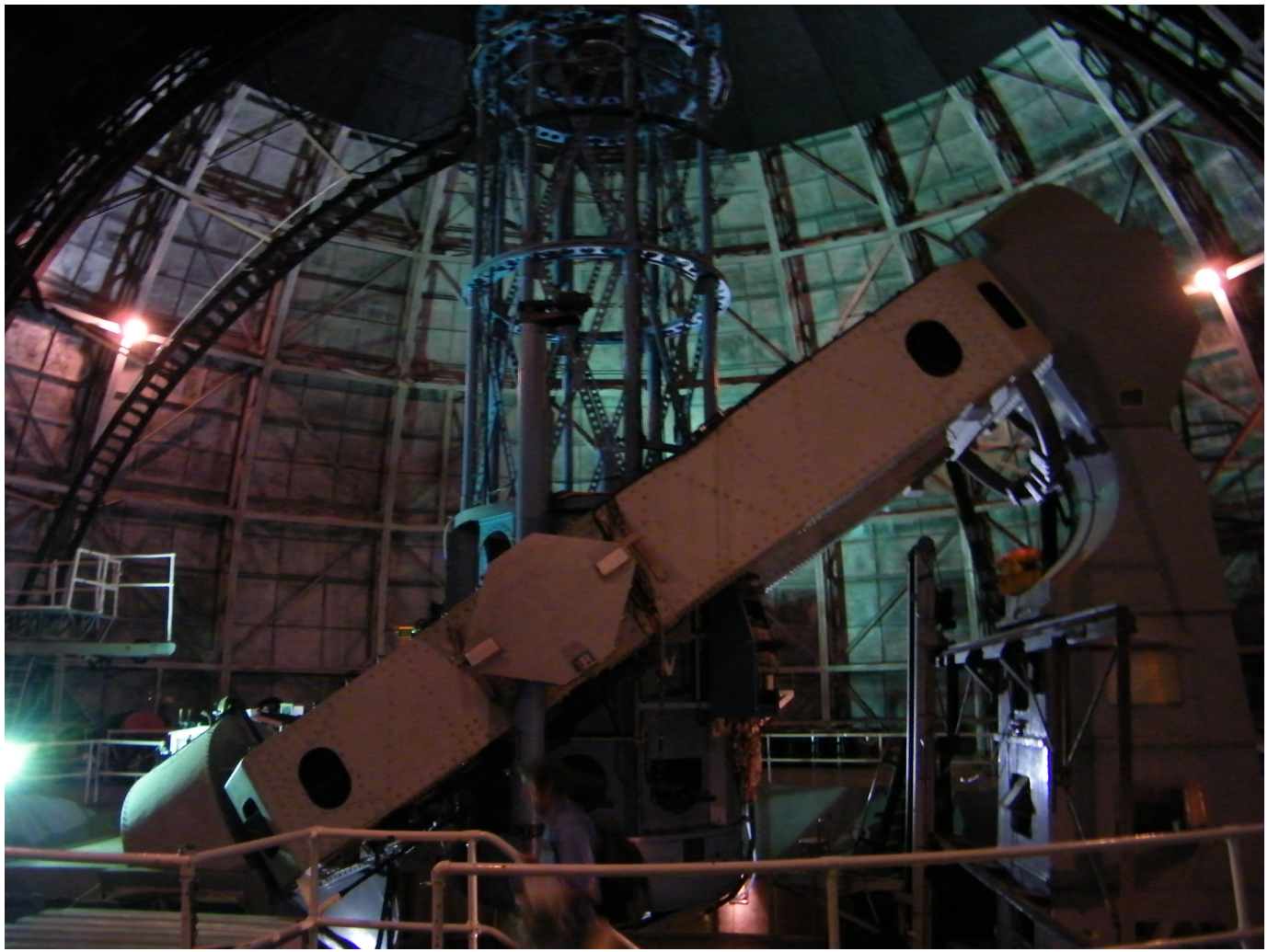
Távcsőszerelések – Parallaktikus

Villás szerelés: az optikai tengely átmegy a rektaszcenziótengelyen

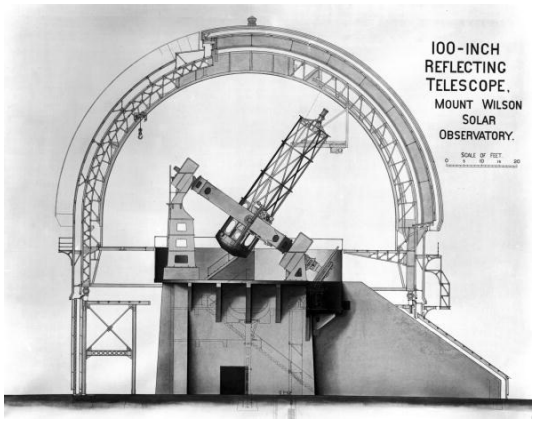


Távcsőszerelések – Parallaktikus

Angol szerelés: villa helyett zárt keret, a két végén tengelyezve



Mount Wilson 100“ teleszkóp (Hubble ezen fedezte fel az Univerzum tágulását)



Távcsőszerelések

Patkó alakú szerelés: Palomar Observatory 200”- 5.1 m-es távcső



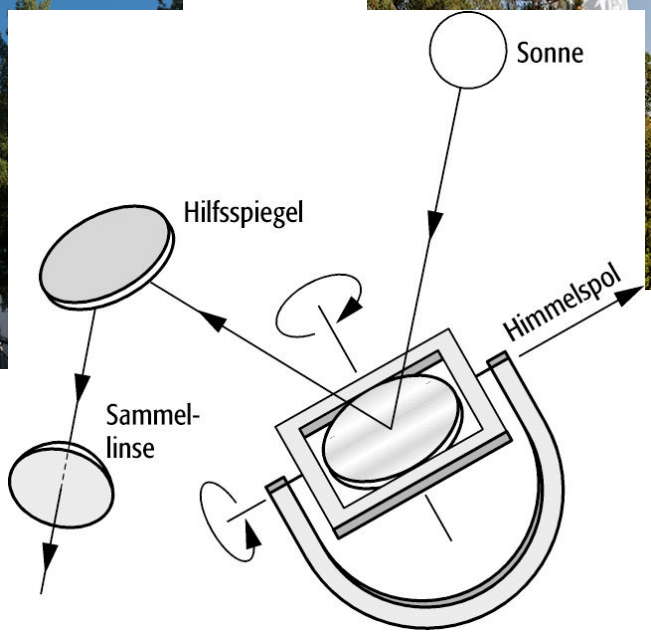
Naprendszer
exobolygók
csillagok és fejlődésük
távoli galaxisok

Távcsőszerelések – Parallaktikus

Napészleléshez: cölosztát (főtükör + segédtükör), Mount Wilson toronytávcsövek



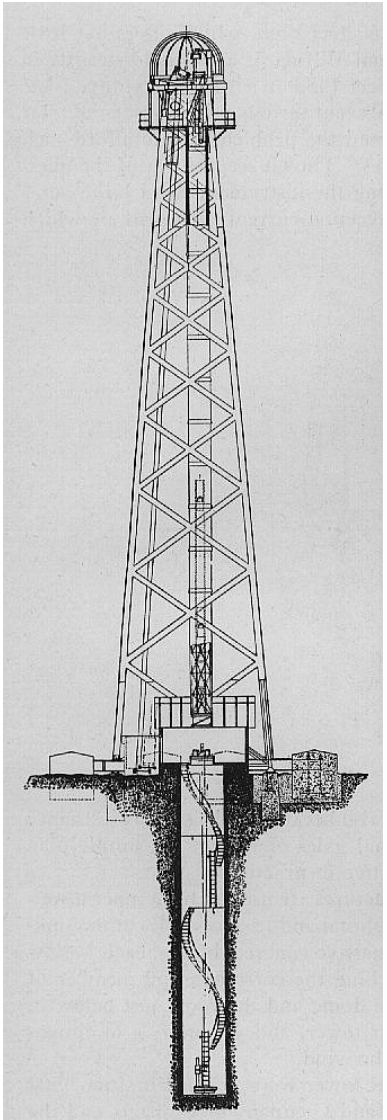


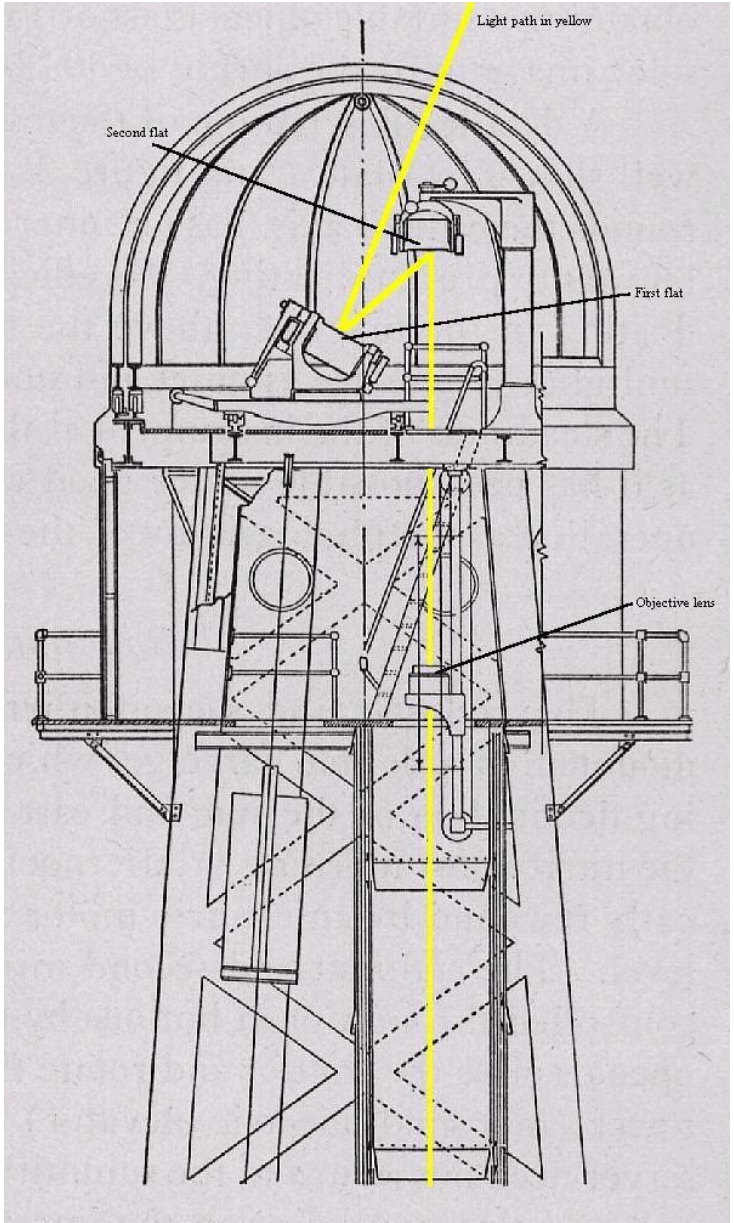


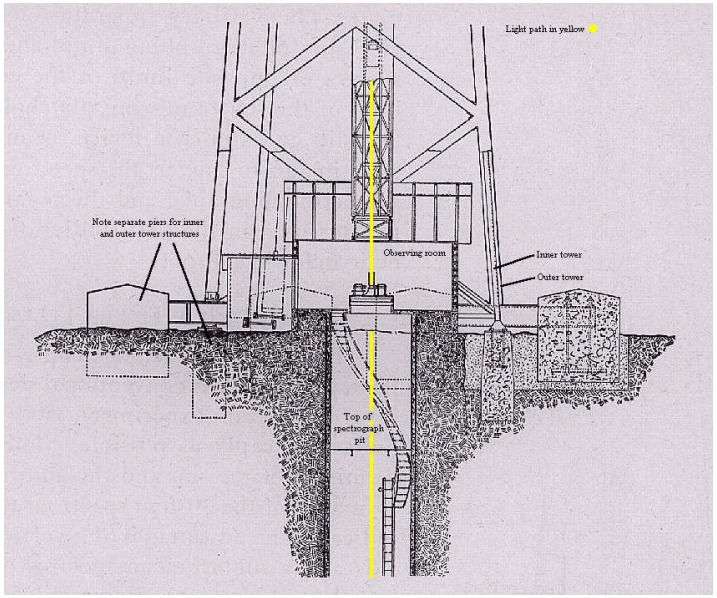


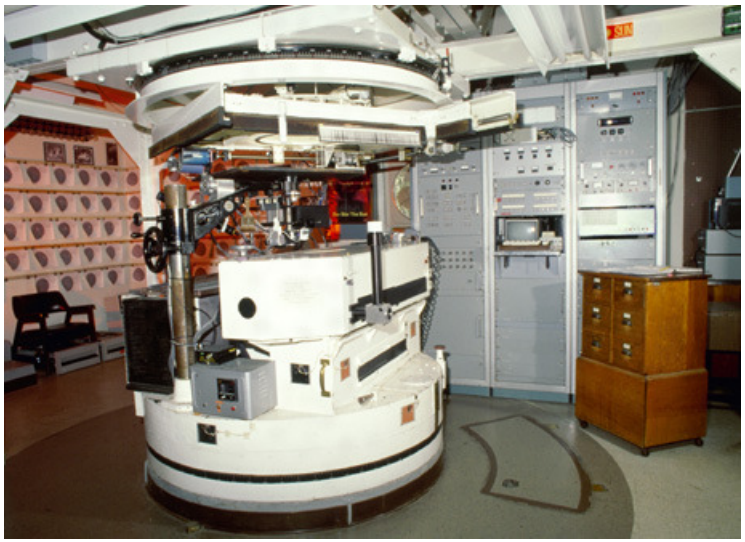
A fénnyalábot betükrözi a műszer látómezejébe. A műszer forog.

Távcsőszerelések – Parallaktikus



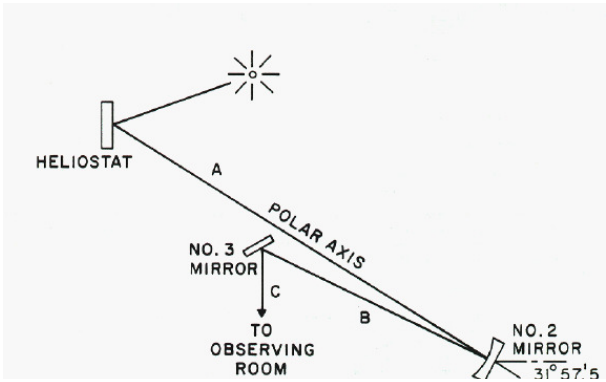


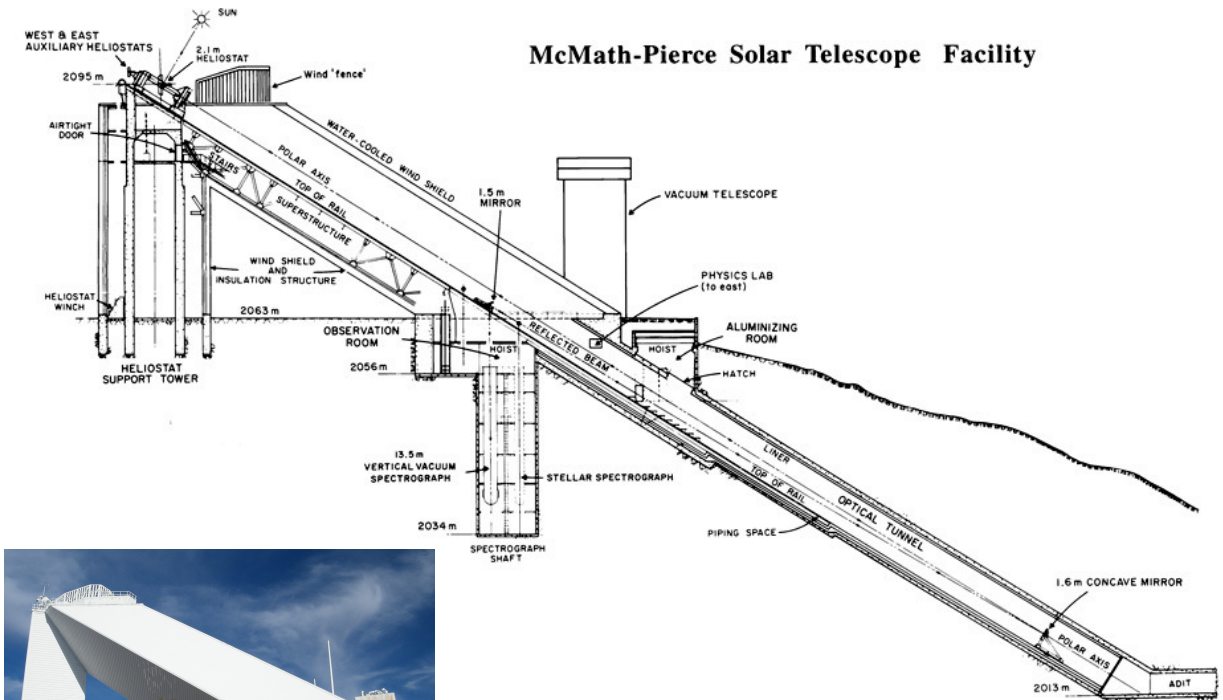




Távcsőszerelések – Parallaktikus

Napészleléshez: heliosztát (egyetlen főtükör), Kitt Peak naptávcső

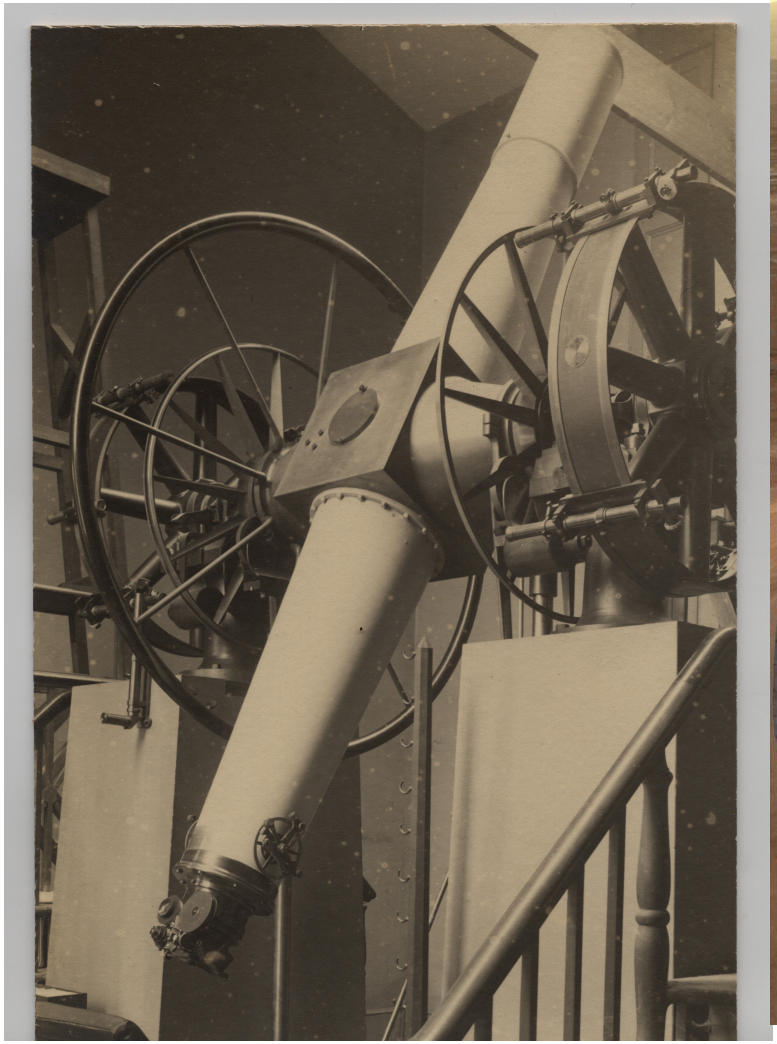






Távcsőszerelések – Horizontális szerelések

Tranzitműszer
csak a meridiánsíkban mozog, a meridián-átmeneteket észleli



Tervezett Extremly Large Telescope
39 m átmérőjű objektív



óriási súly, számítógép-vezérelt tengelyek

Rádiótartomány

Hosszú hullámhossz: nagy teleszkóp átmérő

Bonn: 100 m átmérő, 30 m fókusztávolság
– a legnagyobb irányítható antenna
– tükör deformálódás gravitáció miatt
– Itt számítógép deformálja tökéletes parabola alakúra a tükröt.



Rádiótartomány

Hosszú hullámhossz: nagy teleszkóp átmérő

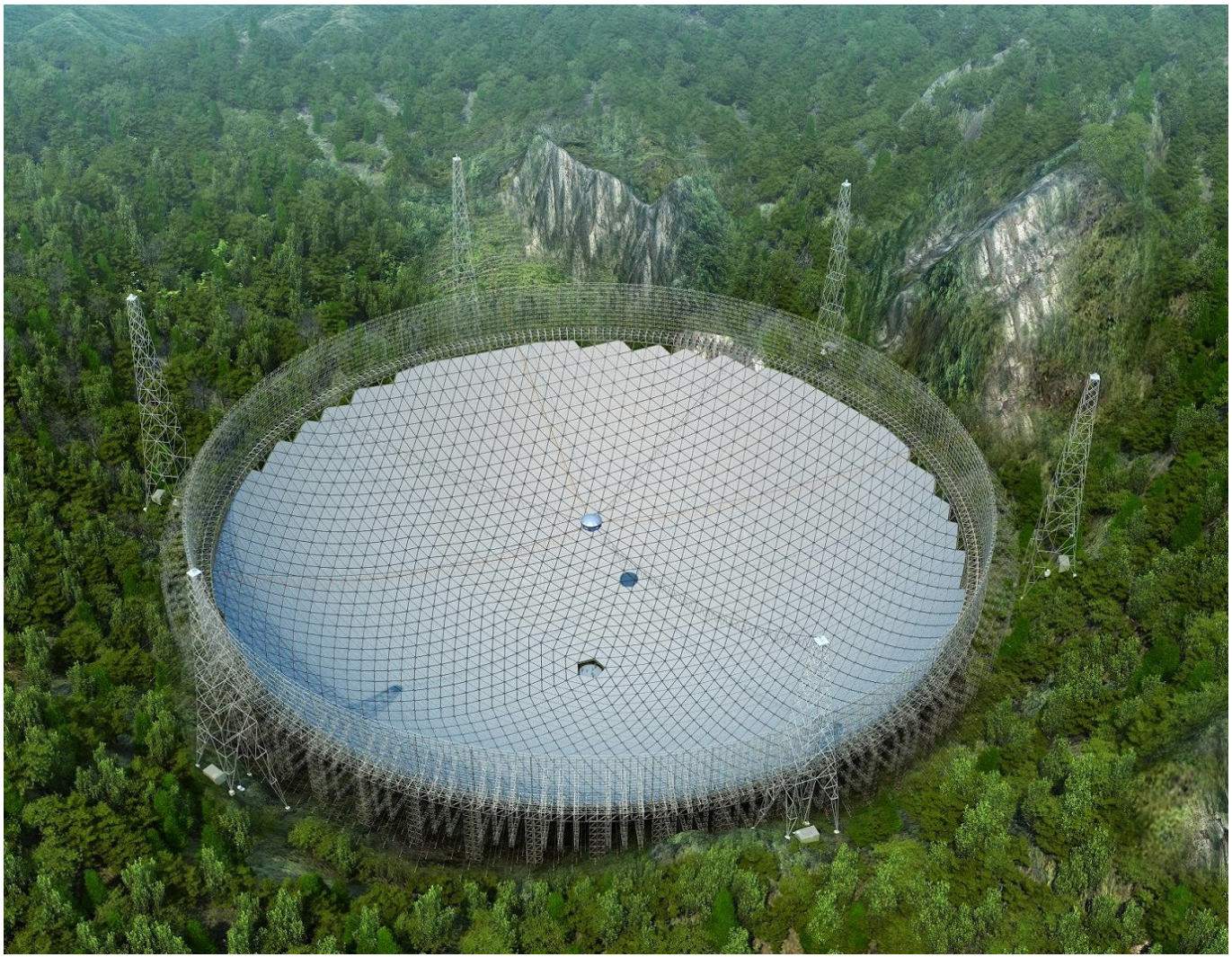
Arecibo (Puerto Rico) 300 m átmérő, de 2020-ban végleg bezárt



Rádiótartomány

Hosszú hullámhossz: nagy teleszkóp átmérő

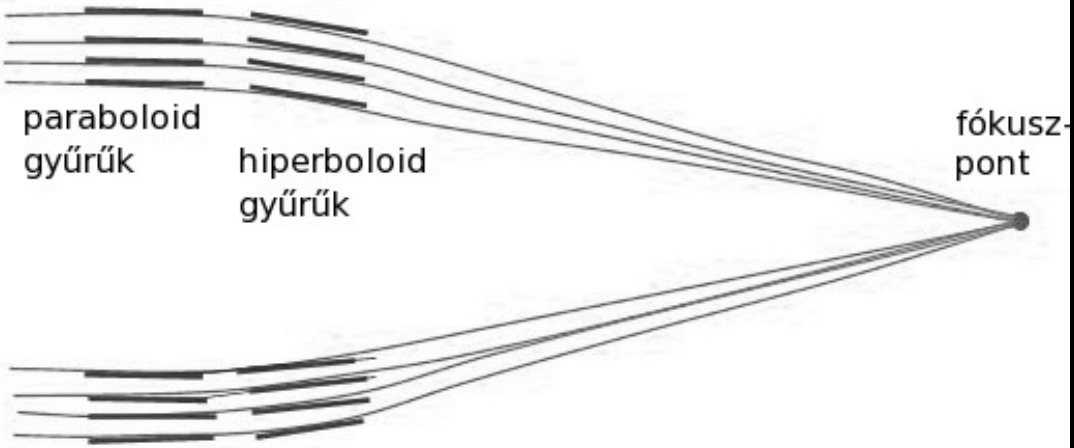
FAST (Five-hundred meter Aperture Spherical Radio Telescope), Kína, 500 méteres rádiótávcső, 140 m fókusztávolságú

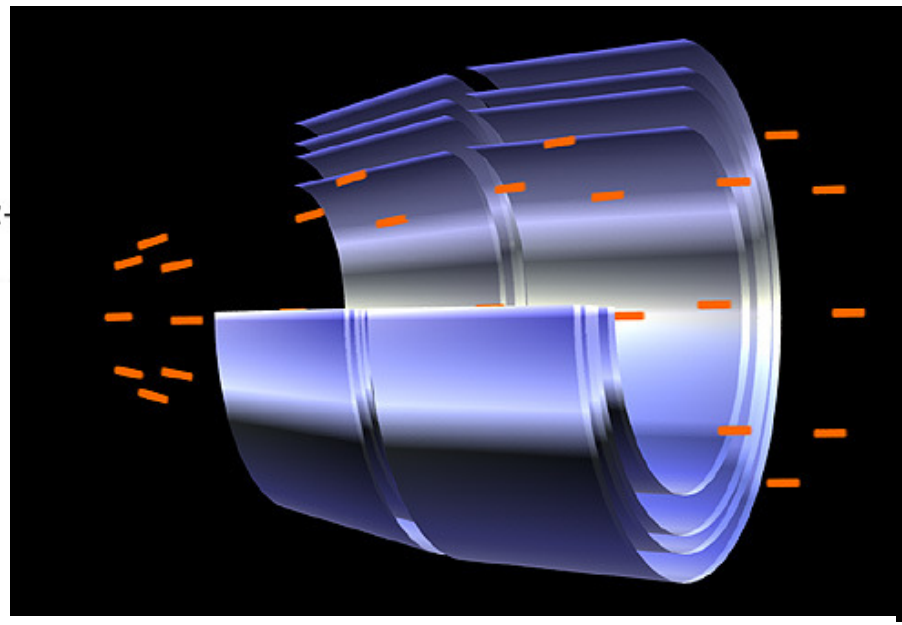


Röntgentartomány (X-ray)

Csak súrlódó beesésnél (88-89º) érvényes a visszaverődési törvény, a nagy energiájú röntgensugarak egyszerűen áthatolnak a szokásos üvegtükrökön.

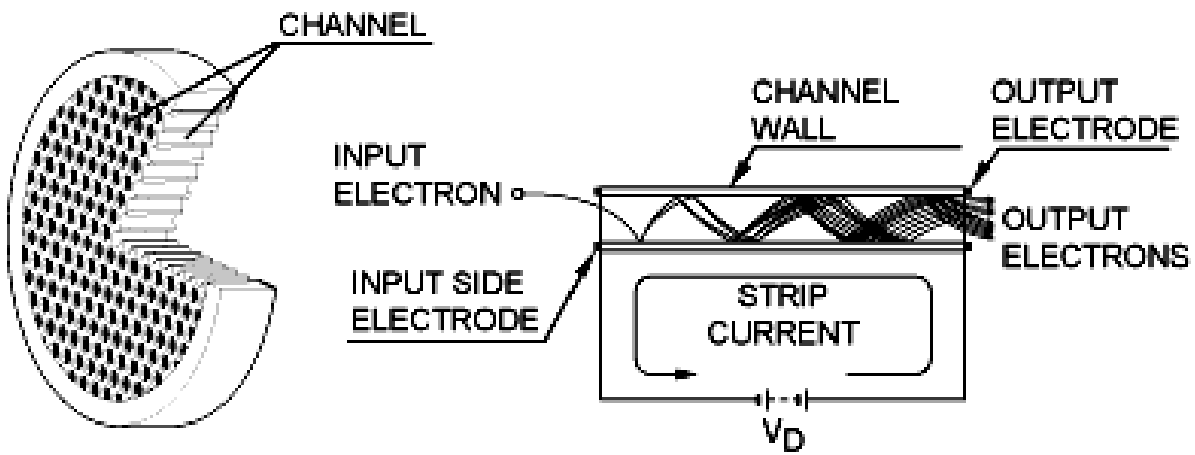
Megoldás: Wolter-teleszkóp





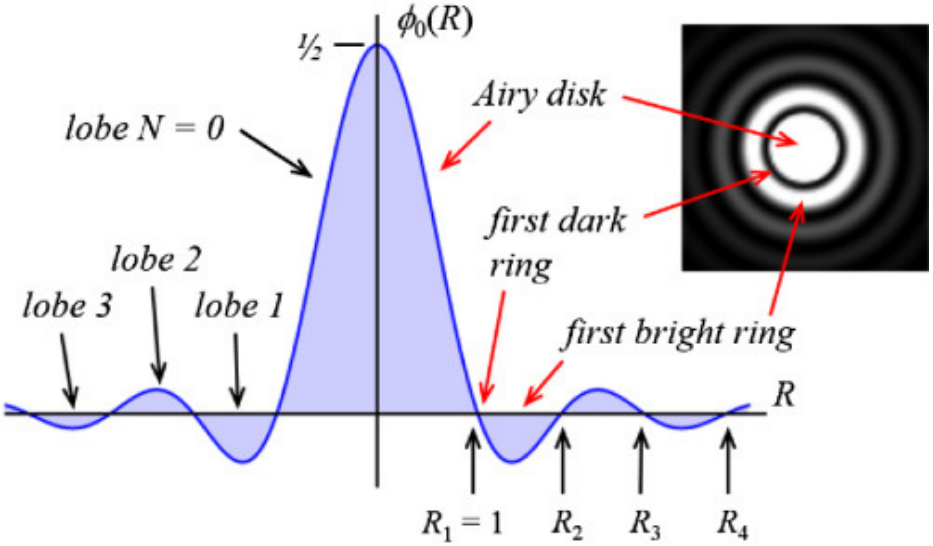
Detektor:
mikrocsatornás lemez

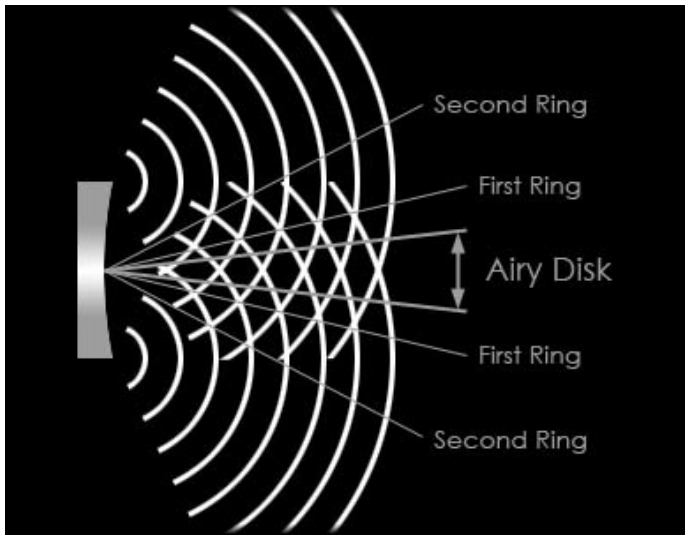
A mikrocsatornába lépő foton lavinafolyamat végén felvillanást okoz a kimeneten



Térbeli felbontás

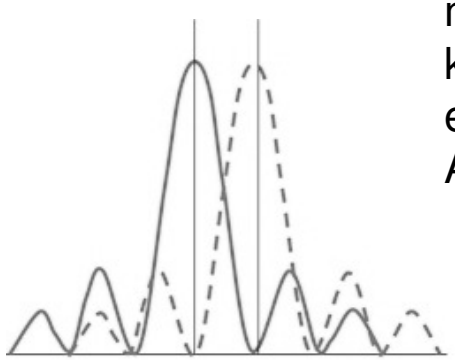
Az objektív szélein történő diffrakció miatt egy pontszerű objektum képe nem pont, hanem **Airy gyűrűk** sorozata:





Két pont csak bizonyos távolságban különböztethető meg:





Rayleigh-kritérium a megkülönböztethetőségre: az egyik pont központi maximuma a másik első minimumára essen.
A legkisebb felbontható Θ szögtávolság:

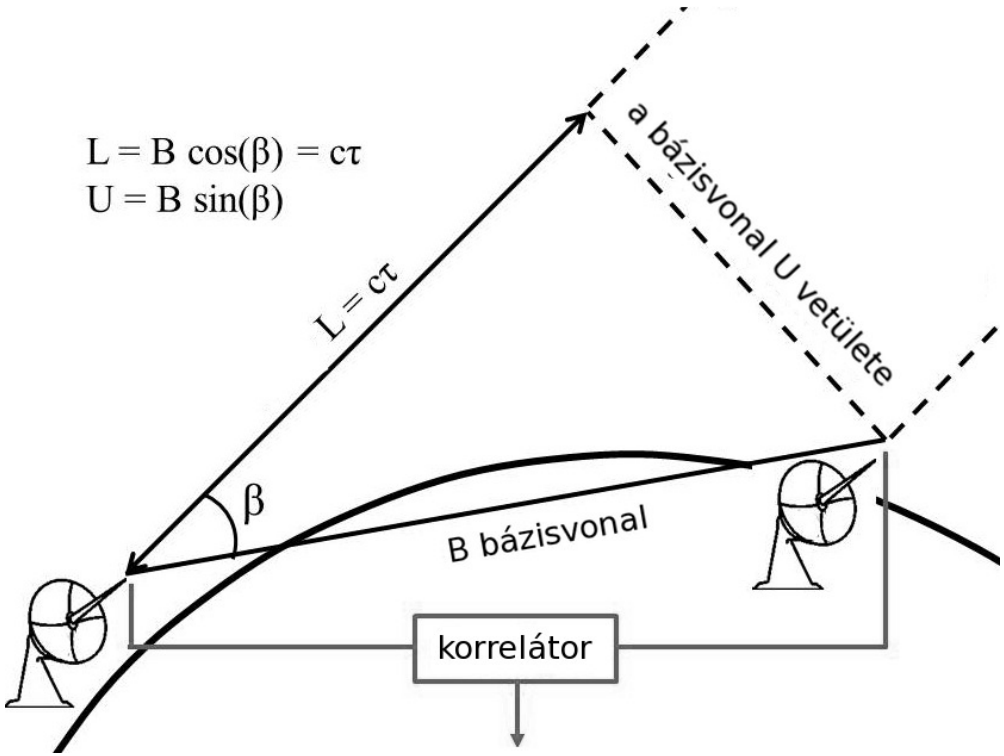
$$\Theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

λ: hullámhossz [m]
D: objektív átmérő [m]

Apertúraszintézis

Átmérőnövelés távoli antennatányérokkal
Képalkotás csak úgy lehetséges, ha a fókuszsíkban a hullámfrontoknak minden időpillanatban azonos fázisú részei találkoznak.

Két távoli antenna esetén ez a B távolság és a β észlelési irány ismeretében biztosítható



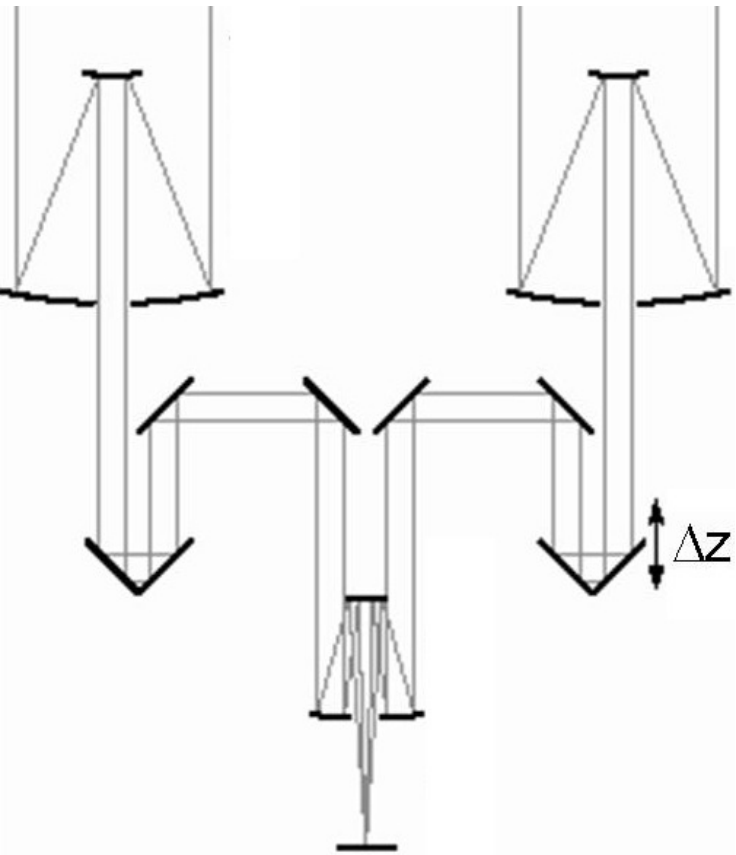
Very Large Array (VLA), New Mexico

27 db. 25 m-es antenna, ekvivalens átmérő: 36 km
λ= 0.6 – 410 cm, felbontás: 0.2 – 0.004 arcsec

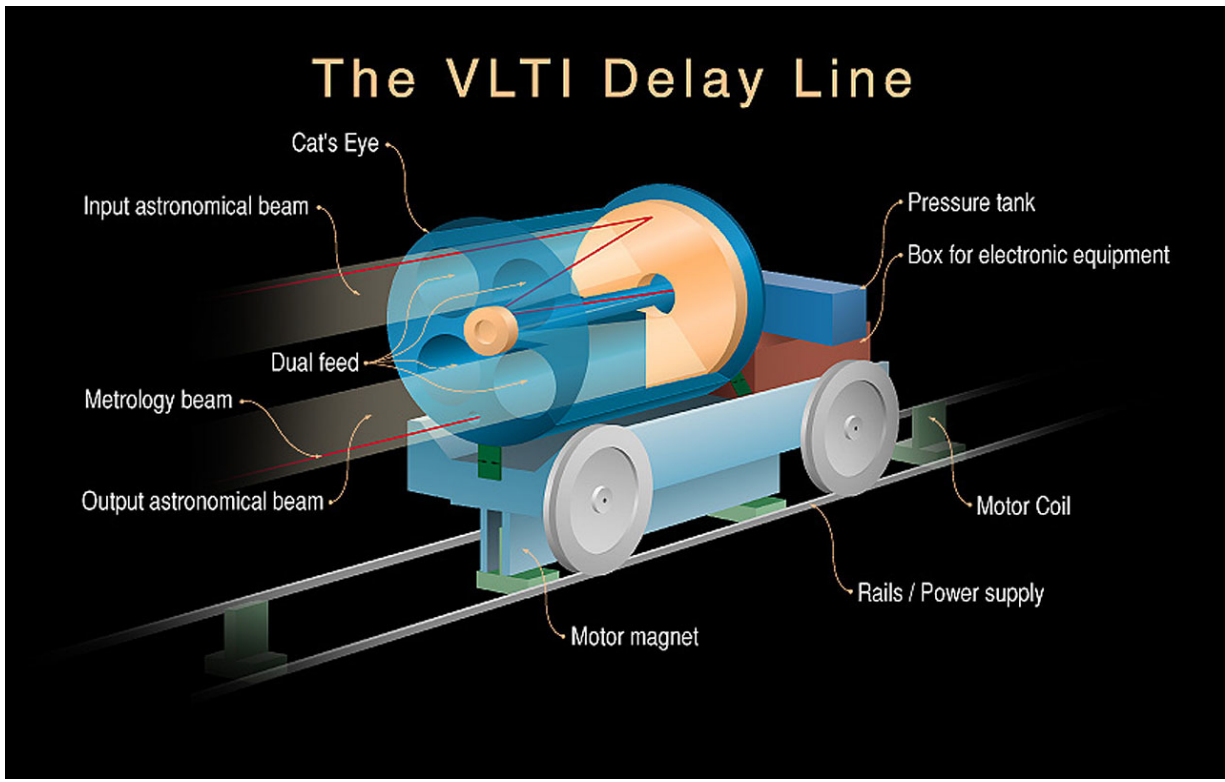




Apertúraszintézis az optikai tartományban



Az egyik távcső sugárfordítójával kikereshetők az azonos fázisú hullámfrontok.



Spektrális felbontás

Rácsegyenlet: maximális intenzitás kapunk a következő feltétel teljesülése esetén:

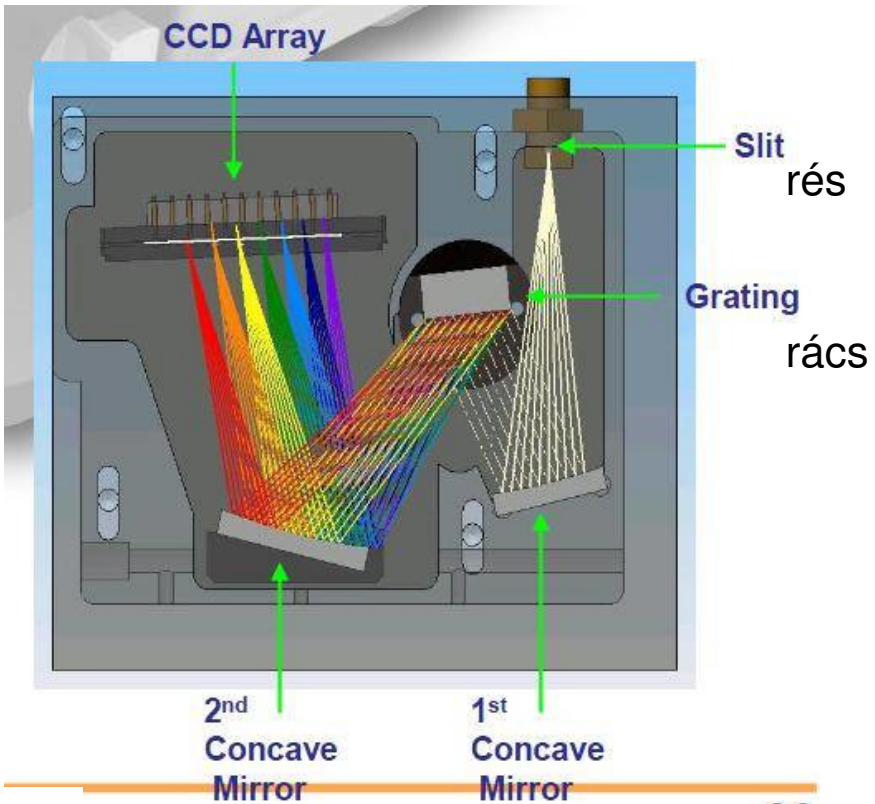
$$n\lambda = d(sin\alpha + sin\beta)$$

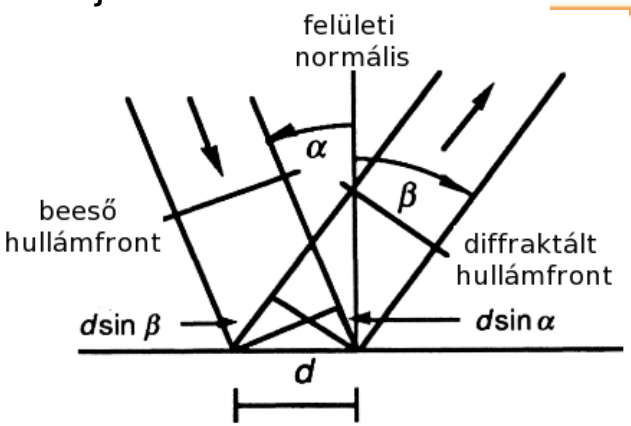
A spektrográf részei:

– a rés után a kollimátor párhuzamos sugarakat továbbít

– a rács ezeket hullámhossz szerint felbontja

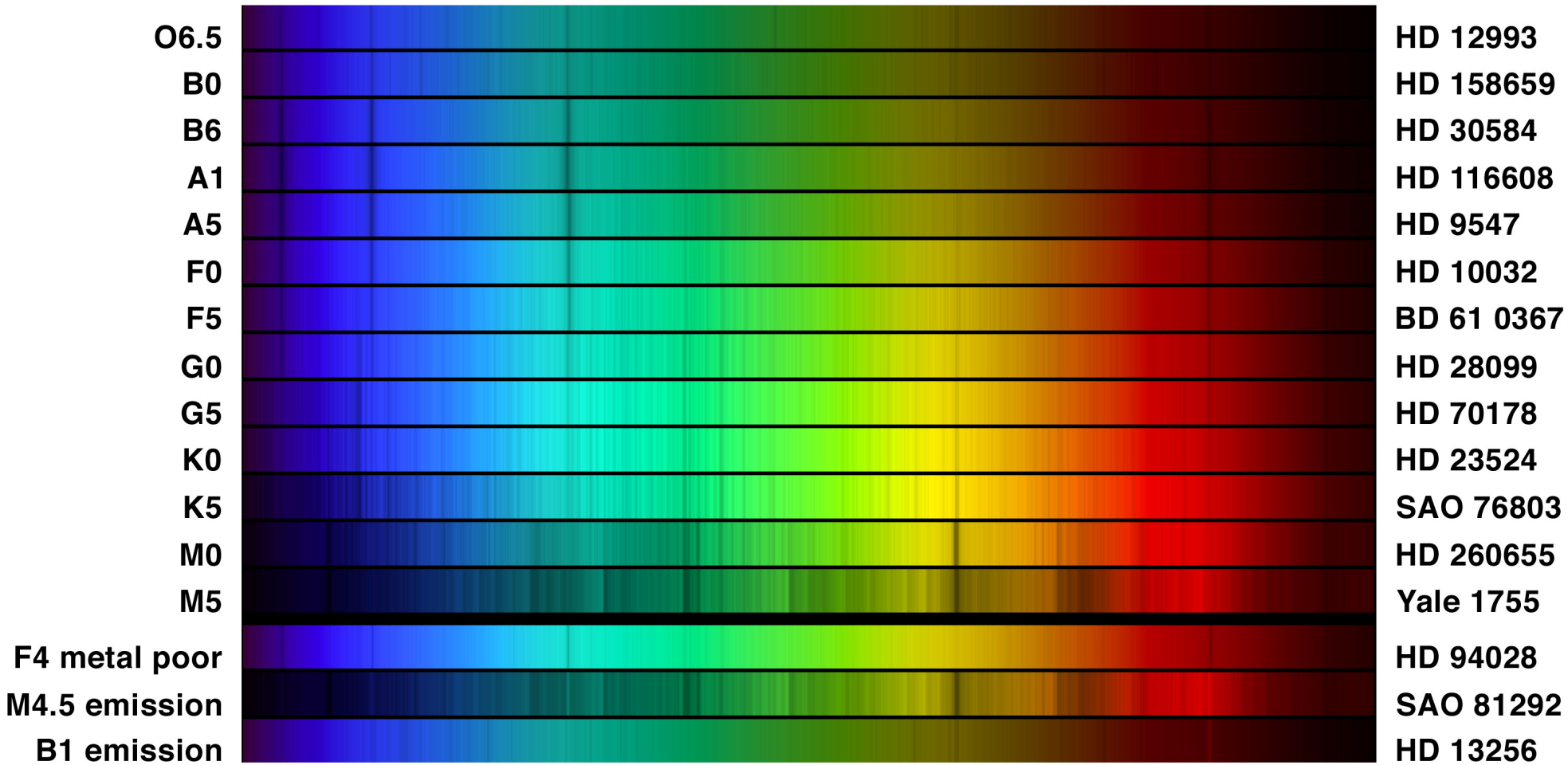
– a kamratükör a felbontott fényt a detektorra fókuszálja





Különböző tömegű (hőmérsékletű) csillagok spektrumai

A spektrográfia megszületésével (Fraunhofer) kezdődik az asztrofizika korszaka.

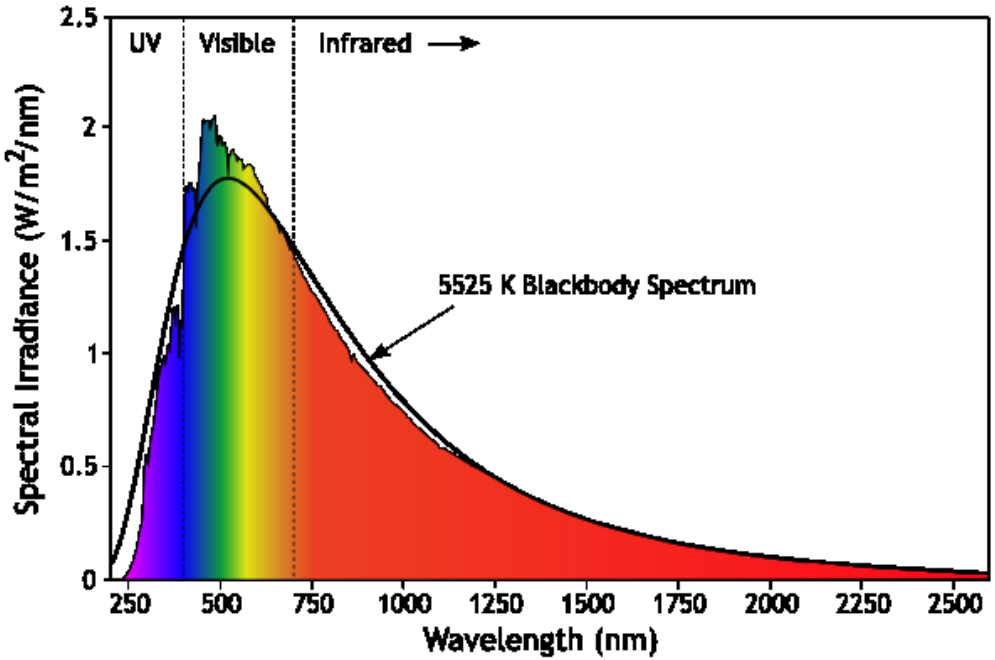


információk: hőmérséklet, látóirányú sebességek, elemgyakoriság

A Nap kontinuum (hőmérsékleti) sugárzásának spektruma

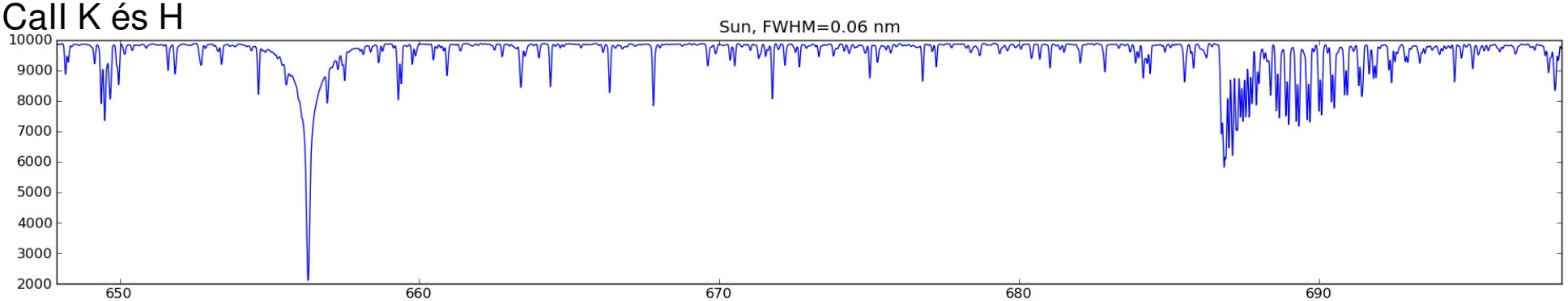
A spektrumvonalak diagnosztikai jellemzői:

– hullámhossz (laborhoz képest)
– vonalszélesség
– vonalmélység
– aszimmetria

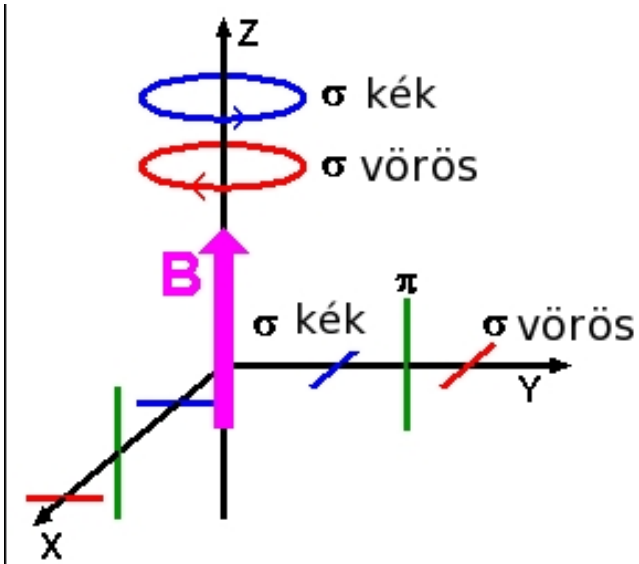




A napspektrum abszorpciós (Fraunhofer) vonalai NaI D H-alfa (6562 Å)
CaII K és H



Polarizáció (mágneses tér) – Zeeman-effektus

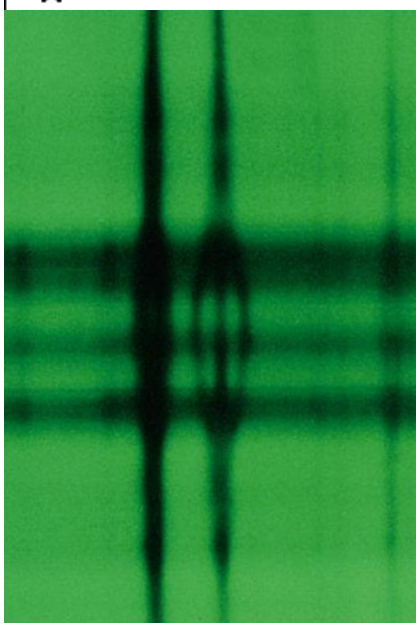


Mérhető, ha g értéke nem nulla!
A σ-komponensek eltolódása:

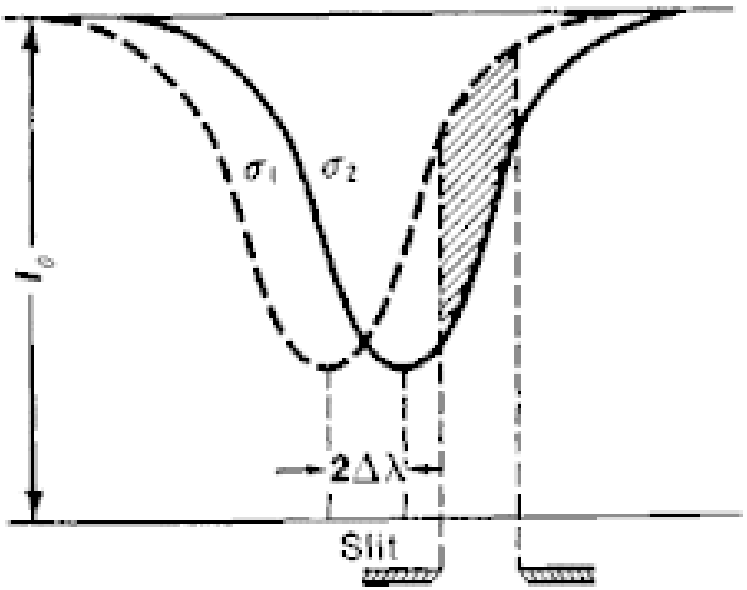
$$\Delta\lambda = 4.67 \cdot 10^{-10} g \lambda^2 B$$

g: Landé-faktor
$[B]$=Gauss
$[\lambda]$=Å
$[\Delta\lambda]$=mÅ

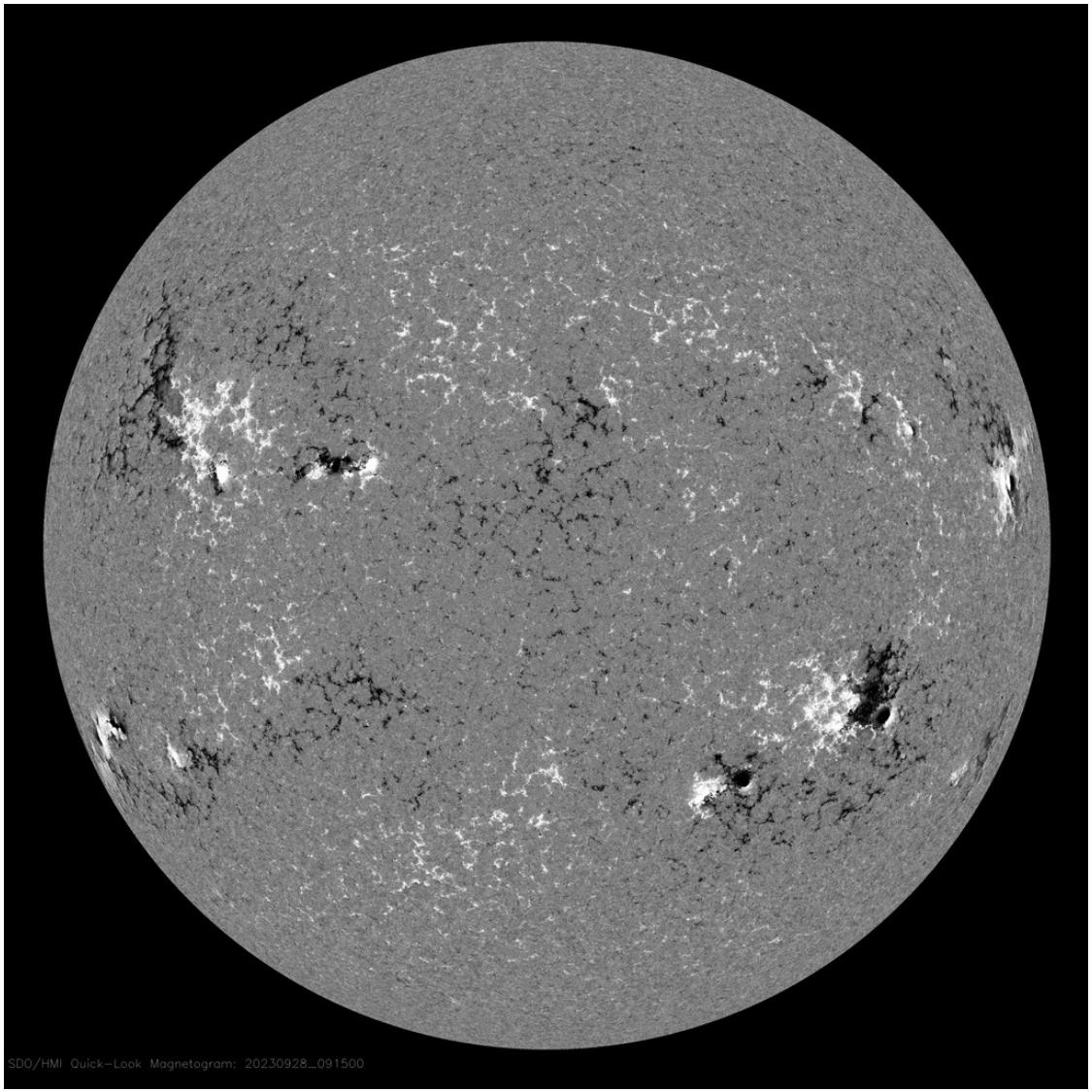
Látóirányú tér mérése Babcock-magnetográfban.
A vonalszárnyban a két σ-komponens különbsége a felhasadást jellemzi.



Zeeman-felhasadás egy napfoltban

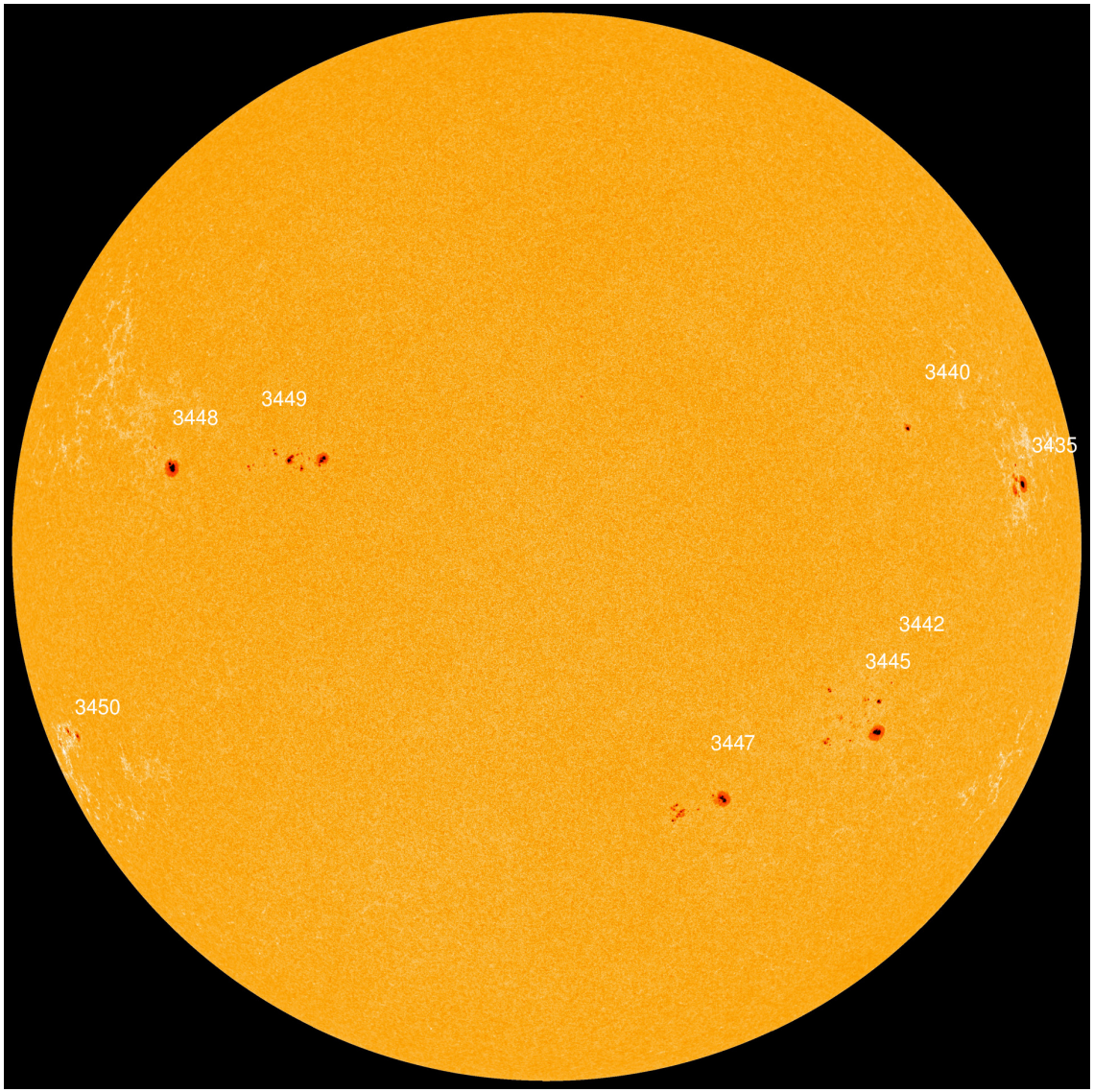


Nap magnetogram



SDO/HMI, 2023.09.28.

Nap kontinuum képe



SDO/HMI, 2023.09.28.

Állapothatározók

A következő paraméterek elégségesek egy csillag állapotának leírására:

- – Fényesség
- – Tömeg
- – Átmérő
- – Hőmérséklet
- – Színkép
- – Rotáció
- – Mágneses tér

Fényesség



Látszólagos fényesség

Fényességet befolyásoló tényezők:

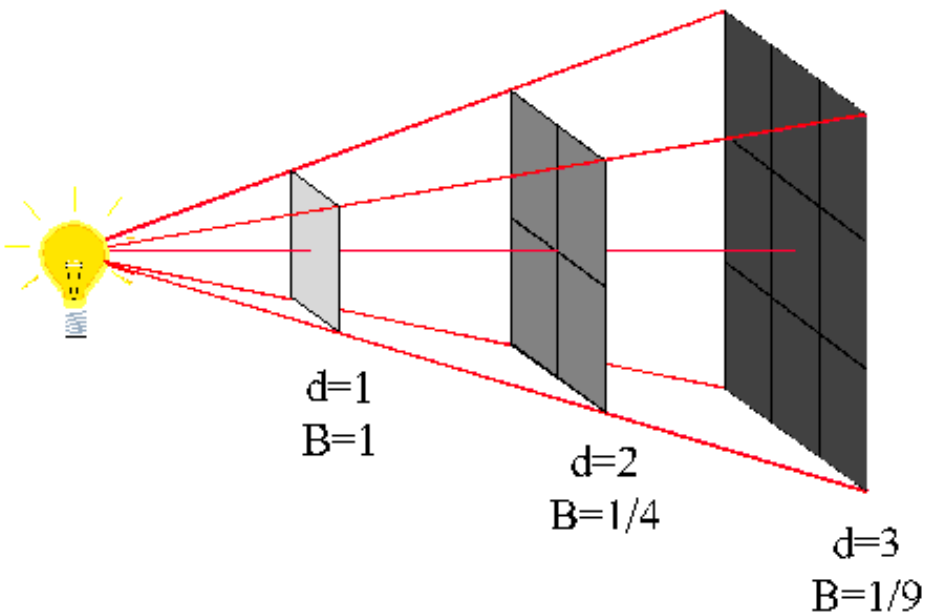
- – valódi fényesség
- – távolság

Látszólagos fényesség:

$$l = \frac{L}{d^2},$$

ahol l: látszó fényesség, L: luminozitás, d: távolság
[L]= W [l]= W/m^2

Luminozitás: egységnyi idő alatt kisugárzott energia

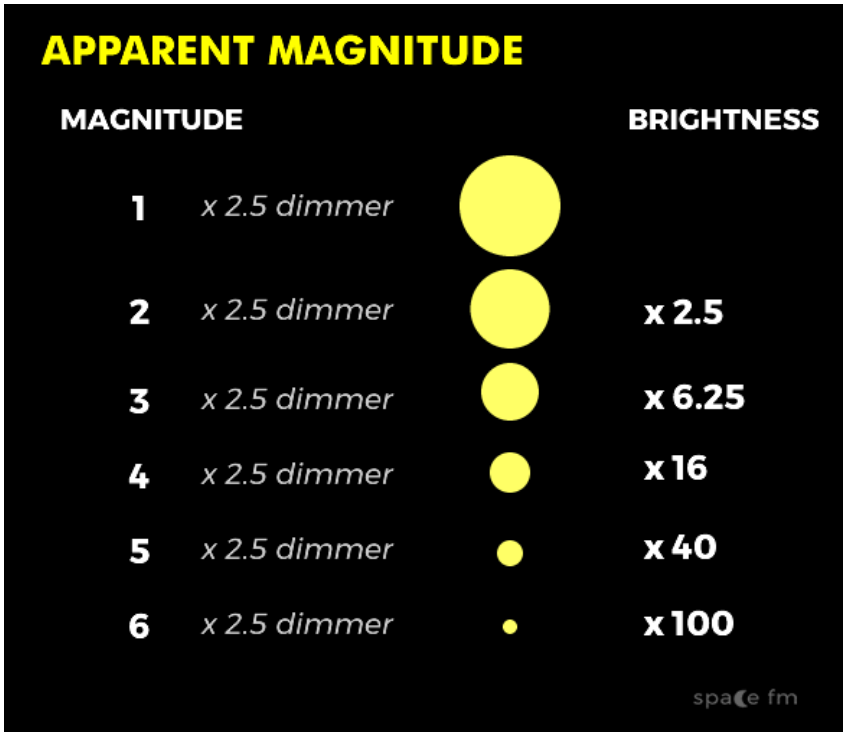


napállandó: az átlagos Nap–Föld távolságban négyzetméterenként és másodpercenként áthaladó energia ($S_\odot = 1367 W/m^2$)

A Nap luminozitása:
$L_\odot = 4\Pi d_\odot^2 S_\odot$

Régi magnitúdó rendszer





- **Hipparchos** (görög csillagász): vizuálisan észlelhető csillagok hat fényességi osztálya
- magnitúdó (görög): nagyságrend
- fényesebbtől a halványabbak (nagyobb számú) felé
- az egyes csoport 100-szor fényesebb, mint a hatos

Új magnitúdó rendszer

Látszólagos magnitúdó (*m*): a Földről megfigyelhető fényesség, mely függ a távolságtól (*r*) és *M*-től.
Weber – Fechner törvény:

$$m = -K_1 \cdot logI + K_2$$

Az ember érzetei az ingerek (*I*) logaritmusával arányosak.

A Hipparchos-skálázással való egyeztethetőség miatt:
Pogson:

$$\frac{m_1}{m_6} = 100,$$

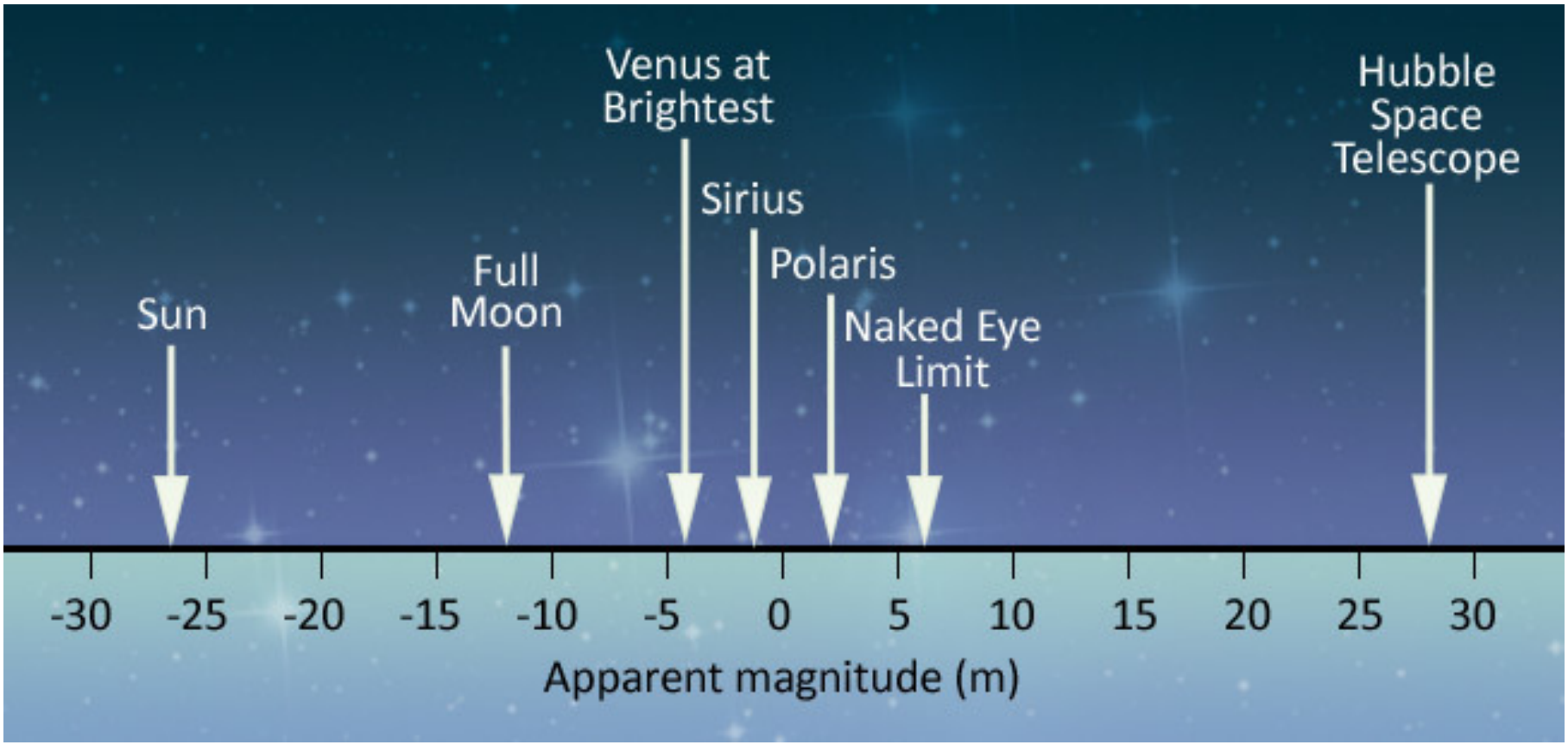
és

$$m_6 - m_1 = 5.$$

Ekkor K_1 = -2.5.

$$m_2 - m_1 = -2.5 \cdot log\frac{I_2}{I_1}$$

Új magnitúdó rendszer



m_{Vega}=0.0

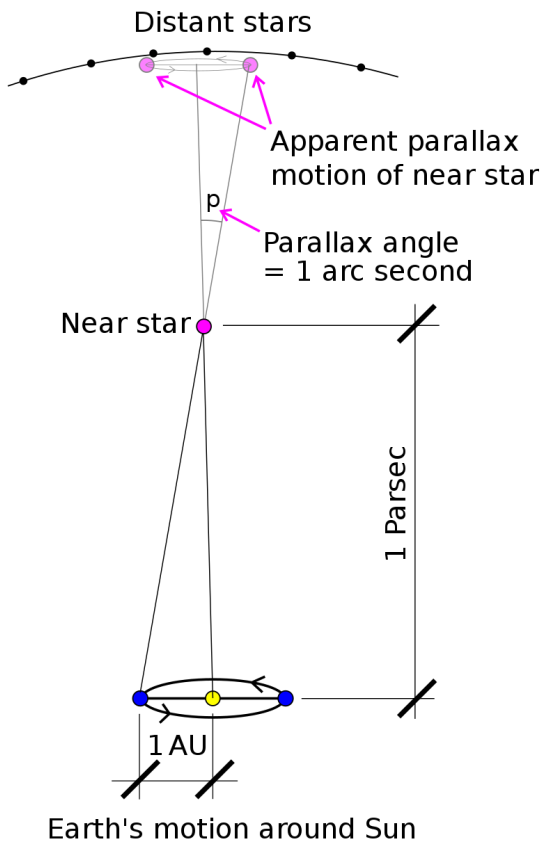
Új magnitúdó rendszer

A csillagok fényessége egyéni érzékenység eredménye, addig a magnitúdó pontosan mérhető mennyiség.

- **abszolút magnitúdó (M)**: egy, a Földtől 10 pc (kb. 33 fényév) távolságra lévő csillag látszólagos magnitúdója

$$M = m + 5 - 5log(r)$$

- **távolsági modulus**: $m - M = 5log(r) - 5$

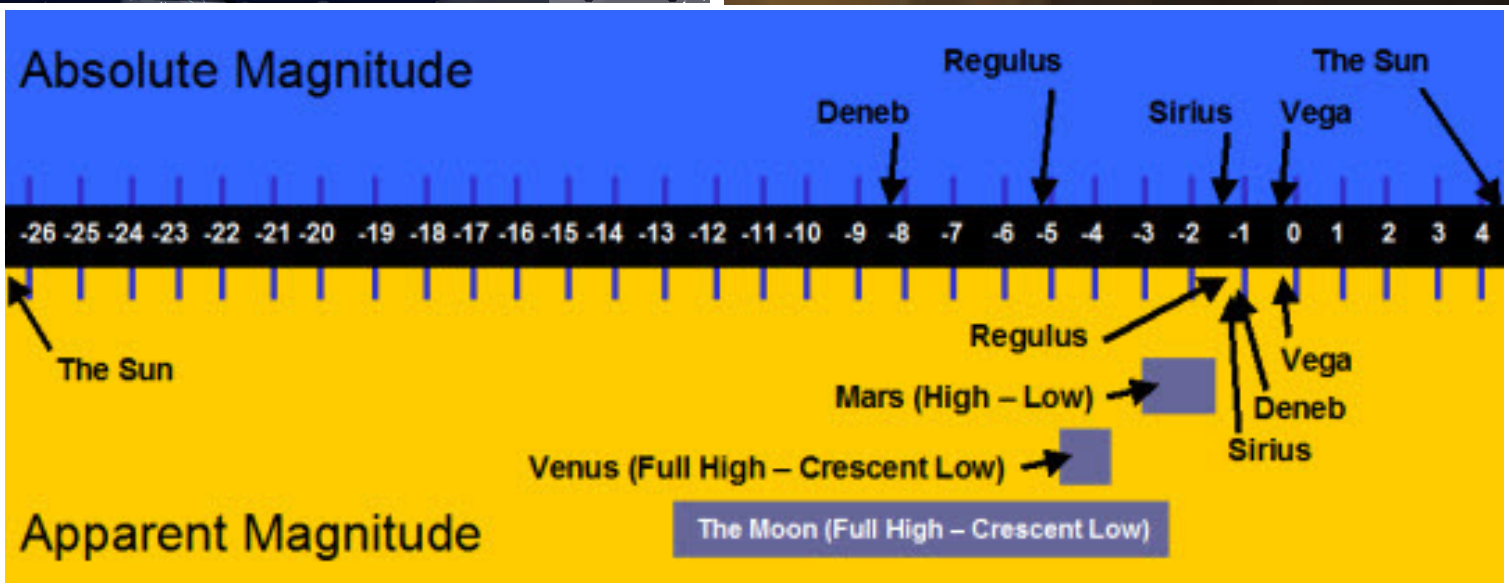


Látszólagos – abszolút magnitúdó

Ilyennek (Alcor) látszana a Nap 10 pc távolságból:





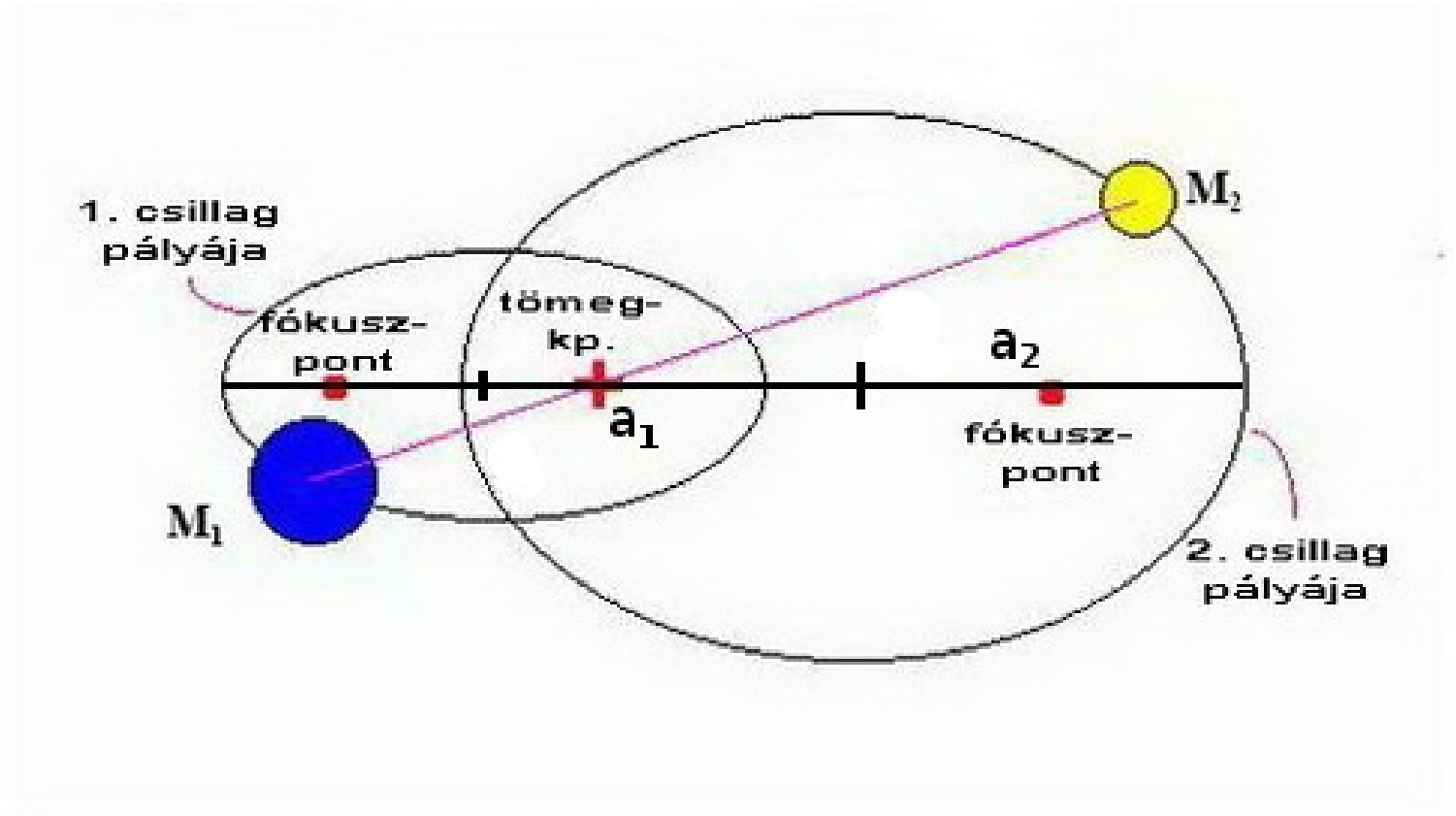


Tömeg

Közvetlenül meghatározható Kepler III.-ból $m_1 + m_2$: ha a csillag kettős rendszer tagja

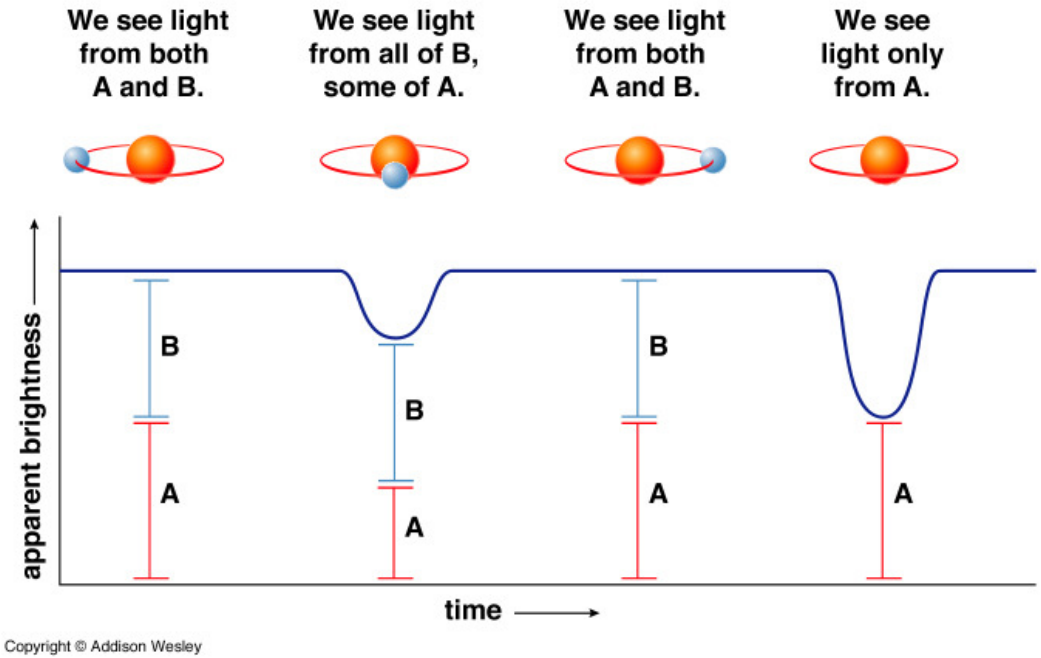
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}$$

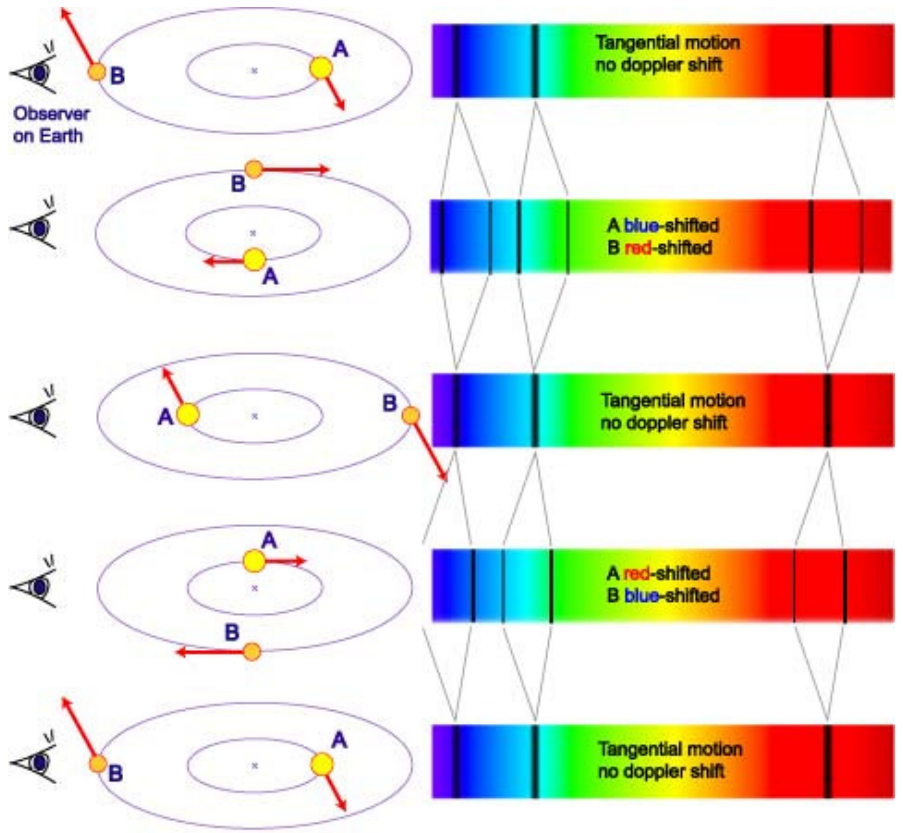
Ha a közös tömegközépponttól mért távolság ismert, akkor m_1 és m_2 külön-külön is meghatározható.



Tömeg

Spektroszkópiai fedési változók esetén:
a vonalak Doppler-eltolódásaiból megkapható a sebességük, majd ennek segítségével a tömegek is meghatározhatók.





A Spectroscopic Binary System
High-mass star A and lower-mass B orbit around a common centre of mass. The observed combined spectrum shows periodic splitting and shifting of spectral lines. The amount of shift is a function of the alignment of the system relative to us and the orbital speed of the stars.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$$

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$$

Tömeg

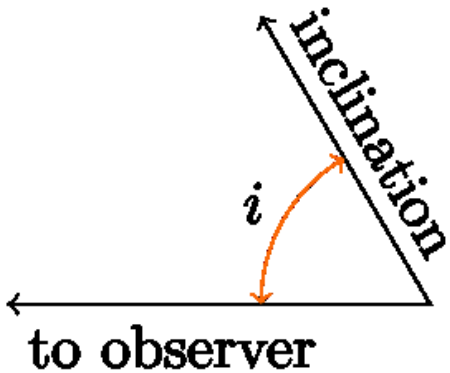
Kepler III. törvénye:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}$$

$$a = \frac{T(v_1 + v_2)}{2\pi}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(m_1 + m_2)} = \frac{4\pi^2 T^3 (v_1 + v_2)^3}{8\pi^3 G(M_1 + M_2)} = \frac{T^3 (v_1 + v_2)^3}{2\pi G(m_1 + m_2)}$$





$$m_1 + m_2 = \frac{T}{2\pi G}(v_1 + v_2)^3$$

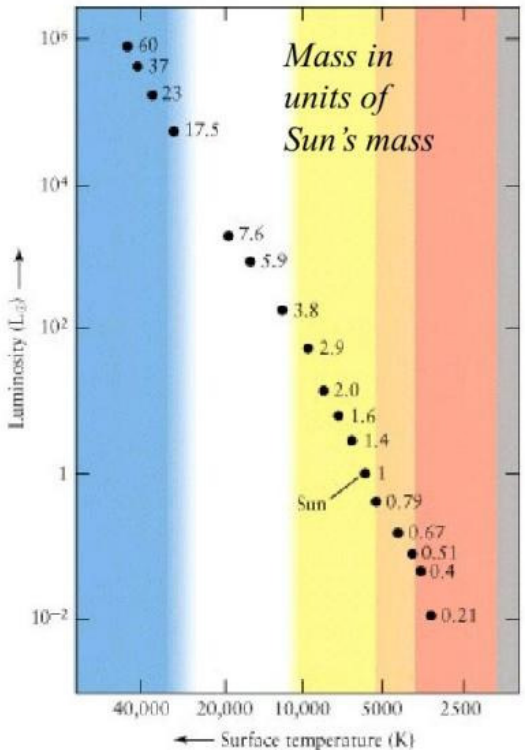
A v_{r_1} és v_{r_2} megfigyelhető radiális sebességek helyettesítésével:

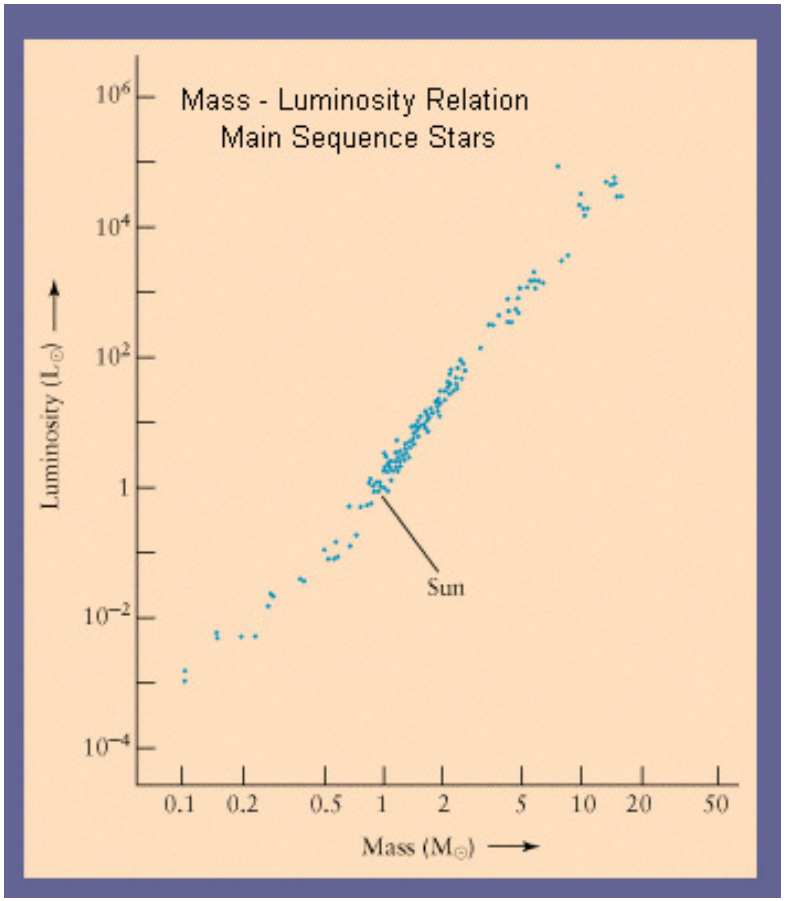
$$m_1 + m_2 = \frac{T}{2\pi G}\frac{(v_{r_1} + v_{r_2})^3}{sin^3 i}$$

Tömeg–fényesség reláció

$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^a$$

a=2.3, ha M<0.43$M_\odot$
a=4, ha 0.43$M_\odot$<M<2$M_\odot$
$a \approx 3.5$, ha 2$M_\odot$<M<20$M_\odot$
$L/L_\odot \approx 3200 M/M_\odot$



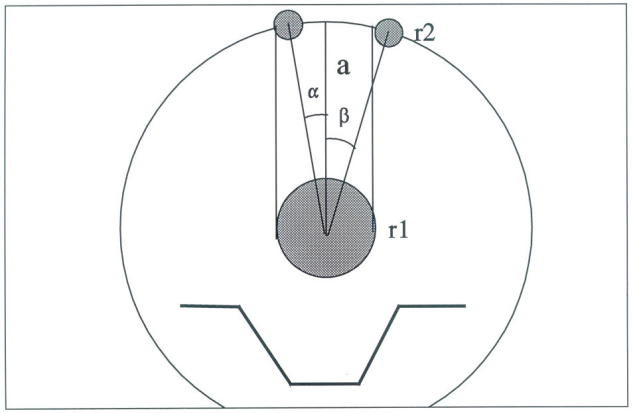


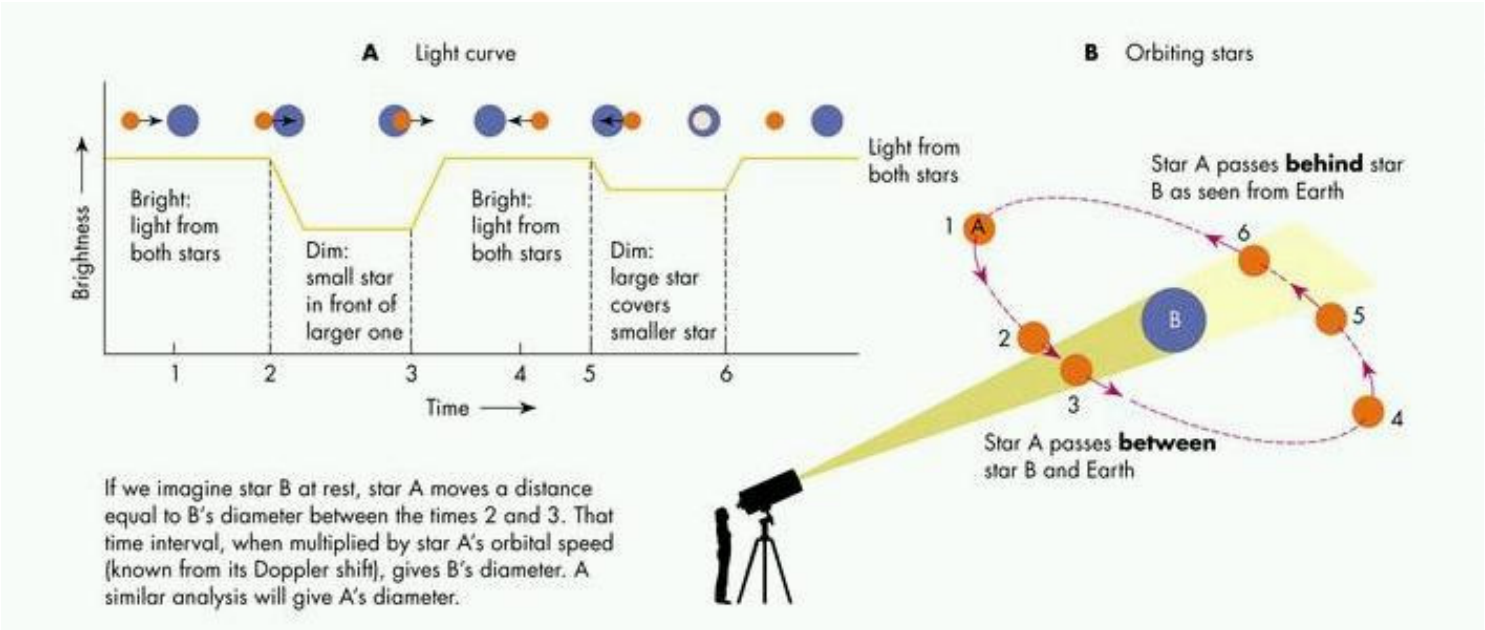
– csak fősorozati csillagokra
– kettőscsillagok megfigyeléséből származó empírikus eredmény
– minél nagyobb tömegű egy csillag, annál fényesebb és forróbb

Átmérő

Közvetlenül csak a Nap esetében mérhető. Más csillagoknál más módszerek szükségesek a meghatározására.

Meghatározható pl. **fedési kettősök fénygörbéjéből**:





$$\sin\alpha \approx \frac{r_1 - r_2}{a}$$

$$\sin\beta \approx \frac{r_1 + r_2}{a}$$

$$\frac{2\alpha}{2\pi} = \frac{t_3 - t_2}{P}$$

$$\frac{2\beta}{2\pi} = \frac{t_4 - t_1}{P}$$

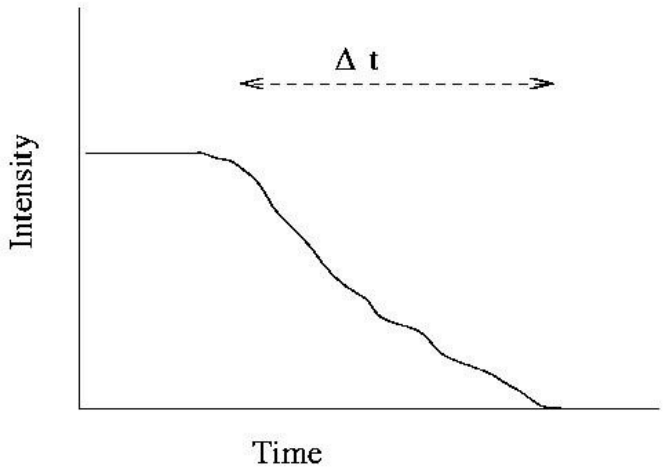
Átmérő

Ritkán meghatározható **holdfedések fénygörbéjéből** is:



A csillag távolságának ismeretében átmérője km-ekben is megadható.

A csillag Θ szögátmérője megkapható a Hold szögsebességének és a csillag teljes intenzitásesés idejének (Δt) ismeretében.



is just the angular size of the star **θ** divided by the angular speed **v** of the Moon through the sky.

$$\theta = v * (\Delta t)$$

Effektív hőmérséklet

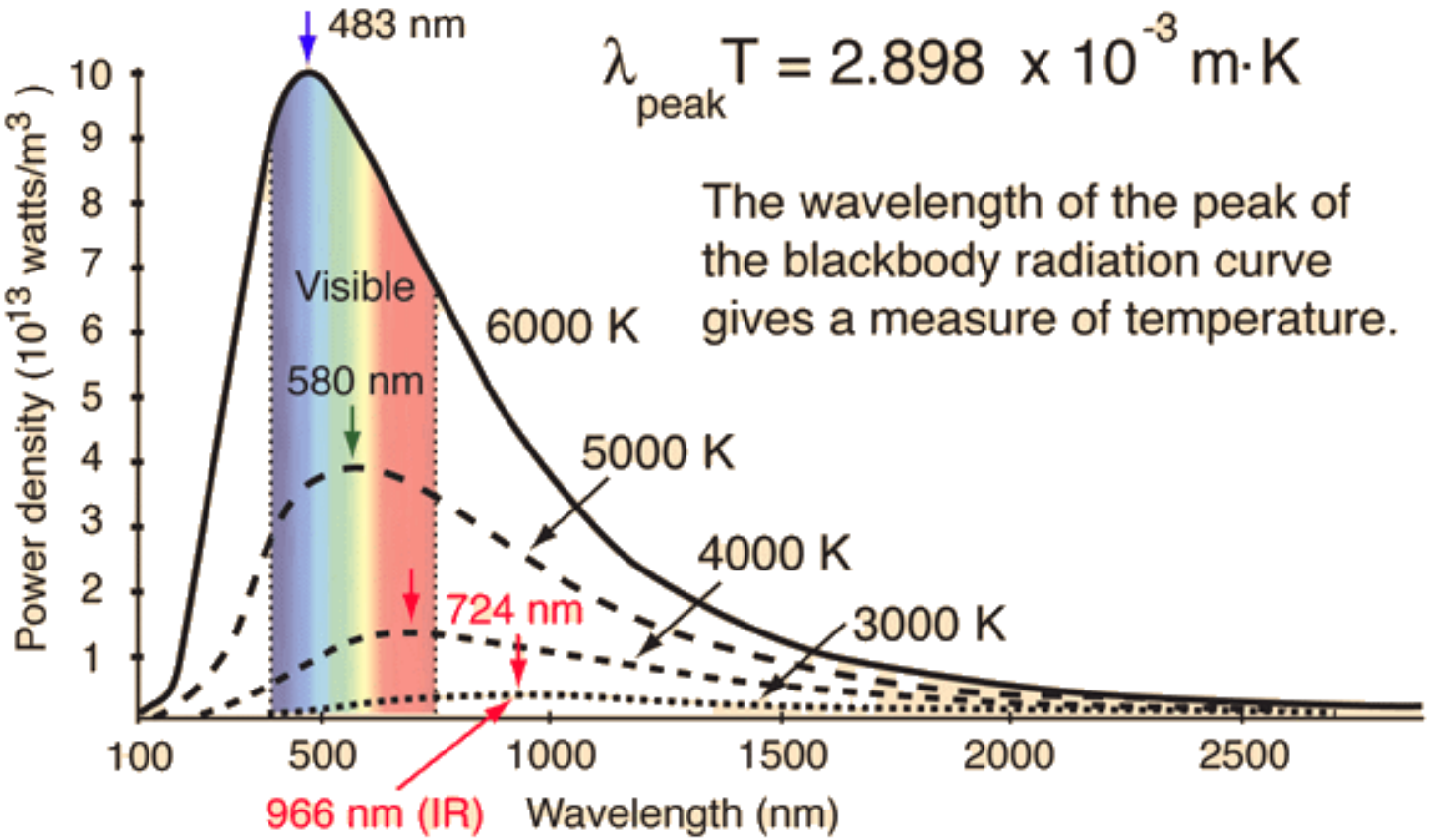
Olyan fekete test hőmérséklete, melynek elektromágneses sugárzási teljesítménye ugyanannyi, mint a vizsgált csillagé.

$$L = 4\pi r^2 \sigma T_{eff}^4$$

Stefan–Boltzmann törvény: $R = \sigma T_{eff}^4$: fekete test felület egységnyi területének sugárzási teljesítménye.

Újabb lehetőség a csillag átmérőjének meghatározására (L és T ismeretében)!

Wien–hőmérséklet

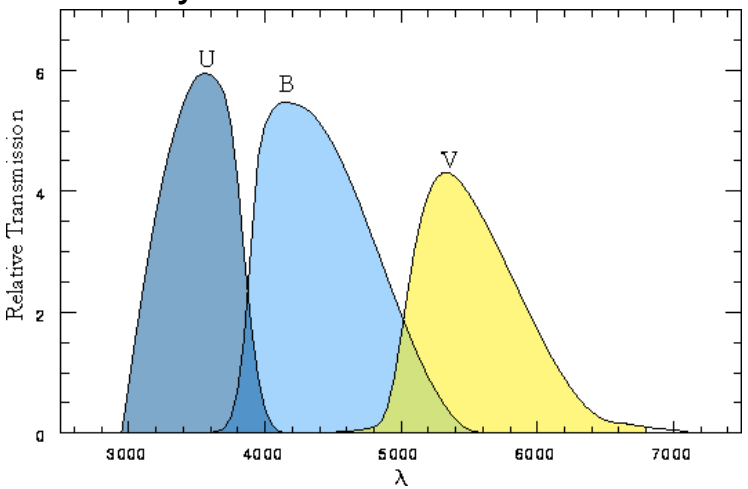


$\lambda_{max} T_W = 2.89 \cdot 10^7$ ÅK

Meghatározható a hőmérsékleti sugárzás maximumának hullámhossza.

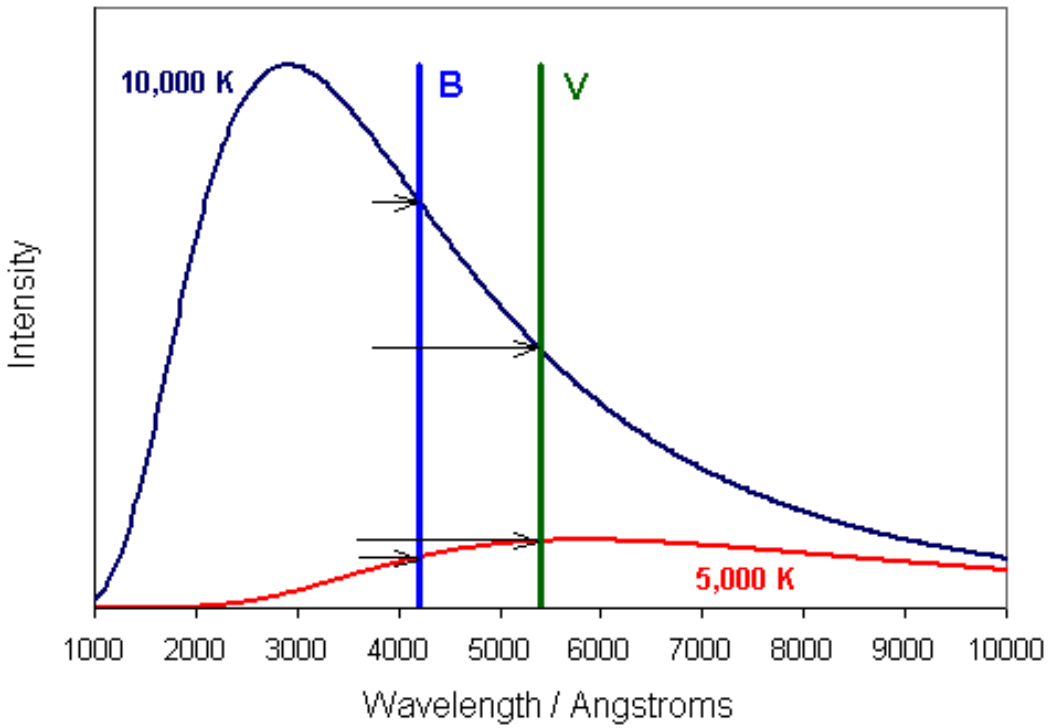
Színhőmérséklet, színindex

Szabványos UBV szűrők áteresztése:



UBV rendszer: ultraibolya (364 nm)
kék (442 nm) és
vizuális (540 nm) magnitúdók

Színindexek: abszolút fényességek különbsége (U-B, B-V)
Intenzitások magnitúdóban!!!

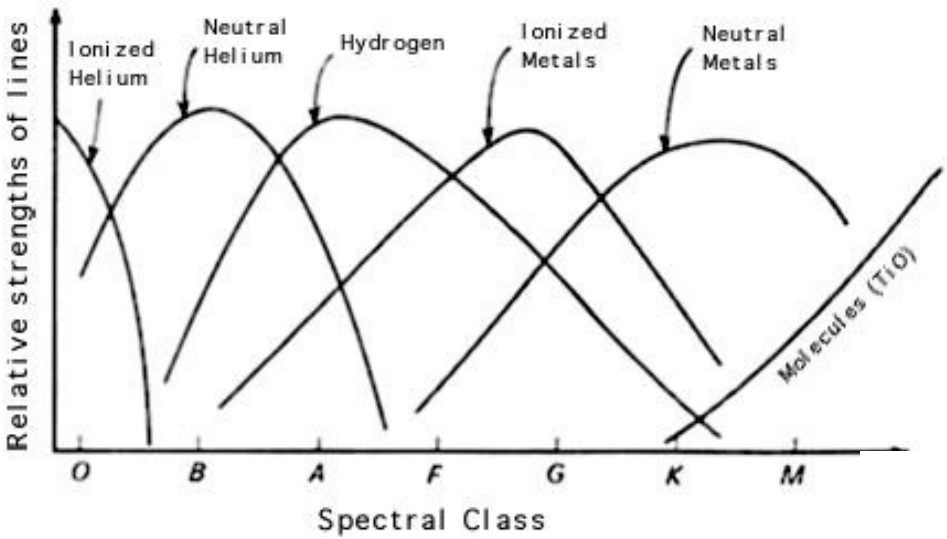


A B és V szűrőkkel kapott B-V színindex a hőmérsékletet jellemzi egyszerű méréssel.

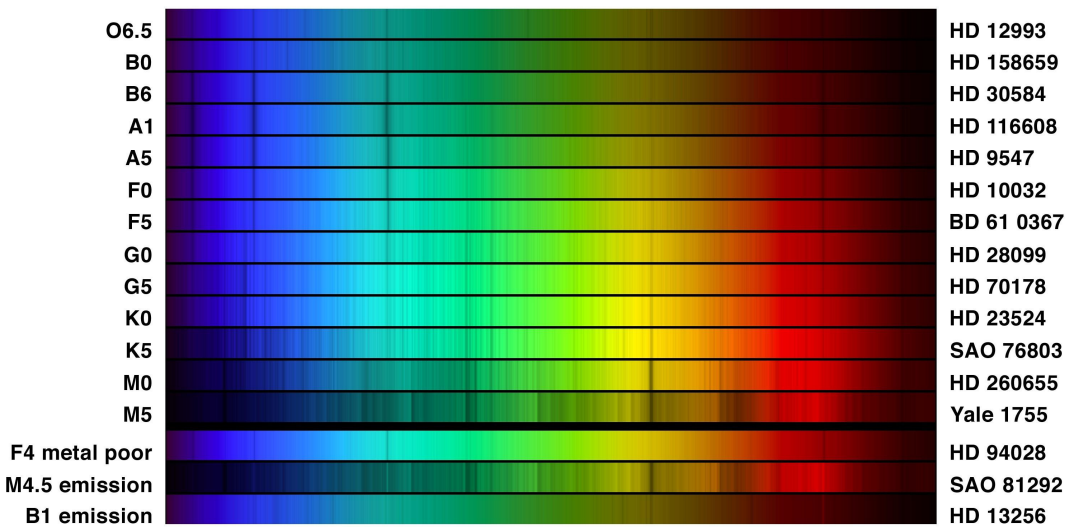
O és B típusú csillagokra: B-V<0
A-ra: B-V=0
F, G, K, M-re: B-V>0

Színkép

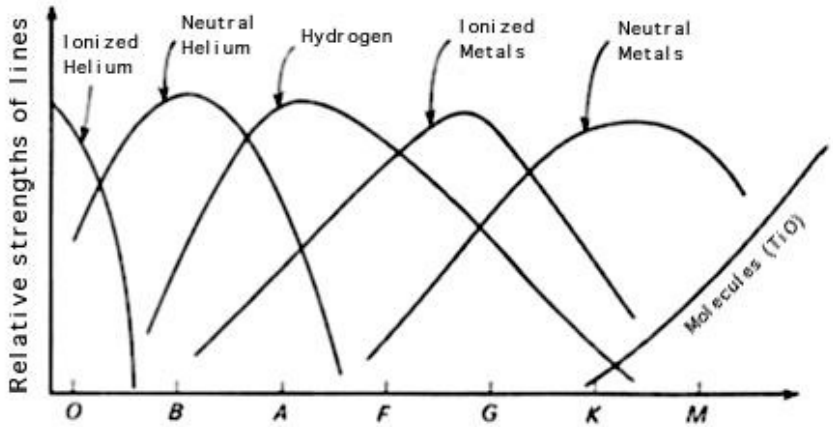
Különböző hőmérsékleten különböző vonalak erősödnek meg.



Színképosztályok: O, B, A, F, G, K, M



Színkép

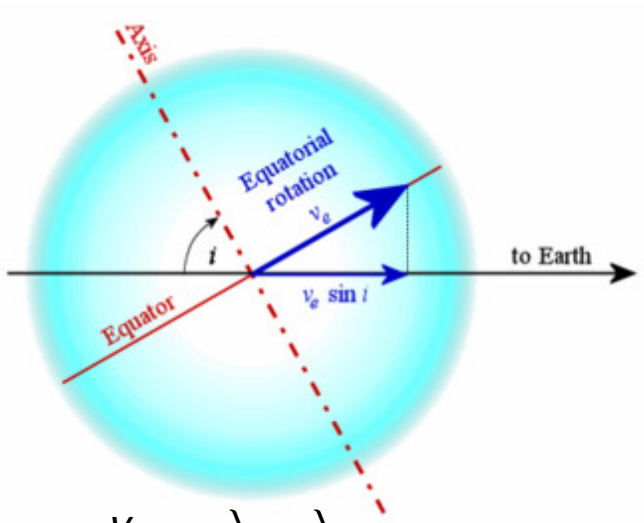


Színképtípusok jellemzői

Sp. típus	Felszíni hőmérséklet	Szín	Spektrális jellemzők	Példa
O	30000 -	kékes-fehér	Fényes folytonos színkép kevés abszorpciós vonallal. Az ionizált He és néhány más magasan ionizált elem vonalai dominálják a színképet. A H vonalai gyengék.	
B	11000 - 30000	kékes-fehér	Semleges He abszorpciós vonalai. B9-ig ezek fokozatosan halványodnak, miközben a H vonalai erősödnek.	Rigel, Spica
A	7500 - 11000	fehér	A színképet a H erős vonalai uralják, de A9-ig halványulnak. Megjelennek egyes ionizált fémvonalak is (Ca H és K vonala).	Sirius, Vega
F	6000 - 7500	fehér sárgás-fehér	A H vonalainak intenzitása tovább csökken, s erősödik a Ca H és K vonala, de megjelennek más ionizált fémvonalak is.	Canopus, Procyon
G	5000 - 6000	sárga	A H-vonalak tovább gyengülnek, s itt a legerősebbek a H és a K vonalak. Az osztály vége felé a fémvonalak intenzitása meghaladja a hidrogén vonalainak intenzitását.	Nap, Capella
K	3500 - 5000	sárgás-narancs	A H vonalai már alig látszanak. Erősek a Ca H és K vonalai, s TiO sávok is megjelennek.	Arcturus, Aldebaran
M	- 3500	vörös	Erős neutrális fémvonalak. A TiO sávok a legerősebbek.	Betelgeuse, Antares

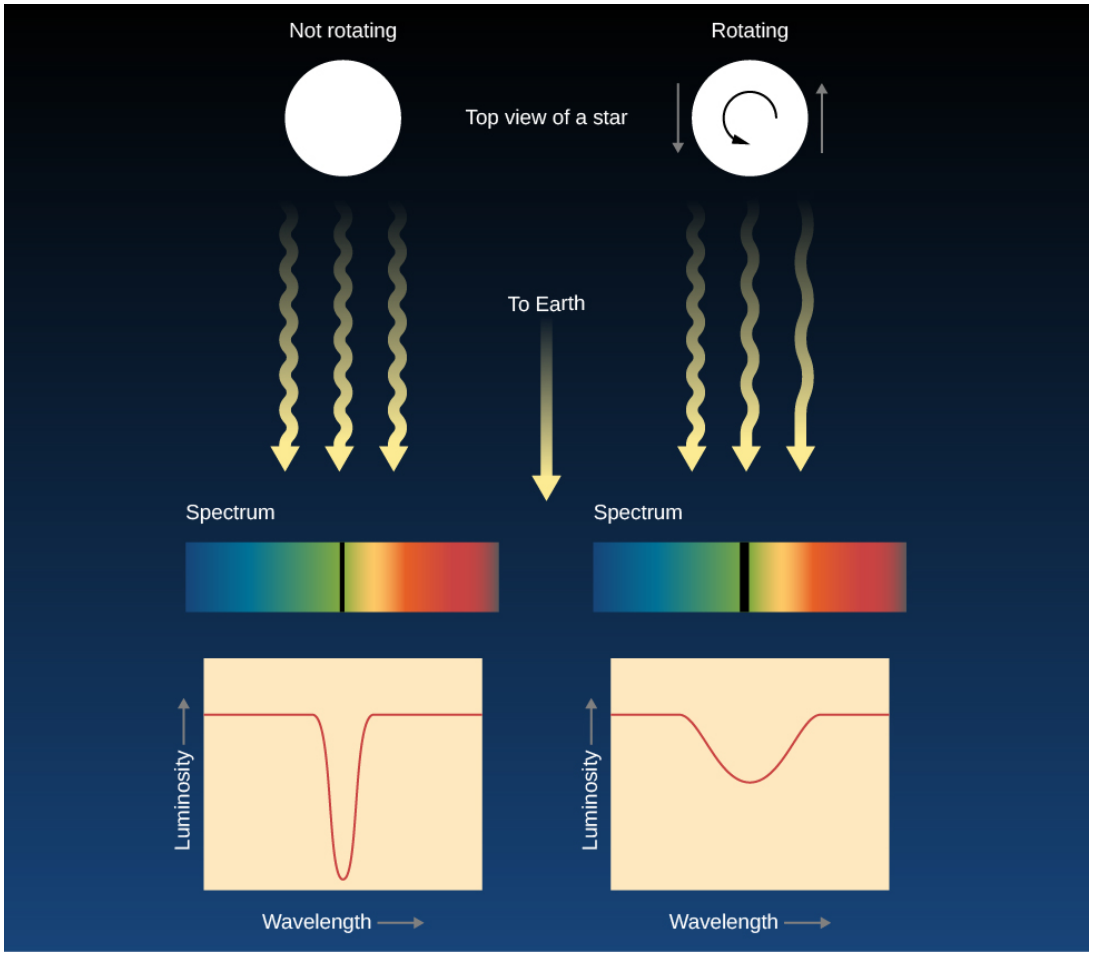
Rotációs sebesség mérése

Spektroszkópiai módszer a rotációs sebesség meghatározására: a forgástengely–látóirány szöge *i* nem ismert, ezért csak a $v_r = v_e \sin i$ mérhető a vonal-kiszélesedésből.

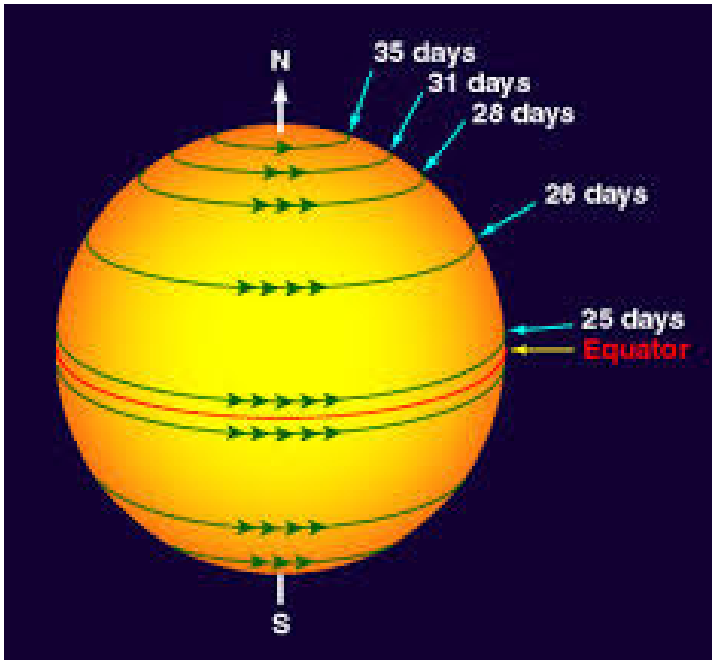


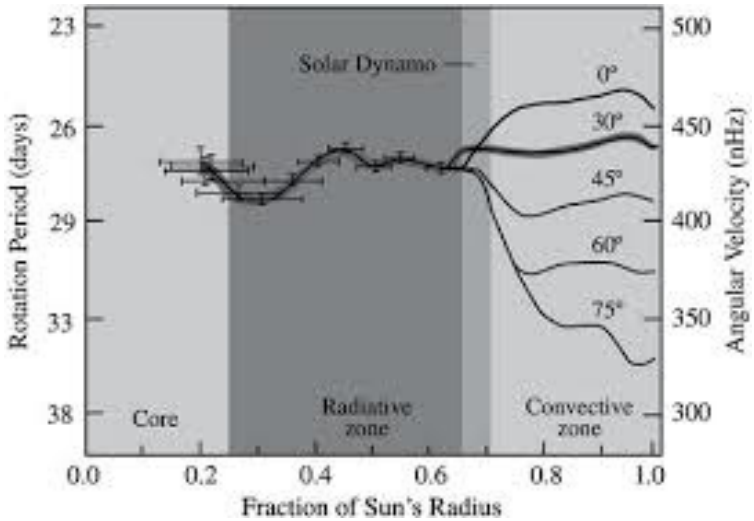
$$\frac{v_r}{c} = \frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o}$$

ha $v_r << c$

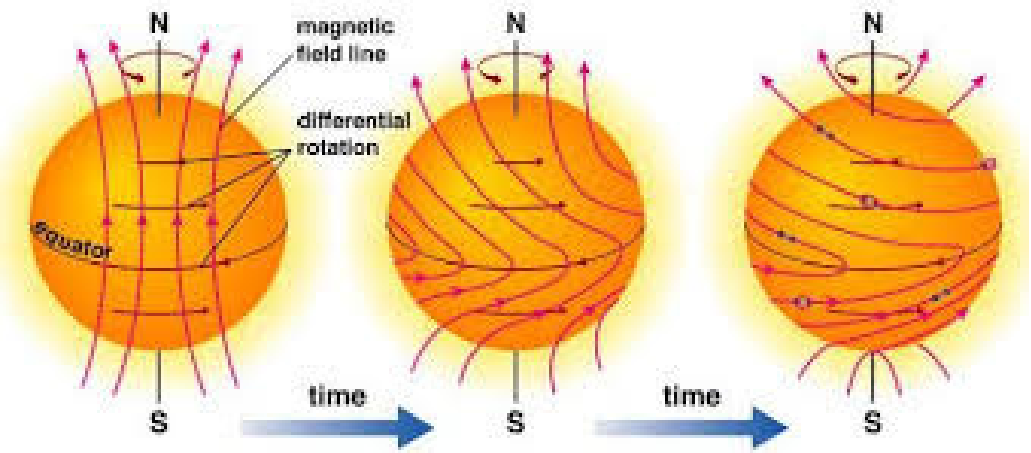


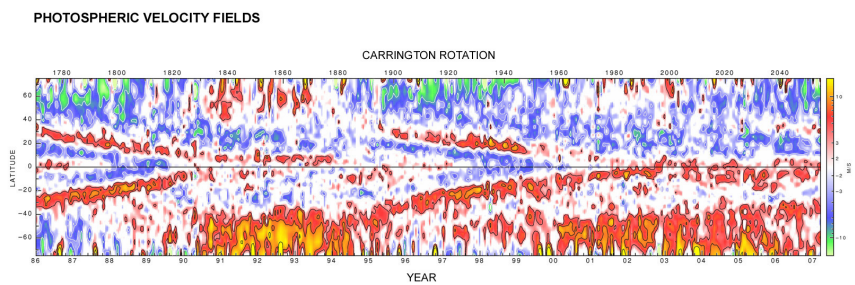
A Nap rotációja





– differenciális rotáció
– a diff. rot. mélységfüggő: a konvektív zónában követhető
– a mag már merev testként rotál
– mágneses erővonalak feltekeredése (befagyás)





A diff. rot. torziós oszcillációja.

Rotáció

Tapasztalatok:

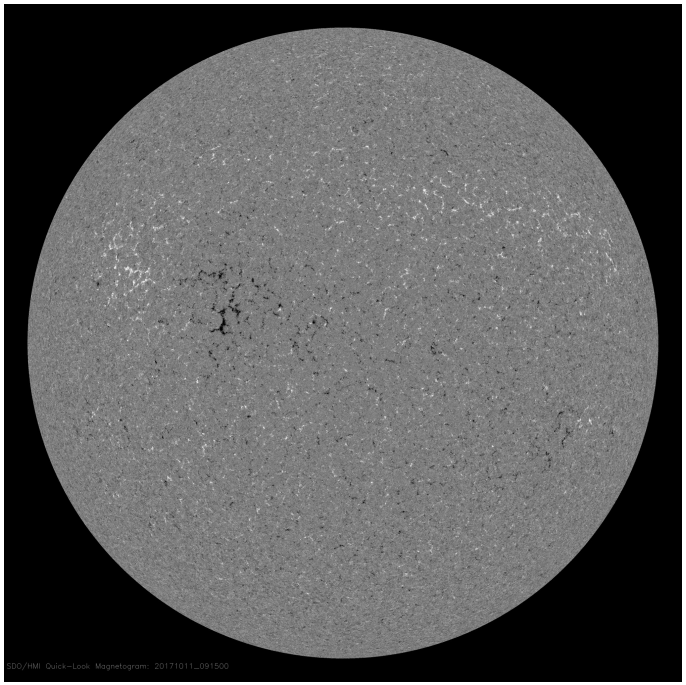
1) Korai színképtípusú (nagyobb tömegű) csillagok rotációja gyorsabb.

2) Idővel minden csillagnak csökken a rotációs sebessége (mágneses fékezés).

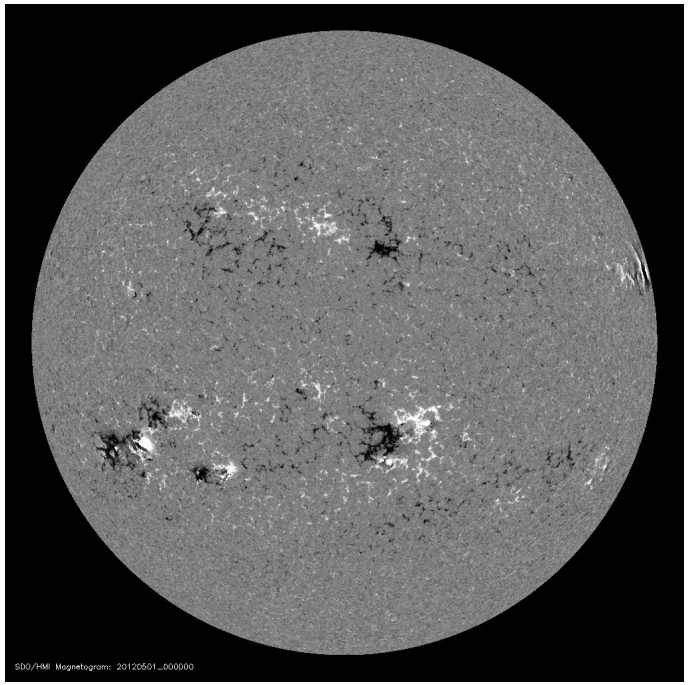
3) Szupernóva utáni összeomlásban keletkező neutroncsillag rotációs periódusa igen rövid (millisec) az impulzusmomentum-megmaradás miatt.

4) A Nap (és valószínűleg minden csillag) rotációja differenciális.

A Nap mágneses tere



(SDO HMI 2017.10.11.)



(SDO HMI 2012.05.01.)

A napfoltok mágneses mezejének erőssége 0.2 – 0.3 T.

A Nap egésze rendelkezik mágneses mezővel.

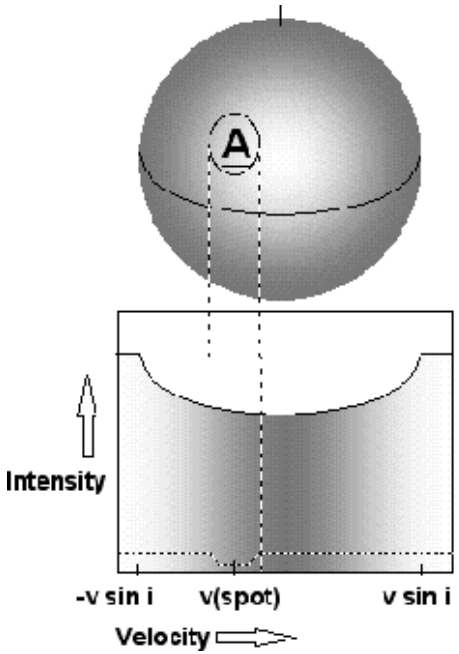
Naptevékenység: a mágneses mező változása (poloidális tér – toroidális tér), 11 és 22 éves napfoltciklus.

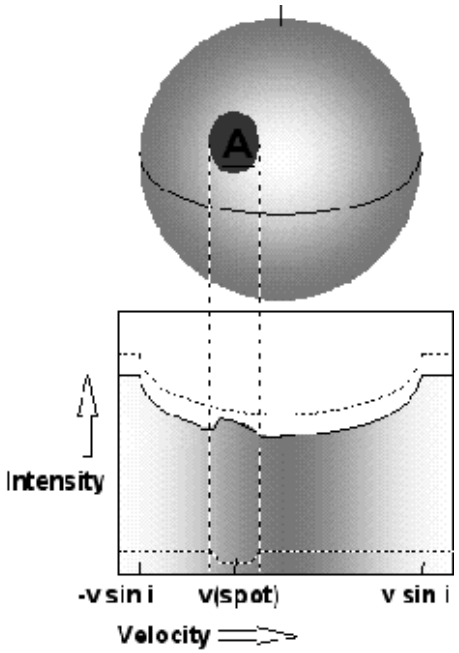
Csillagok mágneses tere

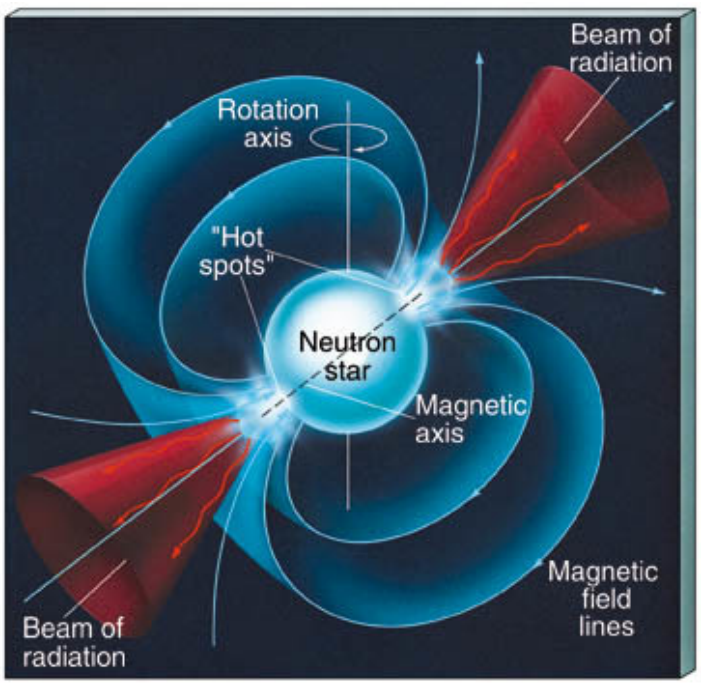
Korai színképtípusok mágneses tere jelentős.

A mágneses tér mérése $i \approx 0$-nál megbízható.

A napfoltokhoz hasonlóan csillagfoltok is léteznek.







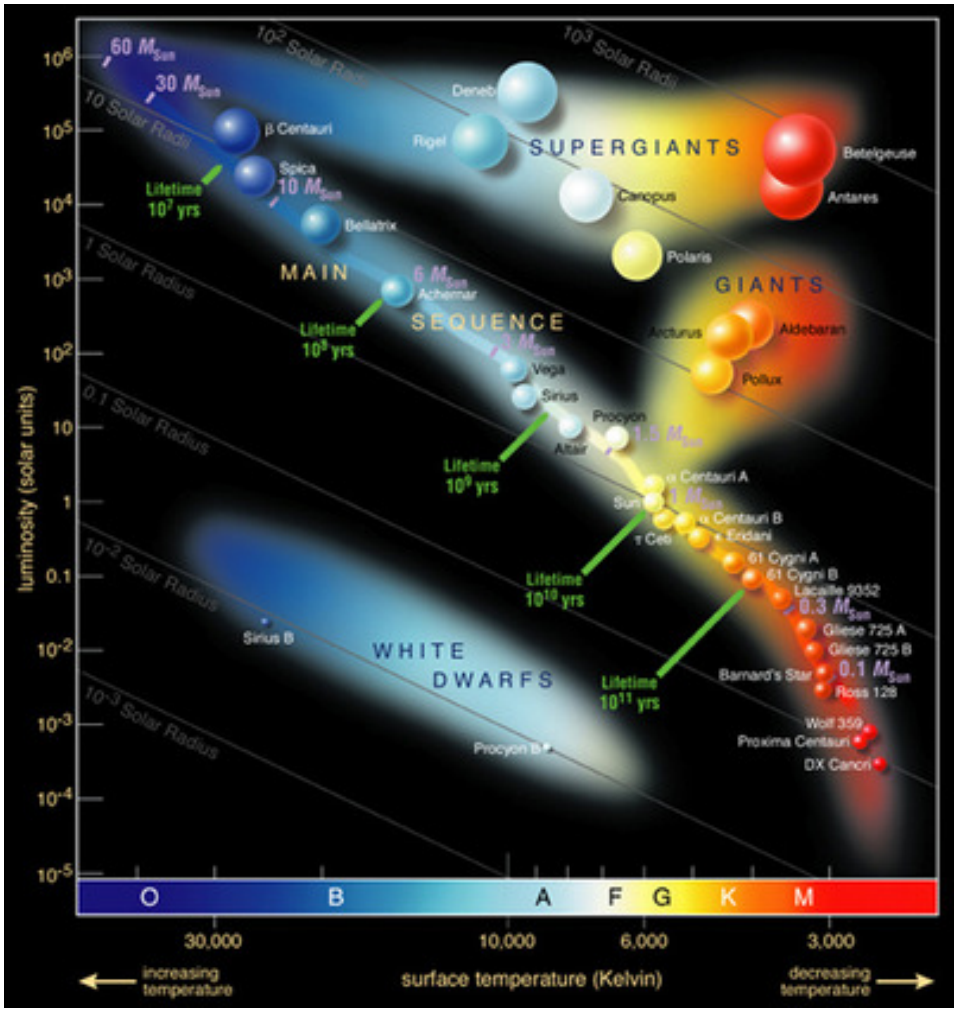
A neutroncsillagok néhány tíz km átmérőjű, nagy sűrűségű maradványcsillagok.
Gyorsan forgó, életük végéhez érő csillagok, melyeknek jelentős mágneses tere van.

Csillagok mágneses tere

objektum	mágnesesfluxus-sűrűség (T)	jellemző méret (km)	megjegyzés
Föld	0,0001	10 000	enyhe aszimmetria, időbeli változás
bolygók	10^{-8}– 0,001	1000 – 100 000	
Nap	kb. 0,1 (napfoltok)	10^{6}	enyhe aszimmetria, időbeli változás, mágneses ciklusok, hosszú minimumok
hideg csillagok	?	10^{6}	a naptevékenységhez hasonló mágneses ciklusok
forró csillagok	1	10 000	
fehér törpék	10 000	10	ferde rotátor
neutroncsillagok	10^{8}	10	ferde rotátor
magnetárok	10^{11}	10	ferde rotátor
galaxisok	10^{-9}	10^{18}	tengelyes szimmetria
intergalaktikus tér	$<10^{-10}$	$>10^{20}$	

(Szabados László: Kozmikus mágnesség, Magyar Tudomány, 2014/3)

Hertzsprung–Russell diagram (HRD)



– T & L diagram ($L_\odot = 1$)

– főág (Main Sequence): a legtöbb csillag itt található
Stacionárius termonukleáris energiatermelő folyamat egyensúlyi állapotot tart fenn.

– a forróbb csillagok fényesebbek és nagyobb tömegűek a fősorozaton

– a vízszintes tengelyt akár tömeg szerint is lehetne skálázni

Fősorozatról elkerült csillagok:

– óriáság és szuperóriáság
– törpék: életük végén járó csillagok

M(r), P(r)-re:

- **Tömegmegmaradás**:

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho \tag{1}$$

egy *dr* vastagságú gömbhéjban *dm* tömeg található.

- **Hidrosztatikai egyensúly**:

$$\frac{dp}{dr} = -G\rho_r \frac{M_r}{r^2} \tag{2}$$

- **Mozgásegyenlet**:

$$\rho \frac{d\nu}{dt} = -\frac{dp}{dr} - \rho g \tag{3}$$

A gázra a nyomásgradiens és a gravitációs erő hat.

T(r), L(r)-re:

- **Luminozitás változása**:

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon \tag{4}$$

ε az egységnyi tömegben termelt energia.

- **Hőmérséklet változása**:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{3}{16} \cdot \frac{\kappa \rho l}{acT^3 \pi r^2} \tag{5}$$

sugárzási energiatranszport esetén.
Konvektív energiatranszport esetén:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \frac{\partial T}{\partial P} \tag{6}$$

- **Gáz állapotegyenlete**:

$$p = \frac{R}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4 \tag{7}$$

A gáznyomás és a sugárzási nyomás összege.

Vogt–Russel tétel

Egy hidrosztatikus és termikus egyensúlyban lévő **csillag struktúráját egyértelműen meghatározza az össztömege** (M) **és az elemösszetétel eloszlása**, amennyiben az össznyomás (P), az egységnyi tömegre eső belső energia (E_i), a κ opacitás és az energiatermelés (ε) mértéke csak a sűrűség (ρ), a hőmérséklet (T) és az elemösszetétel lokális értékeitől függ.