ŰRCSILLAGÁSZAT

BEVEZETÉS

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem

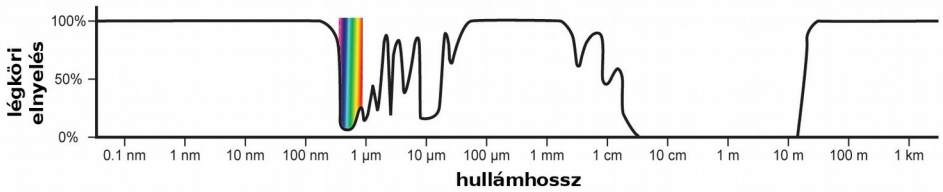
2019

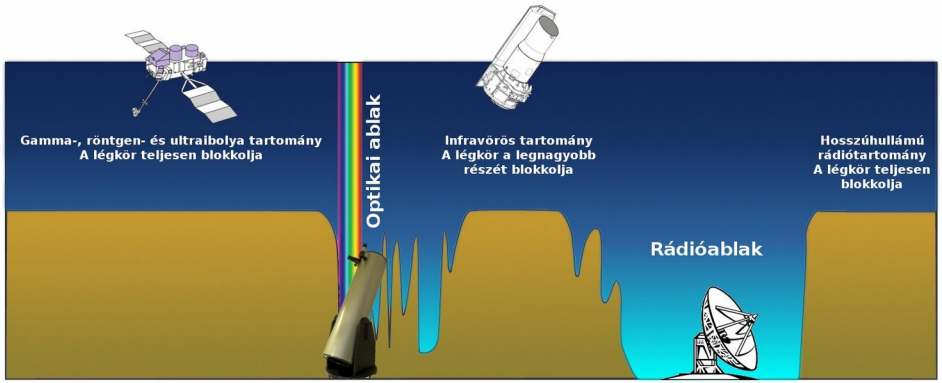
Az űrcsillagászat előnyei

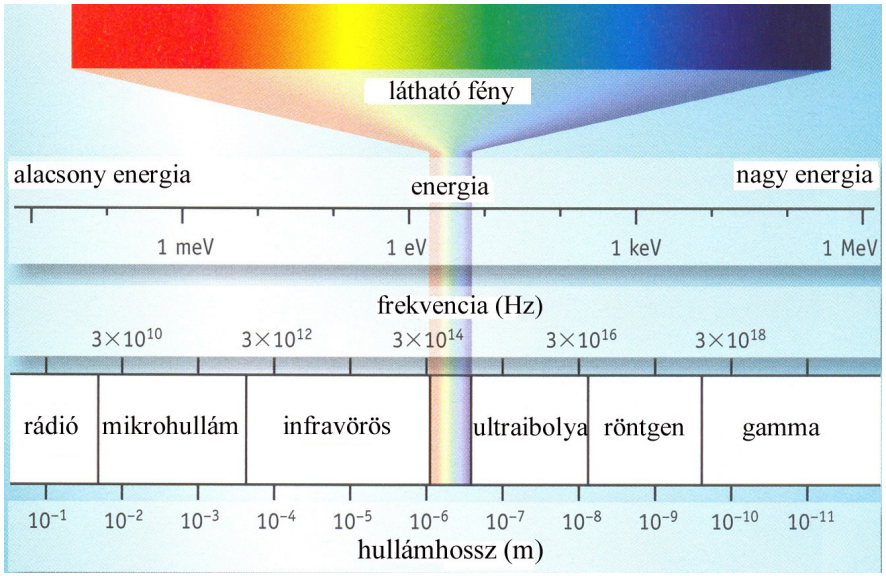
A csillagászati megismerés mérföldkövei (szóban ismertetve)

Költséges – mi indokolja az űrcsillagászat művelését?

- *in situ* (a Naprendszeren belül)
- *színképtartomány:* 3×10^{-16} - 3000 m hullámhosszak között
- *nemcsak elektromágneses információ:* kozmikus sugárzás, gravitációs hullám (*többcsatornás csillagászat*)







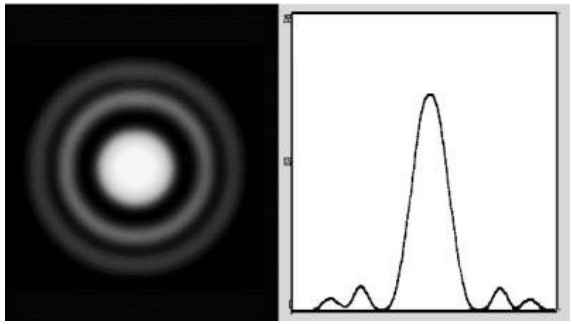
Az űrcsillagászat előnyei (folytatás)

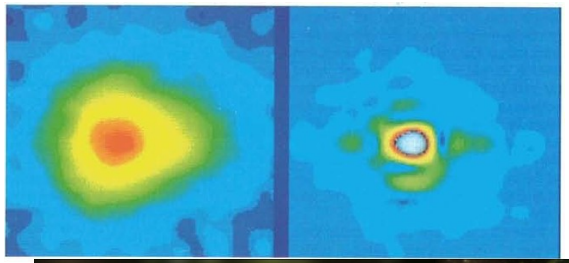
- *felbontóképesség:*

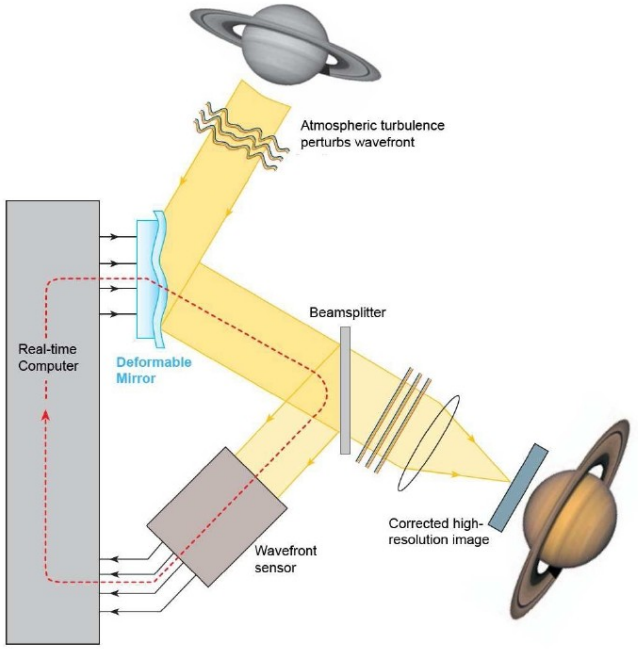
elvi határa $2{,}52 \cdot 10^5 \lambda/d$ [ívmásodperc] $\cong$ 0,01" .

A turbulencia ellen földi észlelésnél adaptív optika alkalmazása (pl. Deneb és a Tejútrendszer centruma).

Interferometriával is növelhető a szögfelbontás. Űrszegmense az űr-VLBI. 1 CSE bázishossz esetén 10^{-8} ívmásodperc felbontás.

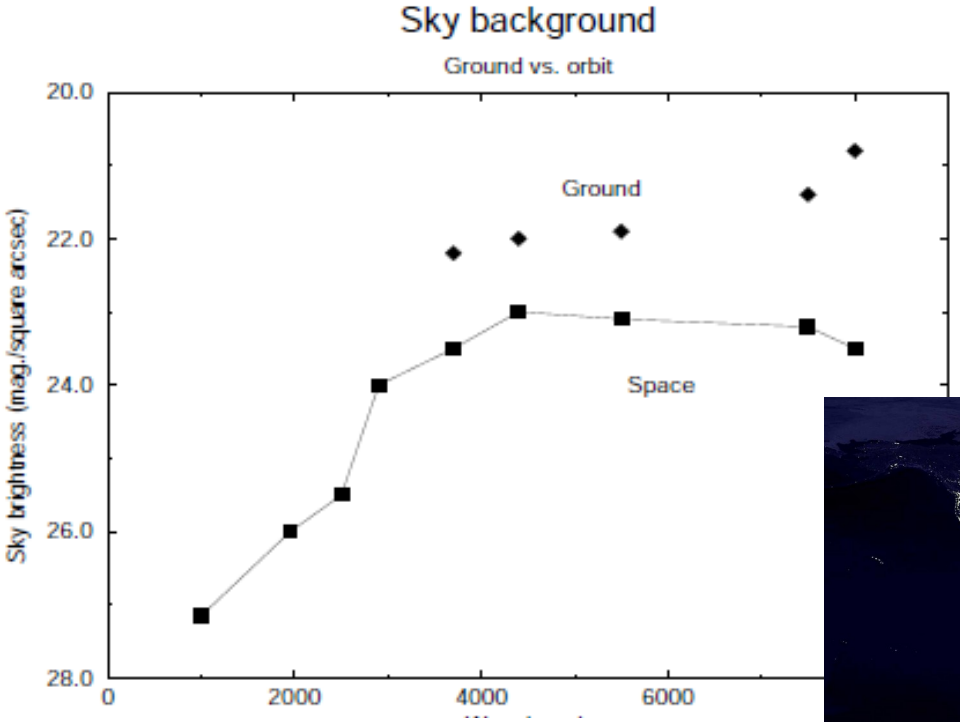


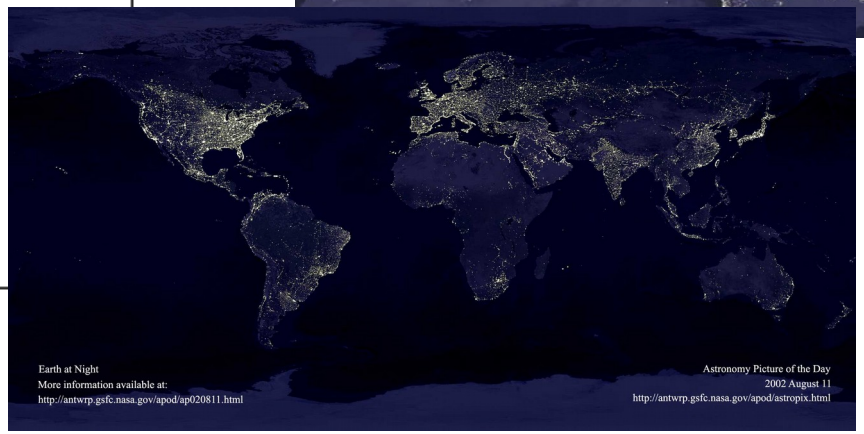




Az űrcsillagászat előnyei (folytatás)

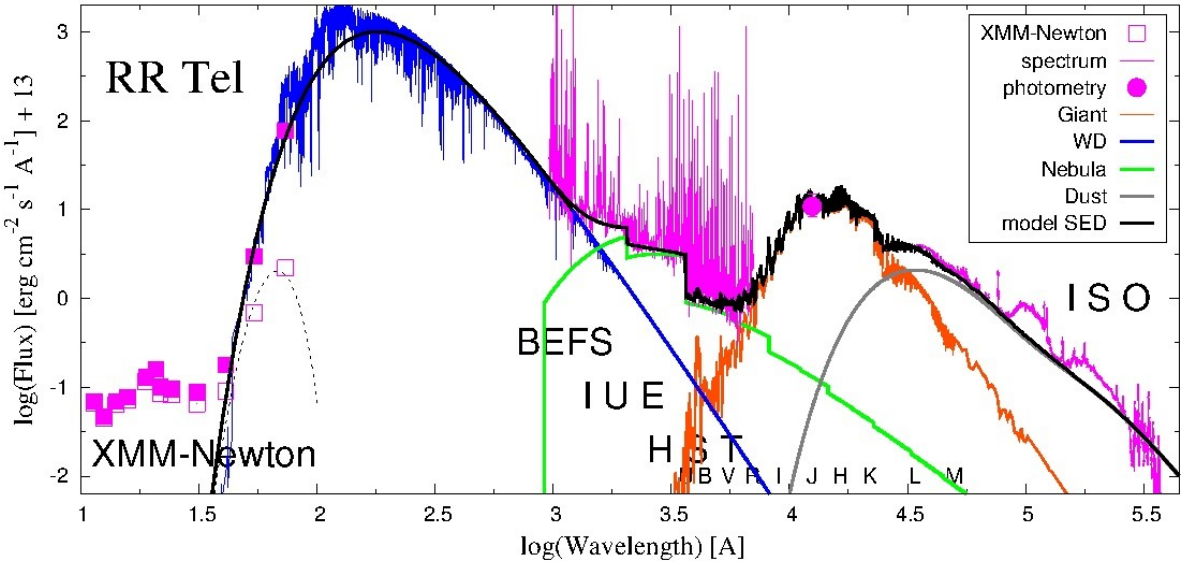
- *az égi háttérfényesség csökkentése:* humán hatások + airglow (égboltfény) kb. 5 magnitúdót jelentenek (de az állatövi fény hatása megmarad).
- *folyamatos megfigyelés lehetősége:* fotometriai idősoroknál lényeges előny. A földfelszínen az Antarktiszon van ilyen lehetőség fél éven át.

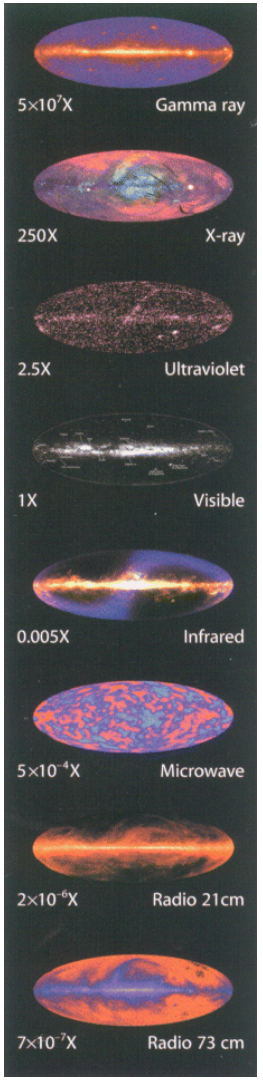




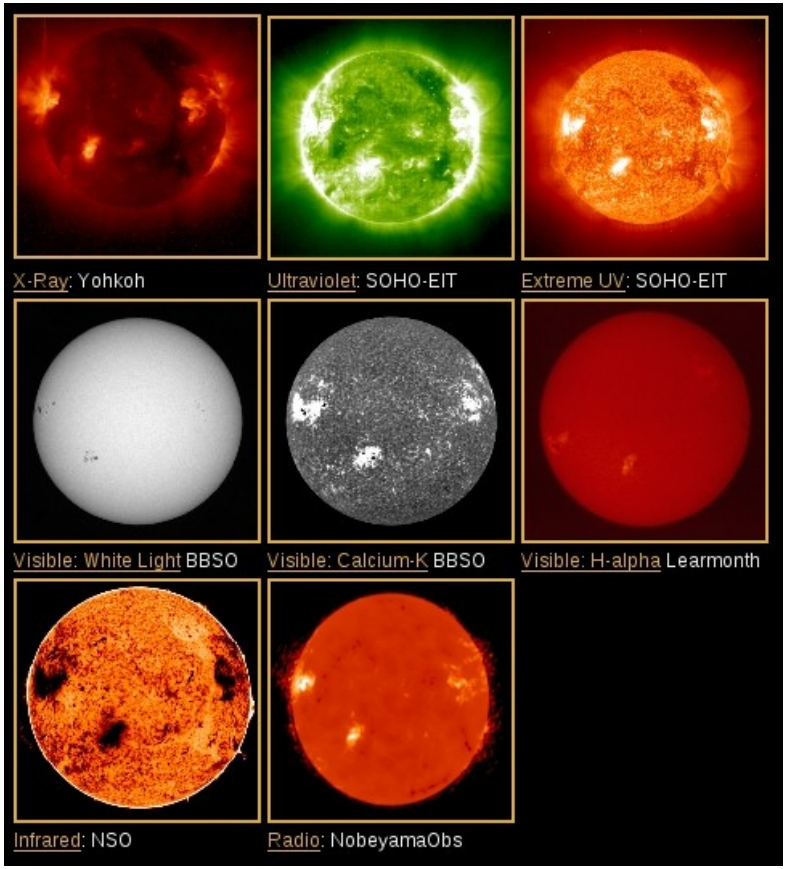
Az űrcsillagászat előnyei (folytatás)

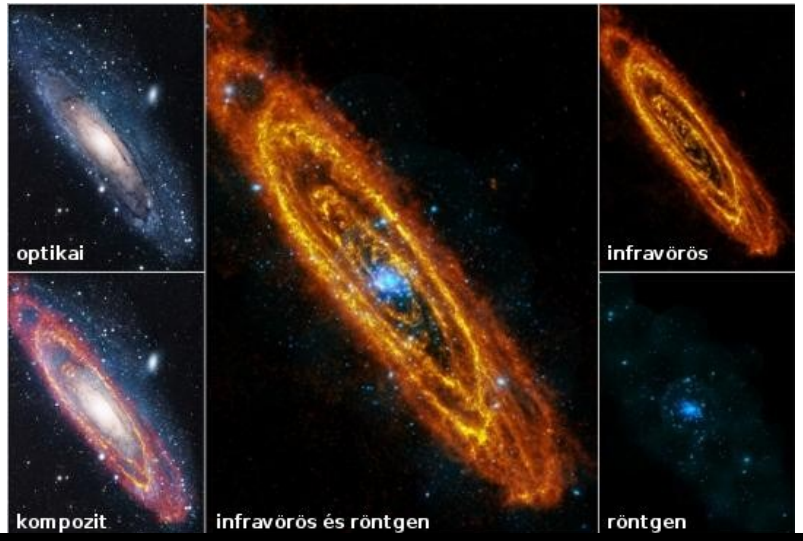
- a súlyerőből származó *deformációk hiánya*
- hűtendő detektoroknál természetes *alacsony és stabil hőmérséklet* (főként az infravörös tartományban)
- *az elektromágneses zavaroktól is mentesülnek* a detektorok (de a dél-atlanti anomália hatása zavaró lehet)
- a spektrum teljes lefedésének előnyei: a vizsgált objektum természete csakis így állapítható meg biztonsággal

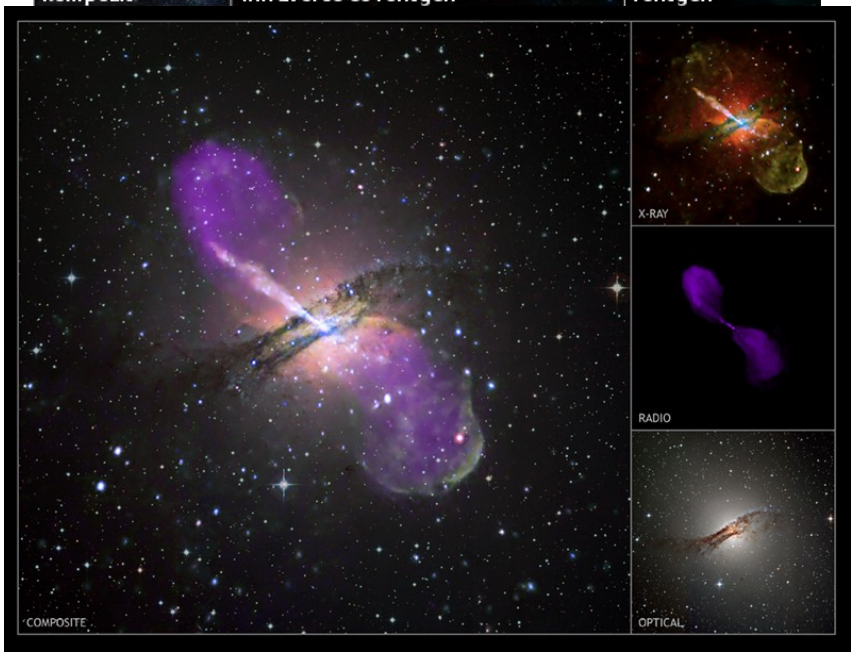




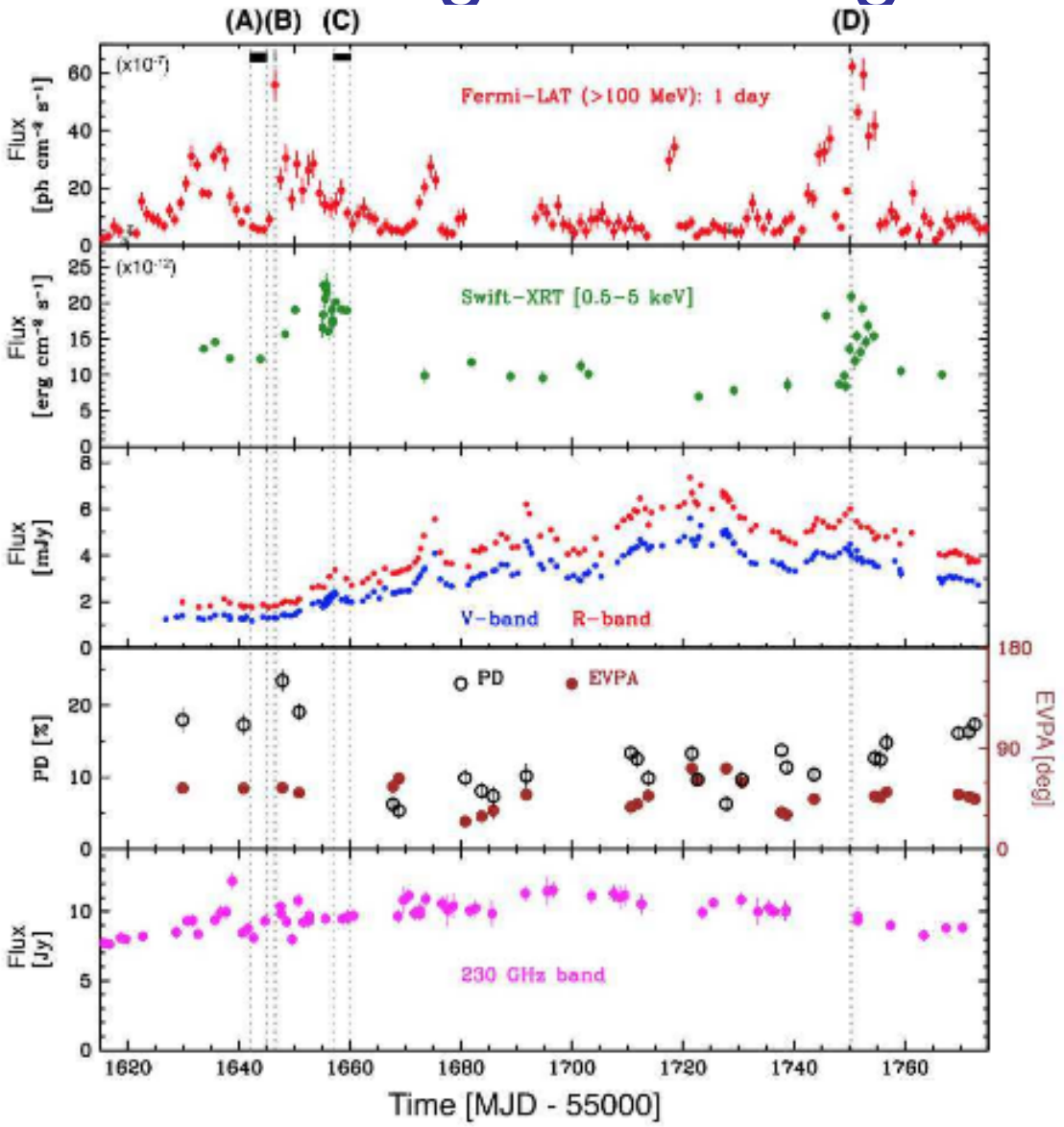
Az űrcsillagászat előnyei (folytatás)







Példa: aktív galaxismagok



3C279 jelű blazár

Példa: aktív galaxismagok

The AGN zoo: list of AGN classes.

Class/Acronym	Meaning	Main properties/reference
Quasar	Quasi-stellar radio source (originally)	Radio detection no longer required
Sey1	Seyfert 1	FWHM $\gtrsim 1,000$ km s^{-1}
Sey2	Seyfert 2	FWHM $\lesssim 1,000$ km s^{-1}
QSO	Quasi-stellar object	Quasar-like, non-radio source
QSO2	Quasi-stellar object 2	High power Sey2
RQ AGN	Radio-quiet AGN	see ref. 1
RL AGN	Radio-loud AGN	see ref. 1
Jetted AGN		with strong relativistic jets; see ref.
Non-jetted AGN		without strong relativistic jets; see r
Type 1		Sey1 and quasars
Type 2		Sey2 and QSO2
FR I	Fanaroff-Riley class I radio source	radio core-brightened (ref. 2)
FR II	Fanaroff-Riley class II radio source	radio edge-brightened (ref. 2)
BL Lac	BL Lacertae object	see ref. 3
Blazar	BL Lac and quasar	BL Lacs and FSRQs

Asztrofizikai sugárzási források

Table 1: Radiative processes

Object	Radio	sub-mm	IR	optical	UV	X-ray	γ-ray
AGN (Seyferts)	S	S	rep	T	T	IC/SSC	IC/SSC
Blazars Sgr A*	S	S	S	S	S/IC/SSC	S/IC/SSC	IC/SSC
TDEs	S	S	S	T	S/T/IC	S/IC	IC
BHXRBs	S	S	S/*/rep	S/*/rep/SSC	S/*/rep/SSC	S/T/IC	S/IC
NSXRBs	S	S	S/*/rep	*/rep/SSC	*/rep/SSC	NS/T/B/IC	?
Iso. NS	S	S	S/rep	S/rep	?	T/RCS/IC	S/B/RCS
AWDs/DNe	S	?	T/*	T/*	WD/T	T/B	?
ULXs	S	?	*/S	*/T/rep	*/T/rep	T/IC	?
SNe	S	S	T	N/T	T	S/T/B/IC	IC/N
GRBs	S	S	S	S	S	S/SSC/IC	S/SSC/IC

Notes: A broad summary of the possible radiative processes in each object class discussed so far. The key for the processes is as follows: T = optically thick thermal emission (i.e. a blackbody/modified blackbody), S = synchrotron, IC = inverse Compton (including bulk Compton), SSC = synchrotron self Compton, B = bremsstrahlung, rep = reprocessed emission (i.e. a second order thermal process) * = stellar companion, N = nuclear processes, RCS = resonant cyclotron scattering, ? = unknown or no current observations in this band. We note that not all of these processes happen at once, e.g. the prompt emission from GRBs radiates in the X-rays and γ-rays via SSC/IC whilst the afterglow does not (instead radiating in these bands via synchrotron losses).

A földi légkör hatása a csillagászati megfigyelésekre

A korlátok és a lehetőségek miatt egyaránt megismerendő:

- a légkör viselkedésének hullámhosszfüggése
- az opacitás eredete (függése a kémiai összetételtől)
- szórás (nappali fény, éjjeli fényszennyezés)
- hőemisszió (infravörös és mm-es tartományban éjjel-nappal zavaró)
- turbulencia (a leképezést rontja, interferometria esetén pedig a fázis fluktuál)
- ionizáció a felsőlégköri plazmában (a rádióhullámok terjedését befolyásolja)
- mindezek idő- és helyfüggőek

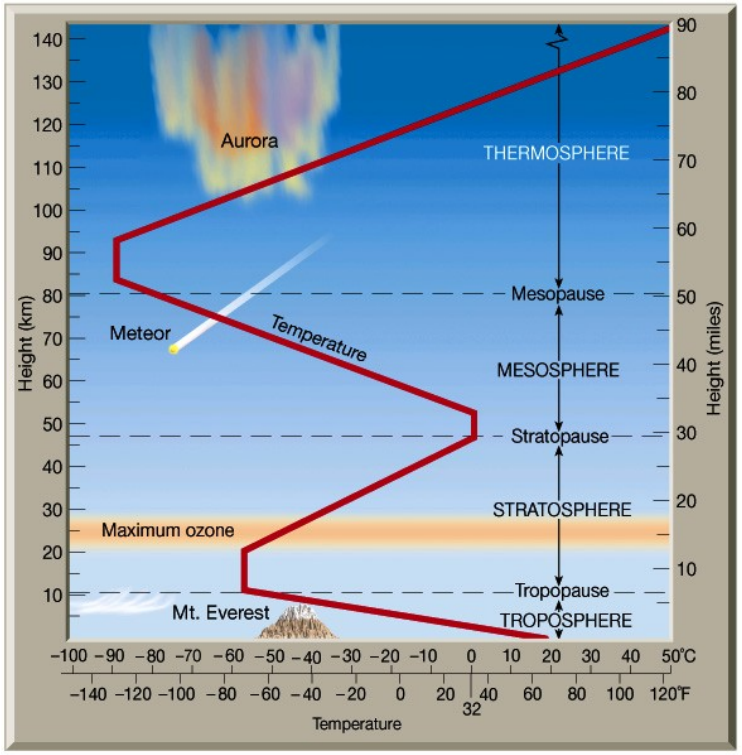
A vertikális szerkezetben a stacionárius rétegződésre napi és évszakos ciklusok, valamint hosszú időskálájú trendek rakódnak.

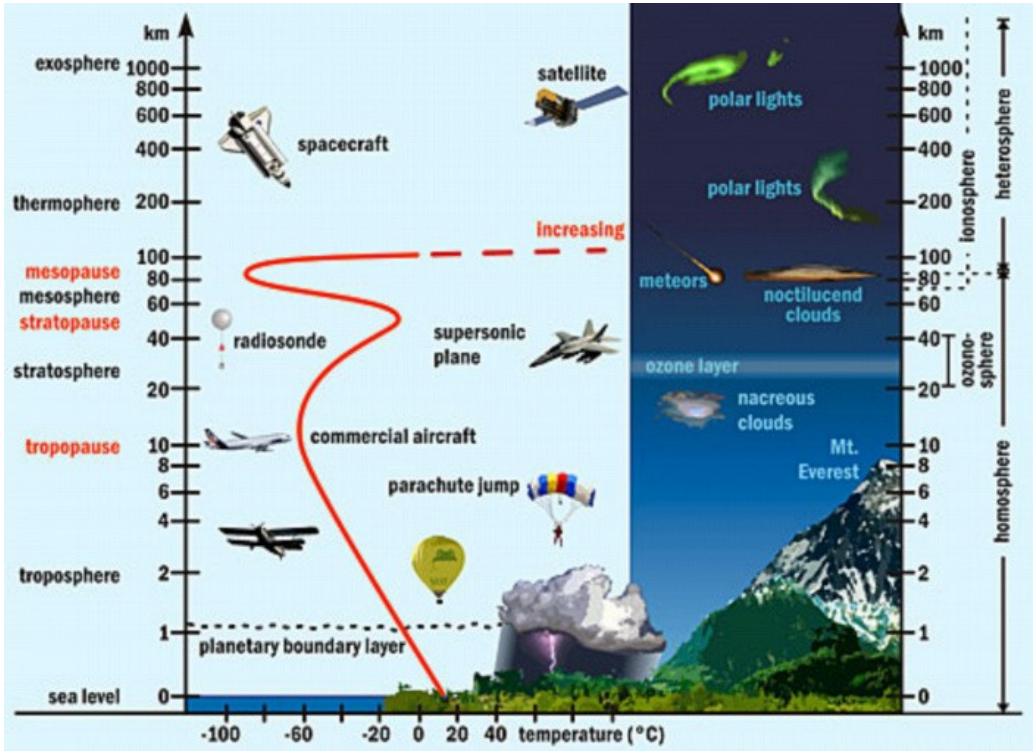
A földi légkör

A függőleges hőmérséklet- és sűrűségeloszlás jellemző.

- *troposzféra* (alsó 10 km): $dT/dz < 0$
- *tropopauza*: magassága a földrajzi szélességgel változik (az Antarktisznál a földfelszínen van)
- *sztratoszféra*: $dT/dz > 0$

De: néhol inverziós réteg van kb. 1 km-es magasságban (szerepe az asztroklímában)





A földi légkör (folytatás)

90 km-ig a nyomás exponenciálisan csökken: $p(z) = p_0 \exp(-z/H)$

ahol a H skálamagasság az átlaghőmérséklet és az átlagos molekulasúly függvénye. A felszínen H = 8 km.

A száraz levegő adiabatikus hőmérséklet-gradiense:

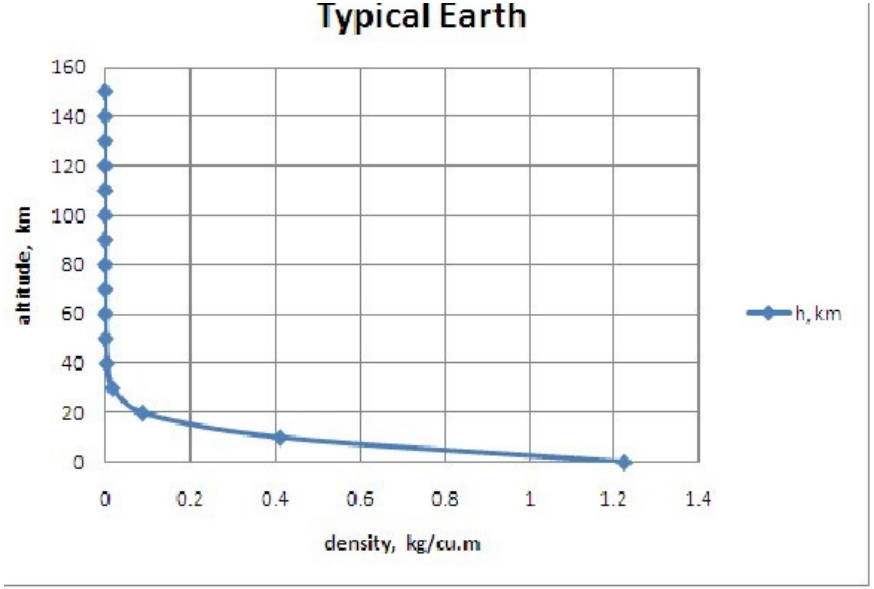
$$(\partial T/\partial z)_{ad} = - (g/R) \cdot M_0 \cdot (c_p - c_v) c_v$$

(ahol R = 8,23 J/K ; M_0 = 0,029 kg). Ennél nagyobb gradiens esetén konvektív instabilitás lép fel, függőleges áramlással.

Még 300 km magasság fölött sem hanyagolható el a légkör sűrűsége:

magasság (km)	sűrűség (kg/m³)
0	1,225
5	0,7364
10	0,4135
50	0,0010

Fékeződnek az alacsony pályán keringő űreszközök.



A légkör összetétele

0-100 km közötti magasságban az O_2 és az N_2 aránya állandó.

A ritkább összetevők igen fontosak: sugárzási egyensúly, a felszínre jutó UV fluxus (+ humán eredetű egyensúlyzavar)

A csillagászatot zavaró erős abszorpciós sávok: vízgőz (H_2O), CO_2, ózon (O_3)

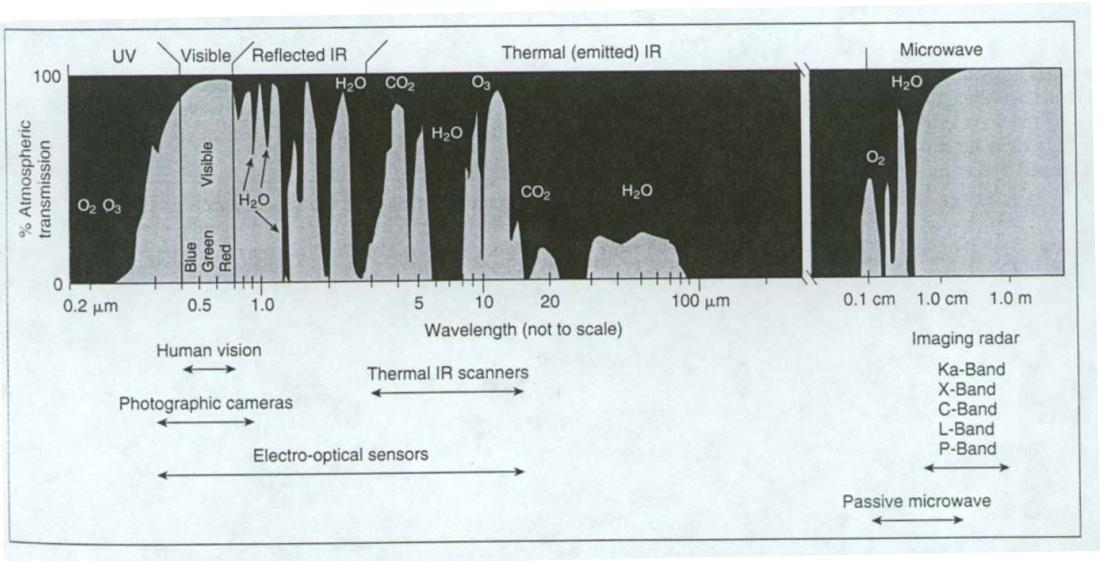
A *vízgőztartalom* hamar lecsökken (*H* = 3 km)

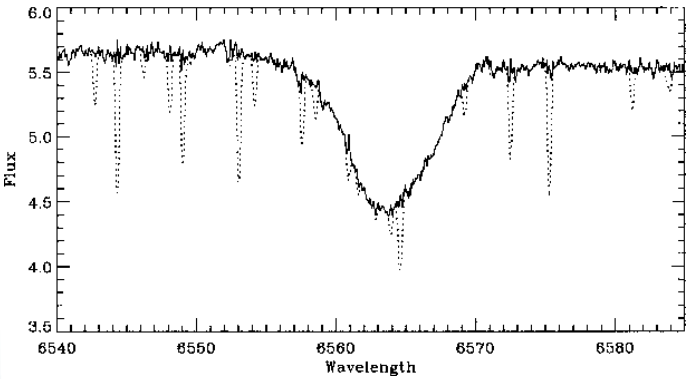
Magas hegy és az Antarktisz a legjobb (infravörös!)

Ózon: legnagyobb a koncentrációja 16 km magasságban, de még 80 km magasban is van (humán eredetű CFC) (UV!)

CO_2: eloszlása az O_2 és N_2 eloszlását követi, nincs mit tenni (IR!)

A színképben tellurikus vonalak jelennek meg.





A légkör összetétele

60 km felett a Nap UV-sugárzásának hatására fotokémiai ionizáció lép fel:

$O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e^-$

$O_2 + h\nu \rightarrow O^+ + O + e^-$

Adott magasságban az elektronsűrűség a Nap helyzetétől (magasságától) és aktivitási szintjétől is függ.

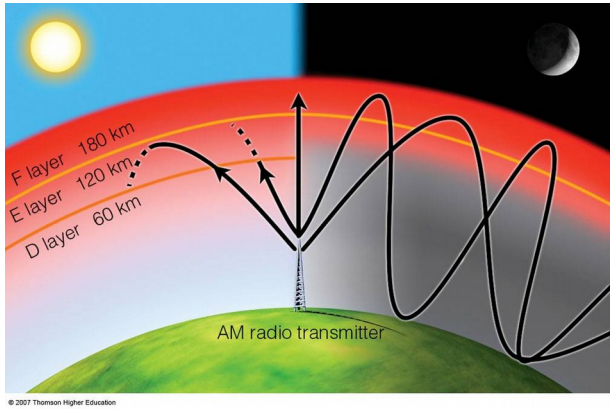
Az ionoszféra rétegei:

D: 60 km 10^3 cm^{-3} elektronsűrűség

E: 100 km 10^5 cm^{-3}

F: 150-300 km $2 \cdot 10^6$ cm^{-3}

Felette 2000 km-ig állandó ($N_e \approx 10000$ cm^{-3})



Az ionoszferikus plazma törésmutatója:

$n^2 = 1 - (\lambda/\lambda_p)^2$

ahol a λ_p plazmafrekvencia: ν_p [Hz] $= 8970 \cdot \sqrt{N_e}$

Pl. az F-rétegben ($N_e = 2 \cdot 10^6$ cm^{-3}) teljes visszaverődés lép fel ($n = 0$ értéknél)

$\lambda = 23{,}5$ m-es hullámhossz esetén.

Földi rádiócsillagászat csak ennél rövidebb hullámhosszakon lehetséges (földi rádiózás pedig efölött).

A sugárzás légköri elnyelése

Az elnyelés *teljes* vagy *részleges*. Áteresztési ablakok és tellurikus elnyelési sávok vannak. E sávok helyét, intenzitását és ekvivalens szélességét egyaránt ismerni kell.

Diszkrét hullámhosszakon való elnyelés okai:

- rotációs molekulaátmenetek (H_2O, CO_2, O_3 , …)
- rotációs-vibrációs molekulaátmenetek (CO_2, NO, CO, …)
- elektronátmenetek molekulákban (CH_4, H_2O, CO, O_2, O_3 , …)
- elektronátmenetek atomokban, gyökökben (O, N)

Milliméteres hullámhosszakon a H_2O és O_2 rotációs átmenetei,

IR és szubmilliméteres sávban a H_2O és CO_2 rotációs és rotációs-vibrációs átmenetei,

Közeli-UV-ben az O_2 és O_3 elektronátmenetei dominálnak.

Az elnyelési együtthatót atom- és molekulafizikából lehet tudni, de a légköri nyomás és hőmérséklet miatt esetleg korrekció kell a táblázatokban közölt laboratóriumi értékekre.

A légköri elnyelés

Az *i*-edik összetevő függőleges vonal menti mélysége:

$$\tau_i(\lambda,z_0) = {}_{z0}\int^{\infty} r_i(z)\rho_0(z)K_i(\lambda)dz \ ,$$

ahol $r_i(z)$ a frakcionális gyakoriság, $\rho_0(z)$ a levegő tömegsűrűsége.

$$I(z_0)/I_0(\infty) = \exp\left[-1/\cos\Theta \cdot {}_i\Sigma\, \tau_i(\lambda,z_0)\right]$$

(itt az összegzés valamennyi elnyelő anyagra történik).

A légkör teljesen opak $\tau_0 = 10$-nél, csillagászati észlelés még lehetséges $\tau(\lambda,z) < 0{,}3$ esetén (az áteresztés nagyobb 75%-nál).

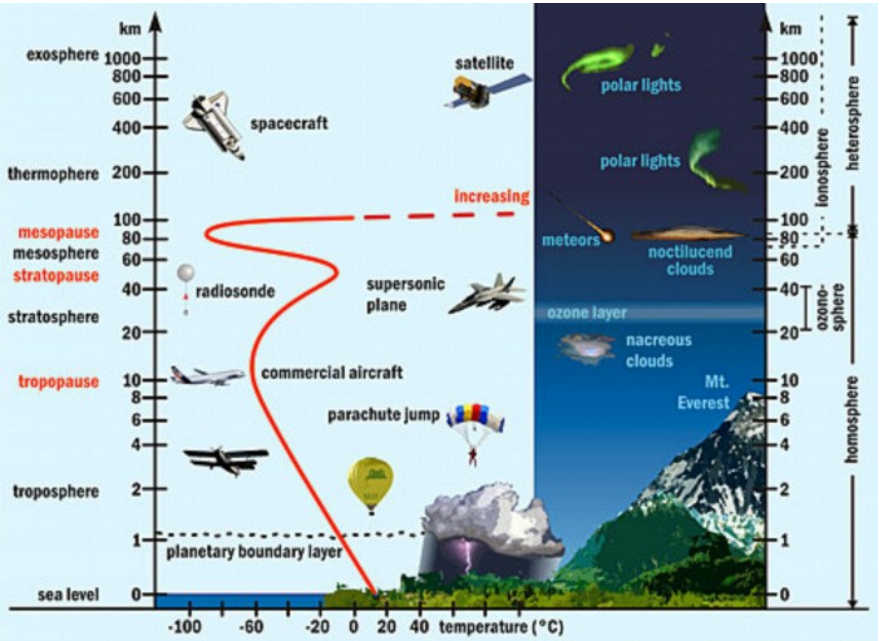
Optikai mélység – szerepe a csillagközi anyag és elnyelés kapcsán is.

Az észlelésre alkalmas tartományokban a tellurikus sávok *vonalprofil*ját is ismerni kell (*vonalszélesedés* különféle okokból).

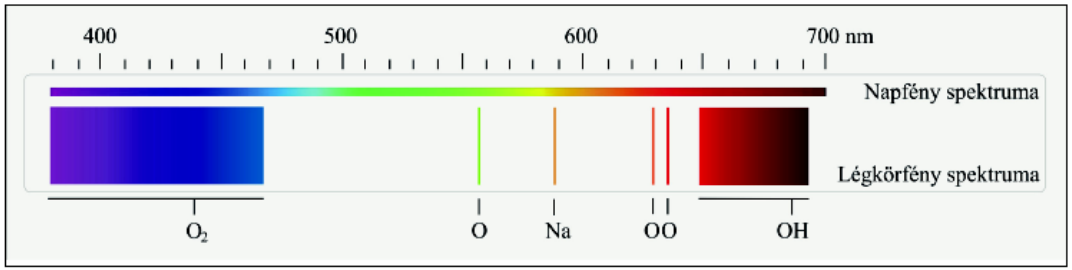
Légköri emisszió

Fluoreszcens eredetű légköri fotonok (korlát az optikai, IR és mm-es tartományban)

- Az éjszakai *ég emissziója*: a nappali disszociáció során keletkezett elektronok és ionok rekombinációja fluoreszcens fotont kelt;
- *Airglow* (égboltfény): folytonos emissziós blend 100 km-es magasságban (ott megfelelő az elektronsűrűség);
- *Sarki fény*: 70 fokos szélességtől a pólusok felé (kép később);
- *Geokorona*: a napfény rezonáns szórása a légkör tetején levő hidrogén által.



1. ábra. A légkörfény többféle színben is feltűnhet az égbolton, a fotokémiai reakciókban résztvevő atomoktól és molekuláktól függően. Spektrumát a 90–100 km magasságban lévő gerjesztett oxigén atomok révén kialakuló zöld (558 nm) fény uralja. A gyengébb vörös (630 és 636 nm) légkörfénysávokat az ennél magasabban lévő gerjesztett oxigénatomok okozzák. Ezeken kívül gerjesztett O_2 molekulák, hidroxilgyökök (OH) és nátrium (589 nm) közreműködésével is kialakulhat a jelenség *(atoptics.co.uk)*



Légköri emisszió

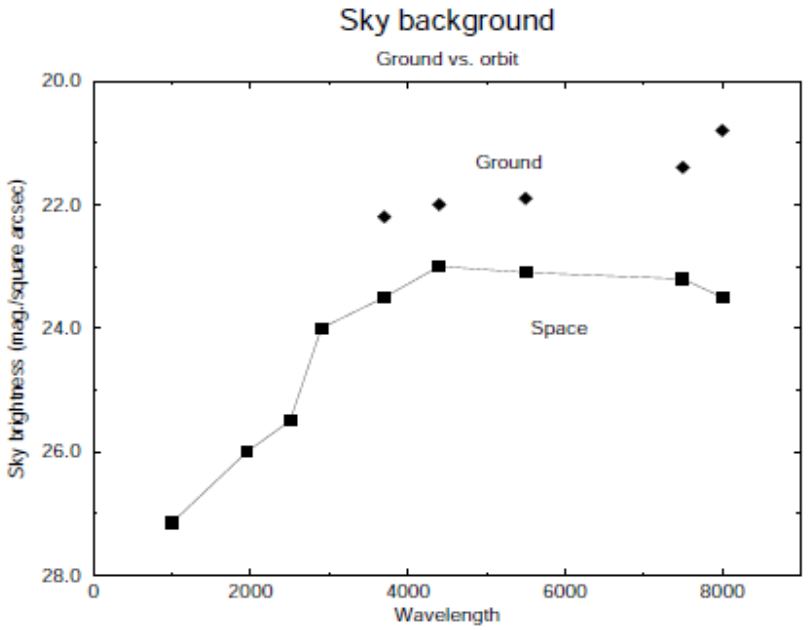
A légköri összetevők könnyű gerjeszthetősége viszont kedvező a légkör tanulmányozásához: összetétel, hőmérséklet, fizika, kémia.

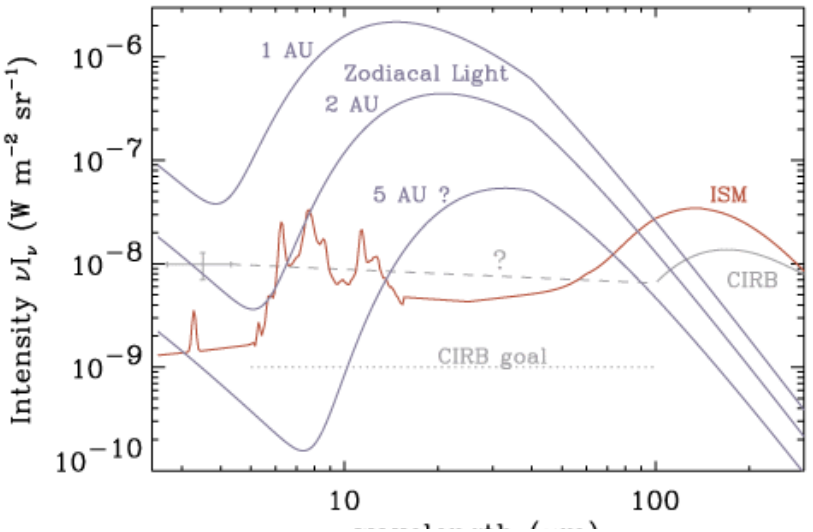
Az égi háttérfényesség:

22 magnitúdó/négyzetívmásodperc, de erősen fluktuál (halvány galaxisok nehezen mutathatók ki).

A légkörön kívül jobb a helyzet, de a *Naprendszer háttérsugárzása* nem hanyagolható el (állatövi fény).

Légköri hőemisszió: IR és mm-es észlelésnél törekedni kell a minimális háttérzajra (kis vízgőztartalom).





Szórás

A csillagászatban nemcsak a légkör miatt fontos.

A szórás a szóró részecske és a hullámhossz méretviszonyától függ.

- Ha a részecskeméret $>>\lambda$: a szórás (a beesési iránytól mért szórási szög) független a hullámhossztól (pl. felhő vagy köd az optikai hullámhosszakon, emiatt szürke olyankor az ég);

- Ha a részecskeméret $\approx\lambda$: a szórás a hullámhossztól és a részecskemérettől is függ. Az optikai tartományban $1/\lambda$ szerinti függés (Mie-szórás); ilyen az intersztelláris poron való szórás hullámhosszfüggése;

- Ha a részecskeméret $<<\lambda$: a szórás nagyon erősen hullámhosszfüggő, $1/\lambda^4$ szerint (Rayleigh-szórás). Ettől ered az ég kéksége (a kék szín minden irányból ideér). A látóirányból kiszóródott kék miatt egyre vörösebb a horizont közelében a napkorong, minél vastagabb a légkör a napsugárzás számára.

Állatövi por

Távoli égitesteknél figyelembe veendő a közbeeső interplanetáris és intersztelláris anyag hatása (szórás, termális emisszió).

Állatövi por: az ekliptikával 3°-os szöget bezáró síkban. Struktúrája kisbolygócsaládokhoz (Themis, Koronis, Eos) kötődik: sűrűsödések, porsávok.

Három szemcsepopuláció van benne:

0,008-0,16 μm, 10^{-12} cm^{-3}

0,16-29 μm, 10^{-14} cm^{-3}

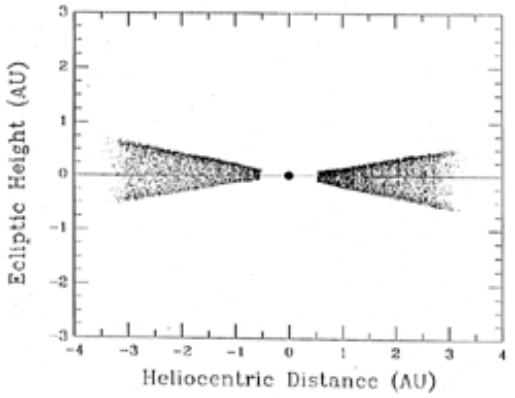
29-340 μm, 10^{-17} cm^{-3}

- λ = 3,5 μm-nél: ún. kozmológiai ablak.
- λ < 3,5 μm: szórt napfény, λ > 3,5 μm a por hőemissziója miatt nem lehet messzire látni.

Üstökösök porcsíkjai (nem a csóva) 10° hosszan: mm-es méretű részecskék IR sugárzása.

A porszemcsék élettartama 10000-100000 év a Poynting–Robertson-effektus miatt. 9 millió g/s utánpótlás kell a stacionaritáshoz, és az üstökösök porkibocsátása ehhez kevés.

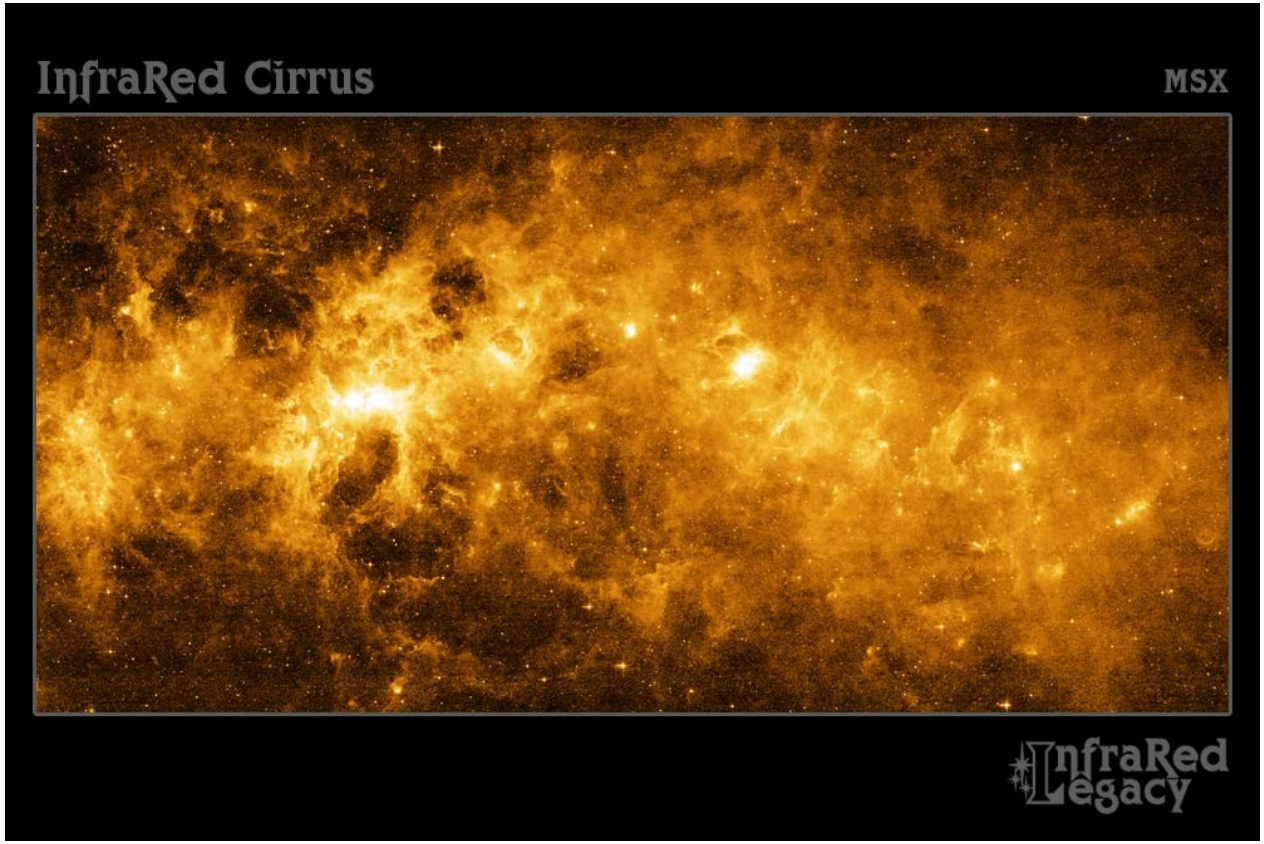
(Régen üstökösáporok lehettek.)



Infravörös cirrusz

Naprendszeren kívüli zajforrás: infravörös cirrusz (IRAS, 1983).

60 mikrométeren a meleg intersztelláris por ívmásodperces fluktuációjú égi zajt okoz (háttér/előtér).



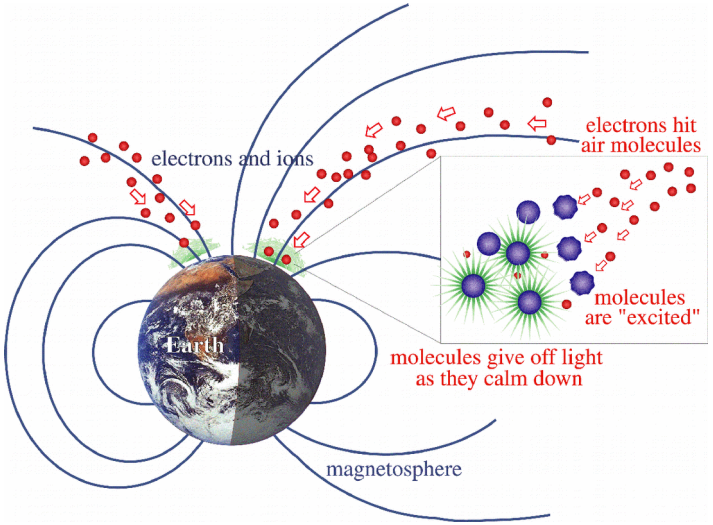
Nagy energiájú részecskék

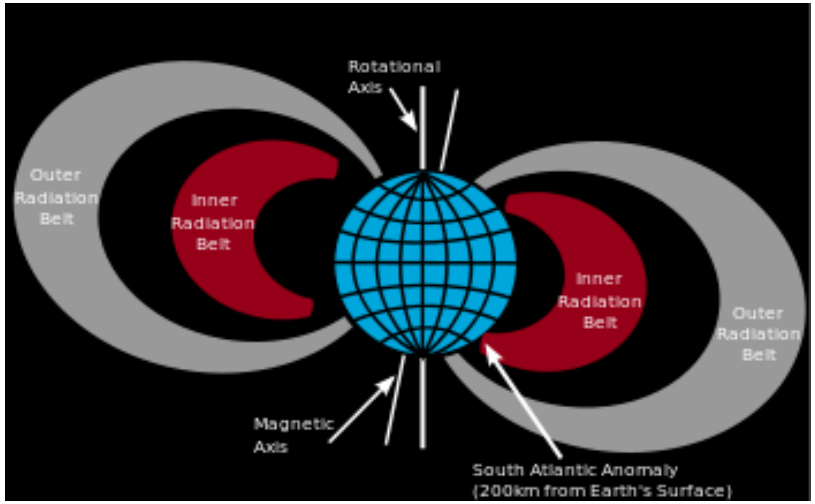
A napszél kölcsönhat a földi mágneses térrel (magnetoszféra).

Kozmikus sugarak is növelik a részecskehátteret: a légkörben másodlagos részecskéket vagy gammafotonokat keltenek.

A röntgen- és gammacsillagászatban ez fokozott háttérzajt okoz.

Alacsony pályájú (200-2000 km) űreszköznél a részecskefluxus a magassággal és a földrajzi szélességgel változik (auróra-vidék, dél-atlanti anomália Brazília mellett 250 km magasságban). Szükség lehet a detektorok átmeneti kikapcsolására.

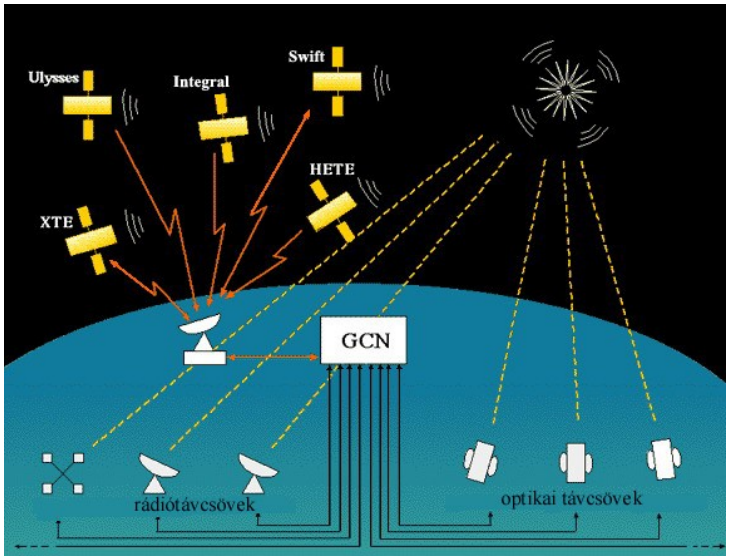


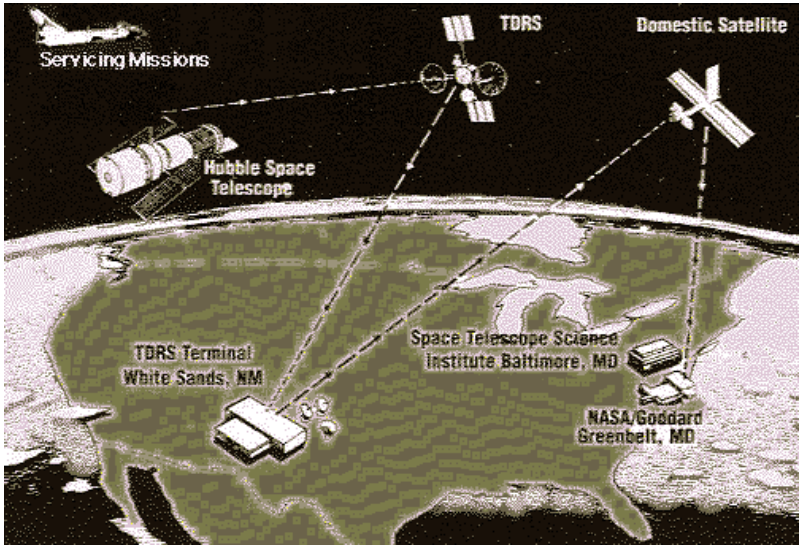


Az űrcsillagászat kialakulása

Műszaki feltételek

- az adott hullámhossztartományban érzékeny detektorok kifejlesztése;
- hordozórendszerek megléte (pályára juttatás, tömeg);
- telemetriai kapcsolat (irányítás, adatok átmeneti tárolása, küldése, fogadása, a távolság szerepe), esetleg külön központ;
- számítógépes háttér az adattömeg tárolásához, feldolgozásához;
- stabilizálás, irányzás, vezérlés (3 tengelyű stabilizálás, beállítás a Nap vagy fényes csillagok alapján, vezetés helyzetérzékelőkkel → külön tudományos haszon az azokkal kapott fotometria).

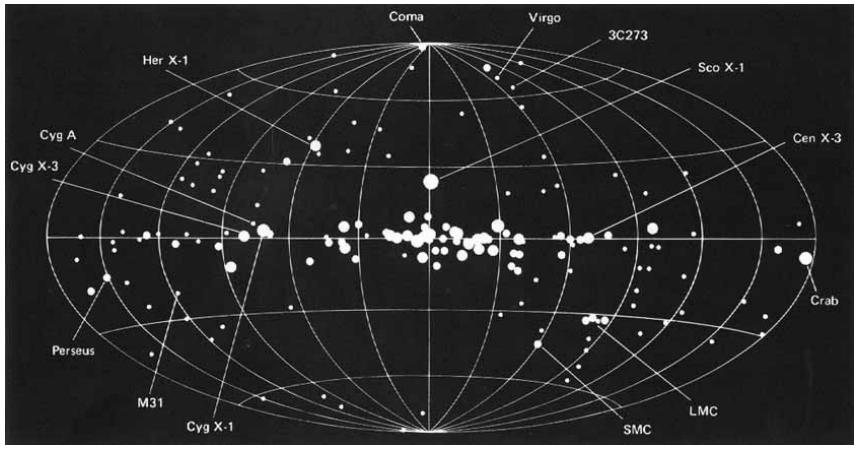




Az űrcsillagászat kialakulása

Minden hullámhossztartományra érvényes *kezdeti feladatok:*

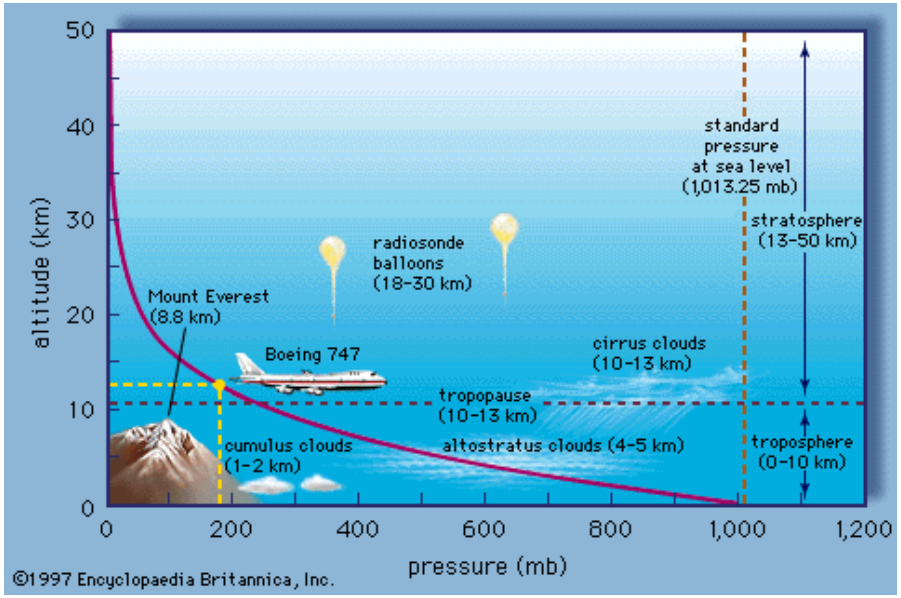
- térképezés, pozíciómeghatározás, azonosítás már ismert objektumokkal más hullámhosszakon végzett mérések alapján (pl. a V818 Sco esete);
- színkép (vonalak és polarizáció miatt is, UV-ben a hőmérséklet miatt a folytonos színkép is lényeges – a térképezés emiatt késett is, sőt UV-ben még nem teljes az égtérkép);
- időbeli változás (fényesség és színkép is!);
- háttérsugárzás (léte, jellege, diffúz?)



Az űrcsillagászat története

Kb. 1970-ig egységesen és időrendben tárgyalható.
A légköri átlátszóság a hullámhossztól
és a magasságtól is függ.
Műszerplatform lehet:

- repülőgép
- léggömb (ballon)
- rakéta
- űreszköz
- más égitest felszíne.



A *repülőgép* és a *ballon* előnye: tartós működés, nincs súlykorlát, többször felhasználható;
A *rakéta* előnye: gyorsan bevethető (még az űreszközök korában is van szerepe);
Űreszközök: lényeges szempont lehet a költség, tömeg, élettartam, szervizelés;
Az űreszközök nevezéktanáról később lesz szó.

Csillagászat repülőgépről

- 10-12 km működési magasság, főleg IR-ben jó.
- Az 1920-as évektől az 1960-as évek elejéig szinte csak napfogyatkozások észlelésére használták. 1961-ben: Ga:Ge-bolométer → IR-csillagászat beindult.
- A repülőgép mobil: felhőmentes helyről észlel, gyorsan a totalitás sávjába ér, és követheti a teljes árnyék vonulását (rekord: 1973-ban egy Concorde-ról 74 percig észlelték a totalitást Afrika fölött; egy helyről a totalitás legfeljebb 7,5 percig tarthat). Másik rekord: 1979. II. 26-án legalább 1000 repülőgépről figyelték a napfogyatkozást (de nem tudományos céllal).
- Tudományos célú észlelések: 1923. IX. 10-én 16 amerikai kétfedelű repülőgépről a fogyatkozás középvonalát akarták meghatározni, de egyetlen fénykép sem sikerült, csak a vizuális észlelések. 1930. IV. 28.: csak 1,5 s a totalitás, első mozgófilm fogyatkozásról. Körülmények: hidegben, oxigénmaszkban (élettani reakciók).

Photograph from the archives of Dr. Eric R. Craine

Figure 1. The O2U-1 flying over Honey Lake.

Photograph from the archives of Dr. Eric R. Craine

Figure 2: Chief photographer (left) and pilot on the O2U-1 aircraft used during the Honey Lake eclipse mission. Akeley motion picture camera is in the background.

Csillagászat repülőgépről

1963: egyezmény a légköri atomrobbantás betiltásáról. Az USA ellenőrző repülőgépei (NC-135) egyben légi laboratóriumok voltak, tudományos kutatásra is igénybe vehetők.

1964-1965: IQSY – nemzetközi koordináció a napjelenségek megfigyelésére.

1964: a NASA repülőgépet vett (Convair 990), a *Galileo* nevet kapta, ez ma zavaró lehet. 1965. V.-tól 1973-ig működött, akkor lezuhant (de a KAO már üzemben volt addigra). Galileo-eredmények: bolygók színképe közeli-IR-ben; a Vénusz felhői nem vízből állnak (a KAO megerősíti); Mars-oppozíció megfigyelése.

Közben 1968-tól *Learjet* IR-megfigyelésekre. Először használtak chopping technikát az égi háttér levonására. Eredmények: Orion távoli-IR-ben; a Tejútrendszer centrumának fényes IR-forrásai; a Vénusz felhői kénsavcseppekből állnak.

A sztratoszférarepülés műszaki feltételei az 1970-es években teljesültek. További feltétel a *pontos irányzás* mozgó platformról.

Technikai nehézségek:

- a levegőágy rezgésmentesítése;
- a távcső belépő oldalának hermetikus elzárása az észlelőtől;
- a távcső stabilizálása giroszkóppal.

Kuiper Airborne Observatory (KAO)

Nevét Gerard [Gerrit Pieter] Kuiperről (1905-1973) kapta.
1974-1995, Lockheed C-141 Starlifter, 144 tonnás szállítógép, 91 cm ⊘
Nasmyth-Cassegrain + fotométer, spektrométer, interferométer infravörös-csillagászati megfigyelésekre
Kb. ötnaponta repült, 8 órás műszakot teljesítve, évente 3-szor az egyenlítőtől délre is. 20 főnyi személyzete volt (a Learjeten csak 2 kutató fért el).
Főbb eredmények:

- Az Uránusz gyűrűinek felfedezése;
- A Plútó légkörének felfedezése;
- Vízgőz kimutatása üstökösökben;
- 70-nél több intersztelláris molekula kimutatása;
- Bolometrikus korrekció meghatározása extragalaxisok luminozitási függvényéhez.

SOFIA

Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (NASA + DLR) a KAO folytatásaként. A légköri vízpára 99,8%-a fölé, 12-14 km magasra juttatott 2,5 m-es Cassegrain+Nasmyth-távcső (a tükör fényereje 1,3, a távcsőé 19,7) infravörös- (1–655 nm) és optikai csillagászatra szolgál.

1997-ben vette a NASA az akkor már 20 éves Boeing 747SP repülőgépet.

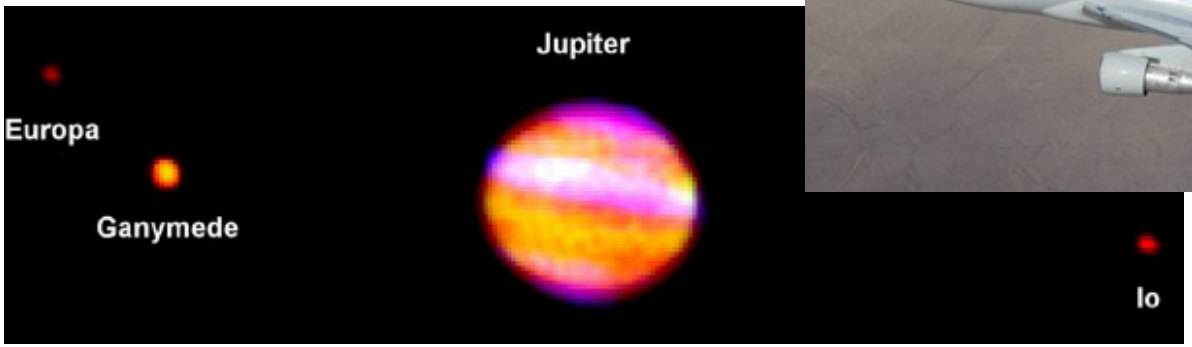
A teleszkóp német gyártmány (Zerodur üvegkerámia, könnyű).

A távcsövet felszállás előtt lehűtik, leszállás előtt nitrogéngázzal telítik.

Első fény: 2010. V. 26. A késés okai: német újraegyesítés, alvállalkozók csődje, NASA-támogatás felfüggesztése (a költség duplájára nőtt).

Rutinszerű észlelések 2010. decembertől.

2014-től évi 100 repülést terveznek 20 éven át, de forráshiánnyal küzdenek.

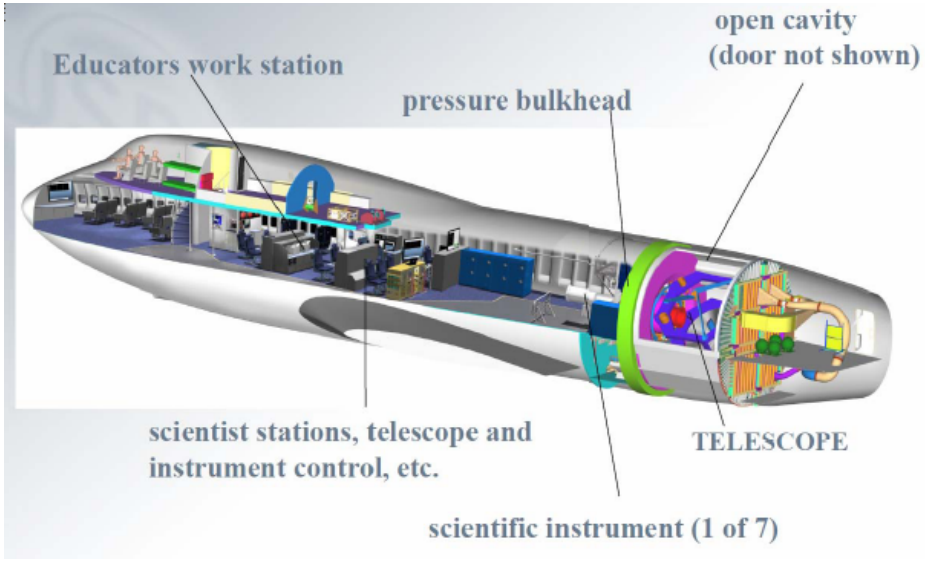


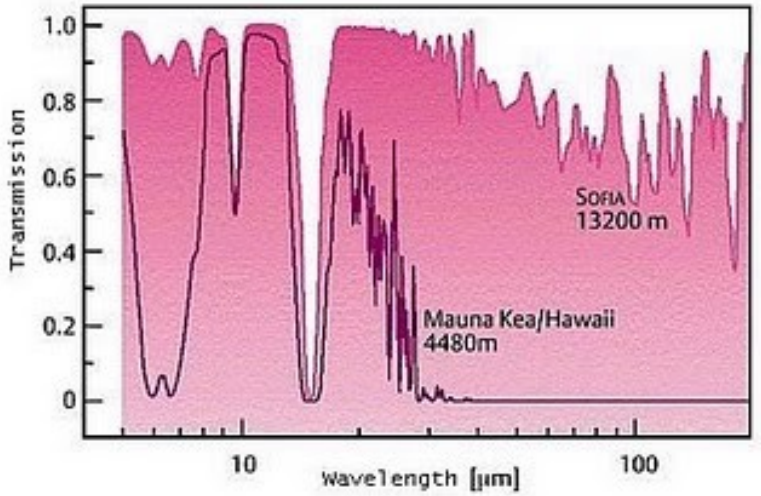
SOFIA

Fő kutatási programok:

- Bolygólégkörök és bolygófelszínek kémiai összetétele;
- Üstökösök szerkezete, fejlődése, anyagösszetétele;
- A csillagközi anyag fizikája és kémiája;
- A csillagképződés fázisainak vizsgálata.

Fő műszerek:
FLITECAM: 1–5 mikrométer
FORCAST: 5–40 mikrométer
HAWC: 42–210 mikrométer

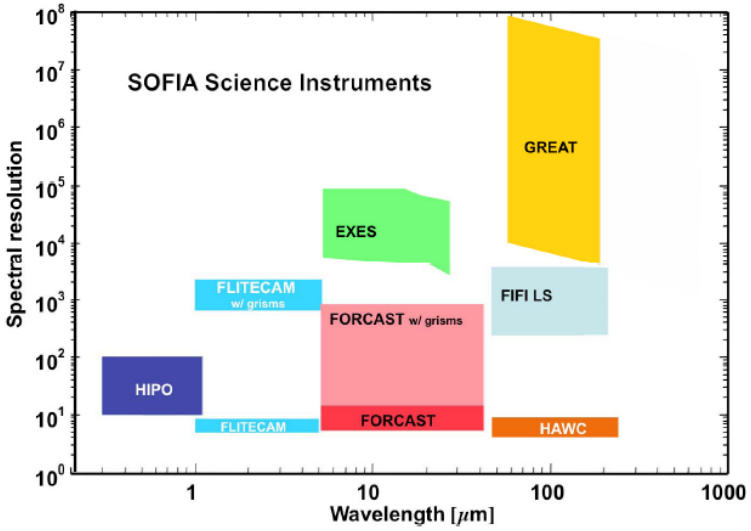




SOFIA

Table 1: SOFIA system characteristics

Characteristic	*Value*
Nominal Operational Wavelength	0.3 to 1600 μm
Primary Mirror Diameter	2.7-m
System clear aperture diameter	2.5-m
Nominal system f-ratio	f/19.6
Primary mirror f-ratio	f/1.28
Telescope's unvignetted elevation range	20 to 60 degrees
Unvignetted field-of-view	8 arcmin
Image quality of telescope optics at 0.6 μm	1.6 arcseconds on-axis (80% encircled energy)
Diffraction limited image size	0.1× (λ in μm) FWHM in arcseconds
Diffraction Limited Wavelengths	≥ 15 μm
Optical Configuration	Bent Cassegrain with chopping secondary mirror and flat folding tertiary
Chopper frequencies	1 to 20 Hz for 2-point square wave chop
Maximum chop throw on the sky	± 5 arcmin (unvignetted)
Pointing stability	2.0 arc sec RMS at first light; 0.5 arcseconds RMS during full operations phase
Pointing accuracy	0.5 arcsecond with on-axis focal plane tracking; 3 arcseconds with on-axis fine-field tracking
Total emissivity of telescope (goal)	0.15 at 10 μm with dichroic tertiary; 0.1 at 10 μm with aluminized tertiary
Recovery air temperature in cavity (and optics temperature)	240K



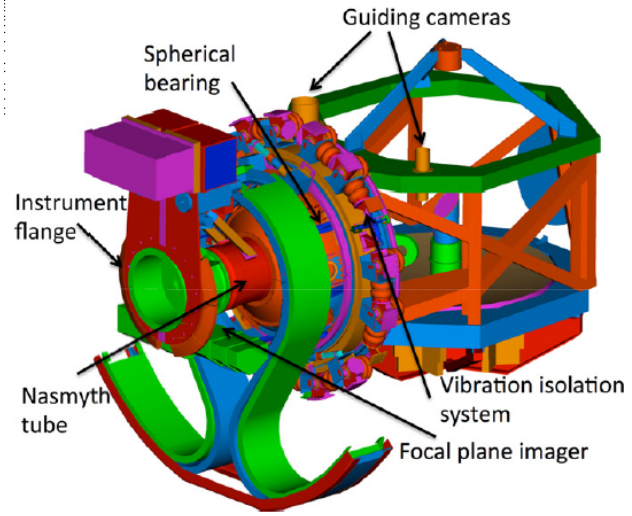


Figure 2. Structural assembly of the SOFIA telescope showing the location of key subsystem elements.

SOFIA

Table 2: SOFIA's First Generation Instrument Complex

Instrument	*Description*	*Institution and PI*	*λ range (μm) Resolution (λ/Δλ)*	*Field of View Array Size Array Type*	*Date Available*
FORCAST (Facility SI)	**F**aint Object InfraRed **CA**mera for the SOFIA **T**elescope: *Facility Instrument - mid-IR camera and grism spectrometer*	Cornell University T. Herter	5 – 40 Grisms: R ~ 200-800	3.2' x 3.2' 256 x 256 @ 0.75" Si:As, Si:Sb	2010
GREAT	**G**erman **RE**ceiver for **A**stronomy at **T**erahertz Frequencies: *PI Instrument – heterodyne spectrometer*	MPIfR, KOSMA, DLR-WS R. Güsten	60-240 R = 10^6 - 10^8	Diffraction Limited Single pixel heterodyne	2011
FIFI-LS (Facility SI – like modes to be provided)	**F**ield **I**maging **F**ar-**I**nfrared **L**ine **S**pectrometer: *PI Instrument with facility-like capabilities – imaging grating spectrometer*	MPE, Garching A. Poglitsch	42 - 210 R = 1000 - 3750	30" x 30" (Blue) 60" x 60" (Red) 2 -16 x 5 x 5 Ga:Ge	2013
HIPO	**H**igh-speed **I**maging **P**hotometer for **O**cculation: *Special PI Instrument – high speed imaging photometer*	Lowell Observatory E. Dunham	0.3 – 1.1 R = UBVRI; custom NB filters	5.6' x 5.6' 1024 x 1024 @ 0.05" or 0.33" CCD	2012
FLITECAM (Facility SI)	**F**irst **L**ight **I**nfrared **T**est **E**xperiment **CAM**era: *Facility Instrument – near-IR test camera and grism spectrometer*	UCLA I. McLean	1 – 5 R ~ 2000	8.2' x 8.2' 1024 x 1024 @ 0.48" InSb	2012
HAWC (Facility SI)	**H**igh-resolution **A**irborne **W**ideband **C**amera: *Facility Instrument – far-IR bolometer camera*	University of Chicago D. Harper	50-240 R = 5 - 10	Diffraction Limited 12 x 32 Bolometer	2013
EXES	Echelon-Cross-Echelle (**EXE**) Spectrograph: *PI Instrument – echelon spectrometer*	University of California Davis M. Richter	5 – 28 R = 10^4, 10^5, or 3000	5" to 90" slit 1024 x 1024 As:Si 1" – 4" slit width	2013

A SOFIA első eredményei

A tesztmérések eredményeit 2013-ban közölték. Első eredmények: - FORCAST-képek és GREAT-spektrumok csillagkeletkezési tartományokról (pl. protocsillag-komplexumok az Orion-ködben, proplidok sugárzása is, BN-KL);

- OD-abszorpció kis tömegű protocsillagnál;
- cirkumnukleáris gyűrű a Tejútrendszerben (20, 32 és 37 mikrométer)

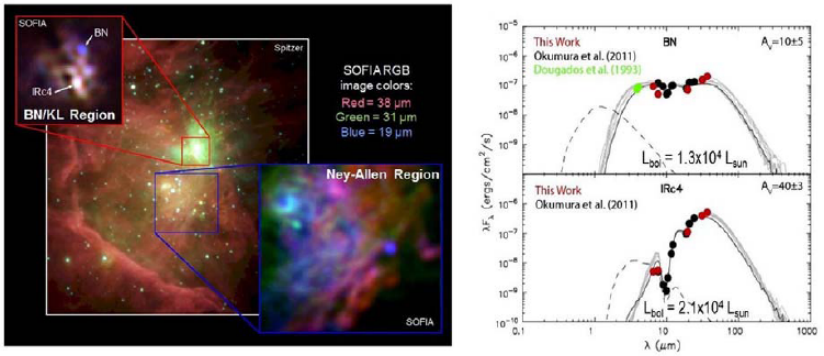


Fig. 6 The Orion Nebula Cluster imaged by FORCAST on SOFIA (from Shuping et al. 2012 and De Buizer et al. 2012), including spectral energy distributions of the two main protostars in the BNKL region (*right*, De Buizer et al. 2012). Figure courtesy of J. De

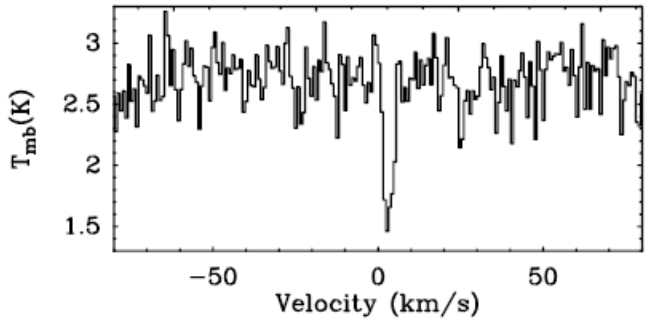


Fig. 12 GREAT OD absorption spectrum at 1.39 THz towards the low-mass protostar IRAS 16293 in Ophiuchus. Reproduced

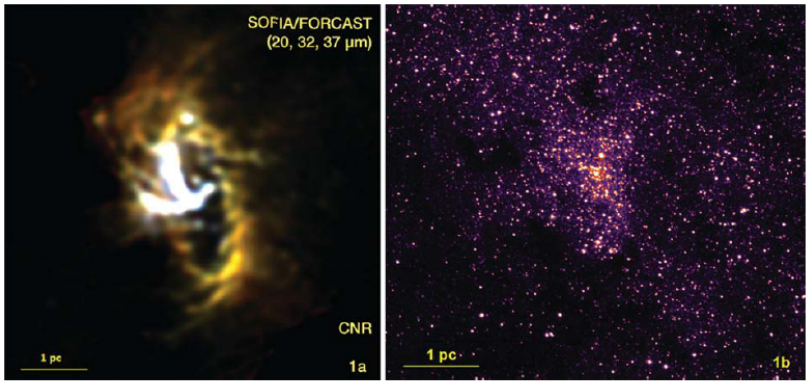


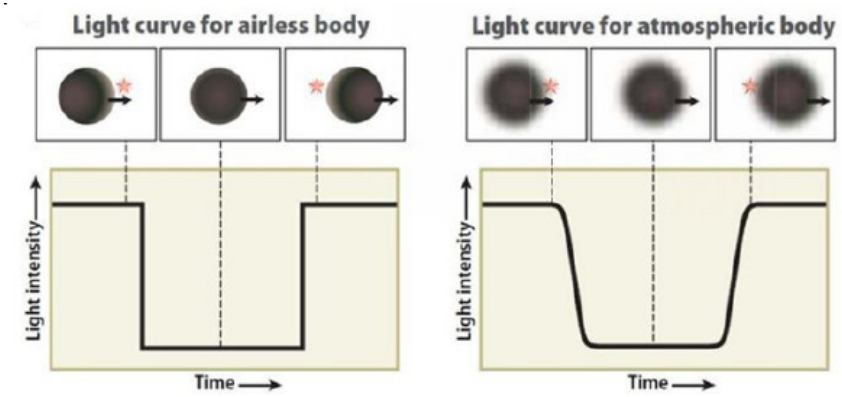
Fig. 8 Image release at the AAS in Long Beach (Lau et al. 2013, January 8): Galactic center circumnuclear ring as imaged FORCAST/SOFIA (*left*) and NICMOS/HST (*right*) with the same field-of-view; see text for details.

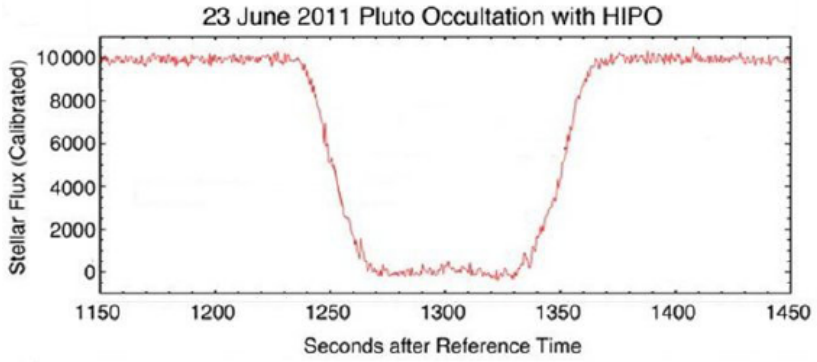
A SOFIA első eredményei

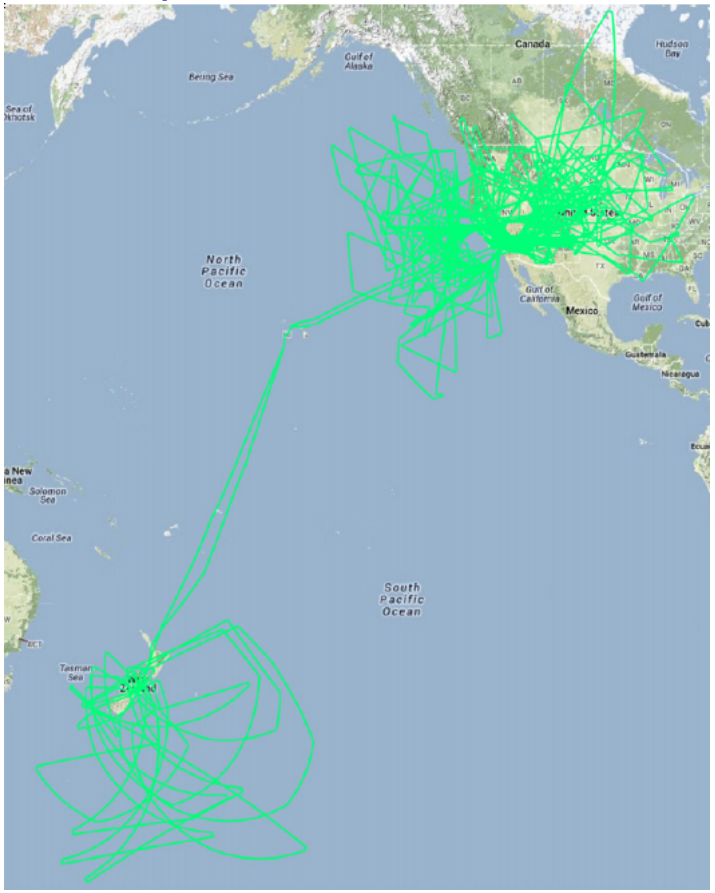
A Pluto csillagfedése 2011. jún. 23-án (bolygók mérete, gyűrűk, holdak kimutatása). A földi állomás mobiltelefonon adta meg a fedés középvonalának pontos helyét (100 km eltérés az addig tervezettől).

2015. jún. 29.: a Pluto újabb csillagfedése (észlelés Új-Zélandról).

Már készülnek a 2. generációs műszerek. A SOFIA repülési útvonalai 2013-ban.

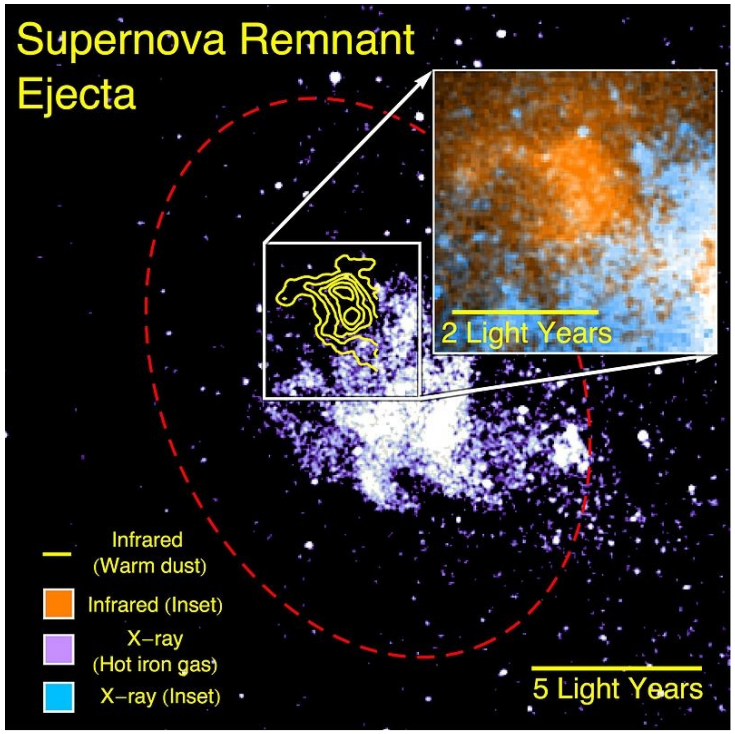


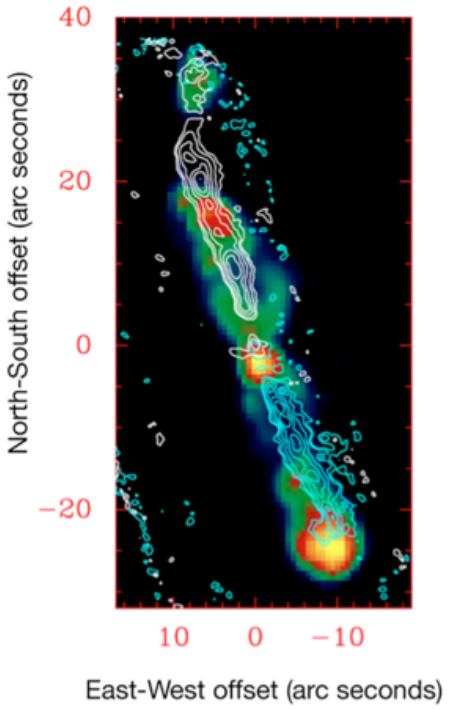




A SOFIA további eredményei

- atomos oxigén kimutatása a Mars légkörében
- hideg por sugárzásának észlelése aktív fekete lyuk körül
- protocsillag a Cep E-ben: bipoláris kilövellés fejhullámmal (jobbra lent)
- az ε Eri bolygórendszerében a maradékkorong észlelése
- 2017. júl.: a 2014 MU69 csillagfedésének észlelése – a felszínről nem sikerült (ez az objektum az Ultima Thule)
- szupernóva-maradványban meleg por kimutatása (balra lent)

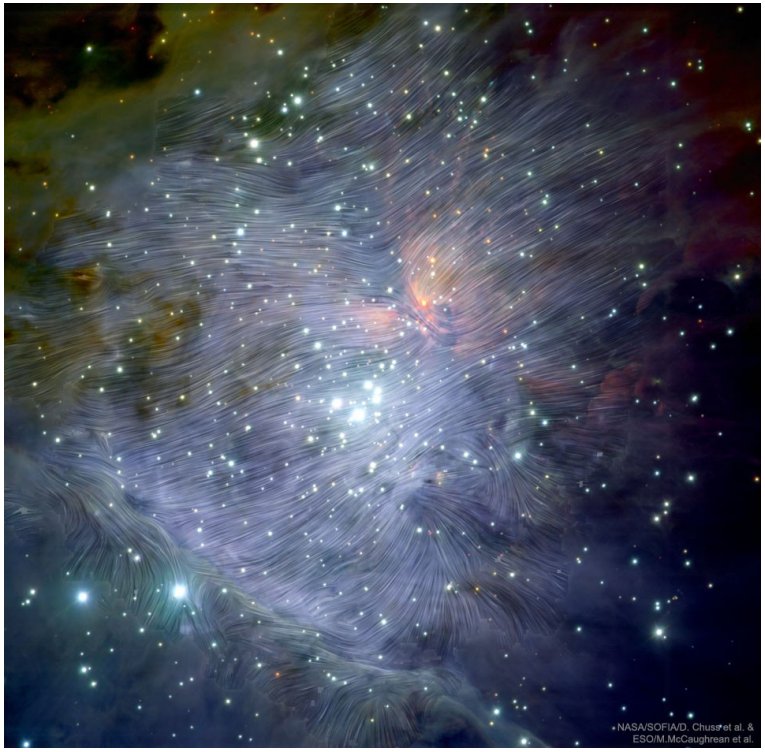


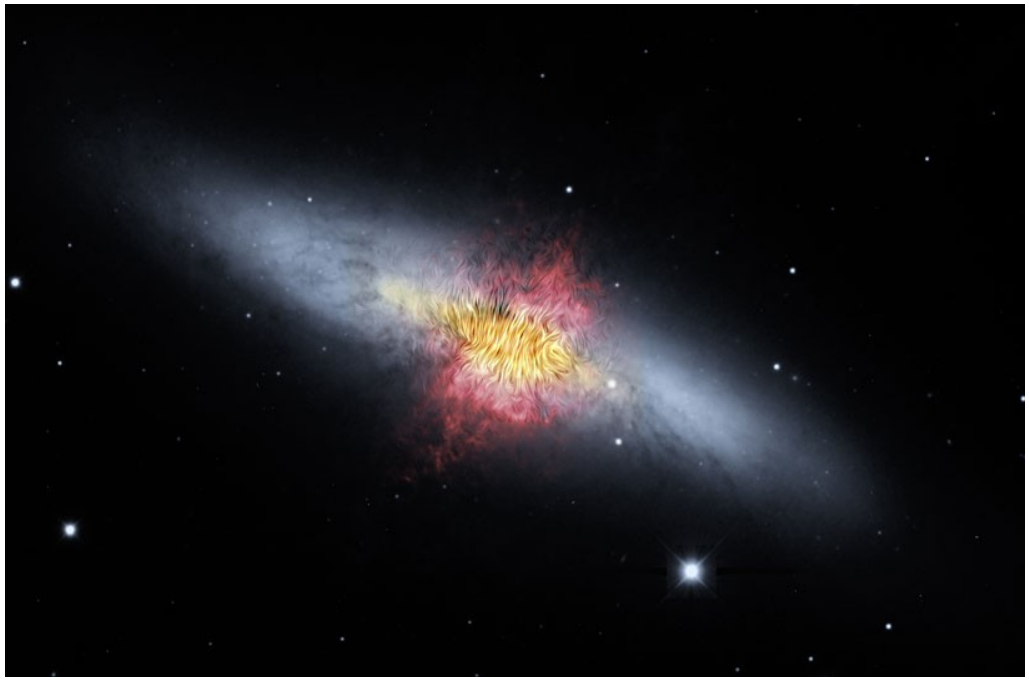


A SOFIA további eredményei

- polarizáció az Orion-ködben (távoli IR, HAWC) (balra lent)
- polarizáció az M82-ben (ugyancsak távoli IR, HAWC) (jobbra lent)

Mindkettő a Spitzer méréseinek használatával készült.





Csillagászat léggömbről

1874: Jules Janssen (1824-1907) egy ballon kosarában 7300 m magasról a Napot vizsgálta kézi spektroszkóppal.

1898-tól hőlégballonnal rendszeresen meteorrajokat vizsgált.

Rendszeres balloncsillagászat 1951-től létezik. Audoin Dollfus 30 cm-es refraktorral a Nap granulációs szerkezetét és a bolygólégköröket kutatta.

Majd: hermetikus kabin, életfenntartás, telemetria.

A kabin tetején 50 cm-es Cassegrain-távcső a kabinból irányítva.

Még később: automatikusan stabilizált gondola.

Csillagászat léggömbről

Stratoscope projekt (USA): 1957-től. Előbb belső óra vezérelte, majd folyamatos földi távirányítás. 1959-től mobil távirányítás.

Stratoscope I (1957-1959): 30 cm átmérőjű távcső, napfényképezés, granulációs szerkezet 1959-ben már TV-kép továbbításával.

Stratoscope II (1963-1967): 90 cm átmérőjű távcső, irányzása TV-kép alapján földi rávezetéssel. Bolygók és csillagok közeli-IR (0,8-3,4 μm) spektroszkópiája. H_2O felfedezése hideg csillagok atmoszférájában.

Coronascope projekt (USA): több tízezer köbméter térfogatú polietilén ballon, 5 ívmásodperc irányzási pontossággal, 30 km magasságig emelkedve. A napkoronát észlelték az 1960-as évek elején. Coronascope II (1964–1965): a külső napkorona észlelése fogyatkozáson kívül. Segített a Skylab koronográfjának tervezésében.

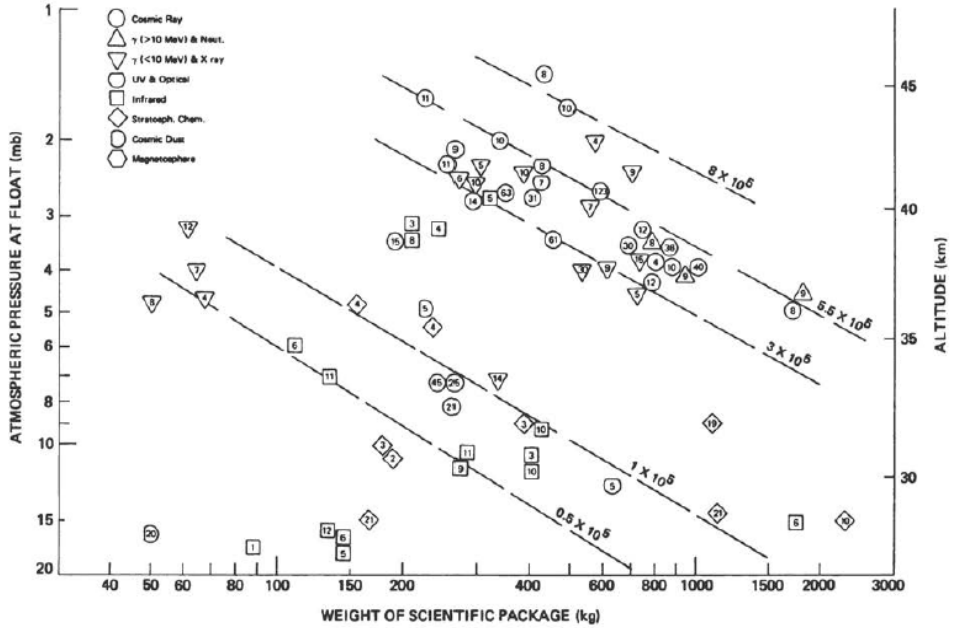
Polariscope projekt (USA): 1966 és 1969 között bolygók és csillagok UV polarimetriája és spektroszkópiája 200 nm-ig. „Előtanulmány” a Pioneer–10 és –11 polariméteréhez.

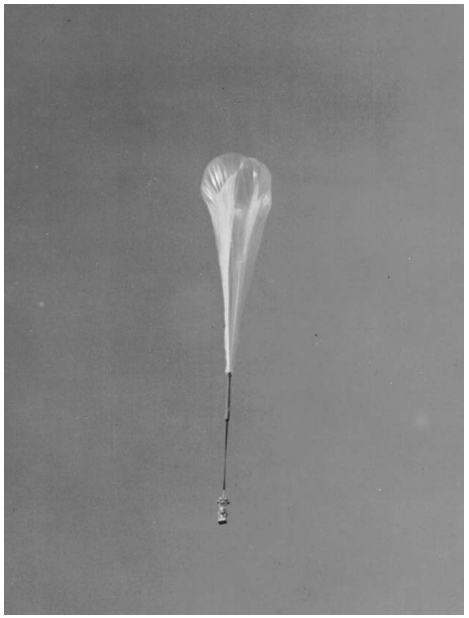
Spectrostratoscope projekt (USA): 1965 és 1975 között a Nap spektroszkópiája nagy szögfelbontással.

A ballonos csillagászat jellemzői

Előnyök: - Sima felszállás, a műszereket nem éri erős igénybevétel
- Rövid idő alatt előkészíthető
- Hibás műszer javítható, a program újra végrehajtható
- A berendezés többször használható
- Tömeg és méret nem számít (2 tonna hasznos terhet is elbír)
- Olcsó (a műholdas projektek költségének tizede-százada)
- A repülőgépeknél magasabbra jut fel (legfeljebb 50 km-re)

Hátrányok: - Fel- és leszálláskor kényes a meteorológiai viszonyokra (szél)
- Legfeljebb néhány napos-hetes folyamatos működés





A ballonos csillagászat művelése

- NCAR: National Center for Atmospheric Research. 1960-ban alapították (Boulder, CO).
- Ballonok indítása 1961 óta.
- 1963 óta a texasi Palestine indító-állomásról.
- 1987-ig 1500 indítás főként innen, de a Föld más pontjairól is.
- A 21. században főként légkörkutató ballonokat indítanak, de részt vesznek a Sunrise programjában is.
- Az 1970-es években a ballonra szerelt legnagyobb távcső 1 m átmérőjű volt, 30 ívmásodperces felbontással, 1 ívperc/perc követési pontossággal

TABLE II.E.1 Infrared Astronomical Experiments Launched by NCAR Balloon Launch Facility

Ames Research Center	C. Swift	Pointed IR Telescope
Center for Astrophysics/ HCO-SAO and University of Arizona	G. Fazio, F. J. Low	High-Resolution Far IR
Fraunhofer Institute, Freiburg	K. O. Kiepenheuer	Near-IR Solar Spectra
Goddard Space Flight Center	R. Hanel	IR Scanning Interferometer
Goddard Institute for Space Studies/ University of Arizona	W. F. Hoffmann	Far-IR Surveys and Mapping
Massachusetts Institute of Technology and University of Arizona	W. Lewin, F. J. Low	Far-IR Survey
Massachusetts Institute of Technology	R. Weiss, D. Muehlner	Cosmic Background Radiation
Max Planck Institute, Heidelberg	D. Lemke, W. Hoffmann	Far-IR Survey, Near-IR Photometry
Princeton University	P. Henry, D. Wilkinson	Cosmic Background Radiation
Queen May College, London	P. Clegg	Cosmic Background Radiation
University of Arizona	F. J. Low	Far-IR Surveys, Mapping, and Pointed Photometry
University of California, Berkeley	P. Richards, J. Mather	Cosmic Background Radiation
University College, London	R. Jennings	High-Resolution Far IR
University of Groningen	R. J. van Duinen	Far-IR Photometry
University of Liege	L. Delbouille, R. Zander	IR Solar Spectra
University of Massachusetts	J. Strong	IR from Circumsolar Dust and Solar Corona
Washington University	M. Friedlander	Far-IR Survey

Fontos balloncsillagászati projektek

THISBE (1970-1976): IR-észlelés, kiterjedt források, állatövi fény, a Tejútrendszer centruma

HIREGS (1991-1998): gamma- és keményröntgen-tartomány, napfler és galaktikus források

BOOMERanG (1997-2003): az Antarktisz fölött észlelt, hosszú időtartamú repülések, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást vizsgálta

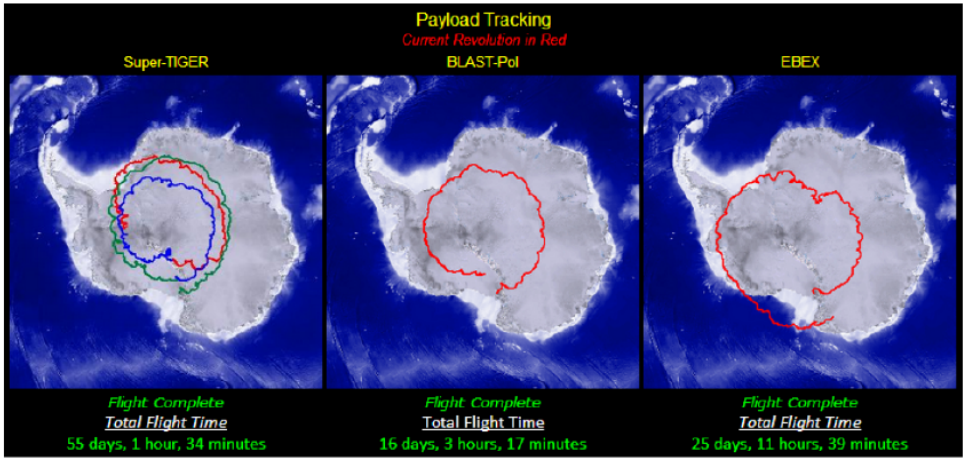
MAXIMA (1998-1999): mikrohullám, kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

HERO (2001-2010): keményröntgen (2010-ben lezuhant, tönkrement)

BLAST (2003-): 1,8 m átmérőjű szubmm-es távcső, 2010-ben negyedszer repült (2003, 2005 és 2007 után)

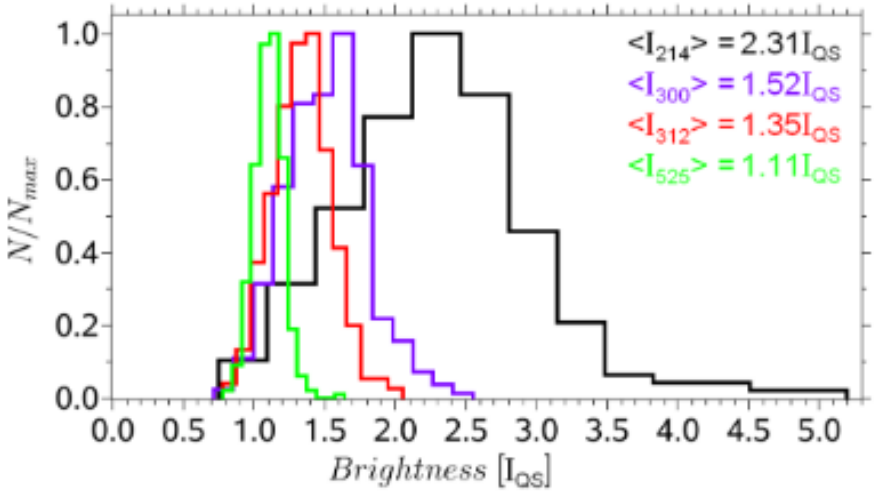
InFOCμS (2004-): keményröntgen, 49 cm^2 gyűjtőfelület

HEFT (2005): keményröntgen, képalkotás



Fontos balloncsillagászati projektek

Sunrise (2009-): 1 m átmérőjű távcsővel a Nap UV-észlelése, spektropolarimetriája, de diffrakcióhatárolt optikai képek is (amerikai, német, spanyol együttműködés).
Műszerei: SUFI (filter imager): 200-400 nm között; IMAX vektormagnetográf.
Eddig kétszer repült. 2009. jún. (napaktivitási minimum) és 2013. jún. (jelentős napaktivitás). 2019-re újabb indítást terveznek érzékenyebb műszerekkel.
Mindig Kirunából indították, 36 km-re szállt fel, É.-Kanadában szállt le.
A konvekció és a napmágneses mező kapcsolatát vizsgálta. A cél a mágneses mező 3D szerkezetének feltérképezése.
Fényes pontok (BP) a granulák határán: kilogauss mágneses koncentráció. A napállandó 0,1%-kal változik a napciklus során, és aktivitási maximumkor nagyobb, éppen a BP miatt (jobbra lent).



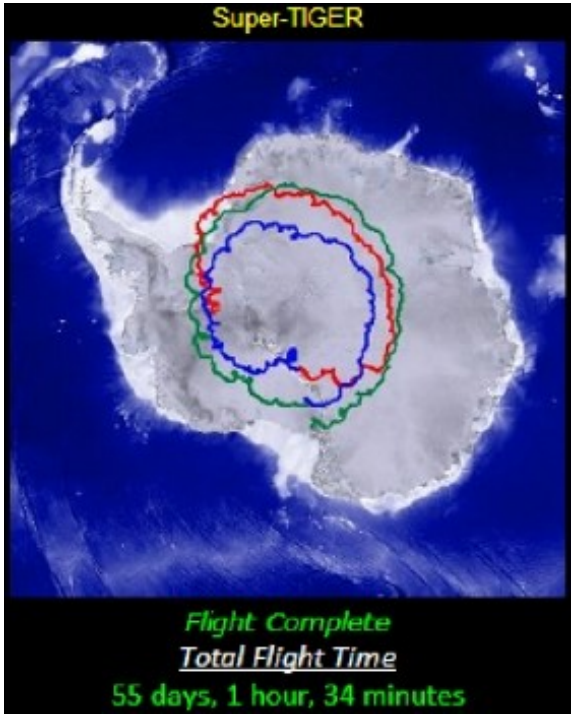
Fontos balloncsillagászati projektek

Főleg mikrohullámú-csillagászati és részecske-asztrofizikai kutatásokra

LDB (Long Duration Balloon): kontinensek között is átrepülhet, mesterséges holdak tartják a kapcsolatot a ballon és a földi állomás között, 3 hét maximális repülési időtartam. Ilyen pl. a BOOMERanG, TOP HAT, TIGER (Trans-Iron Galactic Element Recorder).

BOOMERanG (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics): 800000 m^3, 37 km magasra, 1,5 tonnás teleszkóp. 1998. XII. 29. – 1999. I. 8.: az égbolt 4%-a (COBE-nél jobb felbontás).

TIGER (a képen): 1997, 2001–2002, 2003–2004, 2006–2007: 18 napos repülés, vasnál nagyobb tömegű kozmikus sugarak, Cserenkov-effektussal. 2012–2013: Super-TIGER: 55 napos repülés



Fontos balloncsillagászati projektek

Helyszín: legjobb az *Antarktisz* (az ottani nyár, a műszerek dec.-febr. között kapnak napenergiát), cirkumpoláris örvénylés

BESS (Balloon Experiment with a Superconducting Spectrometer): USA – Japán, 1993 óta 9 repülés, kozmikus sugárzás vizsgálata (antiprotonok). Az utolsó (BESS-Polar, 2004) az Antarktiszról indítva.

ANITA (Antarctic Impulsive Transient Antenna): 2006–2007, ultranagy energiájú neutrínók és a kozmikus sugárzás ultranagy energiájú részecskéinek felfedezése.

CREAM: 2004. X. 16. – 2005. I. 27.; 42 nap után 660 km-rel a felbocsátás helyétől (McMurdo) szállt le. 137 m átmérő, polietilén gömb, 1,8 t teher. A légkörrel való kölcsönhatás előtt detektálja a kozmikus sugárzás részecskéit. Eddig 6 repülés, összesen 160 napig (rekord).

ULDB (Ultralong Duration Balloon): 2001-től tervezte a NASA; 100 napig is képes 35 km magasban maradni; 100 m átmérő, He-töltés, antarktiszi indítás. Ilyen pl. a CREAM (Cosmic Ray Energetics And Mass) is.

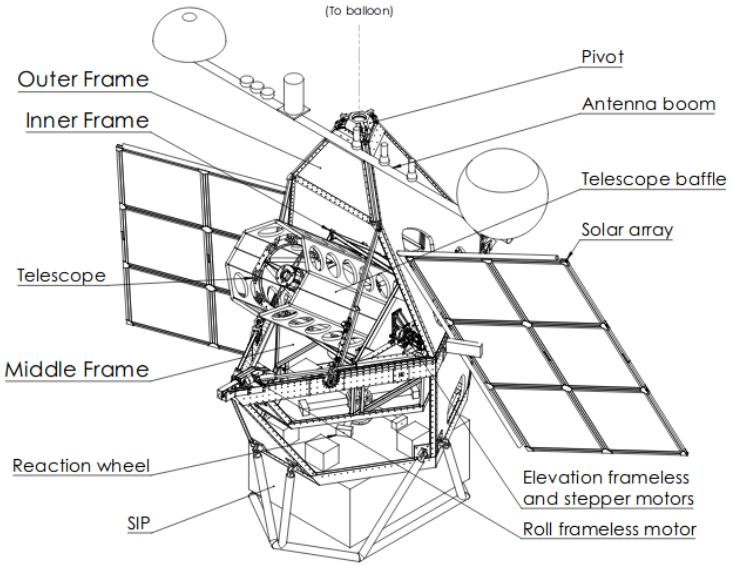
Az ULDB típus másik neve Superpressure Balloon (SPB): futballstadion méretűre felfúvódva állandó térfogaton tartják, hogy állandó magasságban lebegjen. Anyaga polietilén, a töltet hélium. 1200 kg tömeget képes 33 km magasan tartani 70-100 napig. A Szovjetunióban már korábban létezett (Vénusz-szondában küldve 1985-ben 50 km magasan lebegett a Vénusz felszíne fölött).

Fontos balloncsillagászati projektek

SuperBIT (Superpressure Balloon-borne Imaging Telescope): 0,5 m átmérőjű RC-teleszkóp diffrakcióhatárolt 0,01 ívmásodperces képalkotással adaptív optika nélkül. Fél fokos látómező, 5 perces felvétel alatt 0,02 ívmásodperces pozícióstabilitás.

Tesztrepülés: 2015 (Kanada), 2016 (USA). Tervezik új-zélandi indítását, amikor is 100 napon át 200 galaxishalmazban észlel gravitációs lencséket ($0,1<z<0,5$ között).

Később 1-2 méteres távcsövet rászerelve is akarnak észlelni.



Fontos balloncsillagászati projektek

BLAST (Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope):
2 m-es Cassegrain-távcső a gondolában;
3 érzékelő: 250, 350 és 500 mikrométeren széles sávú bolometrikus detektor;
250 mikrométernél 30” szögfelbontás;
Galaxisfejlődés vizsgálata különböző vöröseltolódás-értékek esetén.
NASA, Kanada, Egyesült Királyság.
2003: próbarepülés; 2005. jún.: 100 órás repülés Kirunából (ESRANGE) Kanadába; 2006: 250 órás cirkumpoláris repülés McMurdo bázistól; 2010, majd 2012: BLASTPol: intersztelláris por polarizációja molekulafelhőkben (250, 350, 500 μm) a csillagképződés helyszínén a mágneses mező vizsgálatára

Ballon, rakéta vagy űrszonda?

TABLE II.C.1 Vehicle Comparison for Scientific Objectives

	Vehicle		
Objective	Balloon	Satellite	Rocket
Solar flares	Require long duration	Good coverage	Quick response to flare; limited observation time
Celestial x-ray sources	Long duration desirable, higher altitudes useful	Good coverage; flexible orientation is desirable	Acceptable for unique requirements; e.g., lunar occultation of extended source
Diffuse background	Requires correction for emission from residual atmosphere	Good coverage; susceptible to spallation-produced background	Useful below ~150 keV
Line gamma-ray emission	Long duration and heavy payload desirable	Good coverage; flexible orientation is desirable	No
Gamma-ray bursts	Require long duration	Can provide 4π coverage; high positional accuracy with long-baseline techniques	No

Csillagászat rakétákról

A légkör által teljesen elnyelt hullámhosszakon használják.

Először katonai rakéták függőleges indítása, majd a rakéták visszahozatala ejtőernyővel.

Első célpont: a Nap.

1946: V2 rakéta, távoli-UV;

1949: a Nap röntgensugárzása (de első képalkotás csak 1960-ban);

1962: Aerobee: 10 m hosszú, 100-200 km magasra emelkedik. Giacconi & Rossi a Hold röntgenfluoreszcenciáját akarta mérni, de a rakéta forgása miatt a detektor az egész eget letapogatta. Sco X-1 felfedezése (V818 Sco 11 magnitúdós változócsillag optikaiban).

Csillagászat rakétákról

1963: a Rák-köd röntgensugárzása;

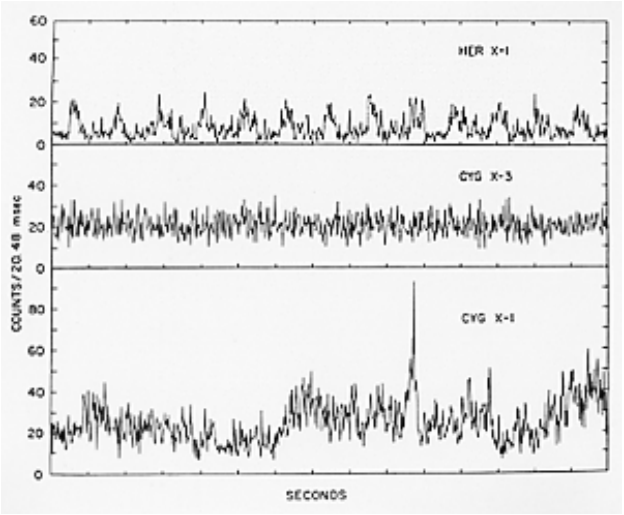
1964: Hold-fedéssel pontos röntgenpozíció;

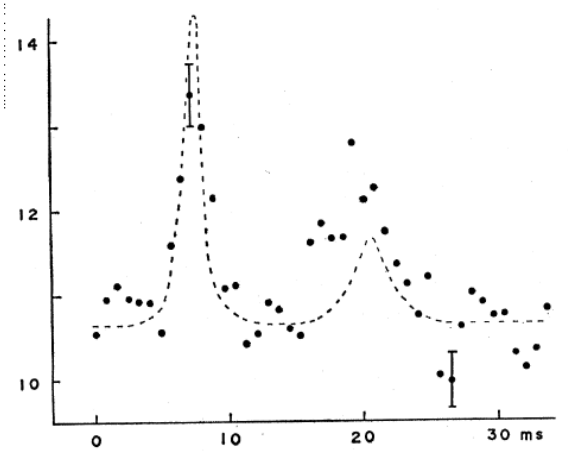
1966: „diffúz” röntgenháttér detektálása;

1967: Cen X-2, az első időszakos röntgenforrás;

1969: a Rák-pulzár röntgenben is pulzál (optikai pulzus kimutatása is 1969-ben, néhány hónappal korábban).

A rakéták szerepe csökkent, de nem szűnt meg. Pl. SN1987A felfénylésekor annak észlelésére gyorsan rakétát bocsátottak fel (és a KAO is a déli félgömbön repült).

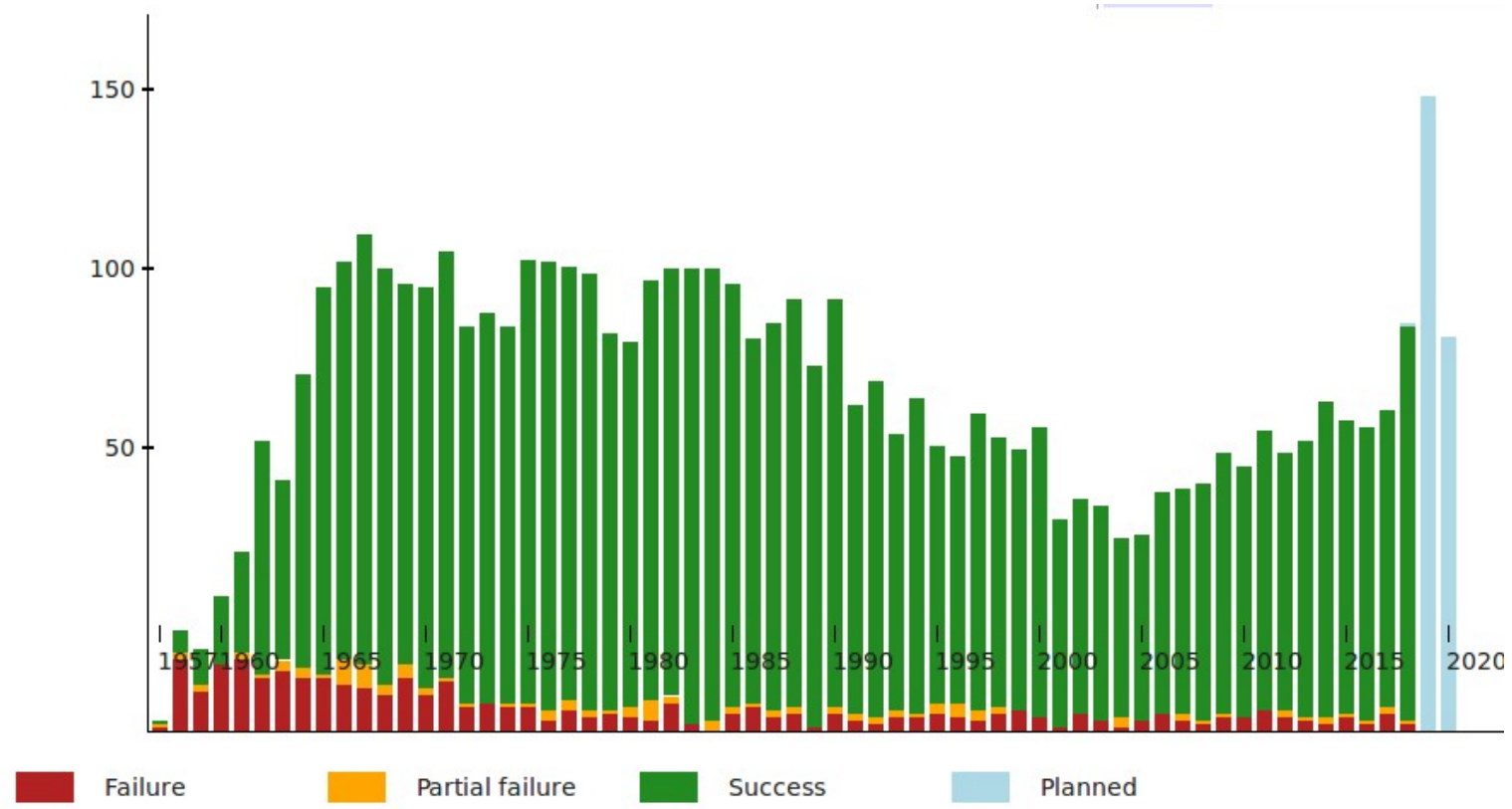




Csillagászati célú mesterséges holdak

1957-től eleinte majdnem minden műholdon volt valamilyen csillagászati célú detektor (de a gammaérzékelők titkos méréseket végeztek).

Lent: az indítások időbeli alakulása minden mesterséges égitestre (emlékezzünk majd erre az űrszemét problémájának említésekor!)



Csillagászati célú mesterséges holdak

Hidegháború → 1958-ban megalakul a NASA.
Presztízs okokból az OAO programot erőltették, és nem a csillagászok érdekeit nézték.

Fontosabb kezdeti eredmények:

1958: Explorer–1: Van Allen-övek (magnetoszféra)

1959: Explorer–7: napkutatás

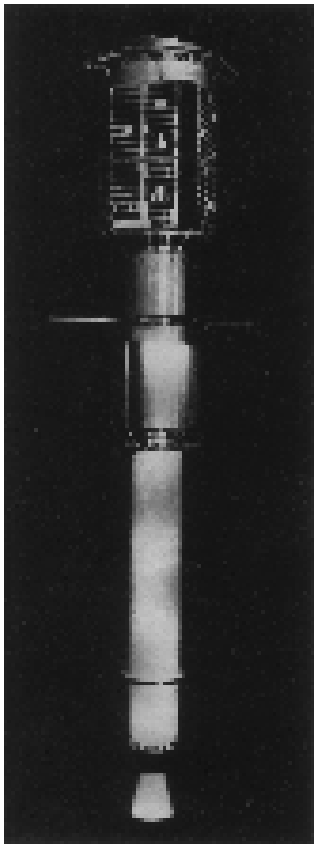
Kifejezetten csillagászati holdak:

1961: Explorer–11: gammacsillagászat kezdete

Az Explorer-sorozatban napfizikai holdak is voltak, sőt az első rádiócsillagászati hold is az Explorer sorozat tagja volt.

Explorer–38 (RAE–A): 1968-ban a galaktikus háttérsugárzást mérte 6000 km magasról. RAE–B (1973): Hold körüli pályára állították a földi eredetű rádiózavarok kiküszöbölésére.

OSO: 1962–1975 között 8 indítás; a Nap UV és röntgensugárzása.

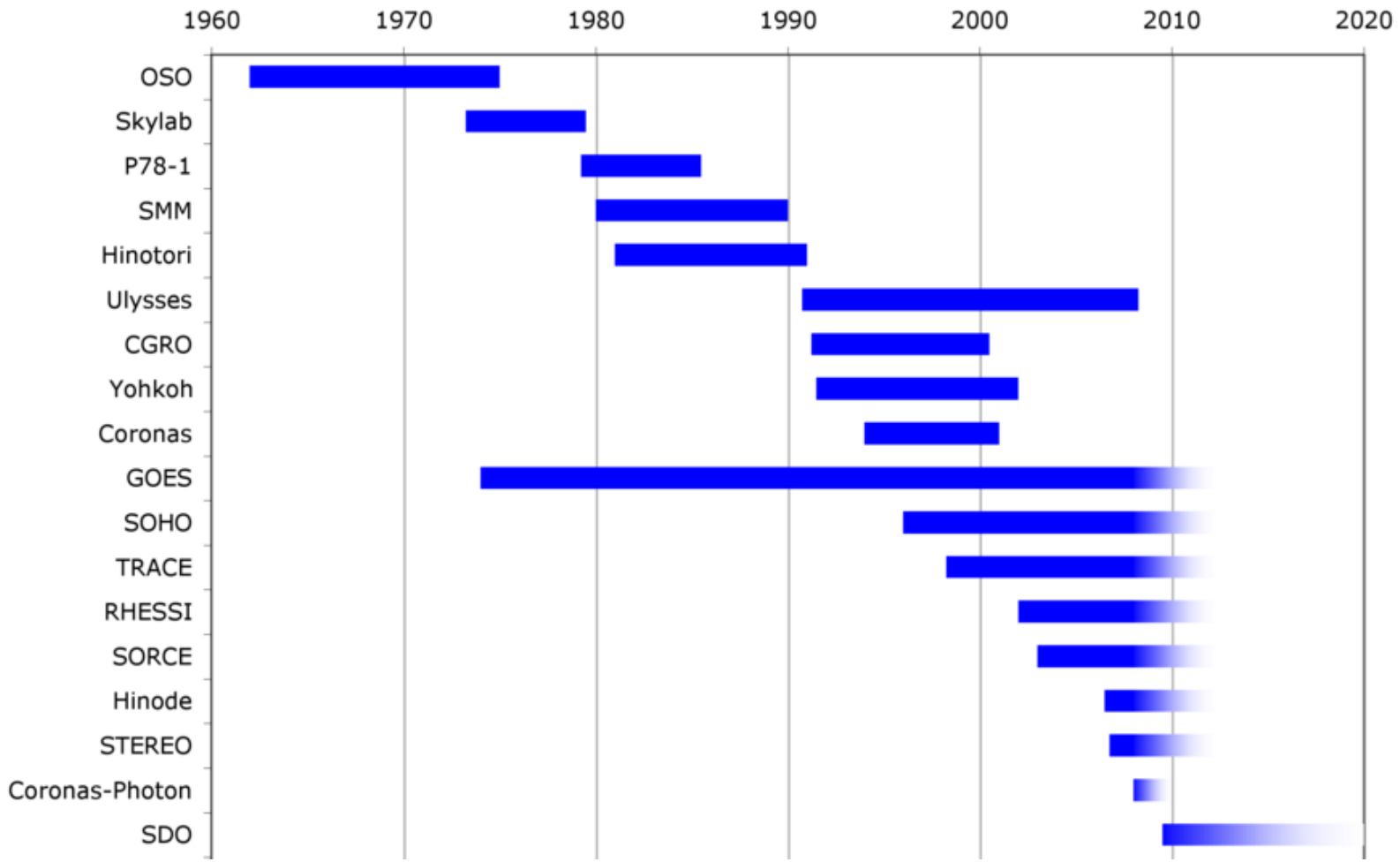


Napkutató űrszondák

Űreszköz	Start	Eredmények
OSO–1	1962. 03. 07.	A napkorona hőmérsékletének és anyageloszlásának vizsgálata
OSO–2	1965. 02. 03.	Mérések UV-, röntgen- és gammatartományban
OSO–3	1967. 03. 08.	Mérések röntgen- és gammatartományban
OSO–4	1967. 10. 18.	Mérések extrém UV-tartományban
OSO–5	1969. 01. 22.	Napsugárzásmérések
OSO–6	1969. 08. 09.	Napfizikai mérések
OSO–7	1971. 09. 29.	Vizsgálatok UV-, röntgen- és gammatartományban
Skylab ATM	1973. 05. 14.	8 naptávcső, 177 047 felvétel, a koronalyukak felfedezése
Helios–1	1974. 12. 10.	A Nap és a bolygóközi tér vizsgálata heliocentrikus pályáról
OSO–8	1975. 06. 21.	Röntgensugárzás-mérések
Helios–2	1976. 01. 16.	A Nap és a bolygóközi tér vizsgálata heliocentrikus pályáról
SMM	1980. 02. 14.	Napállanómérések, flerek vizsgálata, javítás: STS–41C (Challenger)
Hinotori	1981. 02. 21.	Flerek vizsgálata a röntgentartományban
SME	1981. 10. 06.	A Nap UV-sugárzásának hatása a földlégkör ózontartalmára
SPARTAN–1	1985. 06. 17.	Koronográf, UV-mérések, kihelyezés+befogás: STS–51G (Discovery)
Spacelab–2	1985. 07. 29.	A fotoszféra és a granulációk vizsgálata
Ulysses	1990. 10. 06.	1992. 02. 08.: Jupiter flyby, majd első mérések a Nap pólusai felett
Yohkoh	1991. 08. 30.	Kóma- és flervizsgálatok (röntgensugárzás-mérők, spektrométerek)
SPARTAN–201/1	1993. 04. 08.	Mérések koronográffal, kihelyezés+befogás: STS–56 (Discovery)
Koronasz-I	1994. 03. 02.	A napsugárzás vizsgálata a teljes elektromágneses spektrumban
SPARTAN–201/2	1994. 09. 09.	Koronográf, UV-mérések, kihelyezés+befogás: STS–64 (Discovery)
SPARTAN–201/3	1995. 09. 07.	Mérések koronográffal, kihelyezés+befogás: STS–69 (Endeavour)
SOHO	1995. 12. 02.	Napkorona és napszél finomszerkezeti vizsgálatai az L1 pontból
SPARTAN–201/4	1997. 11. 19.	Koronográf, UV-mérések, kihelyezés+befogás: STS–87 (Columbia)
SPARTAN–201/5	1998. 10. 29.	Koronográf, UV-mérések, kihelyezés+befogás: STS–95 (Discovery)
Koronasz-F	2001. 07. 31.	Röntgensugárzás-mérések
Genesis	2001. 08. 08.	Mintavétel a napszélből (0,4 mg), 2004. 09. 08.: leszállás a Földre

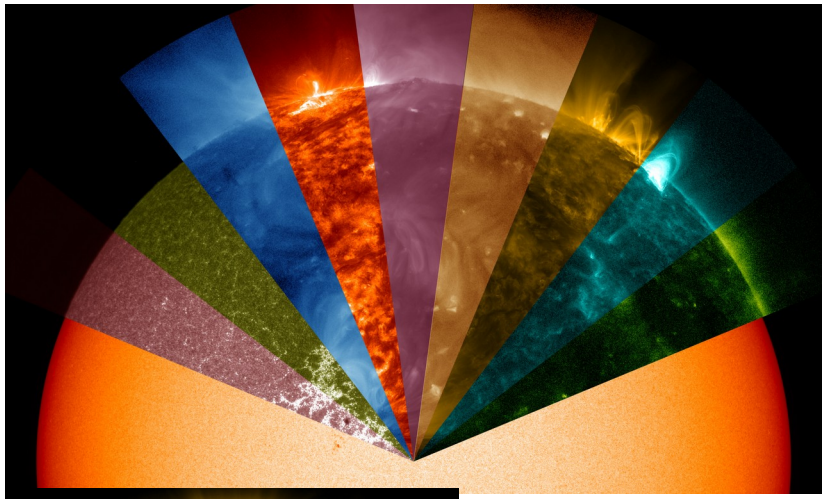
Hinode 2006–, STEREO 2006–, SDO 2010–, DSCOVR 2015– ,
Parker Solar Probe 2018– , Solar Orbiter 2020–?

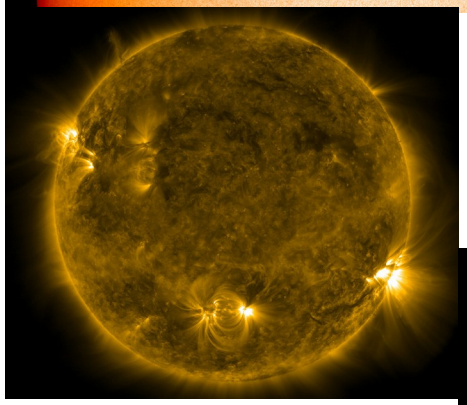
Napkutató űrszondák

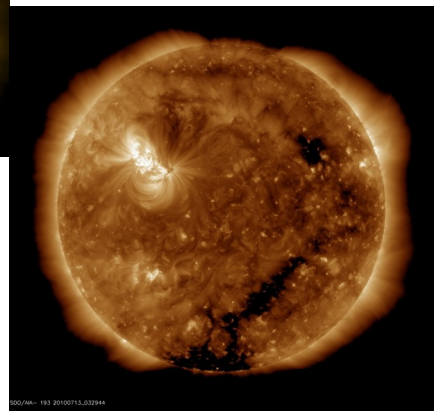


Napkutató űrszondák

- RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager): 2002. II.-tól (NASA) (kétéves működést terveztek, de 2018-ig mért).
- Hinode (Napfelkelte): 2006. IX.-től (JAXA/NASA), röntgen, EUV, opt.
- STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory): 2006. X.-től (NASA); 2 szonda L4 és L5 felé, 4-4 műszerrel; 3-dimenziós kép a Napról.
- SDO (Solar Dynamics Observatory): 2010. II.-tól (NASA), a SOHO „utódja”, 3 műszerrel
- Solar Sentinels: 2015–2017 (NASA), 3-szor 2 szonda
- Űridőjárás kutatása: GOES (1975–2010 között 4 szonda), NOAA-N (2005)







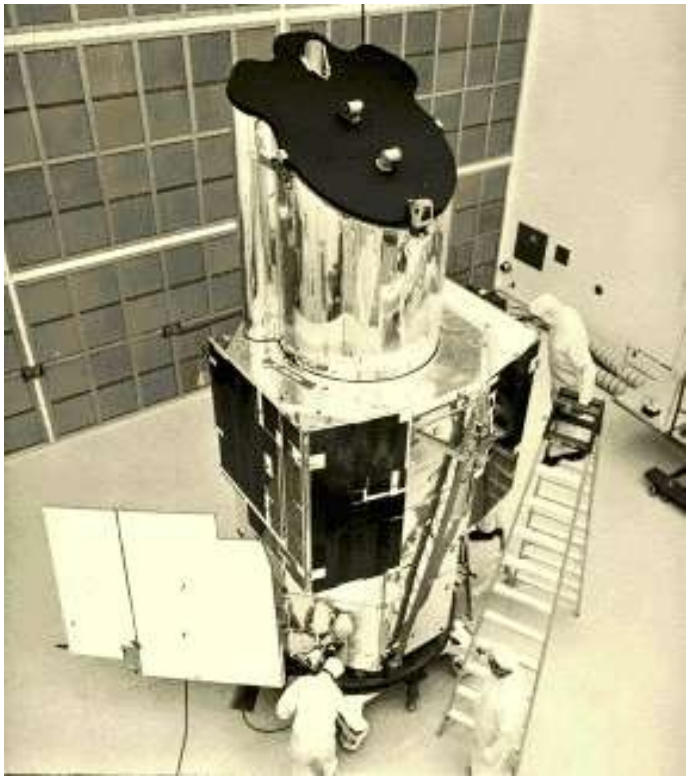
Kezdeti csillagászati műholdak

OAO-sorozat, 1966-tól: de OAO–1 nem működött (energiaellátás csak 3 napig).

OAO–2: 1968–1973, körpálya, giroszkópos stabilizálás, 1” pontosság (tömeg: 2 t); 4 db 31 cm-es távcső UV-ben 9^m-ig mérte az eget → 17000 csillag UV-fényessége (SAO + UWisconsin); további távcsövek: 4 db 20 cm-es + 1 db 40 cm-es; 0,1 nm felbontású UV-színképek. Az eredmények továbbítása videokamerával, tévélánccal.

Fontos eredményei: a nóvák UV-fényessége az optikai leszálló ágon is nőhet; üstökösök körül több ezer km-es hidrogénhaló.

OAO–3 (Copernicus): 1972–1981, a legsikeresebb tag (bővebben az UV-csillagászatról szóló előadásban).



Kezdeti csillagászati műholdak

Uhuru = SAS-A = Explorer–42: az első röntgenhold; 1970. dec. – 1973. ápr.; (Kenya mellől, a San Marco platformról indították); stabilizált forgás 550 km magas pályán.

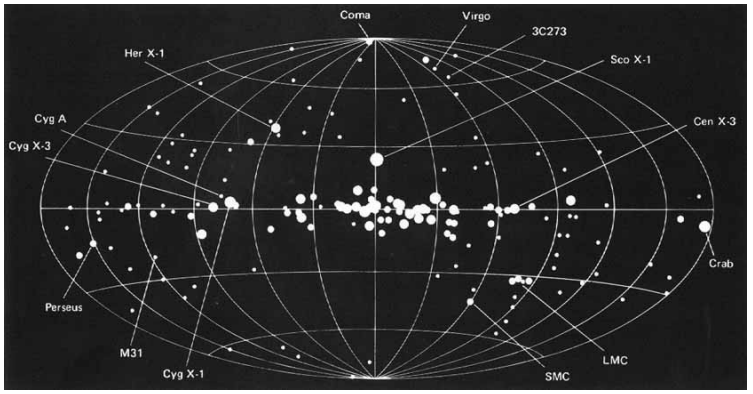
2–20 keV között néhány ívperc pontossággal letapogatta az eget; változó erősségű források és azok azonosítása;

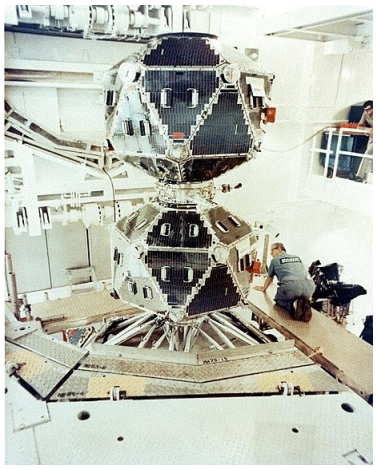
4 Uhuru-katalógusban 339 forrás, főleg a Tejútrendszer fősíkjához közel.

1 UFU = $1{,}7 \cdot 10^{-11}$ erg/(cm$^2 \cdot$ s) =

0,001 foton/(cm$^2 \cdot$ s) (2–10 keV között)

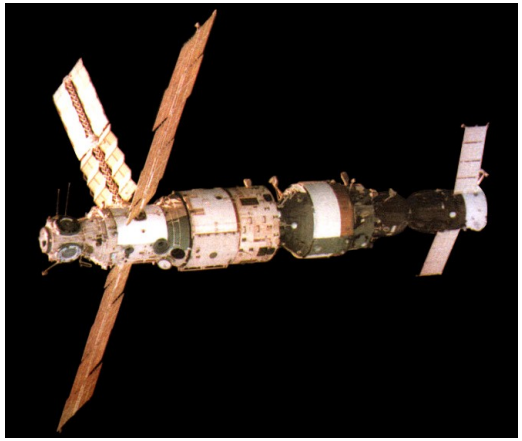
Vela-műholdak: 1969-től más céllal, 110 ezer km magas körpályán; rögtön felfedezték a gammakitöréseket, de csak 1973-ban jelentették be.

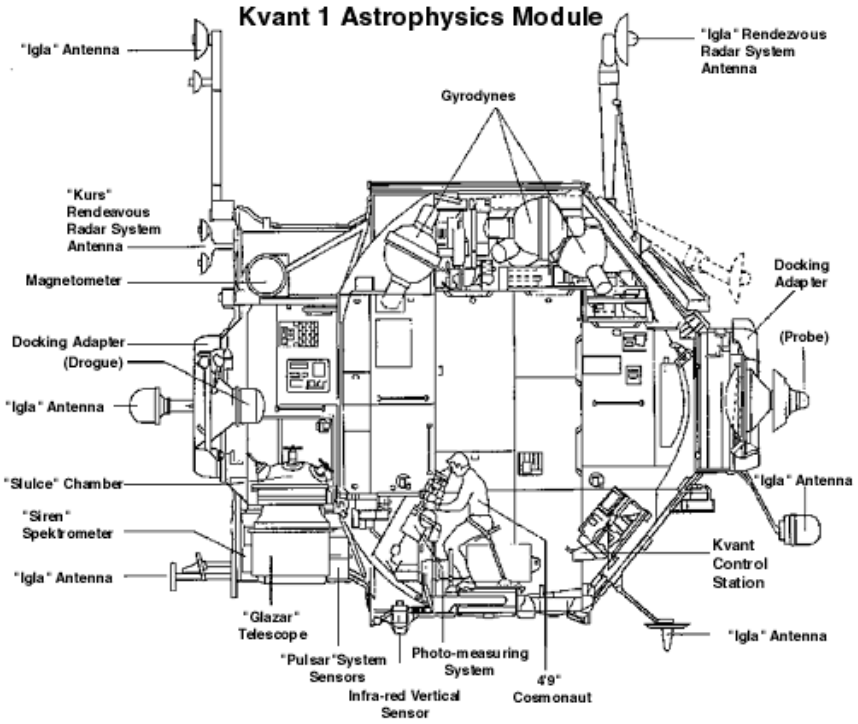




Emberes mérések

Az 1960-as években a Gemini űrhajósai.
1972-ben John Young (Apollo-16) a Holdról Schmidt-távcsővel UV-színképet készített.
Szaljut-1 (1971) és Szojuz-13 (1973) fedélzetén Orion-távcsövek.
Orion–1: spektrográf 30 cm-es távcsövön, 0,5 nm felbontású UV-spektrumok;
Orion–2: 24 cm-es objektívprizmás Makszutov-távcső.
Hátrány a rövid észlelési idő, de az űrhajóssal együtt az adatok is biztosan visszakerülnek.
Kiment a divatból. Űrállomáson (pl. Mir, 1986–2001) automata mérőeszközök, de helyszíni emberi beavatkozás lehetséges.
Kvant–1 modul 1987-től, röntgen- és UV-megfigyelések.





Elnevezésbeli sajátosságok

Űreszköz, űrszonda általában, de az eszköz tulajdonságai, a mérés helyszíne és jellege alapján lehet pontosítani, megkülönböztetni.

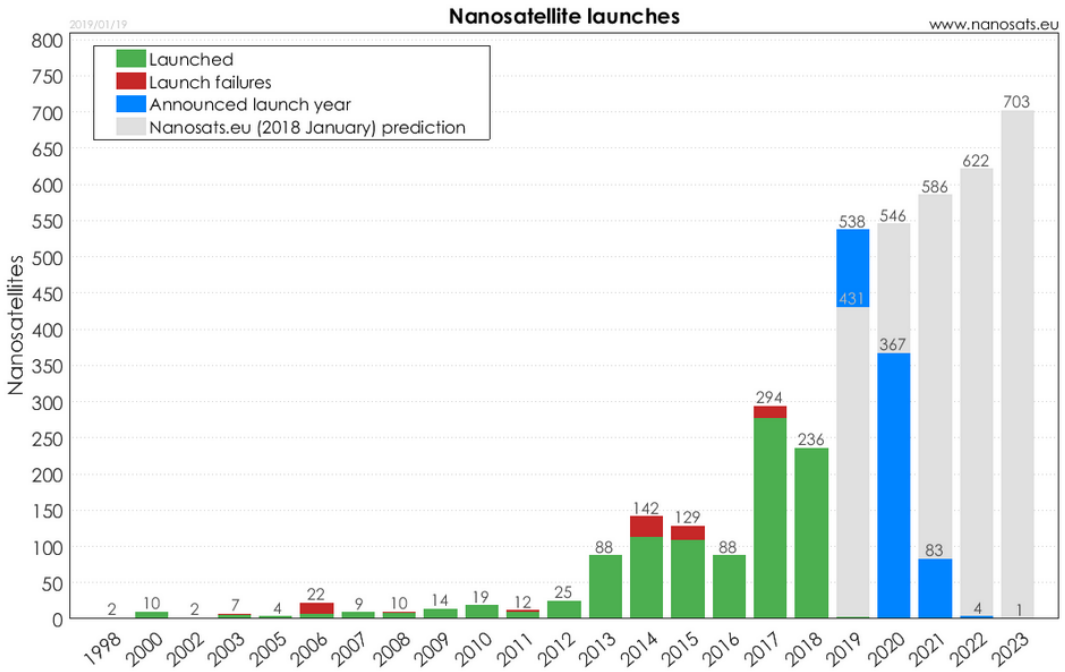
Műhold: ha a Föld vagy más bolygó, kisbolygó körül kering.

Űrobszervatórium (pályázati úton elnyert észlelési idő): pl. IUE, HST, ISO;

Példák nem obszervatóriumra: IRAS, Hipparcos;

Tömeg alapján: minihold (100–500 kg), mikrohold (10–100 kg), nanohold (1–10 kg), pikohold (0,1–1 kg).

CubeSat: 1U: 10 cm · 10 cm · 10 cm
(1 köbdeciméter)
6U: 10 cm · 20 cm · 30 cm
12U: 20 cm · 20 cm · 30 cm.
2018-ban az InSight
Mars-szonda 2 6U méretű
CubeSat-ot vitt magával
(Mars Cube One, MarsCO).
2019-ig ezernél több
CubeSat-ot indítottak
90%-ot meghaladó sikerrel.



Elnevezésbeli sajátosságok

A ***pálya*** lehet:

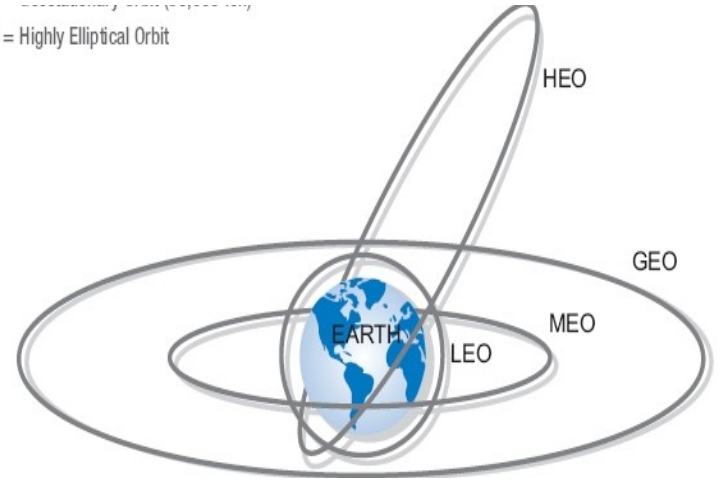
LEO (low Earth orbit): 200–1200 km. Helyszíni javítás lehetséges. Fékeződés gyors.

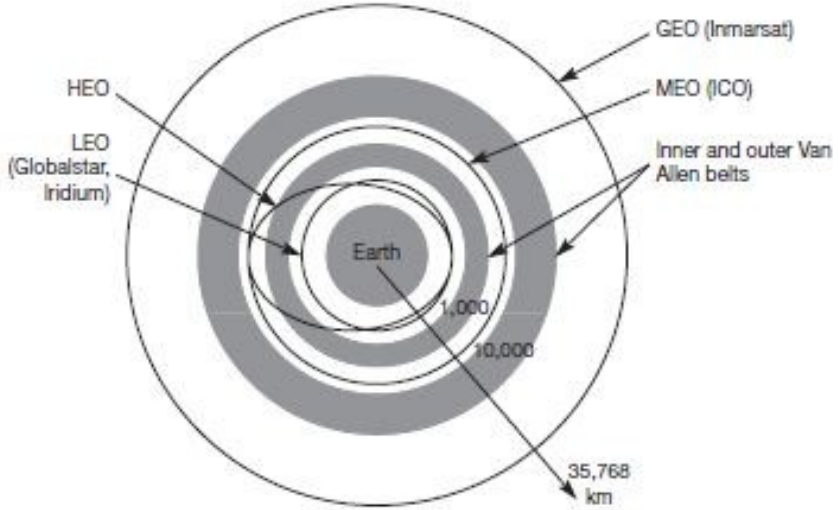
MEO (medium Earth orbit): 1200–35786 km.

HEO (high Earth orbit): 35786 km felett. Molnyija típusú pálya, a magnetoszféra kevéssé zavar, hosszabb folyamatos észlelési idő lehetséges, holdfedés „kikényszerítése”, VLBI.

GEO: 35786 km-rel a felszín fölött. *Geoszinkron* vagy *geostacionárius* pálya (e=0, i=0). Adattovábbítás egy konkrét földi központba (IUE).

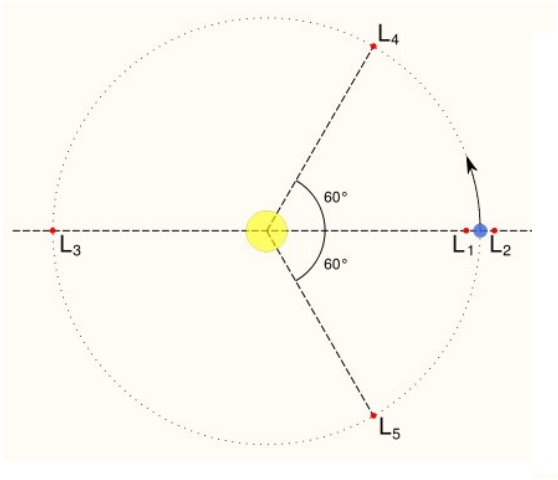
Poláris pálya, napszinkron pálya (a pályasík állandó szöget zár be a Nappal).

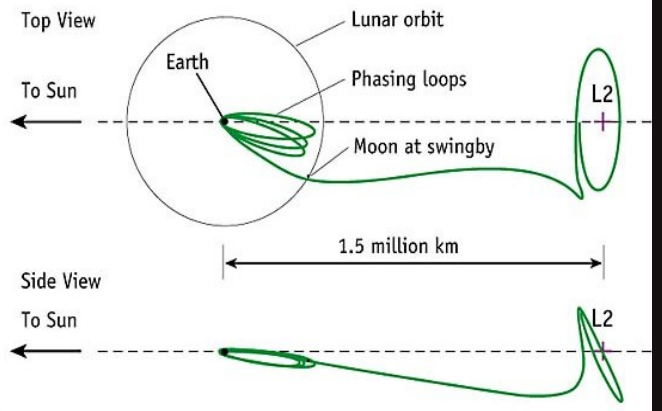


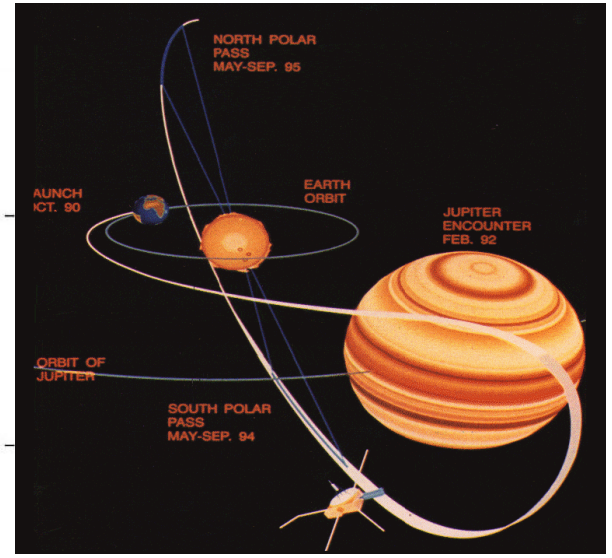


Librációs pontokba telepítés

Librációs (Lagrange-) pontok:
L1: Nap és napszél vizsgálata, űridőjárás (SOHO, ACE)
L2: nem zavar a Föld, tartósan alacsony hőmérséklet (WMAP, Gaia).
Halópálya L1 és L2 körül
L3: az űrcsillagászatban nincs szerepe
L4 és L5: STEREO
Egyéb pályák: a Földével majdnem azonos pálya (Spitzer, Kepler)
Más égitest körül vagy leszállás azok felszínére. Bolygószonda, kisbolygószonda (Dawn), üstökösszonda (Rosetta → Philae)
Hintamanőver: Ulysses kilendítése az ekliptikából.





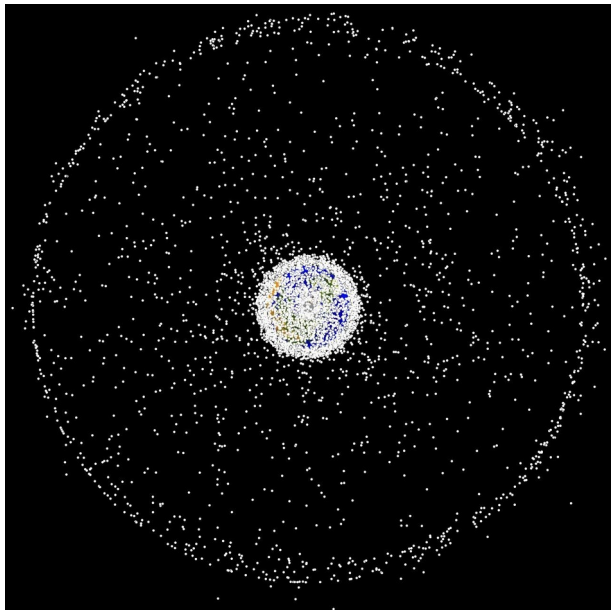


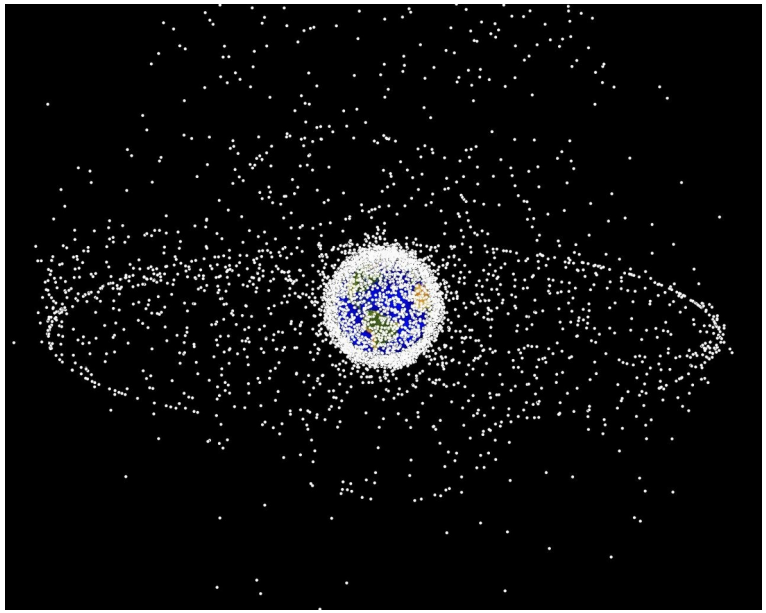
Káros környezeti hatások

Humán hatások az űrcsillagászati mérésekre

Űrszemét: 1992-ben 7000 katalogizált objektum keringett (kis magasságban 10 cm, GEO-pályán 1 m felett), ennek 6%-a volt akkor működő mesterséges hold.

2013-ban 19000 darab 5 cm felett 2000 km magasságig, becslés szerint 300000 db 1 cm-nél kisebb törmelék.





Káros környezeti hatások

Emlékezetes esetek: kesztyű, fényképezőgép, szerszámostáska, ütközés (2009. II. 10., Iridium + Kozmosz-2251, 600 db űrszemét keletkezett)

A hosszú aktív élettartamú IUE-nél kb. 4-évente történt becsapódásra visszavezethető anomália (de mikrometeoritok is lehettek).

Megsemmisítés: pályamódosítás, visszahozatal, szétrobbantás.

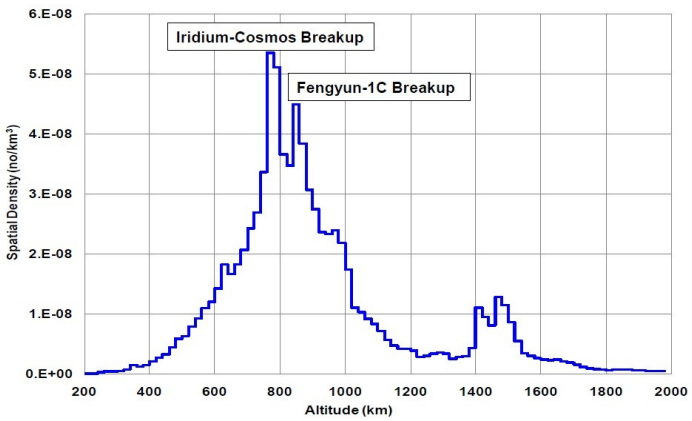
LEO és GEO pályáknál lényeges, főleg 0 és 90 fokos inklinációknál.

Fékeződés: 1000 km magasságban a keringés 2000 év után ér véget.

Fő veszély: a törmelékképződés kaszkádszerű felerősödése.

Műszaki megoldásokkal meg kell akadályozni a törmelékképződést.

Nukleáris üzemanyag hatása: hosszú élettartamú és magas pályájú eszközöknél. A gammacsillagászatban hamis jelet okoz (511 keV).



Csillagászat a Holdról

Hatalmas előnyök csillagászati szempontból, de költségei miatt megéri-e? A telepítés drága, az üzemeltetés nem.

Előnyösebben használható a Föld körül keringő vagy a Lagrange-pontba telepített űreszköz, még akkor is, ha a holdi obszervatórium autonom, könnyű optikákkal és szuperkönnyű kompozitanyagból készült, szilárd tartószerkezettel van ellátva. Fél évszázada van űrcsillagászat – az OAO–2 mint első űrtávcső ma primitív szerkezetnek tűnne, de felbocsátásakor forradalmi újdonság volt.

Csillagászat a Holdról

A holdi bázis előnyei (űreszközön mint platformon levő távcsövekhez képest): mágneses mező hiánya, stabil hőmérsékleti környezet, űrszemét nem zavar, szilárd felszín.

Mágneses mező hiánya: nincsenek sugárzási övek a magnetoszférán kívül (LEO-pályánál forró pixelek), de az L2 pontban sincs efféle gond.

Stabil hőmérsékleti környezet: a lassú mozgás miatt van idő a hőmérsékleti egyensúly kialakulására (↔ LEO-nál a deformáció képtorzuláshoz vezet). IR-ben nagyon fontos a hőmérsékleti egyensúly (+ alacsony hőmérséklet), pl. poláris napszinkron pálya a terminátor felett (COBE, IRAS).

Űrszemét nem zavar: ez a LEO-pályáknál lehet gond (0,1% esély egy 1 cm-nél nagyobb darabbal való találkozásra 10 m^2 keresztmetszet esetén).

Szilárd felszín: de az űreszköz is stabil platform, pontosabban irányozható, mint a földi távcsövek. Az igénybevétel miatt azonban a helyzetérzékelő tönkremehet (ASCA, Kepler, IUE ↔ SMM). Alkalmas optikai vákuumpadhoz nagy csillagászati interferométereknél (nincs tektonikus aktivitás, akusztikus rezgés vagy más vibráció). De LISA űrprojekt gravitációs hullámok kimutatására.

Csillagászat a Holdról

A holdi bázis előnyei (földi bázishoz viszonyítva): légkör hiánya, a Föld mint égitest is tanulmányozható, gyenge gravitáció, az égbolt lassú forgása, rádiózaj hiánya, alacsony hőmérséklet.

Légkör hiánya: opacitás, hővezetés, szél hatása figyelmen kívül hagyható, de a kozmikus térségben sincs légkör, csak LEO-pályánál fékez a felsőlégkör, és bevonat képződik a távcsőoptikákon.

A Föld mint égitest folyamatos tanulmányozásának lehetősége csillagászati szempontból: de erre jó a geoszinkron pálya is, sőt az közelebbi.

Gyenge gravitáció: *g* értéke 1/6-a a földinek. Nagy távcső összeszerelése és működtetése egyszerűbb *g*=0 esetén. A gyenge, de nem 0 gravitáció előnye a cseppfolyós Hg-ból forgatással kialakítható hatalmas tükör, zenit körüli vizsgálatra (a Földön ki is próbálták, a szél ellenére használható).

Az égbolt lassú forgása (a gravitáció vektorához képest): kb. 30-szor lassabb, mint a Földön. Tranzittávcsöveknél ez jó, CCD-érzékelővel csíkokban fel lehet mérni az eget. (SDSS ilyen, az űrben LEO-pályán a GALEX mért így).

Nincs rádiózaj: A Hold túlsó félgömbjére nem jut el földi eredetű rádió-interferencia. Más irányból (a Mars és Jupiter felől) viszont rádiózaj éri a Holdat. Költségei miatt nincs is komoly terv holdi rádióteleszkóp építésére. Az űr-VLBI pedig másképpen is megoldható.

Csillagászat a Holdról

Alacsony hőmérséklet (és persze stabil hőmérsékleti környezet): különösen IR-detektoroknál lényeges (nem kell külön hűtés). Az űrben véges a működési idő a hűtőanyag fogyása miatt. A Holdon pótolható a kriogén hűtőanyag. Sőt a Hold pólusainál a kráteraljzatokban sosem látszik a Nap, sem a Föld. Ott folyamatosan 30 K lehet a hőmérséklet (a Naprendszer leghidegebb helyei). Árnyékolással és passzív hűtéssel 7 K is elérhető. Mostanra a holdi topográfiát is meghatározták a pólusok környékén (térképezés a 2009 óta működő Lunar Reconnaissance Orbiter szondával). A kráter alján levő távcső kilátása viszont korlátozott – jobb az L2 Lagrange-pont e tekintetben.

Élettartam: jó-e egyáltalán a hosszú élettartam? Konkrét tudományos kérdések megválaszolására tervezett műszereknél az a cél, hogy elfogadható időn belül megszülessen a válasz. A műszaki fejlődés üteme miatt gyorsan avulnak az eszközök (főleg a detektorok). A HST-nél ezért volt előre betervezve néhány szerviz (közel 30 éve működik). A működtetés éves költsége az elkészítés+felbocsátás költségének kb. 10%-a. Nem egyértelműen előnyös a hosszú misszió (IUE példája).

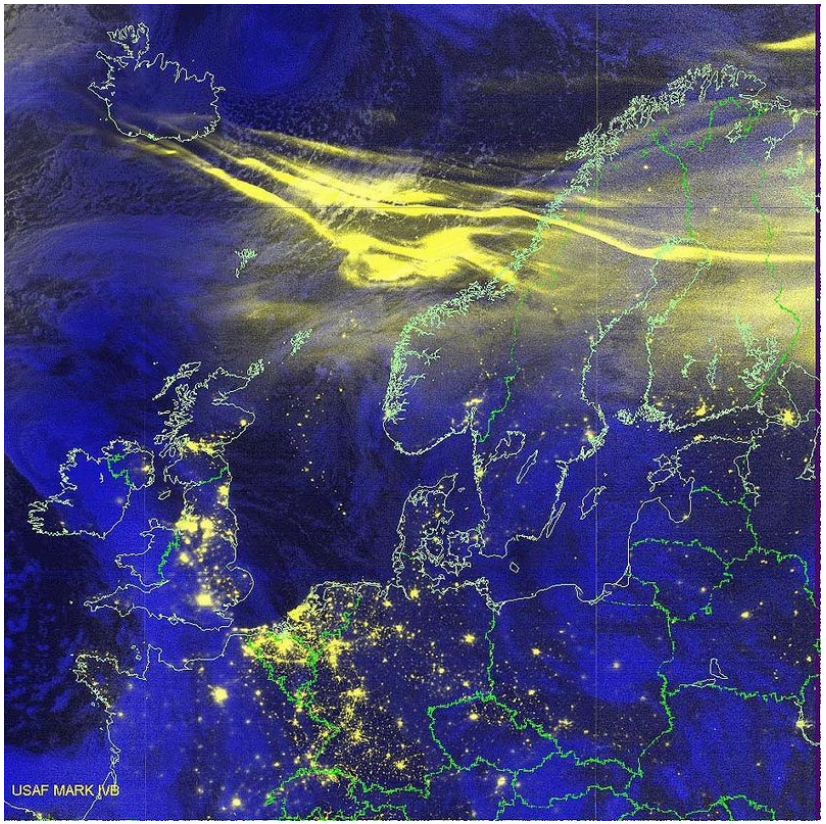
Csillagászat a Holdról

A holdi környezet hátrányai:

- Szennyeződés (holdpor)
- Meteoritbecsapódás
- Napszél (elektrosztatikus hatás)
- Elérhetőség: veszélyes utazás, szervizelés hiánya
- Röntgen- és gammasugárzás kockázata:

a szkafander nem véd eléggé; napkitörés esetén a fénysebességű terjedés előre jelzi a részecskeáram által okozott veszélyt.

Példák igen erős napflerekre:
1956. febr.,
1960. nov.,
1989. okt.,
2003. okt.-nov.,
2005. jan 20.

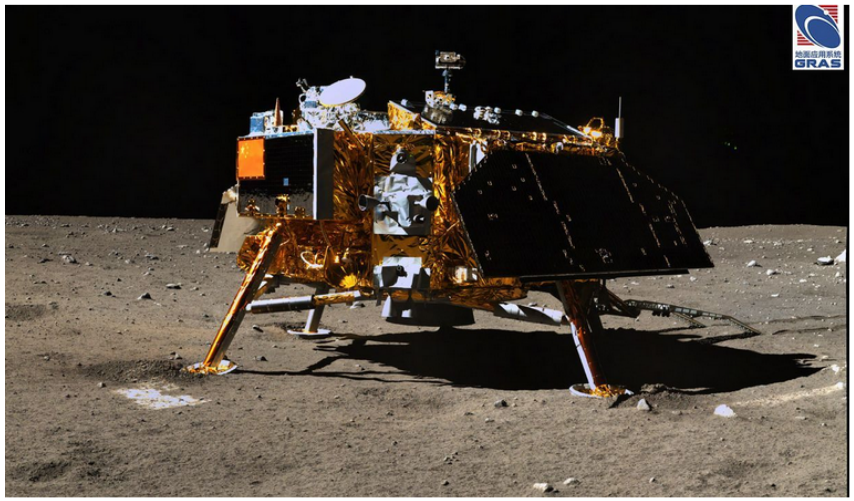


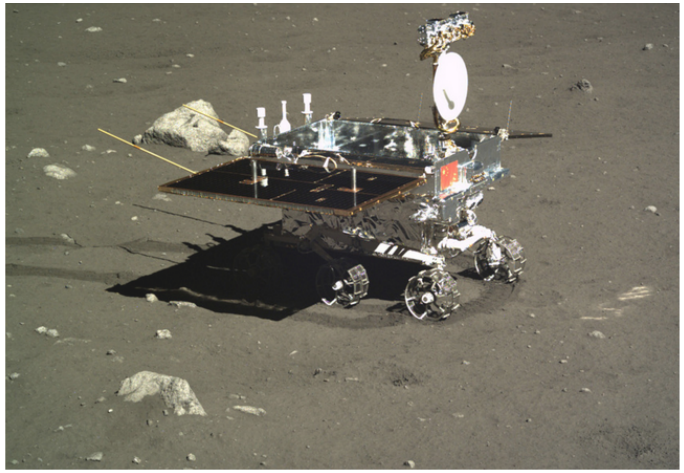
Csillagászat a Holdról

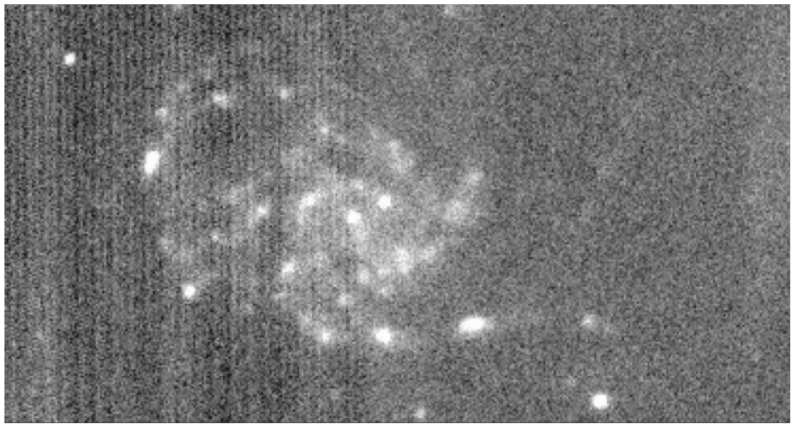
LUT (Lunar Ultraviolet Telescope) a Chang'e–3 fedélzetén 2013 decembere óta. (Előtte sima leszállás a Holdon 1976-ban volt legutóbb.)

A LUT 15 cm átmérőjű RC-teleszkóp, és 250–340 nm között észlel a közeli UV-ben.

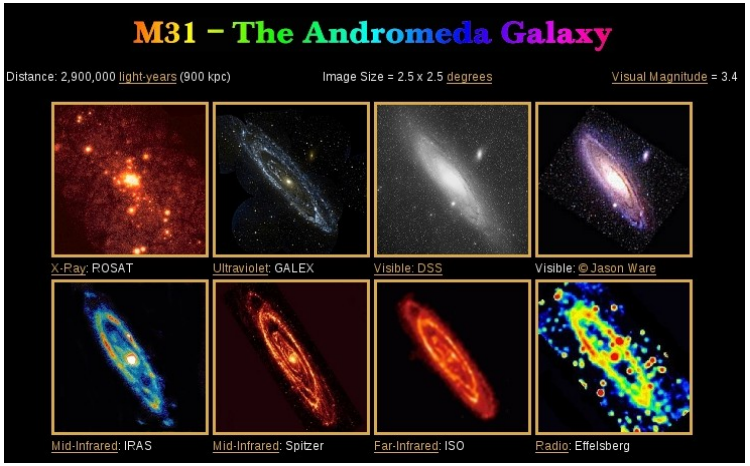
A Yutu holdjáró pedig a Holdat vizsgálja.

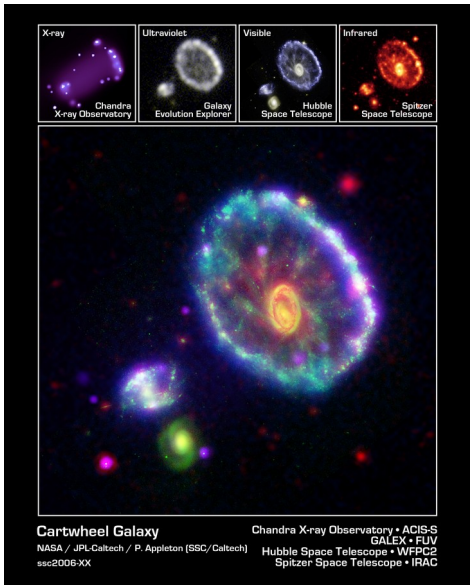




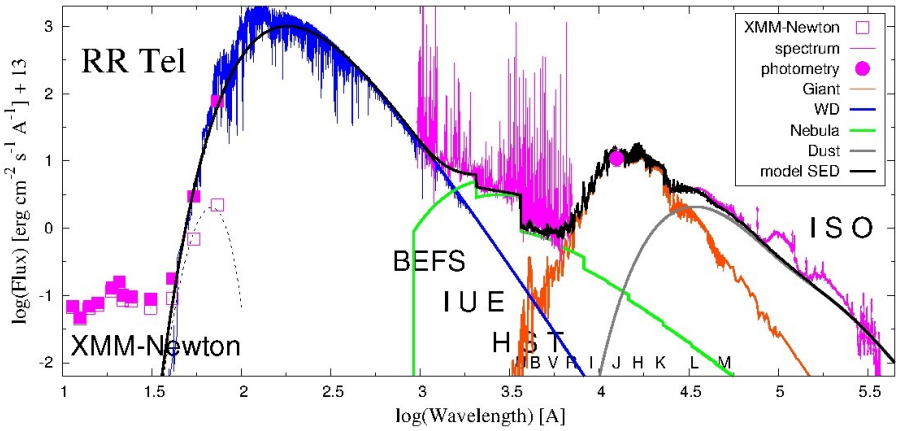


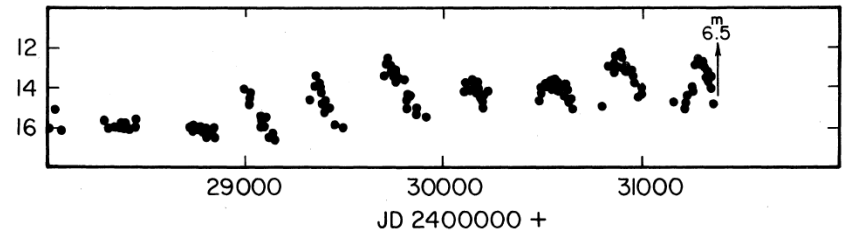
Csillagászat különféle hullámhosszakon



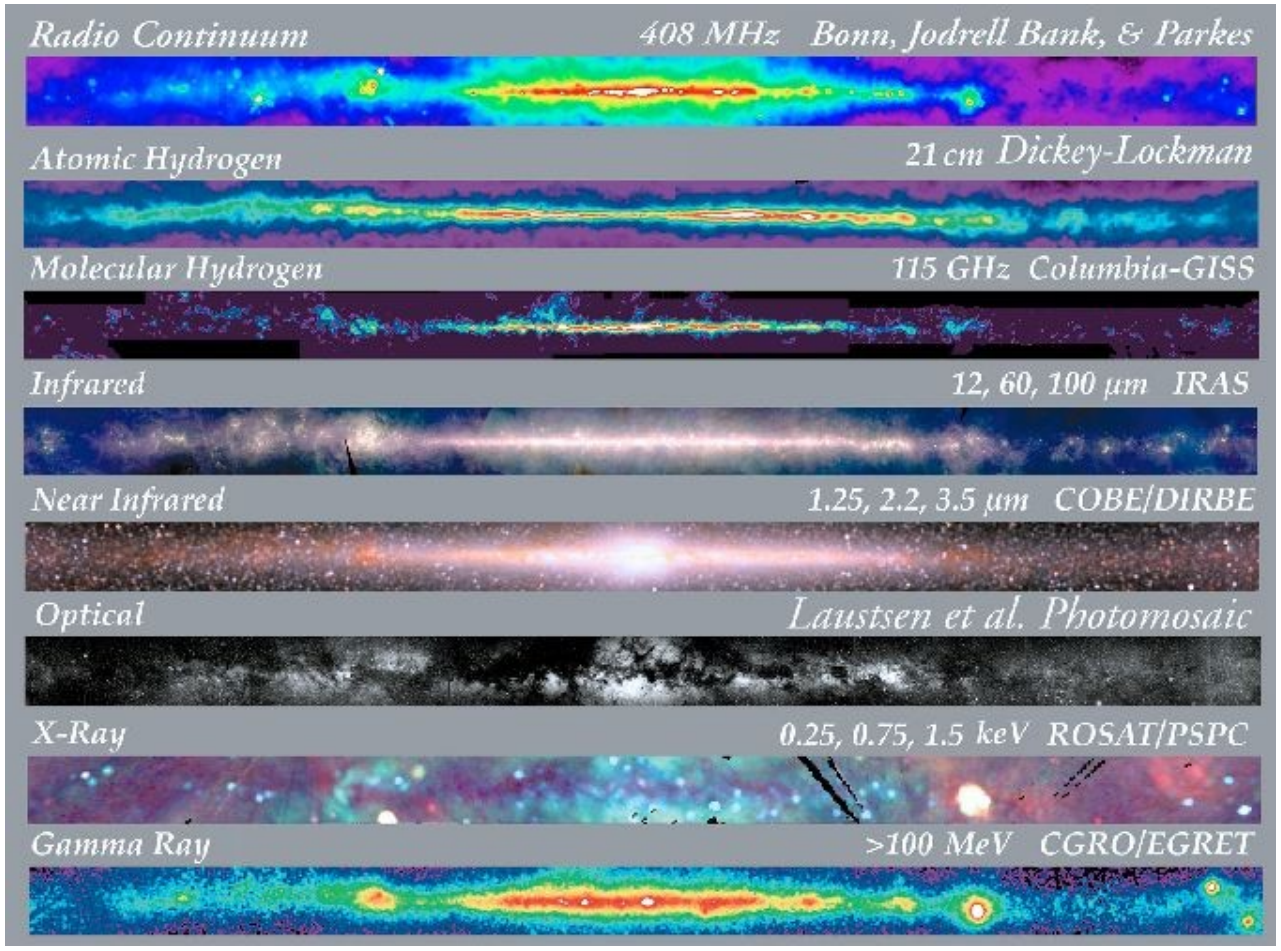


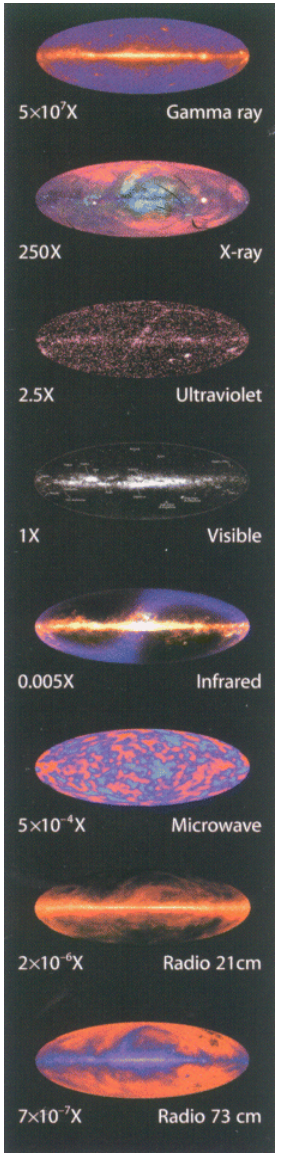
A. Skopal szívességéből





A Tejútrendszer minden hullámhosszon





Űrcsillagászati eszközök

időszak	misszió (zárójelben a felbocsátó állam v. intézmény)	a misszió jellemzői, fő eredményei (a távcső átmérője)
1959	Luna-1 (SZU)	a napszél felfedezése
1959-1961	Explorer-7 (USA)	napkutató szonda
1962	Aerobee rakéta (USA)	az első röntgenforrás felfedezése a Naprendszeren kívül
1962-1978	OSO (USA)	napkutató szondák sorozata, 8 indítás, UV-, röntgenészlelések
1967	Vela (USA)	a gammakitörések felfedezése a kém-műhold-család gammadetektoraival
1968	OAO-2 (USA)	a Föld körül keringő első csillagászati műhold
1970-1973	Uhuru (Explorer-42) (NASA)	Az első égboltfelmérés röntgentarto-mányban
1972-1981	Copernicus, OAO-3 (NASA, UK)	Az UV- és a lágyröntgentartomány vizsgálata
1972-1973	SAS-2, Explorer-48 (USA)	a gammatartományt vizsgáló első csil-lagászati szonda
1972-1973	TD-1 (ESRO, az ESA elődje)	első UV-égfelmérés
1974-1995	KAO – repülőgép (NASA)	infravörös észlelések Lockheed C141A repülőgépről, 91 cm
1975-1982	COS B (ESA)	a Tejútrendszer első gammatérképe
1978-1981	Einstein (HEAO-2) (NASA)	Az első leképező röntgentávcső
1978-1996	IUE (NASA, ESA, UK)	több mint 100 000 UV-színkép, 45 cm
1979-1981	HEAO-3 (NASA)	keményröntgen- és gammaszínkép
1979-1985	Hakucho (Corsa-B) (Japán)	röntgen, a kváziperiodikus oszcilláció (QPO) felfedezése
1983-1985	Tenma (Astro-B) (Japán)	röntgen, a vas színképvonalainak vizs-gálata
1983	IRAS (USA, Hollandia, UK)	Az égbolt első felmérése infravörös-ben, 57 cm
1983-1986	EXOSAT (ESA)	Az UV- és lágyröntgen-tartomány vizsgálata
1987-1991	Ginga (Astro-C) (Japán)	röntgen- és gammatartomány
1989-1993	Hipparcos (ESA)	Az első asztrometriai űrszonda, 0,001 ívmásodperc pontosság 118 000 csil-lagra, 29 cm
1989-1993	COBE (NASA)	a kozmikus mikrohullámú háttérsu-gárzás első részletes vizsgálata
1989-1998	Granat (Oroszország)	röntgen- és gammatartomány

Űrcsillagászati eszközök

időszak	misszió (zárójelben a felbocsátó állam v. intézmény)	a misszió jellemzői, fő eredményei (a távcső átmérője)
1990-	HST (NASA, ESA)	2,4 m , infravörös, optikai, ibolyántúli észlelések, az első Nagy Obszervatórium
1990-1999	ROSAT (Németország, UK, USA)	a lágyröntgen-tartomány nagy érzékenységű vizsgálata, teljes égfelmérés (150 000 forrás), az első égfelmérés extrém UV-ben, 84 cm Wolter
1990-2008	Ulysses (ESA, NASA)	a Nap poláris vidékeinek multispektrális vizsgálata az ekliptika síkjából kitérve
1991-2000	Compton GRO (NASA)	a gammatartomány észlelése, a 2. Nagy Obszervatórium
1991-2001	Yohkoh (Japán, NASA, UK)	a Nap röntgen- és gammatartományban
1992-2001	EUVE (USA)	Az extrém UV-tartomány észlelése
1993-2000	ASCA (Japán, NASA)	röntgenszonda, 1,2 m Wolter
1995-1998	ISO (ESA)	célzott észlelések infravörösben, 60 cm
1995-1996	IRTS (Japán)	infravörös, 15 cm
1995-	SOHO (NASA, ESA)	a Nap és a helioszféra több hullámhosszon, üstökösök tömeges felfedezése, L1 pontnál
1995-	RXTE (NASA)	röntgenészlelések nagy időfelbontással
1996-2002	BeppoSAX (Olaszország, Hollandia)	röntgenészlelések, gammakitörés röntgenutófényének első detektálása
1997-	ACE (NASA)	napszél, kozmikus sugárzás, L1 pontnál
1997-2005	HALCA (Japán)	8 m , rádió-interferometria, erősen lapult pálya
1998-	TRACE (USA)	a Nap és a helioszféra több hullámhosszon, nagy időbeli- és szögfelbontás
1998-2004	SWAS (USA)	a szubmilliméteres tartományt vizsgáló első szonda, 55´71 cm
1999-	WIRE (NASA)	(infravörös fotometria, 30 cm , 4 hónapig)optikai fotometria, asztroszeizmológia, 5 cm
1999-	FUSE (USA, Kanada, Franciao.)	távoli UV, 39´35 cm
1999-	Chandra (NASA)	nagy felbontású röntgenképalkotás, a 3. Nagy Obszervatórium, elnyúlt pálya
1999-	XMM-Newton (ESA, UK)	röntgenspektroszkópia+képalkotás+optikai és UV-kamera (30 cm)

Űrcsillagászati eszközök

időszak	misszió (zárójelben a felbocsátó állam v. intézmény)	a misszió jellemzői, fő eredményei (a távcső átmérője)
2000-2007	HETE-2 (USA, Japán, Franciaország, Olaszország)	röntgen- és gammatartomány, gammakitörések detektálása
2001-	WMAP (NASA)	a mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálata, L2 pontban
2002-	RHESSI (NASA)	napészlelés röntgen- és gammatartományban
2002-	Integral (ESA, NASA, Oroszország)	szimultán gamma, röntgen és optikai, nagy spektrális és térbeli felbontás, elnyúlt pálya
2003-2005	CHIPS (USA)	extrém UV spektrométer
2003-	GALEX (USA)	ultraibolya, 50 cm
2003-	MOST (Kanada)	nagy pontosságú optikai fotometria, 15 cm , mikroszatellita
2003-	Spitzer (NASA)	infravörös, a 4. Nagy Obszervatórium
2004-	Swift (USA, UK, Olaszország)	gamma, röntgen, UV, optikai, 30 cm
2005-	Suzaku/Astro-E2 (Japán, USA)	röntgen, gamma, LEO
2006-	Akari/Astro-F (Japán)	infravörös, 67 cm , napszinkron poláris pálya
2006-	Hinode/Solar-B (Japán, USA)	a Nap: optikai 50 cm , EUV és röntgen
2006-	STEREO (ESA)	a Nap és a belső helioszféra három dimenzióban
2006-	CoRoT (Franciaország, ESA)	nagy pontosságú optikai fotometria, 27 cm
2007-	AGILE (Olaszország)	képalkotó gamma, keményröntgen, LEO
2008	SOFIA (USA, Németország)	infravörös-észlelések Boeing 747SP repülőgépről, 2,5 m
2008	GLAST (NASA)	széles gammatartomány
2008	Herschel (ESA)	távoli-infravörös, L2 pontban, 3,5 m
2008	Planck (ESA)	a mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálata, L2
2009	Kepler (NASA)	nagy pontosságú optikai fotometria, 1,4 m
2009	WISE (USA)	teljes égbolt felmérése infravörösben 3,5-23 mikrométeren, 40 cm

Űrcsillagászati eszközök

2010 – Gamma-ray Burst Polarimeter (GAP), JAXA, gammacsillagászat

2011 – Szpektr-R (Ragyioasztron), orosz, rádiócsillagászat

2012 – NuSTAR, NASA, röntgencsillagászat

2013 – Hisaki (SPRINT-A), JAXA, UV csillagászat

2013 – Gaia, ESA, optikai asztrometria

2013–2014 – BRITE constellation, osztrák–kanadai–lengyel, optikai fotometria, 5 űrszonda

2015 – Astrosat, ISRO, optikai, UV, röntgencsillagászat

2015 – Dark Matter Particle Explorer (DAMPE), CNSA, részecskekutatás

2016 – Hitomi (Astro-H), JAXA, röntgencsillagászat

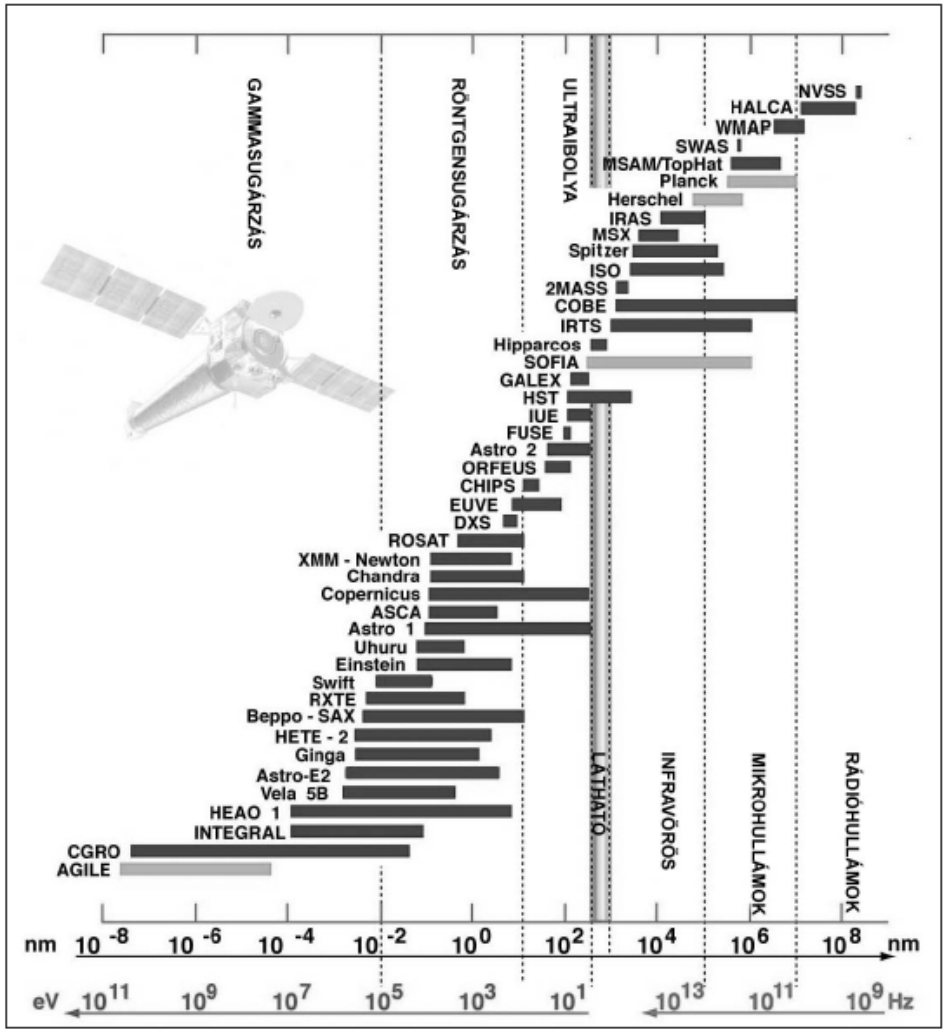
2016 – M. Lomonosov, MSU, röntgencsillagászat

2017 – HXMT, CNSA, röntgencsillagászat

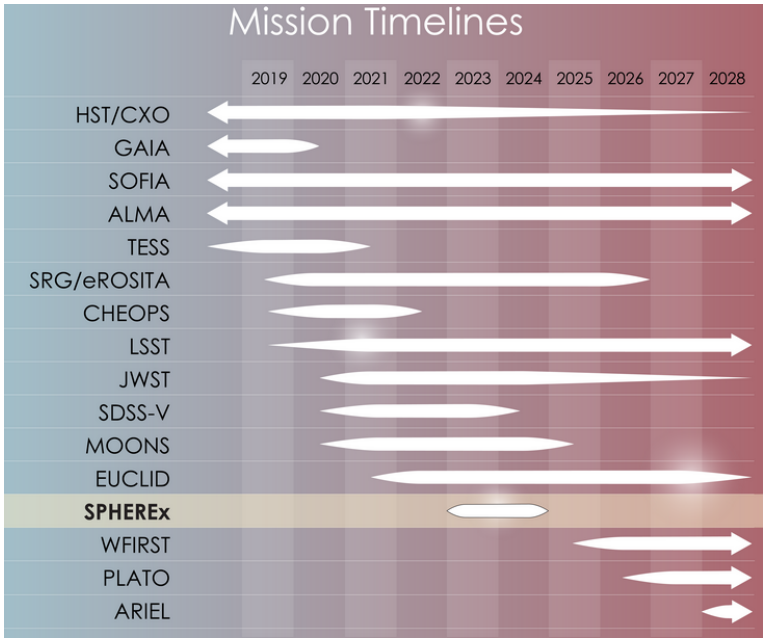
2017 – LISA Pathfinder (SMART–2), ESA, gravitációs hullám

2018 – TESS, NASA, optikai fotometria

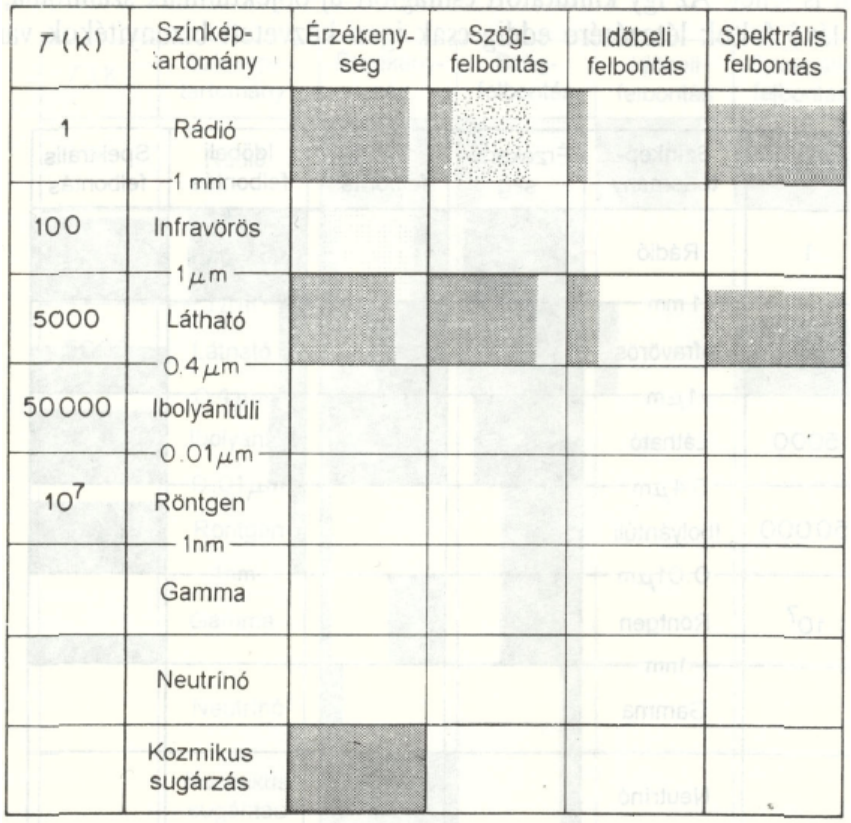
Űrcsillagászati eszközök

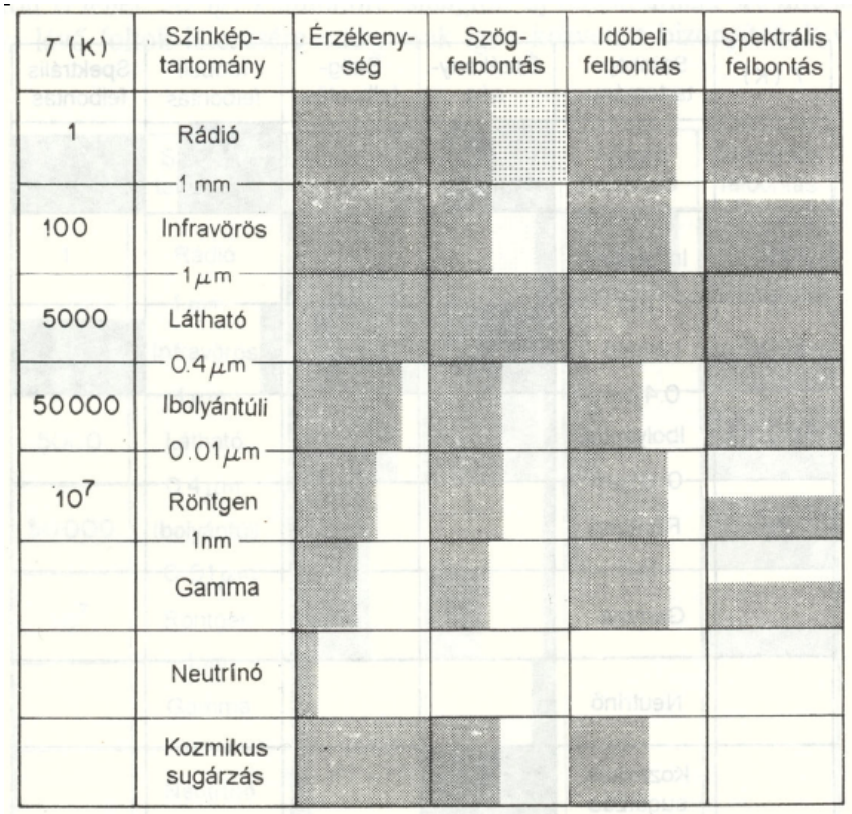


5. ábra. A legfontosabb űrtávcsövek érzékelési hullámhossztartománya.

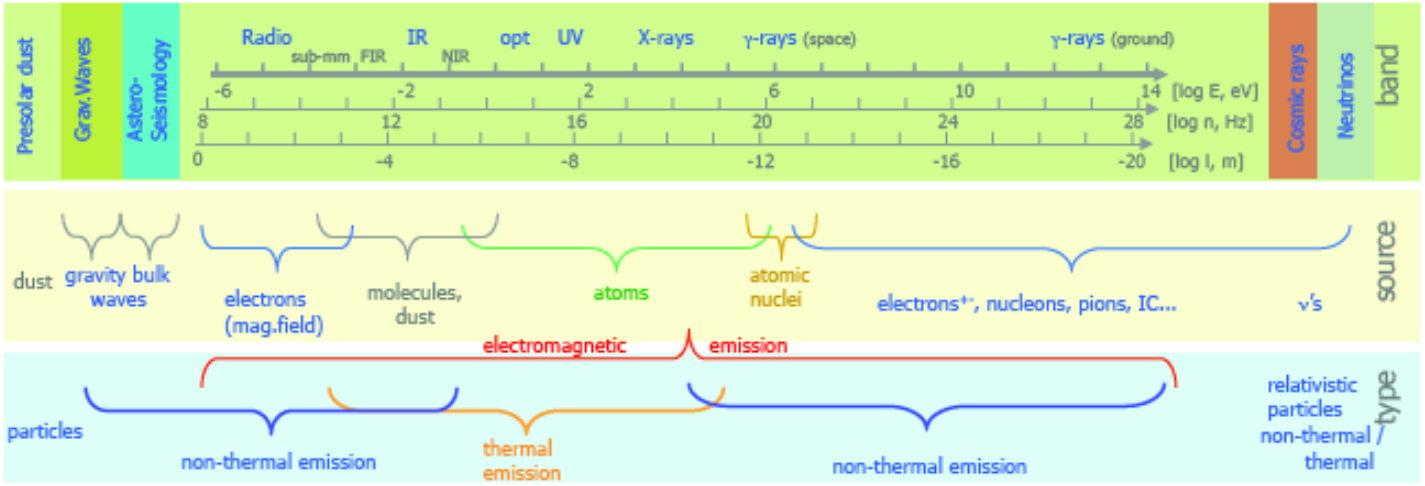


A fejlődés 1960 és 2000 között





A színképtartomány áttekintése



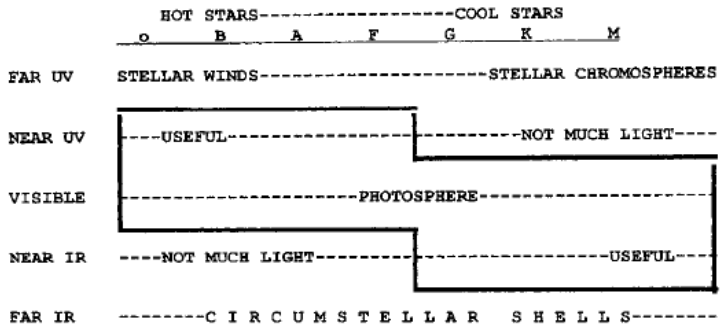


Figure 4. Table summarizing the choices of wavelength regions, as well as some of the general advantages and disadvantages for the various types of stars.

A színképtartomány áttekintése

Rádióhullámok:
- bolygókutatás radarral
- bolygók mágneses mezeje
- csillagközi gáz és por
- a Tejútrendszer centruma
- a Tejútrendszer szerkezete
- aktív galaxisok
- kozmikus háttérsugárzás

Nappal is végezhető kutatás;

A hullámhossz miatt nagy átmérőjű teleszkóp kell a jó felbontáshoz

Infravörös:
- csillagkeletkezés
- hideg csillagok
- a Tejútrendszer centruma
- aktív galaxisok
- az Univerzum nagy léptékű szerkezete
- asztrometria

Optikai:
- asztrometria
- bolygók
- csillagok, csillagfejlődés
- a Tejútrendszer szerkezete
- az Univerzum nagy léptékű szerkezete

A színképtartomány áttekintése

Ultraibolya:

- csillagközi anyag
- forró csillagok

Röntgensugarak:

- csillaglégkörök
- neutroncsillagok, fekete lyukak
- intergalaktikus anyag galaxishalmazokban
- aktív galaxismagok

A képalkotáshoz speciális optikai elrendezés szükséges.

Gammasugarak:

- neutroncsillagok
- aktív galaxismagok

A képalkotás nincs megoldva.

… És számos más kutatási terület, pl. szupernóvák minden hullámhosszon.

A detektálás eszközei

Az elektromágneses spektrum tartományai. A röntgen- és gammasugárzás esetében nem a hullámhosszat, hanem a fotonok energiáját adják meg az elektronvolt (eV) ezerszeres (keV) és milliószoros (MeV) egységeiben. Az átszámítás: E [keV] = 1,24 / λ [nm].

Tartomány	hullámhossz	fotonenergia	detektor
ultranagy energiájú gamma		$>10^8$ MeV	ködkamra, földi Cserenkov-távcsövek
nagyon nagy energiájú gamma		10^4–10^8 MeV	Cserenkov-számláló, Si-lapok kaloriméterrel
nagy energiájú gamma		30–10^4 MeV	szikrakamra
közepes energiájú gamma		10–30 MeV	szikrakamra
alacsony energiájú gamma		1–10 MeV	szcintillátor
lágygamma		0,1–1 MeV	szcintillátor
keményröntgen	0,01–0,1 nm	10–100 keV	szcintillátor, mikrocsatornás lemez
lágyröntgen	0,1–10 nm	0,1–10 keV	proporcionális számláló, mikrocsatornás lemez
extrém ultraibolya (EUV)	10–91,2 nm		mikrocsatornás lemez
távoli-ultraibolya	91,2–200 nm		mikrocsatornás lemez, fotoelektron-sokszorozó cső (PM-cső)

Tartomány	hullámhossz	fotonenergia	detektor
közeli-ultraibolya	200–380 nm		fotolemez, PM-cső, CCD
látható (ibolya, kék, zöld, sárga, narancs, vörös)	380–720 nm		fotolemez, PM-cső, CCD
közeli-infravörös (NIR)	0,72–3 mm		fotokonduktív detektor, CCD
közép-infravörös (MIR)	3–30 μm		hibrid szilárdtest detektor
távoli-infravörös (FIR)	30–300 μm		bolométer
szubmilliméteres mikrohullámú rádió	0,3–1 μm		kürtantenna
mm-es mikrohullámú rádió (EHF)	mm–cm		kürtantenna
cm-es mikrohullámú rádió (SHF)	cm–dm		kürtantenna
dm-es rádió (UHF)	dm–m		kürtantenna, dipólantenna
ultrarövidhullámú rádió (VHF)	1–10 m		dipólantenna
rövidhullámú rádió (HF)	10–100 m		dipólantenna
középhullámú rádió (MF)	100–1000 m		dipólantenna
hosszúhullámú rádió (LF)	1–10 km		dipólantenna

Űrcsillagászat – rövid összegzés

Type of radiation	Wavelength range	Frequency range (Hz)	Typical sources	Temperature of radiating objects	Examples of space observatories
Gamma-rays	< 0.01 nm	$> 3 \times 10^{19}$	Compacts objects (from neutron stars to black hole candidates or active galactic nuclei), galaxies, Gamma-Ray bursts.	$> 10^8$ K	INTEGRAl, Fermi (ex-GLAST)
X-rays	0.01 – 20 nm	$3 \times 10^{16} – 3 \times 10^{19}$	Stellar corona, pulsars, star formation regions, colliding galaxies, hot gas in galaxies and clusters of galaxies, supernova remnants, environment of super-massive black holes.	$10^6 - 10^8$ K	Chandra, XXM-Newton, Suzaku *IXO*
Ultraviolet	20- 400 nm	$7.5 \times 10^{14} – 3 \times 10^{16}$	Very hot stars, supernova remnants, quasars.	$10^5 - 10^6$ K	IUE, FUSE, HST
Visible	400 - 800 nm	$4 \times 10^{14} – 7.5 \times 10^{14}$	Stars (atmospheres), planets, galaxies, reflection and emission nebulae.	$10^3 - 10^5$ K	HST, Corot, Kepler, Hipparcos, *Gaia*
Infrared (IR)	0.8– 50 mm	$6 \times 10^{12} – 4 \times 10^{14}$	Cool stars, star forming regions, interstellar dust and gas, planets	$10 – 10^3$ K	ISO, Spitzer, Akari, WISE, *JWST*
Far-IR and microwaves	50 mm - 10 mm	$3 \times 10^{11} . 3 \times 10^{13}$	Cosmic Microwave Background, cold interstellar medium.		WMAP, Herschel, Planck
Radio	> 1 cm	$< 3 \times 10^{11}$	Interstellar medium, cold molecular clouds, supernova remnants, planets.	< 10 K	-