# ŰRCSILLAGÁSZAT

## A HUBBLE-ŰRTÁVCSŐ ÉS „UTÓDA”, A JWST

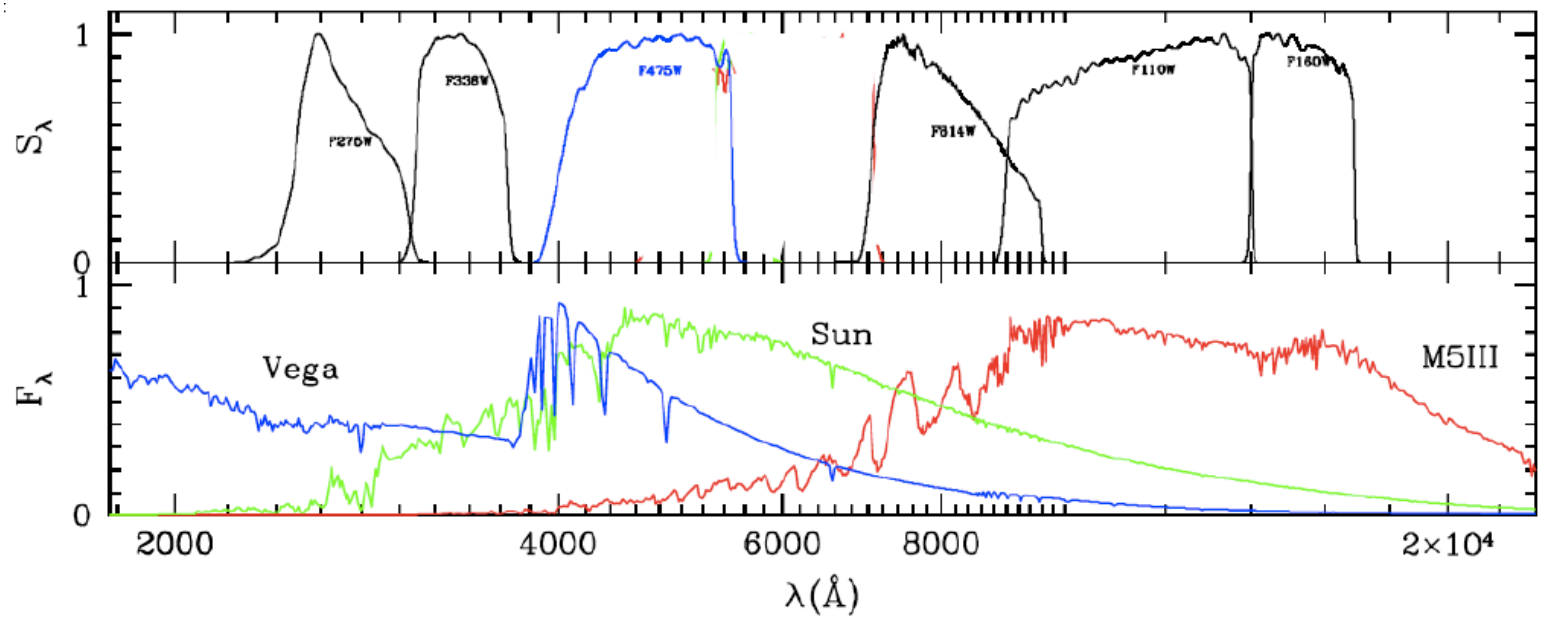
Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem

2023

# A HST-ről röviden

NASA + ESA. 1990. ápr. 24. óta a leghosszabb aktív életű csillagászati űrszonda (korábbi időtartam-rekorder: IUE,1978–1996). A NASA 4 nagy obszervatóriumából az első: CGRO, 1991–2000; Chandra, 1999–; Spitzer, 2003–2020.
***2,4 m*** átmérőjű RC-távcső, 607–589 km magasságban, 96–97 perces keringési periódus. Optikai + közeli-IR + UV-tartományban észlel.
2018 elejéig 1,5 millió észlelést végzett 43500 égi célpontról + a helyzet-érzékelő (FGS) fotometriája (153 TB adat). Havonta 80 Gbyte új adat.
***Moduláris rendszerű*** (a műszereiről később).



# A HST főbb jellemzői

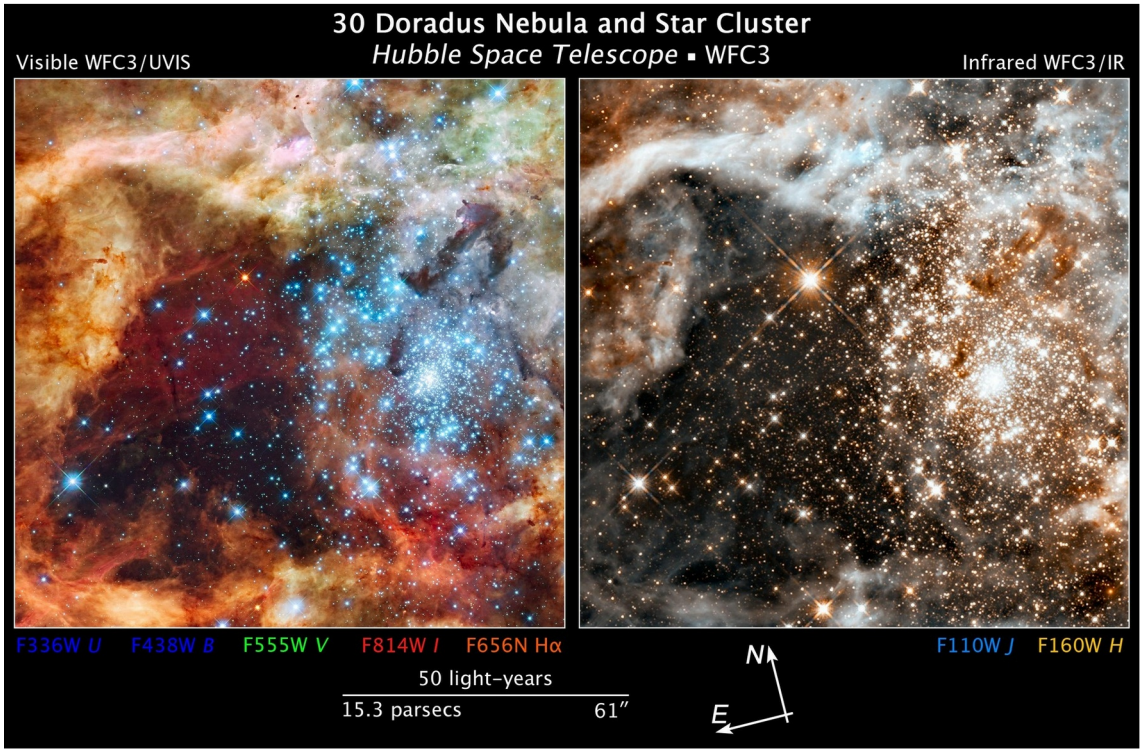
***Három lényeges képessége***:

Nagy szögfelbontás (optikaiban 0,5″ [0,012″ pontosságú iránytartással])
a *teljes* látómezőben (szemben az adaptív optikával);

- nagy érzékenység (halvány objektumok → mélyvizsgálatok);
- UV-érzékenység 115 nm-ig (Lyman-$\alpha$, 121,6 nm is!); 2-3 nagyságrenddel érzékenyebb az IUE-nél.

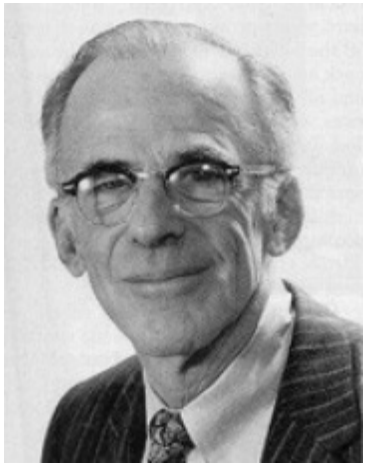
***Univerzális, nem egy konkrét kutatási feladatra*** (↔ COBE, WMAP):

- új felfedezések (pl. proplid);
- korábban gyanítottak megerősítése (pl. nagy tömegű fekete lyukak);
- elméleti modellek átdolgozására késztető eredmények (pl. kozmológia)



# A HST története

1946: Lyman Spitzer: Astronomical advantages of an extraterrestrial observatory (szögfelbontás + UV-IR-észlelések);
1965: Spitzer (balra lent) vezetésével az űrtávcső létrehozását tudományos szempontból vizsgáló bizottság alakul;
1968–1972: az OAO–2 sikere mutatja az űrcsillagászat lehetőségét (csillagok, galaxisok UV sugárzása);
Terv: 3 m tükörátmérőjű Large Space Telescope (LST) 1979-re;
1974-ben leállították (Ford elnök költségvetési szigora), de az összeg felét sikerült megmenteni. A tükör már csak 2,4 m-es + az ESA bevonása (FOC, napelemek), cserében 15% észlelési idő európai csillagászoknak.
A neve 1981-től Hubble (jobbra lent), 1983-as tervezett felbocsátással.



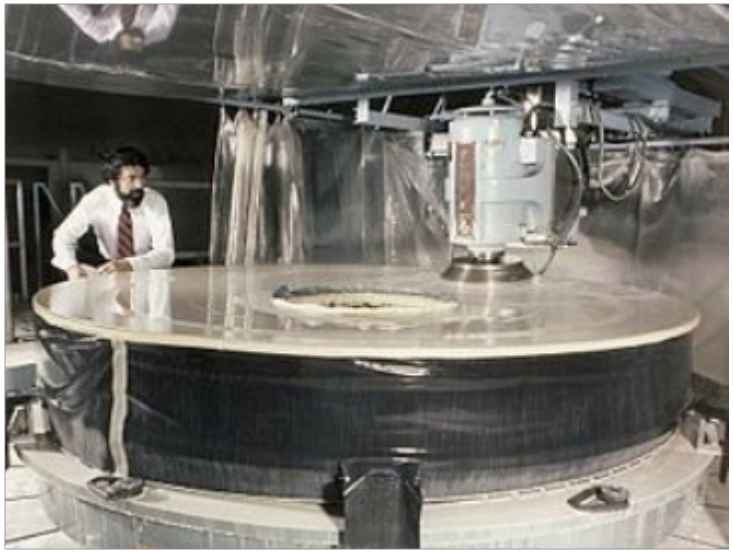
# A HST főtükrének elkészítése

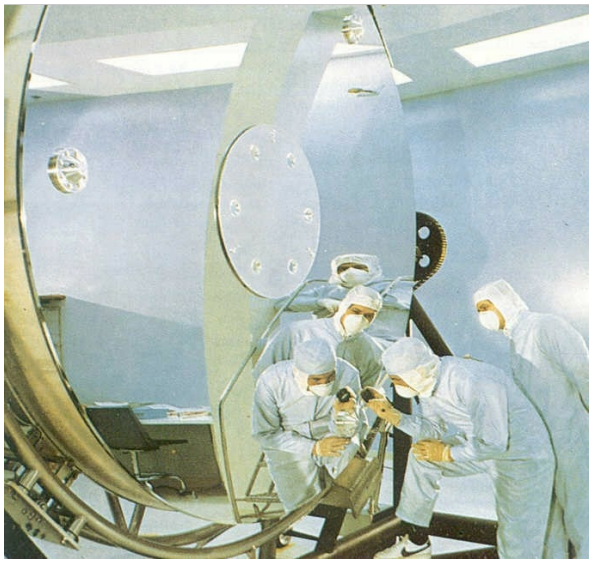
PerkinElmer: számítógép-vezérelt csiszolás $\lambda/20$ (30 nm) pontos felülettel. A technikai nehézség és az újszerű feladat miatt a Kodak is megbízást kapott a tükör elkészítésére (hagyományos csiszolással – a Smithsonian Institutionban kiállítva).

A PerkinElmer csúszott a határidővel, és emelte az árat. 1981 végére lett kész a tükör + bevonat (75 nm Al + 5 nm MgF).

Ekkor még 1986. szeptemberi felbocsátást terveztek.

A hőszigetelés megoldása is bonyolult műszaki feladat.





# A HST földi létesítményei

Space Telescope Science Institute (STScI, Baltimore): 1983-ban jött létre.
Feladata a tudományos szempontok érvényesítése az üzemeltetés során, és az adatok eljuttatása a csillagászokhoz.
A NASA ezeket magának akarta megtartani, de a csillagászok összefogtak.

# A HST földi létesítményei

1984: megalakul az ST-ECF (Garching)
(2011-től az ESAC [Vilspa] veszi át a szerepét)
1986. jan.: Challenger-katasztrófa – újabb késés
1990. ápr. 24–25.: LEO pályára helyezés
Műszaki irányítás: NASA GSFC, 50 km-re az STScI-től, 6 óránként egymást váltó 4 csoporttal

# A HST pályára kerül, új korszak kezdete

Az 1990. ápr. 25-i pályára helyezésig a költségek: 400 M USD helyett 4700 M USD. Ehhez jön a folyamatos üzemeltetés költsége: mostanáig legalább 10 milliárd USD + 1 milliárd EUR.

# A HST kezdeti műszerei

***Axiális*** műszerek:

GHRS: csak UV (115–320 nm), $\lambda/\Delta\lambda = 80000$

HSP: gyorsfotometria, $10^{-5}$ s időfelbontás, sok szűrő, UV+opt., 2% pontosság

FOC (ESA): fotonszámláló, nagy felbontás (0,014”/px), 115–650 nm

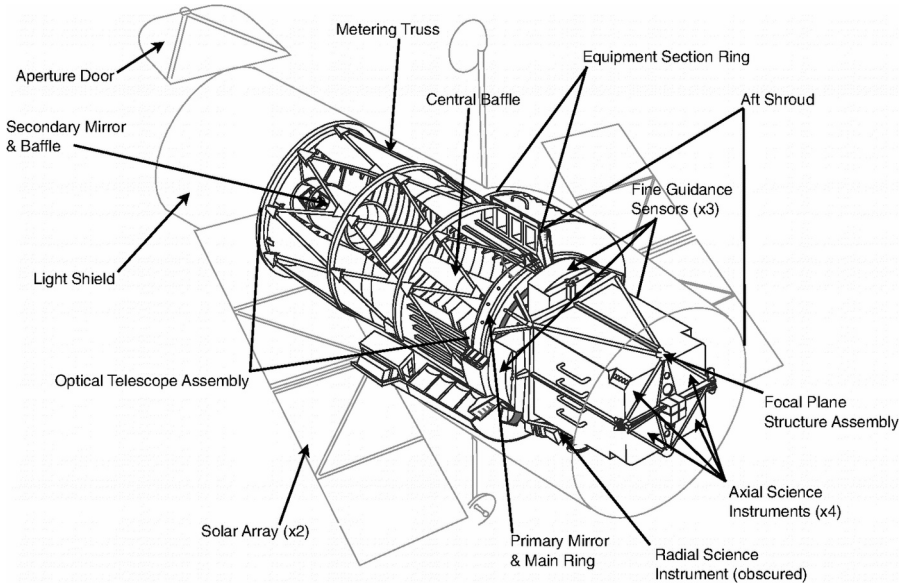
FOS: 115–800 nm, asztrofizikai források spektroszkópiája

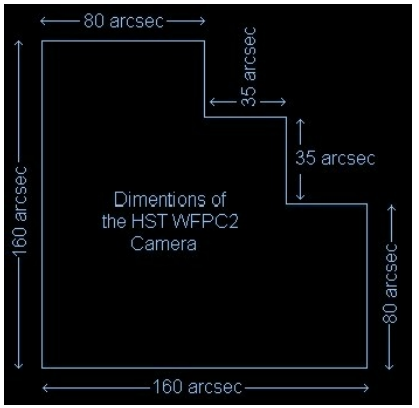
A két spektrográf és a FOC érzékelője digicon képerősítő.

***Radiális*** műszerek:

WFPC: Ly-$\alpha$ és 1,1 $\mu$m között érzékeny, 48 szűrővel; 8 db 800×800 CCD (4 a bolygókhoz, 0,046”/px, 4 nagy látószögű, 0,092”/px)

\+ FGS: független műszer, interferométerként 0,007”-en belüli iránytartás



# Meglepetés és csalódás

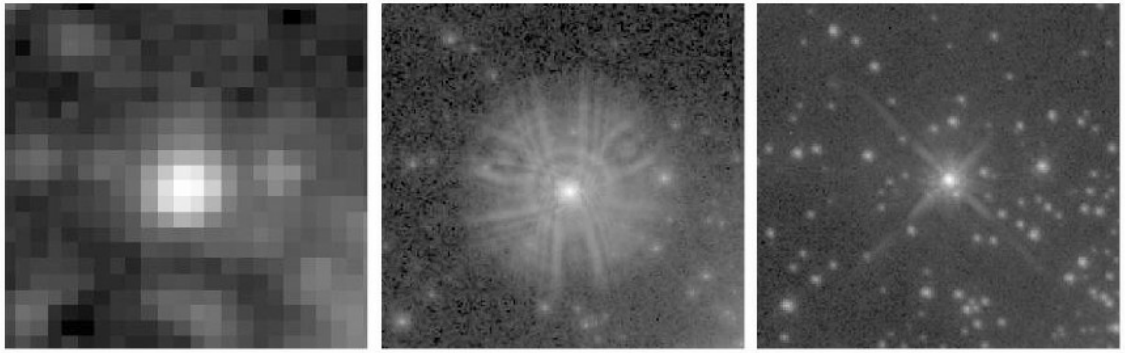
A főtükör leképezési hibája: szférikus aberráció; 0,1” helyett >1” sugarú körbe képezte le a pontforrásokat.

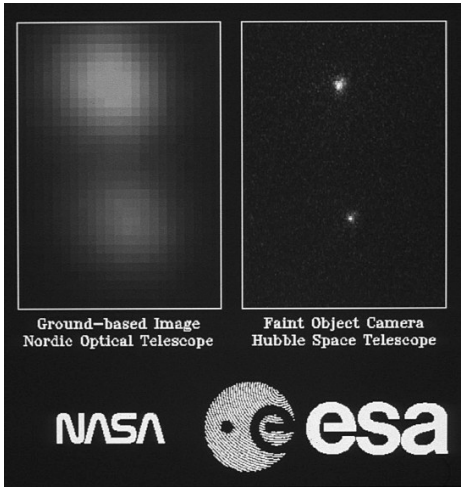
A csiszoláskor a görbület ellenőrzésére szolgáló nullkorrektor mezőlencséje 1,3 mm-rel arrébb volt a tervezettnél. Két másik nullkorrektorral külön ellenőrizték a szférikus aberrációt, azok már akkor jelezték is a hibát, ám a teszteket nem vették figyelembe, mondván, a két segéd-nullkorrektor kevésbé pontos, mint a folyamatosan ellenőrző.

A képhiba (PSF) a halvány és/vagy kiterjedt objektumok észlelését gátolta, a fényesekét alig, és a spektroszkópiát sem.

Így kozmológiai észlelés nem indult, és egy időre a Naprendszer kutatása került előtérbe.

*földi* *HST kezdeti* *HST korrigált*





# A megoldás

Szerencsére szervizküldetéseket terveztek – 1993-ig megoldást kellett találni.

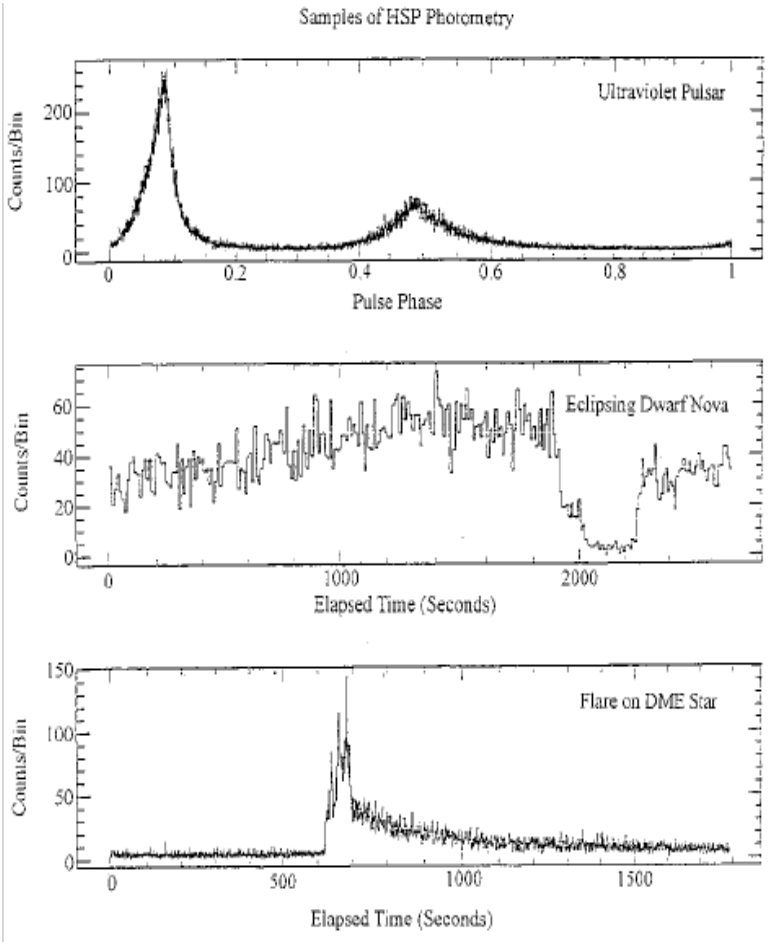
A tartalék tükör beszerelése drága lett volna (HST-t vissza a Földre, majd újra fel).

Megoldás: új optikai rendszer behelyezése a fényútba, ellenkező irányú szferikus aberrációval.

A WFPC-ben tükrök vannak; az egyik tükröt megfelelő alakúra csiszolva a hiba kiküszöbölhető: WFPC2, amelyben már csak 4 CCD van (olcsóbb).

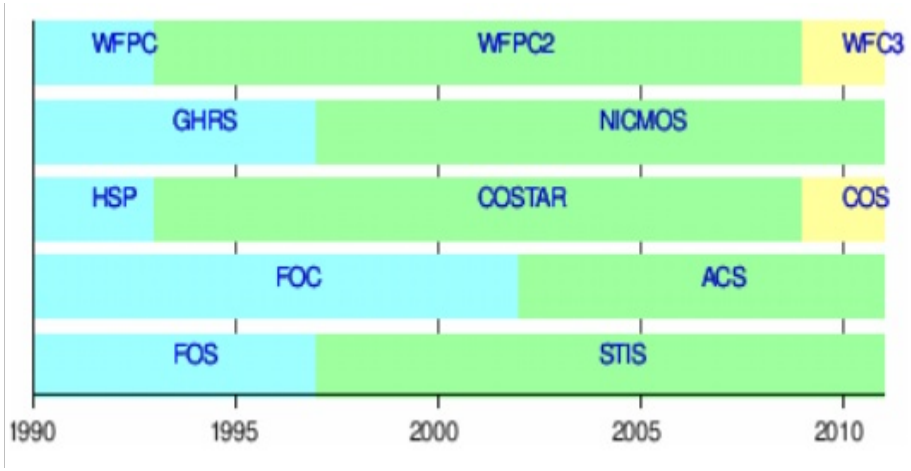
A többi műszerre külső elhelyezésű korrekció: COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement), két tükre közül az egyik korrigálja az aberrációt.

Minek a helyére kerüljön? Az áldozat a HSP gyorsfotométer (jobbra: példák az azzal kapott fénygörbékre).



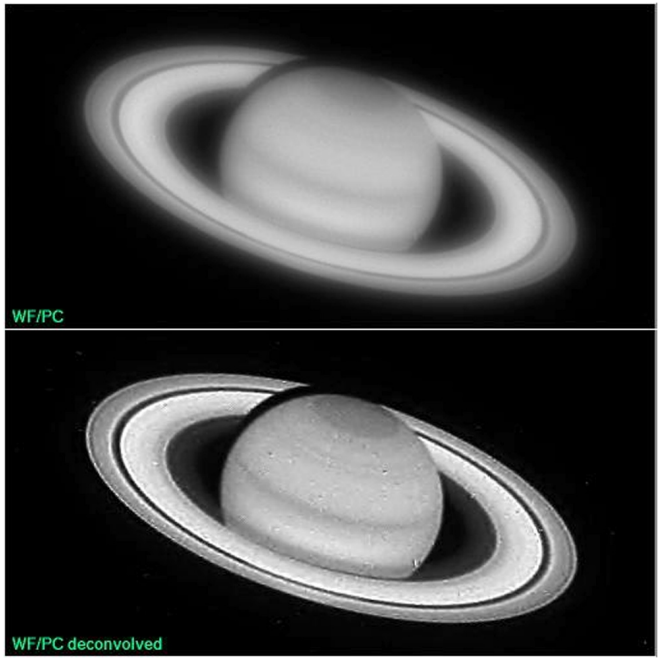
# 1. szerviz

***SM-1*** (1993. dec. 2–13.): kritikus munka, öt alkalommal külső szerelés;
- HSP → COSTAR;
- WFPC → WFPC2;
- napelemek és elektronikájuk cseréje;
- 4 giroszkóp cseréje (a szoftver 1”-nél jobb célponton tartást biztosít, az objektumok közötti irányváltásnál is ekkora pontosság);
- a fedélzeti számítógép bővítése;
- a pályamagasság helyreállítása.



# 1. szerviz

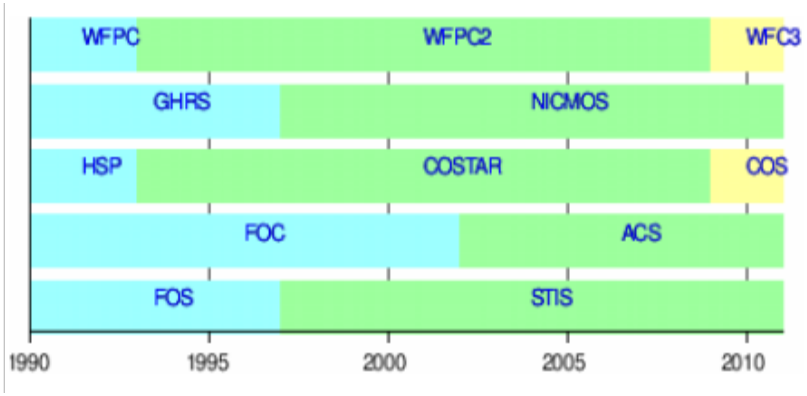
Az 1. szerviz előtt kapott képek is javíthatók dekonvolúcióval: a Szaturnusz WFPC-vel készített felvétele (a felső képpár felső képe), illetve a nyers kép dekonvolúciós eljárással végzett javítása után előállt felvétel (a felső felvételpár alsó képe).




Az M100 spirálgalaxis közvetlenül a HST indítása után készített képen (WFPC, 1990) és az első szerviz után, a WFPC2-vel 1993-ban készített felvételen (az alsó képpáron).

# 2. szerviz

***SM-2*** (1997. febr. 11–21.):
- GHRS és FOS helyett STIS
  és NICMOS;
- szalagos magnetofonok cseréje
  szilárdtest-rögzítésűekre;
- a hőszigetelés sérülésének javítása;
- a pályamagasság helyreállítása.

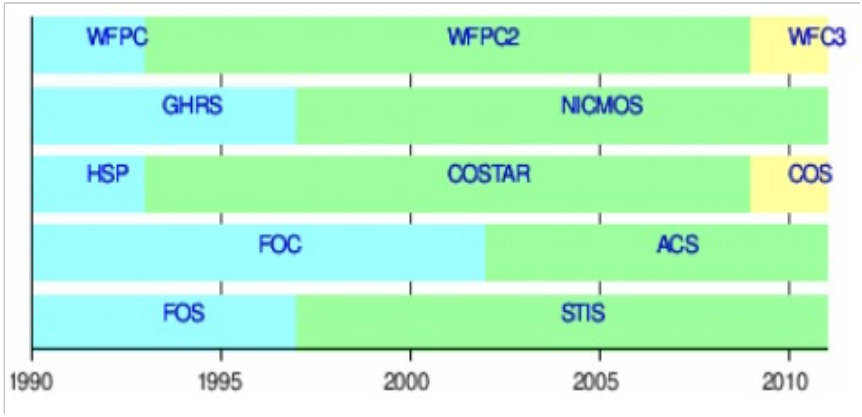



**STIS** (Space Telescope Imaging Spectrograph): leképezés + spektroszkópia, 115–1100 nm között; CCD-üzemmódban 0,05”/px, Cs Te MAMA-detektorral (multi anode microchannel array, UV-ben) 0,024”/px; 2001 májusában az elektronika leállt, 2004. augusztusban a tartalék elektronika is; az SM4 során cserélték ki.

**NICMOS** (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer): 0,8–2,5 μm között leképez + széles, közepes és keskeny sávú szűrők; HgCdTe-mátrix, 256×256 px; 3 kamera (0,043; 0,075 és 0,2”/px felbontással). Hűtés: cseppfolyós nitrogén. De a hőtágulás miatt a hűtőtartály hozzáért más alkatrészhez, folyamatos melegítést eredményezve. 4,5 év helyett akkor csak 2 évig lehetett használni.

# 3. szerviz

Két alkalomra bontották, amikor a
6 giroszkóp közül már 3 tönkrement
(sőt a karbantartásig még egy 4. is).



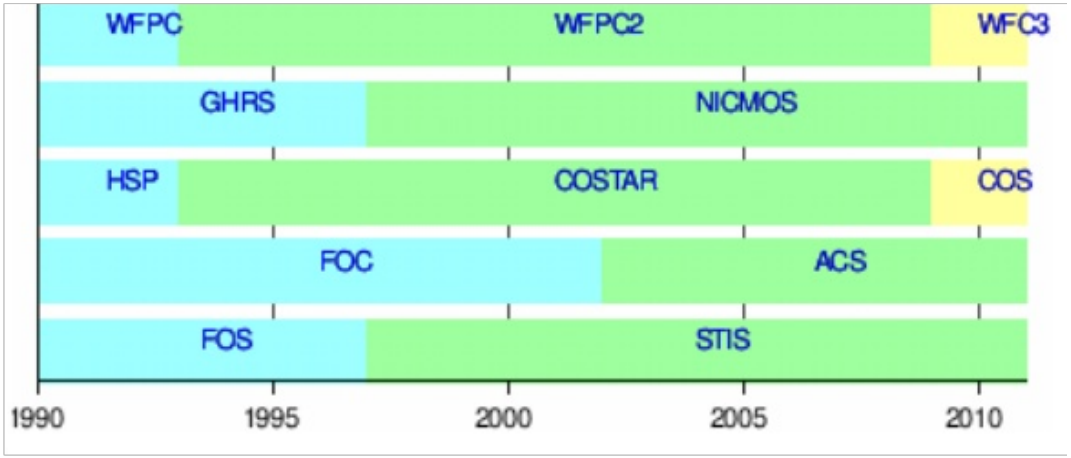

***SM-3A*** (1999. dec. 19–27.):
- mind a 6 giroszkóp cseréje;
- FGS cseréje;
- a fedélzeti számítógép cseréje
  (helyben elvégezhető számítások,
  az addigi földi számítások helyett);
- a hőszigetelés cseréje.

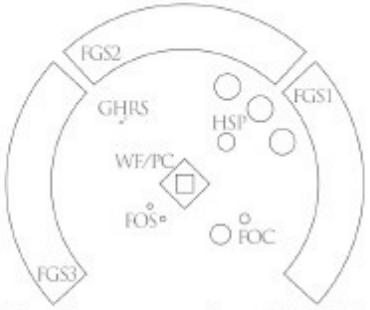
***SM-3B*** (2002. márc. 1–12.):
- FOC helyett ACS (Advanced Camera for Surveys, korszerű felmérő-kamera, az optikaitól távoli UV-ig érzékeny), már 21. századi technika; 2007 elején elromlott az elektronikája;
- a NICMOS újraélesztése (új hűtés, de nem az eredeti hőmérsékletig);
- a napelemek ismételt cseréje (kisebbre, hogy gyengébben fékezzenek és kisebb legyen a vibráció): a 30%-kal nagyobb teljesítmény miatt mind az 5 detektor egyszerre használható;
- a vezérlőelektronika cseréje (a szimultán észlelések miatt).

# A deklaráltan utolsó, 4. szerviz

2005. aug. óta a HST 2 giroszkóppal működött (a többi rossz vagy leállították).
2006. jún.: ACS fő kamerája leállt, csak az UV-kamera maradt működőképes, tartalék elektronikára kapcsolva.
2007. jan.: rövidzárlat a tartalék elektronikában.
2007. aug.: újabb giroszkóp ment tönkre, bekapcsolták a leállított tartalékot.
***SM-4:*** a JWST késése (végül 2021-ben indították) és a Columbia 2003-as katasztrófája miatt 2004 helyett *2009. máj. 11–24.*

- WFPC2 helyett WFC3: 200–1000 nm (opt.+UV) 2048×4096; 800–1700 nm (IR) 1024 ×1024 + szűrők, prizmák, grism (rés nélküli spektroszkópia);
- COSTAR helyett COS (Cosmic Origins Spectrograph): 90–320 nm; FUV: 115–205 nm (forró csillagok, kataklizmikus változók, AGN); NUV: 170–320 nm (Ly-$\alpha$-erdő, forró intergalaktikus anyag);
- 6 új giroszkóp;
- az ACS és az STIS működőképessé tétele;
- új hőszigetelés a minél további működés érdekében.






*Deployment, April 1990*

## 1990-1993

High Speed Photometer
Wide-Field/Planetary Camera
Faint Object Camera
Faint Object Spectrograph
Goddard High Resolution Spectrograph
Fine Guidance Sensors (3)

*Servicing Mission 1, December 1993*

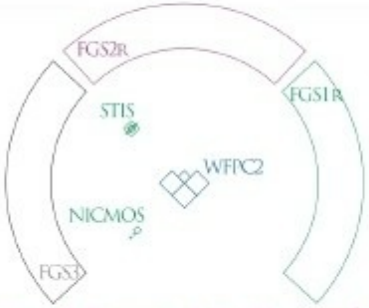
## 1994-1996

Corrective Optics ST Axial Replacement (COSTAR)
Wide-Field Planetary Camera 2
Replacement Redesigned Solar Arrays (SA2)
Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades

*Servicing Mission 2, February 1997*

## 1997-1999

ST Imaging Spectrograph
Near-IR Camera & Multi-Object Spectrometer
Replacement Fine Guidance Sensor
Other Spacecraft Upgrades




*Servicing Mission 3A, December 1999*

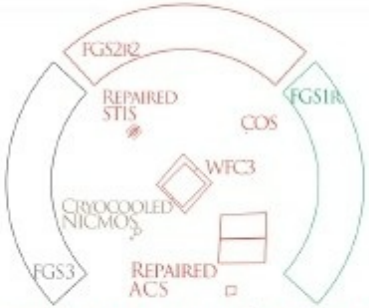
## 2000-2001

Replacement Fine Guidance Sensor
Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades

*Servicing Mission 3B, March 2002*

## 2002-2008

Advanced Camera for Surveys
NICMOS Cryocooler
Aft Shroud Radiator
Replacement Solar Arrays
Other Spacecraft Upgrades



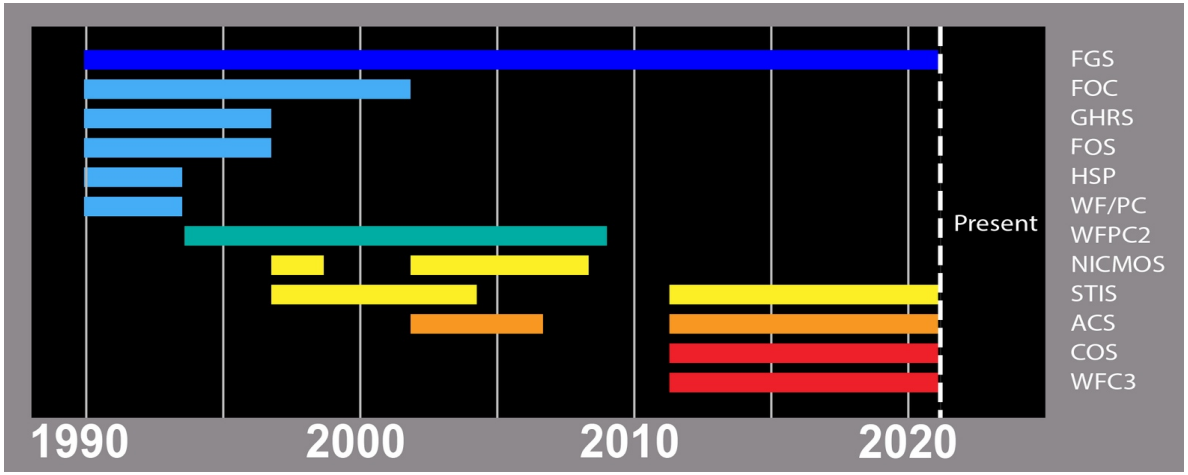

*Servicing Mission 4, May 2009*

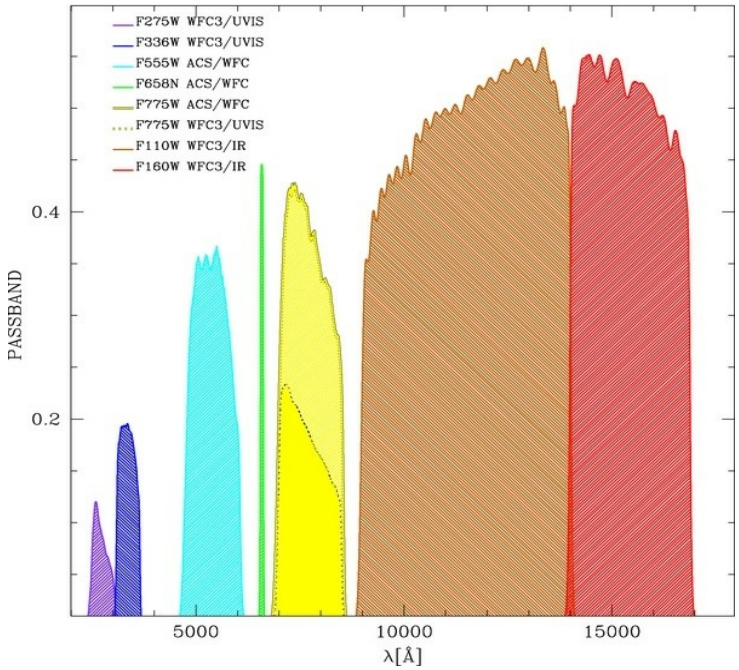
## 2009-

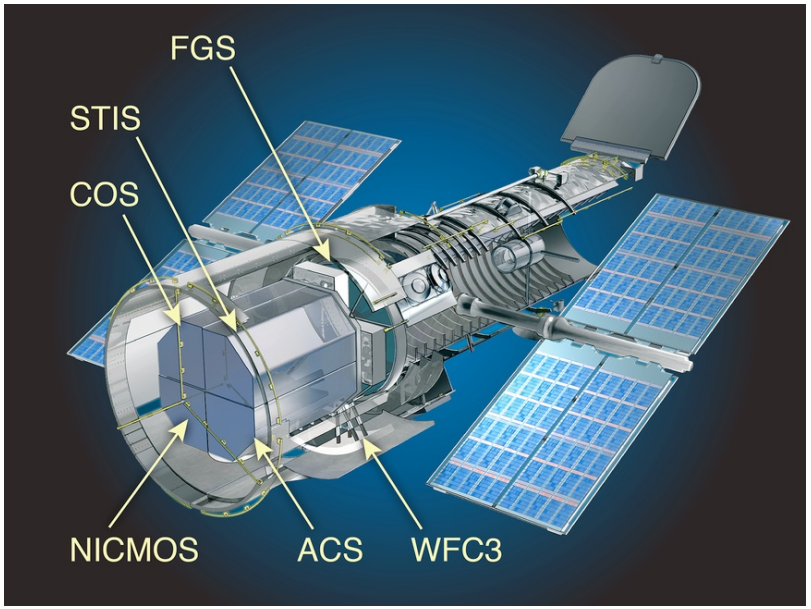
Wide Field Camera 3
Cosmic Origins Spectrograph
Replacement Fine Guidance Sensor
ACS repair
STIS repair
SI C&DH replacement
Batteries, Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades

| Servicing Mission | Dates | New Instruments | Other Components Installed |
|---|---|---|---|
| SM1 | Dec 2-3, 1993 | COSTAR* | Solar Arrays |
| | | WFPC2 | Magnetometers |
| | | | Coprocessors |
| | | | Gyroscopes |
| | | | GHRS Redundancy Kit |
| SM2 | Feb 11-21, 1997 | STIS | Refurbished FGS |
| | | NICMOS | Optical Control Electronics Enhancement Kit |
| | | | Solid State Recorder |
| | | | Reaction Wheel Assemblies |
| | | | Data Interface Units |
| | | | Solar Array Drive Electronics |
| SM3A | Dec 19-27, 1999 | — | Gyroscopes |
| SM3B | Mar 1-12, 2002 | ACS | Solar Array 3 |
| | | | Power Control Unit |
| | | | NICMOS Cryocooler |
| SM4 | May 11-24, 2009 | COS | STIS & ACS fixed |
| | | WFC3 | Replace Gyroscopes |
| | | | Replace Batteries |
| | | | Refurbished FGS |

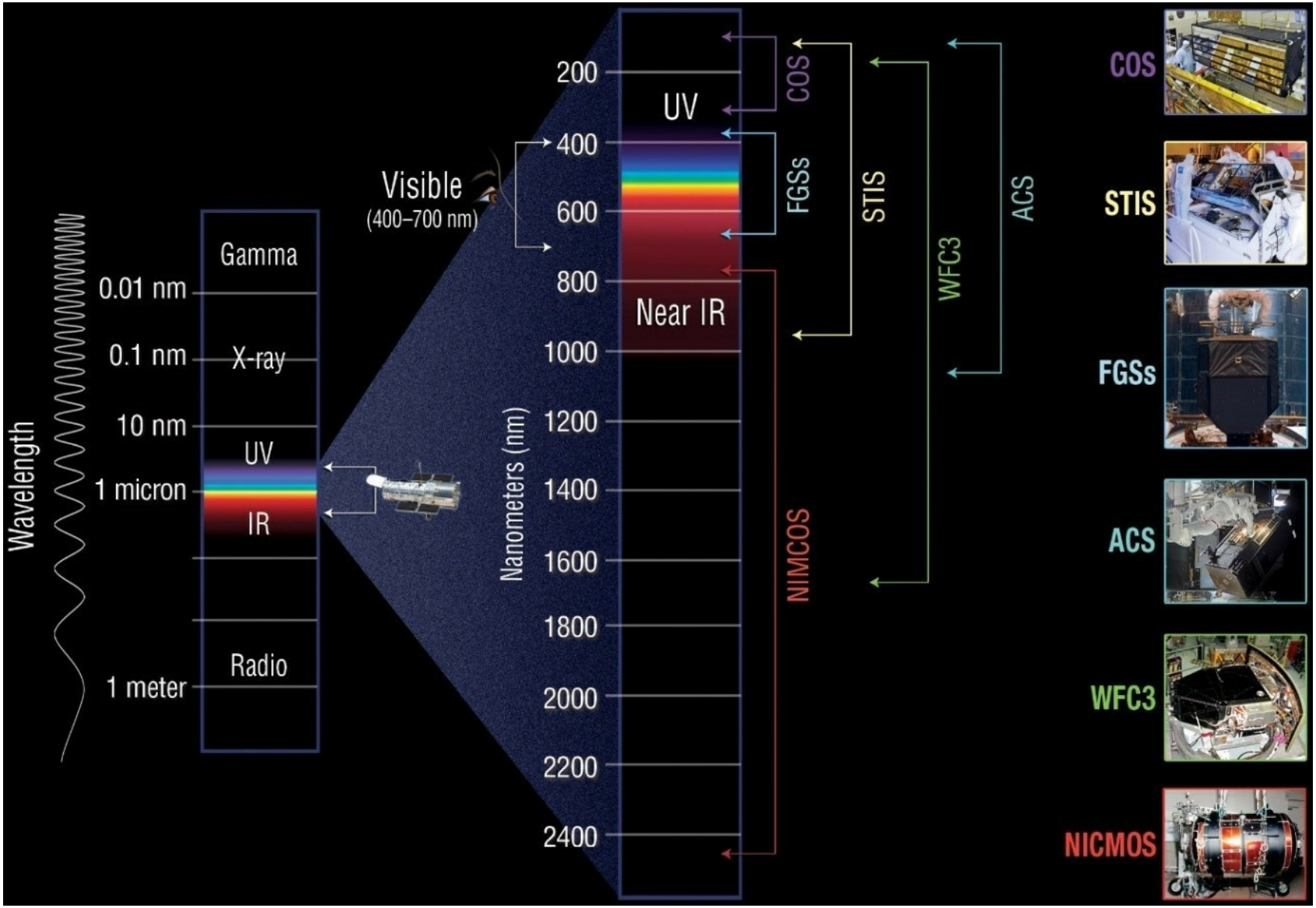
# A HST jelenlegi műszerezettsége



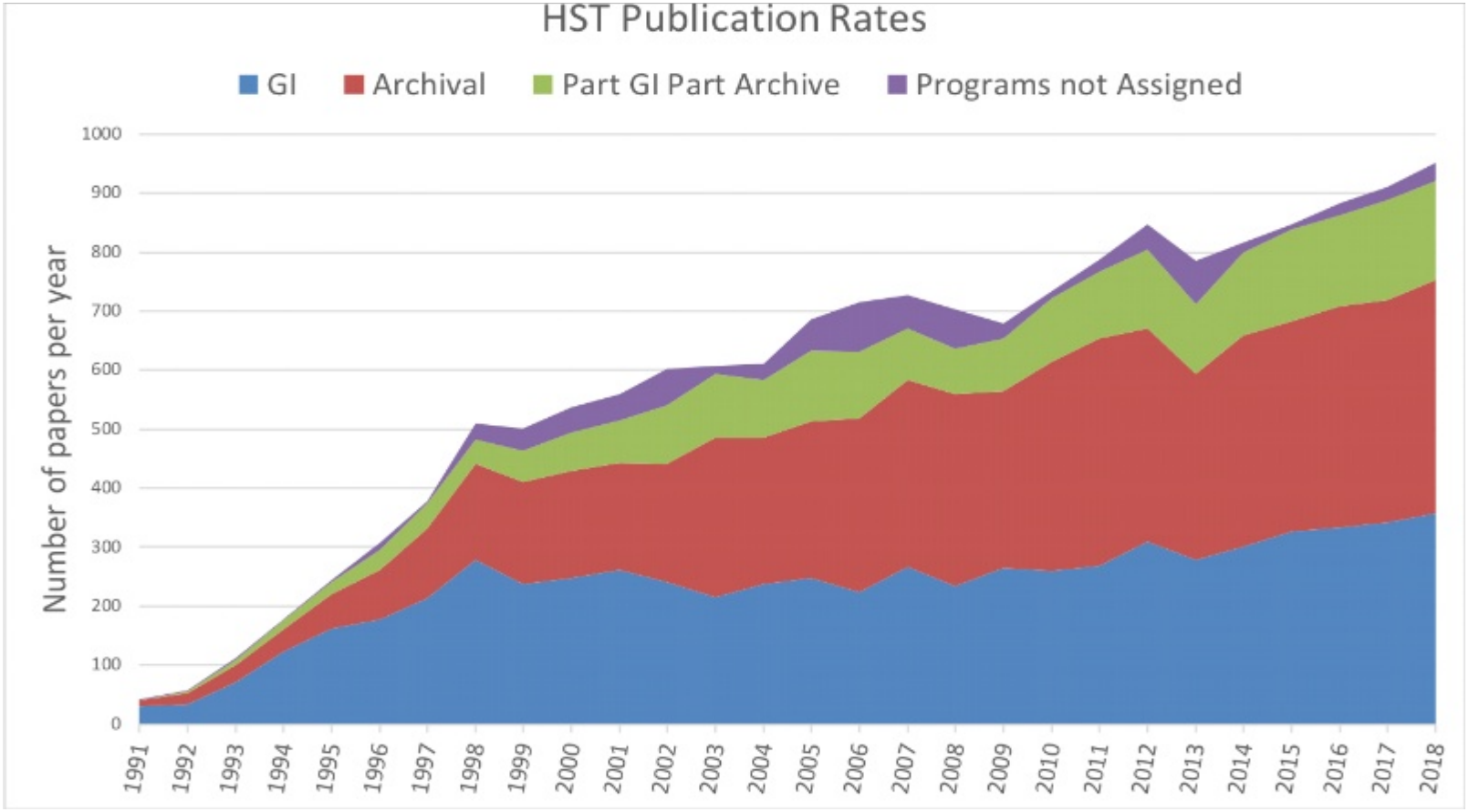



# A HST jelenlegi műszerezettsége



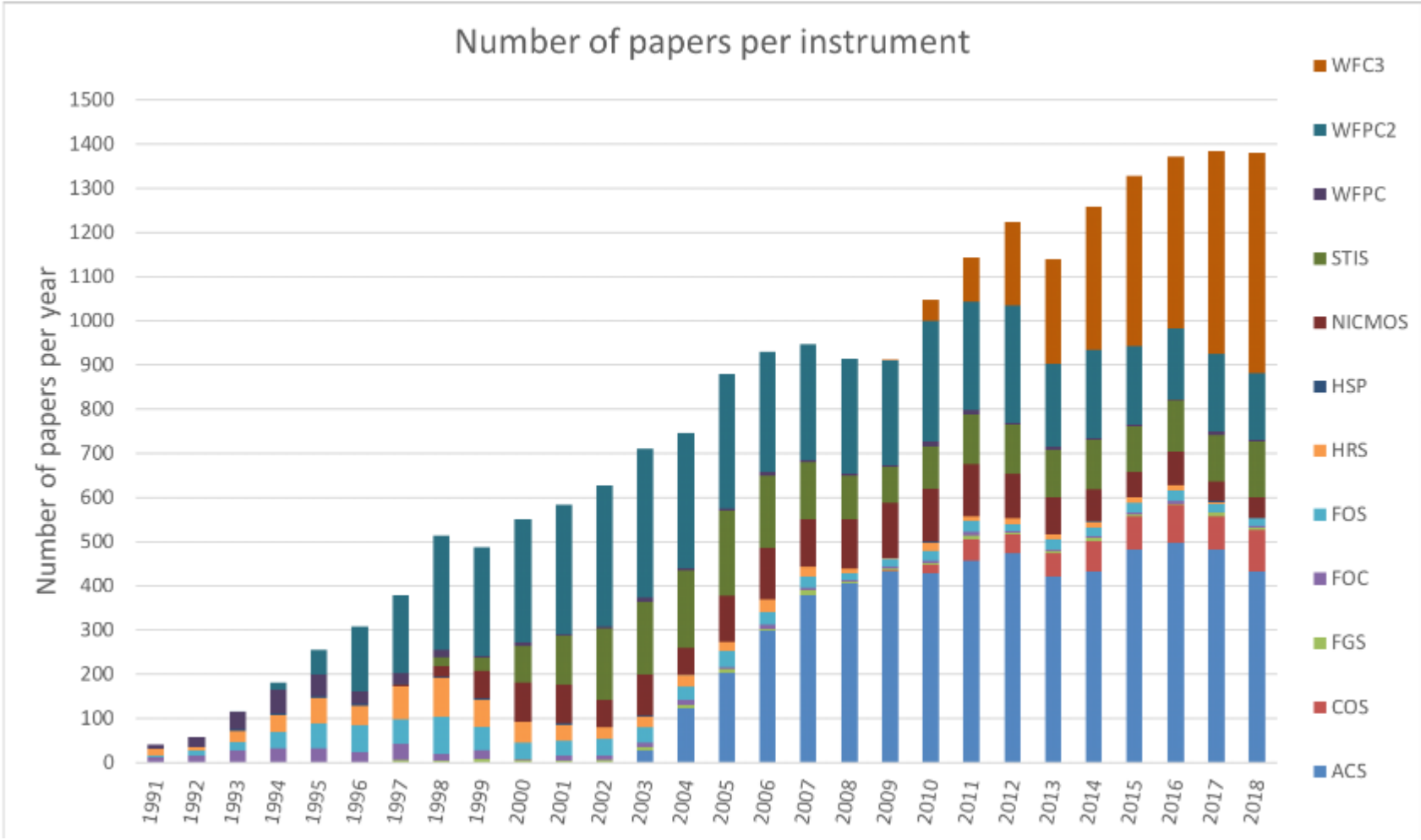
# A szervizek után

2011-re 10000 fölé nőtt a HST adatain alapuló tudományos cikkek száma. A legidézettebb 200 cikk 10%-a minden évben HST-méréseken alapul. Átlagosan 15-ször idézettebbek az eredmények, mint egy 4 m-es, földi távcsővel kapottak. De a HST százszor nagyobb költségű.



# A szervizek után

Szükség van-e rá ilyen áron? Igen! Földi teleszkópokkal észlelve, adaptív optikával csak az optikai tengely mentén jó a leképezés.



# Publikációs statisztikák összehasonlítása

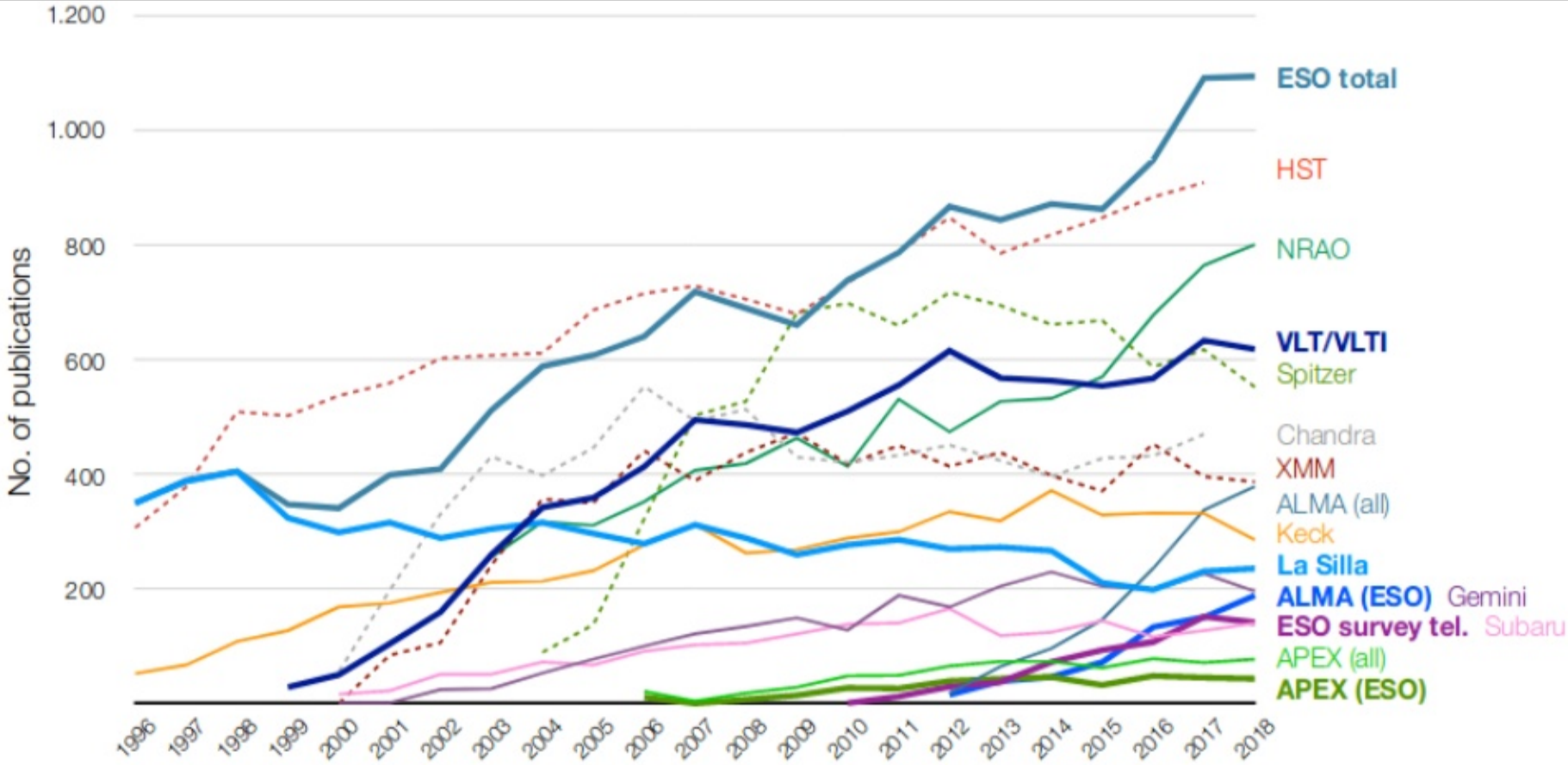
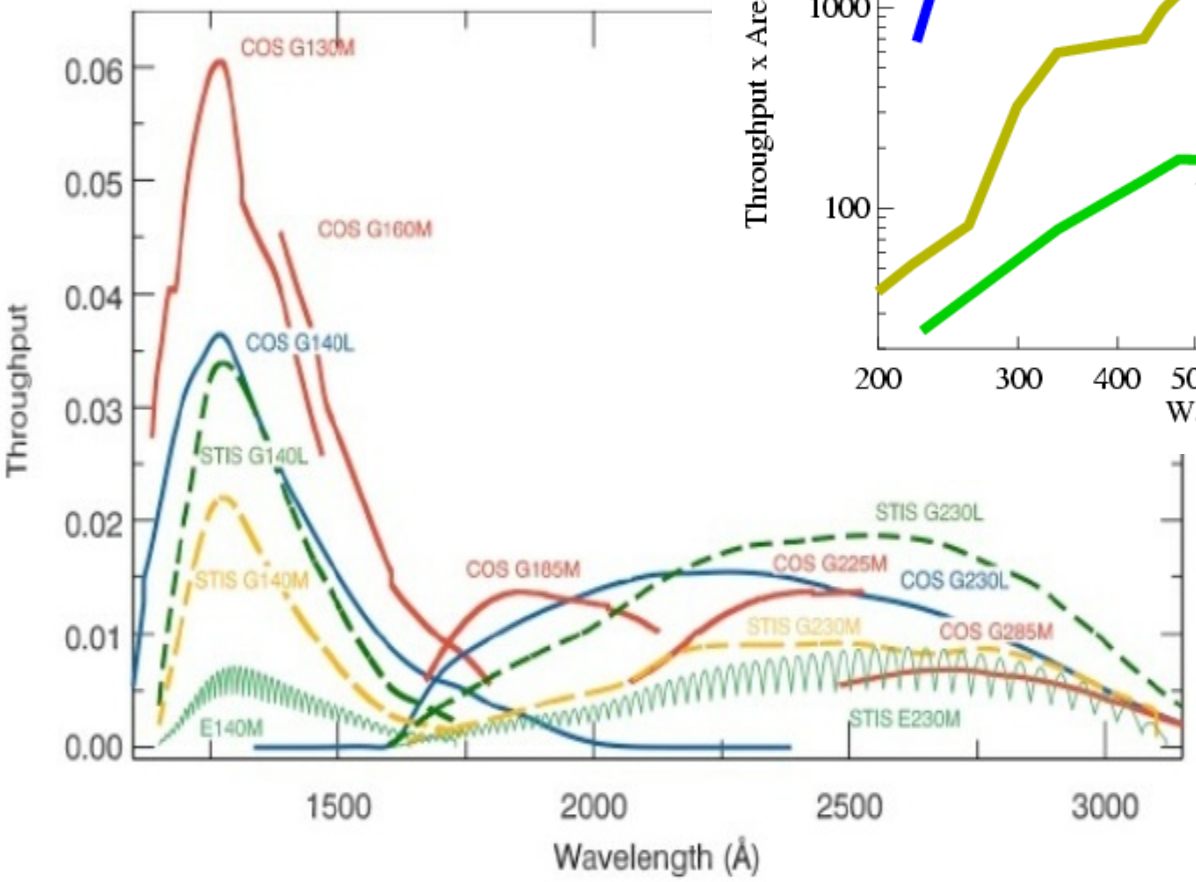
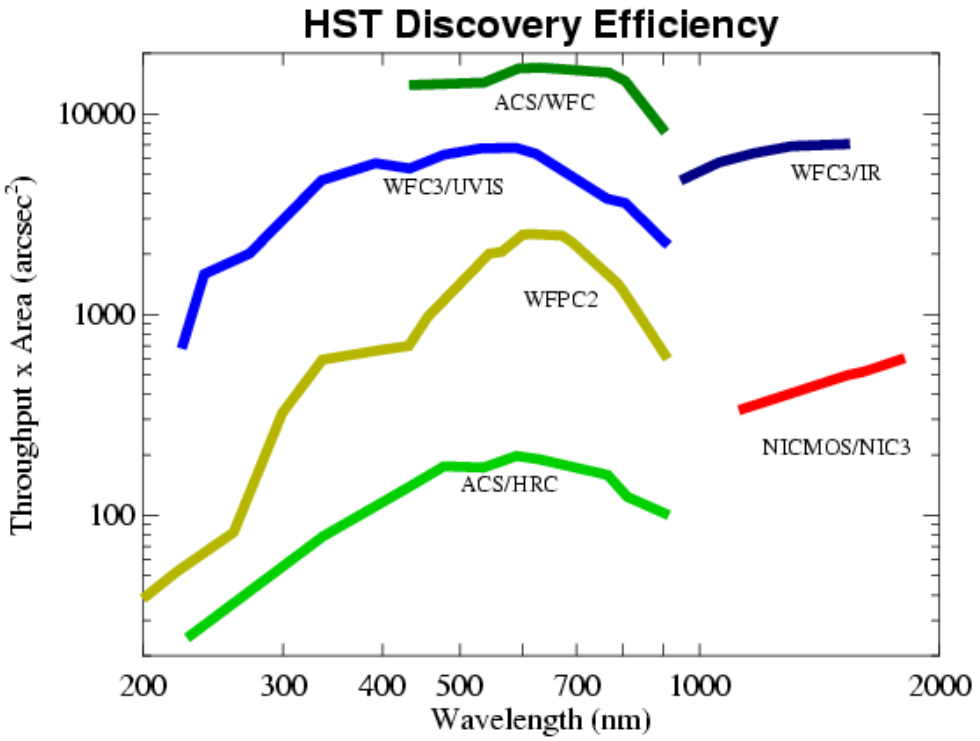



*Fig. 3: Refereed publications by ESO and other observatories (as of Feb. 2019; info for 2018 may still be preliminary.)*
***Thick lines:*** *ESO facilities.* ***Thin lines:*** *other ground-based facilities.* ***Dashed lines:*** *space-based facilities.*

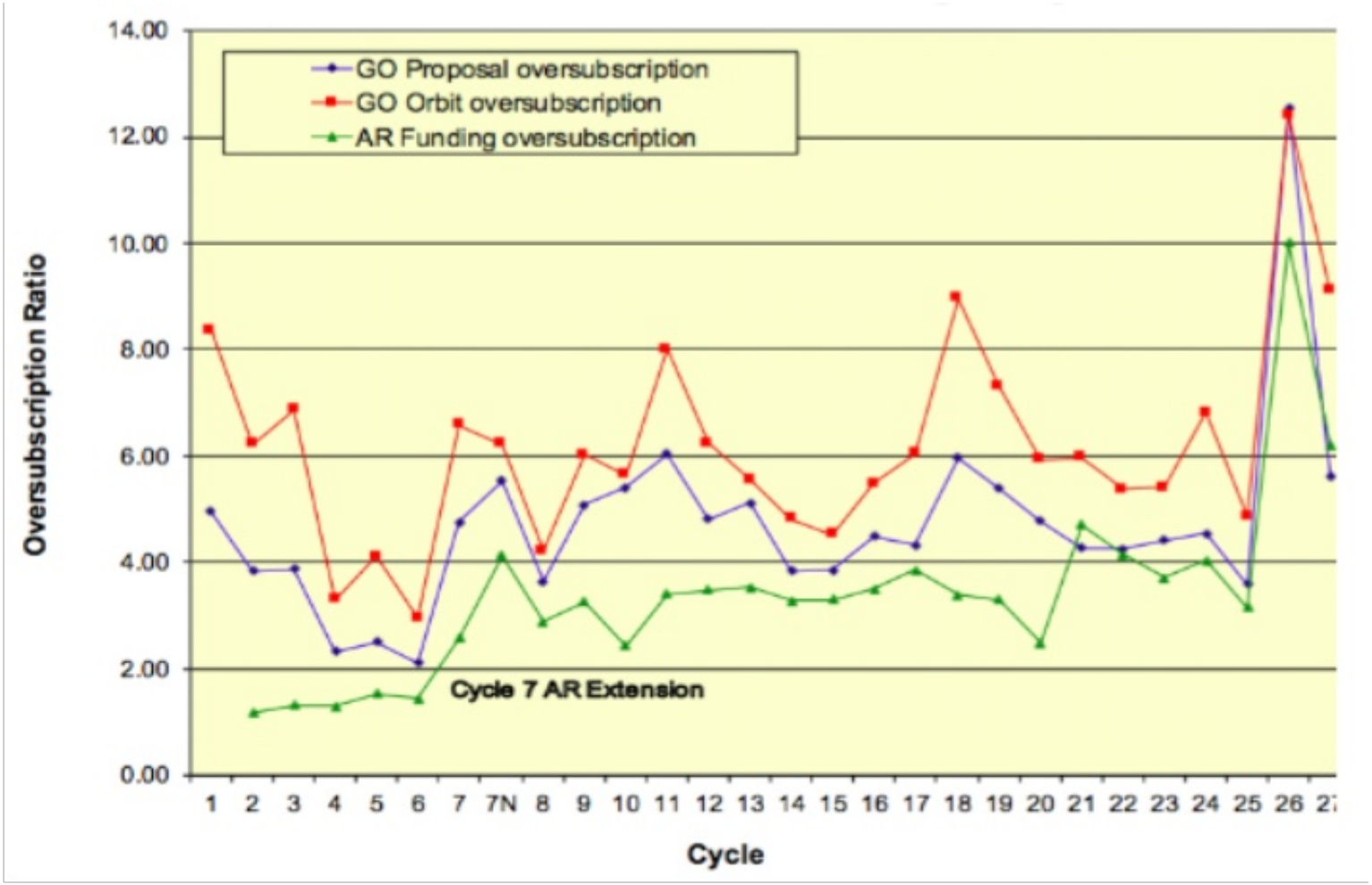
# A HST detektorainak „összehasonlítása”



# Az észlelések ütemezése

Obszervatóriumként működik: a távcsőidőre pályázni kell. A témában illetékes szakmai zsűri bírálja el, hogy milyen észlelési javaslatokat fogadnak el. A távcsőidőre hatalmas a túljelentkezés.



# Az észlelések ütemezése

A távcsőidő tervezése, beosztása sokkal bonyolultabb a földfelszíni obszervatóriumoknál megszokotthoz képest.

A LEO pálya jó a karbantartás miatt, de a Föld a pálya felén át eltakarja az észlelendő égitestet. Észlelési szünet van a dél-atlanti anomália fölötti áthaladáskor, és zavar a Nap és a Hold is (a Naptól 45° szögtávolságra lehet már észlelni). Folyamatosan észlelhető területek (Continuous Viewing Zone, CVZ): a pályasíkra merőlegesen. A pálya precessziója miatt a CVZ 8 hetes periódussal változik.

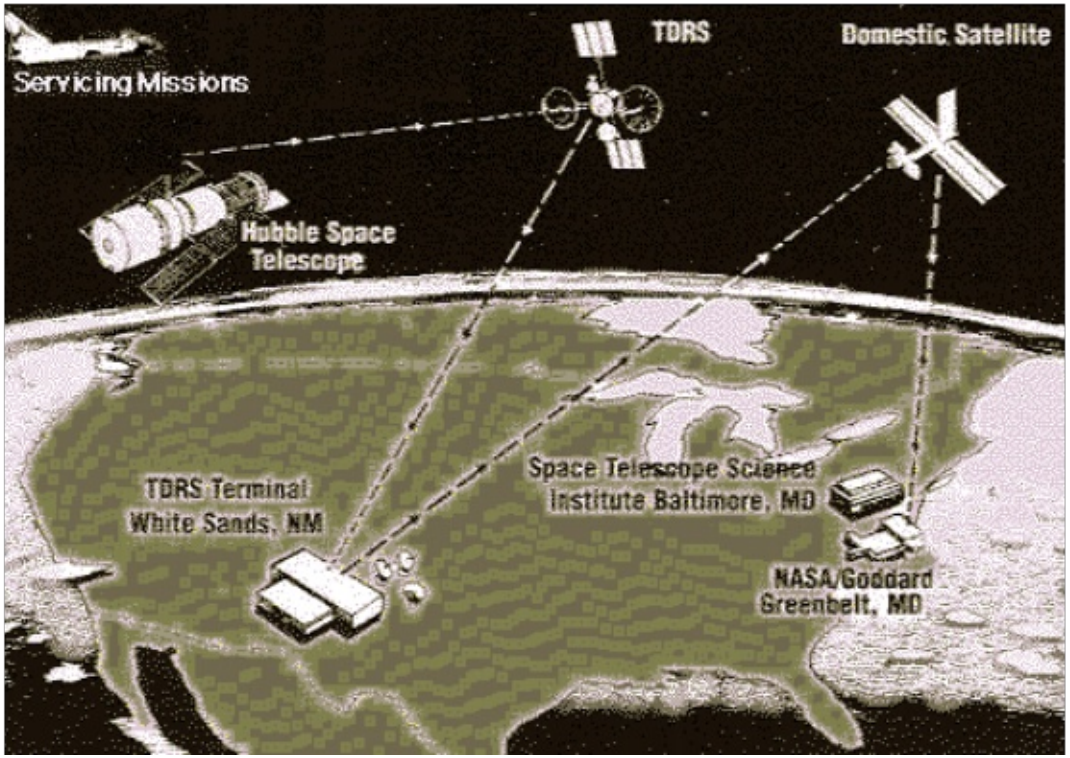
A felsőlégkör állapota előre nem jelezhető (a naptevékenység miatt), ezért a HST pontos pályája sem. Az elfogadott észlelési programokat csak néhány napra előre véglegesítik.

Működési zavarok lehetnek, és vannak is. A legutóbbi évekre vonatkozó lista:

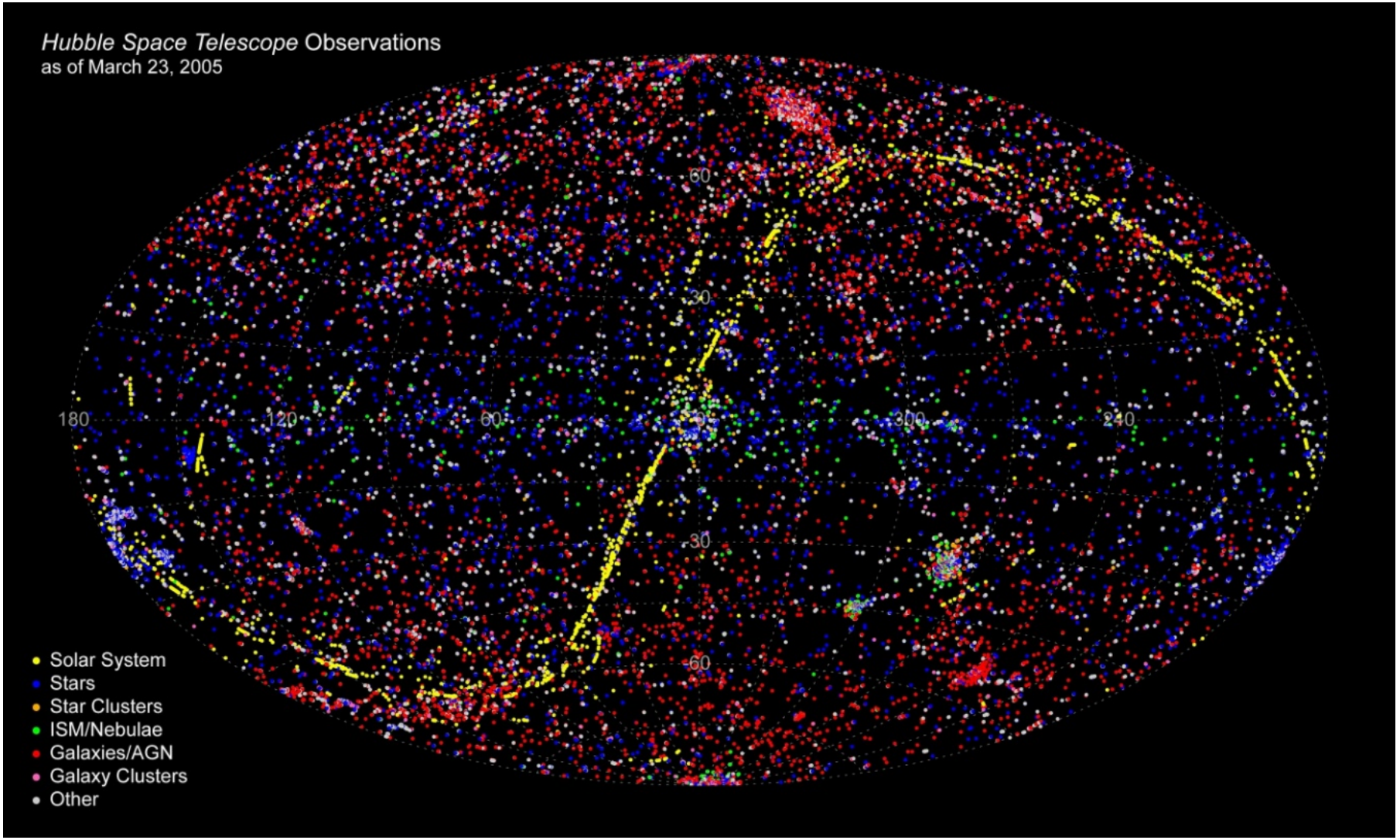
- 2018. ápr.: elromlott a 2. giroszkóp;
- 2018. október: biztonsági üzemmód bekapcsolt, 3 hét után a tartalék giroszkóppal újraindult az észlelés;
- 2019. január: a WFC3 kilenc napra leállt;
- 2019. február-március: az ACS egy héten át nem működött.
- 2021. június: elromlott a fedélzeti számítógép tápegysége, egy hónap üzemszünet;
- 2021. október: a műszerek szinkronizációja jelzett hibát, másfél hónap üzemszünet.

# A HST adatainak továbbítása, kezelése

Adattárolás a fedélzeti számítógépen (kezdetben mágnesszalagon tárolták);
Utána a TDRSS (Tracking and Data Relay Systems Satellite) közvetítésével továbbítják a Földre, majd a GSFC-be kerül.
Minden adatot archiválnak. 1 év után válnak publikussá, a ***DDT***-adatok (Director's Discretionary Time) kivételével, azok rögtön elérhetők.
Adattárolás:
FITS-formátumban.
A feldolgozás könnyebb, de nem alkalmas közvetlen képnézésre.
Erre szolgál a ***Hubble Heritage Project*** (Hubble-örökség).
Adatfeldolgozásra használható programcsomagok:
pl. az IRAF alatt futó STSDAS (Space Telescope Science Data Analysis Software).



# A HST észlelési célpontjai az első 15 évben



# A HST rövid kronológiája

1977: az USA kongresszusa jóváhagyja az LST támogatását
1978: elkezdődik az űrhajósok felkészítése a szervizküldetésekre
1979: a 2,4 m-es tükör készítésének kezdete
1983: az STScI megkezdi működését
1983: az LST nevét Hubble-ra változtatják
1984: az ST-ECF megkezdi működését
1985: elkészül a HST
1986: a Challenger-katasztrófa, újabb késés a HST indításában
1990. ápr. 24⟩25: a HST pályára helyezése
1990. jún. 25.: a főtükör csiszolási hibájának felfedezése
1993. dec.: SM1: COSTAR (le HSP), WFPC2 (a WFPC1 helyett)
1994. júl.: a Shoemaker–Levy-9 üstökös Jupiterbe csapódása
1995: a Sas-ködbeli Teremtés oszlopainak híres felvétele
1996: a HDF első felvételeinek közzététele (sokkal több a galaxis, mint csillag a látómezőben)
1996: a kvazárok gazdagalaxisainak felbontása
1997. feb.: SM2: STIS és NICMOS (a FOS és GHRS helyett)
1999. dec.: SM3A: általános karbantartás, giroszkópok cseréje
2001: HD 209458b exobolygó légkörének összetétele
2002. márc.: SM3B: ACS, NICMOS hűtőrendszere
2004: a HUDF közzététele
2005: a Plútó két újabb holdjának felfedezése

# A HST rövid kronológiája

2006: az Eris törpebolygó nagyobb a Plútónál
2008: Fomalhaut b-ről képalkotás (első kép exobolygóról?)
2008: a HST 100000. fordulata a Föld körül
2009. máj.: SM4: WFC3, COS + STIS és ACS javítása
2010: képek z>8 vöröseltolódású galaxisokról
2011: a HST egymilliomodik észlelése (HAT-P-7b légkörének színképe)
2011: a 10000. cikk HST-adatok alapján
2013: a Neptunusz új holdjának felfedezése HST-felvételeken
2014: az ultraibolyával bővített HUDF közzététele
2014: a Jupiter nagy vörös foltja zsugorodik (üteme: 900 km/év)
2015: Hubble Source Catalog (MAST; Mikulski Archive for Space Telescopes)
2016: az Univerzumban a korábban becsültnél tízszer több galaxis van
2017: a harmadik legnagyobb törpebolygónak (2007 $OR_{10}$) holdja van
2018: a Coma-halmazban 22 gömbhalmazt találtak a galaxisközi térben
2019: a 2I/Borisov intersztelláris eredetű üstökös észlelése (sebessége: 175000 km/h)
2019: a GRB 190114c észlelése (az addigi legnagyobb energiájú gammakitörés)

# Akiről az archívumot elnevezték

MAST: Mikulski Archive for Space Telescopes, nemcsak a HST adatait tartalmazza. http://archive.stsci.edu
Barbara Ann Mikulski (1936–): Maryland állam demokrata szenátora 1987–2017 között, időtartam-rekorder az amerikai szenátorok között. Eredeti foglalkozása szociális munkás.

# Naprendszerkutatás a HST-vel

A szférikus aberráció miatt kezdetben ideális célpontok voltak a bolygók (nagy jel/zaj rövid expozícióval).

A korábbi űrmissziók (pl. Voyager) eredményeivel való összehasonlítás: bolygófelszínek és -légkörök dinamikus viselkedése;

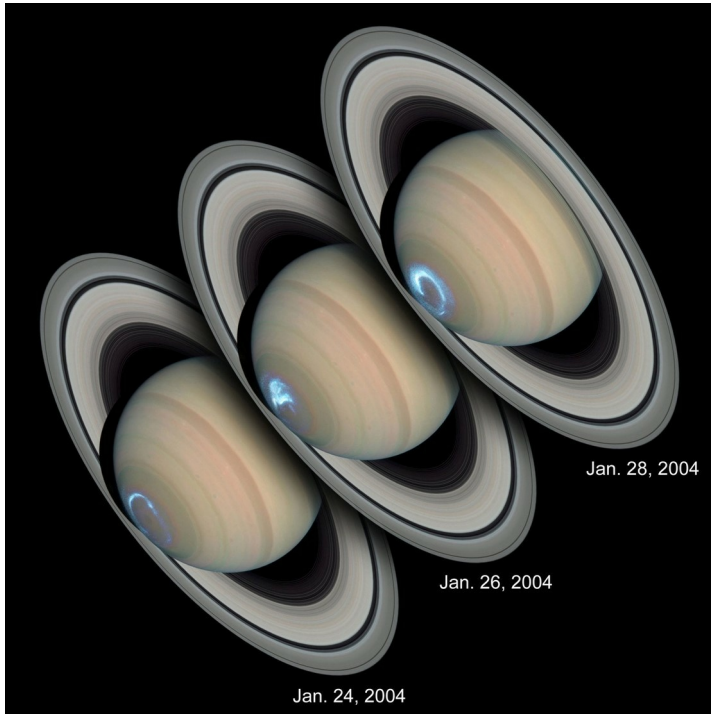
UV-érzékenység: auróra felfedezése a Jupiter és a Szaturnusz pólusainál, bolygólégkörök cirkulációja (és más időbeli változások) a nagy felbontást kihasználva.

A belső bolygók nem vizsgálhatók.

Minden műszerrel észleltek bolygókat (a HSP-vel is, amikor a Szaturnusz gyűrűje elfedett egy 12 magnitúdós csillagot).

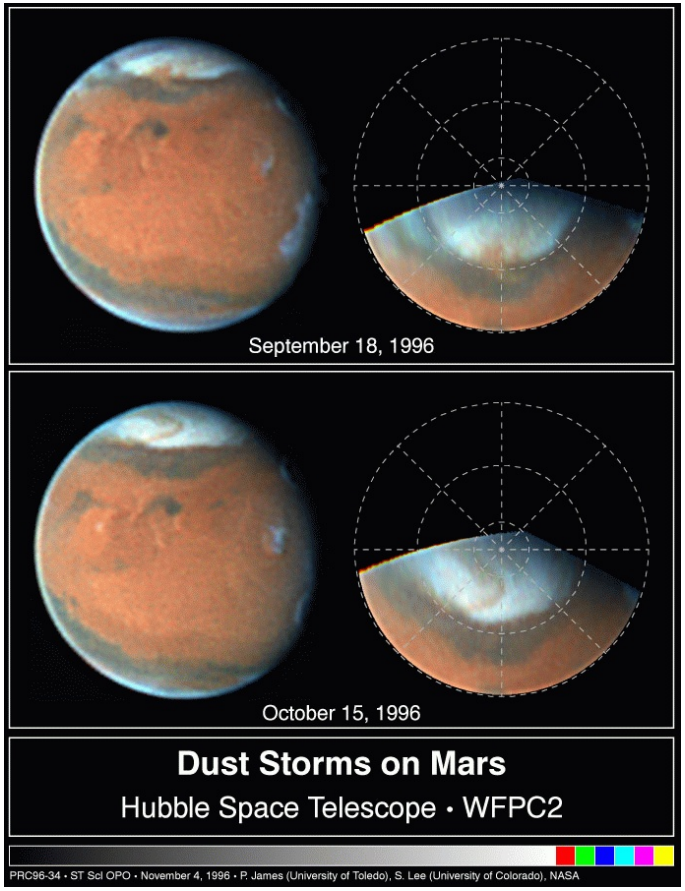
Koordinált megfigyelések földi és űreszközökkel.

Újabb projekt: OPAL (Outer Planets Atmospheres Legacy); a bolygók légkörében fellépő trendszerű változások vizsgálata.



# A Mars kutatása a HST-vel

Rögtön az 1990-es oppozíció után észlelni kezdték.
Légköri ózon areografikus helyfüggése (UV-szűrőkkel);
Felhőövek (8 km magasan) évszakos helyfüggése;
Porviharok: minden skálán előfordulnak (lokális, regionális, globális). 2001-ben volt az eddigi legnagyobb porvihar: a Hellas-medencében tört ki, és gyorsan globálissá vált.
A Pathfinder leszállóhelyét (1997, Valles Marineris) is tanulmányozták.
Az albedó hullámhosszfüggése és eloszlása (albedómintázat): a Viking mérései óta jelentős változás az albedó felszíni eloszlásában.
Az újabb Mars-szondák miatt a HST háttérbe szorult a Mars kutatásában.



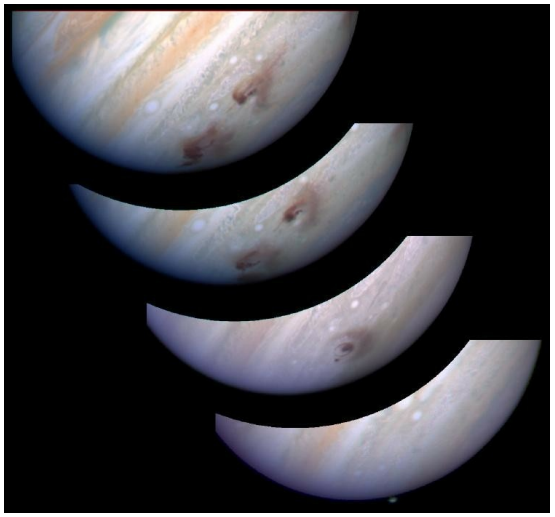
# A Jupiter kutatása a HST-vel

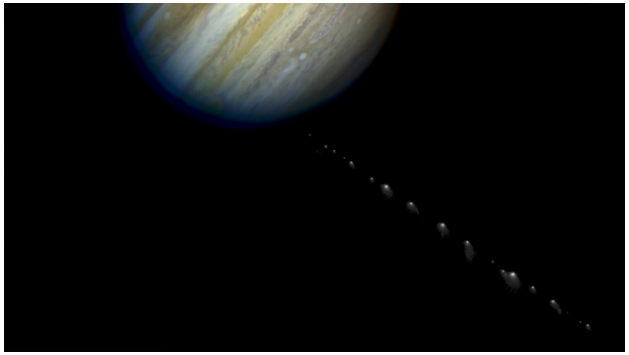
A Voyagerek óta a legjobb felbontás, de szélesebb spektrumtartományban. Időközben a Galileo szonda (indítás: 1989) kutatta a Jupitert (1995–2003), jelenleg pedig a Juno (indítás: 2011) kering a Jupiter körül (2016-tól).

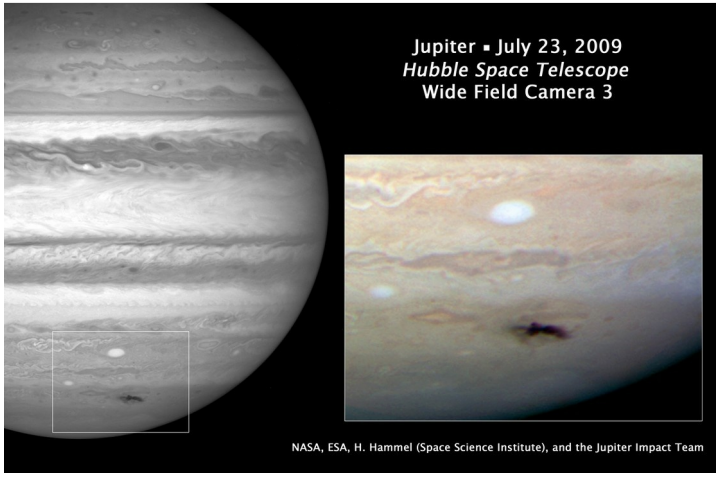
1994: a Shoemaker–Levy-9 üstökös (SL-9) becsapódása a Jupiterbe

SL-9 felfedezése 1993. márc.; HST-vel képek 1993. júliustól. Kéttucat darabból álló lánc + változások. Becsapódás 1994. júl. 16-tól. Légköri „gombafelhők” 3000 km magasra emelkedtek 6-8 perc alatt, 10 perc alatt szétoszlottak, visszaestek. Látszott a hullámterjedés is.

Újabb becsapódás történt: 2009. július 23.





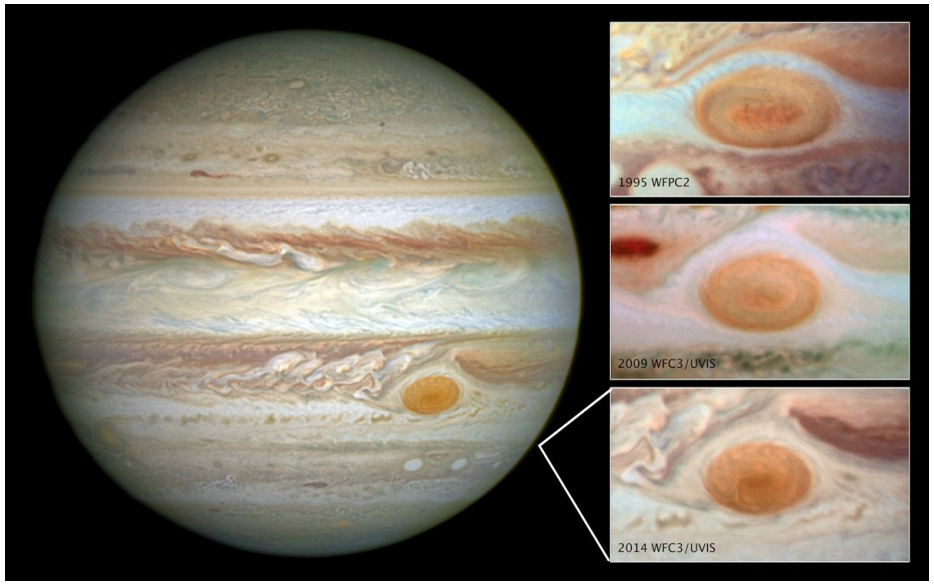


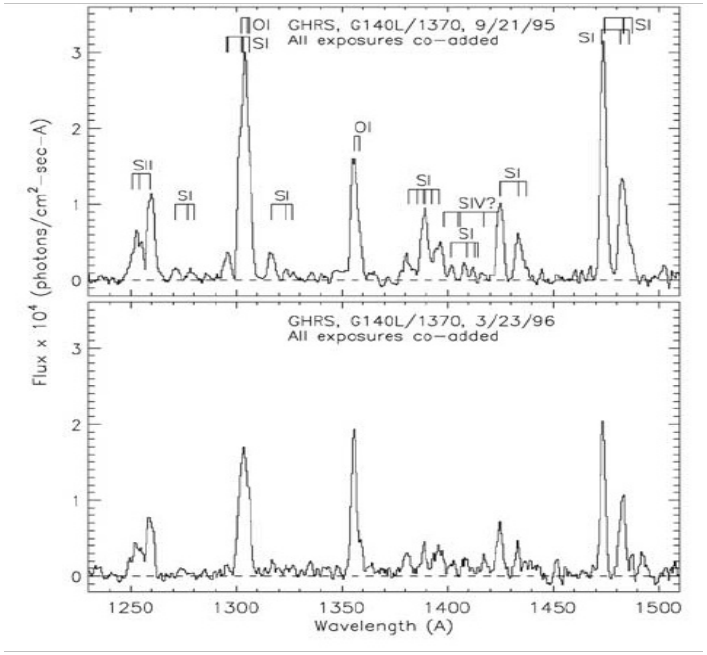
# A Jupiter kutatása a HST-vel

A nagy vörös folt, valamint több fehér és sötét ovális terület alakjának és helyzetének változása hónapos-éves időskálán. A nagy vörös folt évszázadok óta jelen van, de 900 km/év ütemben zsugorodik.

A szélsebesség akkora, mint a Voyager szondák idejében (150-200 m/s). Ciklonok és anticiklonok felváltva egymás mellett.

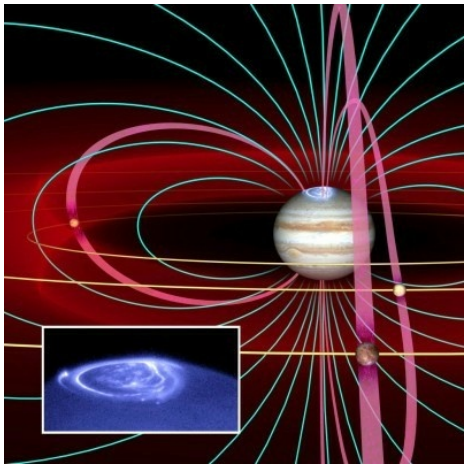
Hosszú időskálájú szinoptikus térkép az atmoszféra dinamikájáról. A GHRS-sel alacsony szélességen néhány perces időskálán drámai változást találtak a Ly-$\alpha$ emissziós vonal profiljában. Ez szuperszonikus mozgásra utal a nagy magasságban.

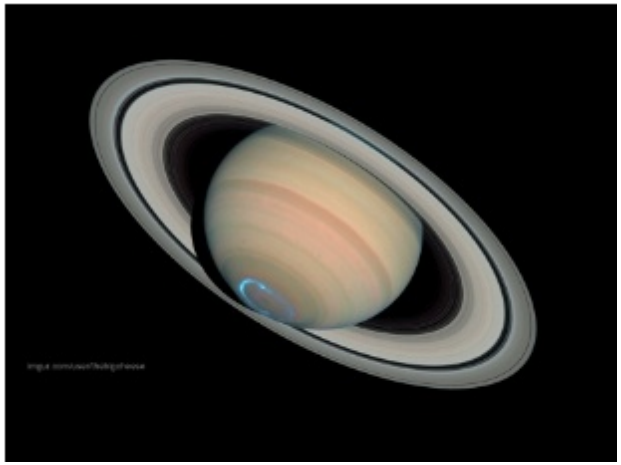


# A Szaturnusz kutatása a HST-vel

A Voyager által 1980-81-ben észlelt sarki hexagon nem tranziens jelenség.
A sötét sávok és világos zónák profilja viszont változott a Voyagerek óta.
1990. szept.: nagy egyenlítői zavar lépett fel, körbefolyta a bolygót, és 1991. júniusban tűnt el. A zavar K és Ny felé egyaránt terjedt, végül hullámszerűen vette körbe az egyenlítőt. Ilyet láttak már 1876-ban és 1933-ban az egyenlítő körül, és kettőt nem az egyenlítőnél: nyáron szokott kialakulni.
Alacsony szélességen lassabb a szél, mint a Voyager szondák idején.
Auróra: a bolygólégkör és a magnetoszféra kölcsönhatása. A Jupiternél az IUE és a Voyager UV-színképei alapján már ismerték. Ott az Io mágneses fluxusa módosítja az auróraovált – vulkáni aktivitás (6 $R_J$-ra kering a bolygótól, az erővonalak 30 $R_J$-ig terjednek).



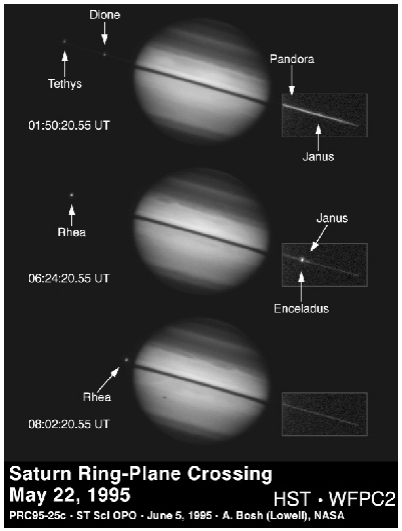


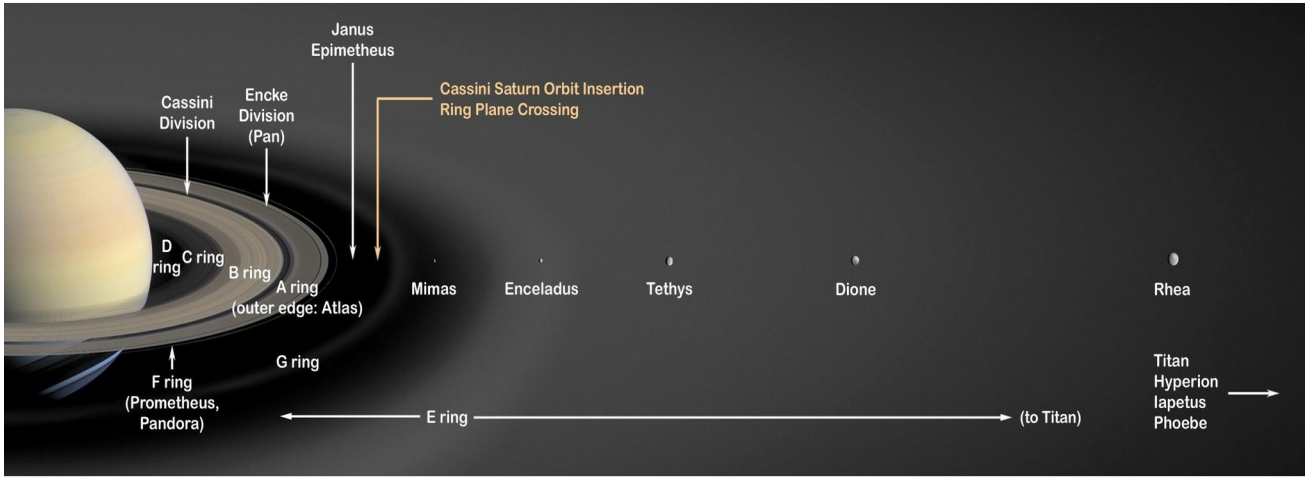
# A Szaturnusz kutatása a HST-vel

A kis holdak nem mindegyike volt a számított helyen. A Prometheus és a Pandora kaotikusan kölcsönhat, a Janus és az Epimetheus pályát cserélt. Ez a Cassini-mérések ütemezése miatt is fontos volt.

FOS: UV-emisszió a gyűrűt körülvevő OH-„légkörből”. OH-oszlopsűrűség: kb. $10^{13}/cm^3$ , azaz másodpercenként $10^{25}$-$10^{29}$ OH molekula szabadul fel, hogy fennmaradjon az atmoszféra.

A 29,5 éves keringési periódus alatt a gyűrű kétszer fordul élével felénk. Ilyenkor vizsgálhatók a terelőholdak. 1995-ben volt mindkét ilyen helyzet. 1995. nov.: a Nap volt a gyűrű síkjában. Az F-gyűrű dominál (a többi vékonyabb). A Szaturnuszhoz küldött Cassini+Huygens szonda (indítás: 1997, működés: 2004–2017) miatt a HST szerepe itt is csökkent.



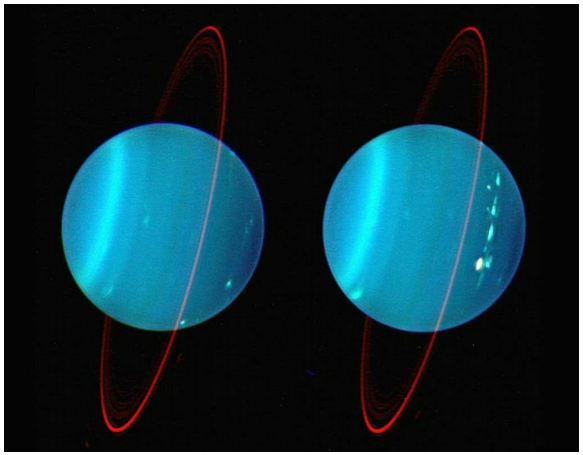



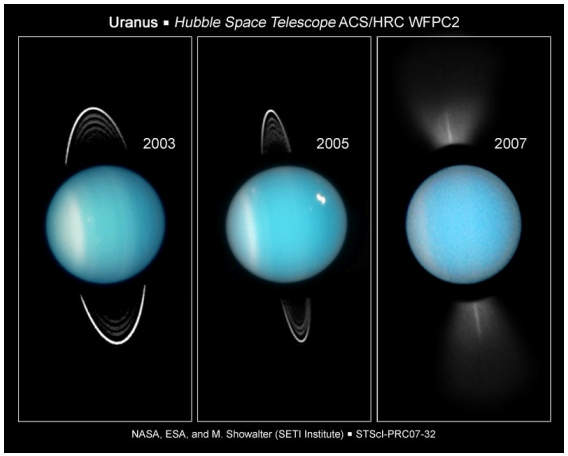
# Az Uránusz kutatása a HST-vel

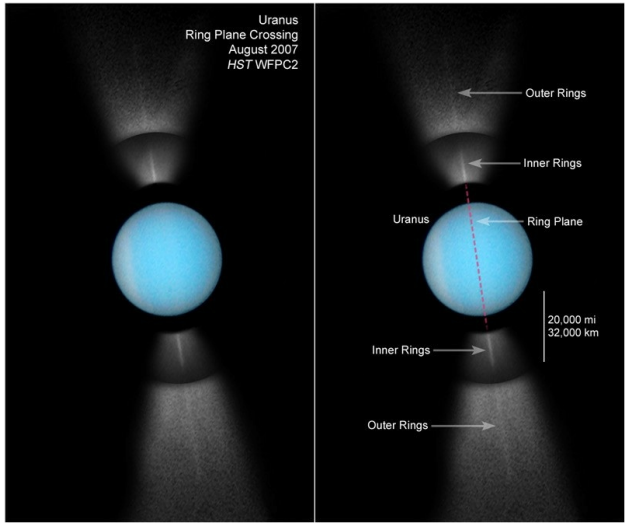
Hét felhő alapján vizsgálták a rotációját. A déliek azonos ütemben forogtak, mint a Voyager idején, az északiak lassabban forognak, ám azokról nincs Voyager-adat.

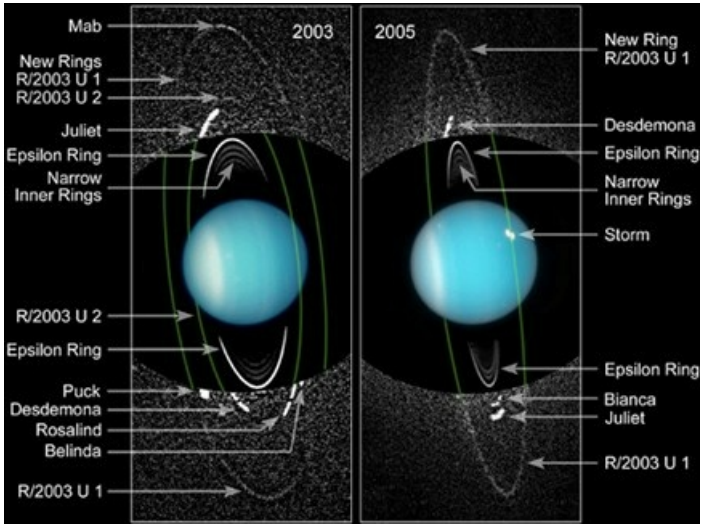
Felfedezések:

- új hold:
  2003;
- új gyűrű:
  2005.

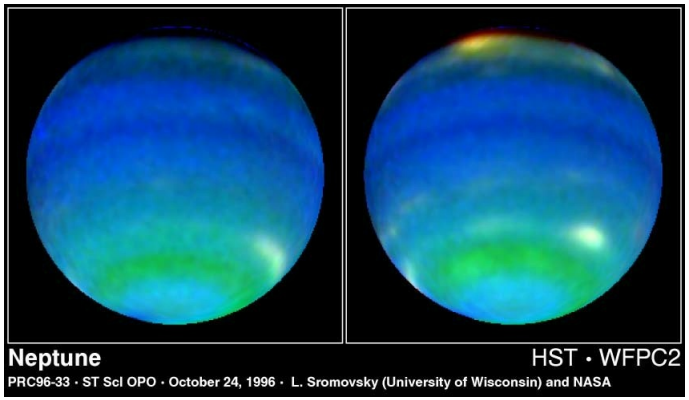




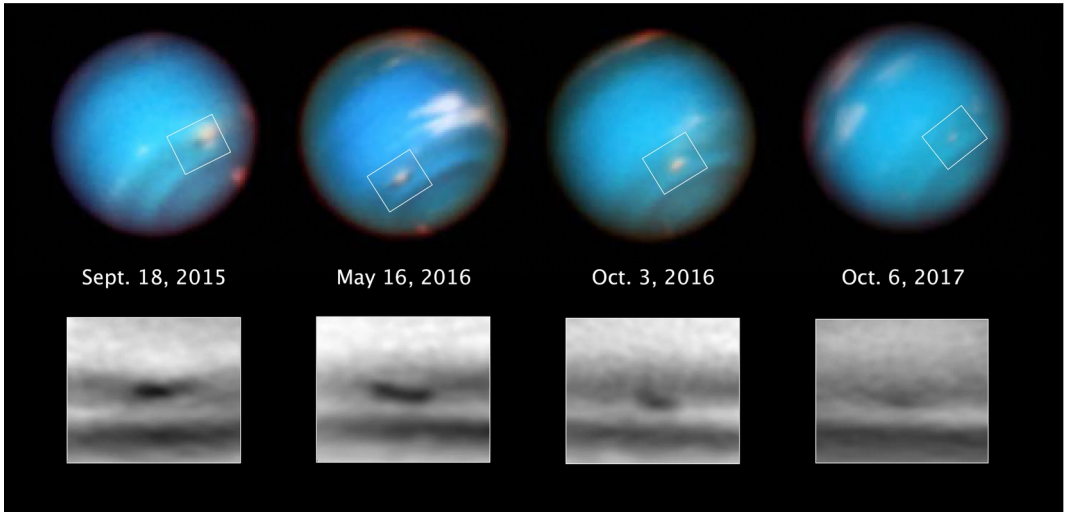



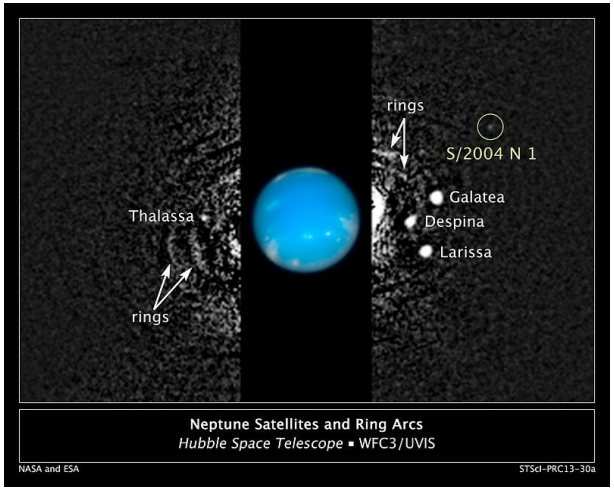



# A Neptunusz kutatása a HST-vel




Dinamikus a légköre: nagy sötét folt (GDS) volt -22° szélességnél, mozgása 1,2°/hónap észak felé (1989-ben Voyager–2). 1994-ben WFPC2-vel: GDS89 eltűnt, volt viszont GDS94. Mérete hasonló, de +31° szélességnél. Nem migrált, és egy év elteltével is megvolt. Magasan lehetett, mert a metán sávjaiban látható bonyolult felhő-csoport kísérte. Új felvételek egy megszűnő nagy viharról (2015–2017).
A XIV. hold (Hippocamp) felfedezése (2013).



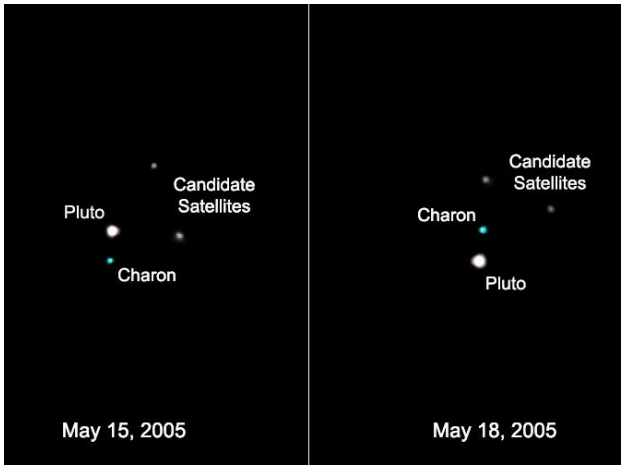



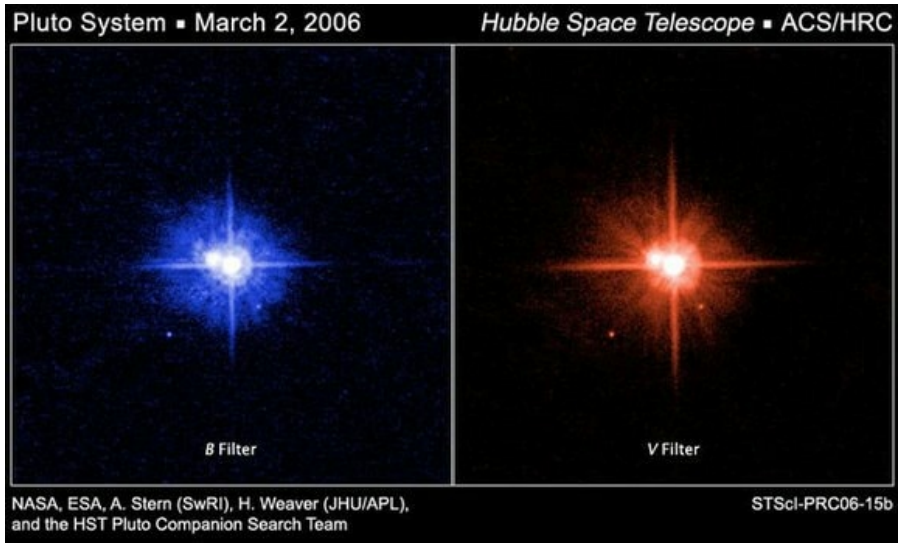
# A Plútó kutatása a HST-vel

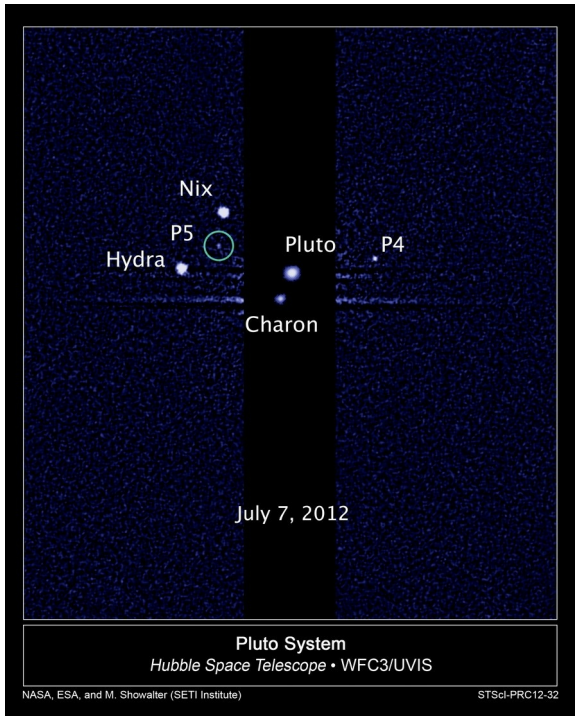
A COSTAR beszerelése után 1994-ben a Plútó és a Charon sugarát és albedóját + a kettős pályaelemeit is meghatározták. Nem 0 az excentricitás, pedig az árapályerők már régen cirkularizálták. Nemrég nagy becsapódás történhetett valamelyiken.

Új holdak: 2005-ben Nix és Hydra, 2012-ben újabb kettő: Kerberos, Styx.

A 2015-ben a Plútó mellett elhaladt New Horizons szonda sok mindent tisztázott.



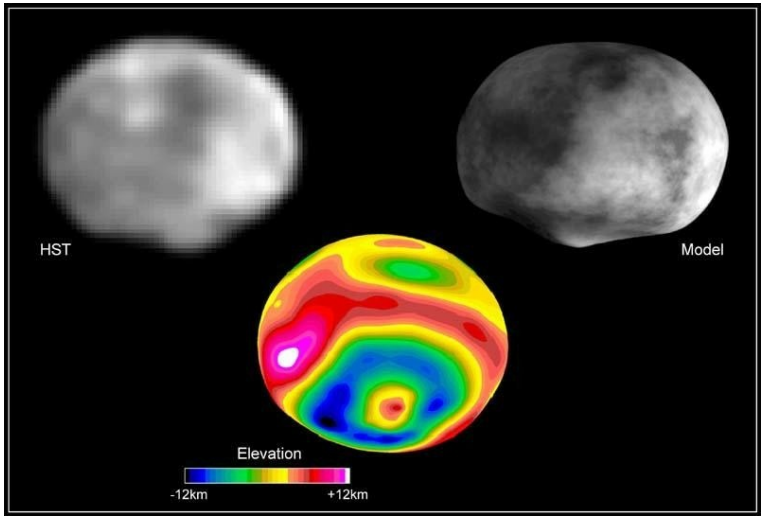
# Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

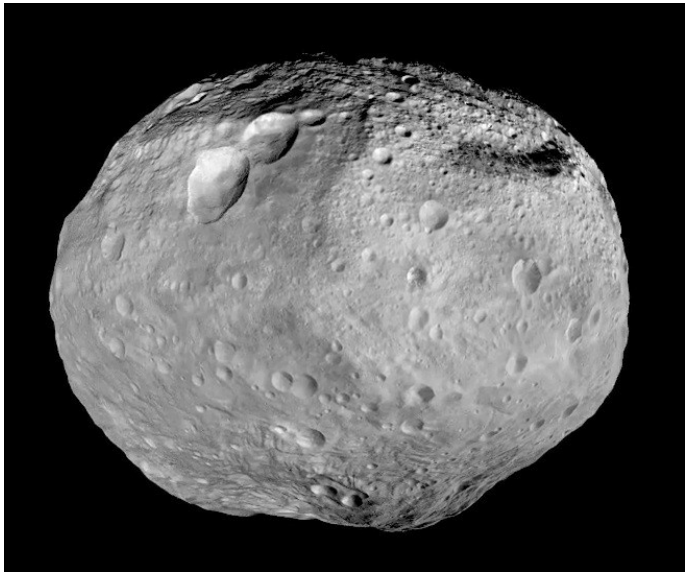
Vesta: oppozíció 1994-ben; 51 km/px felbontású 56 kép alapján geológiai térkép, méret, alak, forgástengely helyzete.

1996-ban kedvezőbb oppozíció: térkép mindkét pólus környékéről. Fontos felfedezés: a déli pólusnál (430 km átmérőjű) becsapódási kráter (ellipszoidnak véve a Vesta fél nagytengelyei: 289, 280, 229 km). A kráter pereme és központi csúcsa 13 km-rel emelkedik a kráteraljzat fölé. Modell: 1%-nyi tömeget vesztett a becsapódáskor a Vesta. A meteoritok 6%-ának szülőégitestje a Vesta.

Szűrőkkel a kémiai összetétel: piroxénben gazdag kéreg az olivinból álló köpenyen. A nagy aszteroidák között egyedülálló, bazaltos felszín.

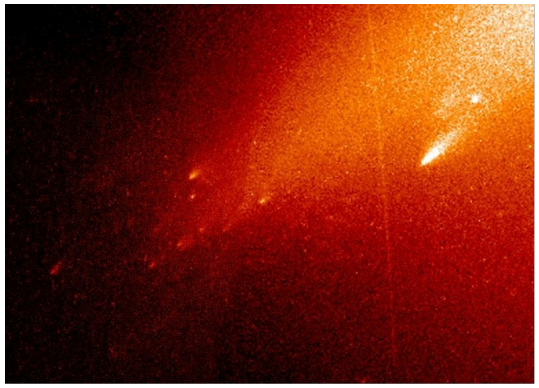
Dawn: 2011. júl. – 2012. aug., Vesta körüli pályán keringett.



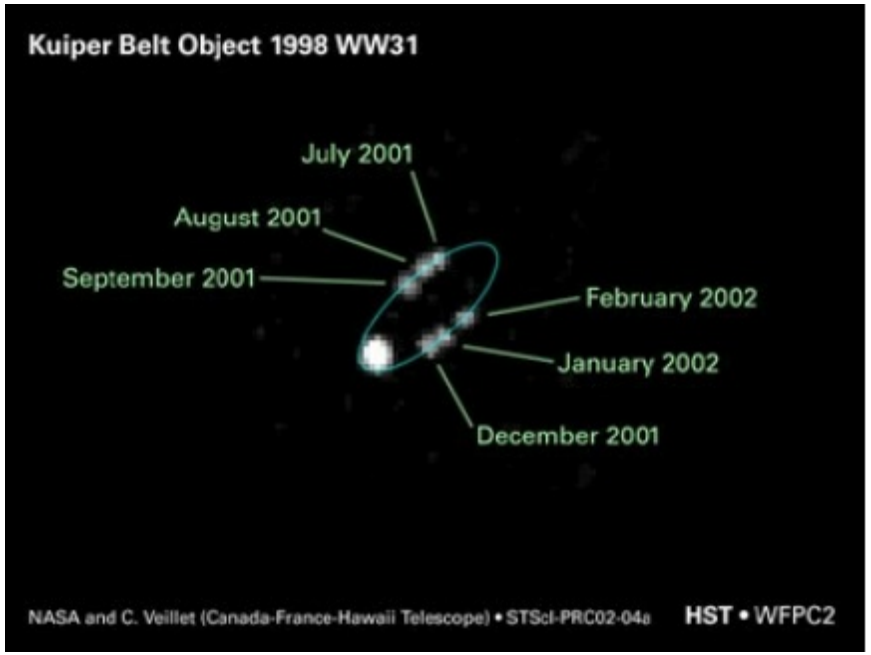



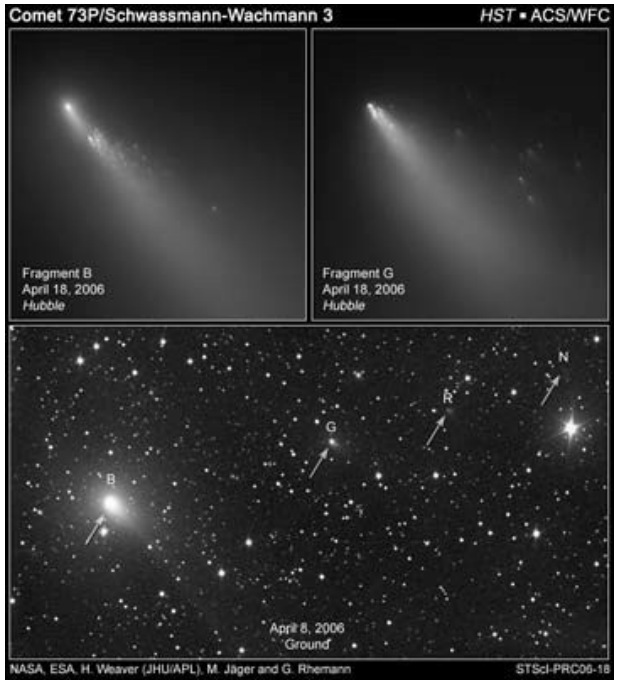
# Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

LINEAR-üstökös szétesése 2001-ben



1998 WW31 kettős kisbolygó a Kuiper-övben: az első kettős TNO (Neptunuszon túli objektum)



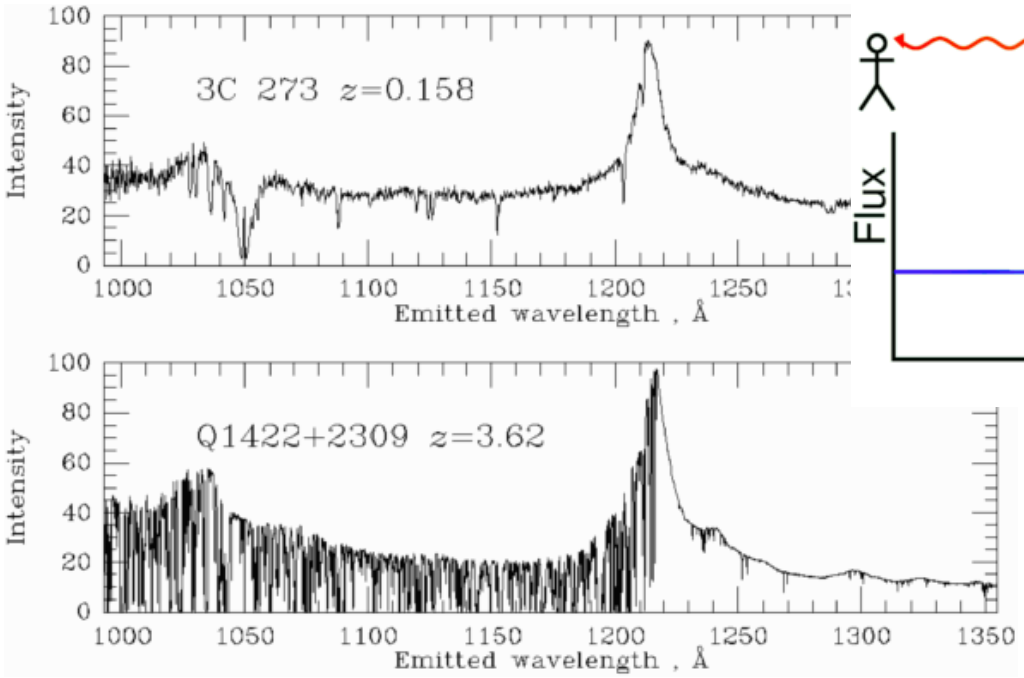



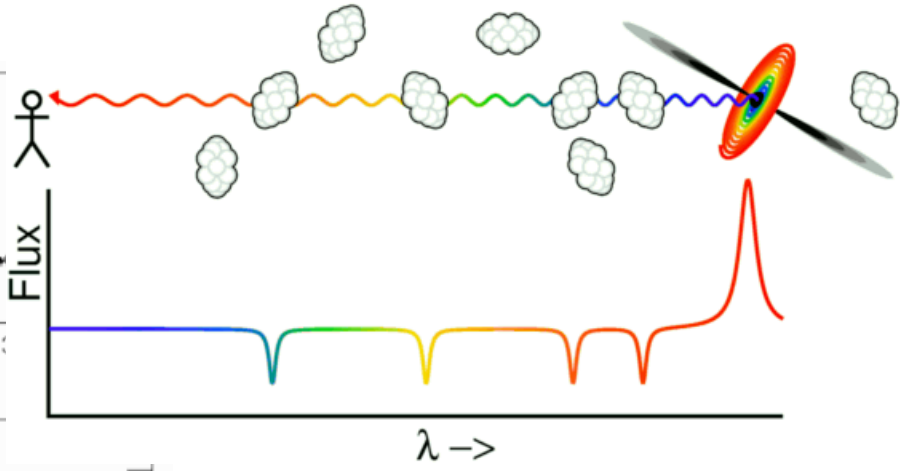

A 73P/Schwassmann–Wachmann Üstökös feldarabolódása 2006-ban. Tóth Imre a kutatócsoport tagja volt.

# A HST kulcsprojektjei

Kezdetben 3 kiemelt program: ***Key Project***. Szakmailag fontosak, és sok észlelési időt igényeltek. Más szondáknál is volt ilyen észlelési politika.

- Az intergalaktikus anyag vizsgálata ***kvazárok*** színképében levő abszorpciós vonalak alapján (galaxisok és galaxishalmazok gázkomponense is);

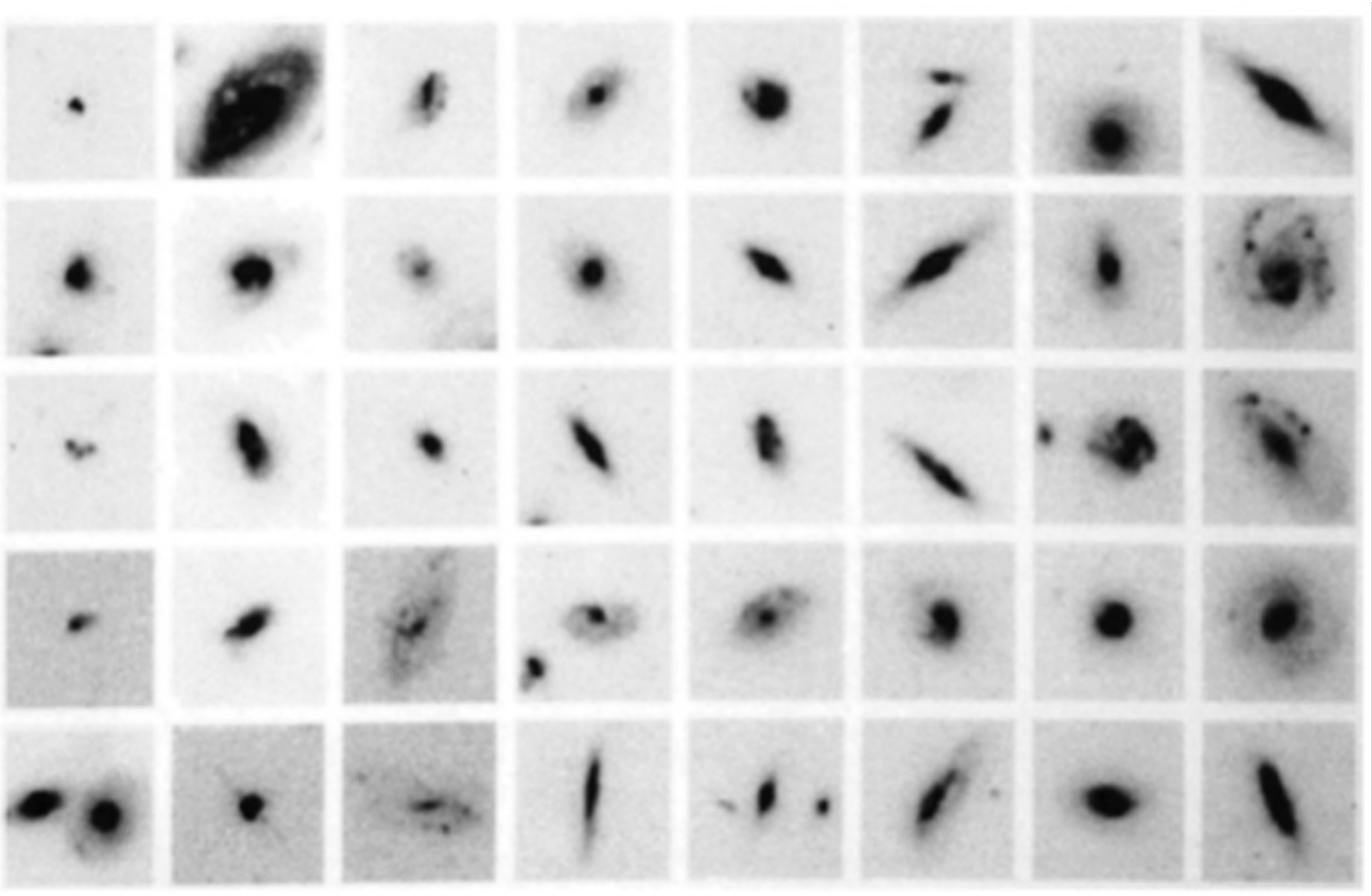


# A HST kulcsprojektjei

- ***Medium Deep Survey:*** a mélyvizsgálatok előőrse; a WF-kamerával, amíg a többi műszer éppen mást mér (parallel mező);

A Cl 0939+4713 jelű galaxishalmaz néhány galaxisának képe a Medium Deep Survey során készített felvételen.



# A HST kulcsprojektjei

- A ***Hubble-állandó*** meghatározása legalább 10% pontosan:

$H_0 = 72 \pm 3 \pm 7$ km/s/Mpc

rand. sziszt. hiba

Table 1. Numbers of Cepheid Calibrators for Secondary Methods

| Secondary Method | $\sigma$ % | N (pre–HST) | $\sigma_{mean}$ % | N (post–HST) | $\sigma_{mean}$ % |
|---|---|---|---|---|---|
| Tully-Fisher relation | ±20% [a] | 5 [b] | ±10% | 21 | ±5% |
| Type Ia supernovae | ±8% [c] | 0 | n/a | 6 [d] | ±4% |
| Surface brightness fluctuations | ±9% [e] | 1 | ±9% | 6 | ±4% |
| Fundamental plane | ±14% | 0 | n/a | 3 [f] | ±10% |
| Type II supernovae | ±12% [g] | 1 | ±12% | 4 | ±6% |

# Fontos előrelépések az ezredfordulóra

| | **1990-beli ismeret** | **a HST alapján 2000-ben** |
|---|---|---|
| Protocsillagok környezete | akkréciós korong (IR) | a korong tereli a kilövellést |
| SN 1987A | a változások követése mindvégig | |
| Hubble-állandó, az Univerzum kora | 50-100 km/s/Mpc<br>10-20 milliárd év | kb. 70 km/s/Mpc<br>12-14 milliárd év |
| Fekete lyukak | gyanították a létüket | kinematikai bizonyítékok (jó felbontással), nagyon gyakoriak |
| Kvazárok | néhány esetben ismert gazdagalaxis | nagyon gyakori a kölcsönható galaxisokban, a behulló anyag hajtja a kvazártevékenységet |
| Gravitációs lencse | 1-2 ismert példa | rengeteget ismernek, távolság-meghatározás, a galaxisok morfológiai fejlődése 1 milliárd éves kortól |

# Nagy projektek a HST-vel

***Mélyvizsgálatok*** (Deep Fields): a DDT észlelési idő terhére (HDF-N, HDF-S, UHDF, XDF). Ezeket részletesebben is tárgyaljuk.

Az ezredfordulón a nagy projektek három újabb fő típusát definiálták:
***Treasury Program***: eddig 53 projekt (19–834 keringés észlelési idővel)
***Archival Legacy Program:*** eddig 59 projekt (csak régebbi archivált adatok új vagy új szempontok szerint történő feldolgozása)
***Large Program:*** eddig 135 projekt (40–530 keringés észlelési idővel)
Céljuk a HST tudományos impaktjának fokozása, a projekt végeredménye adatbázis is lehet, nemcsak folyóiratcikk. (Van, amelyik már több száz cikket eredményezett.) A nagy adattömeg és a parallel észlelési mód nagyban segíti a projektek végrehajtását. Nagy segítség a MAST létrehozása, illetve a HST által észlelt források listáját tartalmazó Hubble Source Catalog megalkotása (2017-től a 2.1-es verzióval, a korábban összeállított Hubble Legacy Archive alapján).
Néhány kiragadott példával érzékeltetem a projektek változatosságát és monumentalitását. A teljes lista az alábbi linken érhető el:
***http://archive.stsci.edu/hst/tall.html***

# Nagy projektek a HST-vel

***Treasury Program:*** 2023-ig 53 projekt

- RELICS: Reionization Lensing Cluster Survey (190 keringés);
  https://relics.stsci.edu ; https://archive.stsci.edu/prepds/relics
- The GOODS UV Legacy Fields: a Full Census of Faint Star Forming Galaxies at *z*~0.5-2 (132 +132 keringés);
  http://www.astro.yale.edu/hduv ; https://archive.stsci.edu/prepds/hduv
- LEGUS: Legacy ExtraGalactic UV Survey (154 + 154 keringés);
  http://legus.stsci.edu ; https://archive.stsci.edu/prepds/legus
- Advanced Spectral Library II: Hot Stars (230 keringés);
  http://casa.colorado.edu/~*ayres/ASTRAL*;
  https://archive.stsci.edu/prepds/astral
- Through a Lens Darkly – New Constraints on the Fundamental Components of Cosmos (474 + 474 keringés); http://www.stsci.edu/~*postman/CLASH* ; https://archive.stsci.edu/prepds/clash
- Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey – GOODS-South Field, Non-SNe-Searched Visits (795+793 keringés);
  http://candels.ucolick.org ; https://archive.stsci.edu/prepds/candels

# Nagy projektek a HST-vel

Példák Treasury Programokra (folytatás)

- A Panchromatic Hubble Andromeda Treasury - I (834+834 keringés);
  https://www.astro.washington.edu/groups/phat/Home.html;
  https://archive.stsci.edu/prepds/phat
- ACS Nearby Galaxy Survey (218+295 keringés);
  http://www.nearbygalaxies.org/dashboard/home;
  https://archive.stsci.edu/prepds/angst
- An ACS Survey of Galactic Globular Clusters (134 keringés);
  http://astro.ufl.edu/~*ata/public_hstgc*;
  https://archive.stsci.edu/prepds/astggct
- The COSMOS 2-Degree ACS Survey (590 keringés);
  http://cosmos.astro.caltech.edu/;
  https://archive.stsci.edu/prepds/cosmos
- The Great Observatories Origins Deep Survey: Imaging with ACS (398 keringés);
  http://www.stsci.edu/science/goods;
  https://archive.stsci.edu/prepds/goods

# Nagy projektek a HST-vel

***Archival Legacy Program:*** 2023-ig 59 projekt, csak archivált adatokra építve. Általában kevés cikk született ezekből a programokból.

- Maximizing the Impact of CANDELS: Rest-frame Optical Spectroscopy of 2000 Galaxies at 1.4
- High level science products from deep ACS and WFC3/IR imaging over the CDF-S/GOODS-S region; http://archive.stsci.edu/prepds/hlf
- An Astrostatistical Approach to Distant Galaxy Morphology
  Exoplanet Search in the HST NICMOS coronagraphic archive; http://archive.stsci.edu/prepds/alice
- Restoring the POS mode Astrometric Precision of FGS-1r and a Definitive Velocity Dispersion for M35
- The Planet Pipeline: data curation and a mining of Solar System images; http://archive.stsci.edu/prepds/planetpipeline
- A Legacy Archive PSF Library and Circumstellar Environments [LAPLACE] Investigation; http://archive.stsci.edu/prepds/laplace
- A New Approach in Studying AGN Intrinsic Absorbers
- Star Formation Histories of Local Group Galaxies

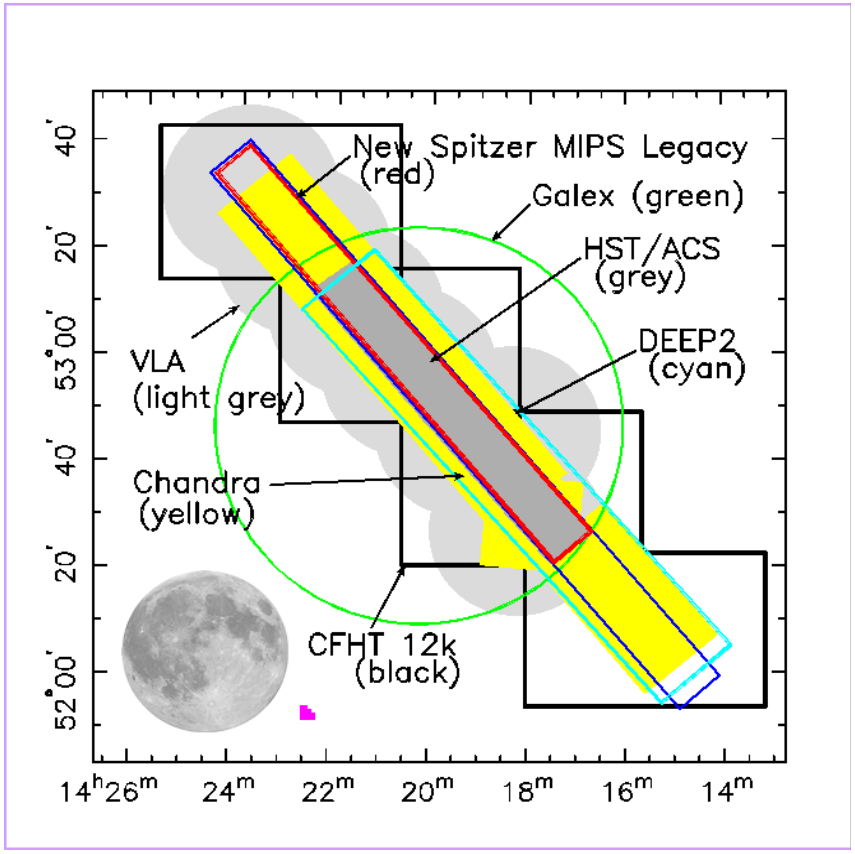
# Nagy projektek a HST-vel

***Large Program:*** 2023-ig 135 projekt

- The Atmospheric Structure of Giant Hot Exoplanets (115 keringés)
- Galaxies at *z* ~ 7-10 in the Reionization Epoch: Luminosity Functions from Deep IR Imaging of the HUDF and HUDF05 fields (193+192 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/hudf09
- Panchromatic WFC3 survey of galaxies at intermediate *z*: Early Release Science program for Wide Field Camera 3 (214 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/wfc3erc
- Comprehensive Auroral Imaging of Jupiter and Saturn during the International Heliophysical Year (128 keringés)
- The Formation History of Andromeda's Extended Metal-Poor Halo (128 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/andromeda
- Searching for galaxies at *z*>6.5 in the Hubble Ultra Deep Field (204+204 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/udf05
- The Grism-ACS Program for Extragalactic Science [GRAPES] (40 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/grapes
- The Size Distribution of Kuiper Belt Bodies (125 keringés); http://archive.stsci.edu/prepds/tno

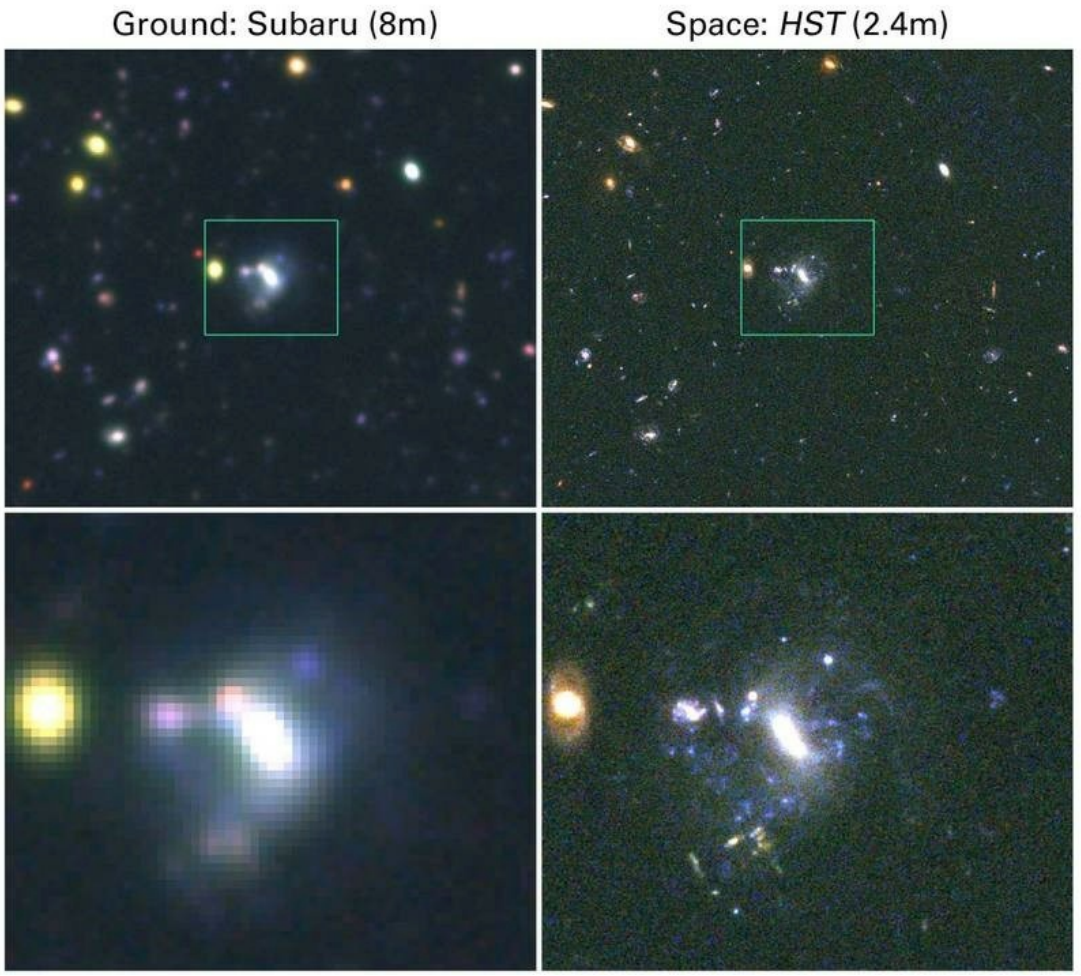
# Nagy projektek a HST-vel

AEGIS: All-wavelength Extended Groth Strip International Survey (UMa).
5 éven át rádiótól röntgenig 2 teleholdnyi terület észlelése.
TNO-search field a Neptunuszon túli objektumok keresésére.
GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey (HDF-N és CDF-S-hez illesztve).



# Nagy projektek a HST-vel

GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey (a HDF-N és a CDF-S mezőkre).

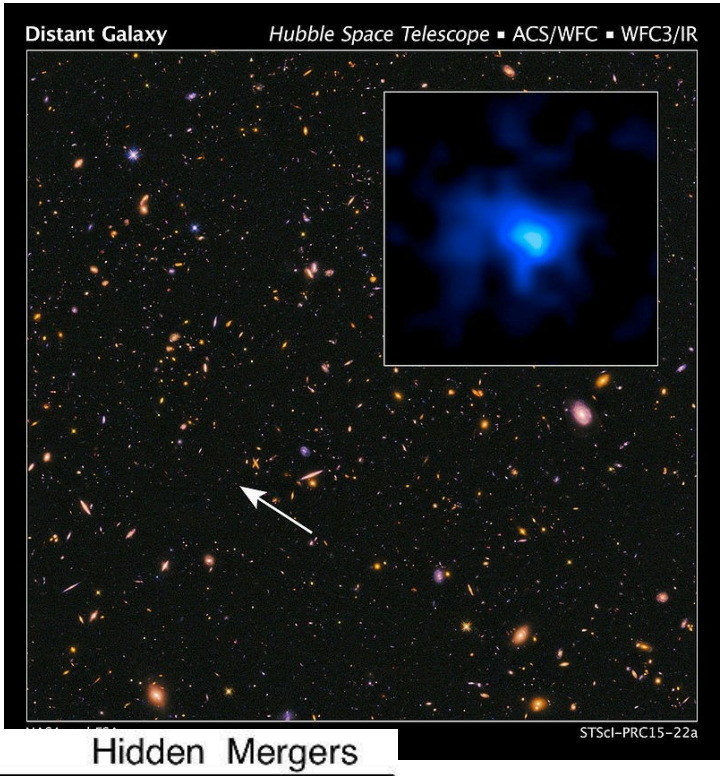


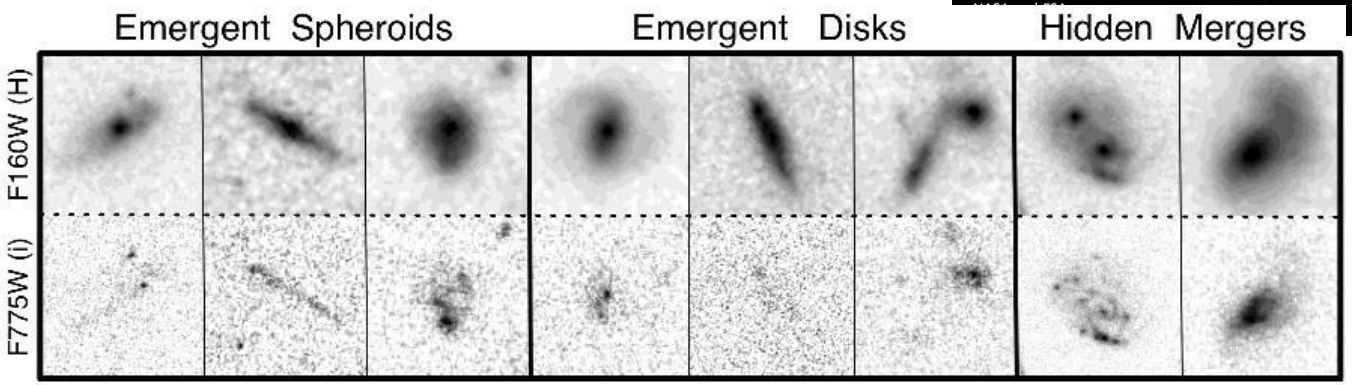
# Nagy projektek a HST-vel

**Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey**: a HST eddigi legnagyobb projektje (902 keringés); 2010 és 2013 között hajtották végre a méréseket a WFC3-mal (IR) és az ACS-sel (opt.). Célja a távoli univerzum és a sötét energia vizsgálata.

Lent: egymás alatt a közeli-IR és optikai képek ugyanazokról a galaxisokról.

Jobbra: egy nagyon távoli galaxis ($z$ = 7,7).



# Nagy projektek a HST-vel

**Hubble Legacy Field** (HLF): archív projekt, a déli GOODS régió kiterjesztése. 186474 objektum fotometriai analízise 0,2 és 1,6 μm között.

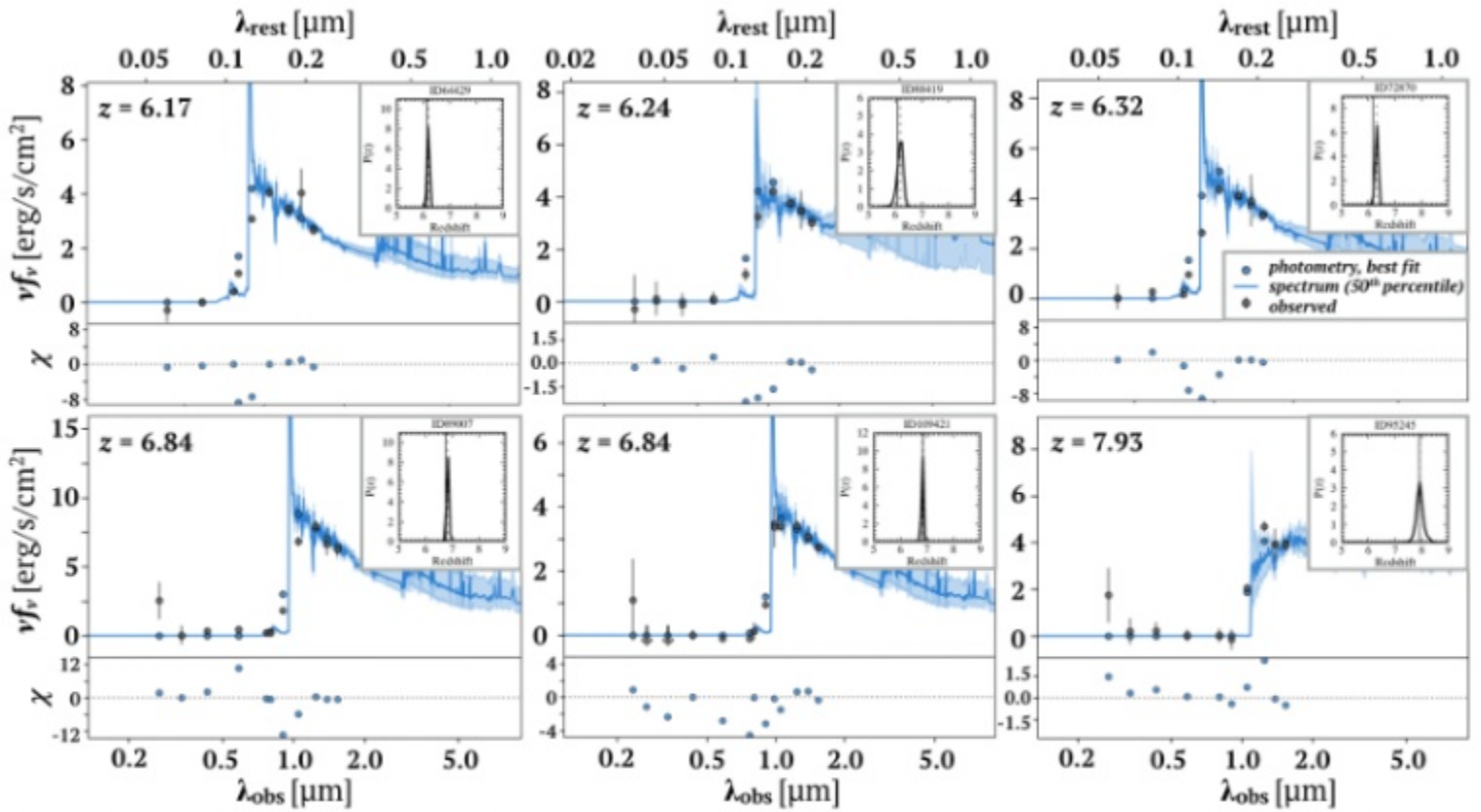



FIG. 22.— Spectral energy distributions for six galaxies at $z>6$, with observed photometry (grey) and the best-fit model (blue). inset panels shows the photometric redshift probability distribution for each target, all with single, well-defined solutions.

# Nagy projektek a HST-vel

**Hubble Deep UV Legacy Survey** (132 keringés): a korábbi GOODS/CANDELS mély-vizsgálati mezők kiterjesztése az UV-sávra (WFC3/UVIS). Területe 100 négyzetívperc.

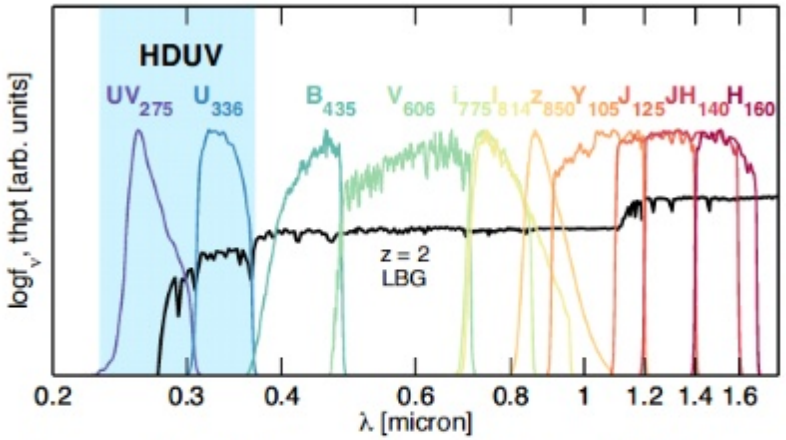



FIG. 1.— The *HST* imaging filter set in the two HDUV survey fields. Combining the data of the two workhorse cameras on *HST*, WFC3 and ACS, these fields are now covered with 11-band data spanning a wavelength range from $\sim 0.25 - 1.7$ $\mu$m at excellent spatial resolution of 100-160 mas. The black line represents the spectrum of a typical Lyman break galaxy at $z = 2$, which can be selected thanks to the HDUV data.

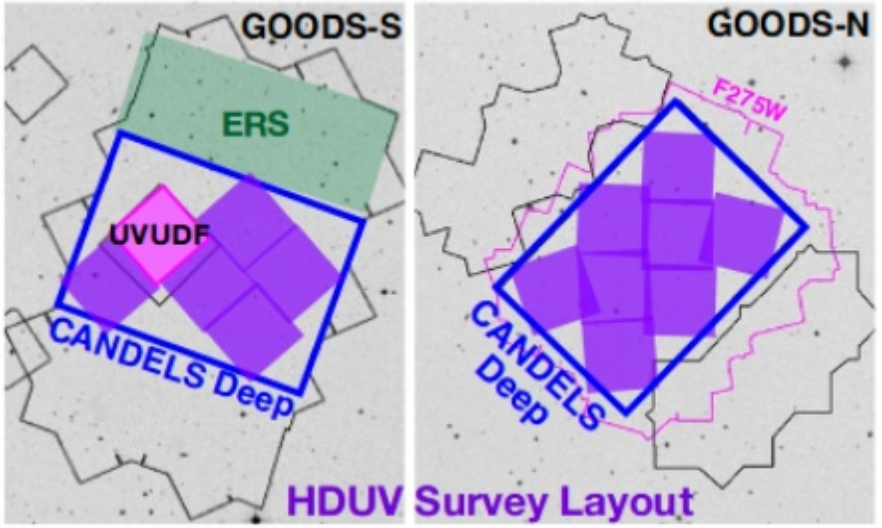



FIG. 2.— Layout of the HDUV Survey with respect to previous datasets in the GOODS-South (left) and -North (right) fields. The HDUV was designed to optimally build on and extend the pre-existing data to provide deep F275W and F336W imaging over most of the CANDELS-Deep area (blue outline). In GOODS-S, the HDUV covers 5 pointings around the UVUDF (pink). A larger area (8 pointings) could be covered in GOODS-N making use of the CVZ and building on the limited, pre-existing F275W imaging from the CANDELS survey. When combined with the UVUDF, the total area of WFC3/UVIS imaging in these two fields spans $\sim 100$ arcmin$^2$ to a depth of 10 and 8 orbits or deeper in the two filters, respectively, reaching 27.5-28.0 mag at $5\sigma$. The data release described here includes the F275W images from the CANDELS survey in GOODS-N.

# Nagy projektek a HST-vel

Képalkotás halvány csillagképző galaxisokról 27,5-28,0 magnitúdós határfényességig az $1 < z < 3$ tartományban.

HDUV SUMMARY

| | HDUV-South | HDUV-North |
|---|---|---|
| R.A. | 03h 32m | 12h 37m |
| Dec. | −27° 48′ | 62° 14′ |
| Pixels | 17500×19700 | 20480×20480 |
| | F275W | |
| Area | 43.4 arcmin$^2$ | 56.5 arcmin$^2$ (39.1 arcmin$^2$)* |
| Exposure Time† | 10.1 orbits | 10.5 orbits (3.8 orbits)** |
| Depth | 27.6 mag | 27.4 mag |
| FWHM | 108 mas | 96 mas |
| | F336W | |
| Area | 43.4 arcmin$^2$ | 56.5 arcmin$^2$ |
| Exposure Time | 9.1 orbits | 8.4 orbits |
| Depth | 28.0 mag | 27.8 mag |
| FWHM | 91 mas | 95 mas |

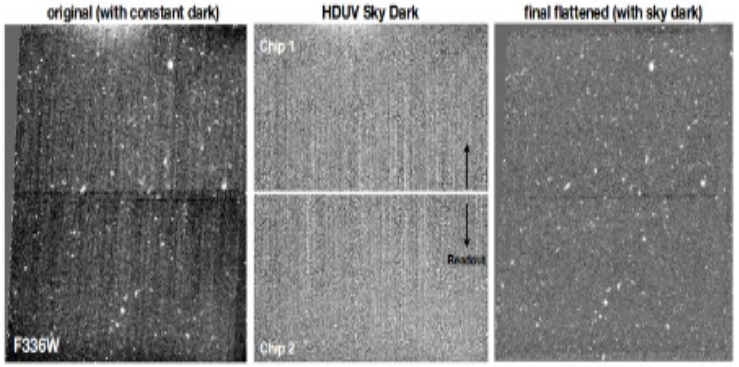
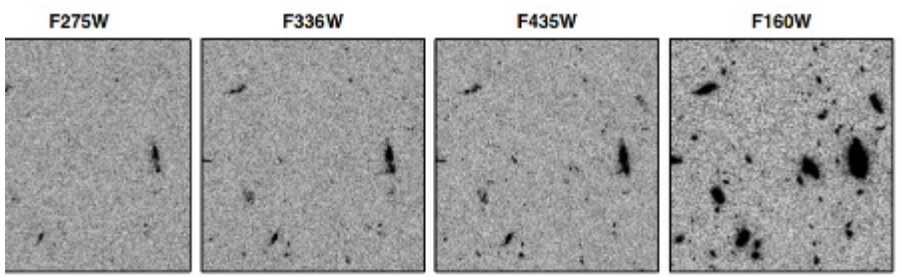


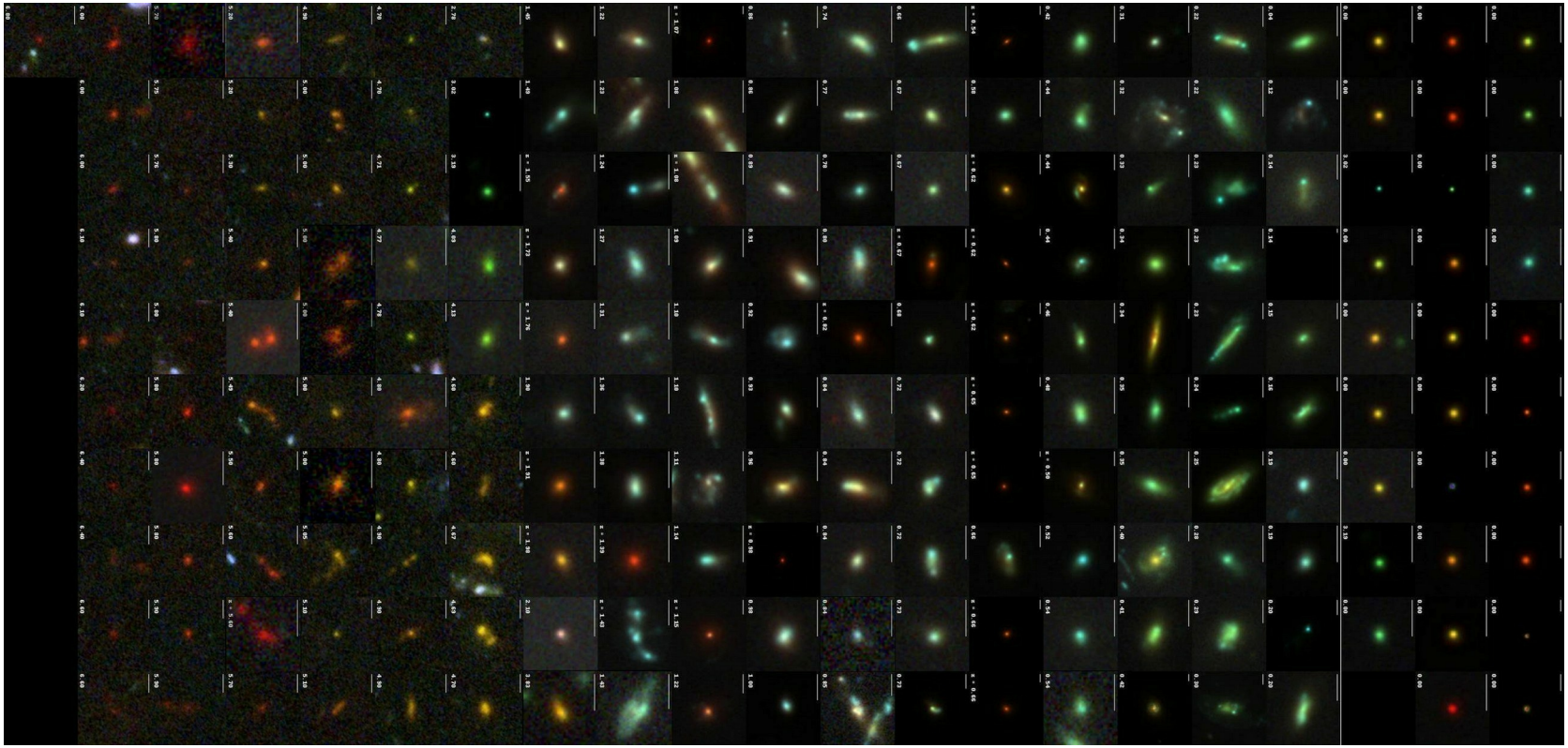

FIG. 4.— The improvement in image quality thanks to the use of a sky dark image in the HDUV data reduction. The left panel shows a single visit of F336W data drizzled using the standard dark frame. Significant residual structure is clearly visible, including severe striping along the readout direction (i.e. hot and cold columns) as well as a significant glow at the upper edge. These can be largely removed with a sky dark. The middle panel represents the corresponding sky dark image computed for the first epoch data of the HDUV in the F336W filter. Such sky dark images are computed for each filter and for the HDUV and CANDELS data separately. They are then subtracted from each corresponding frame before further processing. The right panel shows the improvement in image quality after application of the sky dark on the same F336W visit as in the left panel.




– Examples of images from the HDUV (left two panels; F275W and F336W) and ancillary data (right two panels; F435W and
n the GOODS South field. The images are 0.5 arcmin on a side. Note the flat background in the WFC3/UVIS data, which was
ved after subtraction of the sky dark. Clearly, the surface density of sources decreases to shorter wavelengths as the average
xhibits a relatively red color, and sources at $z \gtrsim 1.7$ start to disappear from the UV imaging due to the Lyman break (see Fig 1).

# Nagy projektek a HST-vel

**GRAPES (Grism ACS Program for Extragalactic Science):**
Az ultramélyvizsgálati mező galaxisainak spektrális felmérése.
40 keringést szántak rá, a $4 < z < 7$ közötti vöröseltolódású kompakt galaxisok vizsgálata a reionizációs időszak jobb megértése céljából.



# Nagy projektek a HST-vel

**COSMOS** (Cosmic Evolution Survey): NICMOS+WFPC2+ACS; 2 négyzetfok; RA=$10^h00^m$, D=$2^\circ12'$, kicsi és homogén extinkciójú, fényes rádió-, UV és röntgenforrások nélküli terület az égi egyenlítő környékén, mindenhonnan látszik ($E_{B-V}$ = 0,02 magnitúdó).

A HST addigi legnagyobb programja, két éven át az észlelési idő 10%-át fordították rá. 2005. júliusban lettek meg a HST-észlelések.

További közreműködők: VLA, VLT, Subaru, XMM-Newton, Spitzer.

Célja: a nagy skálájú szerkezet, valamint a galaxiskeletkezés, a sötét anyag és a magaktivitás közötti kapcsolat vizsgálata (a galaxisfejlődés függése a környezettől), nagy z-tartományban (0,5 és 6 között).

2 millió objektum $I_{AB}$=27 magnitúdóig, közte 35000 Lyman-break galaxis.

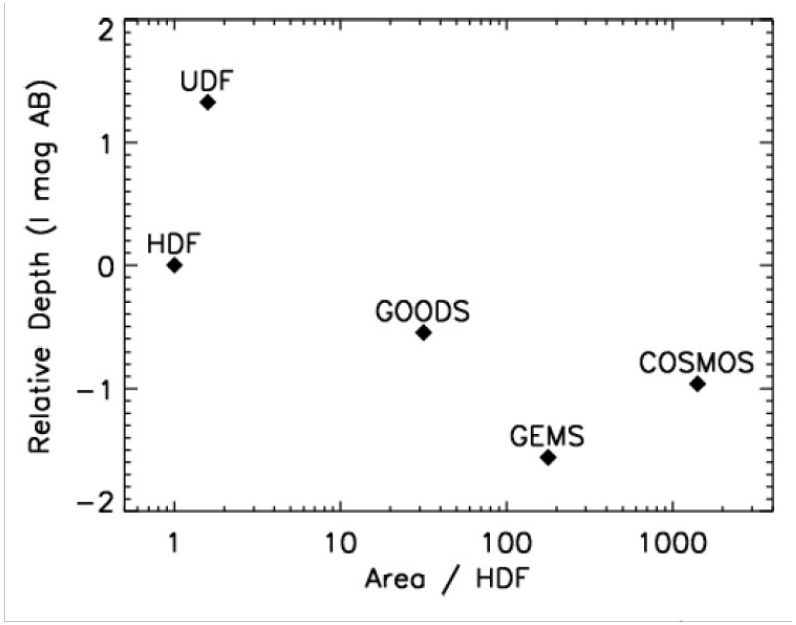
Az AB magnitúdórendszer (Oke, 1974) a spektrális fluxussűrűség alapján abszolút egységre kalibrált magnitúdó.

$m_{AB} = -2{,}5lg(f_\nu) - 48{,}60$

ahol $f_\nu$ a fluxussűrűség;

1 Jy = $10^{-26}$ W/m$^2$/Hz.

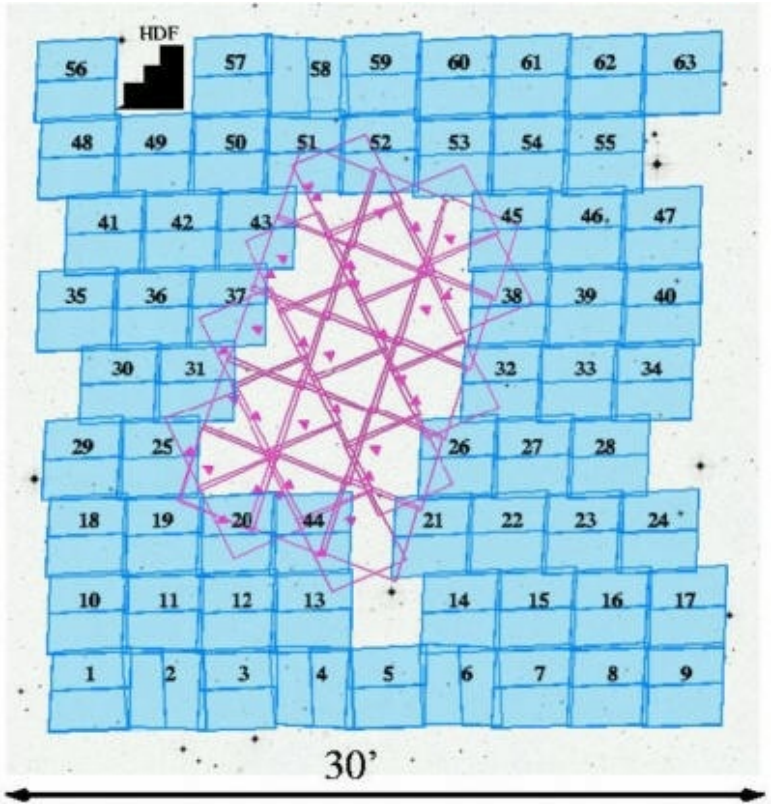
(HUDF $I_{AB}$ = 29-ig, Spitzer GOODS AB=26,6-ig 3,6 μm-en)



# Nagy projektek a HST-vel

**GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs)**: A HST-vel leképezett legnagyobb összefüggő terület (900 négyzetívperc), E-CDS (extended);
Mozaik 9×9 ACS-látómezőből; V (F606W) és Z (F850LP) szűrőkkel;
10000 vöröseltolódás és SED (350–950 nm között) a COMBO17 projektből (Classifying Objects by Medium-Band Observations); Spektrofotometria 17 szűrővel, MPIA, ESO 2,2 m + WFI; $R < 24^m$, $0{,}2 < z < 1{,}2$).

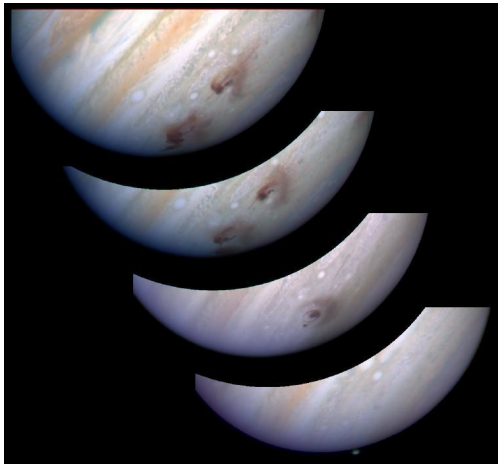
Tudományos feladatok:
- miért csengett le hamar a csillagkeletkezés $z \sim 1$ óta?;
- kölcsönhatási és összeolvadási ráta változása;
- csillagkeletkezés egyre kisebb tömegű rendszerekben;
- a galaxiskorong és bulge időbeli fejlődése (küllők fejlődése is);
- az AGN gazdagalaxisainak fejlődése az elmúlt 10 milliárd évben.

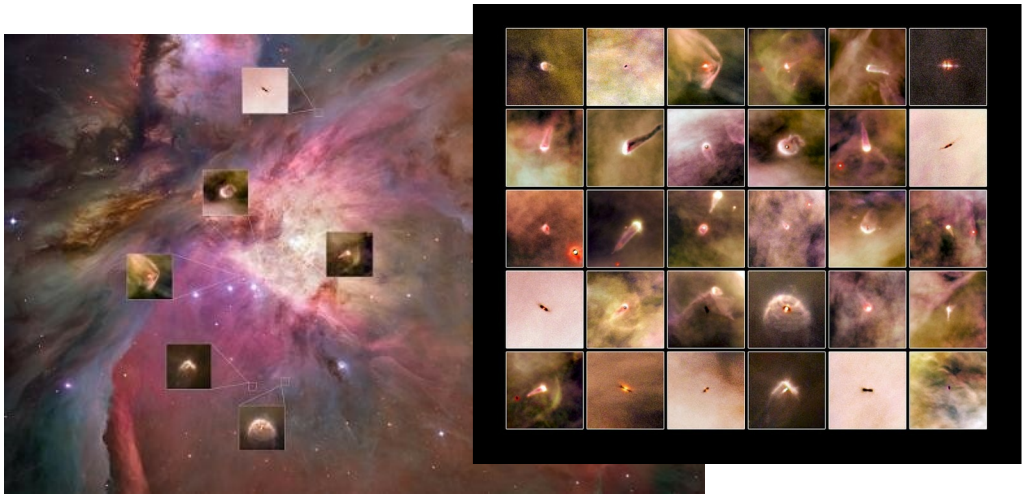


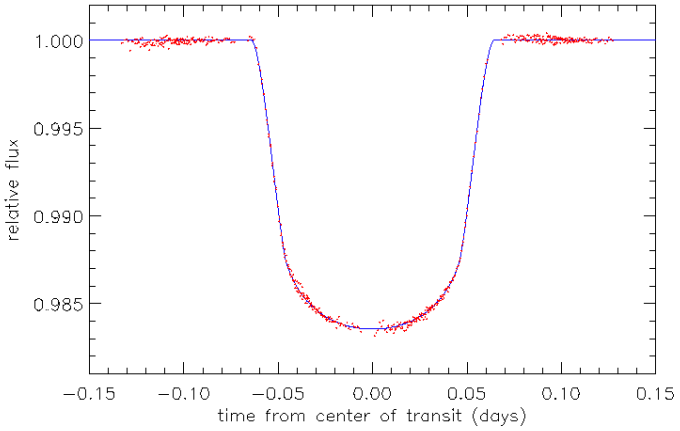
# A HST kiemelkedő eredményei

A HST 15 éves jubileumára (2005) az STScI által közölt összeállítás szerint:

1. A Shoemaker–Levy-9 üstökös Jupiterbe csapódásának megfigyelési eredményei
2. Proplidok (bolygóképződés színhelyei) észlelése
3. Exobolygók tranzitjának fénygörbéi

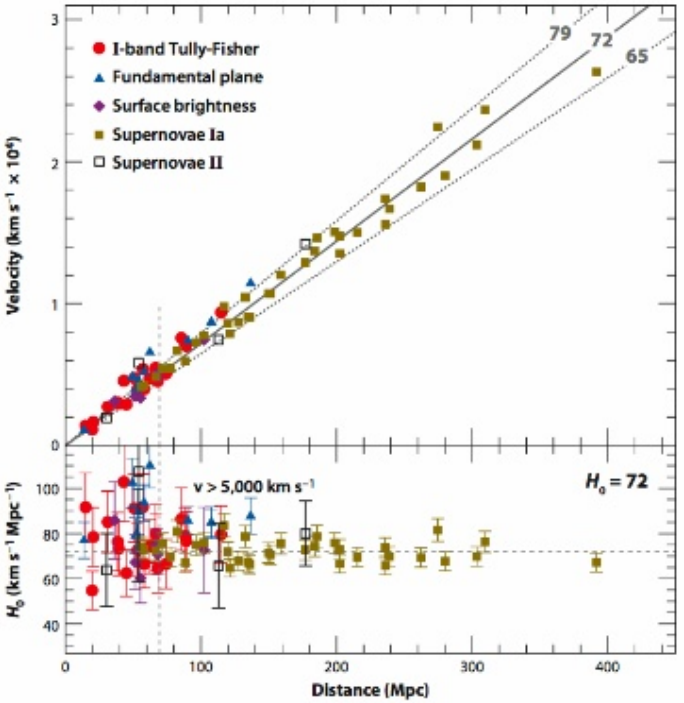


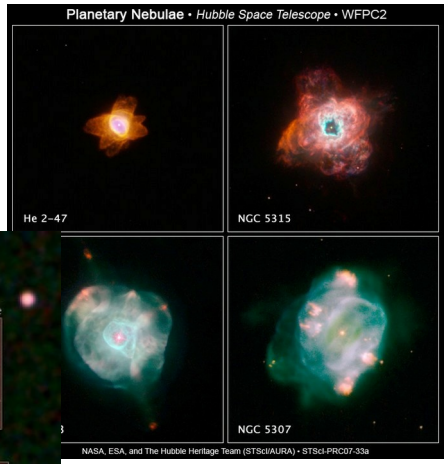


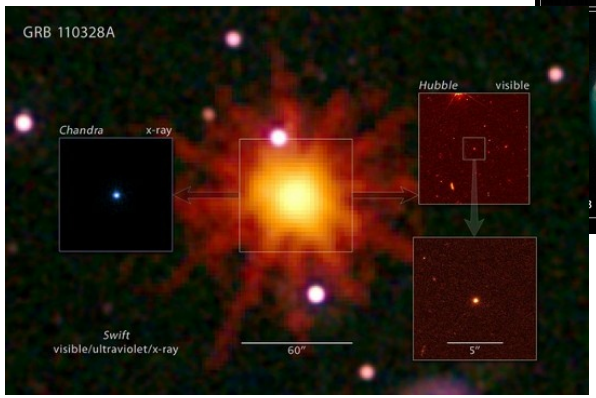


# A HST kiemelkedő eredményei

4. Csillagokból kikerült anyag vizsgálata
   – ködök finomszerkezete, SN1987A, planetáris ködök
5. Gammakitörések optikai azonosítása, gazdagalaxisok
6. Hubble-állandó a cefeidák alapján, az Univerzum kora

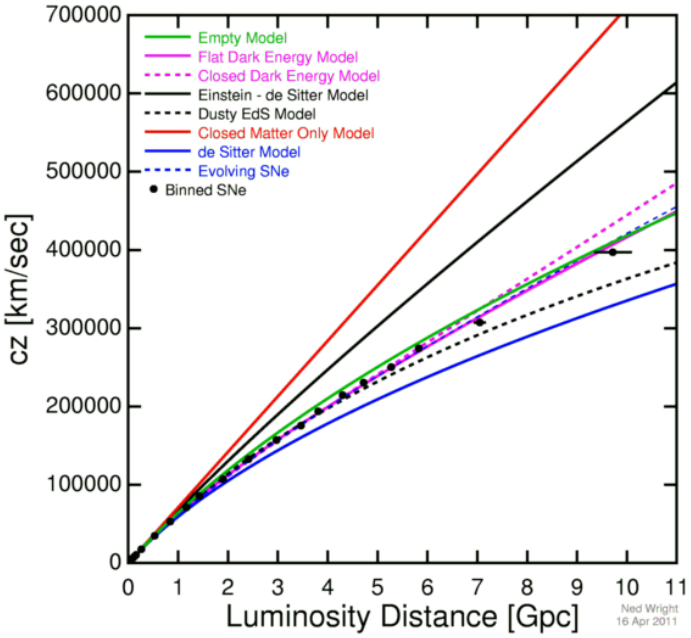


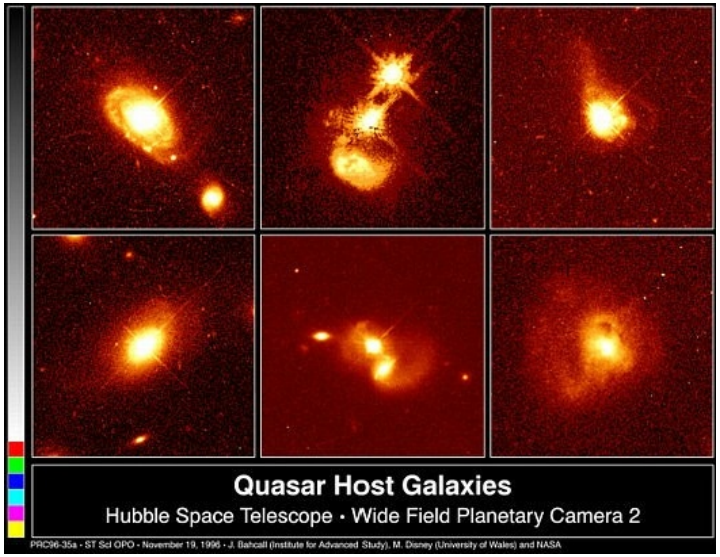



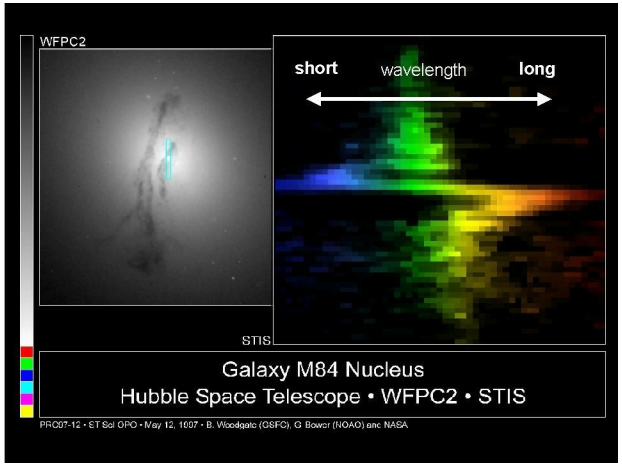



# A HST kiemelkedő eredményei

7. Kvazárok gazdagalaxisa
8. Óriási tömegű fekete lyukak minden galaxisban
9. Információ a legtávolabbi vidékekről, mélyvizsgálatok (később részletesen is lesz szó)
10. Az Univerzum gyorsuló tágulása SNIa-k alapján



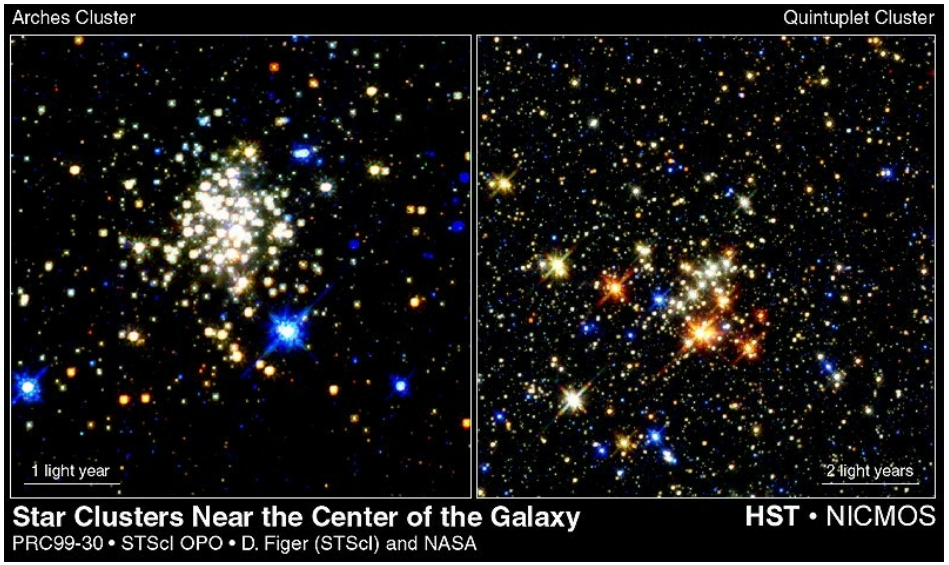
# A HST további kiemelkedő eredményei

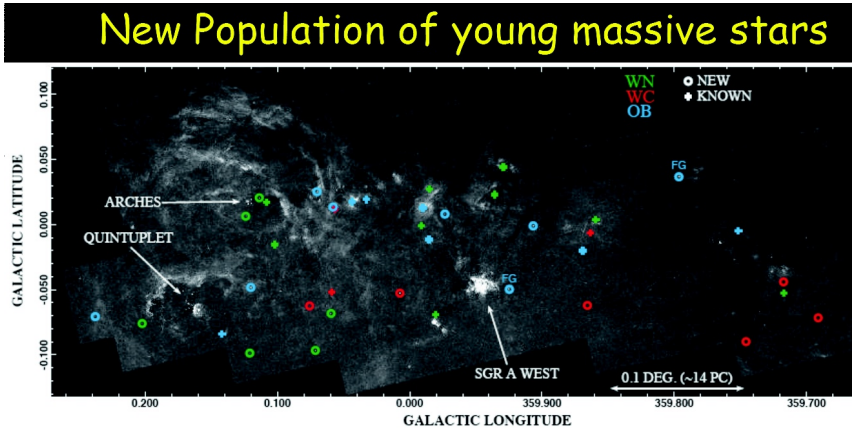
Ugyancsak nagyon fontos eredmények az első 15 évből:

Két egészen fiatal nyílthalmaz felfedezése a Tejútrendszer centrumához közel.

Az Ívek (Arches) 2 millió éves, az Ötös (Quintuplet) 4 millió éves.

Rengeteg nagy tömegű (40-50 naptömegnél nagyobb) csillag van mindkettőben. Több, mint ahányat addig a Tejútrendszerben ismertek!



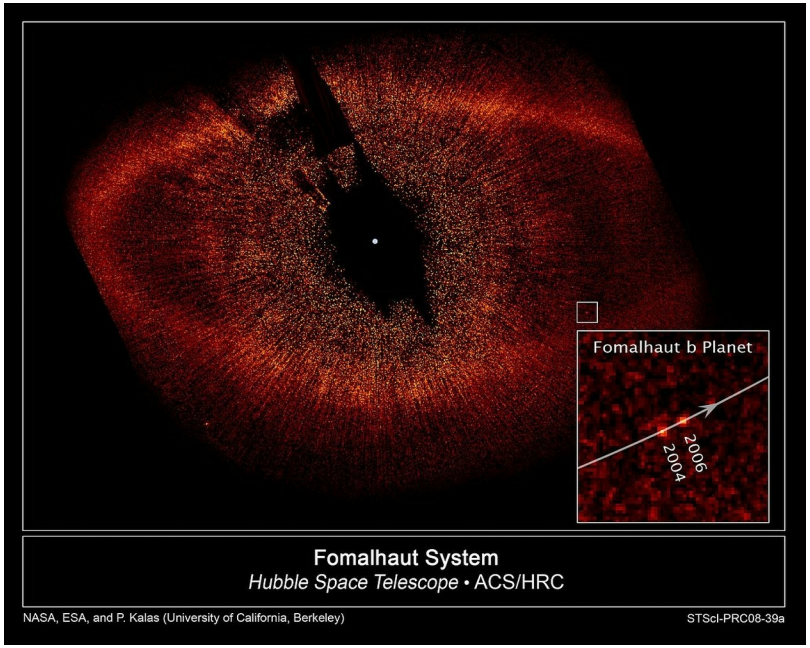
# A HST további kiemelkedő eredményei

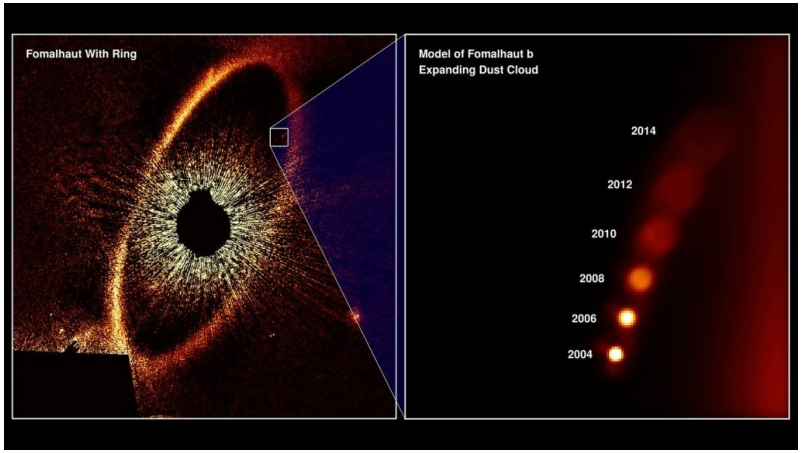
Bolygó (?) közvetlen detektálása a Fomalhaut mellett.

A Fomalhaut ($\alpha$ PsA) 25 fényévre levő, A3V típusú csillag, százmillió éves.

A körülötte levő porkorongot az IRAS fedezte fel. A porgyűrű éles pereme és a korong aszimmetriája egyaránt bolygó(k) létére utal. A HST-vel 2008-ban detektálták (koronográf üzemmódban).

A csillagtól 119 CSE távol kering 872 év periódussal. Tömege 0,3-2 jupitertömeg, de ehhez képest túl fényes, és 2 év alatt fél magnitúdót változott a fényessége. Gyaníthatóan gyűrűrendszere van, és abban dinamikus folyamatok zajlanak, nem bolygó látszik.



# Hubble-mélyvizsgálatok

A kijavított leképezéssel érdekes halvány galaxisok látszanak. Kis szögméretűek, morfológiájuk a Földről nem vizsgálható. Robert Williams, az STScI igazgatója a DDT műszeridő egy részéből mélyvizsgálatot kezdeményezett.

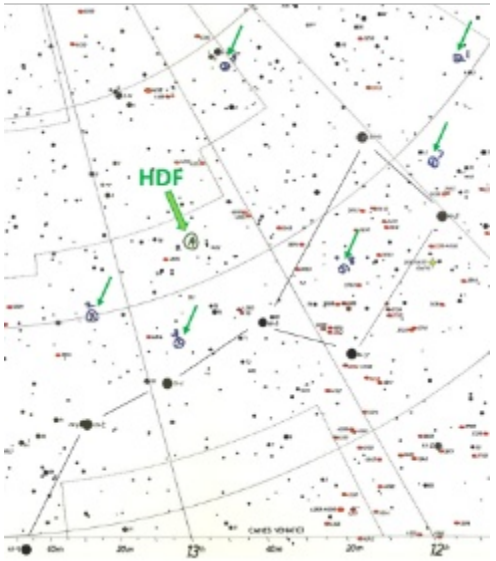
Ezek a legtávolabbra néző képek: V=30$^{m}$-ig tűnnek elő a galaxisok. Százszor annyi galaxis látszik, mint ahány előtércsillag.

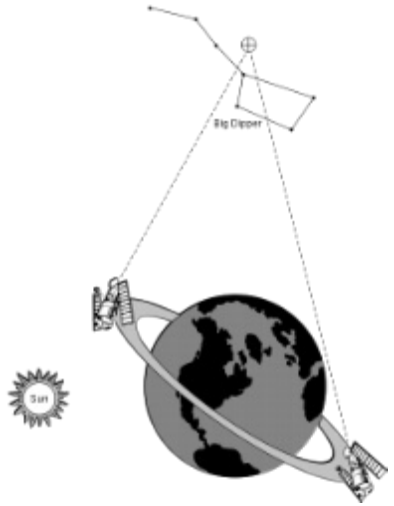
Deep field = mélyvizsgálat: konkrét térség minél részletesebb vizsgálata. Cél: kozmológiai következtetések megfigyelések alapján (primordiális sűrűségfluktuációk, sötét anyag a galaxisok és galaxishalmazok halójában, galaxisok kölcsönhatása).

Kiválasztási szempontok: fényes csillag és közeli galaxis nélküli mező legyen kis elnyeléssel az adott irányban, folyamatos észlelési lehetőséggel.

1995. dec.18–28.; HDF-N: RA = 12$^{h}$ 36$^{m}$ 49,4$^{s}$; DEC =+62° 12′ 58′′ (J2000); UMa, 342 exp.

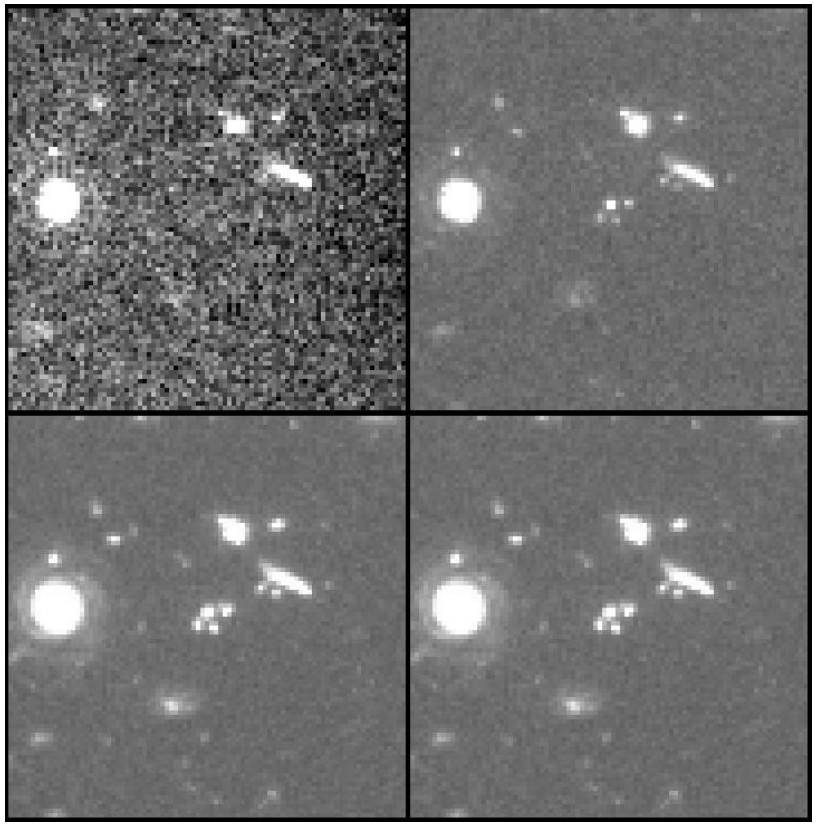
1998. okt. (10 nap); HDF-S: RA = 22$^{h}$ 32$^{m}$ 56,2$^{s}$ DEC =-60° 33′ 03′′ (J2000); Tuc

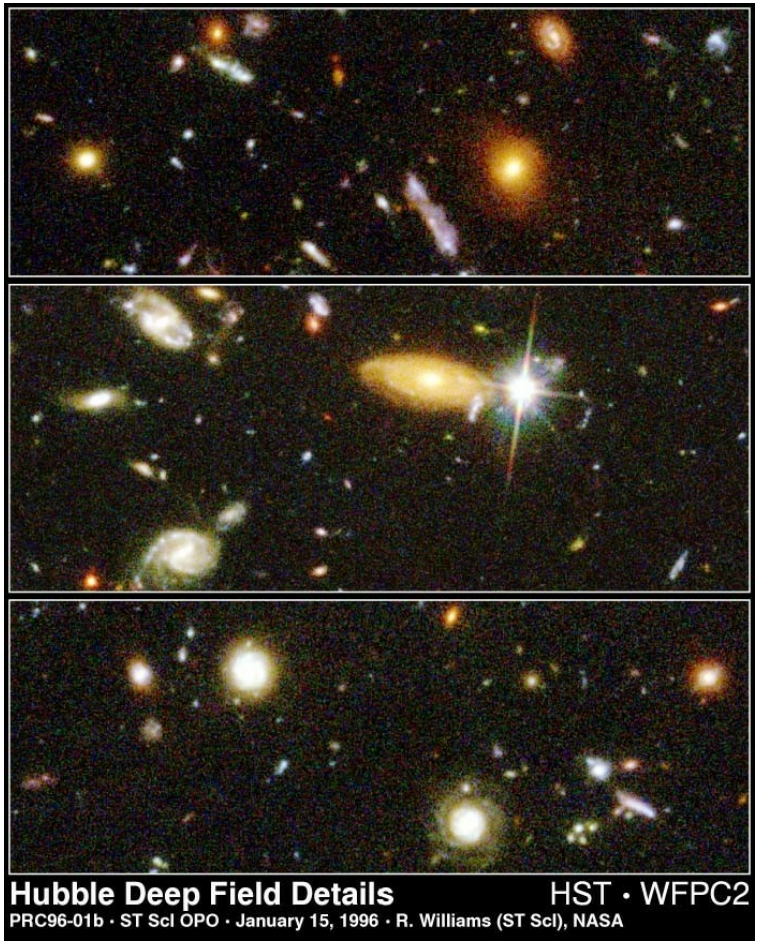


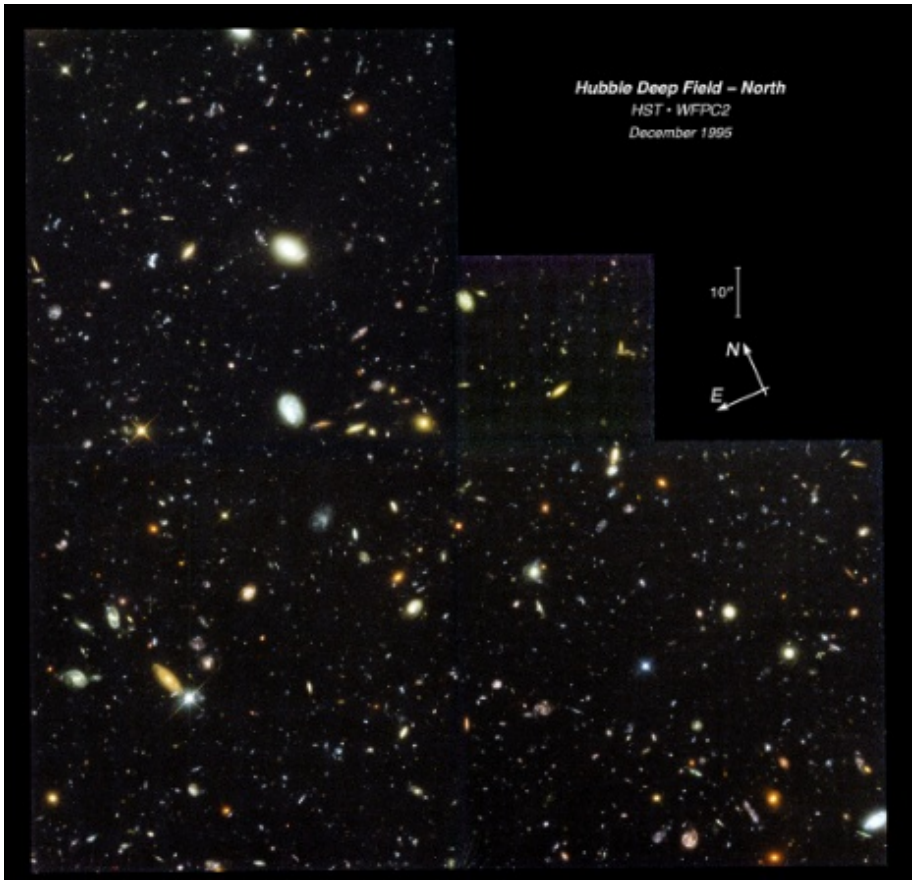
# HDF-N

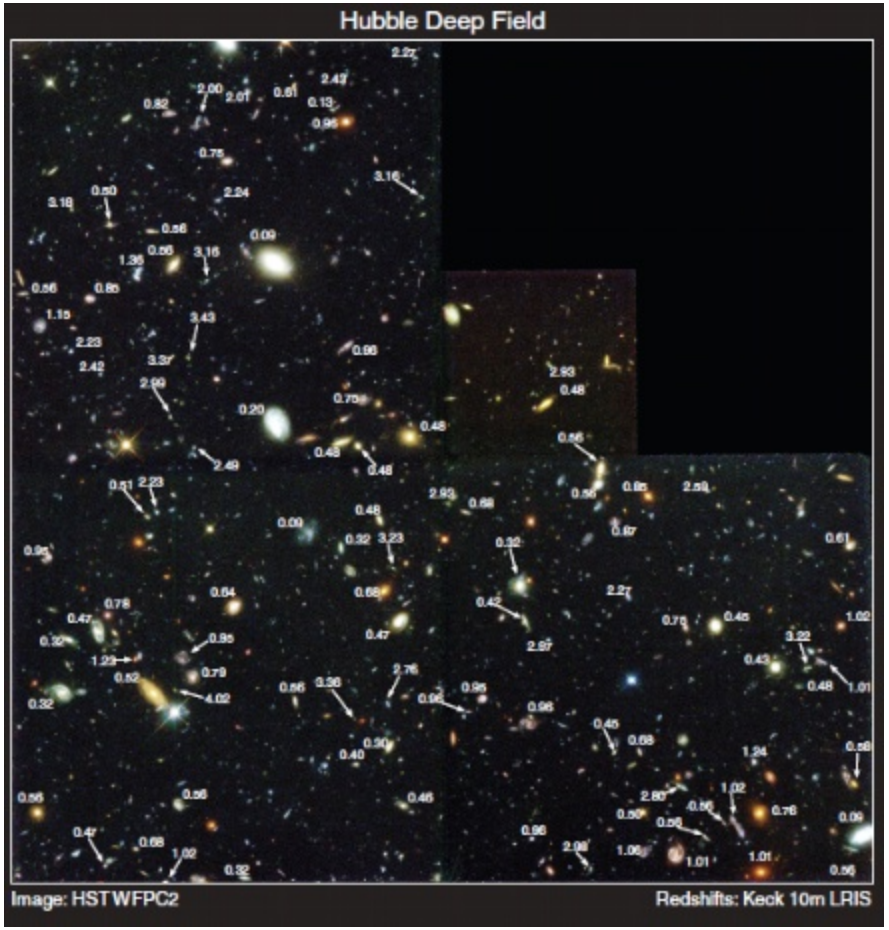
A WFPC2-vel 3 ívperc oldalélű terület 300, 450, 606 és 814 nm-es sávokban.





# HDF-N

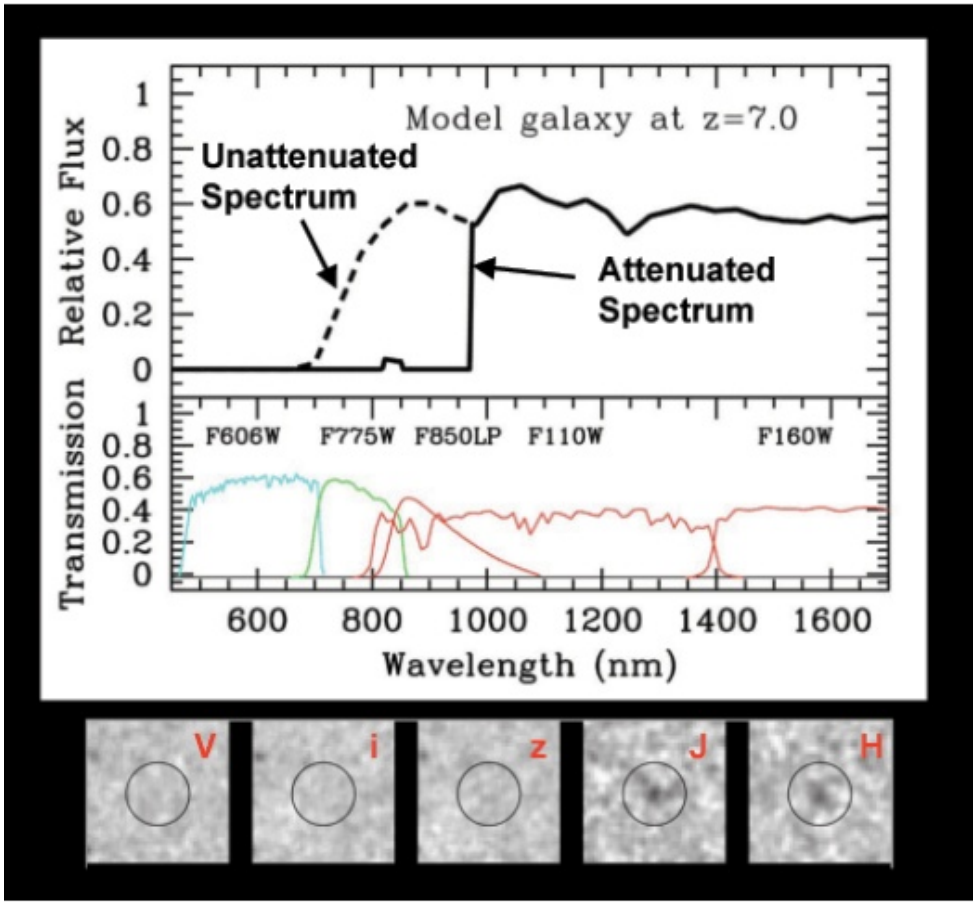



A jobb oldali képen a spektroszkópiai vöröseltolódás is fel van tüntetve.

# HDF

Lyman-alfa-erdő. Színinformáció és a Lyman-ugrás alapján meghatározható a fotometrikus vöröseltolódás (a példa nem a mélyvizsgálati mezőből való).

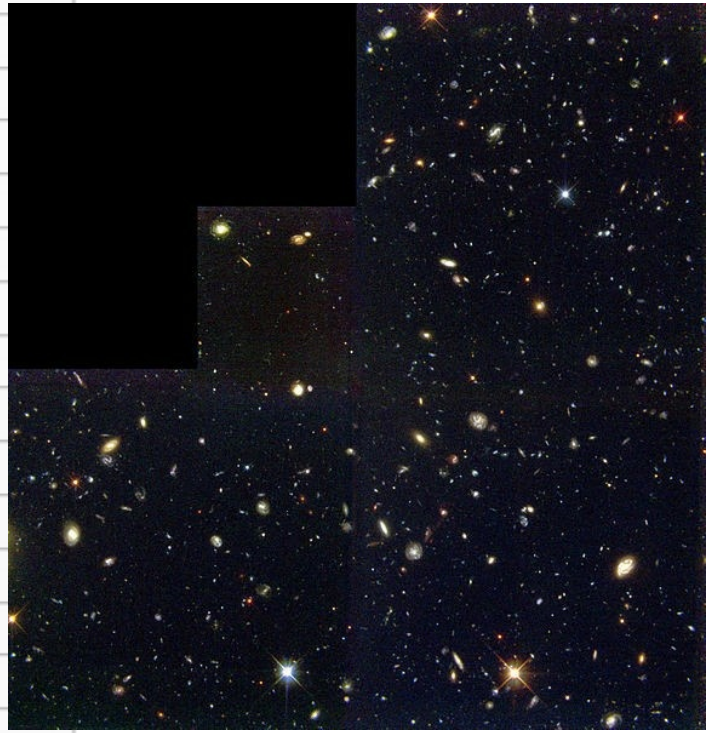


# HDF-S

NICMOS: 1,1 és 1,6 nm + WFPC2. A kép közepén a QSO J2233-606 kvazár. Kozmológiai jelentősége: mindkét irányban azonos viselkedésű galaxisok.

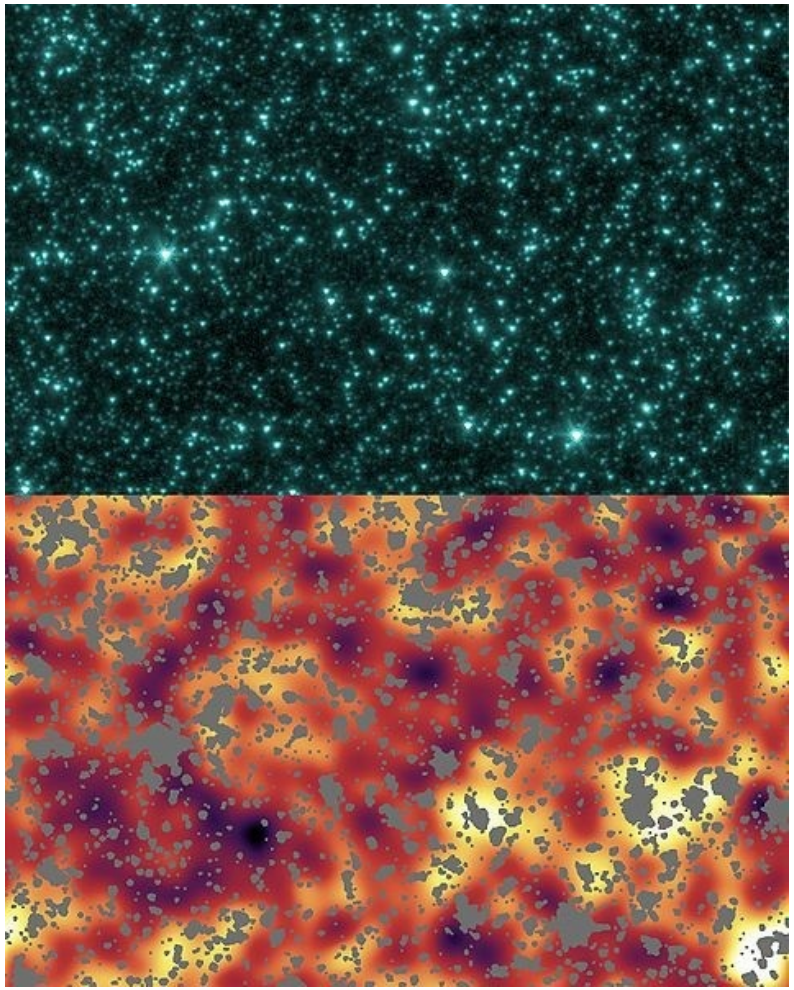
**Observations made of the HDF-S with the HST.**[3]

| Camera | Filter | Wavelength | Total exposure time | Exposures |
|---|---|---|---|---|
| WFPC2 | F300W | 300 nm (U-band) | 140,400 s | 106 |
| WFPC2 | F450W | 450 nm (B-band) | 103,500 s | 67 |
| WFPC2 | F606W | 606 nm (V-band) | 99,300 s | 53 |
| WFPC2 | F814W | 814 nm (I-band) | 113,900 s | 57 |
| NICMOS NIC3 | F110W | 110 nm (J-band) | 162,600 s | 142 |
| NICMOS NIC3 | F160W | 160 nm (H-band) | 171,200 s | 150 |
| NICMOS NIC3 | F222M | 222 mm (K-band) | 105,000 s | 102 |
| STIS | 50CCD | 350–950 nm | 155,600 s | 67 |
| STIS | F28X50LP | 550–960 nm | 49,800 s | 64 |
| STIS | MIRFUV | 150–170 nm | 52,100 s | 25 |
| STIS | MIRNUV | 160–320 nm | 22,600 s | 12 |
| Spectroscopy | G430M | 302.2–356.6 nm | 57,100 s | 61 |
| Spectroscopy | G140L | 115–173 nm | 18,500 s | 8 |
| Spectroscopy | E230M | 227.8–312 nm | 151,100 s | 69 |
| Spectroscopy | G230L | 157–318 nm | 18,400 s | 12 |



# HDF-S

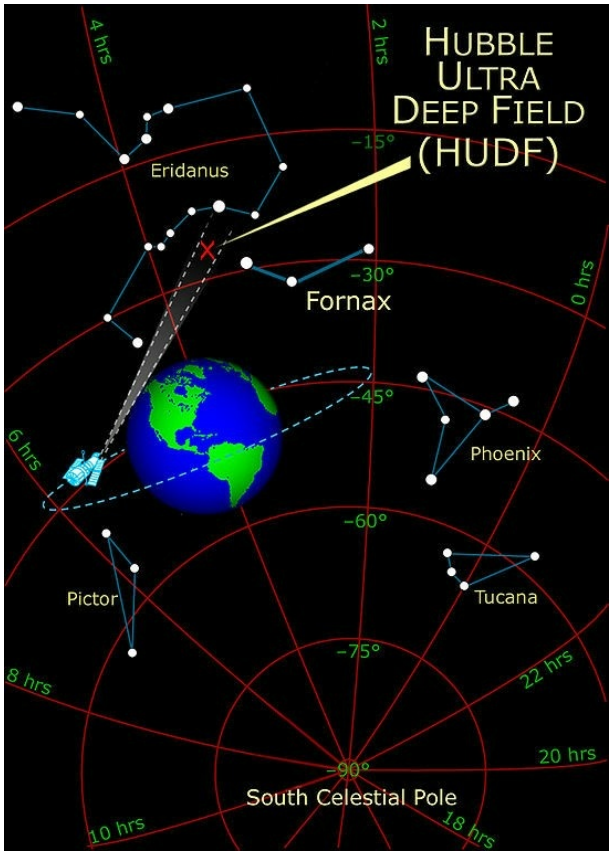
További vizsgálatok más hullámhosszakon.
A HDF-S területén 500 rádiógalaxis (3–20 cm hullámhossztartomány).
Optikai és rádióluminozitásuk aránya szerint nem hagyományos csillagontó vagy rádióhangos galaxisok, hanem a lokális Univerzumban ritka galaxisok nagy rádió/optikai luminozitásaránnyal.
Ha csillagkeletkezés okozza, akkor IR-ben még nagyobb a luminozitásuk, mint az ULIRG galaxisoké (Arp 220).
Az STIS-sel 160–240 nm között vizsgálták az intenzitáslefutást: a csillagkeletkezés inkább nyugodt, mint robbanásszerű/epizodikus folyamat.



A HDF-S Spitzer-képe

# A HST ultramélyvizsgálata

Hubble Ultra-Deep Field: 2003. IX – 2004. I.
RA =$3^h$ $32^m$ $39^s$; DEC = -27°47′29′′ (J2000);
Fornax, hogy mindkét félgömbről észlelhető legyen (nem a CVZ-ben).
11 négyzetívperc terület, 1 millió s expozíciós idő.
ACS 435, 606, 775, 850 nm (a GOODS-mintával egyeztetve). 2009. aug.-szept.: IR-bővítés WFC3-mal, 3 IR-szűrővel.
Kb. 10000 halvány, vörös galaxis látszik $z$ = 3 és 7 között, félmilliárd évvel az ősrobbanás utánig visszatekintve (van $z$ = 12 vöröseltolódású is).

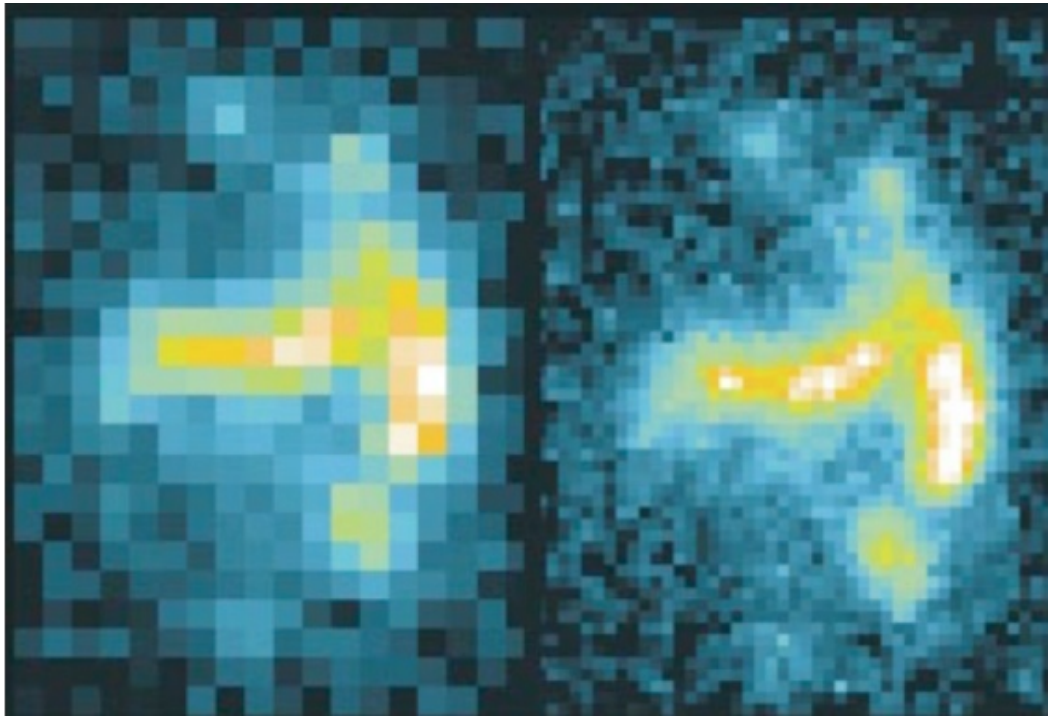



| Camera | Filter | Wavelength | Exposure time |
|---|---|---|---|
| WFC3 | F105W | 1050 nm ± 150 | 16 orbits, 14 usable |
| WFC3 | F125W | 1250 nm ± 150 | 16 orbits |
| WFC3 | F160W | 1600 nm ± 150 | 28 orbits |

| Camera | Filter | Wavelength | Total exposure time | Exposures |
|---|---|---|---|---|
| ACS | F435W | 435 nm | 134,900 s (56 orbits) | 116 |
| ACS | F606W | 606 nm | 135,300 s (56 orbits) | 116 |
| ACS | F775W | 775 nm | 347,100 s (144 orbits) | 288 |
| ACS | F850LP | 850 nm | 346,600 s (144 orbits) | 288 |

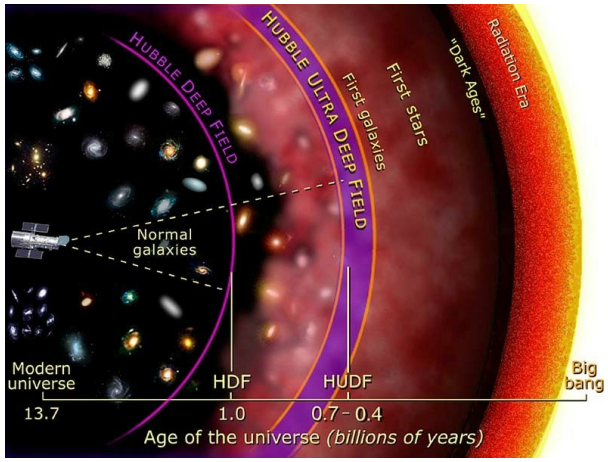
# A HST ultramélyvizsgálata

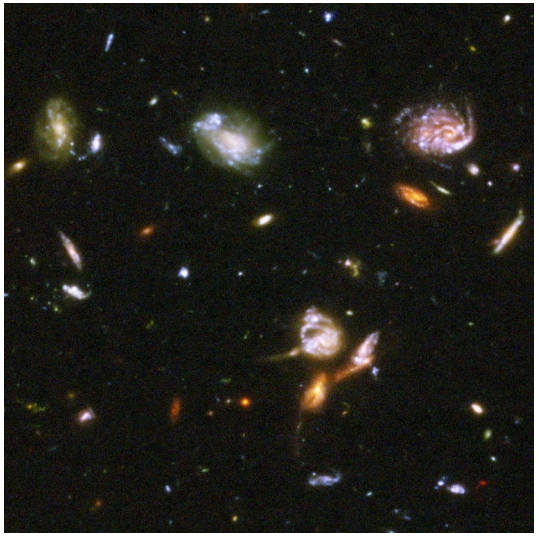
A képek felbontásának digitális javítása:
- dithering [remegtetés]: véletlenszerű zaj hozzáadása, megakadályozza a kiterjedt mintázatok [sávok] megjelenését;
- drizzling [szitálás]: változó pixelű lineáris rekonstrukció alulmintavételezett képen (balra). IRAF alatt fut, az STScI weboldaláról letölthető szoftver (amatőrök is használják képjavításra). Először itt használták.



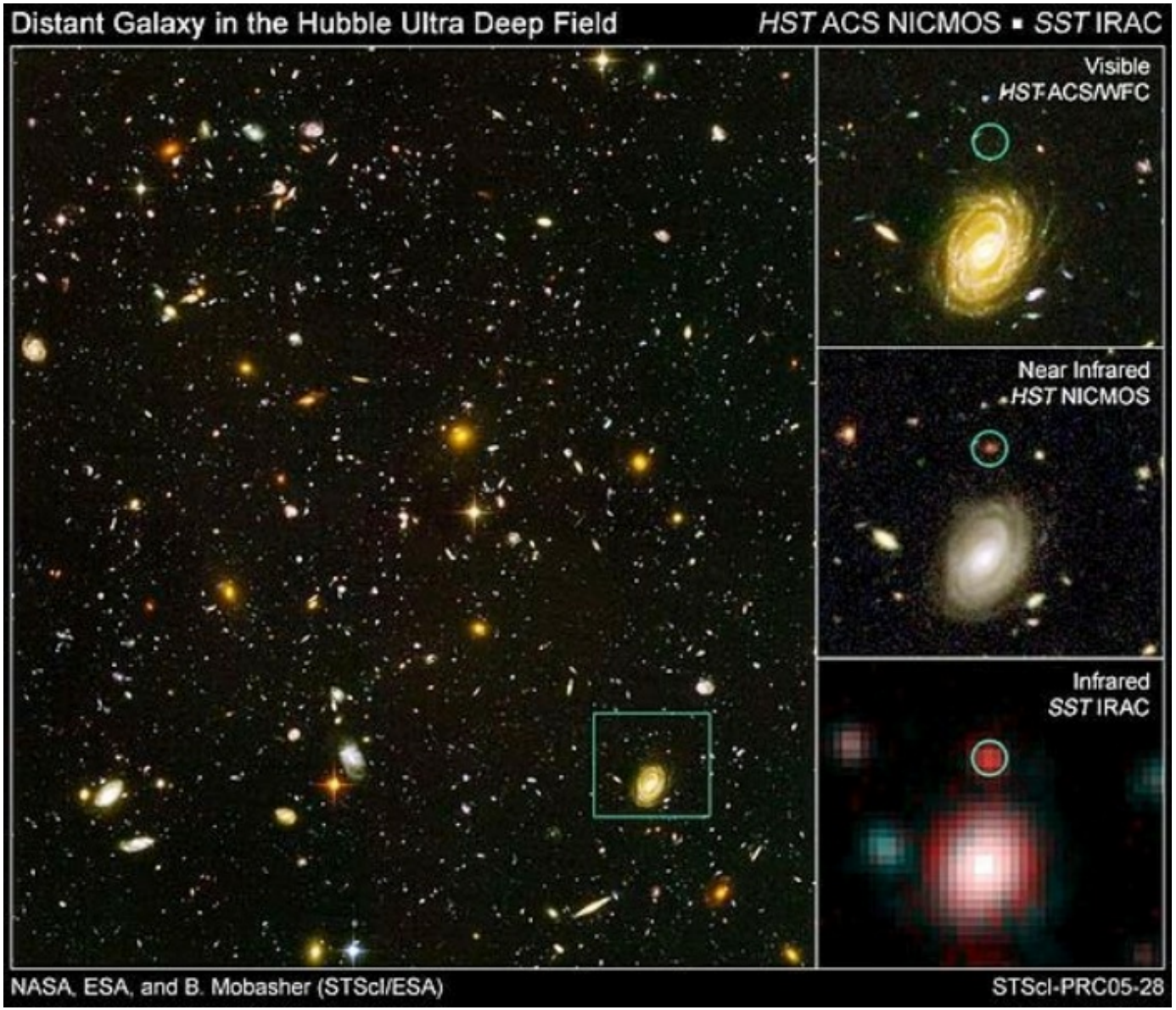
# A HUDF eredményei

- A galaxisképződés elején (az ősrobbanás után 1 milliárd évvel) nagy ütemű csillagkeletkezés;
- A galaxisok eloszlása szám, méret, luminozitás szerint az idő függvényében (galaxisfejlődés);
- Megerősítette, hogy a nagy z-jű galaxisok kisebbek és szabálytalanabbak, mint a kis z-jűek (eleinte gyors galaxisfejlődés).

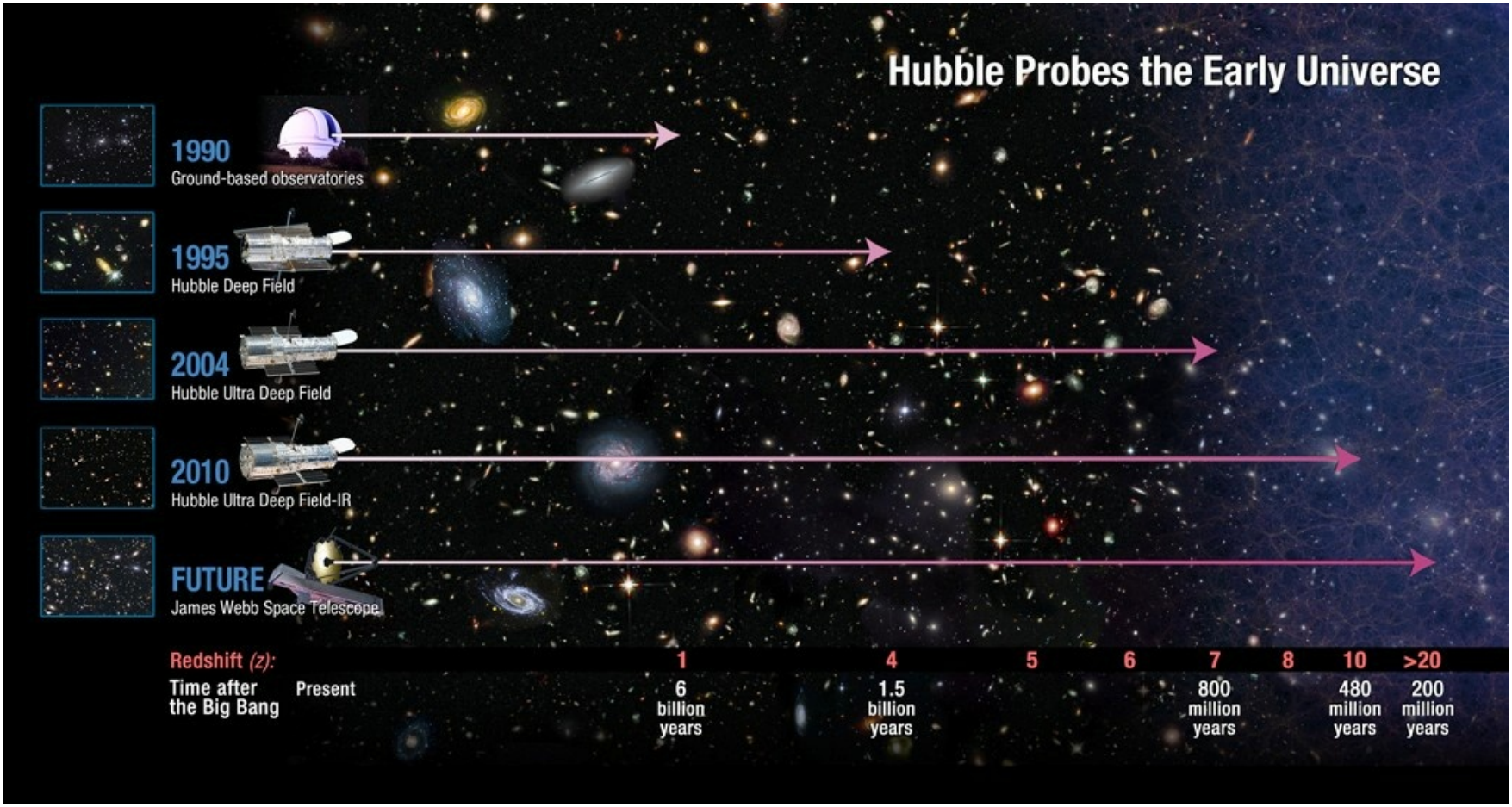


# Optikaiban láthatatlan galaxis a HUDF-képen



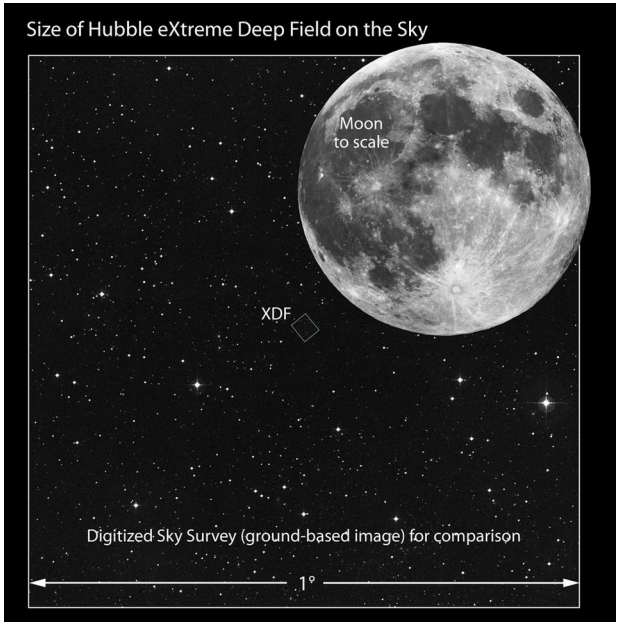
# Kozmoarcheológia mélyvizsgálatokkal




És 2012-ben elkészítették a Hubble Extreme Deep Field-et

# A HST XDF

További finomítás: Extreme Deep Field (XDF).
2012-ben jelentették be. Ugyanaz a kép közepe, de kisebb mező. 10 év alatt kapott képekből 2 millió s (23 nap) expozíciós idő, hullámhosszlefedés: UV-től közeli IR-ig.
5500 galaxis tűnt elő, közte 13,2 milliárd évesek is. Apró, fiatal galaxisok, amelyek később nagyobb galaxisokká olvadnak össze.




XDF SUMMARY

| | |
|---|---|
| Position (J2000) | R.A. 03h 32m 38.5s, Dec. −27° 47′ 00″ |
| Area (XDF total) | 10.8 arcmin$^2$ |
| Area (XDF deep IR) | 4.7 arcmin$^2$ |
| Instruments | ACS/WFC and WFC3/IR |
| Exposure Dates | July 2002 to December 2012* |
| Total Exposure Time | 21.7 days (∼2 million seconds) |
| Number of Exposures | 2963 (1972 ACS/WFC; 991 WFC3/IR) |
| Typical Depths | ∼30 AB mag ($5\sigma$) in most filters |
| Combined Depth | 31.2 AB mag ($5\sigma$) for a flat $f_\nu$ source |
| Archive Link | http://archive.stsci.edu/prepds/xdf/ |

XDF EXPOSURES

| Filter | Exposure Time (ks) | # of Exposures |
|---|---|---|
| **ACS/WFC** | | |
| F435W | 152.4 | 164 |
| F606W | 174.4 | 286 |
| F775W | 377.8 | 460 |
| F814W | 50.8 | 362 |
| F850LP | 421.6 | 700 |
| *ACS Total* | 1177.0 | 1972 |
| **WFC3/IR** | | |
| F105W | 266.7 | 248 |
| F125W | 112.5 | 289 |
| F140W | 86.7 | 118 |
| F160W | 236.1 | 336 |
| *WFC3 Total* | 702.0 | 991 |

HST PROGRAMS CONTRIBUTING TO THE XDF

| Program ID | HST Cycle | Program Title |
|---|---|---|
| 9352 | 11 | The Deceleration Test from Treasury Type Ia Supernovae at Redshifts 1.2 to 1.6 |
| 9425 | 11 | The Great Observatories Origins Deep Survey: Imaging with ACS (GOODS) |
| 9488 | 11 | Cosmic Shear - with ACS Pure Parallel Observations |
| 9575 | 11 | ACS Default (Archival) Pure Parallel Program |
| 9793 | 12 | The Grism-ACS Program for Extragalactic Science (GRAPES) |
| 9978 | 12 | The Ultra Deep Field with ACS (HUDF) |
| 10086 | 12 | The Ultra Deep Field with ACS (HUDF) |
| 10189 | 13 | Probing Acceleration Now with Supernovae (PANS) |
| 10258 | 13 | Tracing the Emergence of the Hubble Sequence Among the Most Luminous and Massive Galaxies |
| 10340 | 13 | Probing Acceleration Now with Supernovae (PANS) |
| 10530 | 14 | Probing Evolution And Reionization Spectroscopically (PEARS) |
| 11359 | 17 | Panchromatic WFC3 survey of galaxies at intermediate z: Early Release Science program for Wide Field Camera 3 (ERS) |
| 11563 | 17 | Galaxies at $z \sim 7-10$ in the Reionization Epoch: Luminosity Functions to $<0.2L^*$ from Deep IR Imaging of the HUDF and HUDF05 Fields (HUDF09) |
| 12060 | 18 | Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey GOODS-South Field, Non-SNe-Searched Visits (CANDELS) |
| 12061 | 18 | Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey GOODS-South Field, Early Visits of SNe Search (CANDELS) |
| 12062 | 18 | Galaxy Assembly and the Evolution of Structure over the First Third of Cosmic Time - III (CANDELS) |
| 12099 | 18 | Supernova Follow-up for MCT (CANDELS) |
| 12177 | 18 | 3D-HST: A Spectroscopic Galaxy Evolution Treasury (3DHST) |
| 12498 | 19 | Did Galaxies Reionize the Universe? (HUDF12) |

# A HST XDF

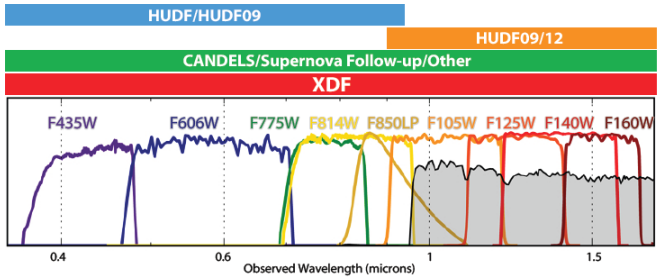
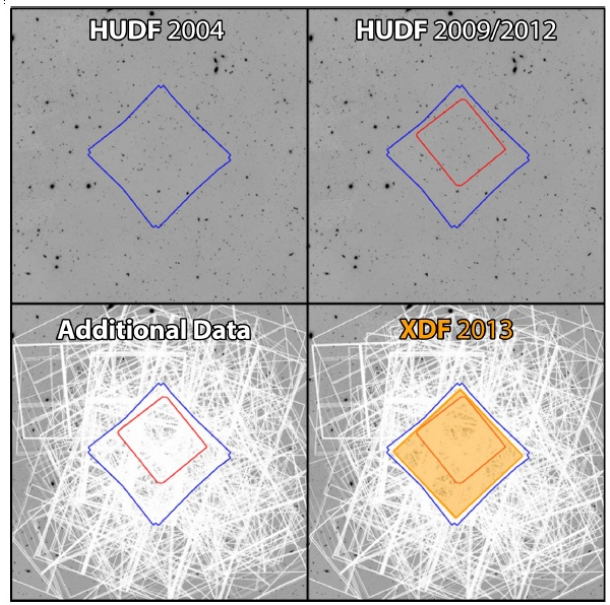
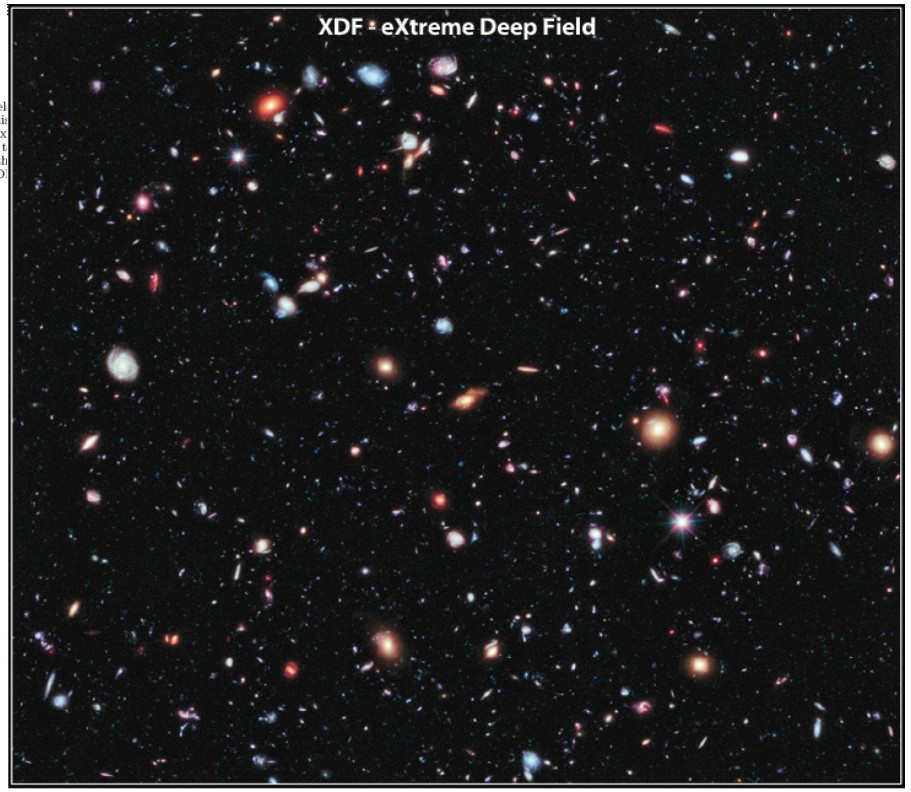


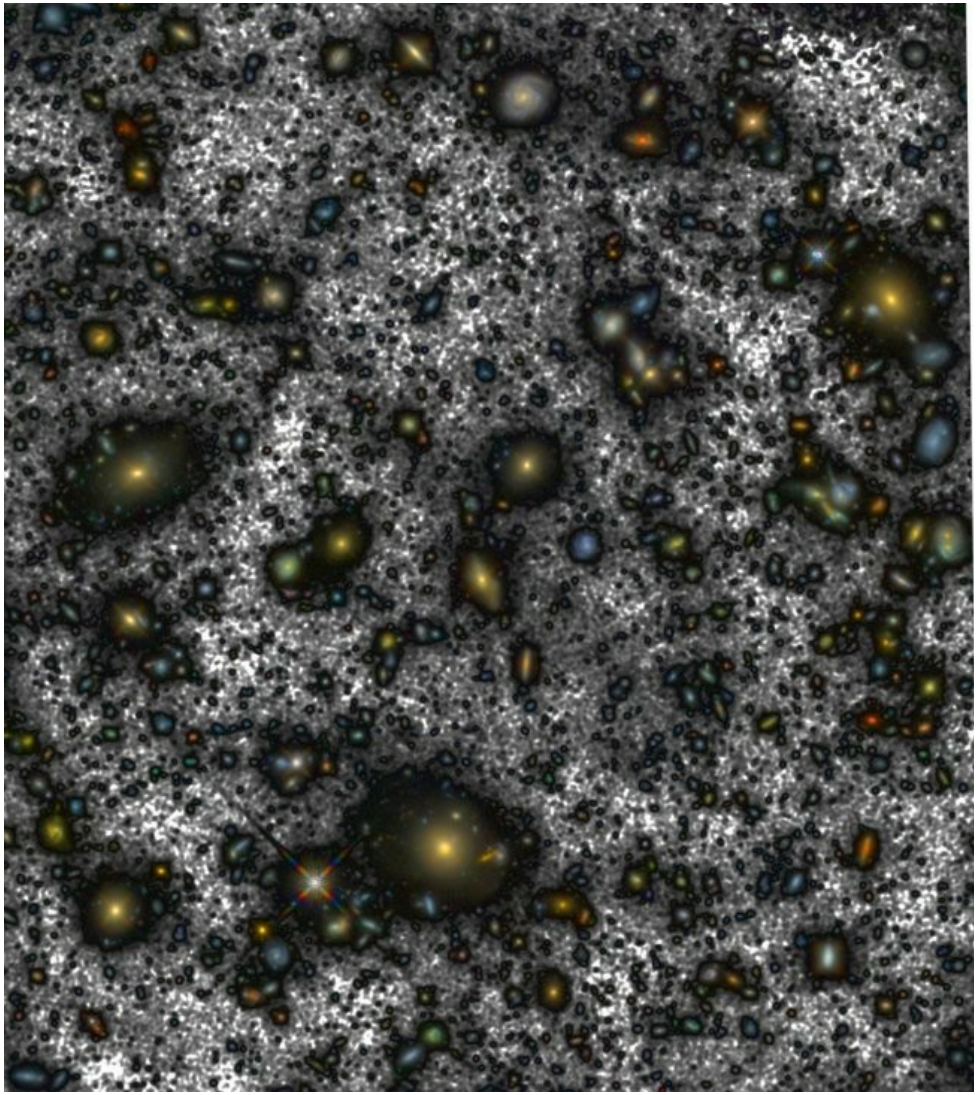

FIG. 1.— The XDF input datasets and spectral elements. The XDF combines *all* the data that have been taken on the HUDF fiel between 2002 and 2013 - this means HUDF, HUDF09, CANDELS, HUDF12 and many other programs. No other release has done thi This makes the deepest image from HST ever, with the widest spectral coverage image from HST on the HUDF. An example galax spectrum at $z = 6.5$ is shown. This example galaxy is seen about 12.8 billion years ago, just 800 million years after the Big Bang. Due t the high fraction of neutral hydrogen present at this early cosmic time, the source is essentially completely invisible at optical wavelength probed by the ACS camera and it can only be seen in the near-infrared with the new WFC3/IR. The wide wavelength coverage of the XD images allow for the identification of similar galaxies across a very large redshift range, from $z \sim 4$ to $z \sim 12$.



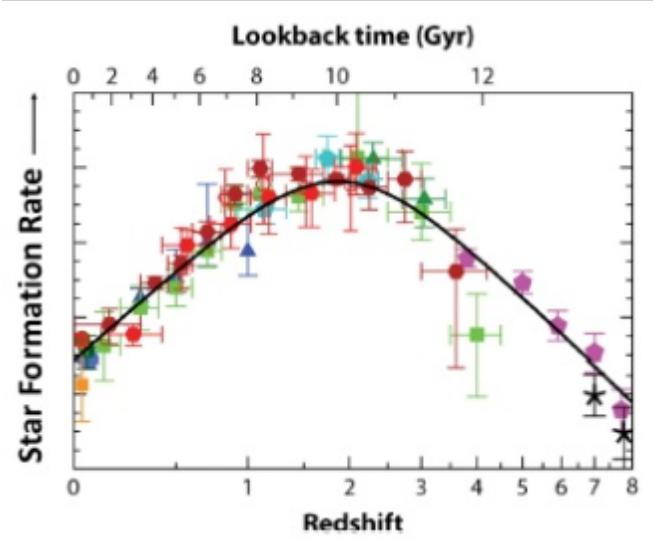
# A HST XDF

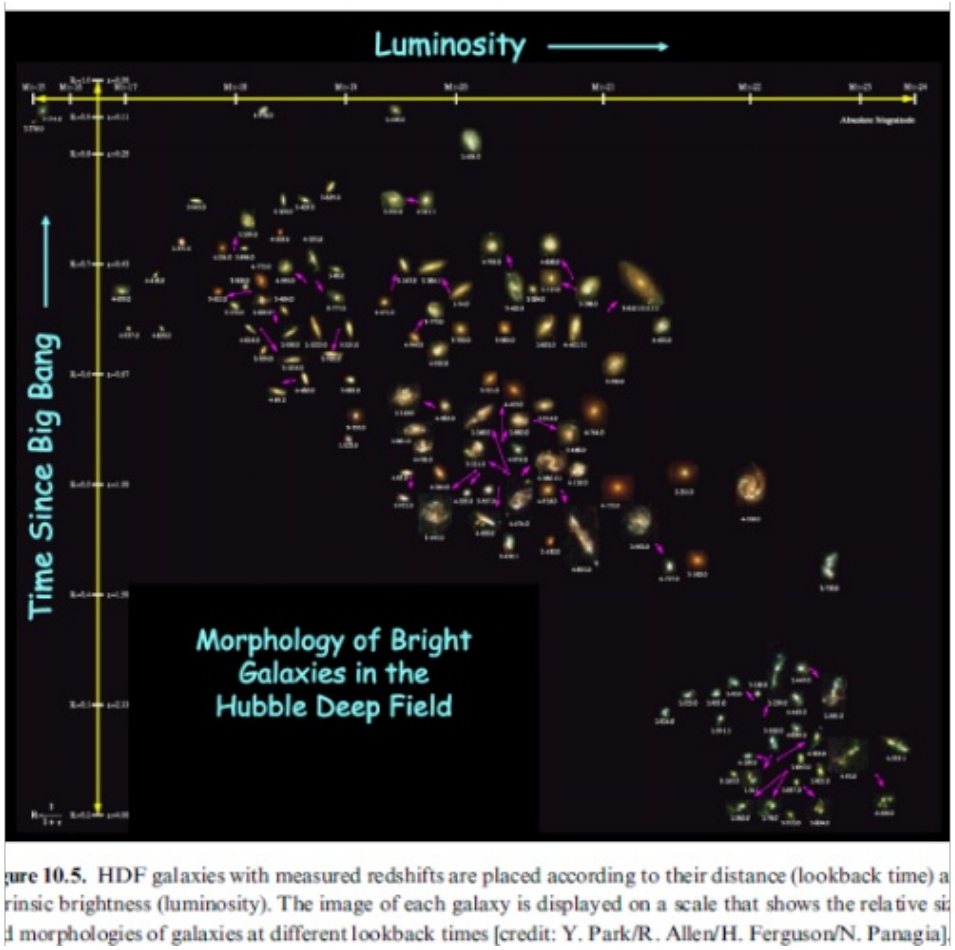
2019 elején az Instituto de Astrofísica de Canarias kutatói a korábbi WFC3/IR-képek újraredukálásával, a háttér gondosabb levonásával még „mélyebb” képet állítottak elő: ***ABYSS Ultra Deep Field.*** Ezen a képen néhány galaxis kiterjedése a korábbinál nagyobb.



# A HST XDF

Eredmények:
- A csillagképződési ütem meghatározása (lent);
- A galaxisok alakjának és luminozitásának változása az idő függvényében (jobbra).




ure 10.5. HDF galaxies with measured redshifts are placed according to their distance (lookback time) a
rinsic brightness (luminosity). The image of each galaxy is displayed on a scale that shows the relative si
l morphologies of galaxies at different lookback times [credit: Y. Park/R. Allen/H. Ferguson/N. Panagia].

# A Hubble-állandó a HST alapján

A Hubble-állandó ($H_0$) fontos az Univerzum mérete és kora miatt is. A HST előtt a $\dot{H}_0$ értékét 50-100 km/s/Mpc közöttinek tartották.

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_R a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda$$

A $H_0$ pontossága a távolságmérés pontosságától függ.
Távolságmeghatározási módszerek; trigonometria; standard gyertya; standard vonalzó; cefeidák; távolságlétra.
A HST KP eredményei:
- 20 Mpc-ig extragalaktikus cefeidák felfedezése és a galaxis távolságának meghatározása;
- A cefeidák P-L relációjára építve $H_0$ meghatározása másodlagos távolságindikátorokkal;
- A hibák meghatározása (a luminozitás fémtartalomfüggése kérdéses).

# A Hubble-állandó a HST alapján

Table 12. Uncertainties in $H_0$ for Secondary Methods

| Method | $H_0$ | Error (%) | References |
|---|---|---|---|
| 36 Type Ia supernovae<br>$4{,}000 < cz < 30{,}000$ km/sec | 71 | $\pm 2_r \pm 6_s$ | Hamuy et al. (1996), Riess et al. (1998),<br>Jha et al. (1999), Gibson et al. (2000) |
| 21 Tully–Fisher clusters<br>$1{,}000 < cz < 9{,}000$ km/sec | 71 | $\pm 3_r \pm 7_s$ | Giovanelli et al. (1997), Aaronson et al. (1982, 1986)<br>Sakai et al. (2000) |
| 11 FP clusters<br>$1{,}000 < cz < 11{,}000$ km/sec | 82 | $\pm 6_r \pm 9_s$ | Jorgensen et al. (1996), Kelson et al. (2000) |
| SBF for 6 clusters<br>$3{,}800 < cz < 5{,}800$ km/sec | 70 | $\pm 5_r \pm 6_s$ | Lauer et al. (1998), Ferrarese et al. (2000a) |
| 4 Type II supernovae<br>$1{,}900 < cz < 14{,}200$ km/sec | 72 | $\pm 9_r \pm 7_s$ | Schmidt et al. (1994) |

Combined values of $H_0$:

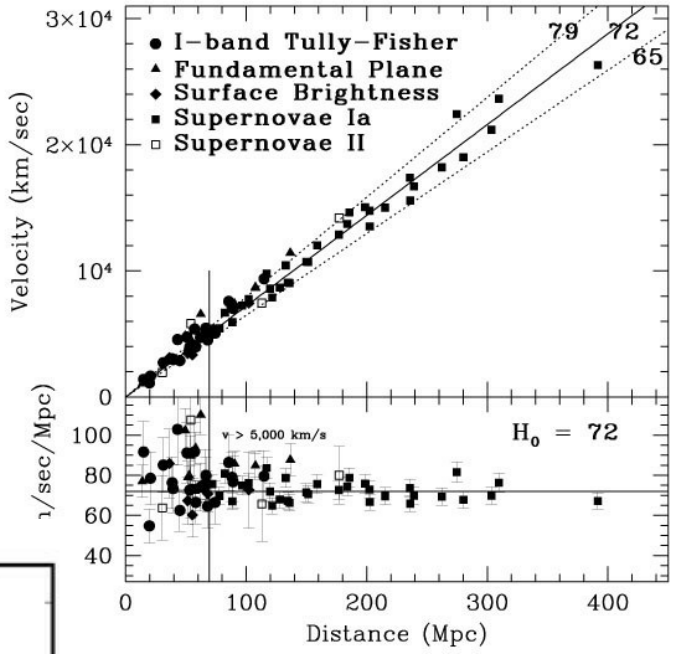
$H_0 = 72 \pm 2$ [random] km/sec/Mpc [Bayesian]

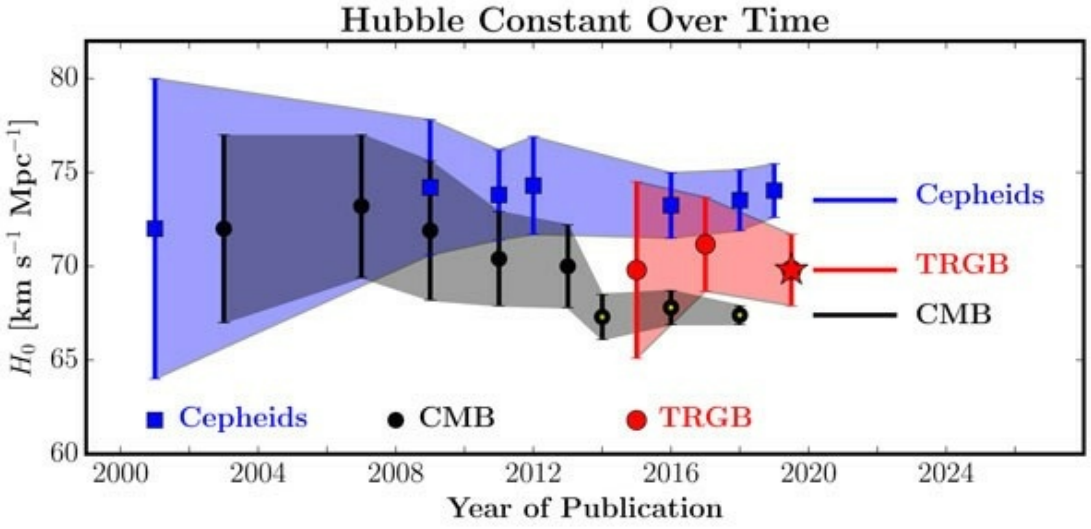
$H_0 = 72 \pm 3$ [random] km/sec/Mpc [frequentist]

$H_0 = 72 \pm 3$ [random] km/sec/Mpc [Monte Carlo]

# A Hubble-állandó a HST alapján

HST Key Project (Freedman et al.):
$H_0 = 72 \pm 3 \pm 7$ km/s/Mpc
rand. sziszt. hiba
(de Sandage et al. SNIa alapján:
$H = 62{,}3 \pm 1{,}3 \pm 5{,}0$ km/s/Mpc)
A WMAP szerint: $H_0 = 72 \pm 5$ km/s/Mpc.
Viszont a Planck 2018-ban közölt eredménye: $H_0 = 67{,}4$ km/s/Mpc .




Ez a jelenleg is aktívan kutatott Hubble-feszültség (Hubble tension)

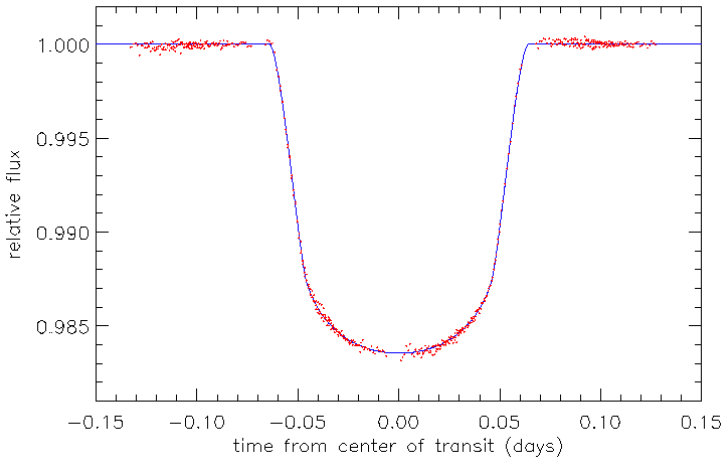
# Exobolygók a HST-vel

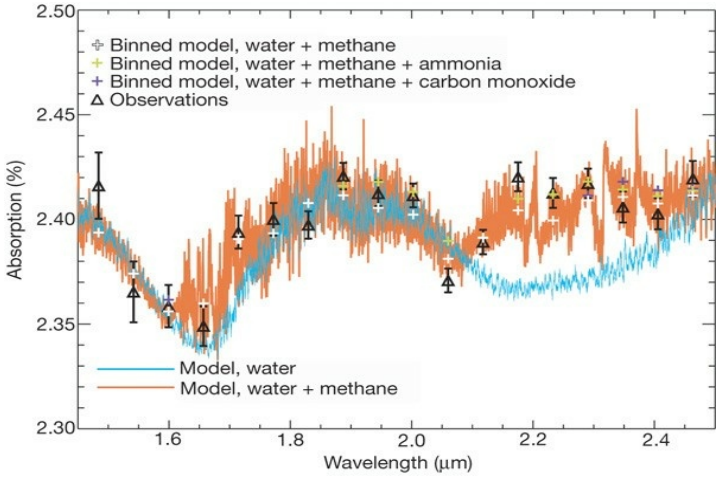
Az exobolygókutatás korai aspektusai a HST-vizsgálatok alapján: cirkumsztelláris korong, proplid. Kezdetben forró jupitereket fedeztek fel, most már kisebb tömegűeket is, de közel a csillagukhoz.

1995: 51 Peg, $v_{rad}$ változása alapján.

2000: első fedési exobolygó: HD 209458. 2001-ben már a HST-vel is észlelték: 1,7% mélység, $P_{orb}$ = 3,5247 nap, $i$ = 87°, 0,69±0,05 jupitertömeg, 1,35±0,06 jupitersugár.

A HST-vel a fedési exobolygók légköre is tanulmányozható. Az első eset ugyancsak a HD 209458 volt (balra lent). Jobbra lent a HD 189733 b atmoszférájának színképe, fekete háromszögek a HST mérései.



# Exobolygók a HST-vel

A fotometriai módszer előnye: az átvonulás idősorából megkapható a bolygó mérete (a minimum mélysége $R_{plan}/R_{csillag}$ négyzetével arányos), A $v_{rad}$ méréséből pedig a bolygó tömege is ($i$ = 90° esetén)

Az átvonulás időtartama: $\tau_{\rm tran} \simeq 1.4 M_*^{-1/3} R_* P_{\rm orb}^{1/3}$ hr

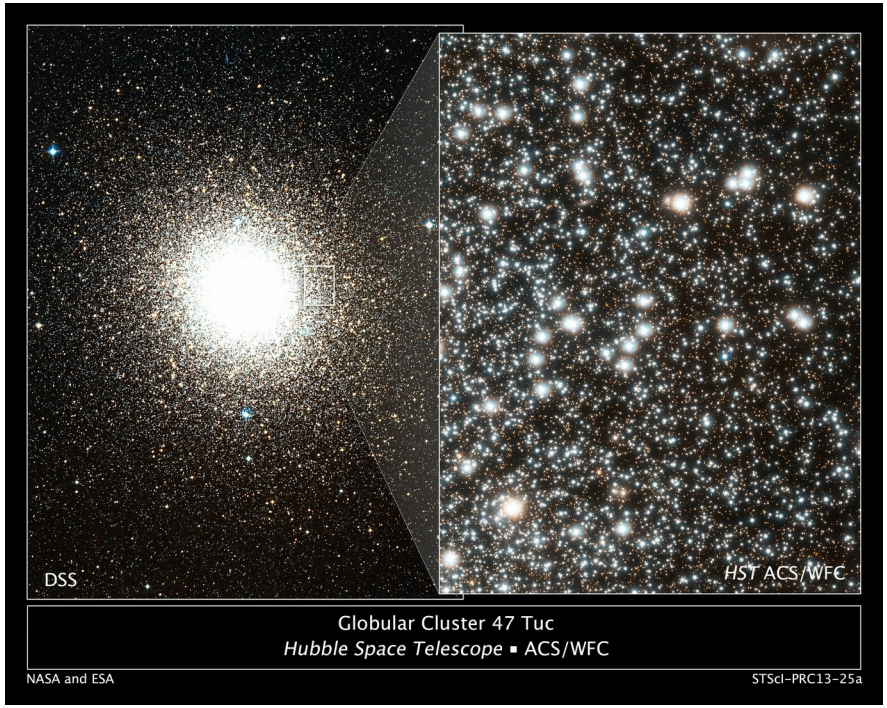
[$M_{nap}$] [$R_{nap}$] [nap]

Az átvonulás valószínűsége: $Pr_{\rm tran} \simeq 23.8\% M_*^{-1/3} R_* P_{\rm orb}^{-2/3}$

Hatékony keresés csillagokban gazdag mezőben, pl. gömbhalmazban. Random pályainklinációt feltételezve 10% az átvonulás valószínűsége. 1998-ban a 47 Tuc gömbhalmaz centrumának fotometriai idősorában keresték bolygófedés jeleit. Tipikus csillagok (0,81 $M_{nap}$, 0,92 $R_{nap}$) esetén 3,8 napos forró jupiterre 9,6% az átvonulás valószínűsége, tartama 2,2 óra, a fedés mélysége 2%, azaz könnyű a detektálás. A becslés szerint minden 1000. csillagnál kellene fedést látni. 8,3 napos folyamatos fotometriai idősor 34000 csillagról (Föld-fedés és a dél-atlanti anomália miatt van csak megszakítva). A zaj és a V fényesség eloszlása miatt 17 fedést vártak, de egyetlenegy sem volt!

# Exobolygók a HST-vel

A hiba nem a módszerben volt: 75 új változócsillagot találtak, köztük egy 1,34 napos periódusú fedési változót is 3%-os fedési mélységgel (nem bolygó, mert a mellékminimum is látszik, K törpe kísérő).
A forró jupiterek száma lehet kicsi a 47 Tuc gömbhalmazban. Oka lehet a kis fémtartalom vagy a korong elbontása a közeli forró csillagok UV-sugárzása által (10,5 milliárd éves).

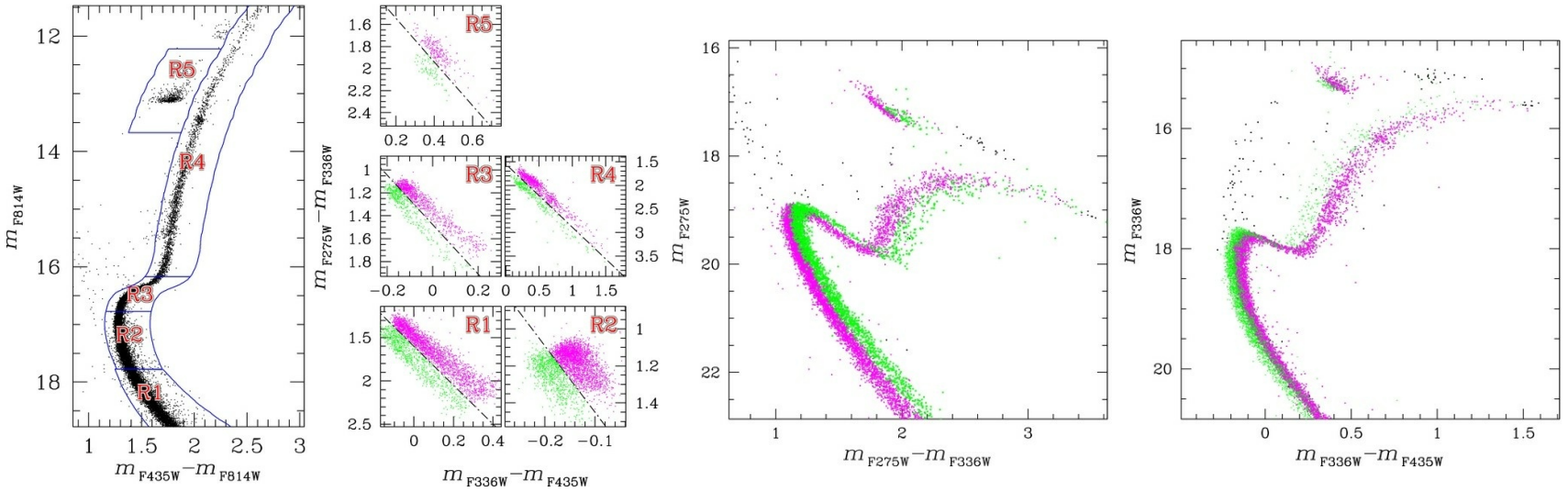


# Csillaghalmazok részletes vizsgálata

Ugyancsak a 47 Tucanae: 2010-ben az ACS-sel + 754 archív felvétel alapján a csillagok elmozdulása 8 év alatt. 30000 csillag alapján két csillaggeneráció.

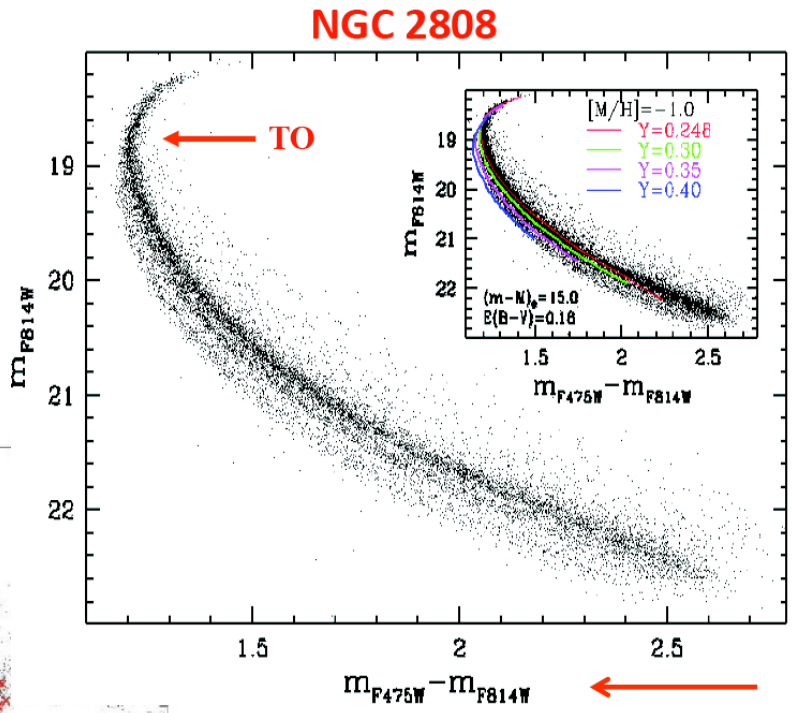
Az idősebb vörösebb, kisebb fémtartalmú, véletlen eloszlású körpályán mozgó csillagokból áll. A fiatalabb kékebb, nagyobb fémtartalmú és elliptikus pályán mozgó csillagokból áll. A korkülönbség 100 millió év.

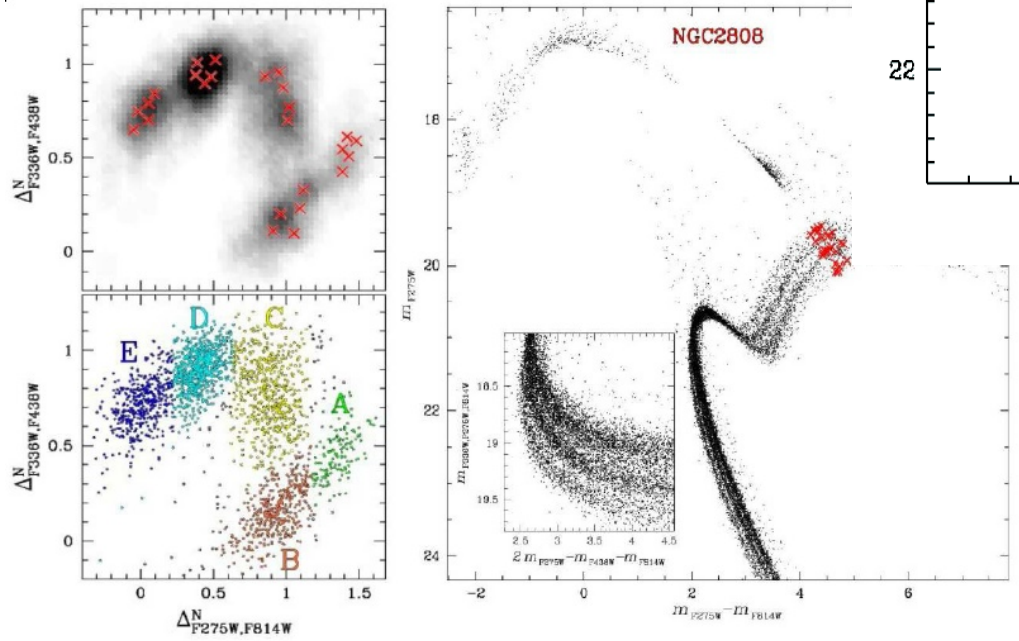
Kétkomponensű fősorozatot már korábban is találtak más gömbhalmazoknál, de ez az első kinematikai alátámasztása a csillaggenerációk elkülönülésének a szín-fényesség diagramon.



# Csillaghalmazok részletes vizsgálata

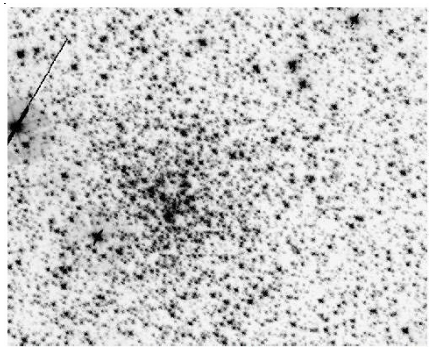
NGC 2808: az átlagosnál nagyobb tömegű gömbhalmaz (ilyen a 47 Tucanae is).
A fősorozaton 3 csillaggeneráció különül el.

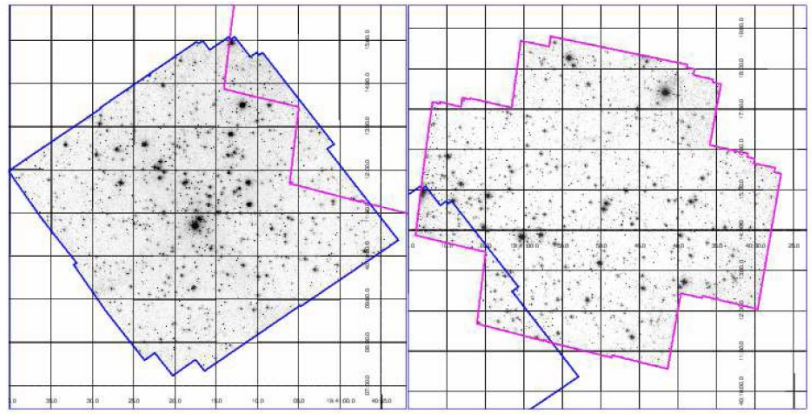


# Halmazok szín-fényesség diagramja

NGC 6819 a Kepler-mezőben:
2,25 milliárd éves nyílthalmaz a Napéhoz hasonló fémtartalommal.
Fehér törpék hűlési sorozata, luminozitása, korfüggése.





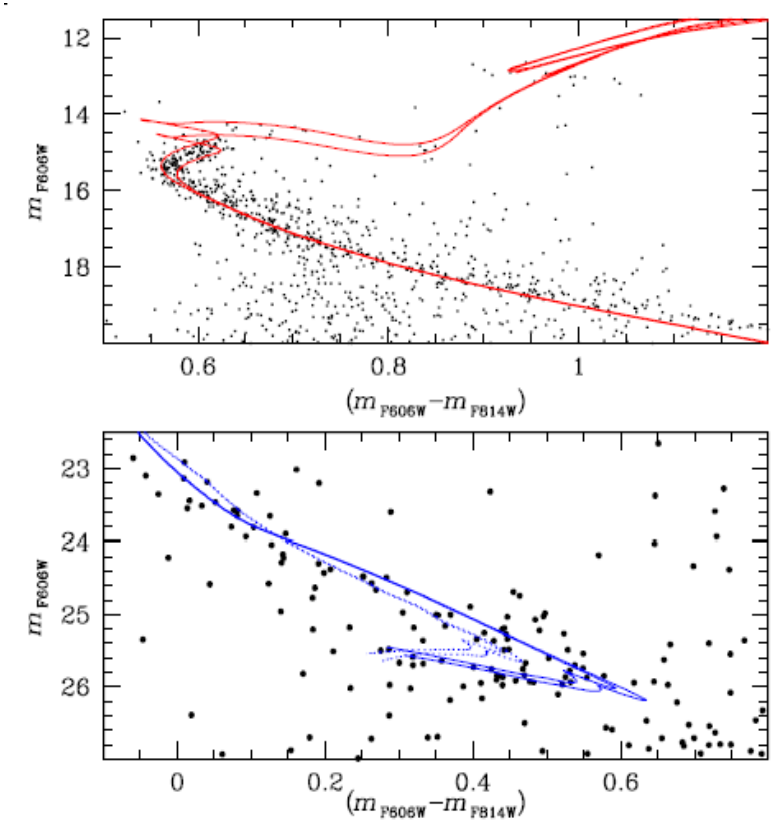
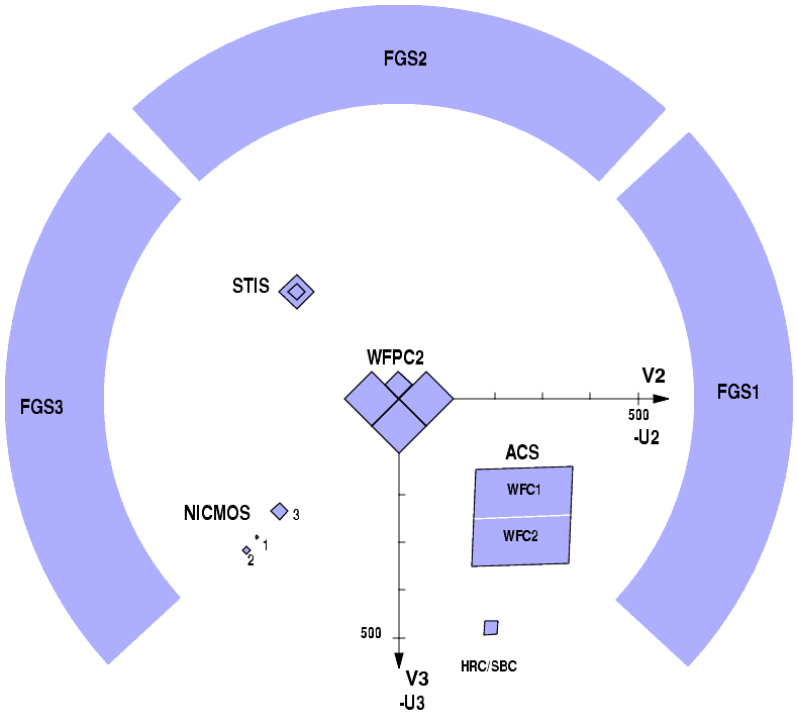
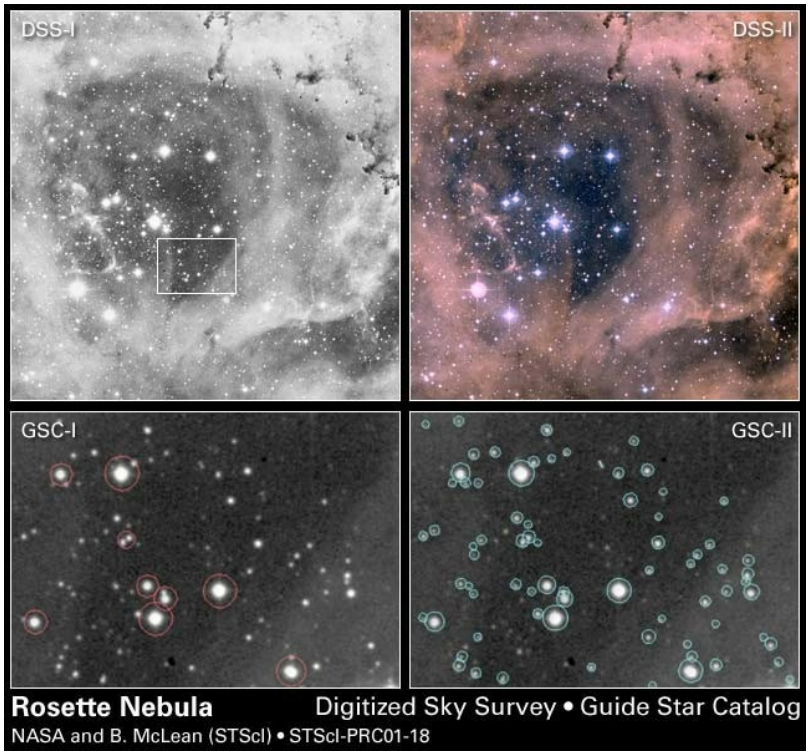



**Figure 3.** *(Upper panel:)* Fit of theoretical isochrones [1.95 Gyr, $(m-M)_0 = 11.99$, $E(B-V)$=0.18 and 2.55 Gyr, $(m-M)_0 = 11.77$, $E(B-V)$=0.16] to the cluster MS in the $m_{F606W}$-$(m_{F606W}-m_{F814W})$ CMD (see text for details). *(Lower panel:)* Fit of WD isochrones to the observed CS, for the same age-distance-reddening combinations. Solid lines denote DA WDs, dotted lines DB objects.

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

GSC: Guide Star Catalogue: 1989-ben 15 magnitúdóig.
2001-ben: GSC II: 19 magnitúdóig 500 millió csillag.
A HST már több mint 30 éve működik. Az időbeli változások jól vizsgálhatók a fotometriai adatok és a képek alapján is (még a környezettel történő kölcsönhatás is).



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Változócsillagok keresése és fénygörbéjük vizsgálata az FGS archivált fotometriai adatai alapján (Zwintz et al.)
Ez csak kiragadott példa, sok millió csillagot lehetne még analizálni.

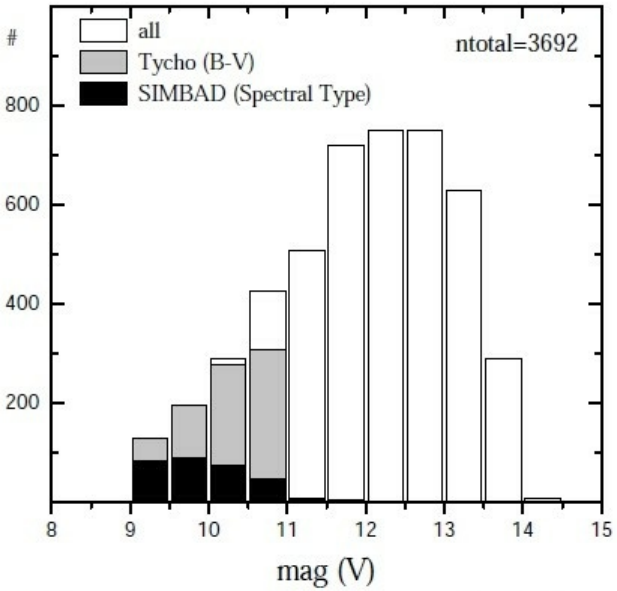
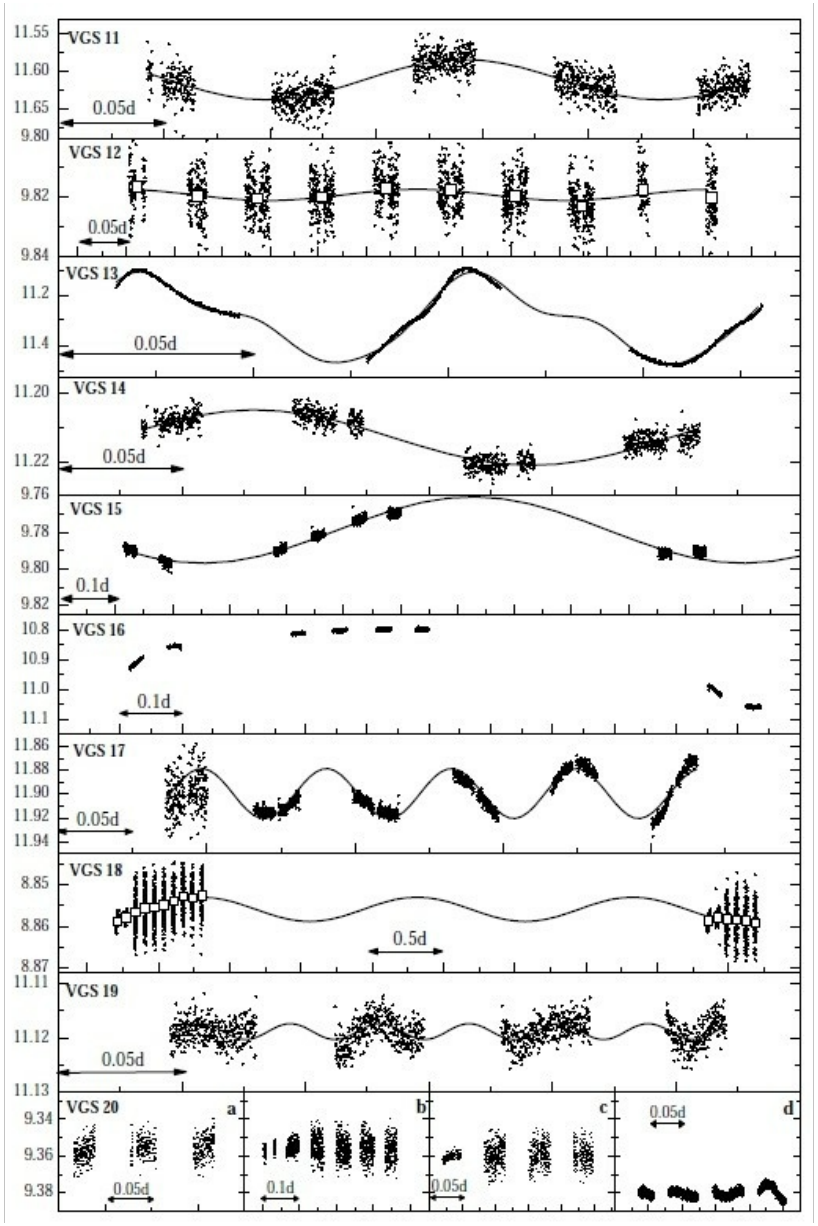



**Fig. 1.** Brightness distribution of total sample of 3692 guide stars analyzed to date (white columns), of guide stars with TYCHO $B-V$ values (grey columns), and of guide stars with published spectral types (black columns)

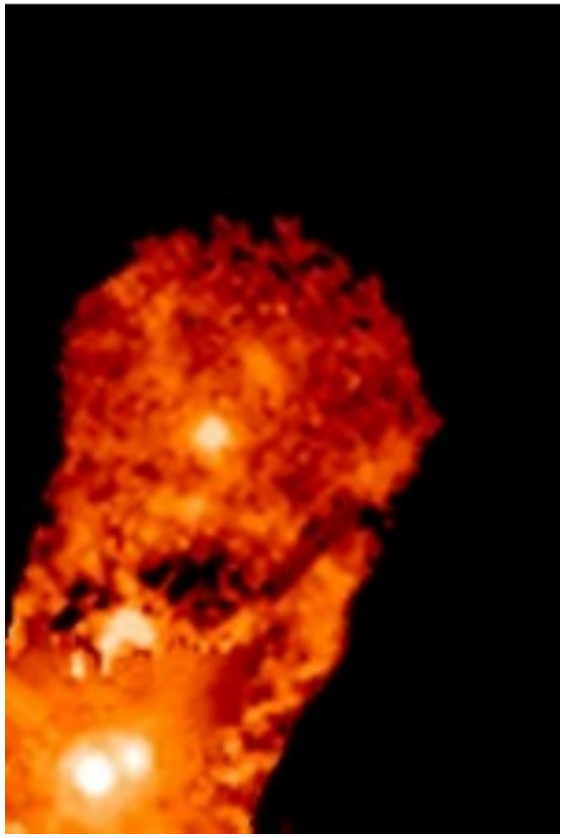


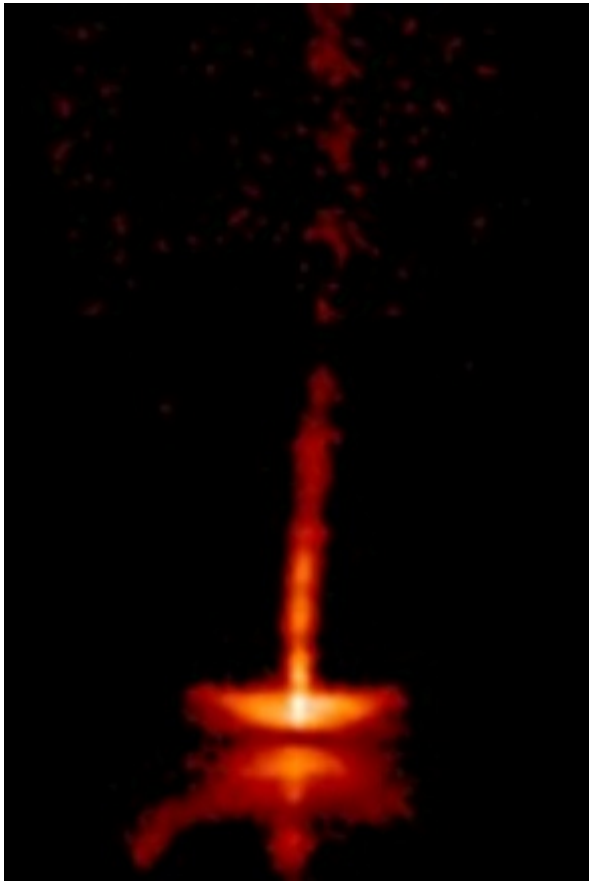
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az LL Orionis körüli fejhullám (balra lent)
Orion-köd: 3000 csillag + barna törpék, 1500 fényévre.
A kép telehold méretű (jobbra lent).

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

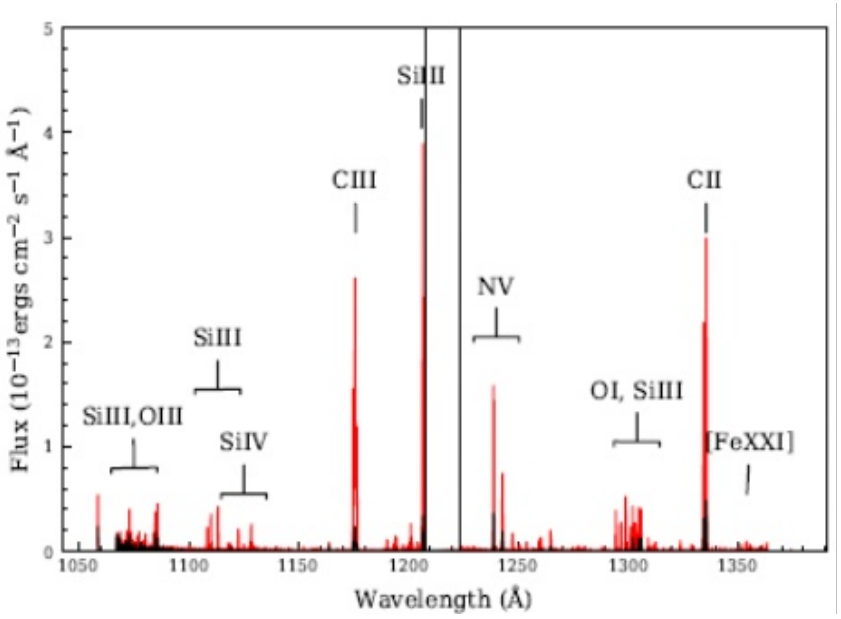
XZ Tauri: vizuális kettős, párja (40 CSE-re) a HL Tauri, a Tau–Aur molekulafelhőben (alig 1 millió éves). A gázfelhő 600 CSE méretű, 180 km/s sebességgel tágul, 40 éve alakult ki. (balra lent)
HH 30: Herbig–Haro-objektum (jobbra lent)

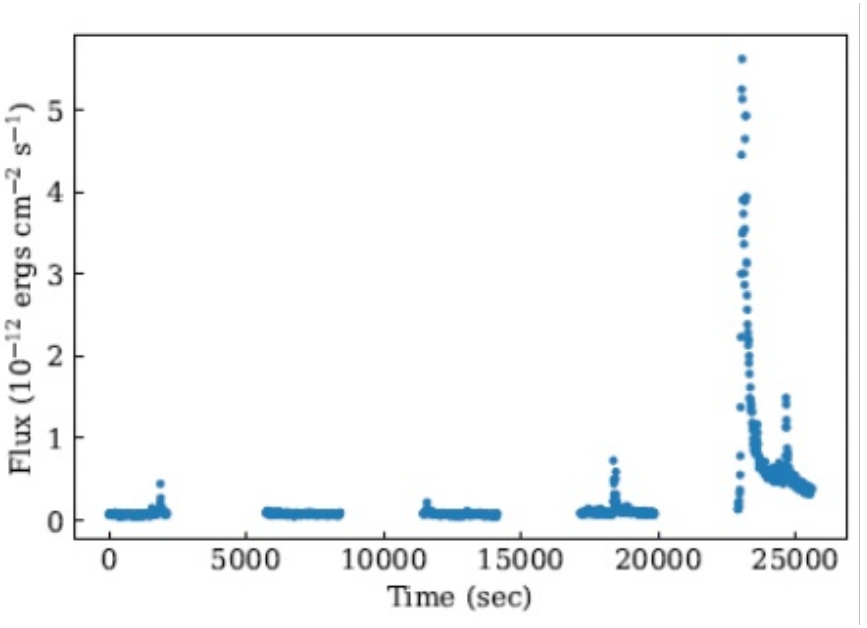




# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

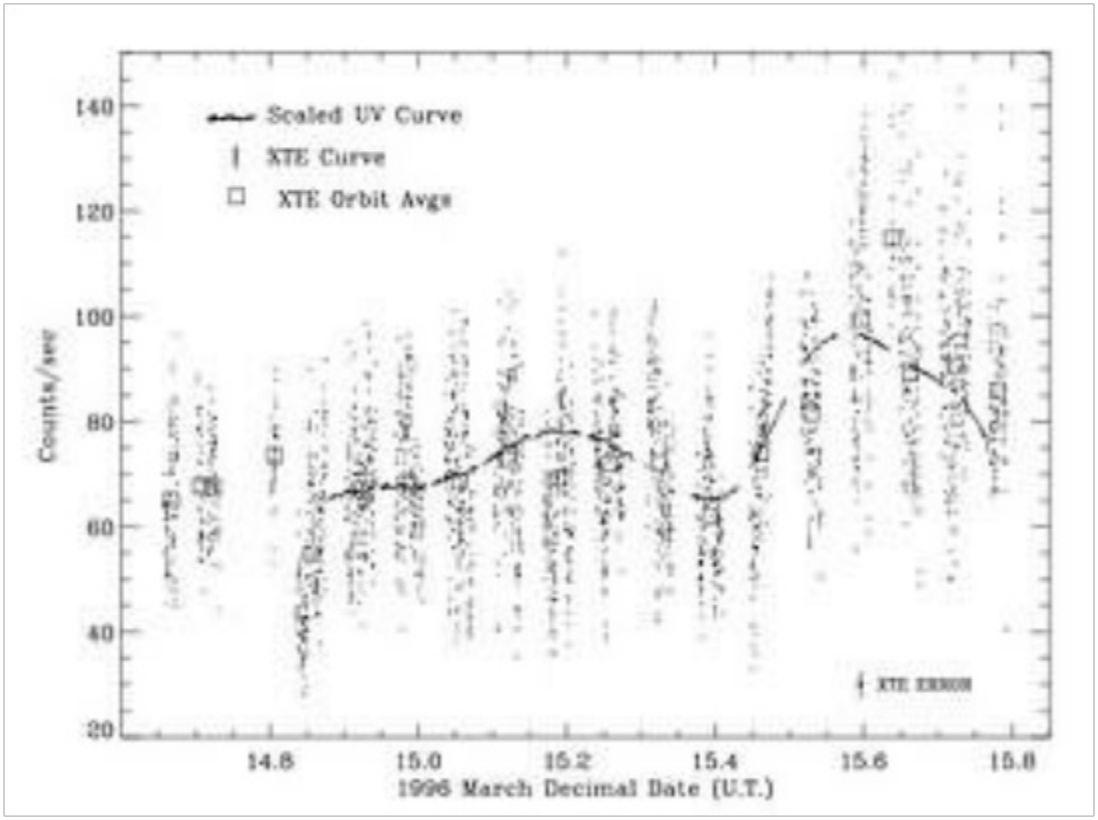
Nagy energiájú UV fler a GJ 674 törpecsillagon (M2,5V színképtípusú).
Sok kis fler után egy majdnem egyórás kitörés a távoli UV-ben
kb. $10^{31}$ erg energiával.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

$\gamma$ Cas: az első ismert Be-csillag (600 fényévre, 2 magnitúdós). Rossi-XTE (röntgen) + IUE (UV) + HST (UV): 100 millió fokos fler (tízszer forróbb, mint a napkitöréseknél), a 27 órás rotációs periódus felismerhető az intenzitásoknál (szimultán változás UV-ban és röntgenhullámhosszakon).



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

A PHAT (Panchromatic Hubble Andromeda Treasury) projekt egyik eredménye az emissziós B-csillagok gyakoriságával foglalkozik. Két eltérő időpontban végzett felmérés alapján az Andromeda-ködben 552 (542) Be-csillagot és 8429 (8556) közönséges B-csillagot találtak. A Be-csillagok gyakorisága a B-csillagok között 6,15%. Összehasonlítás más fémtartalmú galaxisokkal (lent).

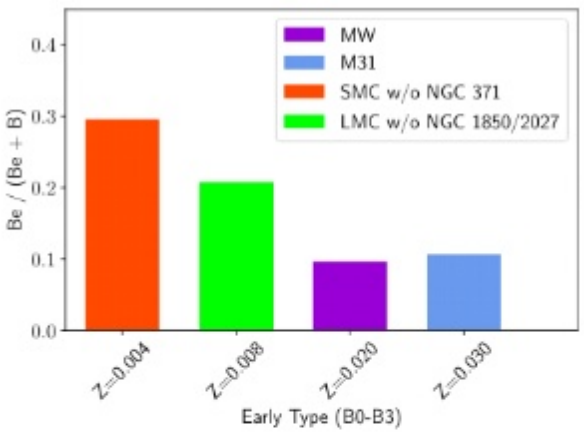



**Figure 12.** The fractional Be content of early-type (B0-B3) stars is shown as a function of metallicity. We adopted metallicities (Z) of 0.030 (1.5x solar) for M31, Z = 0.020 for the Milky Way, Z = 0.008 for the LMC, and Z = 0.004 for the SMC. The LMC and SMC data are taken from Table 6 of

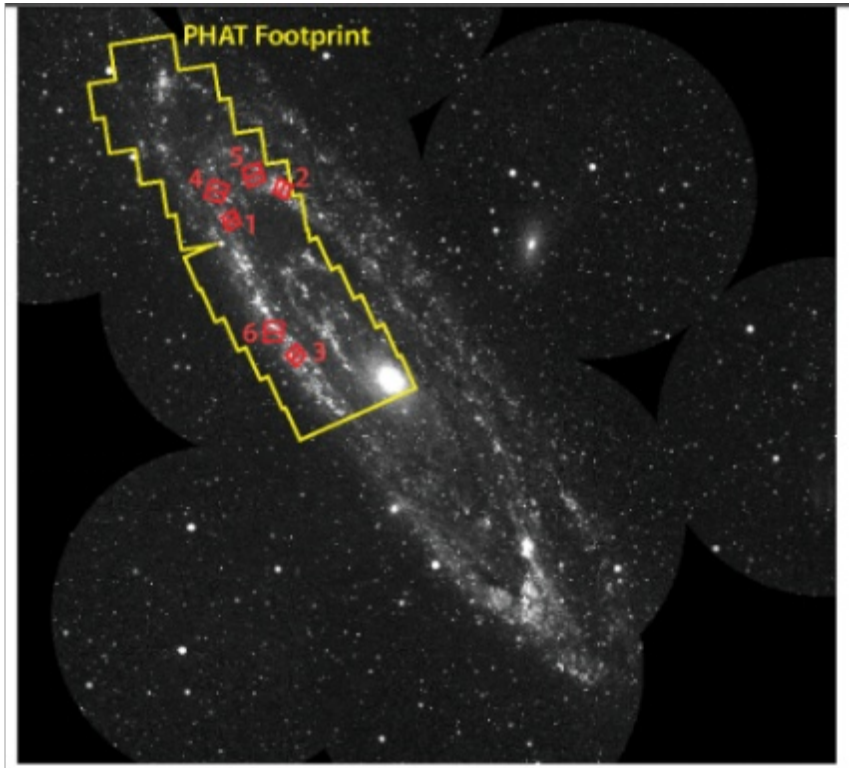
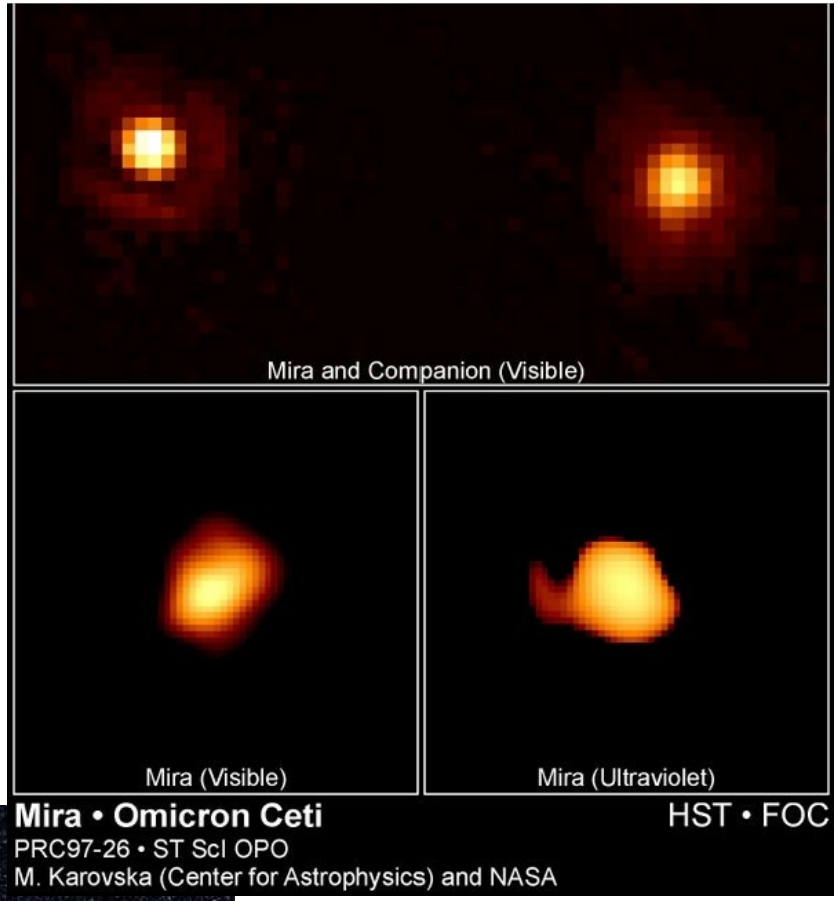



**Figure 1.** The footprint of our HST emission line survey pointings of M31 are depicted in **red**, and labeled by pointing number compiled in Table 1. Also shown here in **yellow** is the overlay of the full PHAT survey (Dalcanton et al. 2012a).

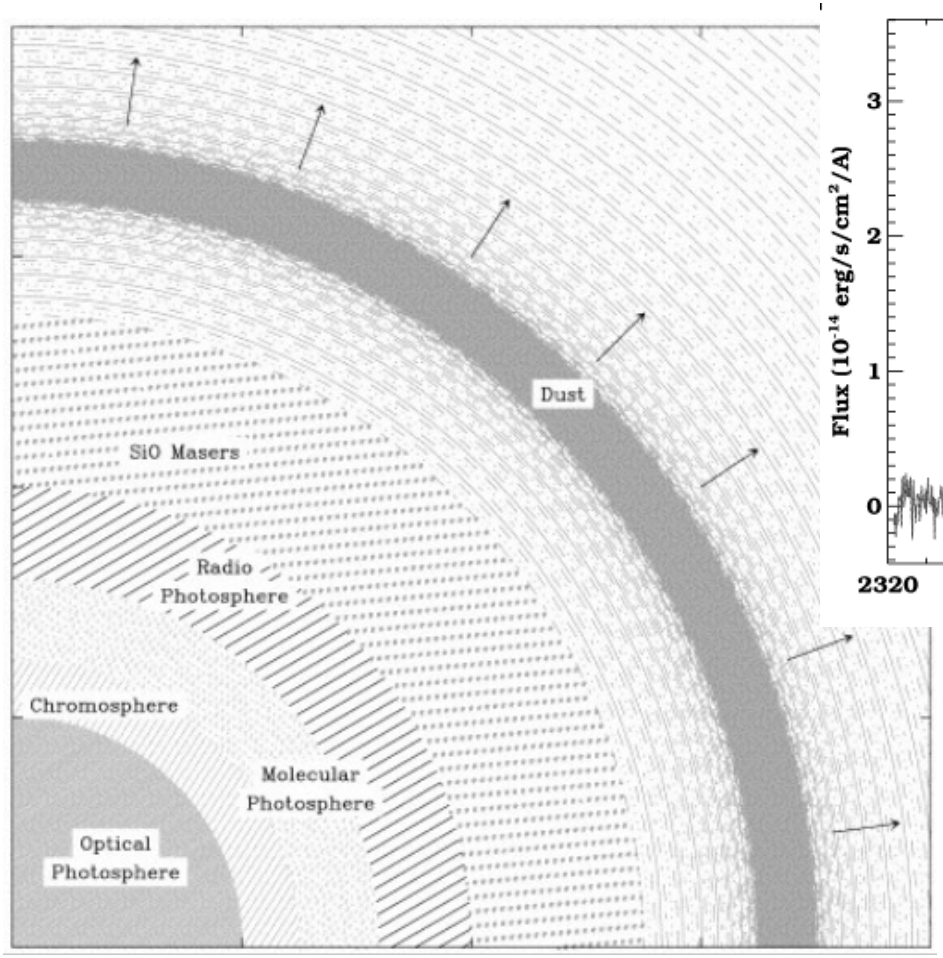
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

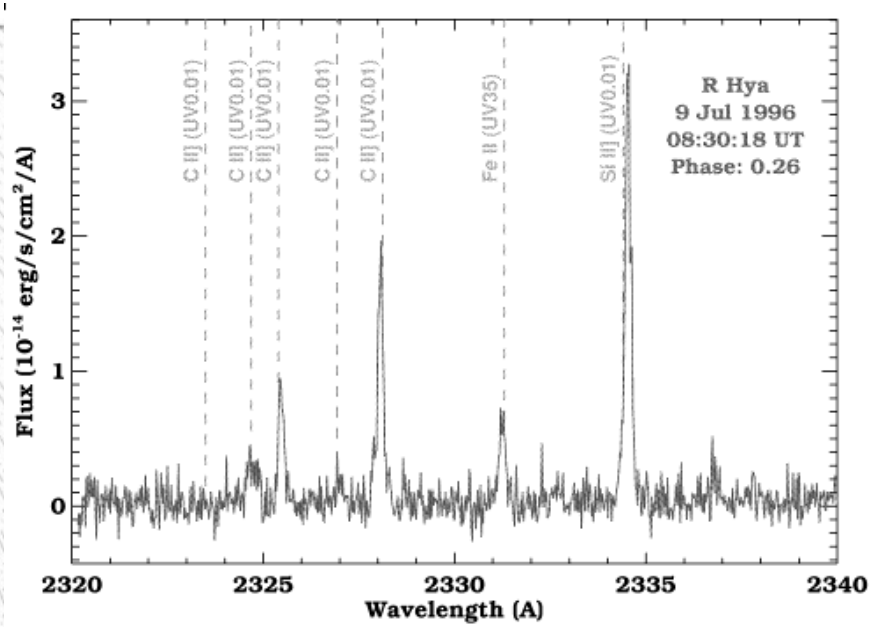
Mira Ceti: P=332 nap, 400 fényévre,
R = 700$R_{Nap}$ , szeparáció: 0,6´´.
Ultraibolyában nyúlvány a
Mira B (VZ Ceti) felé.
A Mira uszályát a GALEX ismerte
fel (UV-ben).
A VZ Ceti fehér törpe akkréciós
koronggal körülvéve.
Az A-B pár keringési periódusa kb.
400 év.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

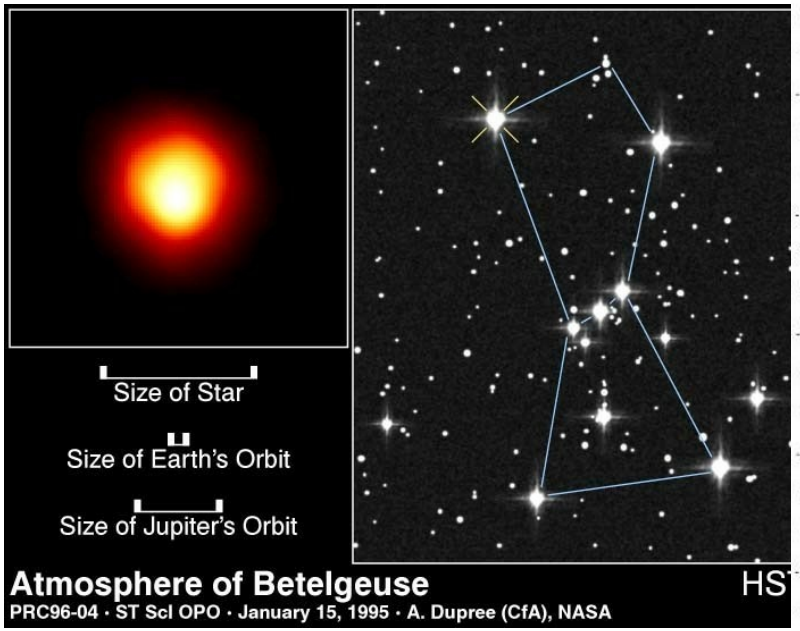
R Hya GHRS-színképe: emissziós vonalak (C, Si, Mg) a mirák légköri rétegződésére utalnak.

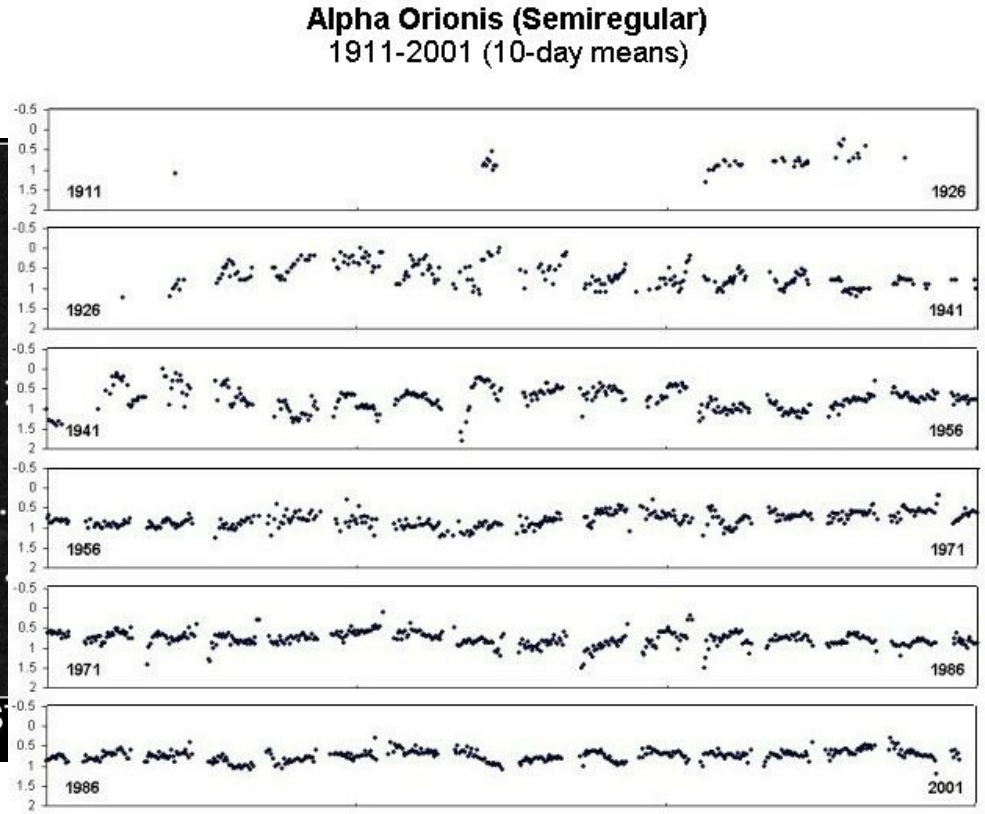


# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

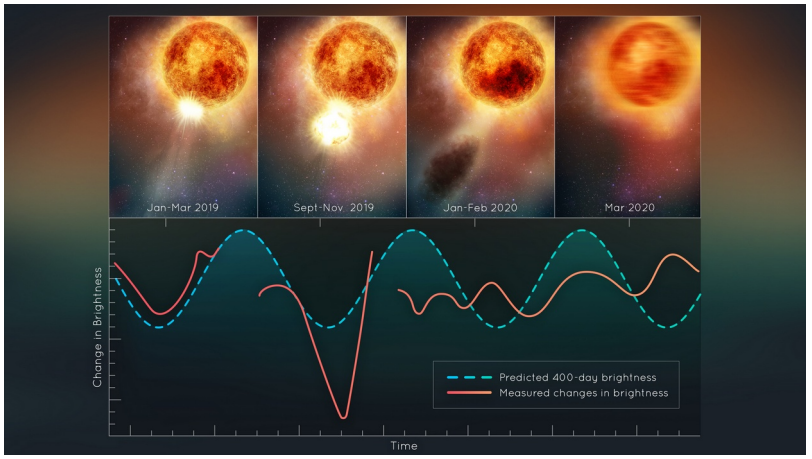
Betelgeuze: 0,4-1,2 magnitúdó közötti fényességingadozás (SR).
John Herschel fedezte fel a fényváltozását 1836-ban. 3100 K hőmérsékletű (M2Iab) szuperóriás 425 fényévre. Forró folt a felszínén.
UV-ben kétszer akkora, mint látható fényben (kiterjedt kromoszféra).
Az IUE-vel 420 napos oszcillációt is találtak.

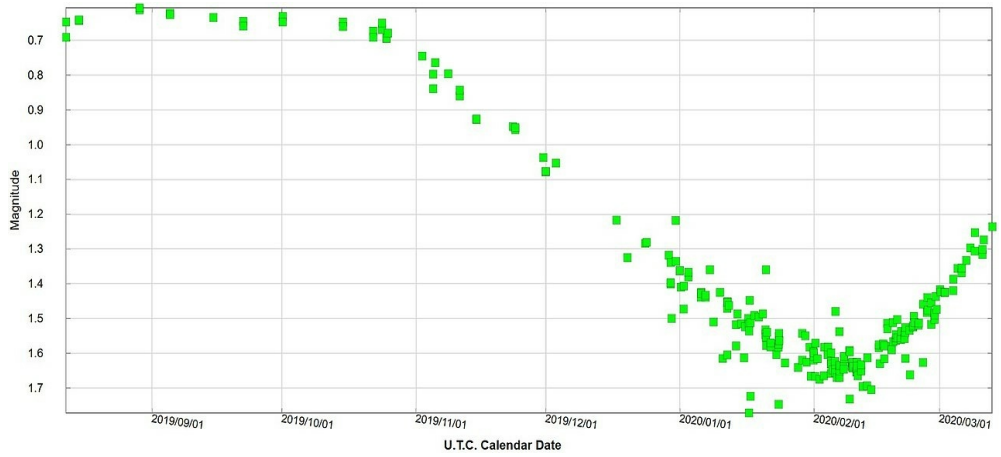


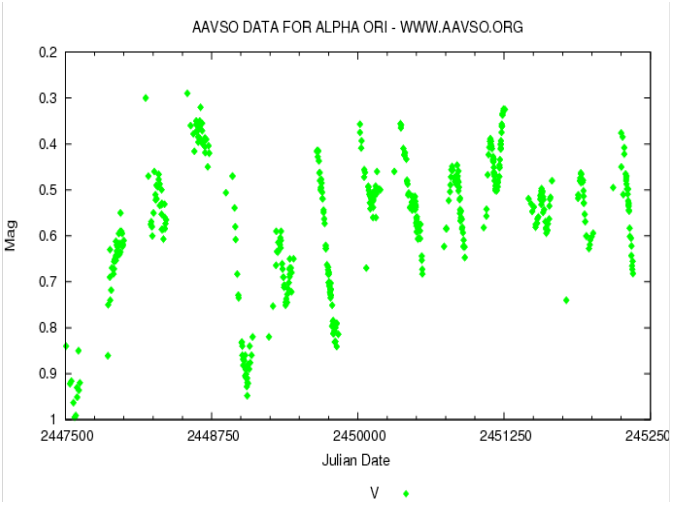



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

2019-ben erősen halványodni kezdett a Betelgeuze, de a fényesség csökkenése 2020-ra megállt, sőt visszafordult.
A csillag déli feléről forró anyagcsomó lövellt ki 300 ezer km/h sebességgel.
Az így kialakult porfelhő részben eltakarta a csillagot.

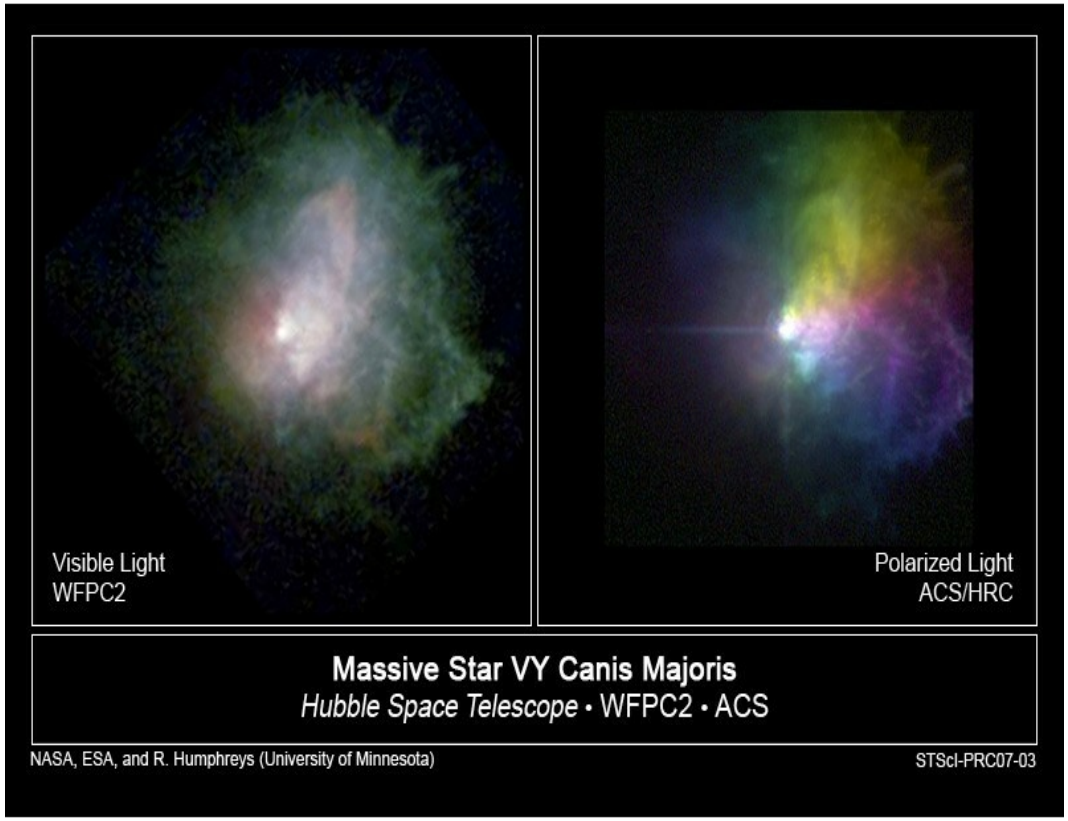


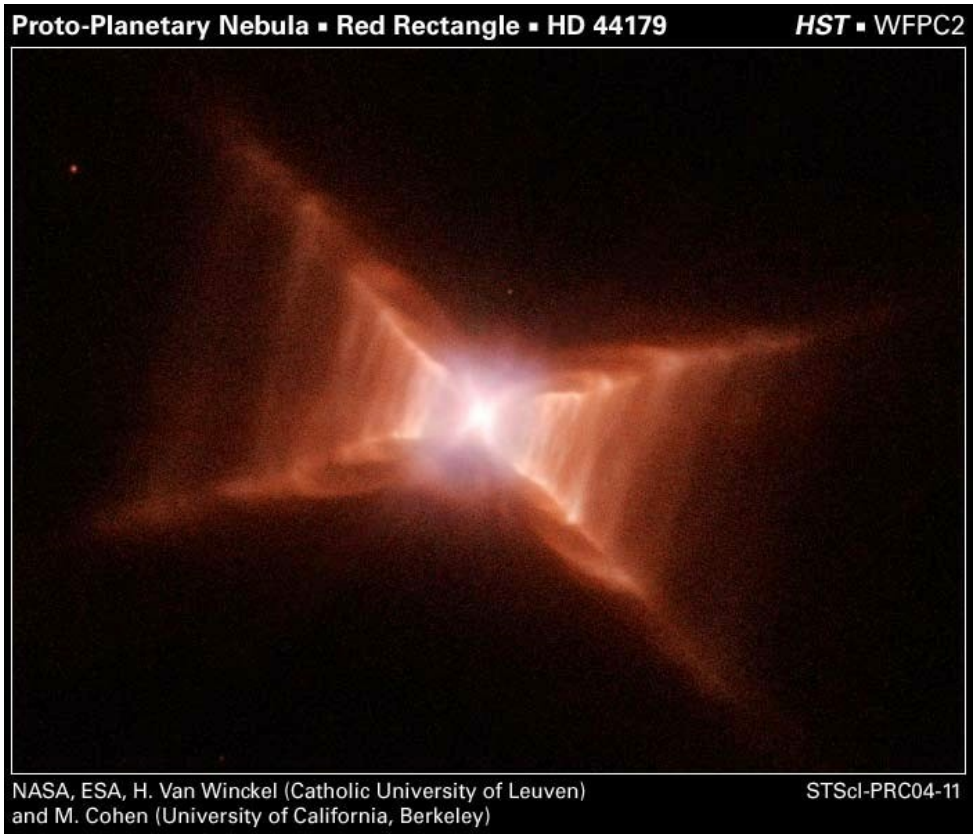
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

VY Canis Majoris: 2000 $R_{Nap}$ sugarú hiperóriás, 5000 fényévre.
4500 CSE sugarú reflexiós köd veszi körül. 1801 óta szekuláris halványodás és hónapos-éves időskálán 0,5-3 magnitúdós fényességingadozás.
A kitörések során tízszeresére nő a tömegvesztés, és a csomók alapján 3D-ban rekonstruálható is.



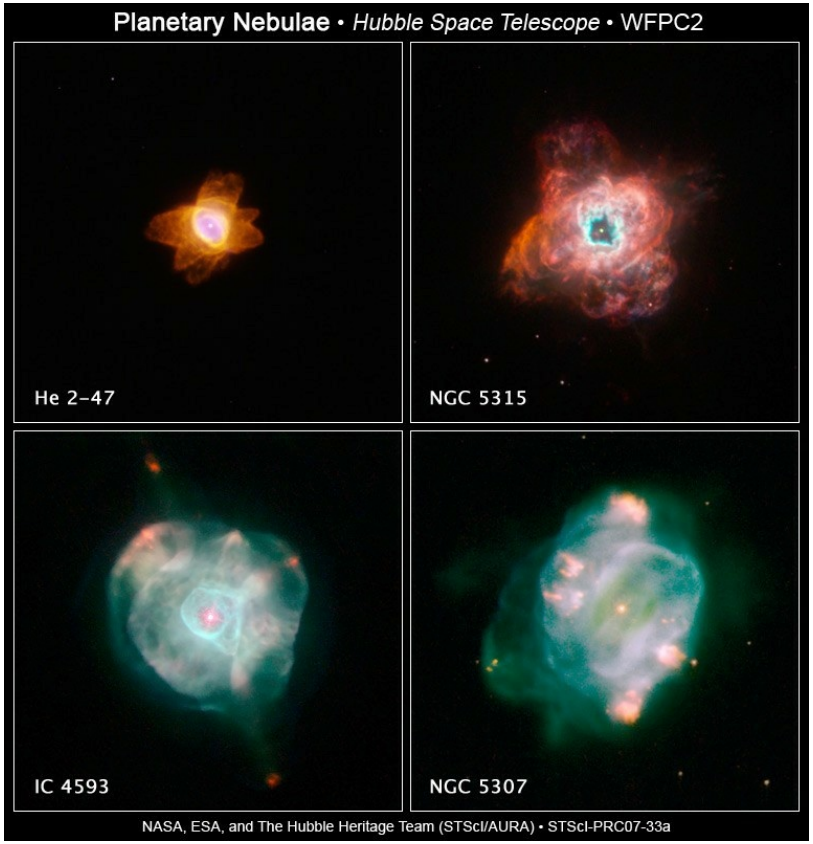
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

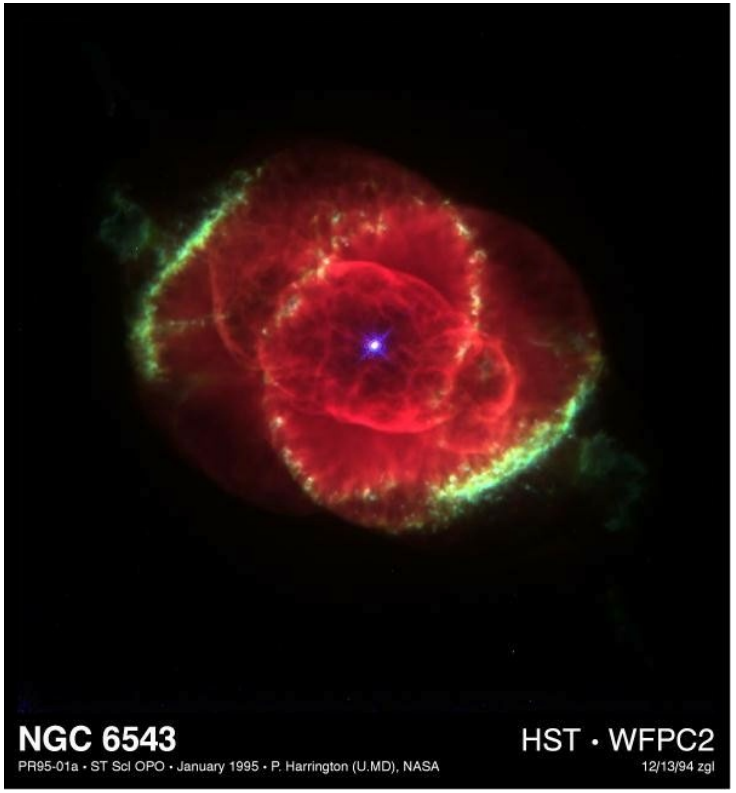
Vörös téglalap: protoplanetáris köd a HD 44179 kettőscsillag körül. Színe a porfelhőbeli molekuláktól származik (szénhidrogénektől). X alakú, nem négyszög: bipoláris kiáramlás + tömegvesztési epizódok.
Hasonló szerkezetű köd van a később szóba kerülő *η* Carinae körül, de ott a kettős rendszerben nagyobb tömegűek a csillagok.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

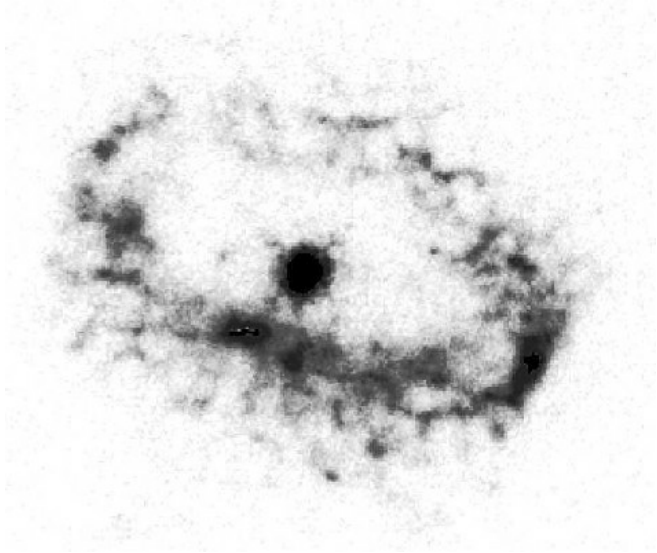
**Planetáris ködök:** 10000 éves csillagfejlődési epizód.
Vörös: N, sárga: H, kék: O. A gerjesztés korfüggő. Mind a négy kb. 7000 fényévre van (balra lent). NGC 6543: 1000 éves, a Dracoban, 3000 fényévre. Jellemző a tengelyes szimmetria, és azt a kettősség is okozhatja.

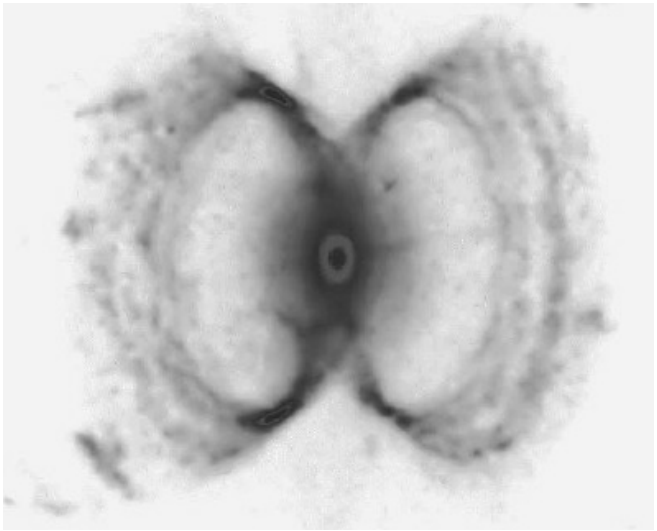


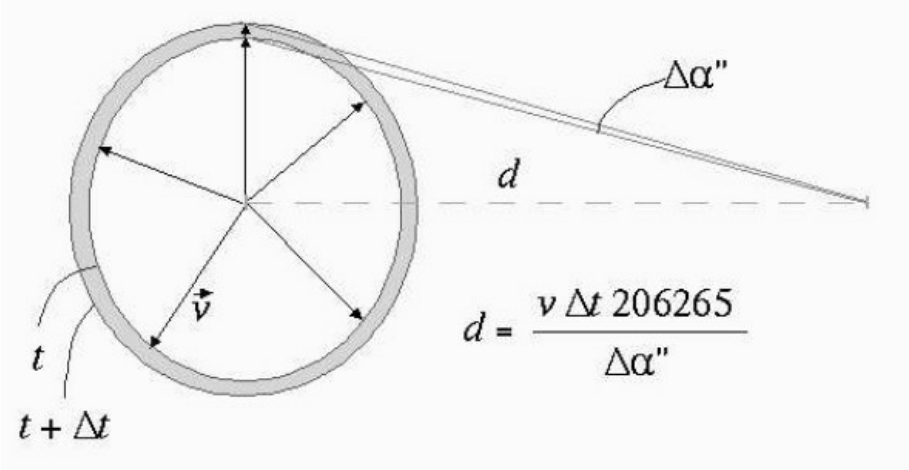



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Planetáris ködök szimbiotikus mira társcsillaggal
He 2-147: V347 Nor (jobbra)
*P* > 250 nap, *A* = 1 mag J-ben
He 2-104 (Déli Rák-köd): V852 Cen (lent)
*P*~400 nap, *A* = 0,4 mag K-ban
Távolságmeghatározásra alkalmas!
(tágulási parallaxis – majd a nóváknál is)

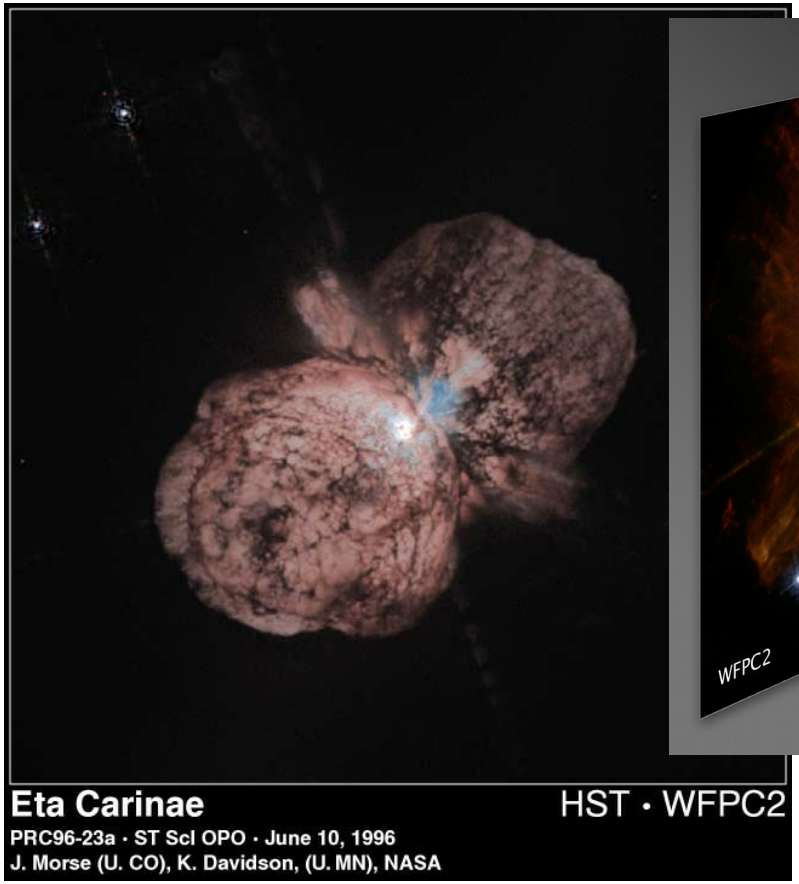


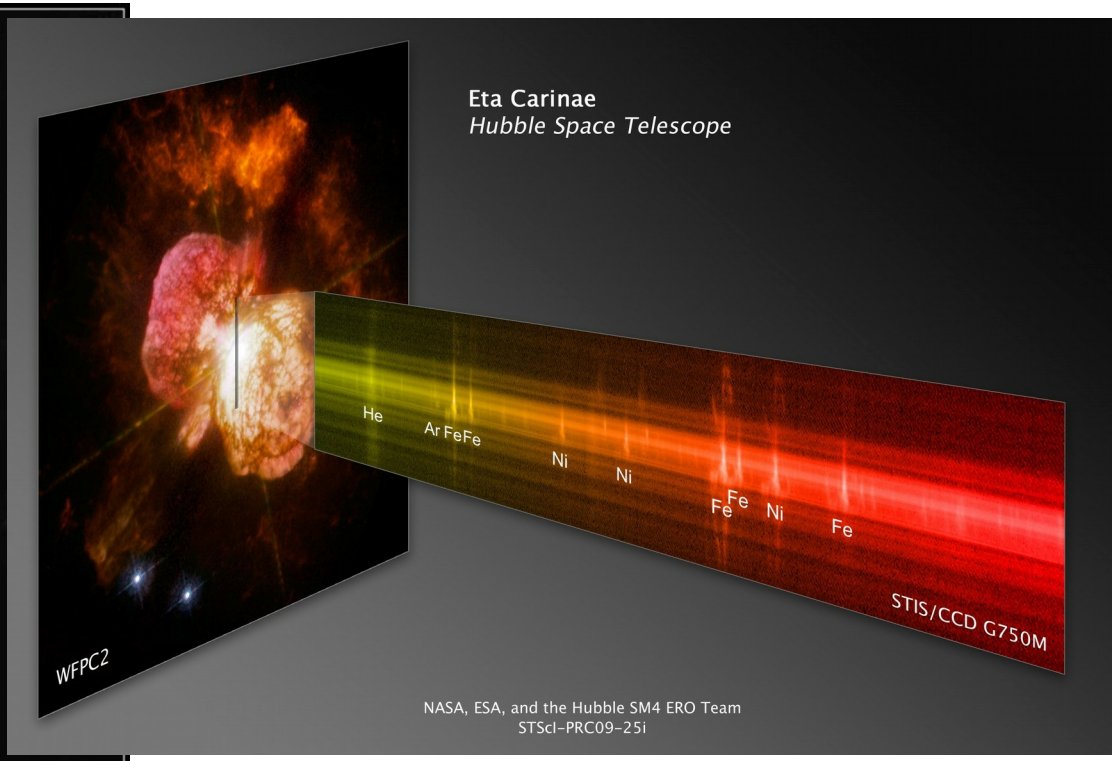




# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

*η* Carinae: 8000 fényévre. Az 1840-es évek elején az égbolt legfényesebb csillaga volt egy ideig. Akkor keletkezett a köd körülötte.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az $\eta$ Carinae környezeti hatásai. Részlet a 200 fényév kiterjedésű Carina-ködből. UV: kék, optikai: zöld, IR: vörös

**Figure 2.** The color Hubble Heritage image of the inner Carina Nebula including the Tr 14 and Tr 16 clusters, the Keyhole, and $\eta$ Carinae, plus several newly discovered HH jets. This is made from a large ACS H$\alpha$ mosaic used for the intensity scale in the image, while the color coding is taken from ground-based narrow-band images obtained with the MOSIAC camera on the 4m Blanco telescope at CTIO (from Smith et al. 2003), with [O III] in blue, H$\alpha$ in green, and [S II] in red. This ground-based image was also used to patch small gaps in the ACS mosaic. See the Hubble Heritage webpage for more information about the image processing for this large mosaic, where color images for individual jets and other structures can be found as well (http://heritage.stsci.edu). The full field shown here is roughly $12' \times 25'$. The rectangular boxes show the detailed fields of view for various HH jets included in the large mosaic. North is to the upper right; the small boxes around individual HH jets are aligned with R.A. and DEC directions.

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

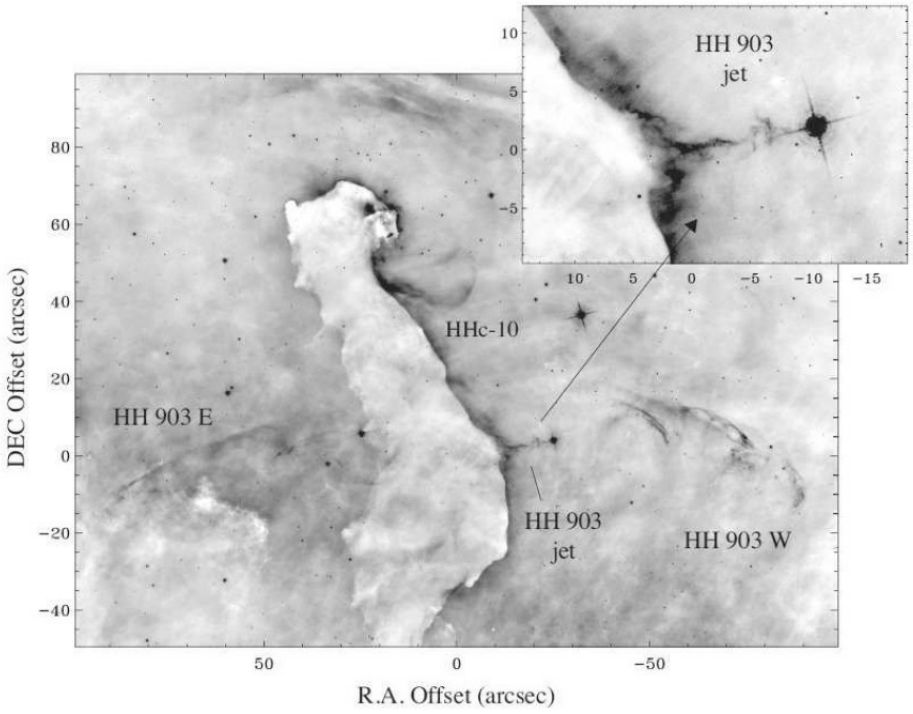



**Figure 6.** ACS Hα image of the large dust pillar (G287.88-0.93) in the South Pillars of Carina. The field contains the parsec-scale bipolar outflow HH 903, which flows east and west to either side of the middle of the pillar and is over 2 pc in length. The field also contains the candidate jet HHc-10 associated with the pillar head (discussed later). North is up and east is to the left.

Az $\eta$ Carinae
környezeti hatásai

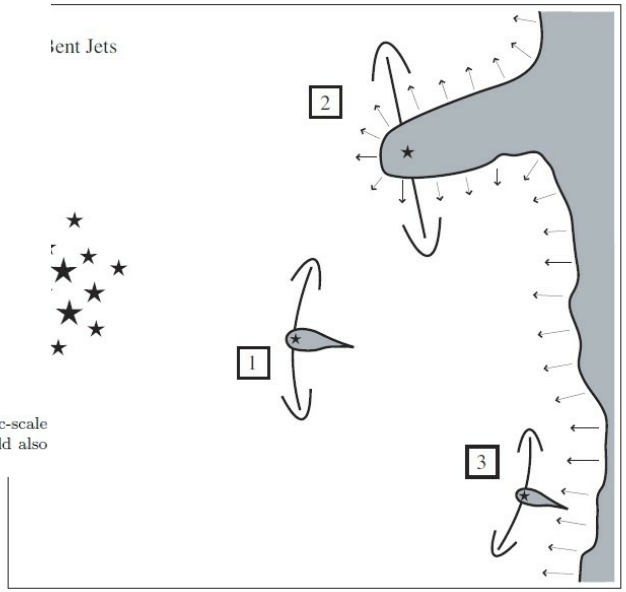
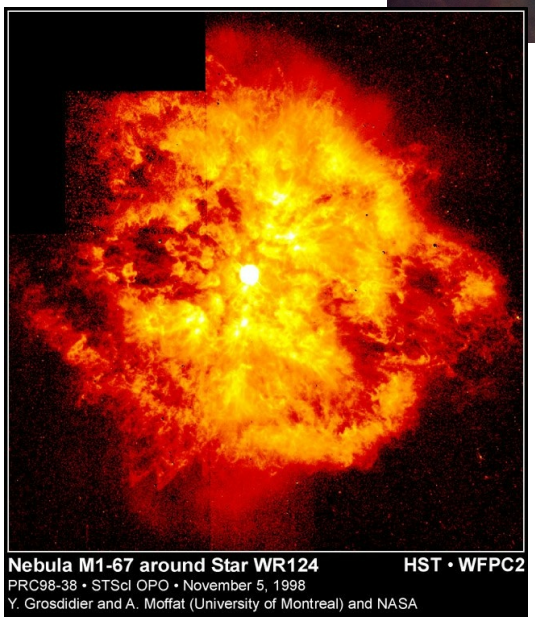
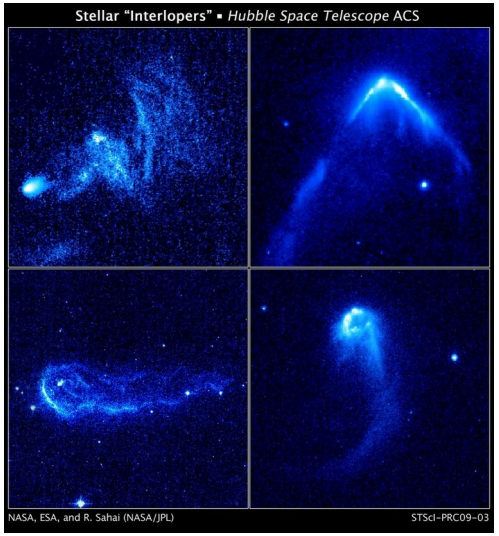



**Figure 33.** A schematic illustration referring to how HH jet axes may get bent by external mechanisms, as discussed in §6.2. A cluster of massive stars is located at left. Case 1 refers to a jet that is bent away from the massive stars by radiation or winds. Case 2 refers to a jet whose axis is not bent because it is moving through a diverging photoevaporative flow from the surface of a dust pillar, which may protect the jet from winds or inhibit its bending. Case 3 shows a jet axis that is bent toward the massive stars because it is located amid a strong photoevaporative flow from the surface of an adjacent molecular cloud, which effectively acts as a tail wind and dominates over the direct radiation or wind from the massive stars.

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

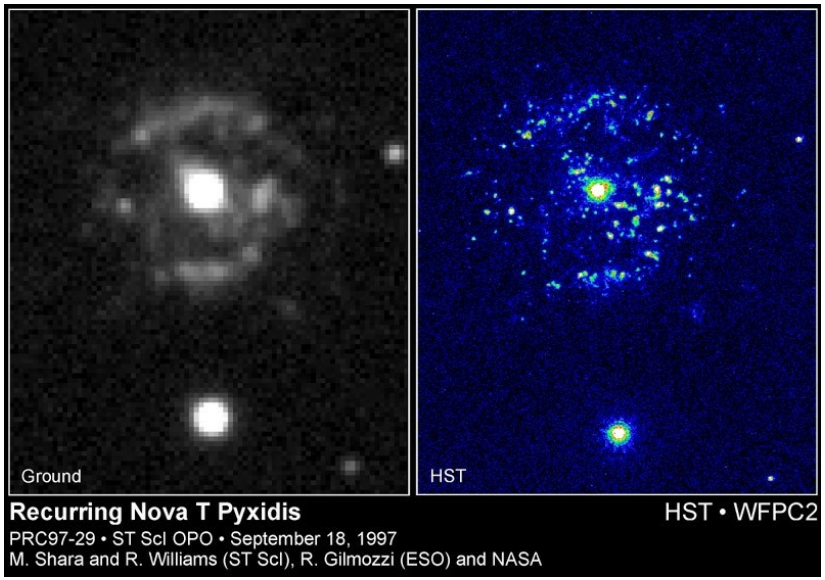
Buborék-köd (NGC 7635):
Nagy tömegű, forró csillag körül 7100 fényévre, 7 fényév átmérőjű (jobbra fent)
WR 124 = QR Sge:
Wolf–Rayet-csillag.
Nagy kezdeti tömegű, forró csillag 15000 fényévre. Erős, de nem egyenletes tömegvesztés (10-5 naptömeg/év) (balra lent).
Nagy sebességű, de nem fiatal szökevény-csillagok tömegvesztéssel (jobbra lent).

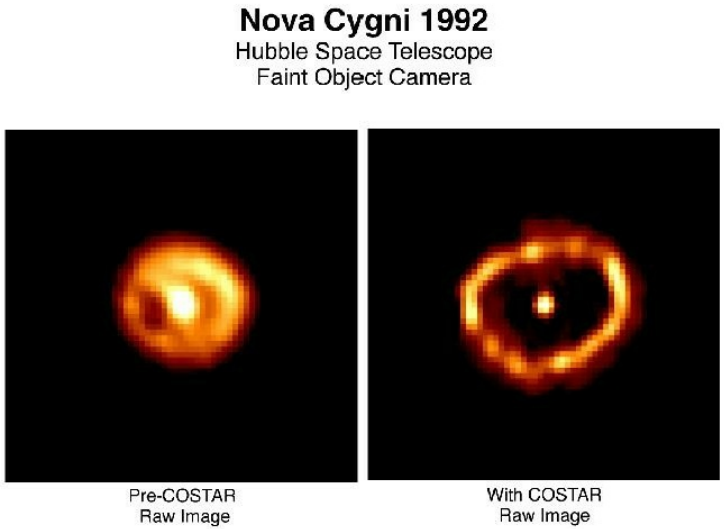


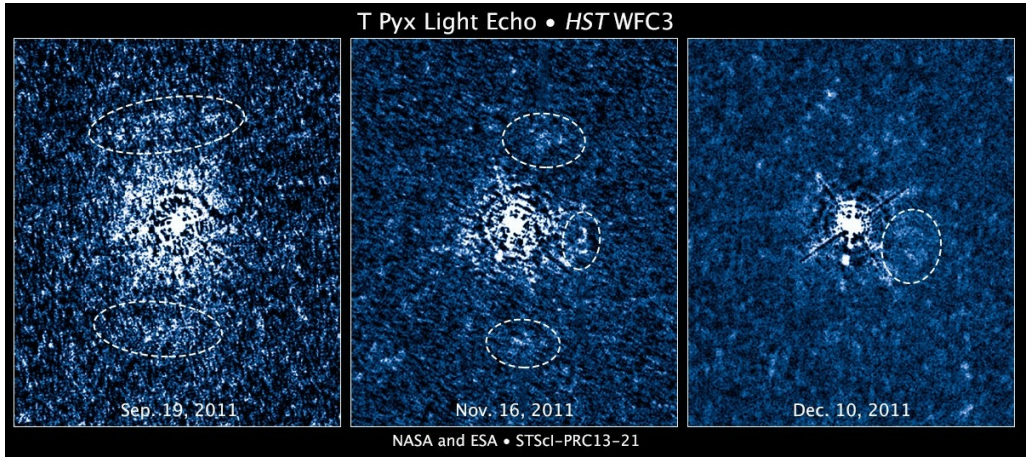



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Nova Cyg 1992 = V1974 Cygni: a burok tágulása alapján 10430 fényév távolságra (467 nap időkülönbségű két felvétel alapján, *balra lent*).
T Pyxidis: ismétlődő nóvakitörések (1890, 1902, 1920, 1944, 1967, aztán „késett”: 2011). Nyolc koncentrikus gyűrű – az előző kitörések lenyomata (*jobbra*).



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

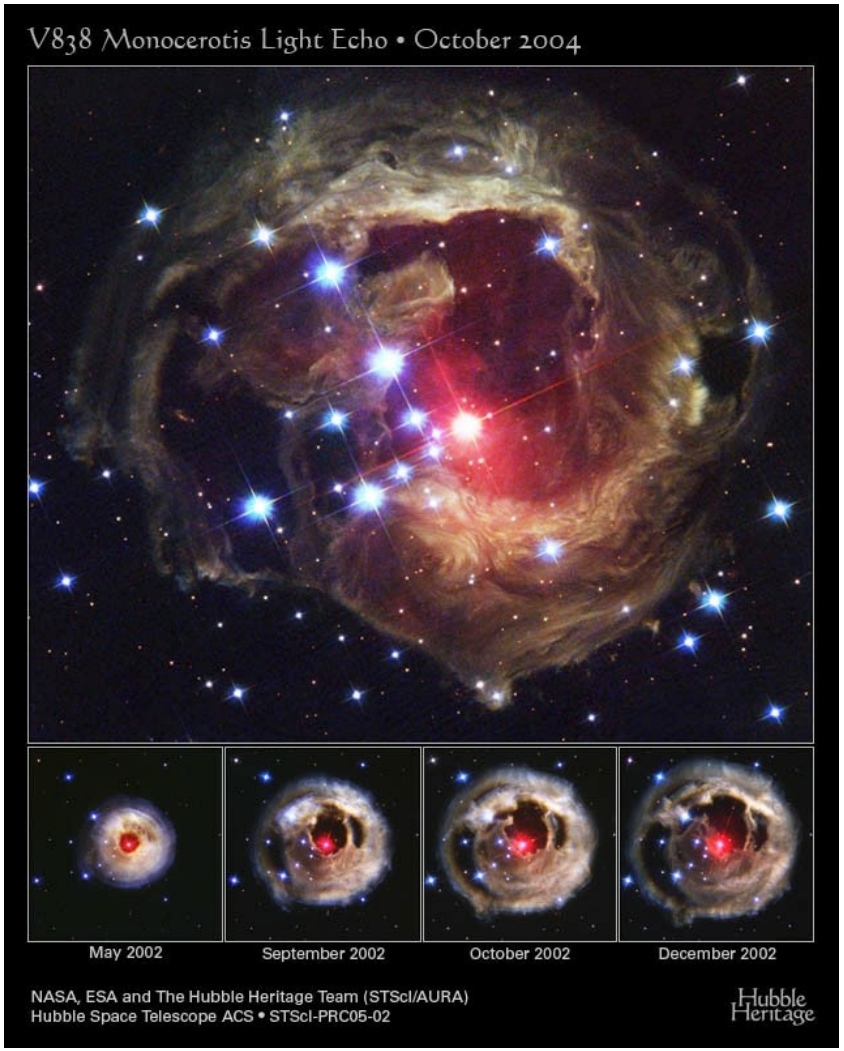
V838 Mon = Nova Mon 2002

6000 fényévre, 600000 $L_{Nap}$,
hirtelen felfényesedés
(a legnagyobb
luminozitású csillag volt
akkor a Tejútrendszerben).

Nem nóva, nem dobott ki anyagot,
hanem kitágult hideg
szuperóriássá. Fényechó
(a képen 2002. május 20. és
dec. 17. között).

A későbbi észlelések alapján egy
eredetileg 8 naptömegű fiatal
csillag összeolvadása néhány
tized naptömegű, fősorozat
előtti párjával.

2011-től lassan fényesedik
(összehúzódó, forrósodó
atmoszféra okozhatja). Még
egy csillag tartozik hozzá.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Cefeidák (szuperóriás csillagok) kísérőinek közvetlen kimutatása. Trigonometrikus parallaxis efeidákra, de a kísérő léte zavar a parallaxismérésénél. Távolságmeghatározás a P-L összefüggés alapján. HST-kulcsprogram: a Hubble-állandó extragalaktikus cefeidák alapján (20 Mpc-en belül 18 galaxisban 800 cefeida): $H_0$ = 72 ± 8 km/s/Mpc.

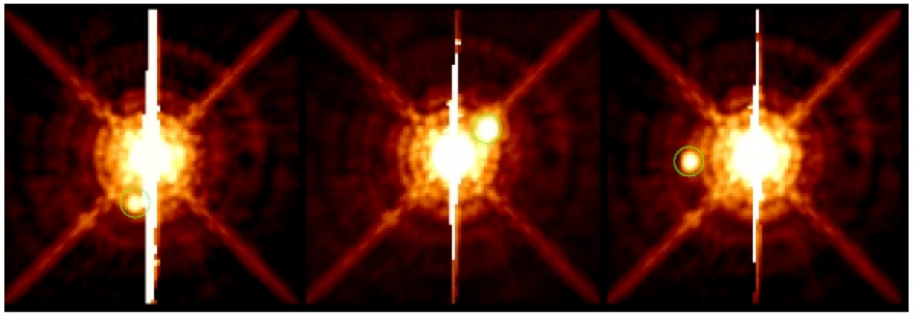
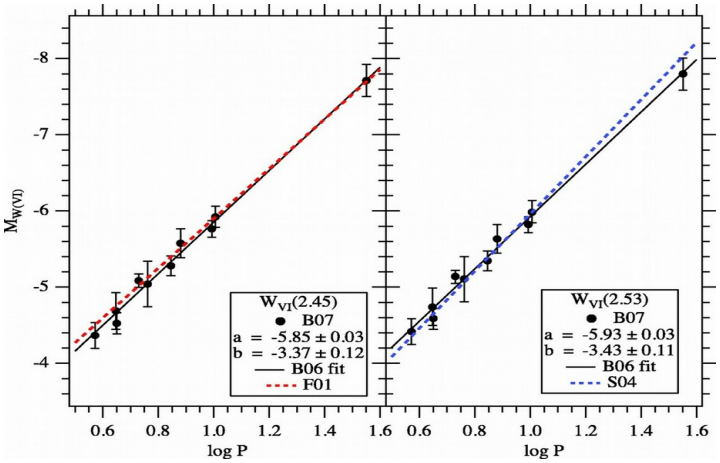
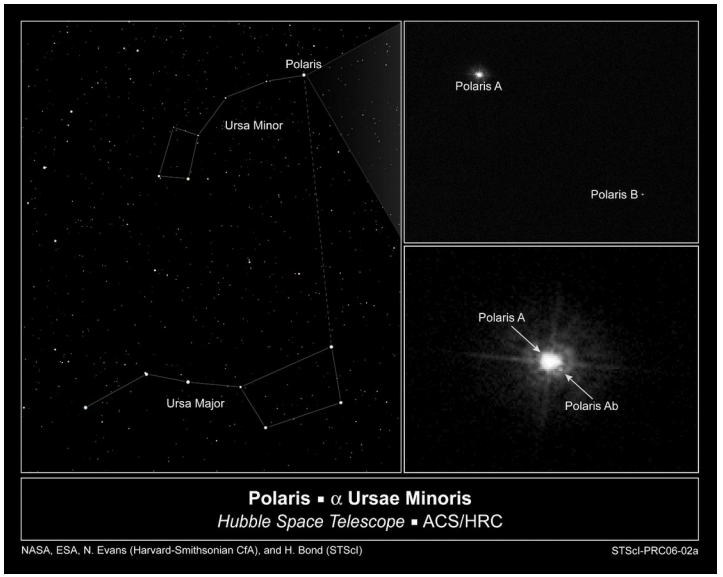


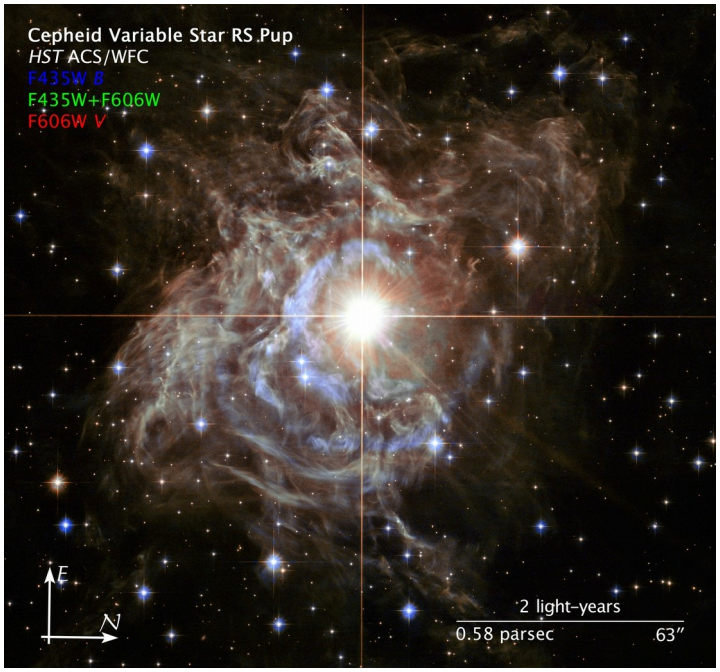
Fig. 1.— *HST* images of three Cepheids whose hot companions were resolved in WFC3 images: $\eta$ Aql (left), V659 Cen (center), and S Nor (right). These are $V$-band images, with a logarithmic stretch. Each frame is $4'' \times 4''$. Companions are circled in green.



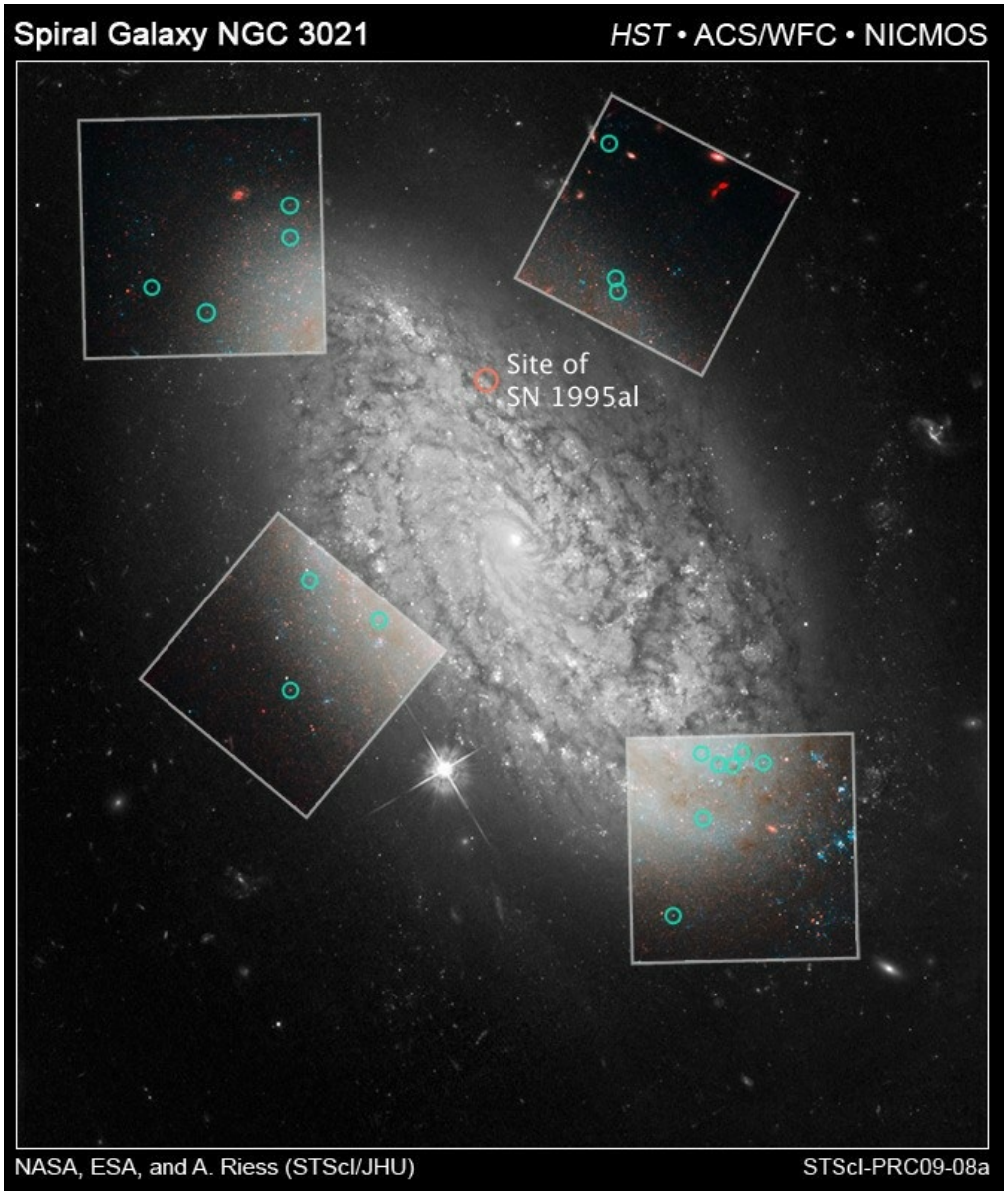
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

- Egyedi cefeida távolságának eddigi legpontosabb meghatározása: RS Puppis.
- Porburokba ágyazódva (a nagy tömegű burkot nem a csillag dobta le, sokkal nagyobb a burok tömege), de a csomók látszó fényessége fáziskéséssel követi a cefeida kb. 41 nap periódusú fényváltozását (fényechó).
- Az ebből meghatározott távolság: 1992 ± 28 pc (1,4%-os bizonytalanság).
- Később az ESO VLT-vel végzett polarimetriai mérésekkel sikerült pontosítani a távolság értékét.



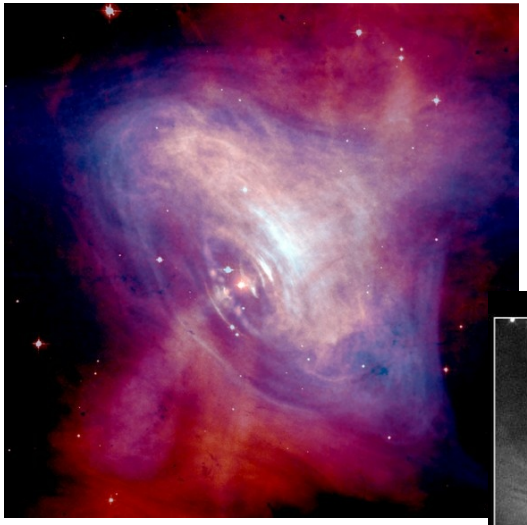
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

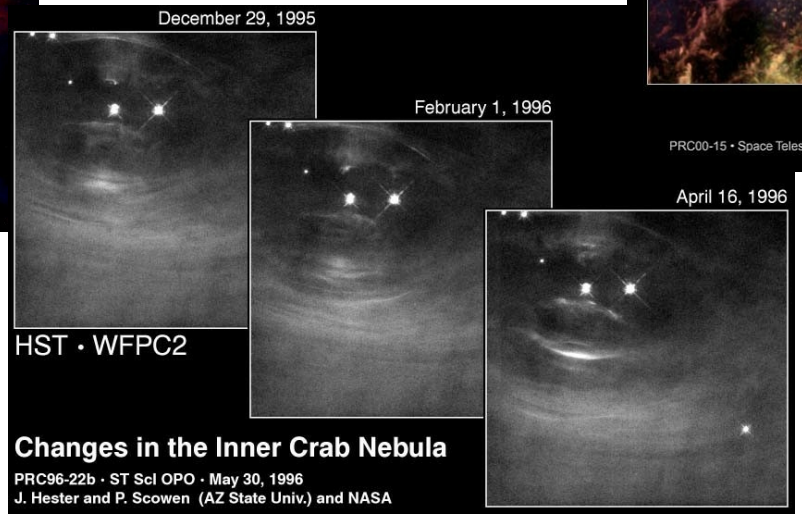
A kozmikus távolságskála pontosítása érdekében azok az extragalaxisok különösen fontosak, amelyekben **cefeidák** és **szupernóvák** egyaránt ismertek. Ezek közé a galaxisok közé tartozik az NGC 3021 is.

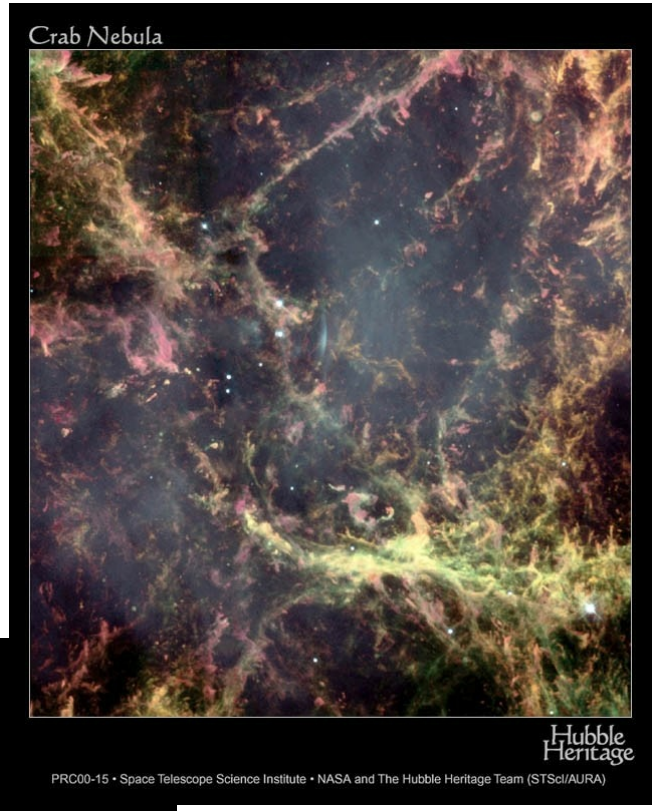


# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Szupernóvák és környezetük:
a tejútrendszerbeli minta eléggé szegényes, de alaposan vizsgálták. Együttműködve nagyenergiás kutatásokkal.



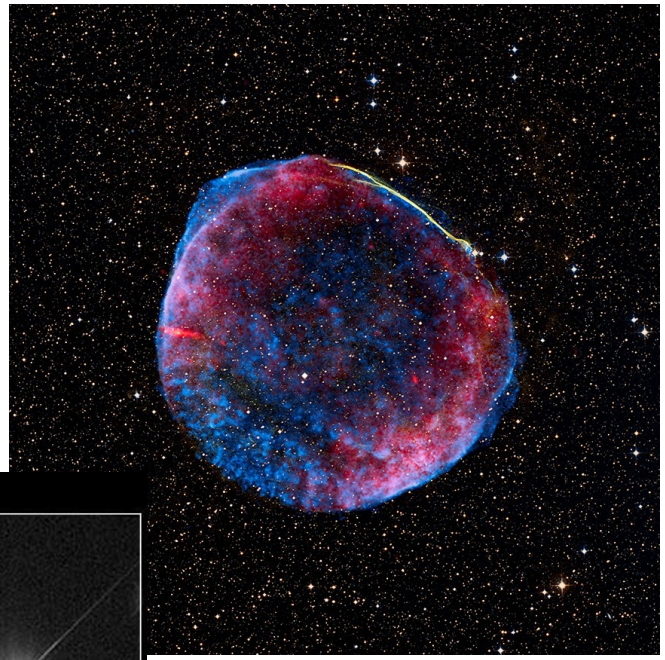


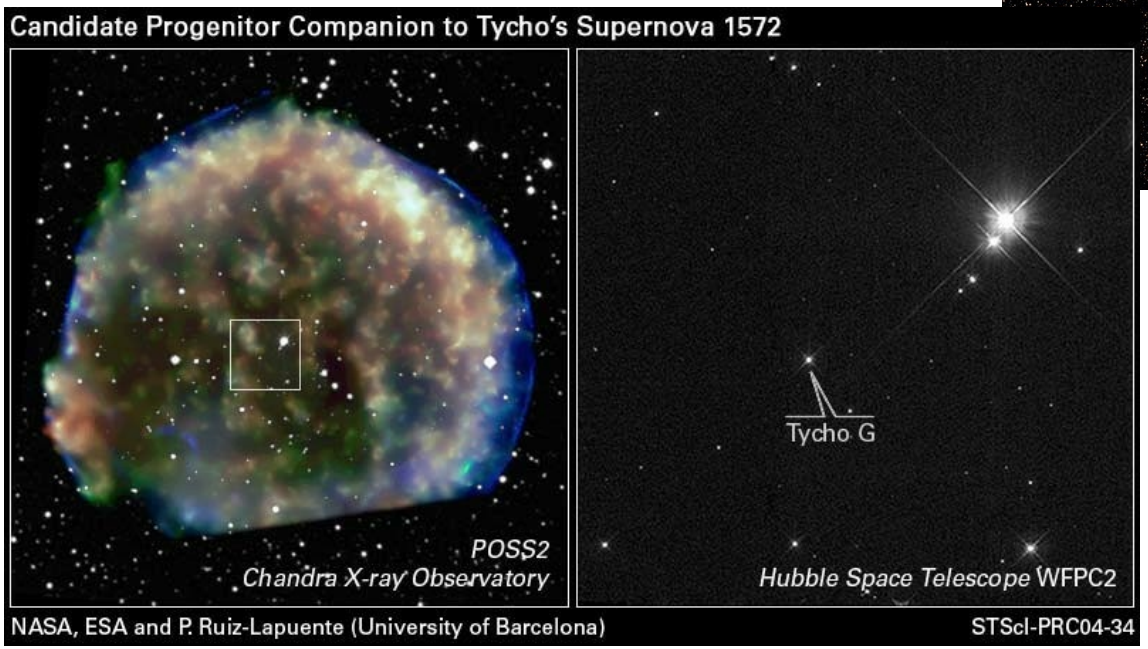



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az 1006-ban felfénylett szupernóva maradványa (jobbra)

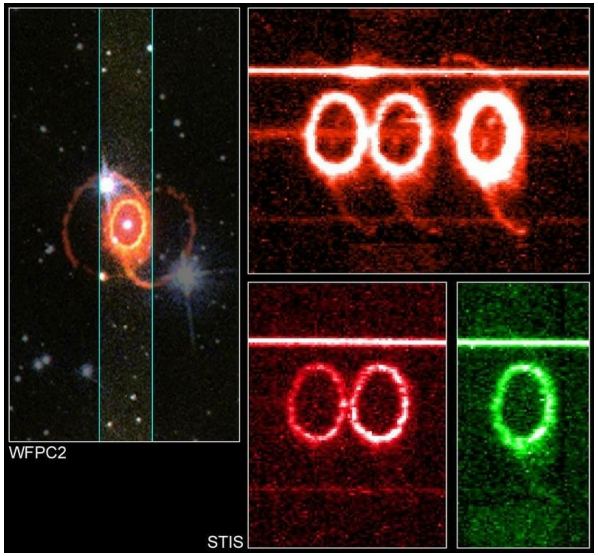
A Tycho-féle szupernóva SNIa volt: a kísérőcsillag nagy sebességgel távolodik a SN-maradványtól (a sajátmozgás és a kémiai összetétel igazolja). Bizonyíték a robbanás aszimmetrikus voltára.

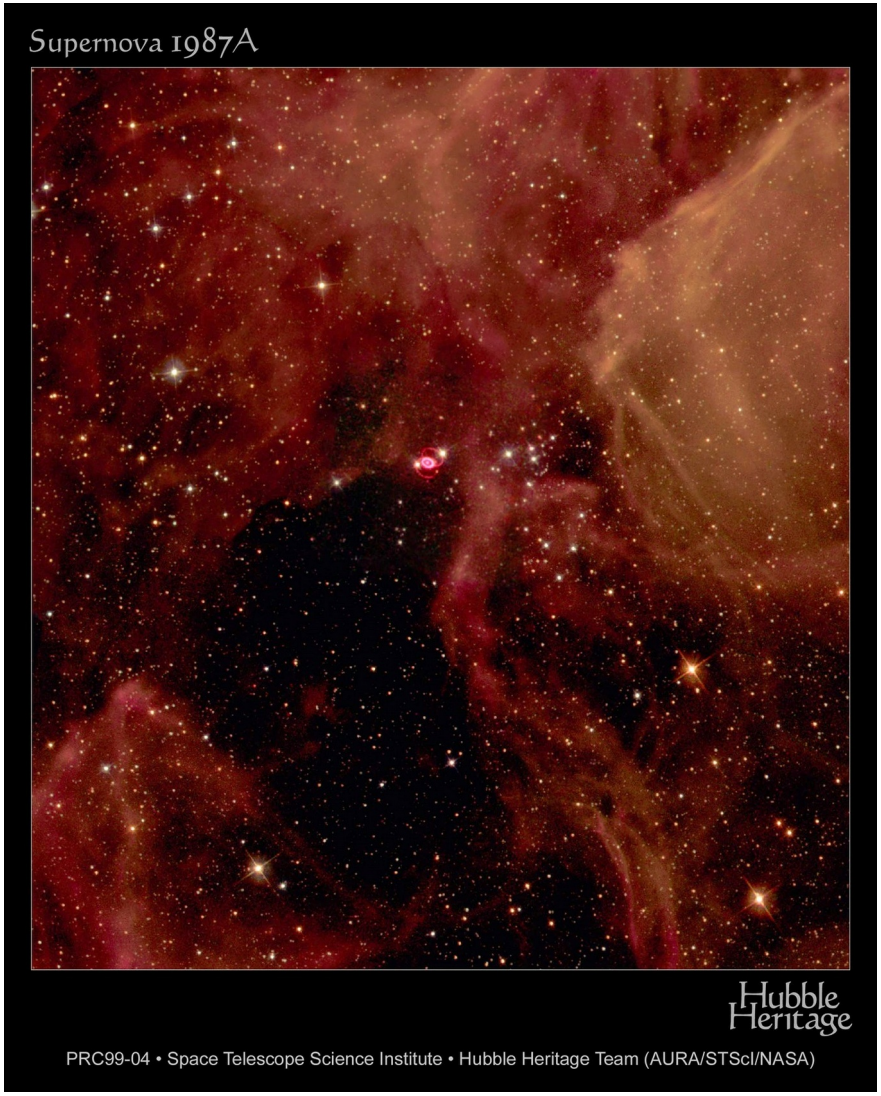




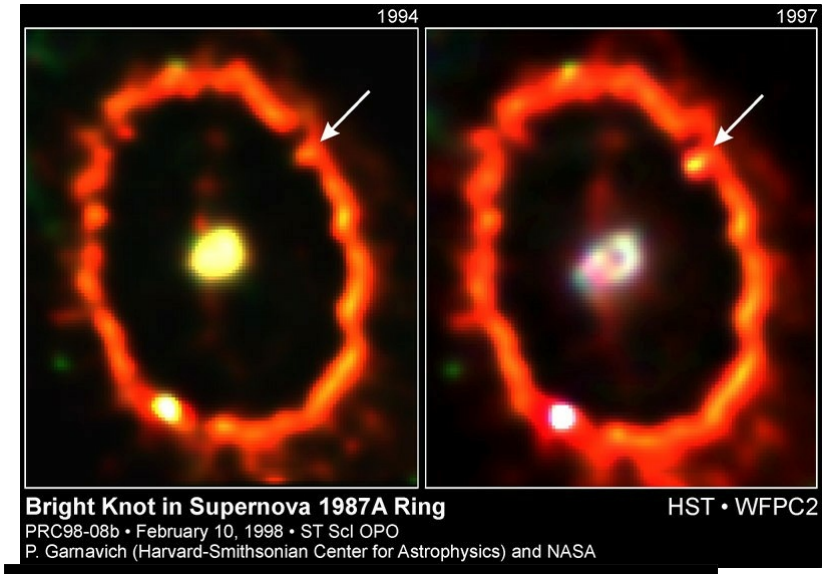
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

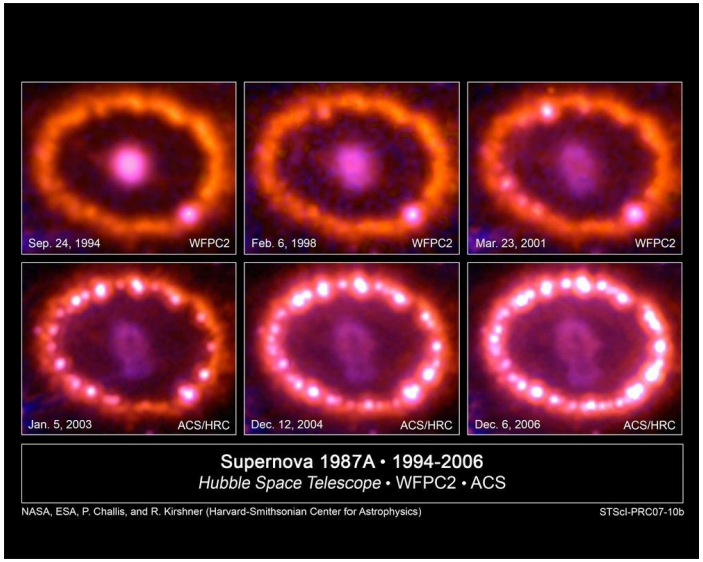
Az SN1987A szupernóva a Nagy-Magellán-felhőben: kék szuperóriás robbant, de 10000 éve még vörös szuperóriás volt. A visszamaradt neutroncsillag még nem látszik. Az észlelések az $^{56}Ni \rightarrow {}^{56}Co \rightarrow {}^{56}Fe$ bomlási sort igazolták (kb. 0,08 naptömegnyi vas).

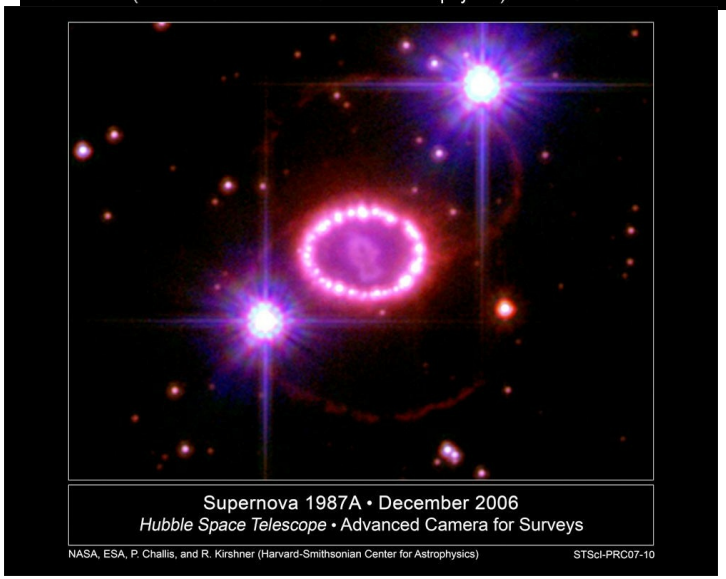


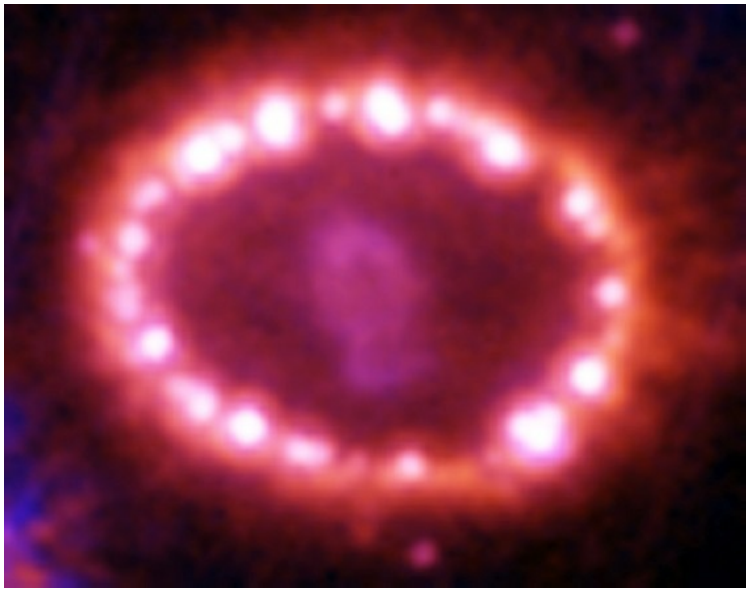



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

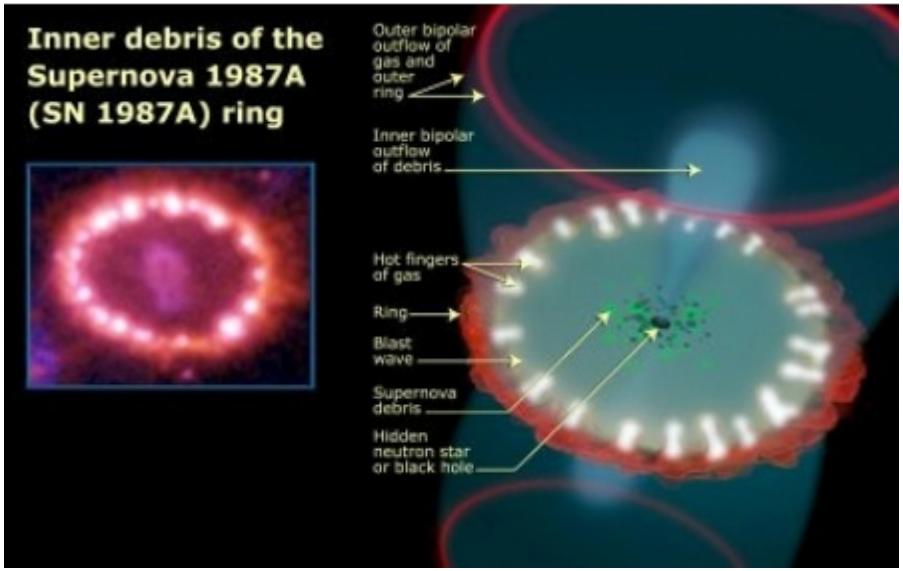


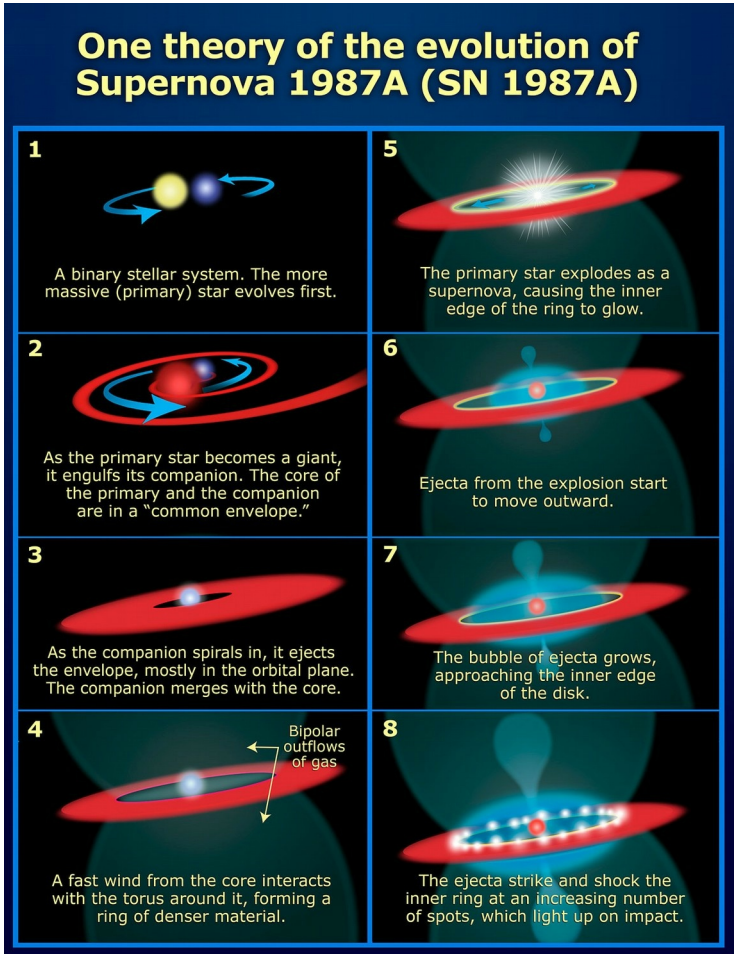



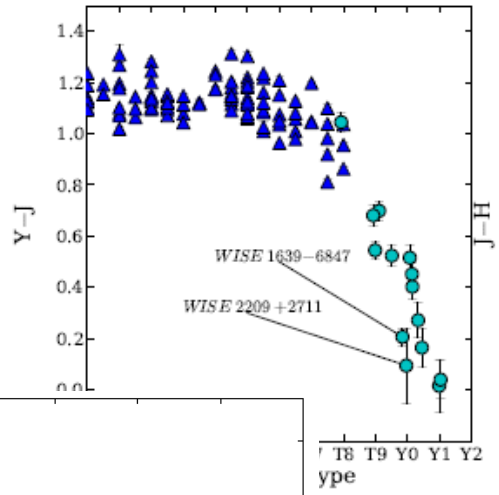



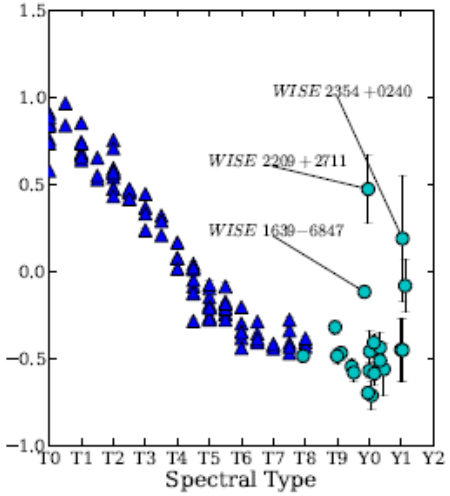
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

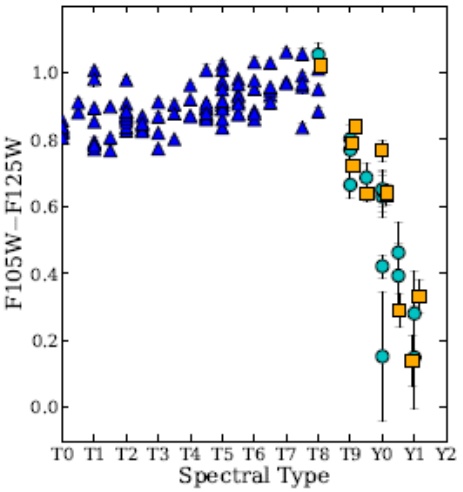


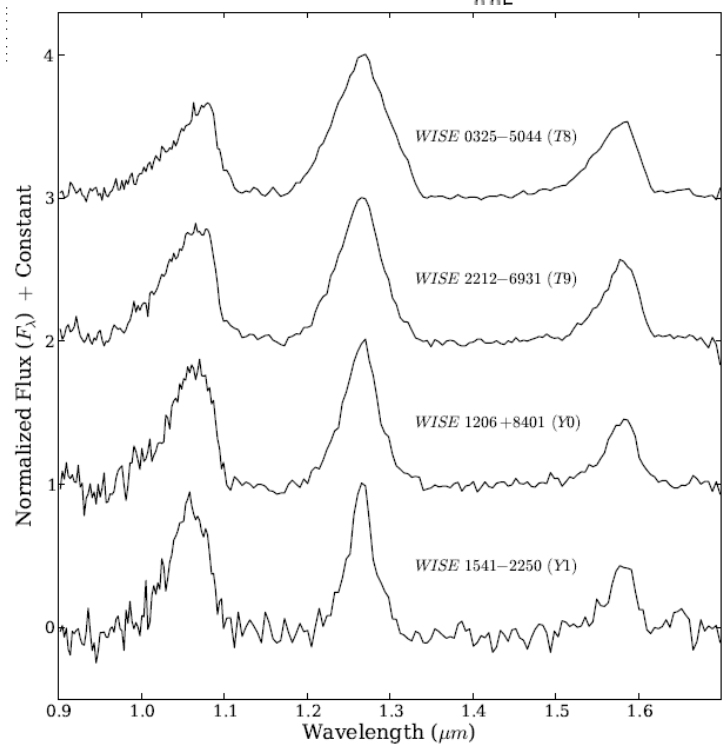



# Ne feledkezzünk meg a színképekről sem!



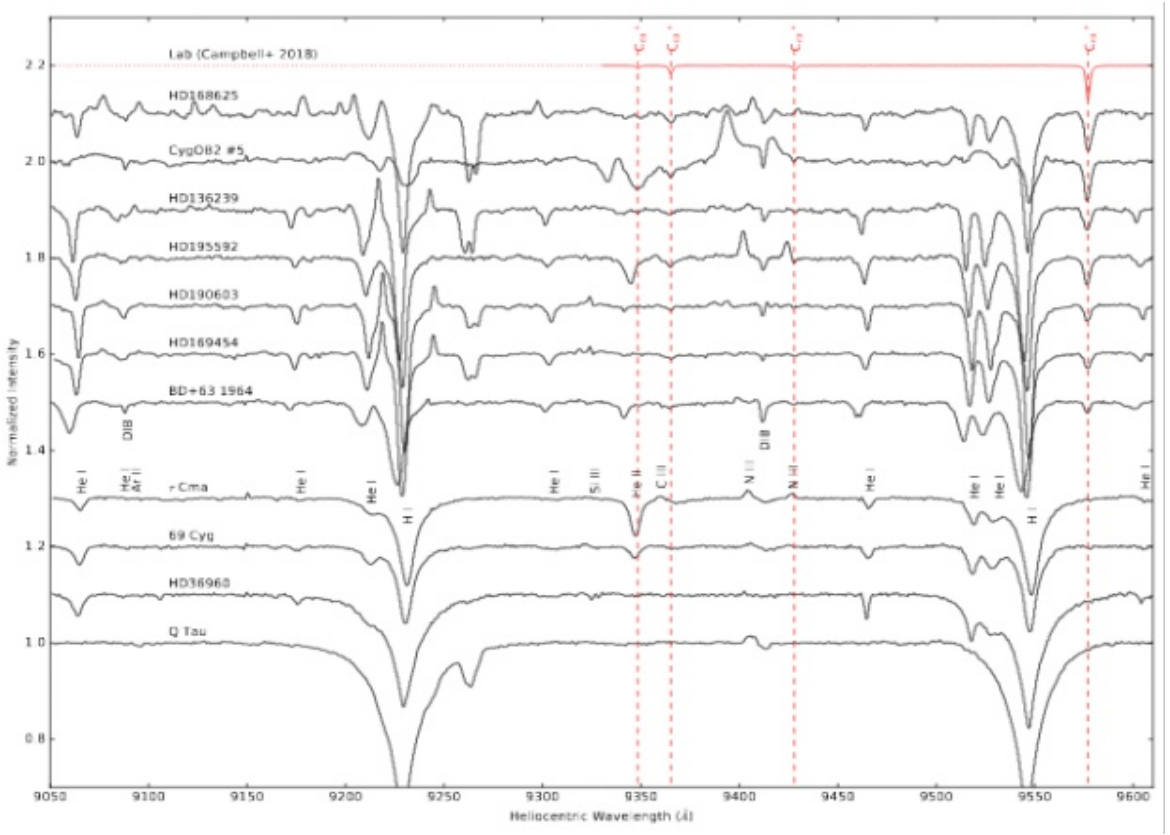




Barna törpék színképe és helye a szín-fényesség diagramon (Apai et al).

# Fullerén a csillagközi anyagban

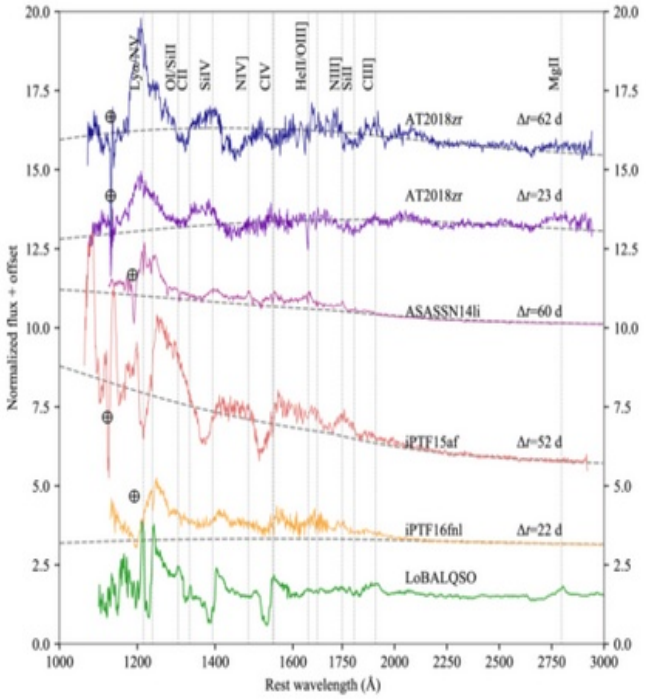
Erősen vörösödött csillagok STIS színképében a közeli IR-ben diffúz sávok észlelése 934,8, 936,5, 942,8 és 957,7 nm-nél (ez utóbbi a legerősebb). A tellurikus sávok a HST-színképekben nem jelennek meg. A sávok a fulleréntől ($C_{60}$-as karbonmolekula) származnak.



# Színképek kellenek, lehetőleg mindenről

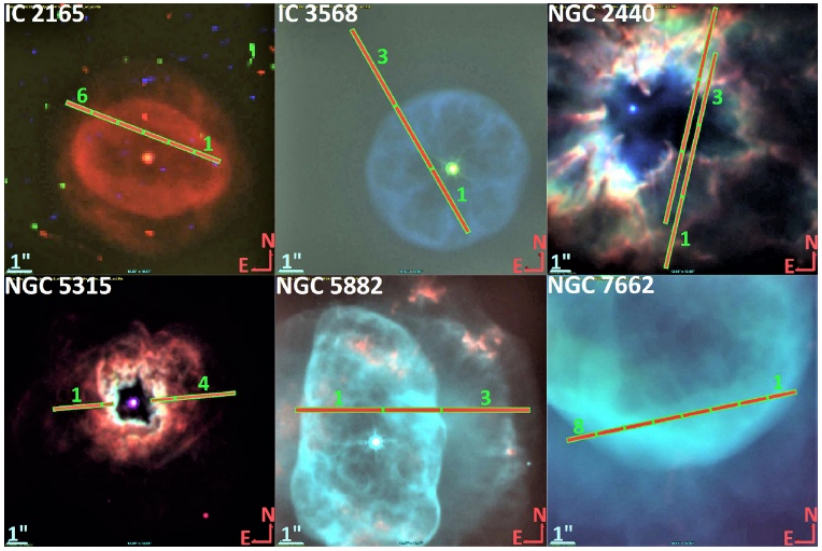
Árapály-katasztrófát elszenvedő objektumok színképe (tidal disruption events, TDE).

Planetáris ködökről résszínképek készültek.




JV spectroscopy of TDEs. Broad absorption and emission UV-resonance lines are detected on top of ntinuum, including Lyα, N V λ1240, Si IV λ1400, and C IV λ1550. A UV spectrum of a low-ionization rption line quasar (LoBALQ) is shown for comparison. Figure from Hung et al. (2019).

*Co-spatial UV-optical STIS spectra of six PNe*




re 1. The locations of the extracted spectra where all seven gratings spatially overlap one another from STIS. In addition to the individual regions, n for each object was extracted over all the regions shown. The double slits in NGC 2440 are the result of a pointing error discussed in the text.

# Az ULLYSES projekt

Ultraviolet Legacy Library of Young Stars as Essential Standards (ULLYSES):
UV-spektrumok készítése nagy és kis tömegű csillagokról (DDT program, 1000 HST keringést rászánva). A táblázat a projekt jellemzőit közli. Jobbra egy nagy tömegű csillag színképe.

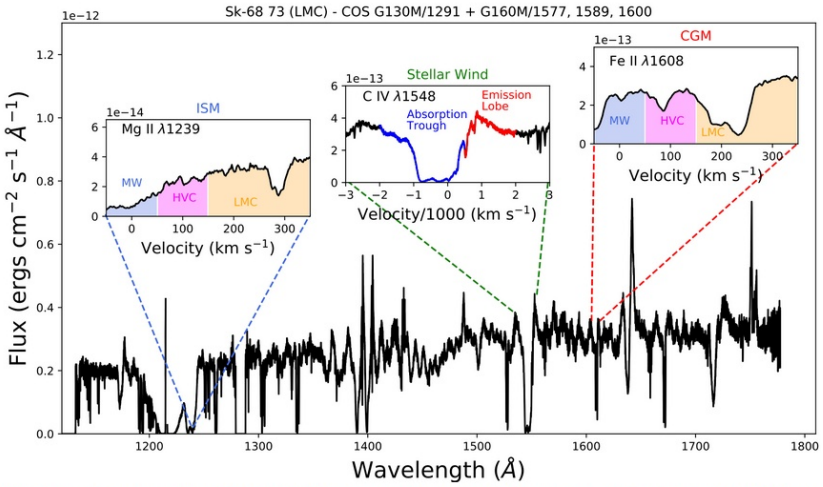



*Figure 1:* Example UV spectrum of the massive LMC star Sk-68 73, a BC2 Ia supergiant. The shortest FUV wavelengths will be covered by archival FUSE spectra or by new ULLYSES spectra using the COS/G130M/1096 setting. The longer FUV wavelengths will be covered by the STIS E140M or COS G130M+G160M gratings. The NUV waveler

Table 1: Instrument Configurations and S/N Goals for Massive Stars

| Mode | Wavelength range (Å) | Resolution | Continuum S/N | Spectral Types |
|---|---|---|---|---|
| COS/G130M/1096 | 937 – 1,241 | 3,000 – 8,000 (Segment A)<br>5,000 – 12,000 (Segment B) | 20 at 1,080 Å | O2-O9 |
| COS/G130M/1291 | 1,132 – 1,436 | 12,000 – 16,000 | 30 at 1150 Å | O2-B9 |
| COS/G160M/1611 | 1,417 – 1,792 | 13,000 – 20,000 | 30 at 1,590 Å | O2-B9 |
| COS/G185M/1953 | (1,830 – 2,080) | 16,000 – 20,000 | 20 at 1,860 Å | B2-B9 |
| COS/G185M/1986 | (1,860 – 2,110) | 16,000 – 20,000 | 20 at 1,980 Å | B2-B9 |
| STIS/E140M/1425 | 1,141 – 1,729 | 45,800 | 20 at 1,200 Å | O2-B9 |
| STIS/E230M/1978 | 1,607 – 2,366 | 30,000 | 20 at 1,800 Å | O9-B9 |
| STIS/E230M/2707 | 2,275 – 3,119 | 30,000 | 20 at 2,800 Å | B5-B9 |
| COS/G140L/800 | 798 – 1,988 | 1,500 – 4,000 | 15 at 1,600 Å | |

# Az ULLYSES projekt

Itt pedig a kis tömegű csillagok spektrumaira vonatkozó adatok és egy mintaszínkép látható.

Így spektrumkönyvtárat hoznak létre (a FUSE távoli UV-méréseivel kiegészítve).

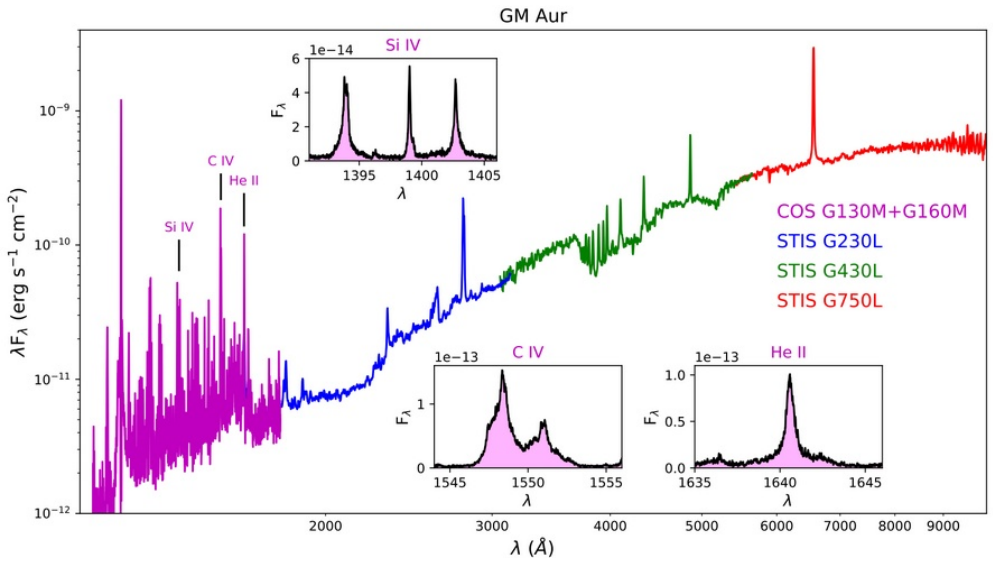
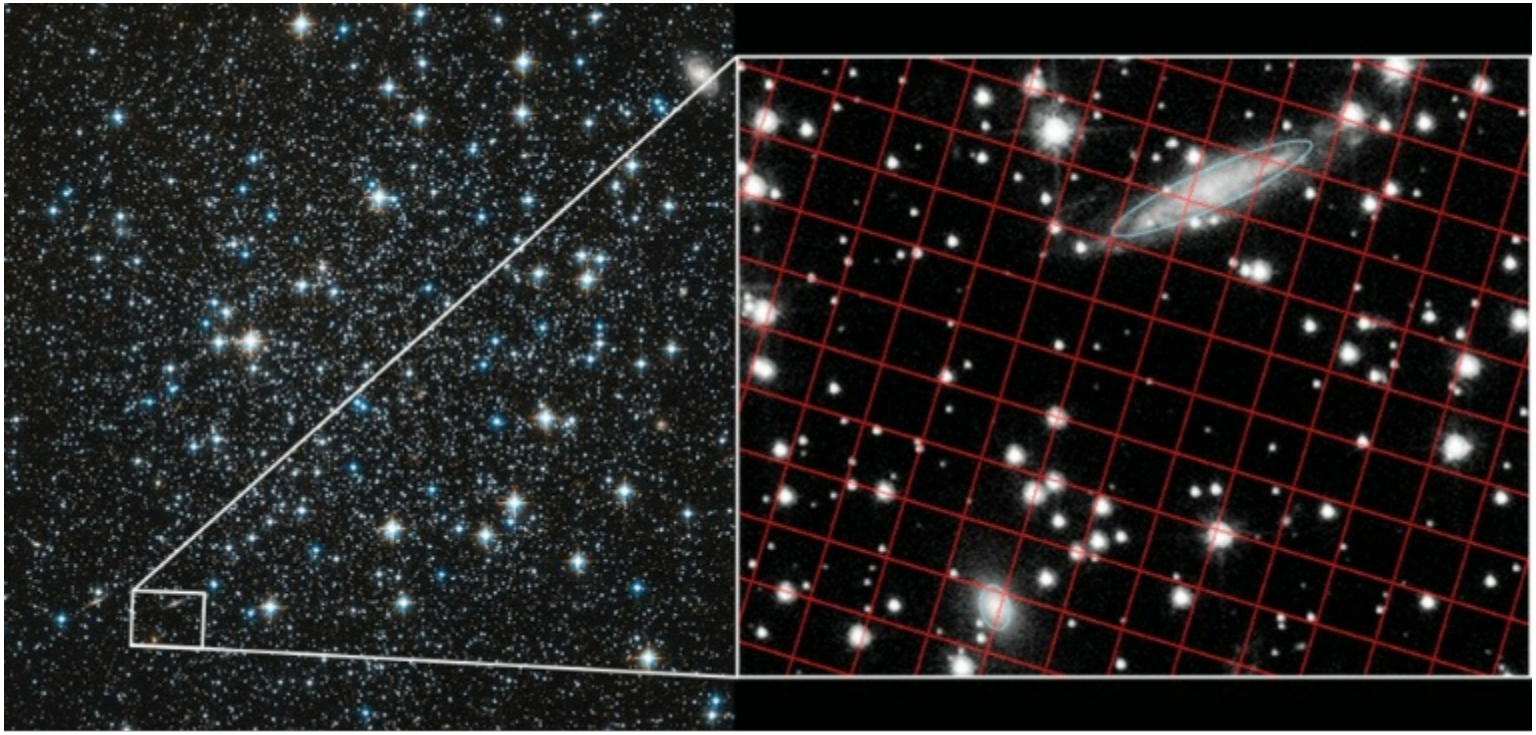



Table 2: Instrument Configurations and S/N Goals for Low-Mass Stars

| Mode | Wavelength range (Å) | Resolution | S/N |
|---|---|---|---|
| COS/G130M/1291 | 1,132 – 1,436 | 12,000 – 16,000 | 15 at N V λ1,239 |
| COS/G160M/1611 | 1,417 – 1,792 | 13,000 – 20,000 | 30 at C IV λ1,548 |
| STIS/G230L | 1,570 - 3,180 | 500 | 20 at Mg II λ2,800 |
| STIS/G430L | 2,900 - 5,700 | 500 | 20 at 4,000 Å |
| STIS/G750L | 5,240 – 10,270 | 500 | 20 at 5,700 Å |
| COS/G230L/2635 | 2,435 – 2,834 | 2,100 – 3,900 | 20 at Mg II λ2,800 |
| COS/G230L/2950 | 1,650 – 2,050 + 2,750 – 3,150 | 2,100 – 3,900 | 20 at Mg II λ2,800 |

# A sötét anyag nyomában

Sötét anyag a Tejútrendszerben: gömbhalmazbeli csillagok térbeli mozgásából; a Gaia DR2 adatait is használva.
HST: 34 halmaz 10 évet átfogó csillagpozíciói, Gaia: 12 halmazra radiális sebességek is (a képen az NGC 5466).
A Tejútrendszer össztömege: 500 milliárd naptömeg (200 milliárd csillag, 4 millió naptömegnyi fekete lyuk + sötét anyag).

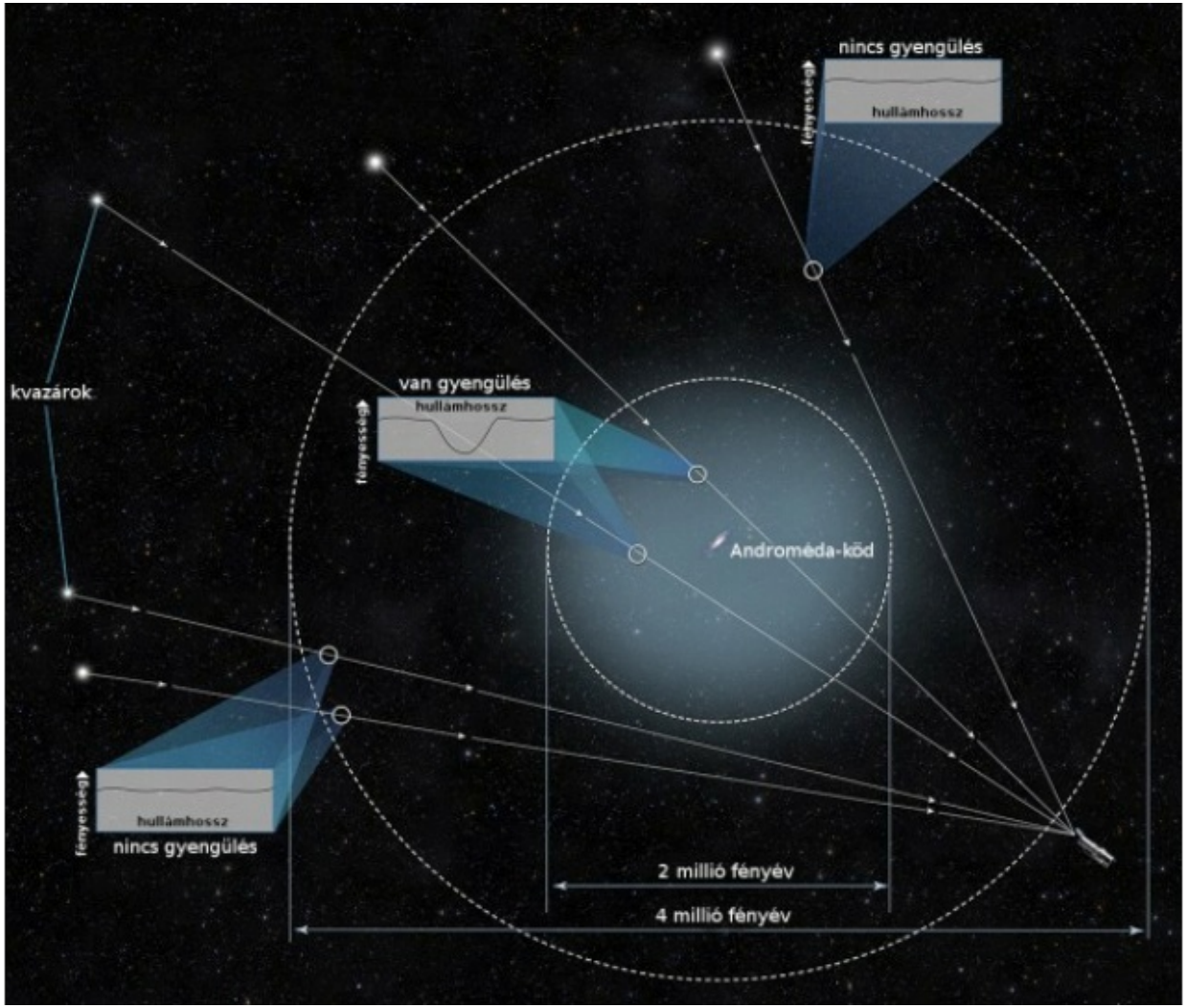


# A sötét anyag nyomában

Az M31 halója a háttérben levő kvazárok UV sávú vizsgálata alapján.

A COS-Halo projekt során 44 távolabbi galaxist is vizsgáltak így archív adatokból.

Az M31 diffúz, forró gázból álló halójának tömege fele a látható galaxis tömegének, mérete 6-szorosa a korábban véltnél.



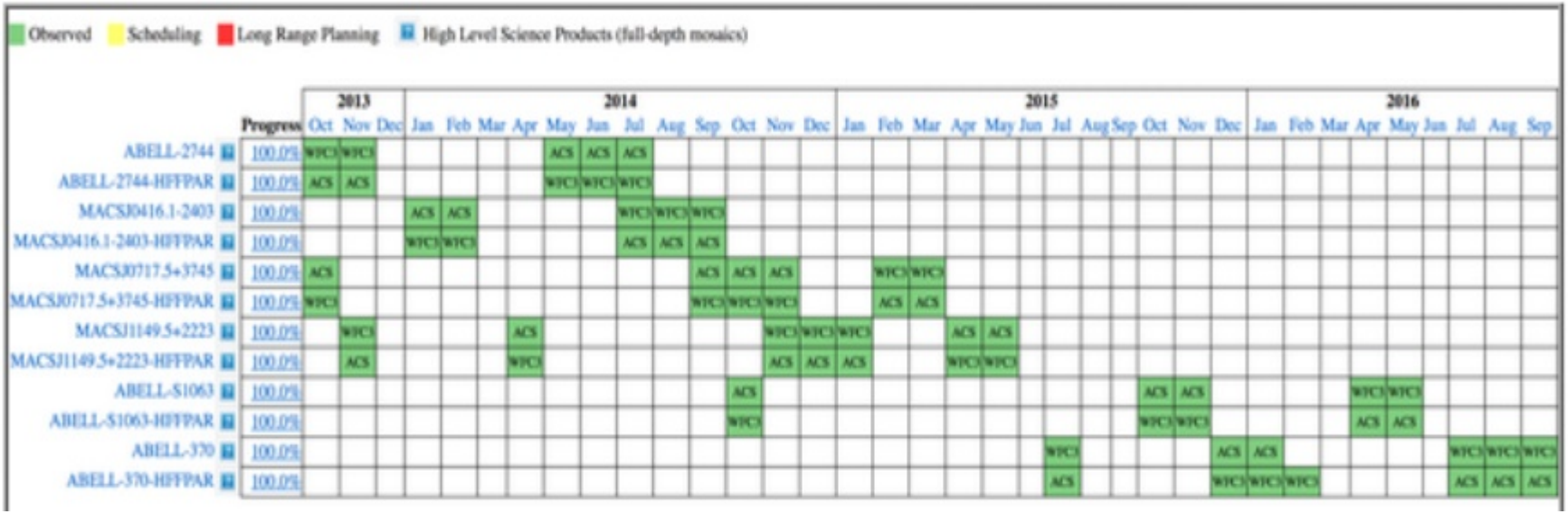
# A sötét anyag nyomában

A HST Frontier Fields projektje keretében a gravitációslencse-hatás alapján hat erősen lencsésző távoli galaxishalmazt vizsgáltak a sötét anyag eloszlásának meghatározására.

Mérések: 2013. okt. és 2016. szept. között az ACS és WFC3/IR műszerekkel (optikai határmagnitúdó: AB = 29).

Egyidejűleg ezekkel 6 „üres” mezőt is vizsgáltak.

A projekt lencsésző célpontjai (zárójelben a *z* értéke): Abell 2744 (0,308), MACSJ0416.1-2403 (0,396), MACSJ0717.5+3745 (0,545), MACSJ1149.5+2223 (0,543), Abell S1063 (0,348), Abell 370 (0,375)

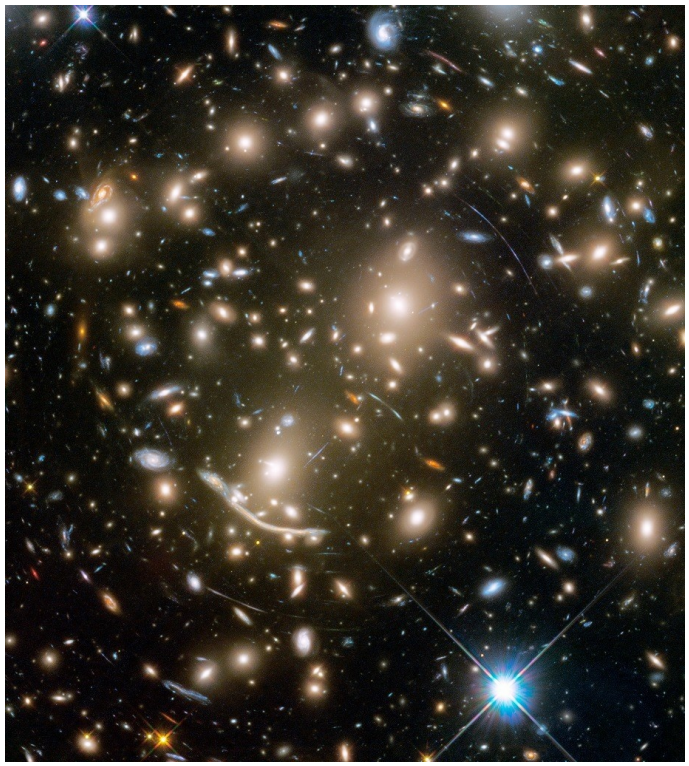


# A sötét anyag nyomában

A HST Frontier Fields két célpontja:

Az Abell S1063 galaxishalmazban a halmazközi fénylést a galaxisokból kidobódott csillagok okozzák. A halmazközi csillagok a sötét anyag nagy skálájú eloszlását rajzolják ki (balra lent).

Az Abell 370 galaxishalmaz (jobbra lent) két domináns galaxisa óriás elliptikus galaxis. A halmaz gravitációslencse-hatása szembetűnő.



# A BUFFALO projekt

BUFFALO: Beyond the Ultra-deep Frontier Fields and Legacy Observations. 2018–2020 között végrehajtott Treasury projekt (200 keringésnyi észlelési idő). A WFC3 és ACS műszerekkel a Frontier Fields 6 galaxishalmazát és az azokkal szomszédos mezőt vizsgálták.

A projekt célja:
az egyébként láthatatlan távoli galaxisok észlelése gravitációslencse-hatással, a sötét anyag eloszlásának vizsgálata a lencséző halmazokban.

A Spitzer és a Chandra is észlelte ugyanezeket a galaxishalmazokat.
A vizsgált halmazok és területek listája
a következő ábrán látható.

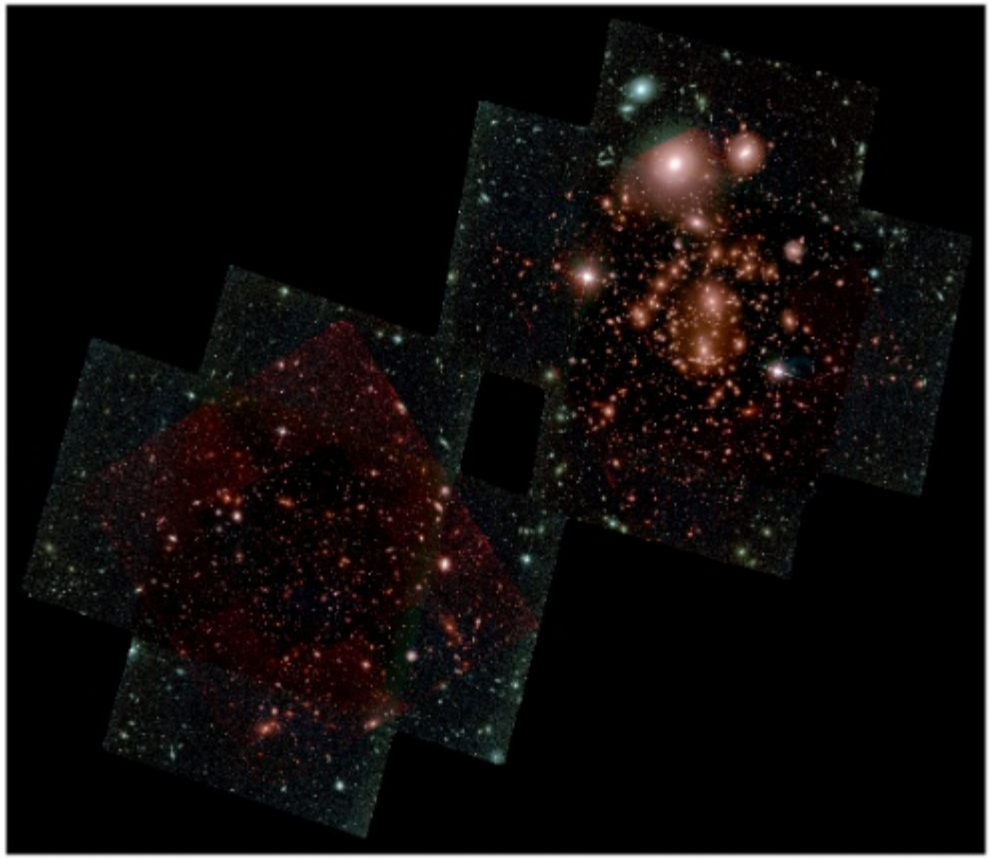


**Figure 9.** BUFFALO composite color image of Abell 370. The BUFFALO field of view is four times larger than the previous Frontier Fields coverage (shaded in the central region for both the cluster and parallel fields) in addition to increasing the depth in the central region.

# A BUFFALO projekt

**Table 1.** BUFFALO/Hubble Frontier Fields Clusters and Flanking Fields

| Field | Center (J2000) | Flanking Field Center (J2000) |
|---|---|---|
| Abell 370 | 02:39:52.9 -01:34:36.5 | 02:40:13.4 01:37:32.8 |
| MACS J0717.5+3745 | 07:17:34.0 +37:44:49.0 | 07:17:17.0 +37:49:47.3 |
| MACS J0416.1-2403 | 04:16:08.9 -24:04:28.7 | 04:16:33.1 -24:06:48.7 |
| Abell S1063 | 22:48:44.4 -44:31:48.5 | 22:49:17.7 -44:32:43.8 |
| Abell 2744 | 00:14:21.2 -30:23:50.1 | 00:13:53.6 -30:22:54.3 |
| MACS J1149.5+2223 | 11:49:36.3 +22:23:58.1 | 11:49:40.5 +22:18:02.3 |

BUFFALO *HST* WFC3 and ACS Observing Schedule

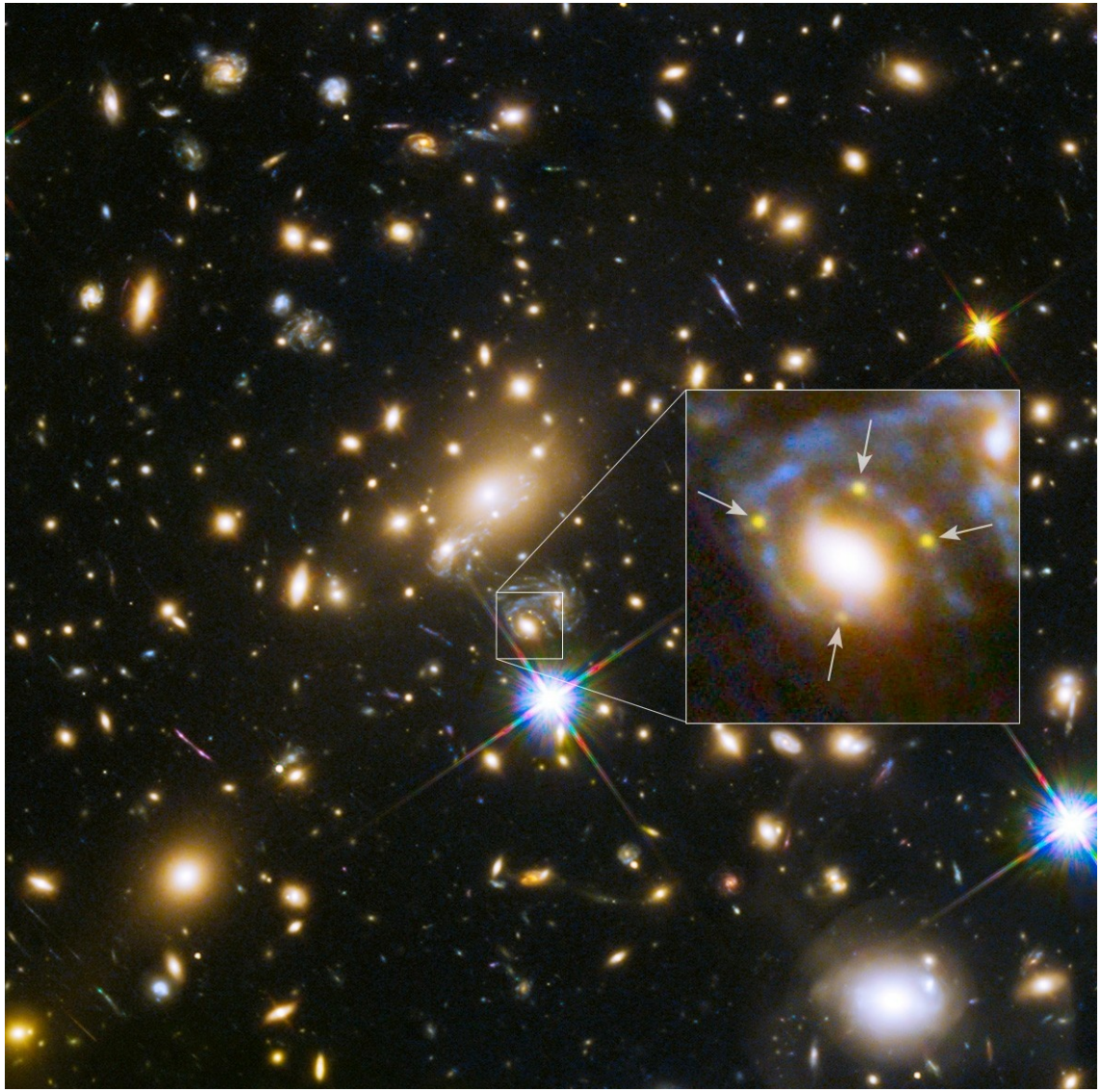
| Field | Visit Numbers | Main Cluster | Parallel Field | Epoch 1 | Epoch 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Abell 370 | 6A-6H | WFC3 | ACS | 2018 Jul 21-22 | 2018 Aug 21 |
| | 6I-6P | ACS | WFC3 | 2018 Dec 19 | 2019 Jan 7 |
| MACS J0717.5+3745 | 3I-3P | ACS | WFC3 | 2018 Oct 2-3 | 2018 Nov 22 |
| | 3A-3H | WFC3 | ACS | 2019 Feb 18 | 2019 Apr 1 |
| MACS J0416.1-2403 | 2I-2P | ACS | WFC3 | 2019 Jan 7 | 2019 Feb 7 |
| | 2A-2H | WFC3 | ACS | 2019 Aug 3 | 2019 Sep 6 |
| Abell S1063 | 5A-5H | WFC3 | ACS | 2019 Apr 20 | 2019 May 29 |
| | 5I-5P | ACS | WFC3 | 2019 Oct | 2019 Nov |
| Abell 2744 | 1I-1P | ACS | WFC3 | 2019 May 15 | 2019 Jul 3 |
| | 1A-1H | WFC3 | ACS | 2019 Oct - Nov | 2019 Nov - Dec |
| MACS J1149.5+2223 | 4A-4H | WFC3 | ACS | 2019 Dec | 2020 Jan |
| | 4I-4P | ACS | WFC3 | 2019 Apr | 2020 May |

# Gravitációslencse-hatás

A WFC3-mal 10 milliárd fényévre levő kvazárok gravitációslencse-hatással felerősített képe (a lencse kb. 2 milliárd fényévre van). A sötét anyag csomói méretének meghatározása (mekkora lehet a legkisebb?).

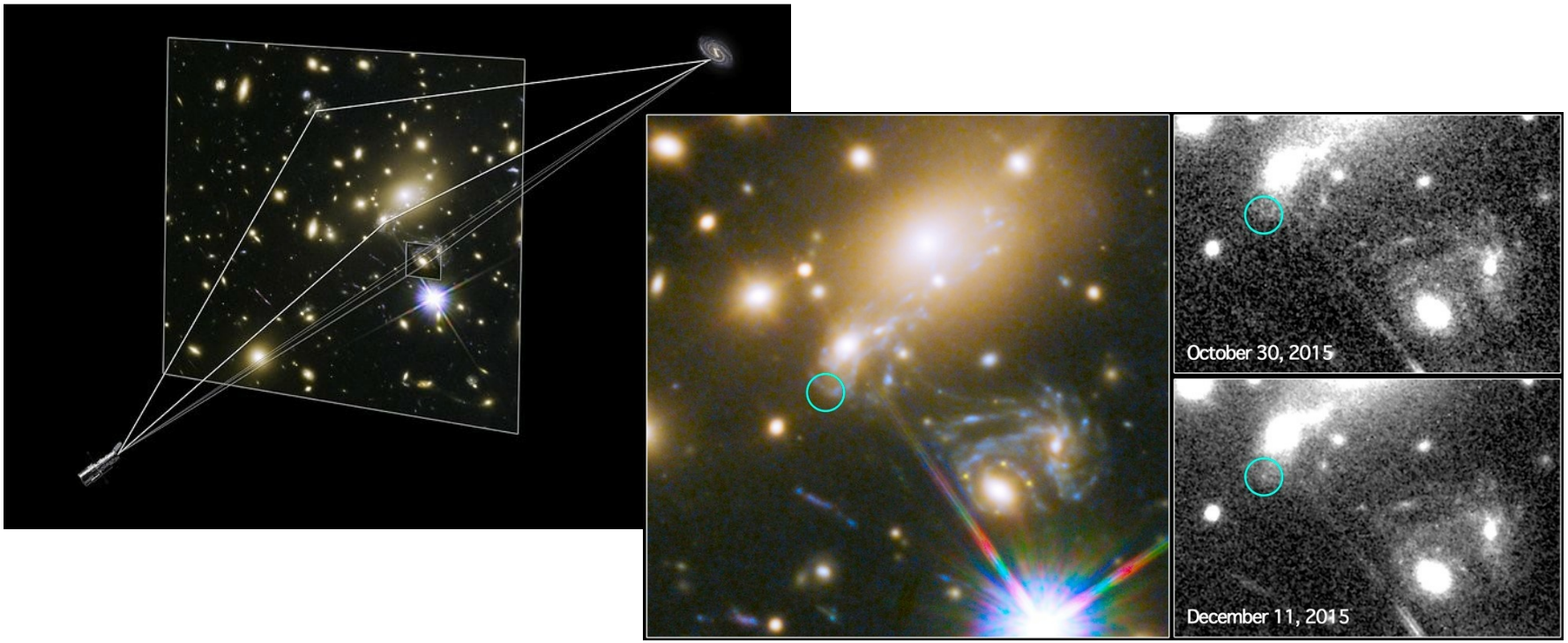
# Gravitációslencse-hatás

Távoli szupernóva megnégyszereződött képe



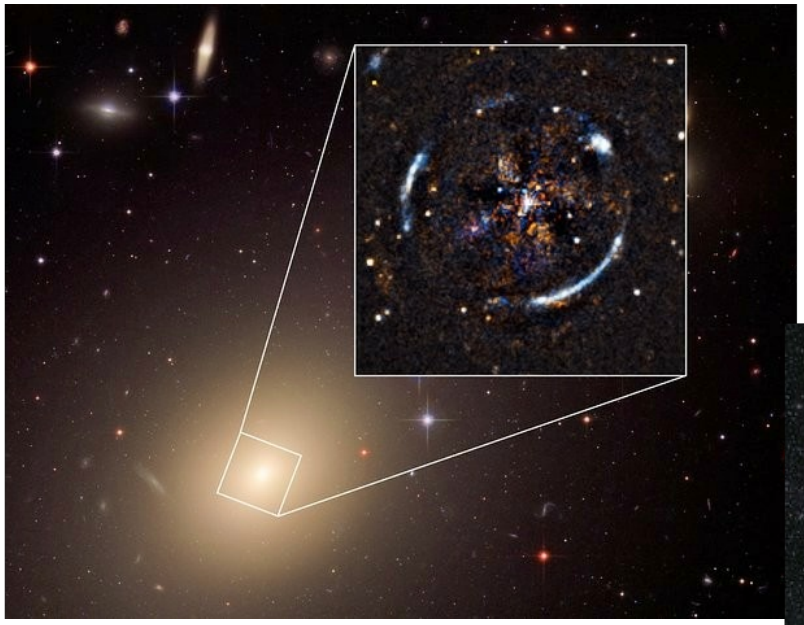
# Szupernóva-robbanás „megrendelésre”

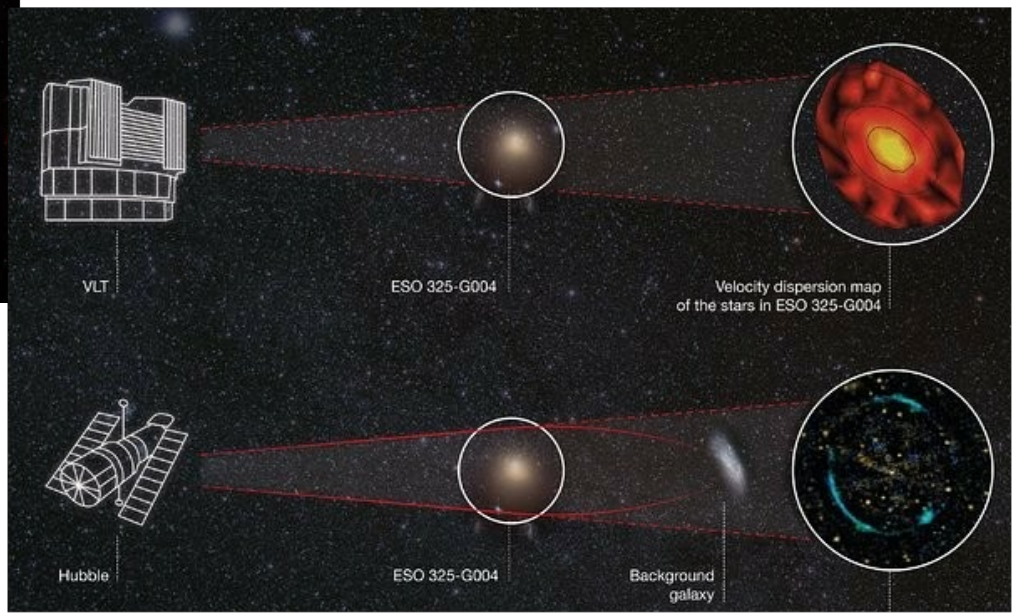
SN Refsdal: Refsdal javasolta 1964-ben, hogy az univerzum tágulását gravitációsan lencsézett szupernóvák időkéséssel kapott képei alapján vizsgálják. A Frontier Fields-beli MACSJ1149.5+2223 ($z$=0,543) egyik elliptikus galaxisa lencsézi a $z$=1,49 vöröseltolódású galaxist, amiben 2014 novemberében SN-t találtak. A halmaz tömegeloszlása alapján az Einstein-kereszt másik képén 2015. decemberre várták a felfénylést, ami be is következett.



# Einstein elméletének igazolása a HST-vel

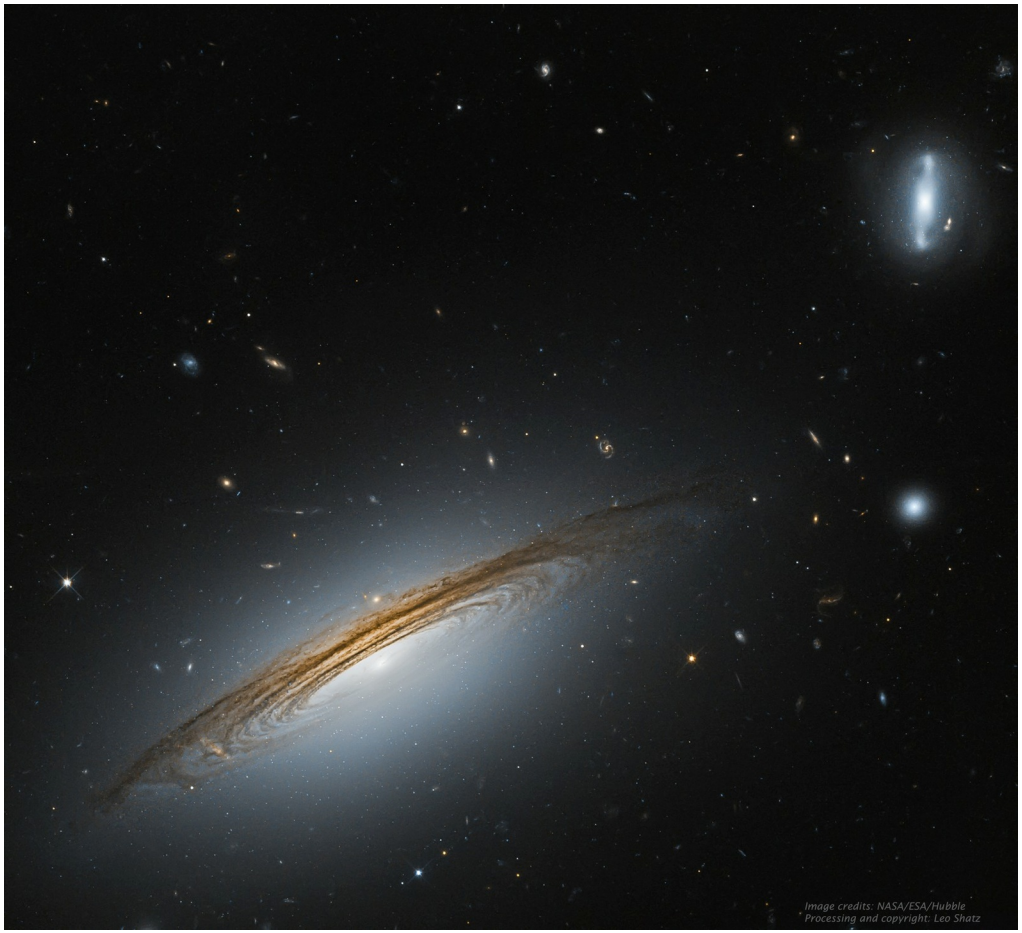
A gravitációslencse-hatás észlelése az általános relativitáselmélet igazolására is szolgált. A lencséző objektum az ESO 325-G004.





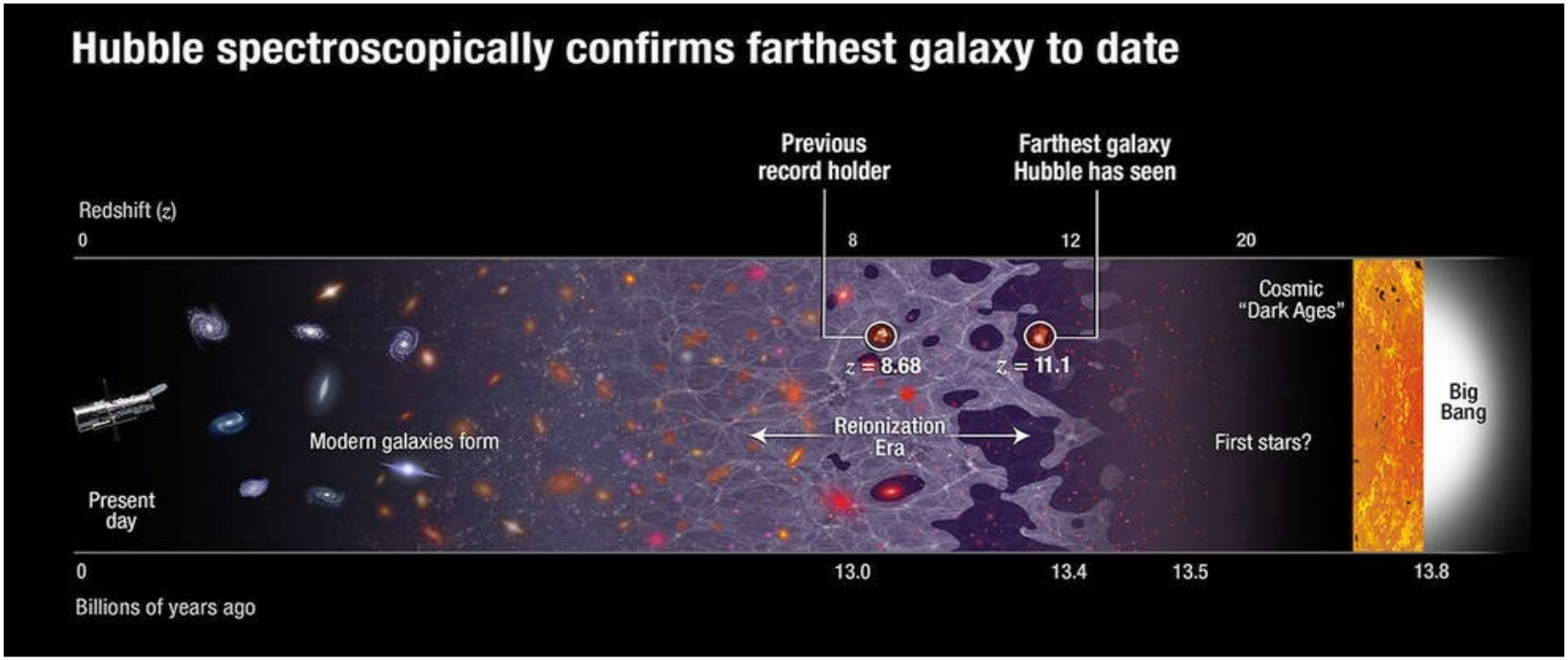
# A leggyorsabban forgó galaxis

A 400 millió fényévre levő UGC 12591 a Tejútrendszernél kétszer nagyobb szögsebességgel forog. A tömege többszöröse a Tejútrendszerének.



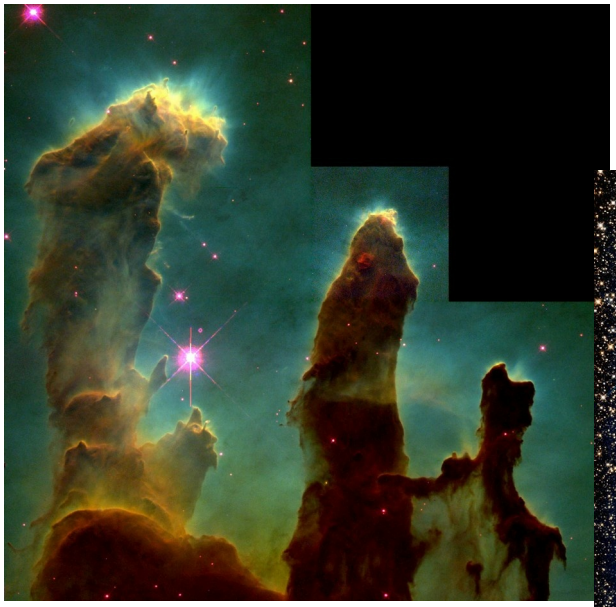
# A legtávolabbi ismert galaxis

A GOODS-N mezőbeli GN-z11 galaxis vöröseltolódását megmérték a WFC3-mal készített spektrum alapján: $z$ = 11,1. 2016-ban ez volt a legtávolabbi ismert galaxis, 13,4 milliárd éves kornak felel meg.
A HST-méréseket Spitzer-adatokkal kiegészítve kiderült, hogy a galaxis tömege a Tejútrendszer csillagai tömegének egy százaléka, de a tömege gyorsan nő. A JWST-vel aztán hamar megdőlt ez a rekord.



# A HST ikonikus felvétele

A teremtés oszlopai a Sas-ködben (Serpens csillagkép). Az 1995-ös felvétel – amelyet a 20. század történelmének 100 leghíresebb fotója közé választottak (balra) – után 2014-ben jobb minőségű optikai kép készült (jobbra), és infravörösben is leképezték 2014-ben (középen).



# A HST jövője

A HST további működtetése egyelőre legalább 2025-ig realitásnak tűnik, ha a műszerek állapota ezt megengedi. A kritikus eszközök továbbra is a giroszkópok, de már akár egyetlen működő giroszkóp esetén is végezhetők észlelések.

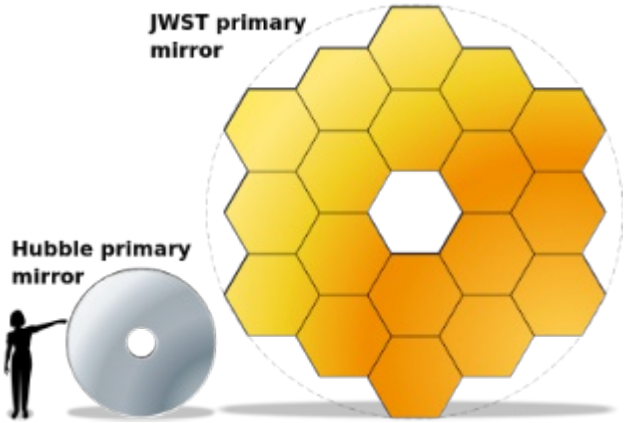
Bár a JWST már működik, a HST-vel végzett észleléseket nem állították le, ez is mutatja, hogy a JWST nem a HST utóda.

Mi lesz a HST sorsa? Irányított megsemmisítés vagy visszahozatal a Földre. A 2009-es, legutolsó szerviz alkalmával adaptert is szereltek a HST-re, amivel rögzíteni lehet ahhoz az űreszközhöz, amelyikkel visszahozzák a Földre, ha ezen megoldás mellett döntenek.

Vannak olyan hangok is, hogy újabb szervizküldetést kell előkészíteni és végrehajtani, ezúttal kereskedelmi célú űrrakéta igénybevételével és robot üzemmódban. 2022 végén a NASA és a SpaceX megállapodott a szervizküldetésről, amely magasabb pályára emeli a HST-t, további 20 év működést biztosítva a Hubble-űrtávcsőnek.

# A James Webb-űrtávcső

Röviden **JWST**: a NASA, az ESA és a Kanadai Űrügynökség (CSA) készítette és üzemelteti. Főtükre 6,5 m átmérőjű, de eredetileg 8-méterest akartak, akkor NGST (New Generation Space Telescope) volt a neve.
A teljes fénygyűjtő felület 25,4 $m^2$
(a HST főtükrének felülete 4,0 $m^2$).
2002-ben nevezték át JWST-re (James E. Webb a NASA egyik vezetője volt az Apollo-program idején).

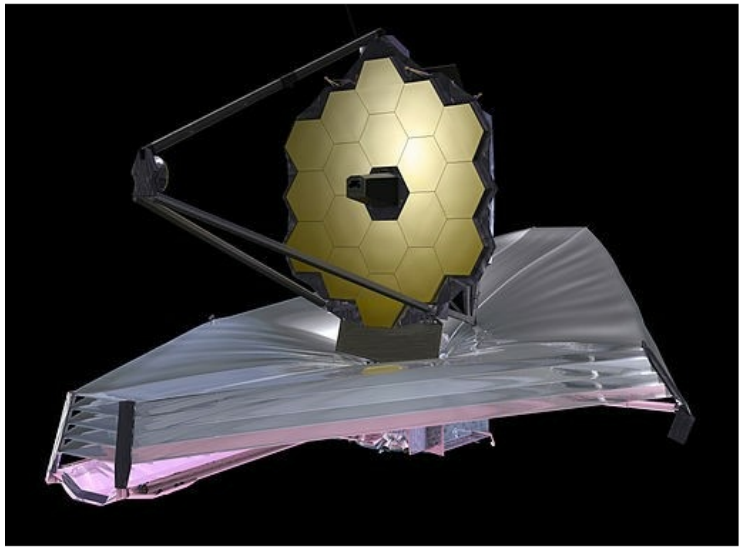


# A James Webb-űrtávcső

A JWST a Nap–Föld rendszer L2 librációs pontja körüli halópályán kering, és csak IR-ben észlel. Indítása: 2021. dec. 25-én Kourou-ból az ESA Ariane–5 rakétájával.

A küldetés időtartama legalább 5 év, de a 10 évet is elérheti. 2011-ben csaknem törölték az egész projektet.

| év | tervezett indítás | becsült költség (milliárd USD) |
|---|---|---|
| 1997 | 2007 | 0,5 |
| 2000 | 2009 | 1,8 |
| 2005 | 2013 | 3,0 |
| 2011 | 2018 | 8,7 |
| 2017 | 2019 | 8,8 |
| 2020 | 2021 | 10,0 |



# A JWST

Csak infravörösben észlel
Ennek indokait szóban ismertetem.

Képalkotás és spektroszkópia egyaránt lehetséges.

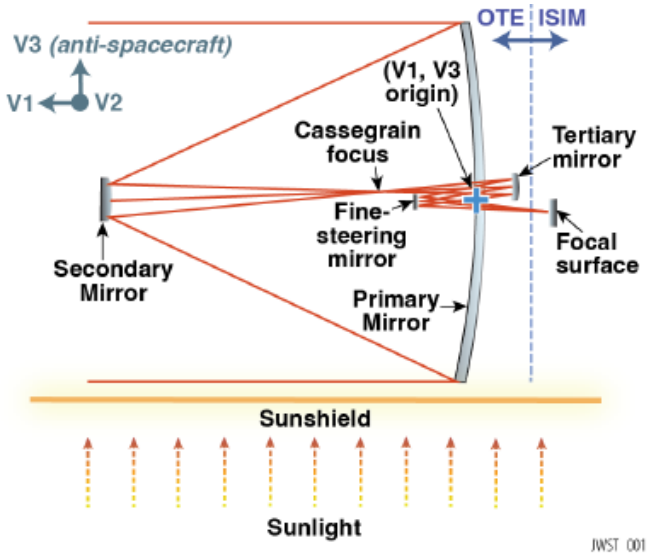
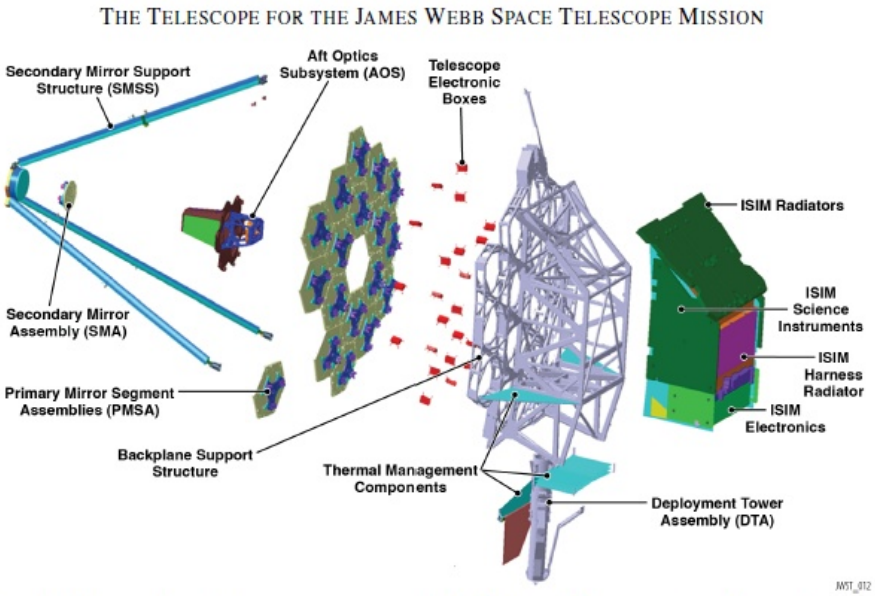



**Figure 3**: The JWST telescope is a three mirror anastigmat that has a primary mirror, secondary mirror, tertiary mirror, and a fine steering mirror. Each of the four science instruments has one or more pickoff mirrors near the telescope's focal surface such that they see different fields of view.




**igure 2**: This exploded view shows telescope components, including the telescope mirrors, the optomechanical structures, ontrol electronics, and the thermal management system. The integrated science instrument module includes the four science ıstruments.

# A JWST

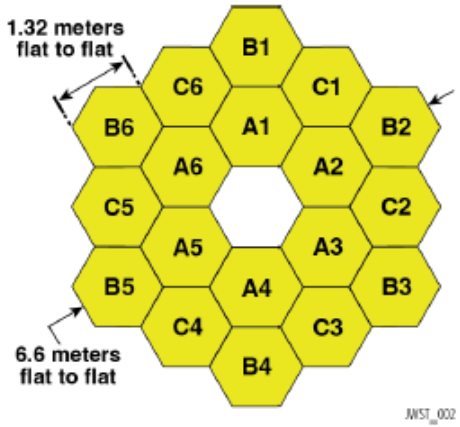
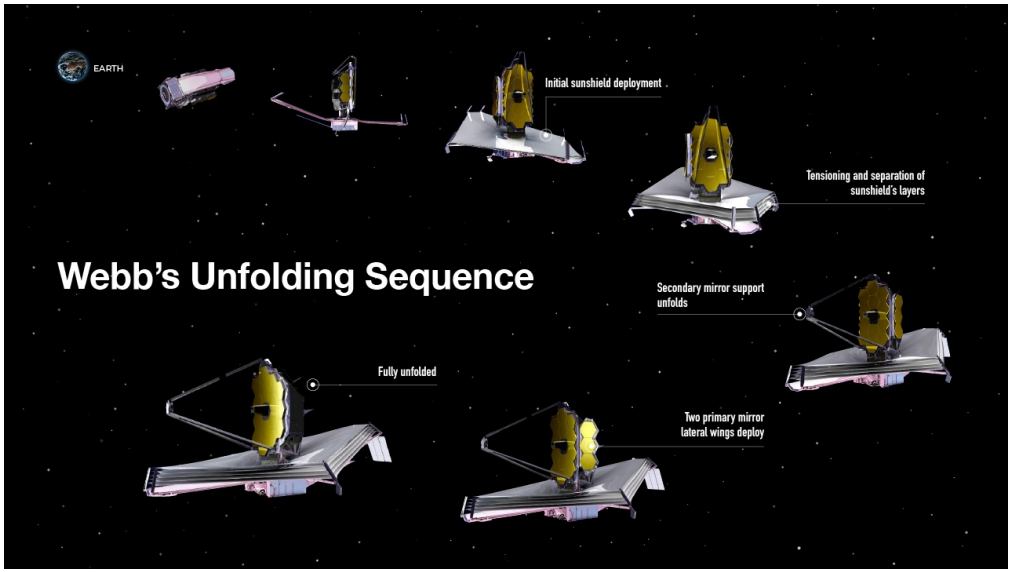



**Figure 4**: The primary mirror dimensions and the tiling configuration with 18 hexagonal-shaped segments to form a tricontagon. The A-, B-, and C-segment prescriptions are separate and take advantage of the six-fold symmetry.




A berilliumból készült főtükör aranybevonatú és 18 hatszögletű szegmensből áll.

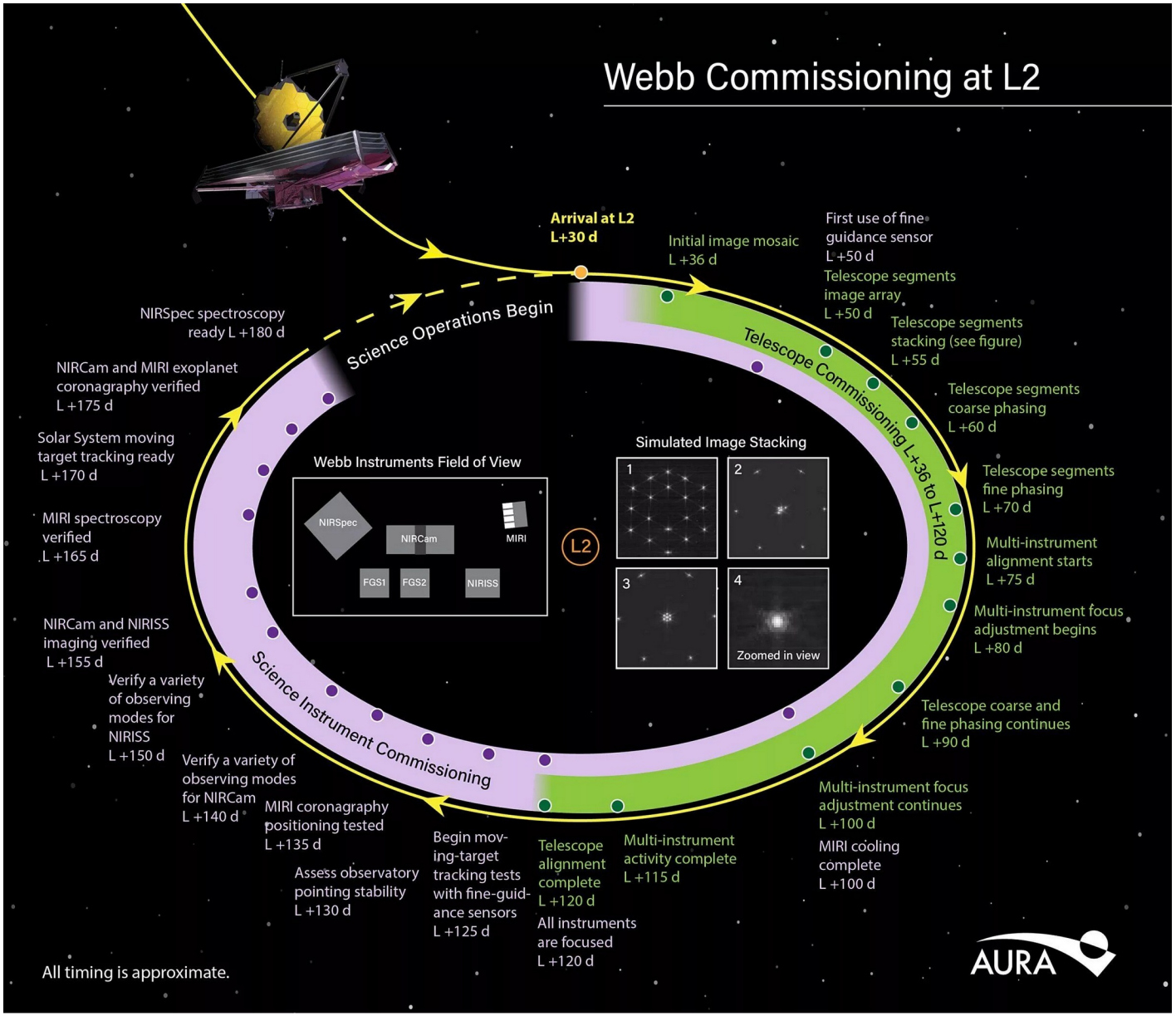
Az 5-rétegű napvédő pajzs 22×12 méteres.

**Table 2**: Telescope Optical Parameters

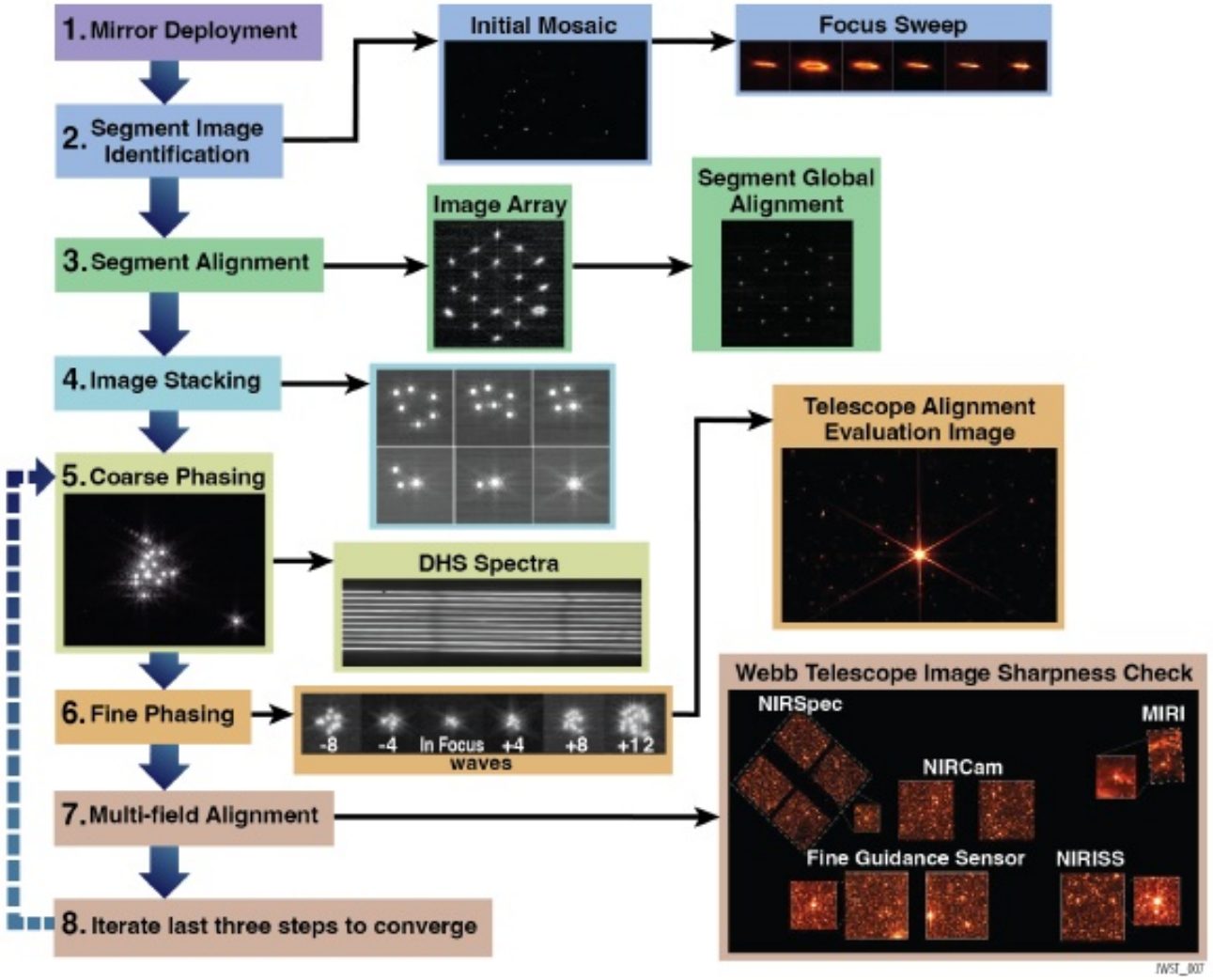
| Mirror | RoC (mm) | Surface | Conic | V1 (mm) | V2 (mm) | V3 (mm) | Phys. Size (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Primary | 15879.7 | concave | -0.9967 | 0 | 0 | 0 | 6605.2 |
| Secondary | 1778.9 | convex | -1.6598 | 7169.0 | 0 | 0 | 738 |
| Tertiary | 3016.2 | concave | -0.6595 | -796.3 | 0 | -0.19 | 728×517 |
| Fine Steering | | flat | | 1047.8 | 0 | -2.36 | 172.5 |

NOTE—The primary-to-secondary effective focal length (EFL) is 59400 mm., and the three-mirror telescope EFL is 131400 mm.

# A tudományos program kezdete előtt



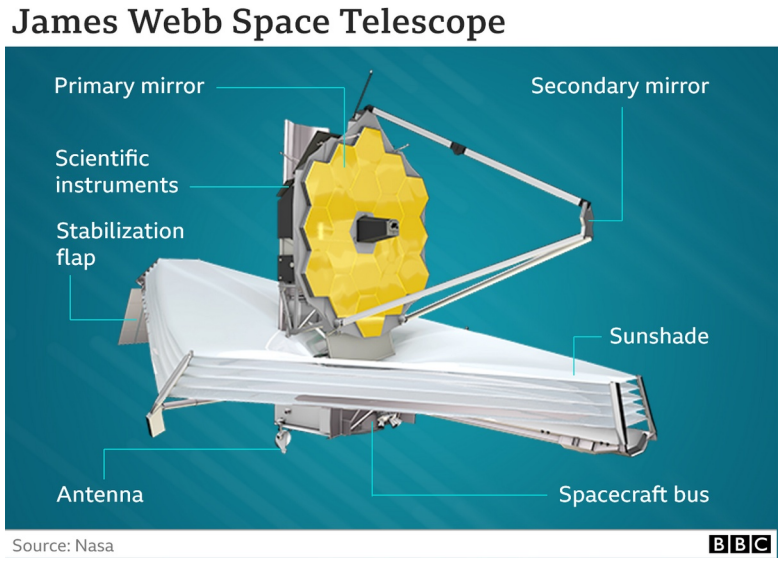
# A tudományos program kezdete előtt

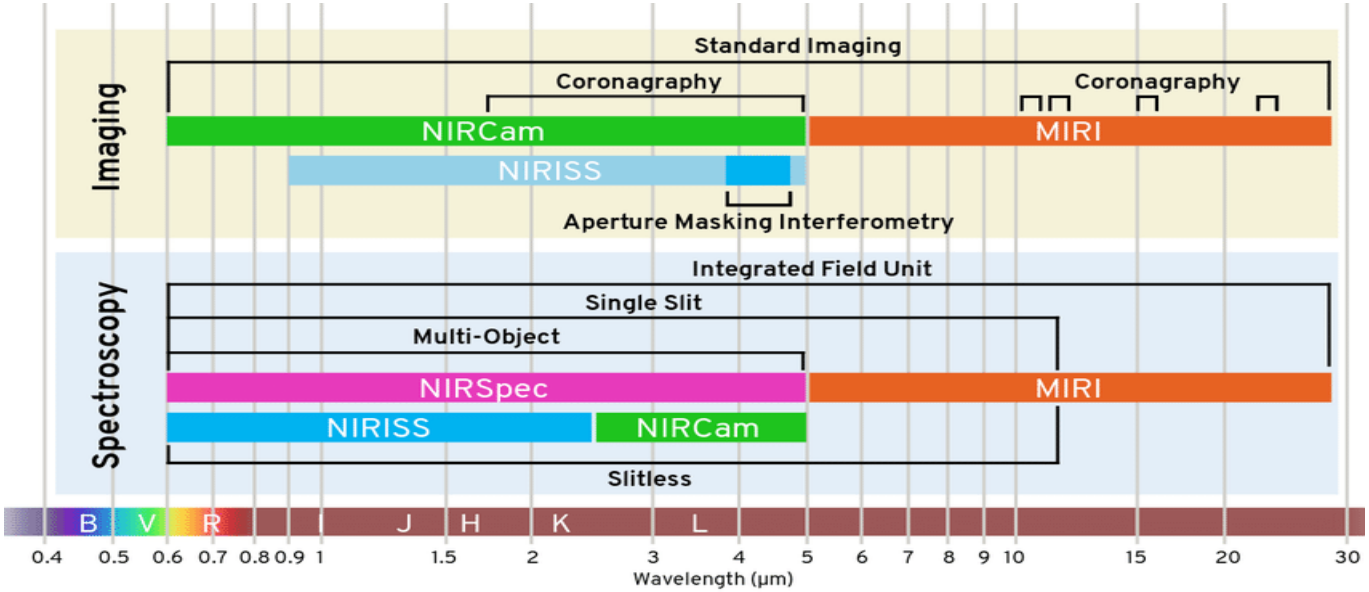



igure 15: High-level overview of the sequence of events during OTE commissioning, along with examples of flight data. This epiction greatly simplifies a complex process involving hundreds of individual steps and observations.

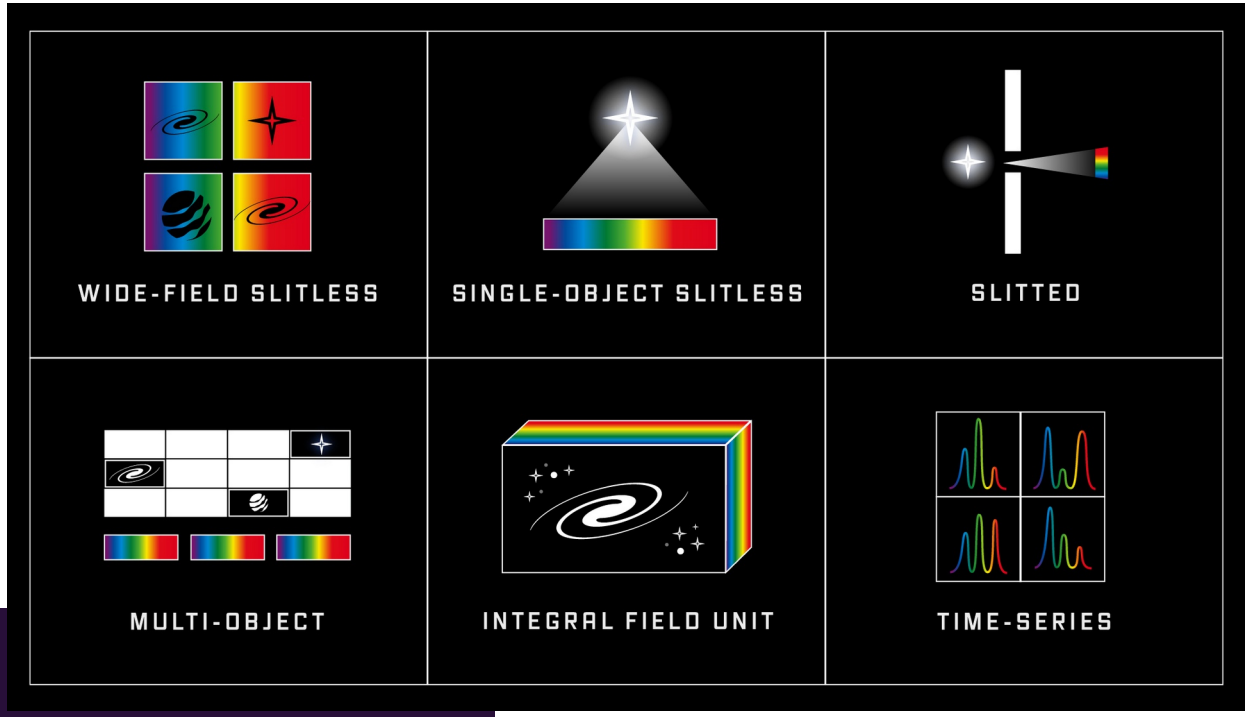
# A JWST

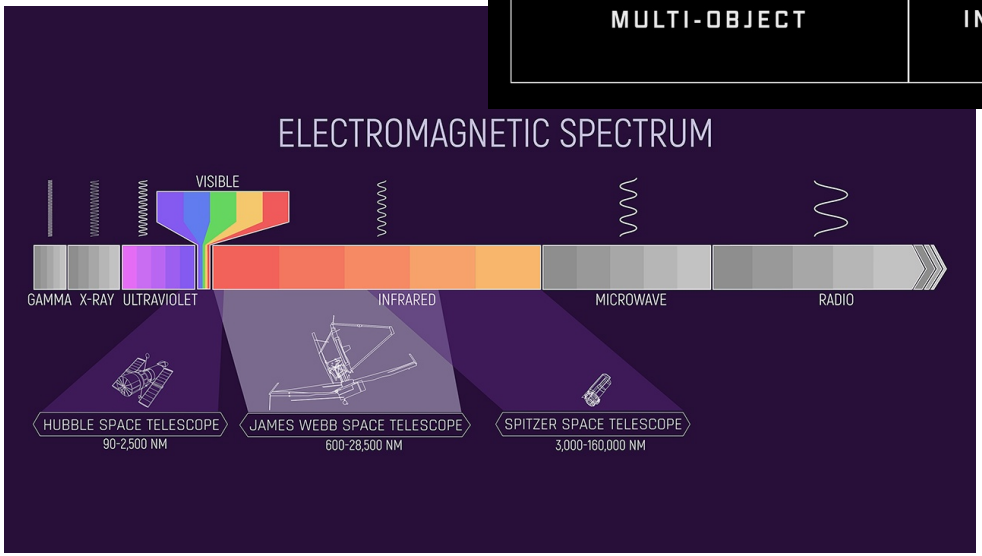
Műszerei:
NIRCam (koronográffal),
NIRSpec (ESA),
MIRI (koronográffal),
FGS/NIRISS (rés nélküli spektrográf, CSA).



# A JWST

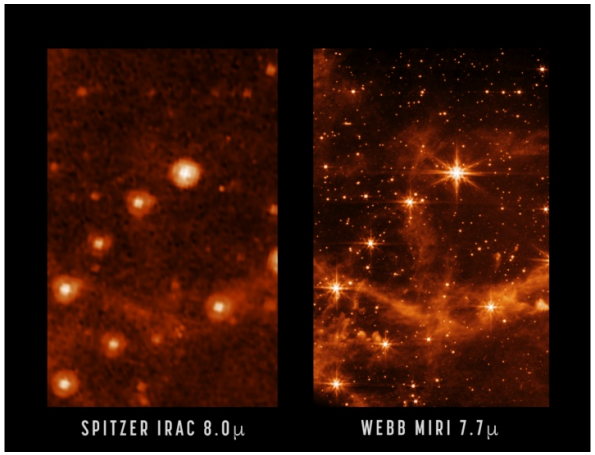


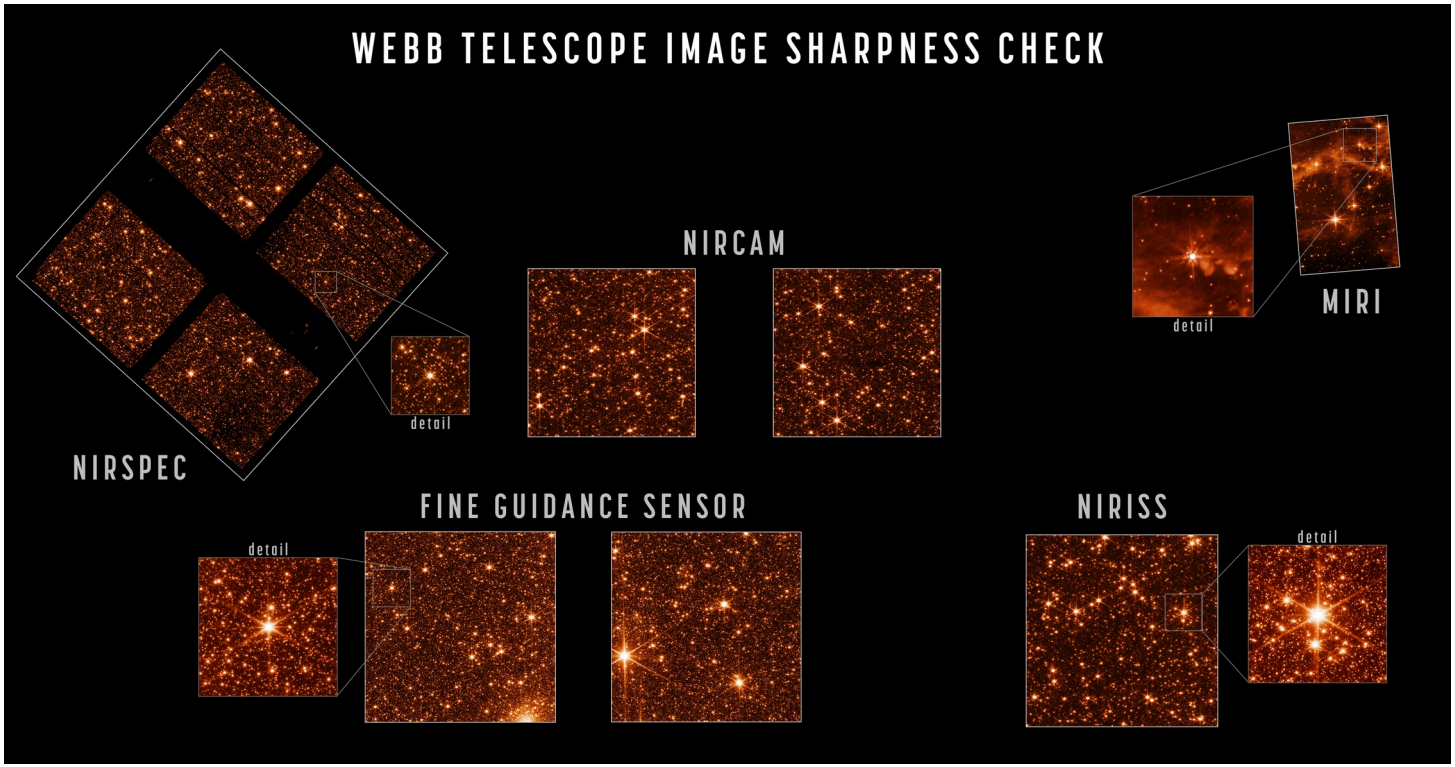




Átfedés van a HST és a Spitzer által észlelt hullámhossz-tartományok között.

# A JWST

A képek élessége felülmúlta az előzetes várakozásokat.
Jobbra: összehasonlítás a Spitzer-űrtávcső azonos területről alkotott képével.



# A JWST

Már az első évben is rengeteg eredményt publikáltak. Vannak nagy projektek, ilyen az UNCOVER projekt is, amelynek célja az Abell 2744 galaxishalmaz és hátterének részletes vizsgálata.

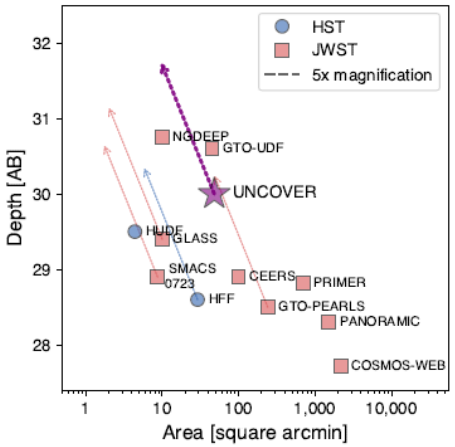
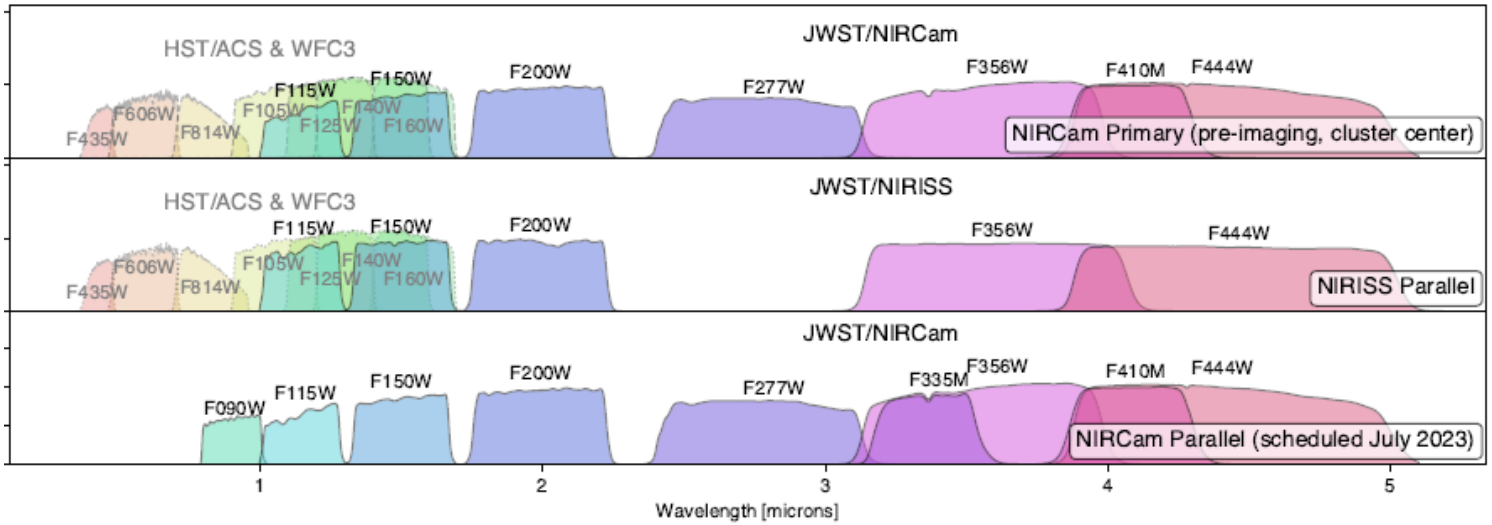



**Figure 1.** The UNCOVER combined imaging (purple star) probes a unique regime in the context of *HST* extragalactic ultradeep fields (blue circles) and *JWST* Cycle 1 imaging surveys (red squares); without lensing it probes deeper than previous *HST* surveys and wide field programs. Grav-



# A JWST

Az UNCOVER célja a galaxiskeletkezés időbeli alakulásának vizsgálata a vöröseltolódás függvényében.

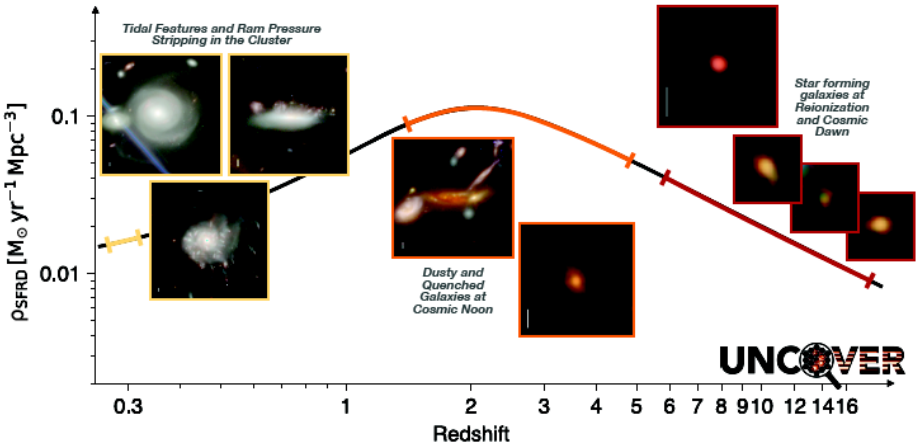



**Figure 8.** The UNCOVER imaging reveals spectacular views of a vast array of galaxies across cosmic time, shown here as drawn from the history of the cosmic star formation rate density from Casey et al. (2018). These galaxies span foreground galaxies within the Abell 2744 cluster, to red and/or remarkably resolved lensed systems at Cosmic Noon (sub-mm galaxy A2744-ID02 from González-López et al. (2017) and a quiescent galaxy candidate), and back into the most extreme – and therefore uncertain – epochs to the time of the first galaxies (GLASSz8-1 from Roberts-Borsani et al. (2022) and triply-lensed JD1 from Zitrin et al. (2014)). White scale bars indicate 0.5" in all postage stamps.

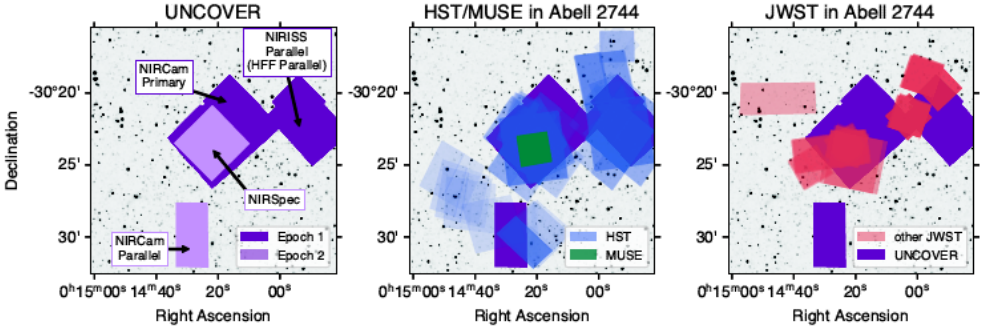
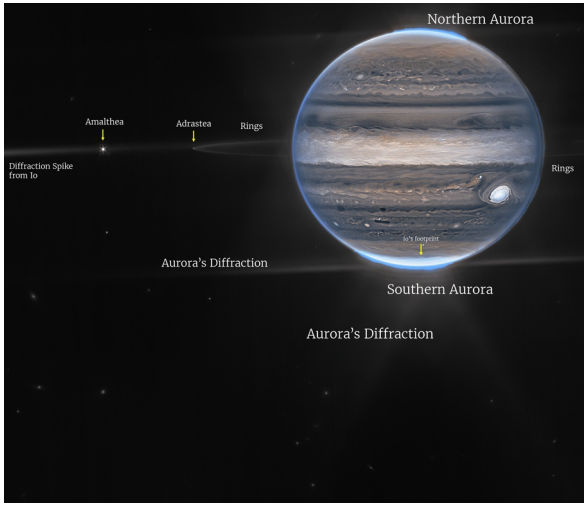



**Figure 2.** The Abell 2744 cluster has extensive deep optical/NIR (*HST* and *VLT*/MUSE) and *JWST* coverage. The *JWST*/UNCOVER footprints (purple) along with *HST* imaging (blue) and *VLT*/MUSE deep datacube (green, center) and *JWST* Cycle 1 imaging and spectroscopy (red, right) against imaging from the Legacy Imaging survey (Dey et al. 2019). In the left panel, we highlight the detailed layout of the UNCOVER dataset, differentiating between the first epoch (dark purple, NIRCam primary imaging and NIRISS parallel imaging) and second epoch (planned NIRSpec spectroscopy and NIRCam paral-

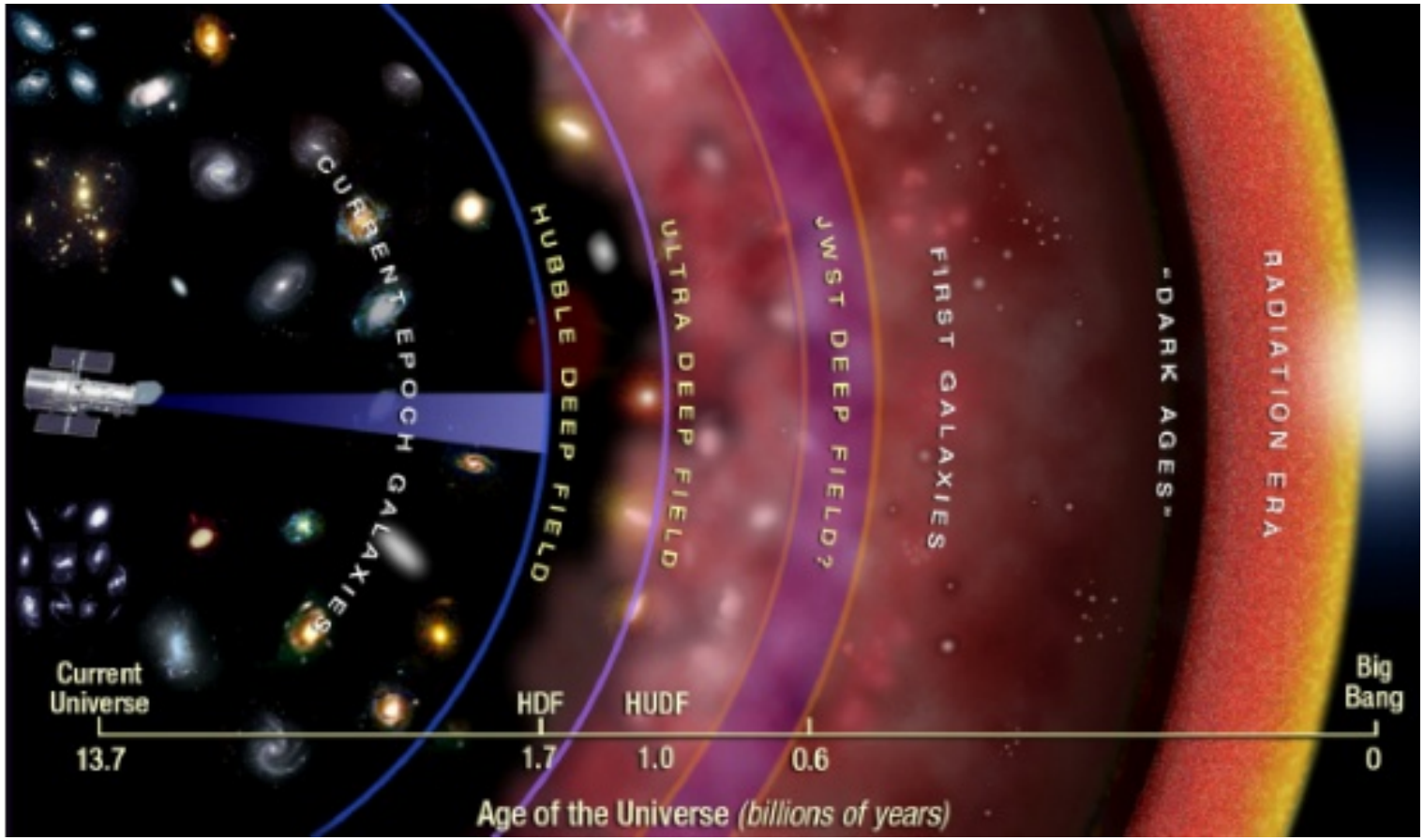
# A JWST

De a JWST már a naprendszerbeli objektumoktól kezdve a csillagokon, ködökön át mindenfélét vizsgált az égen.
Első mélyvizsgálatát az SMACS0723 irányában végezte (jobbra lent).



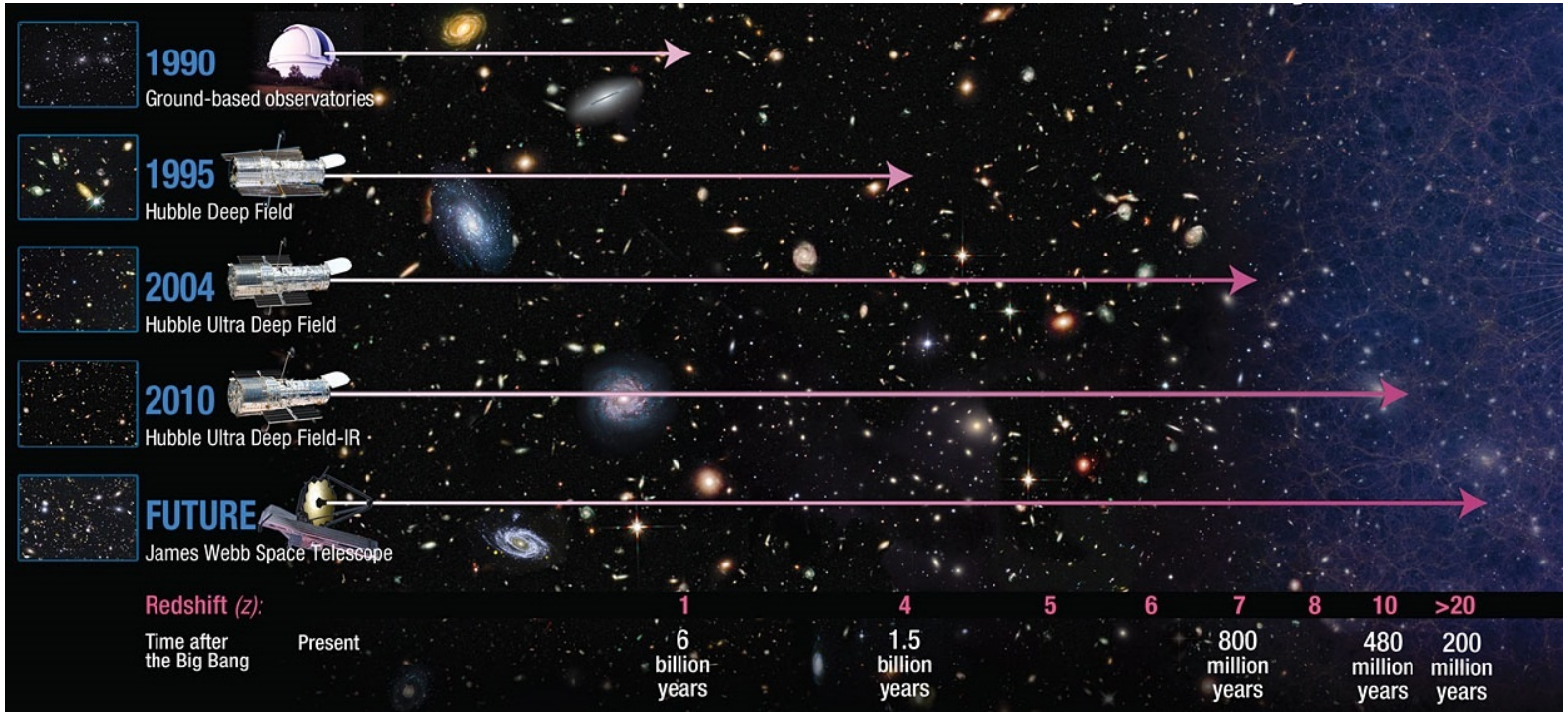
# A JWST

A deklarált cél: minél közelebb kerülni az első galaxisok kialakulásának megfigyeléséhez.



# A JWST

A deklarált cél: minél közelebb kerülni az első galaxisok kialakulásának megfigyeléséhez.



# A JWST

A Nagy-Magellán-felhőbeli Tarantula-köd JWST-vel felvett képéhez nem kell kommentár. Idő híján a példák bemutatását nem folytatjuk.