

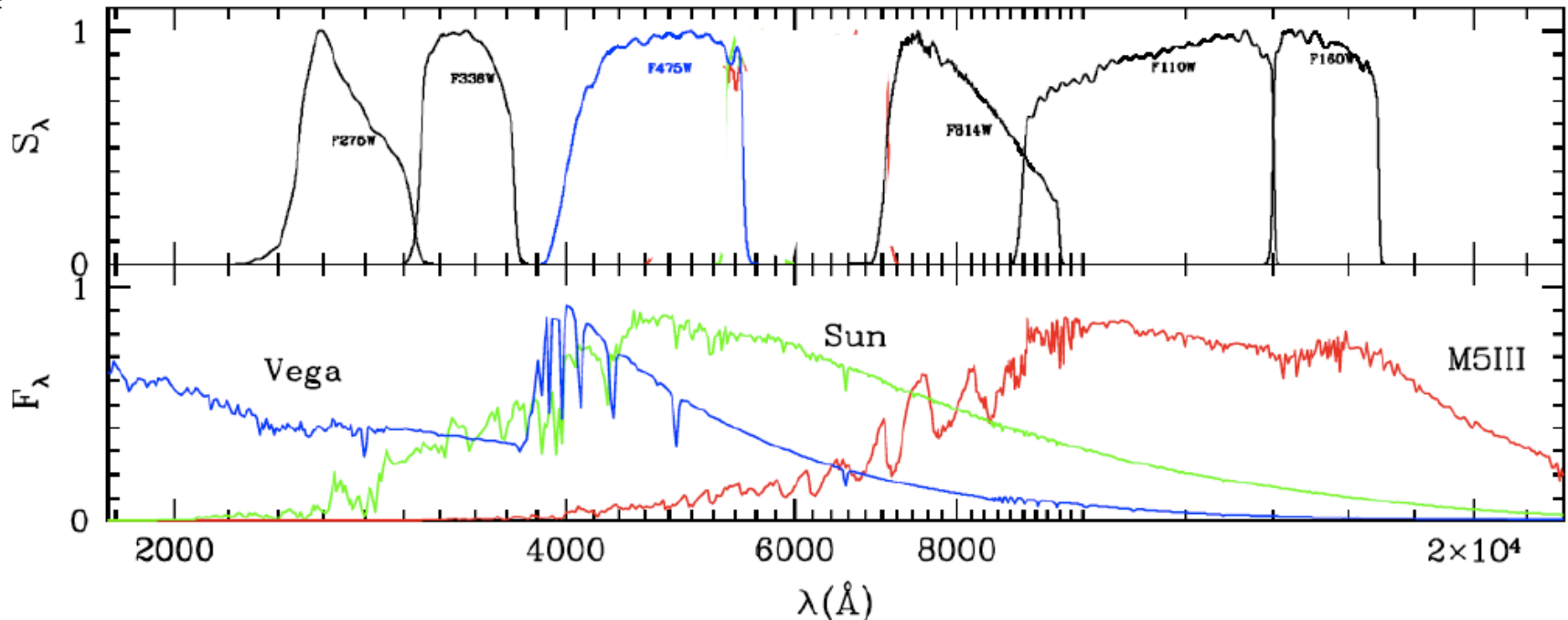
# ŰRCSILLAGÁSZAT A HUBBLE-ŰRTÁVCSŐ

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem  
2020

# 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; Chandra, 1999; Spitzer, 2003. Jellemzői: **2,4 m**  $\varnothing$  RC-távcső, 607–589 km magasságban, 96–97 perces keringési periódus. Optikai + közeli-IR + UV-tartományban észlel. Már 1,3 milliót meghaladó felvétel közel 50000 célpontról + a helyzetérzékelő (FGS) fotometriája. Hetente kb. 120 Gbyte adat.  
**Moduláris rendszerű** (a műszereiről később).



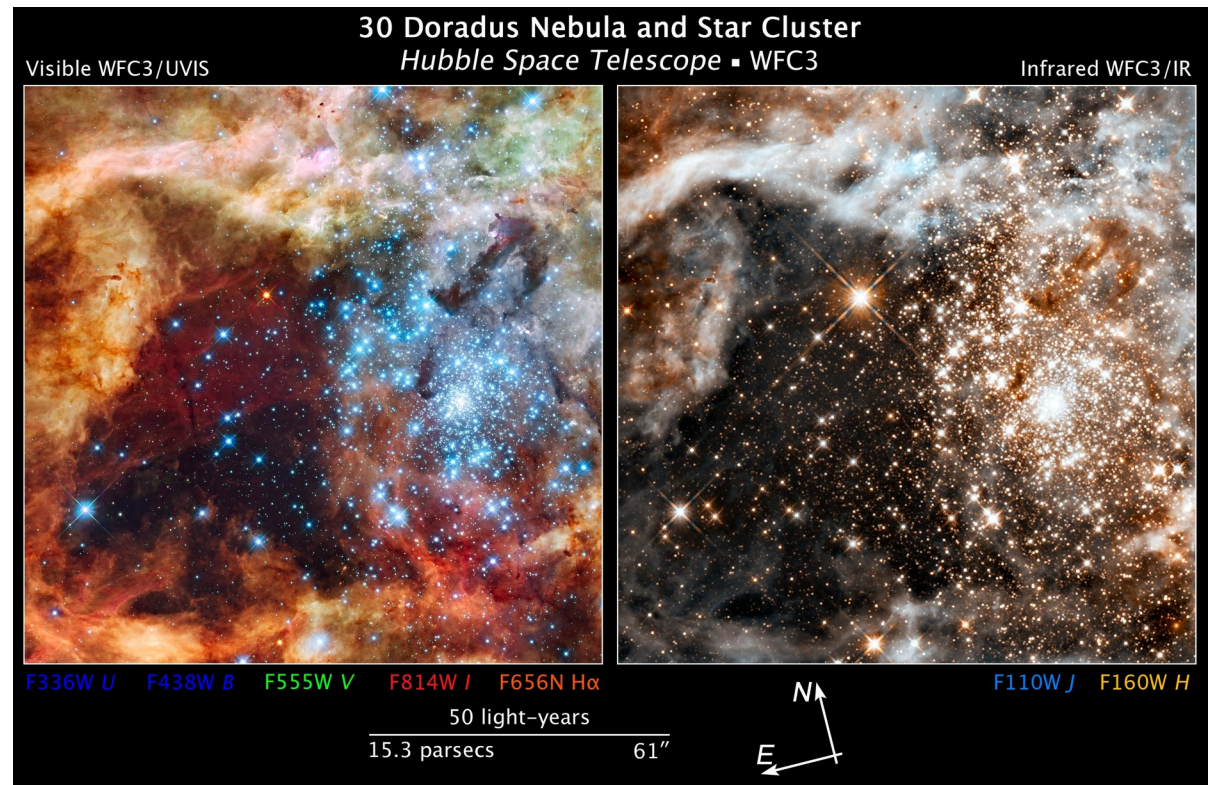
# A HST főbb jellemzői

## Három lényeges képessége:

- Nagy szögfelbontás (optikaiban  $0,5''$ ) a teljes látómezőben ( $\leftrightarrow$  adaptív optika), az iránytartás pontossága:  $0,012''$ ;
- Nagy érzékenység (halvány objektumok  $\rightarrow$  mélyvizsgálatok);
- UV-érzékenység 115 nm-ig (Lyman- $\alpha$ , 121,6 nm is!); 2-3 nagyságrenddel érzékenyebb az IUE-nél.

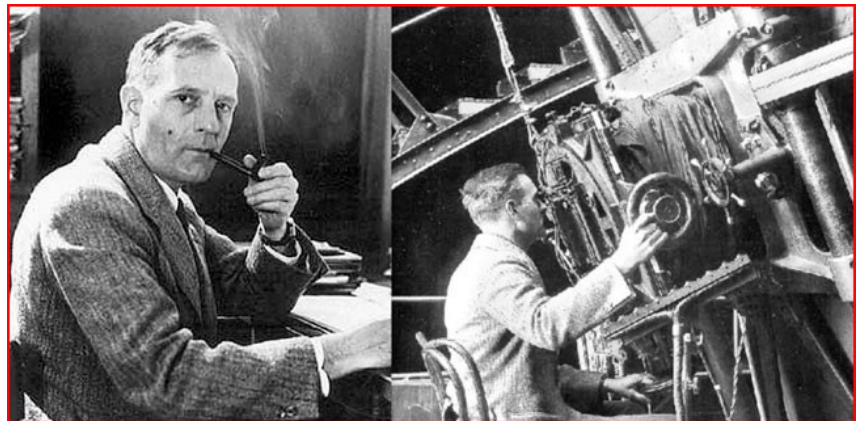
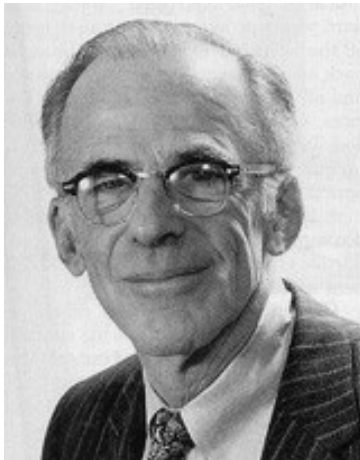
## Univerzális, nem egy konkrét kutatási feladatra ( $\leftrightarrow$ COBE, WMAP):

- Új felfedezések (pl. protoid);
- Korábban gyanítottak megerősítése (pl. nagy tömegű fekete lyukak);
- Elméleti modellek átdolgozására készítő eredmények (pl. kozmológia)



# A HST története

- 1946: Lyman Spitzer: Astronomical advantages of an extraterrestrial observatory (szögfelbontás + UV-IR-észlelések);
- 1965: Spitzer 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, 1983-as tervezett felbocsátással.



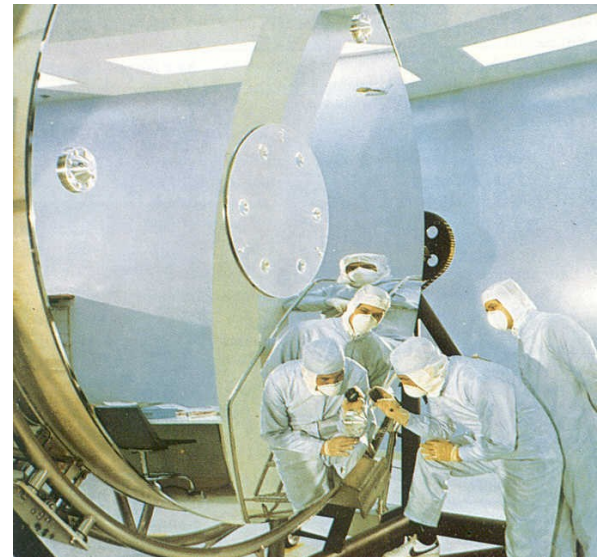
# A HST főtükrének elkészítése

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 + 25 nm MgF).

Ekkor még 1986. szeptemberi felbocsátást terveztek.

A hőszigetelés megoldása is bonyolult műszaki feladat.



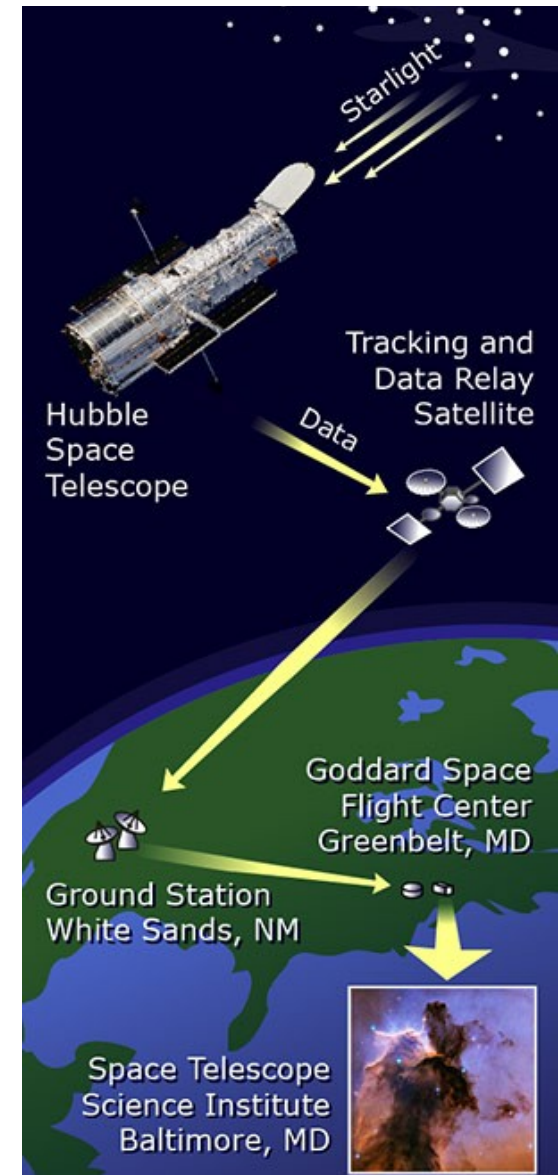
# A HST földi létesítményei

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.: VÉGRE INDÍTÁS
- 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. 24–25-i LEO pályára helyezésig a költségek: 400 M USD helyett 4700 M USD. Ehhez jön a folyamatos üzemeltetés költsége: mostanáig kb.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): fotonzámláló, nagy felbontás (0,014"/px), 115–650 nm

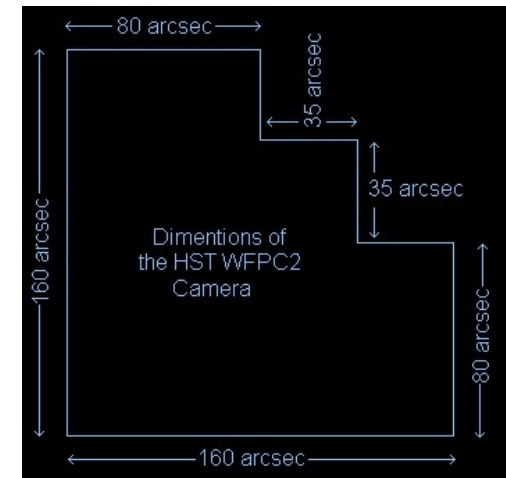
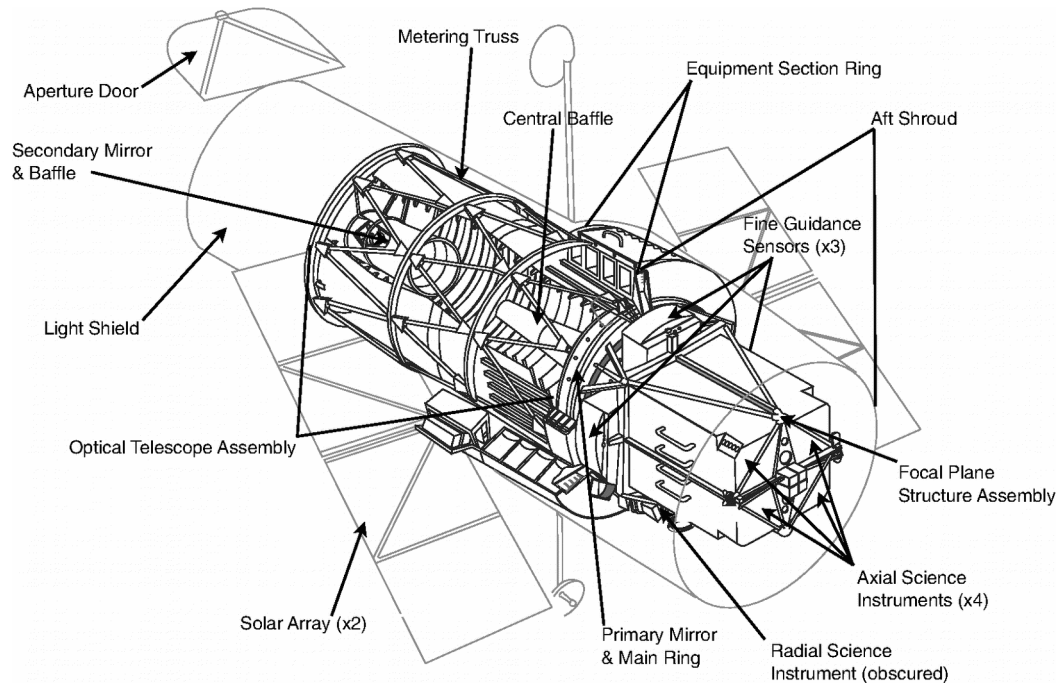
FOS: 115–800 nm, asztrofizikai források spektroszkópiája

A két spektrográf és a FOC érzékelője digicon képerősítő.

## **Radiális** műszerek:

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

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



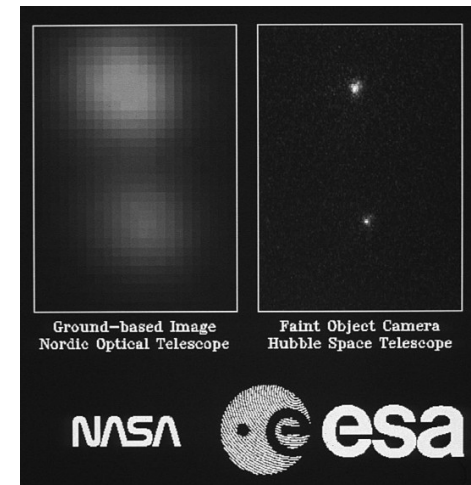
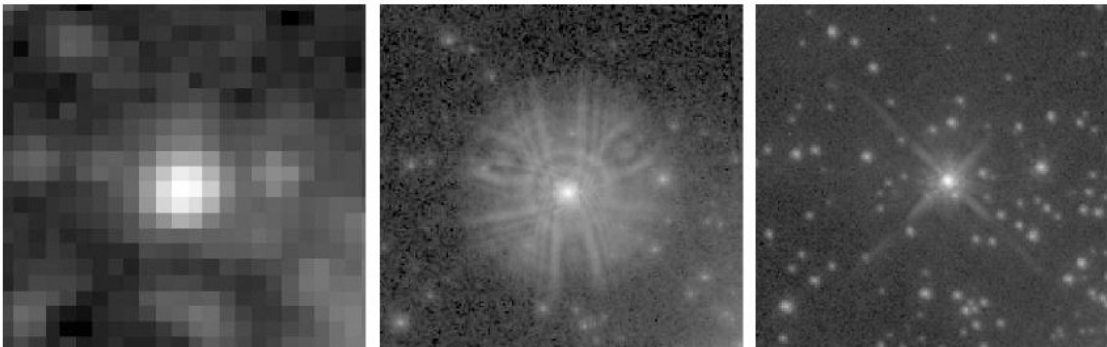
# Meglepetés és csalódás

A főtükör leképezési hibája: szferikus 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 szferikus aberrációt, azok már akkor jelezték is a hibát, ám a tesztek 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 előtérbe került a Naprendszer kutatása.



# A megoldás

Szerencsére szervizküldetéseket terveztek – 1993-ig megoldást kellett találni.

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

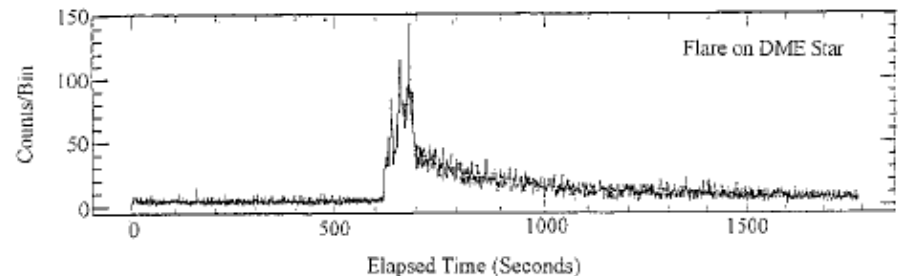
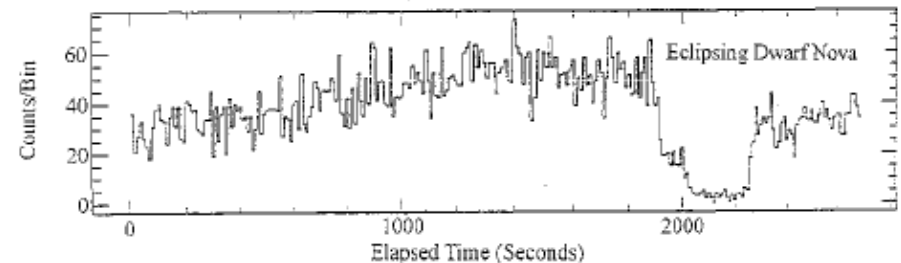
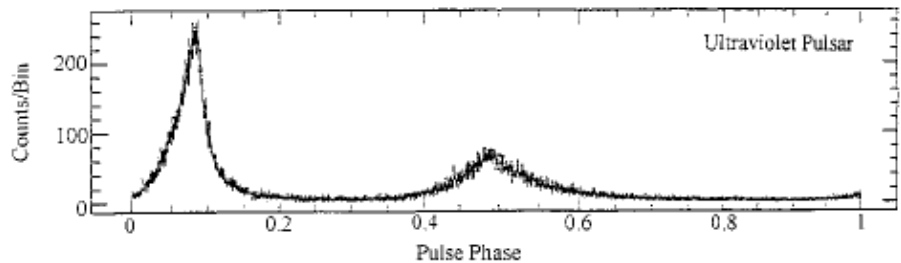
Megoldás: új optikai rendszer behelyezése a fényútba, ellenkező irányú szferikus aberrációval.

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 korigálja az aberrációt.

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

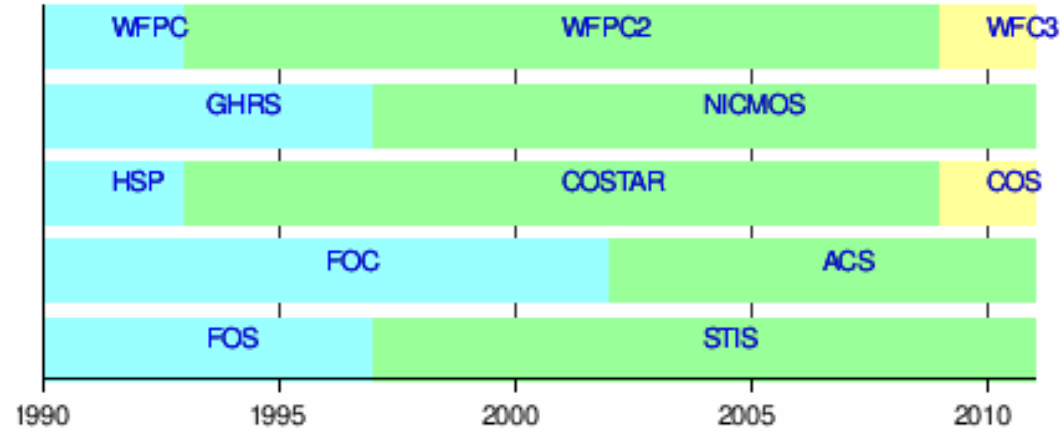
Samples of HSP Photometry



# 1. szerviz

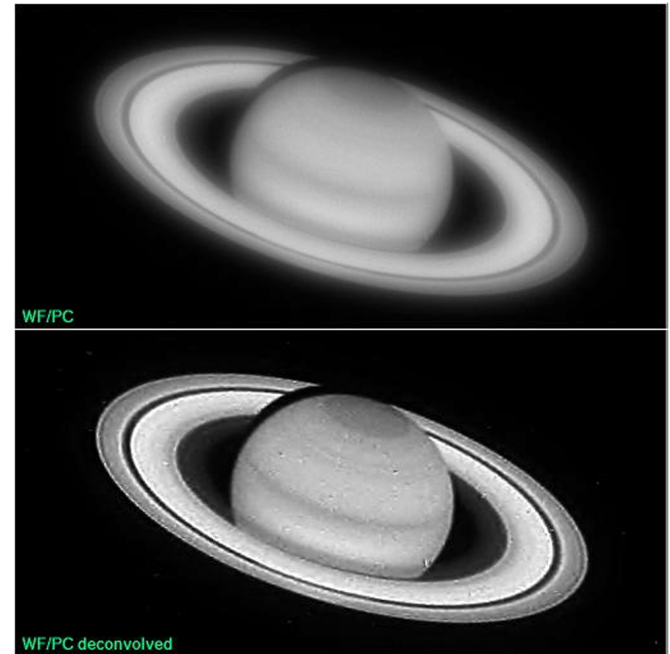
**SM-1** (1993. dec. 2–13.): kritikus munka, 5 alkalommal külső szerelés.

- 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).



Wide Field Planetary Camera 1



Wide Field Planetary Camera 2

## 2. szerviz

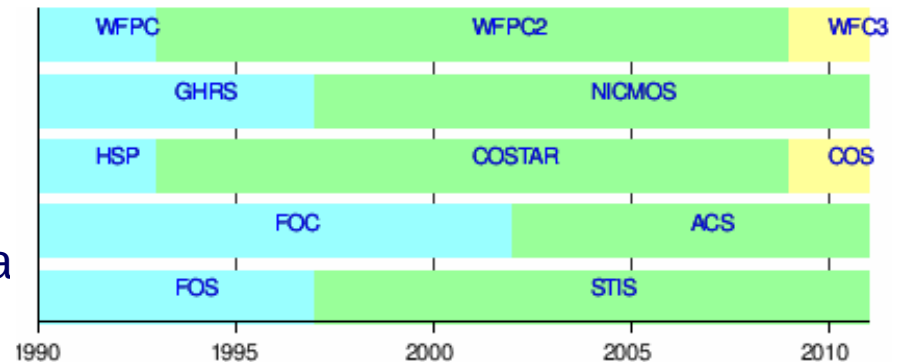
**SM-2** (1997. febr. 11–21.):

- GHRIS 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-üzem módban 0,05"/px, Cs<sub>2</sub>Te MAMA-detektorral (multi anode microchannel array, UV-ben) 0,024"/px; 2001 májusában az elektronika leállt, 2004. aug.-ban a tartalék elektronika is; az SM4 során cserélték ki.

NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer): 0,8–2,5  $\mu\text{m}$  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

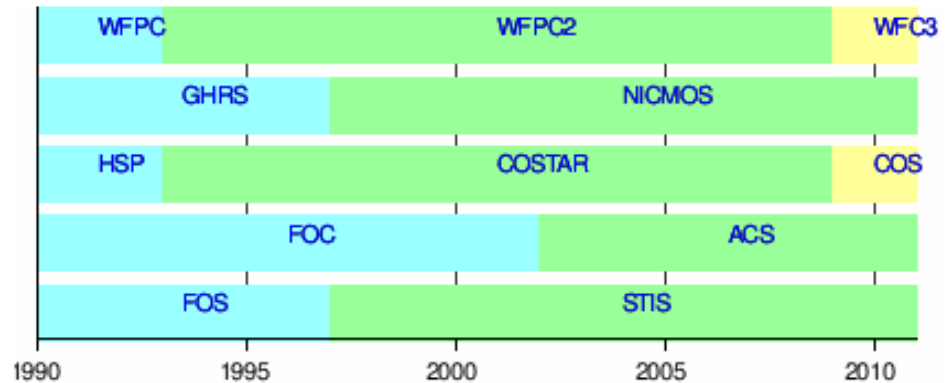
Két alkalomra bontották, amikor a 6 giroszkóp közül már 3 tönkrement (sőt a karbantartásig még egy 4. is).

**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 felmérőkamera, 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).

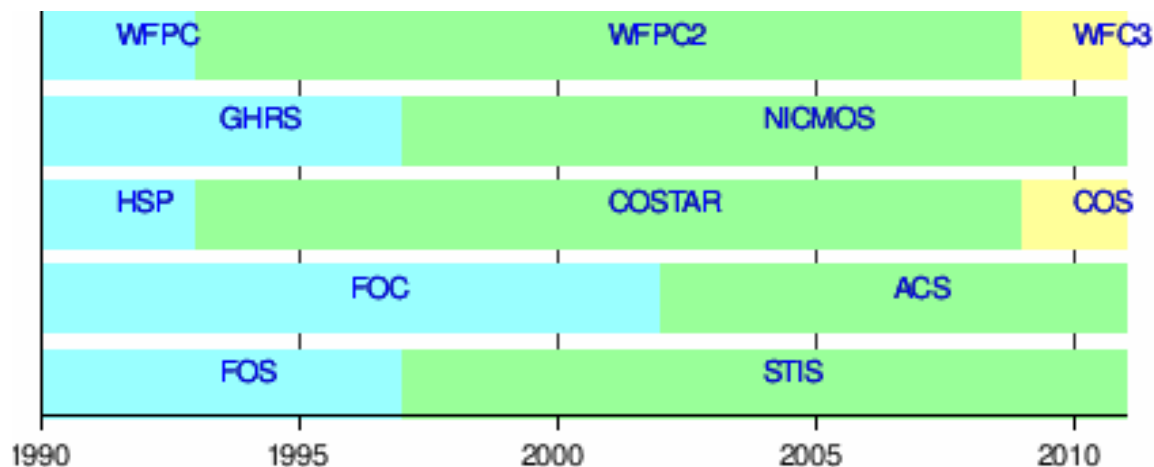
2006. jún.: ACS fő kamerája leállt, csak az UV-kamera maradt működőképes, tartalék elektronikára kapcsolva.

2007. jan.: rövidzárlat a tartalék elektronikában.

2007. aug.: újabb giroszkóp ment tönkre, bekapcsolták a leállított tartalékot.

**SM-4:** a JWST késése (most 2021-re tervezik az indítását) 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-csatorna: 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

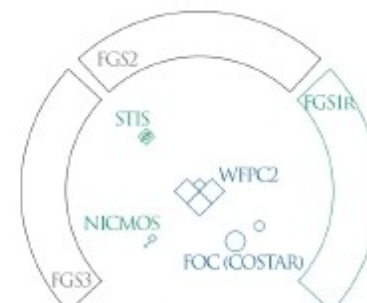
High Speed Photometer  
Wide-Field/Planetary Camera  
Faint Object Camera  
Faint Object Spectrograph  
Goddard High Resolution Spectrograph  
Fine Guidance Sensors (3)



*Servicing Mission 1, December 1993*

1994-1996

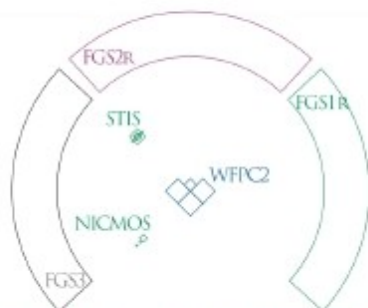
Corrective Optics ST Axial Replacement (COSTAR)  
Wide-Field Planetary Camera 2  
Replacement Redesigned Solar Arrays (SA2)  
Gyroscopes  
Other Spacecraft Upgrades



*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

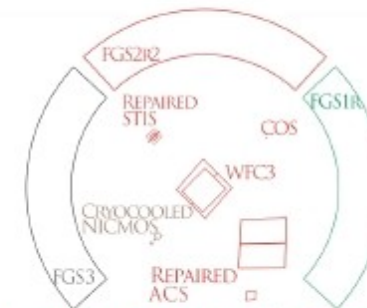
Replacement Fine Guidance Sensor  
Gyroscopes  
Other Spacecraft Upgrades



*Servicing Mission 3B, March 2002*

2002-2008

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



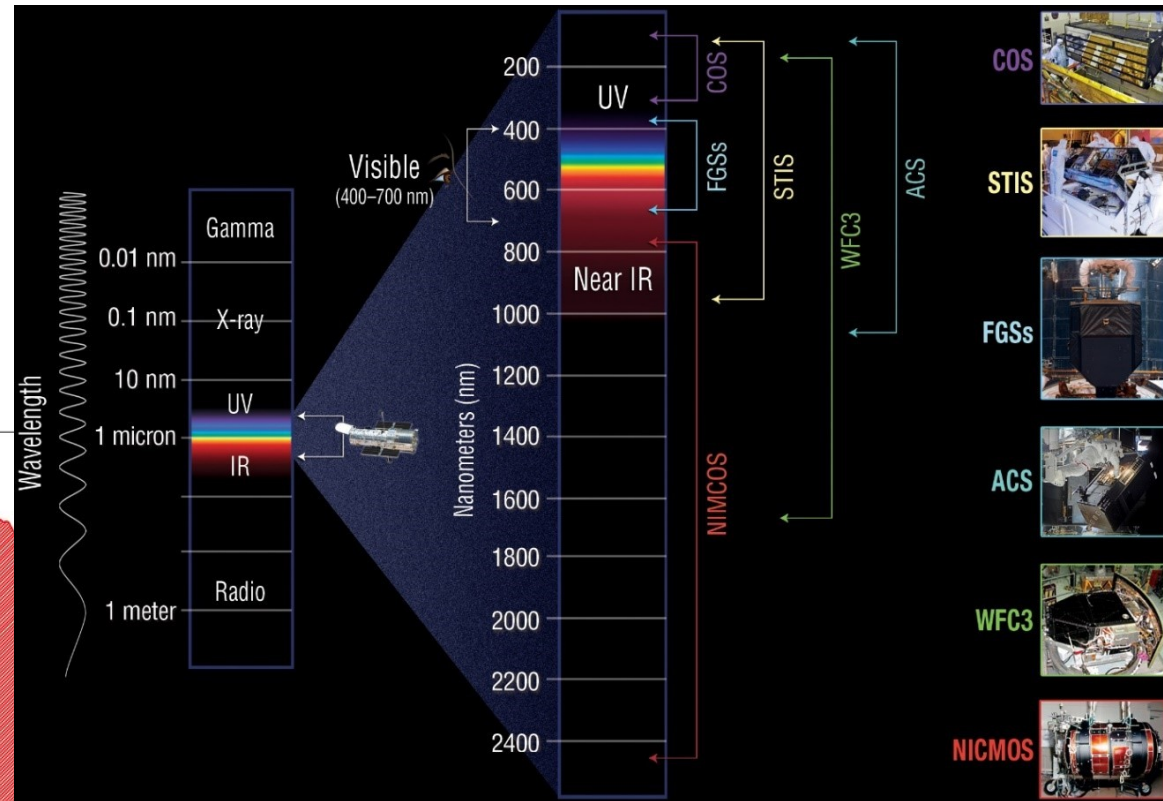
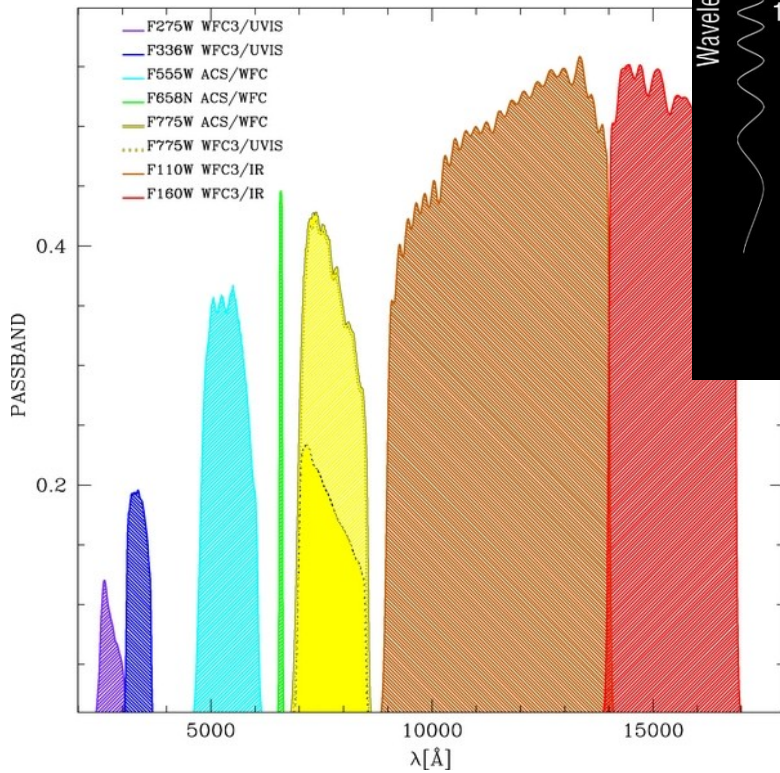
*Servicing Mission 4, May 2009*

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

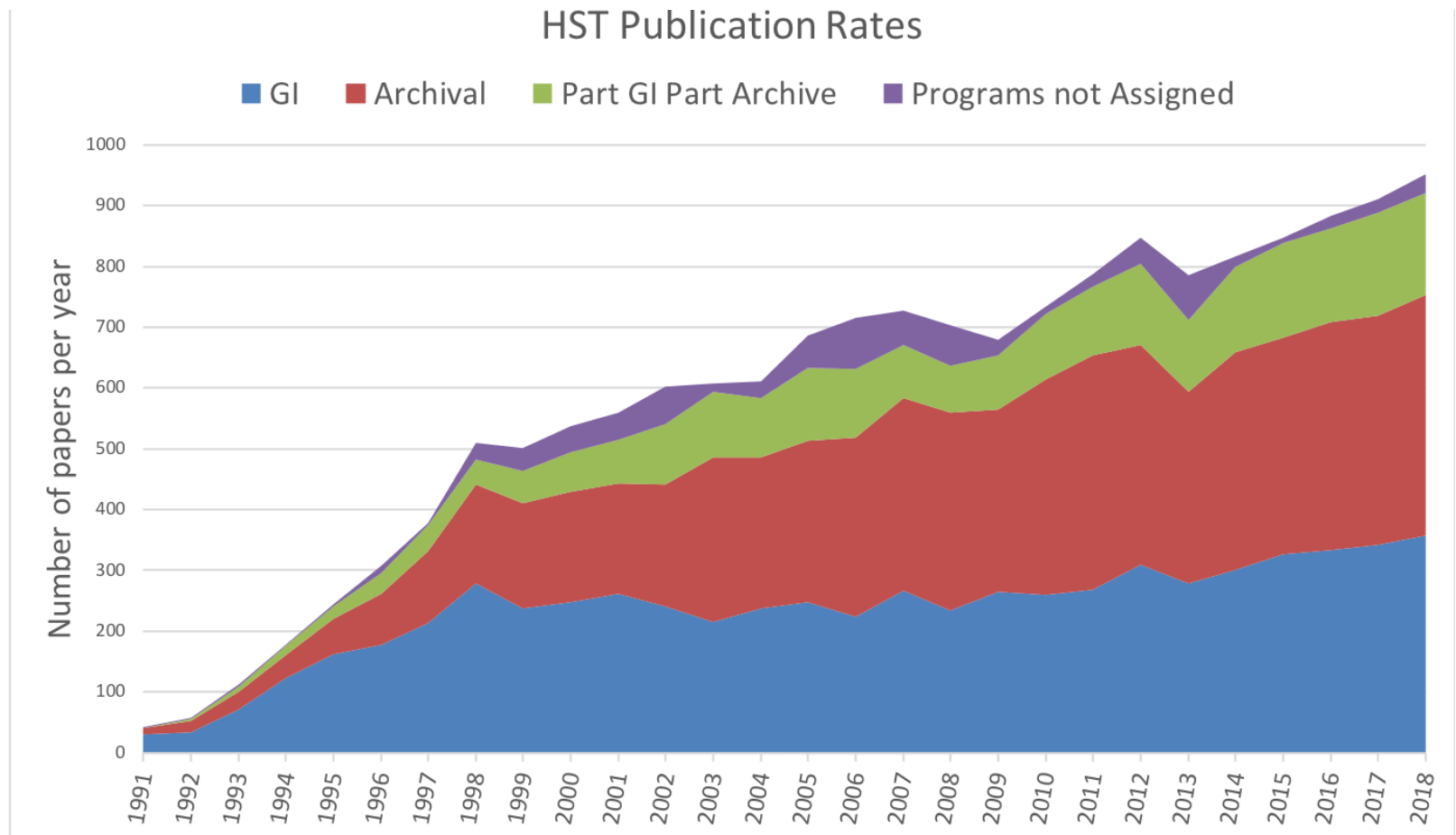
Servicing Mission	Dates	New Instruments	Other Components Installed
SM1	Dec 2-3, 1993	COSTAR* WFPC2	Solar Arrays Magnetometers Coprocessors Gyroscopes GHRS Redundancy Kit
SM2	Feb 11-21, 1997	STIS NICMOS	Refurbished FGS Optical Control Electronics Enhancement Kit Solid State Recorder Reaction Wheel Assemblies 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 WFC3	STIS & ACS fixed Replace Gyroscopes Replace Batteries Refurbished FGS

# 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.





# Publikációs statisztikák összehasonlítása

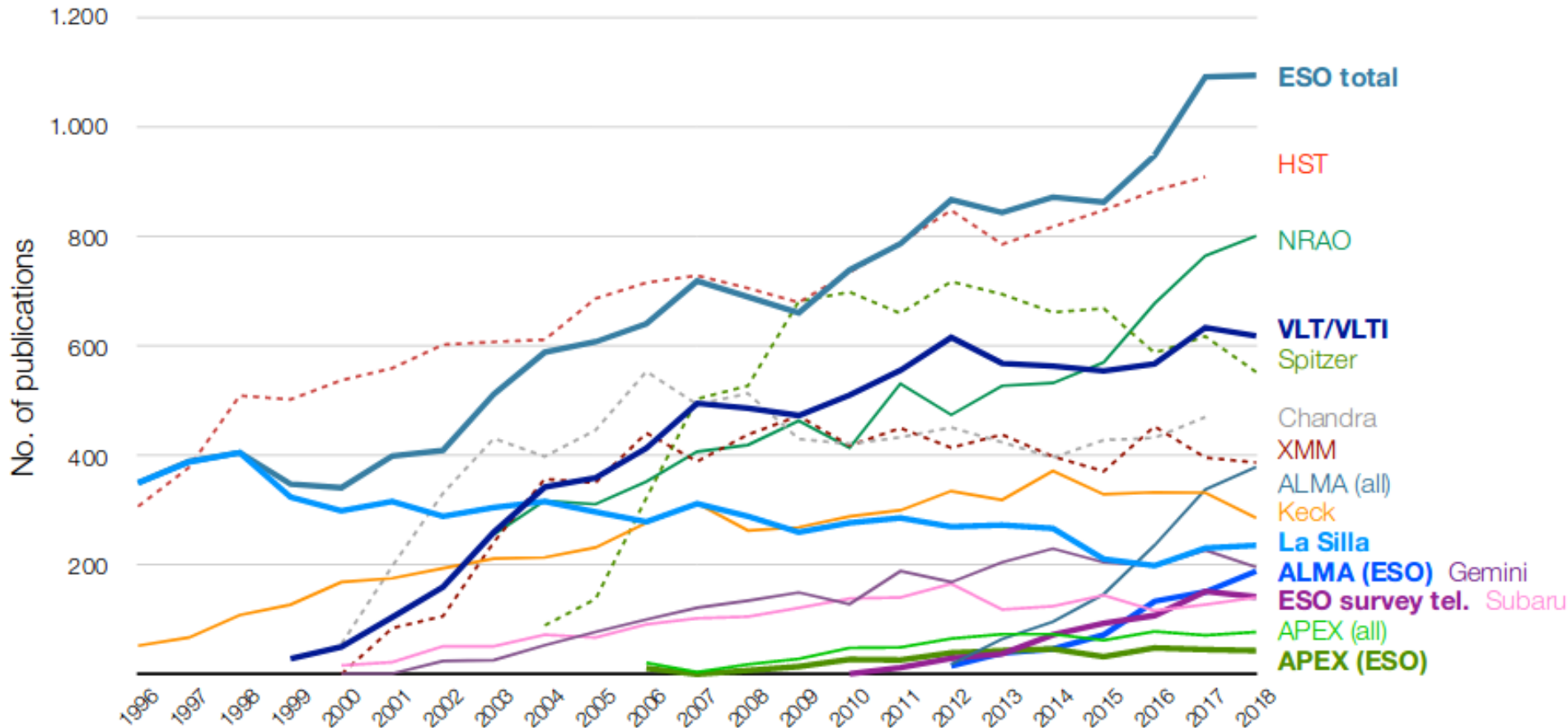
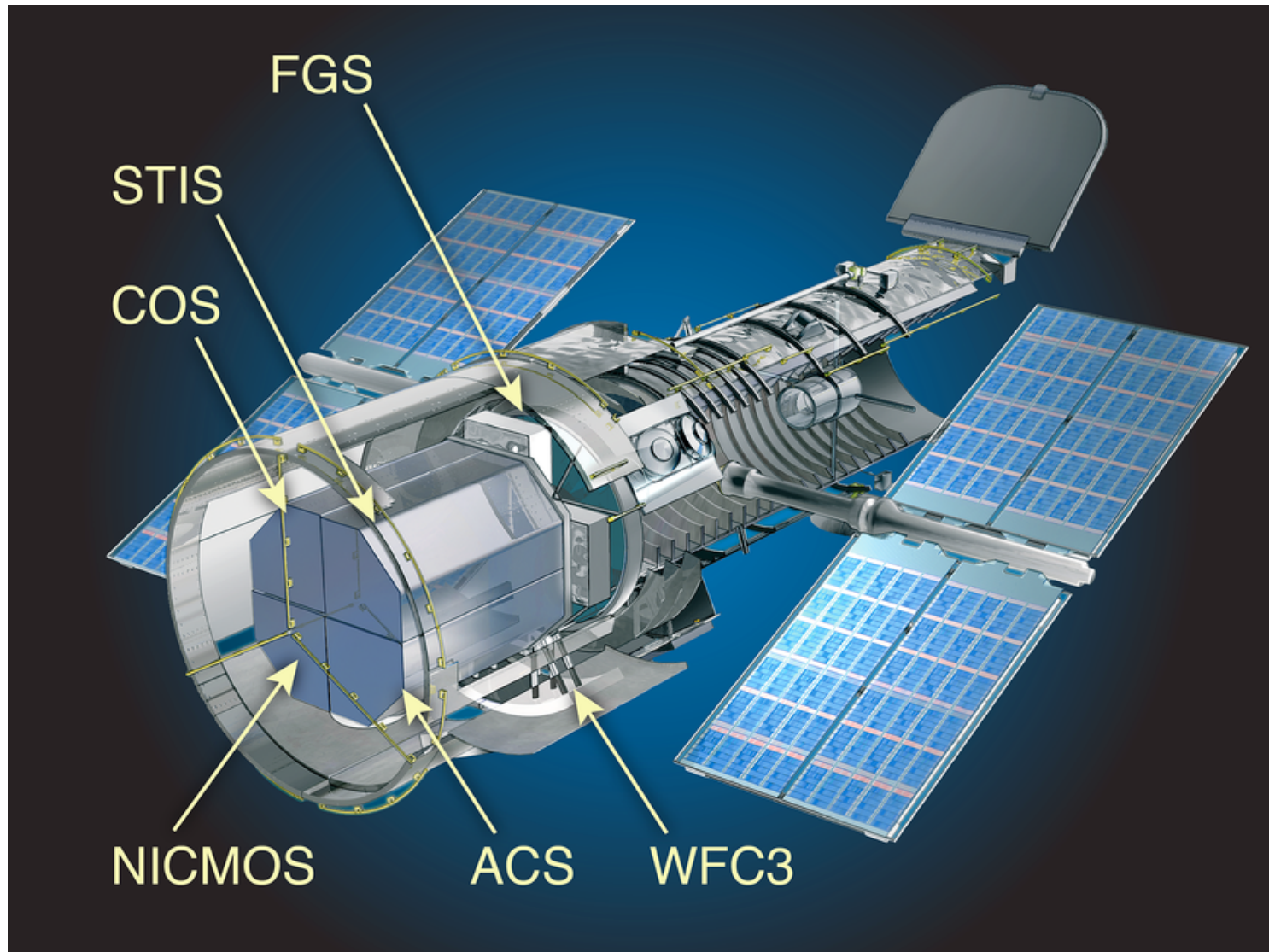


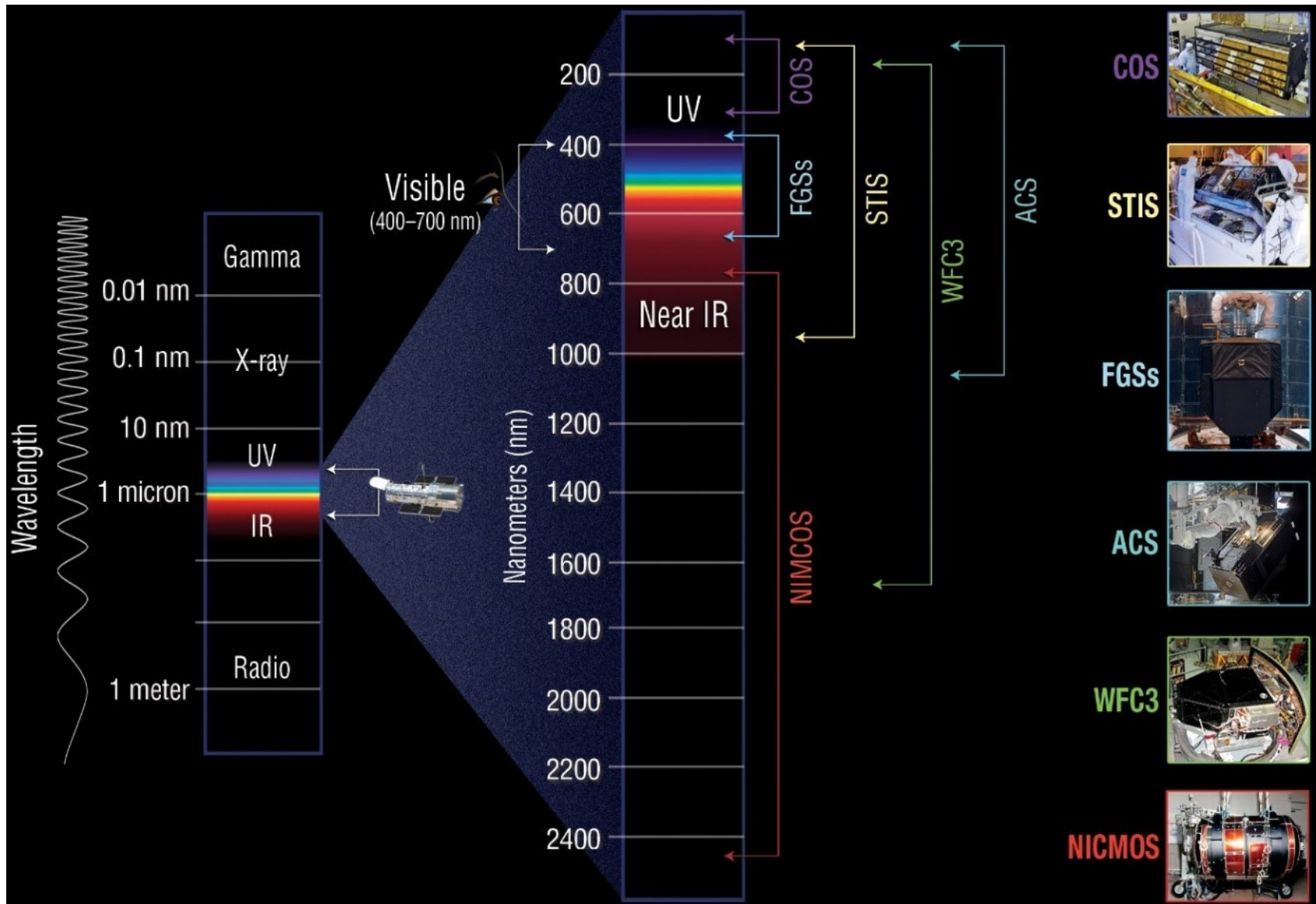
Fig. 3: Refereed publications by ESO and other observatories (as of Feb. 2019; info for 2018 may still be preliminary.)

**Thick lines:** ESO facilities. **Thin lines:** other ground-based facilities. **Dashed lines:** space-based facilities.

# A HST jelenlegi műszerei

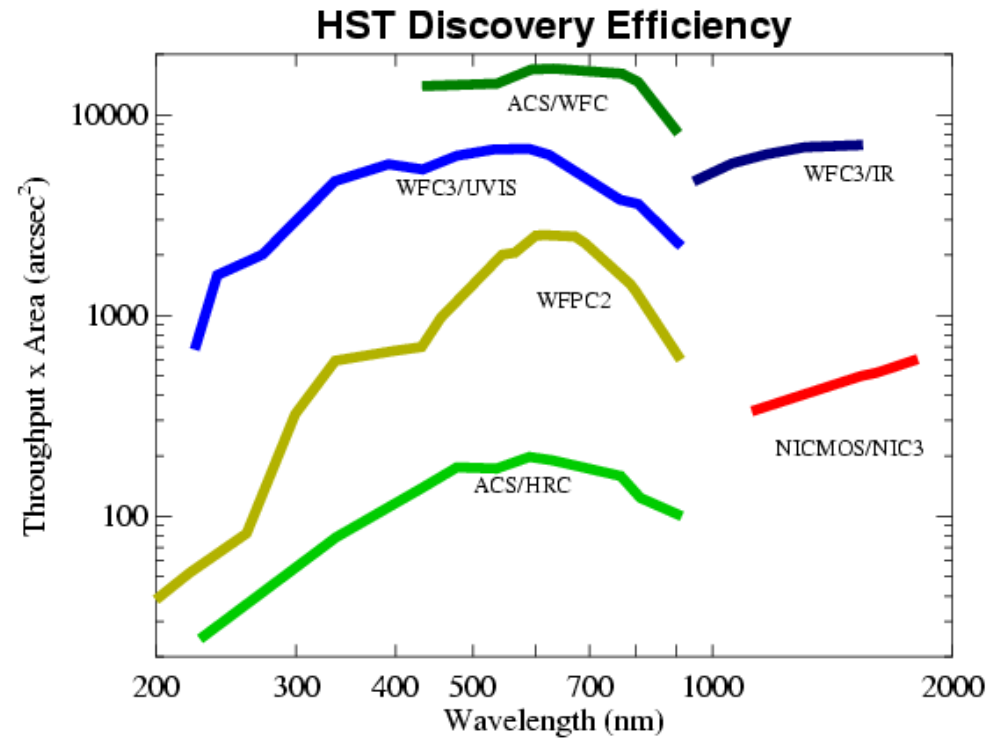
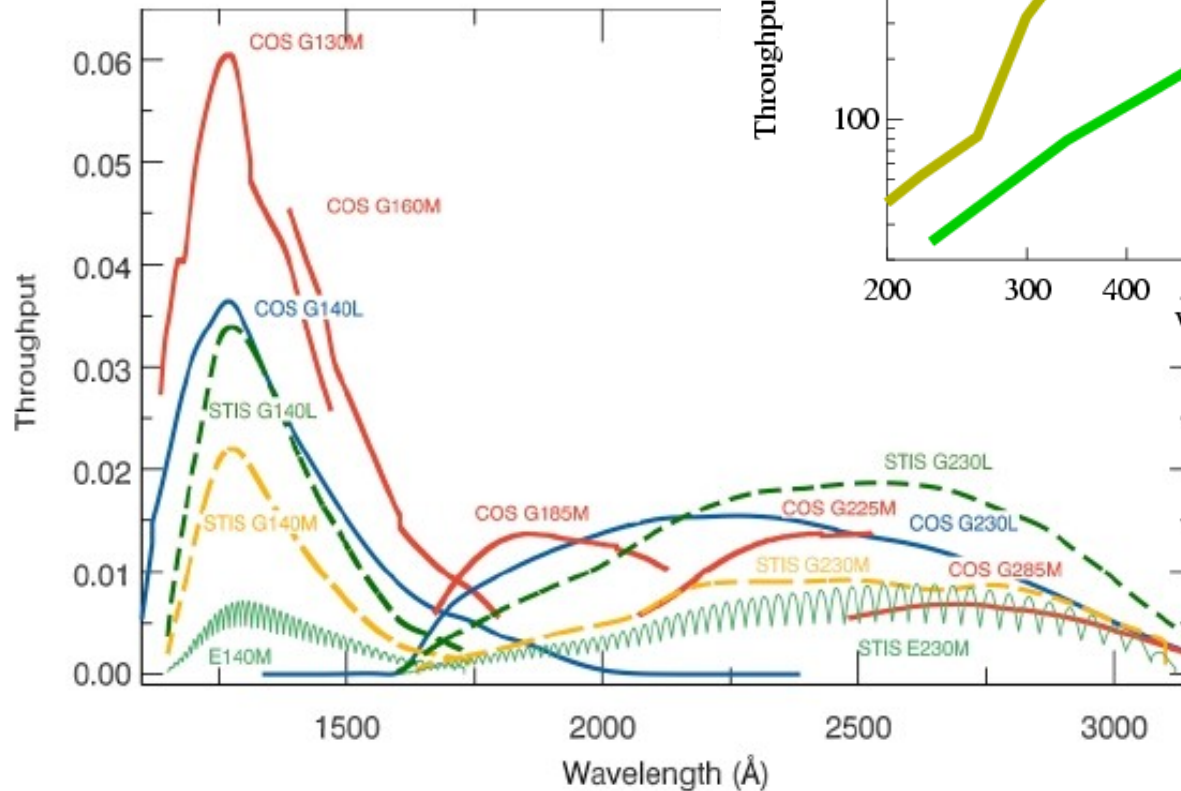


# A HST jelenlegi műszerei



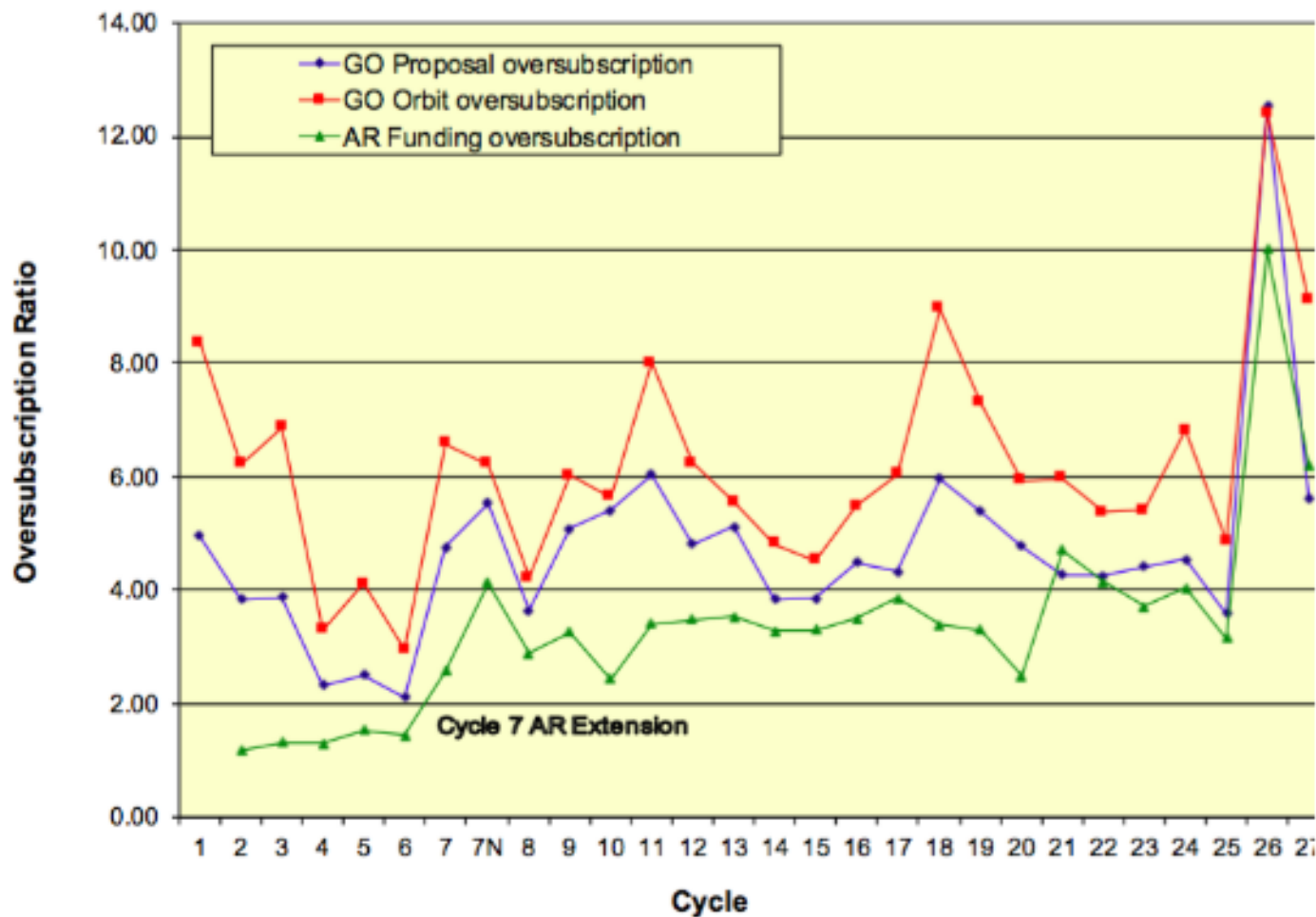


# A HST detektorainak „összehasonlítása”



# Az észlelések ütemezése

Obszervatóriumként működik: a távcsőidőre pályázni kell. A téma alapján illetékes szakmai zsűri bírálja el, hogy milyen javasolt észleléseket hajtanak majd végre. A távcsőidőre hatalmas a túljelentkezés.



# Az észlelések ütemezése

A távcsőidő tervezése, beosztása sokkal bonyolultabb a földi 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  $45^\circ$  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. Csak az utóbbi időkre 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.

# 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.

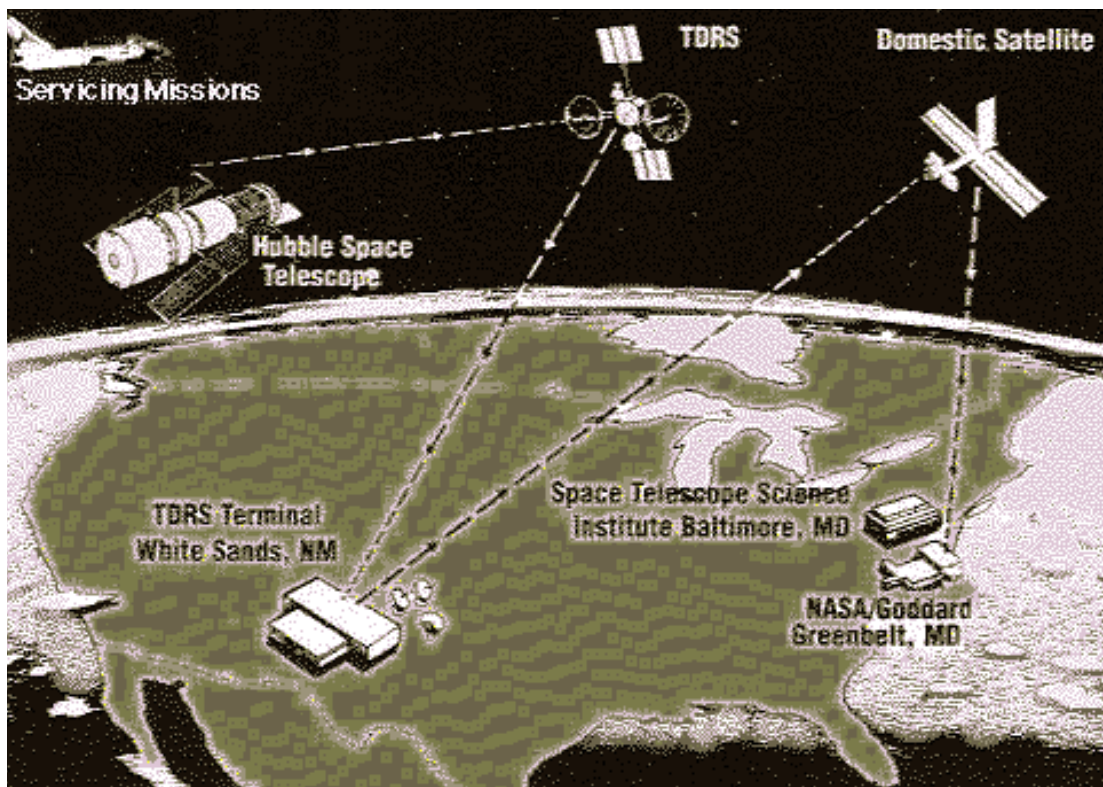
Minden adatot archiválnak. 1 év után válnak publikussá, a **DDT**-adatok (Director's Discretionary Time) kivételével, azok ugyanis rögtön elérhetők.

Adattárolás:

FITS-formátumban.

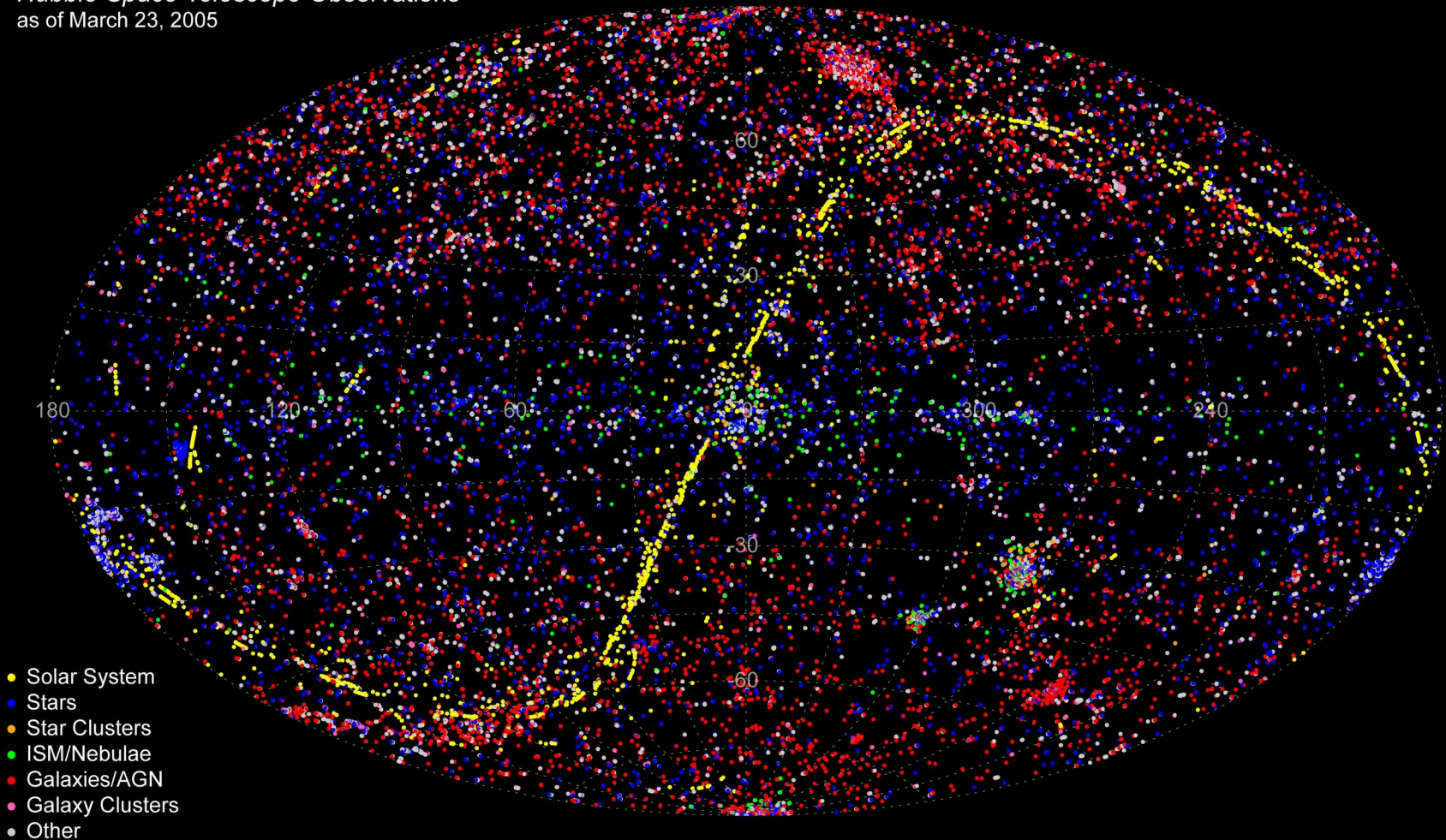
A feldolgozás könnyebb,  
de nem alkalmas  
közvetlen képnézésre.  
Ezért is hozták létre a  
**Hubble Heritage Projectet**  
(Hubble-örökség).

Adatfeldolgozásra szolgáló  
programcsomagok:  
pl. az IRAF alatt futó  
STSDAS (Space  
Telescope Science  
Data Analysis Software).



# A HST észlelési célpontjai az első 15 évben

*Hubble Space Telescope Observations*  
as of March 23, 2005



# 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 megkezdzi működését  
1983: az LST nevét Hubble-ra változtatják  
1984: az ST-ECF megkezdzi 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 főtükrös 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  
2006: az Eris törpebolygó nagyobb a Plútónál

# A HST rövid kronológiája

2008: Fomalhaut b-ről képalkotás  
(első direkt 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 színeképe)

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<sub>10</sub>)  
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 eddigi 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 szferikus aberráció miatt kezdetben ideális célpontok voltak a bolygók (nagy jel/zaj rövid expozícióval).

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

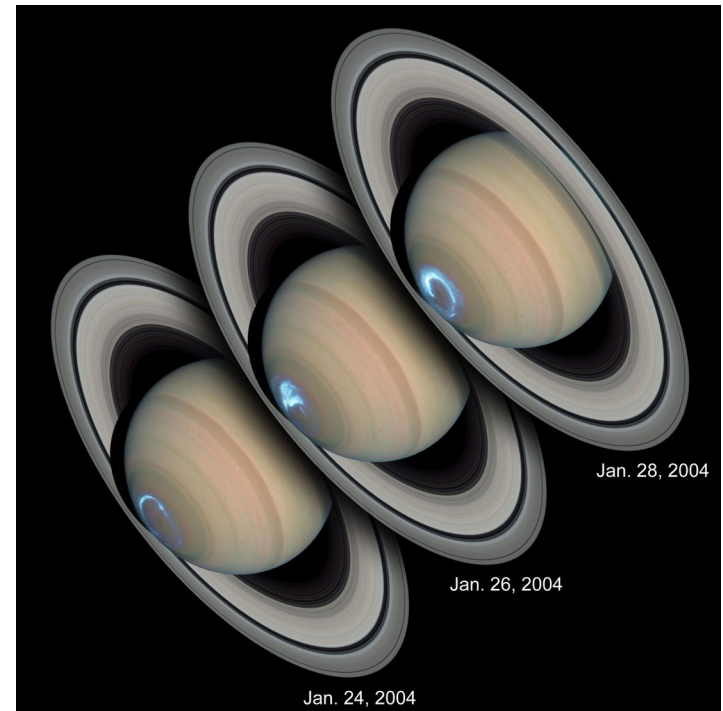
UV-érzékenység: auróra felfedezése a Jupiter és a Szaturnusz pólusainál, bolygóléggörök cirkulációja (és más időbeli változások) a nagy felbontást kihasználva.

A belső bolygók nem vizsgálhatók.

Minden műszerrel észleltek bolygókat (a HST-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);

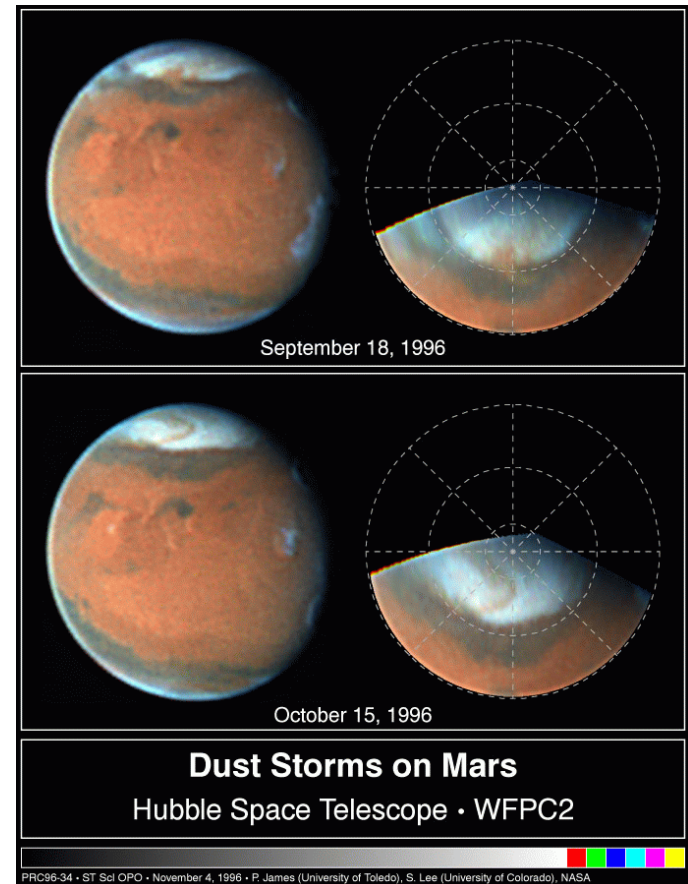
Felhőövek (8 km magasan) évszakos helyfüggése;

Porviharok: minden skálán előfordulnak (lokális, regionális, globális). 2001-ben volt az eddigi legnagyobb észlelt 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.

A Mars-szondák miatt a HST háttérbe szorult.

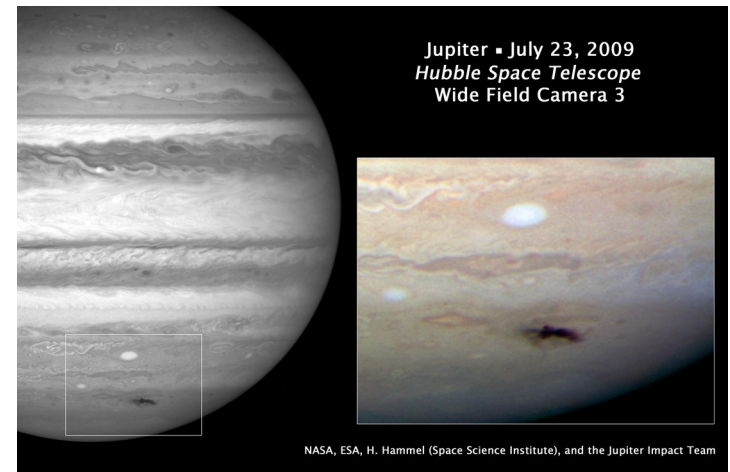
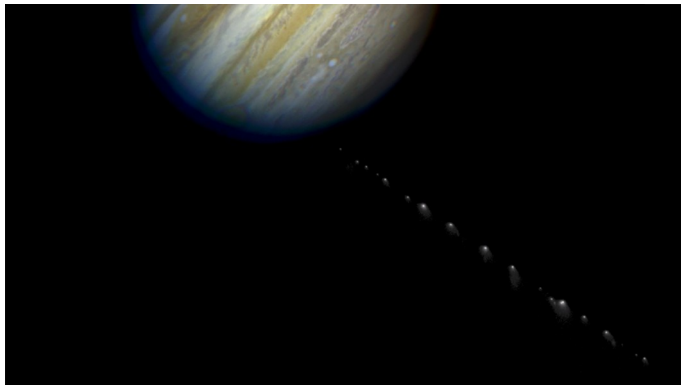
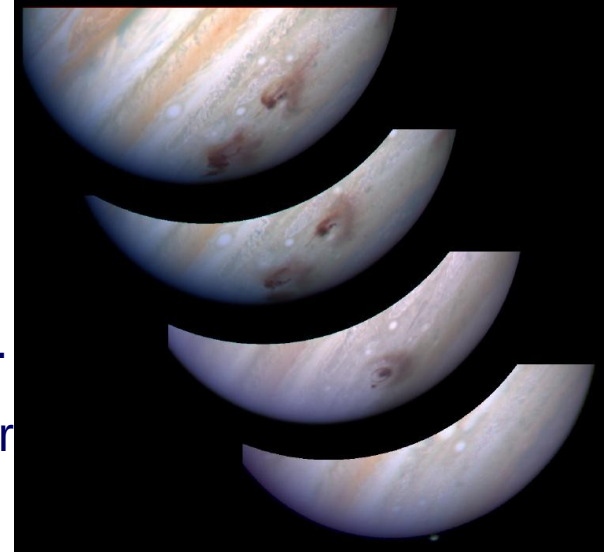


# A Jupiter kutatása a HST-vel

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. Légkör „gombafelhők” 3000 km magasra emelkedtek 6-8 perc alatt, 10 perc alatt széteszlottak, visszaestek. Látszott a hullámterjedés is. Újabb becsapódás történt: 2009. július 23.

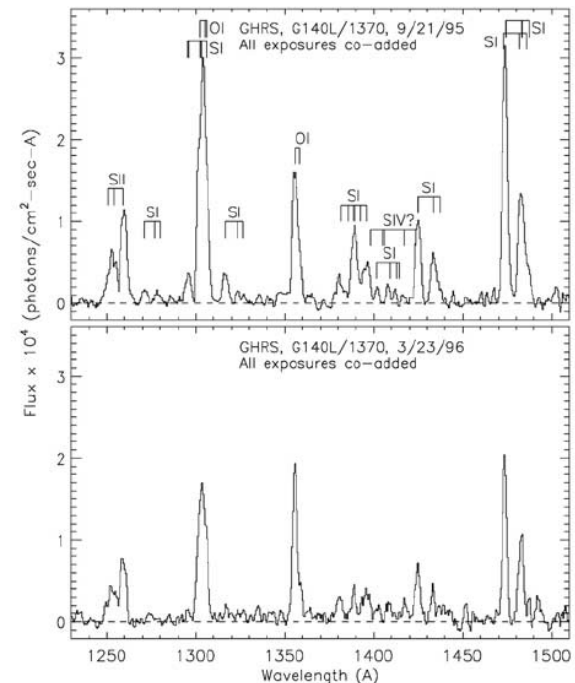
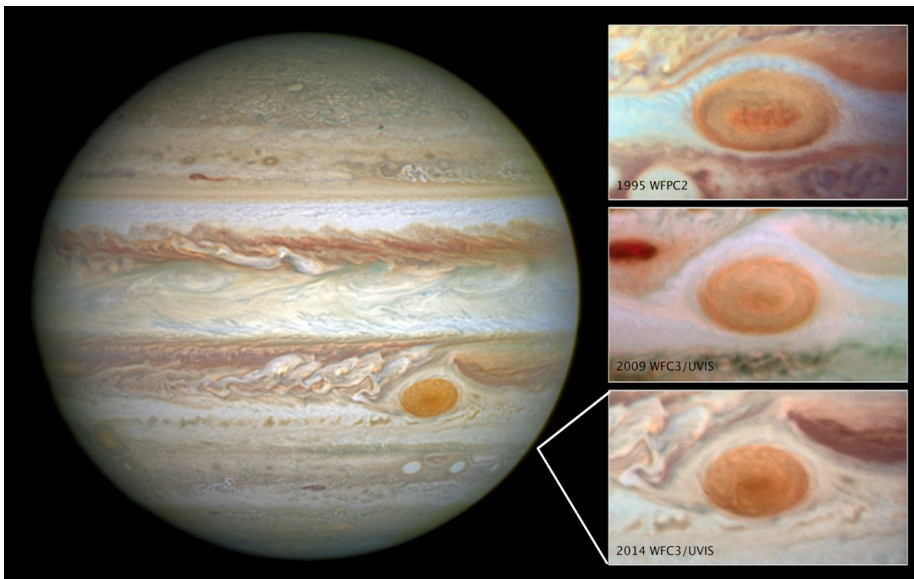


# A Jupiter kutatása a HST-vel

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

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

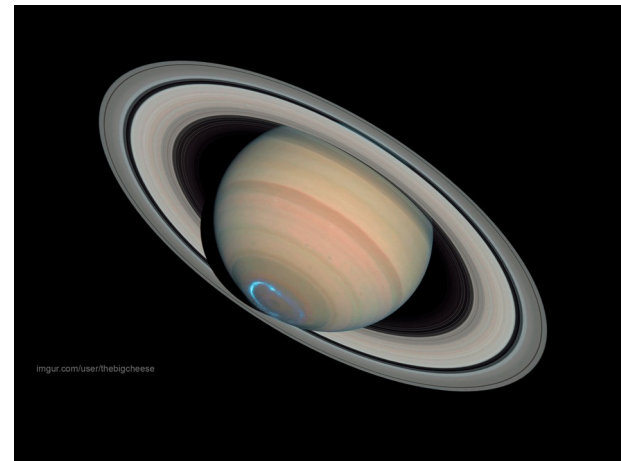
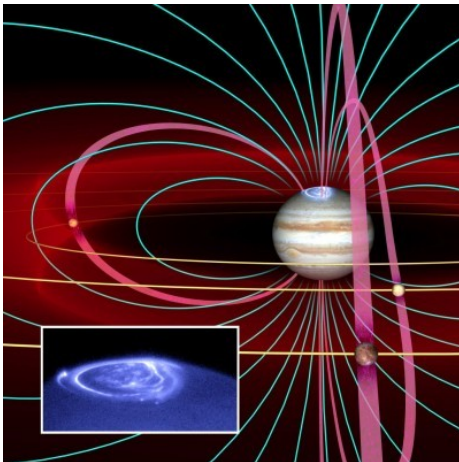


# A Szaturnusz kutatása a HST-vel

A Voyager által 1980-81-ben észlelt sarki hexagon nem tranziens jelenség. A sötét sávok és világos zónák profilha 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 bolygóléggör 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).

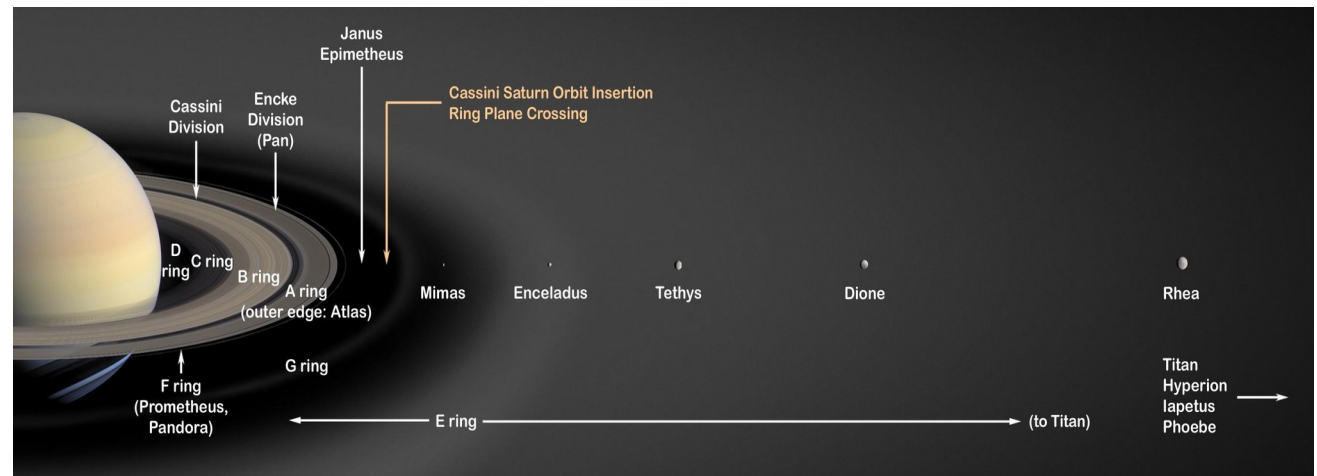
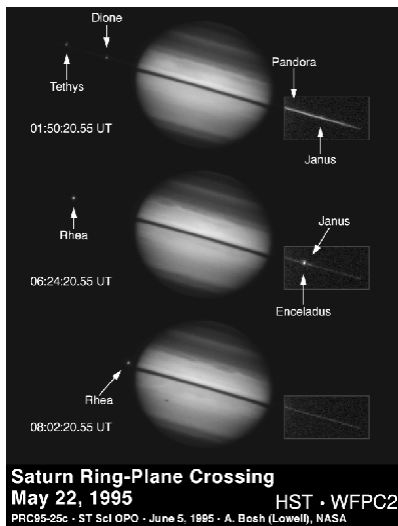


# A Szaturnusz kutatása a HST-vel

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.

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

A 29,5 éves keringési periódus alatt a gyűrű 2-szer fordul élével felénk. Ilyenkor lehet a terelőholdakat vizsgálni. 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.

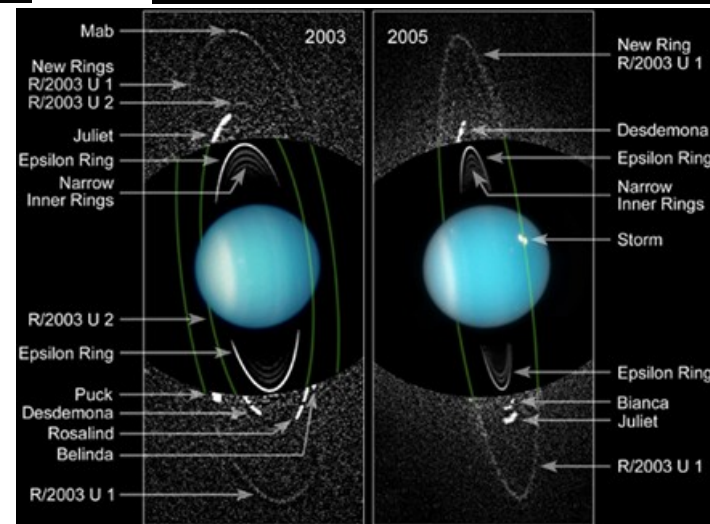
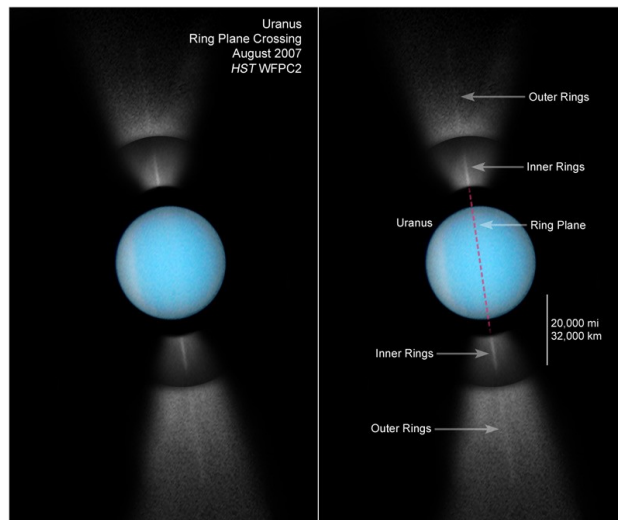
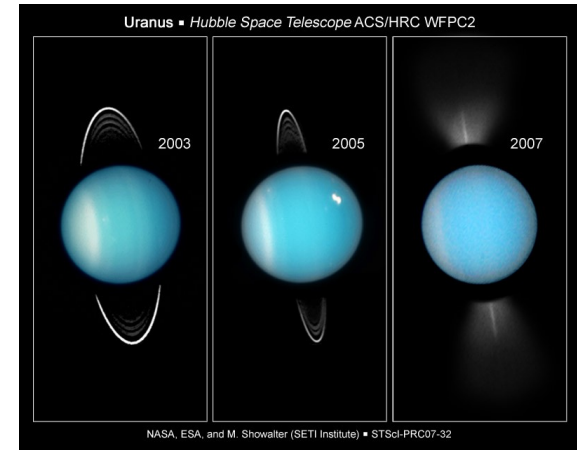
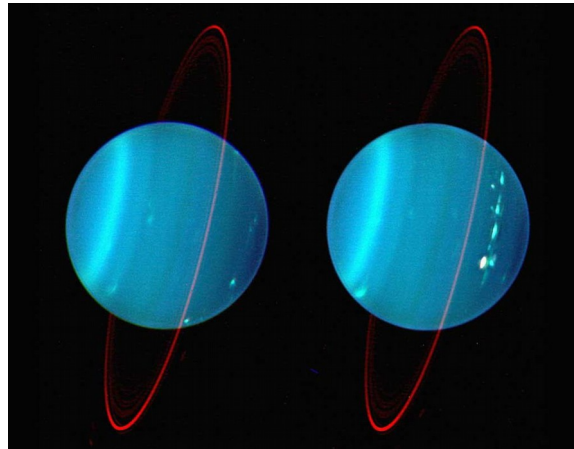


# Az Uránusz kutatása a HST-vel

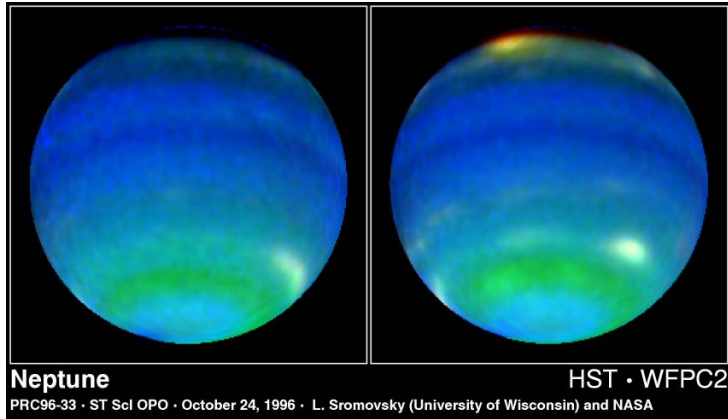
Hét felhő alapján vizsgálták a rotációját. A déliek azonos ütemben forogtak, mint a Voyager idején, az északiak lassabban forognak, ám azokról nincs Voyager-adat.

Új hold: 2003;

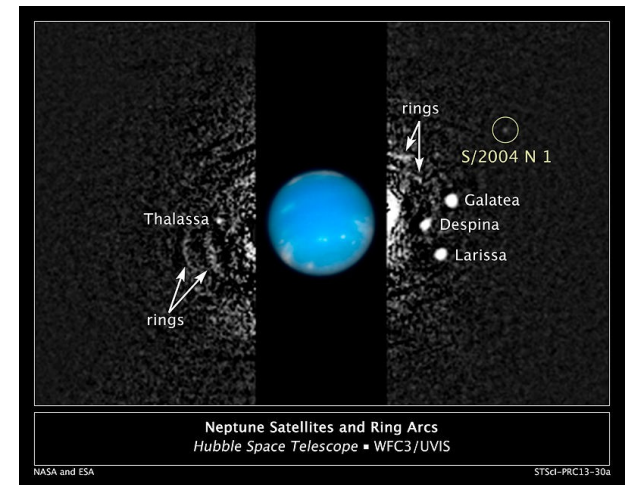
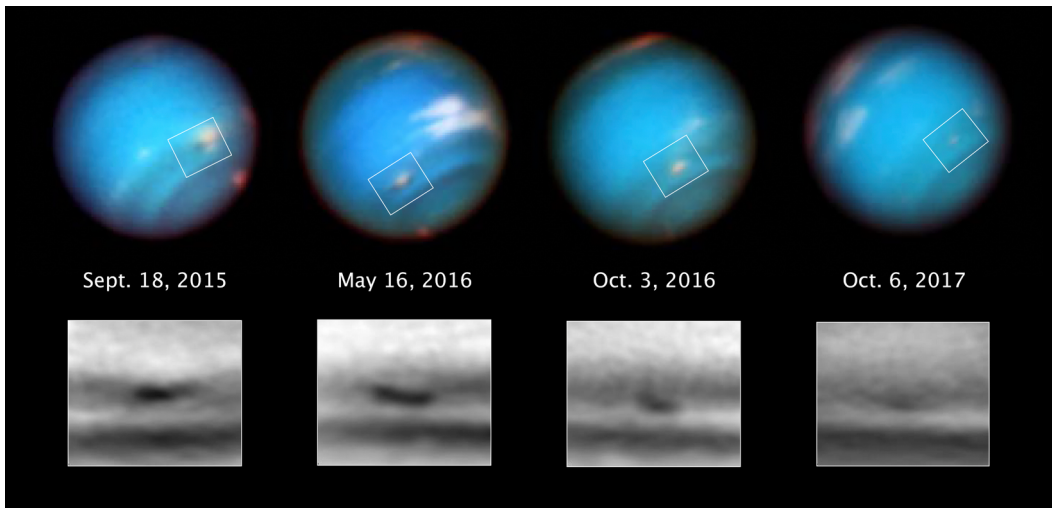
Új gyűrű: 2005.



# A Neptunusz kutatása a HST-vel



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



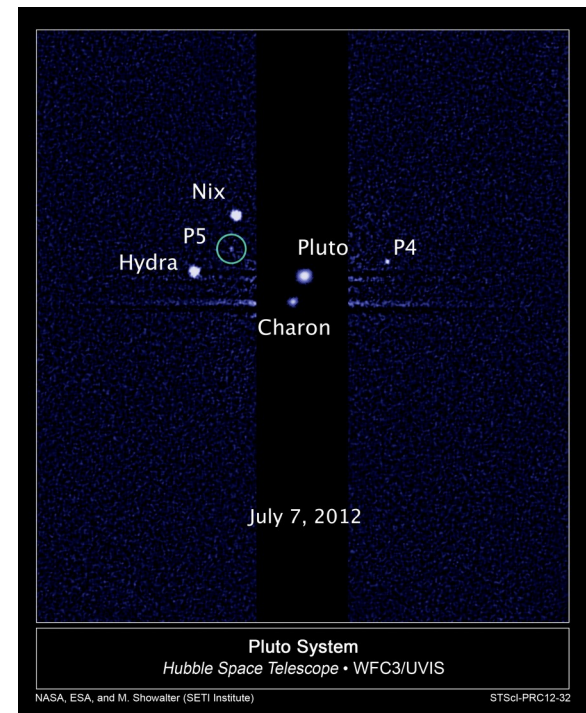
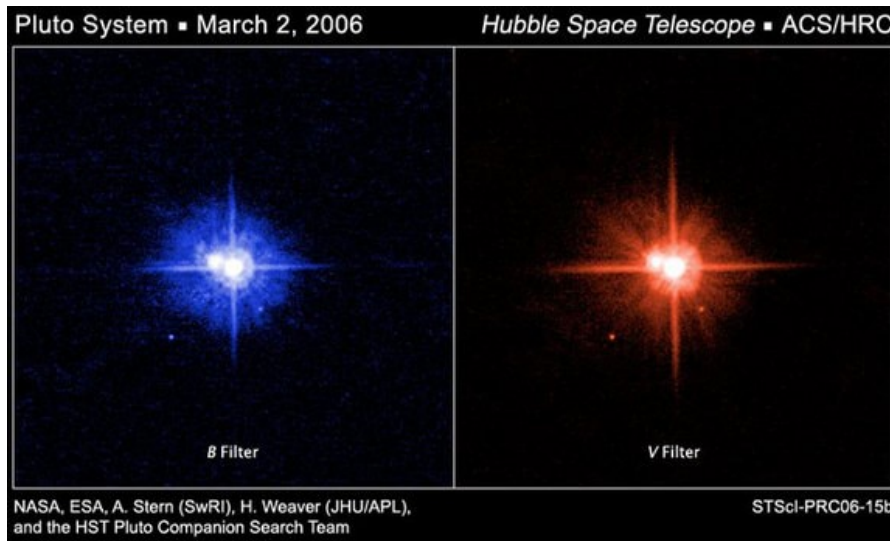
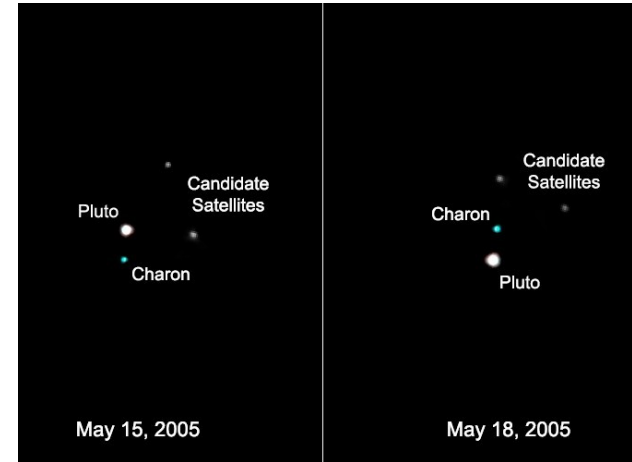


# A Plútó kutatása a HST-vel

A COSTAR beszerelése után 1994-ben a Plútó és a Charon sugarát és albedóját is meghatározták + a rendszer pályaelemeit. 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.



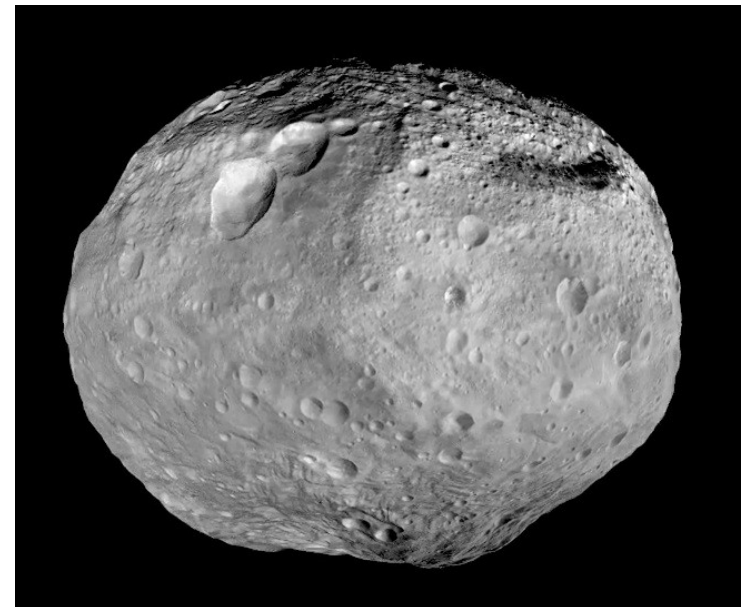
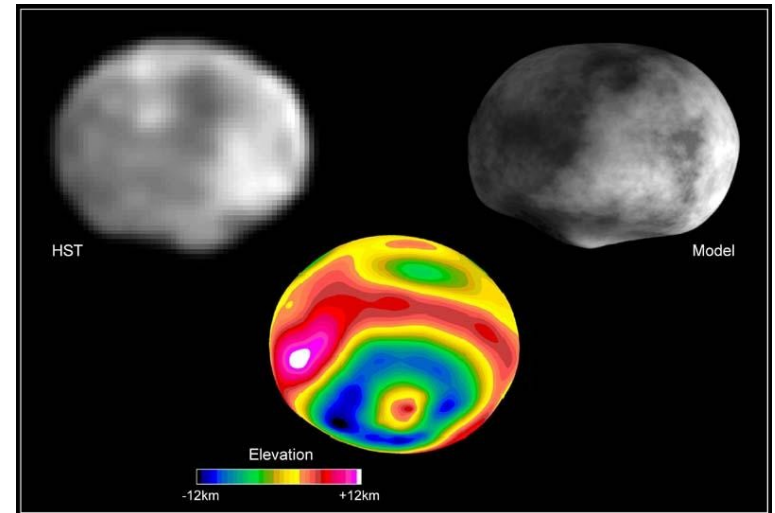
# Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

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. Fő felfedezés: a déli pólusnál hatalmas (430 km  $\emptyset$ ) becsapódási kráter (ellipszoidnak véve a Vesta fél nagy tengelyei: 289, 280, 229 km). A kráter pereme és központi csúcsa 13 km-rel emelkedik a kráteraljzat fölé.

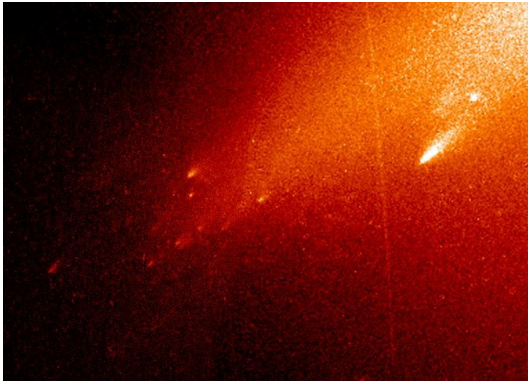
Szűrőkkel a kémiai összetétel: piroxénben gazdag kéreg az olivinból álló köpenyen. A nagyobb aszteroidák között egyedülálló, bazaltos felszín. Modell: 1%-nyi tömeget veszített a Vesta a becsapódáskor. A meteoritok 6%-ának szülőégitestje a Vesta.

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

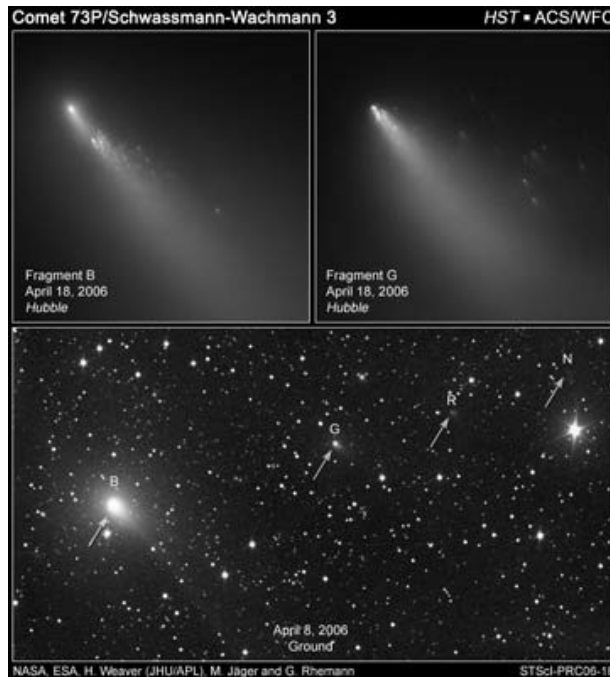
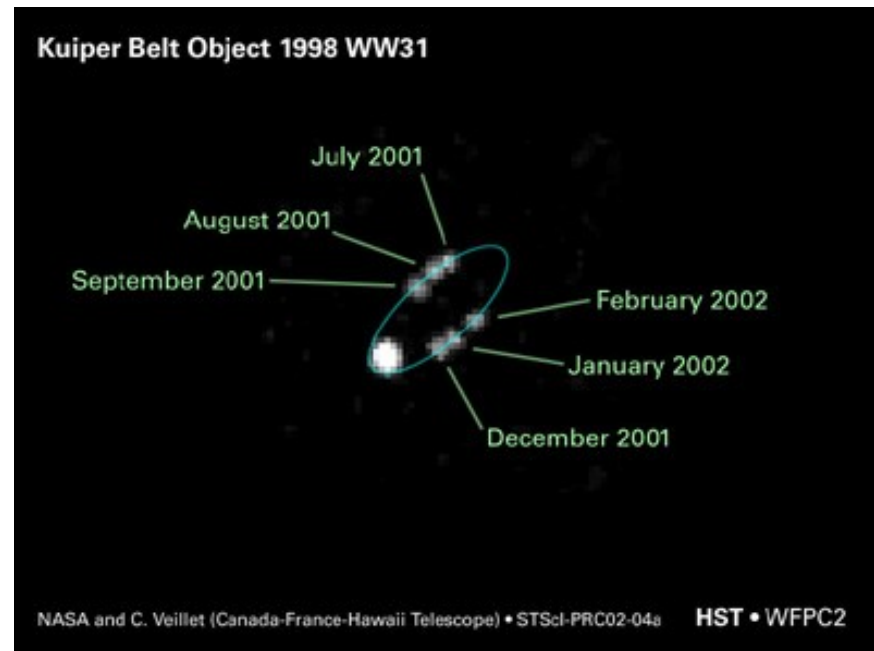


# Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

LINEAR-üstökös szétesése 2001-ben



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

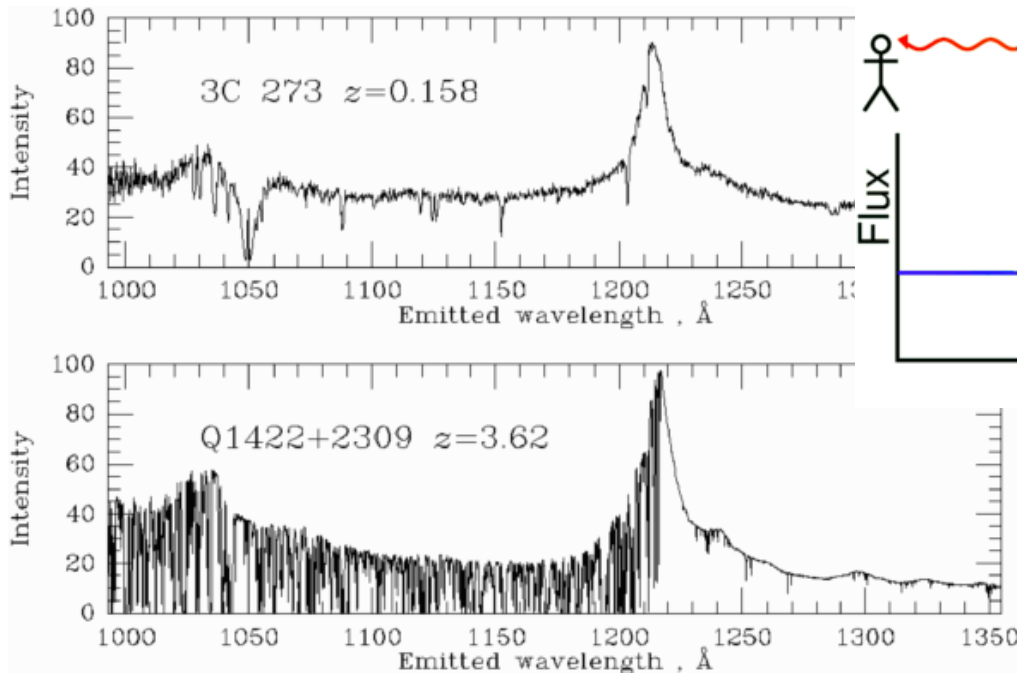


A 73P/Schwassmann–Wachmann üstökös feldarabolódása 2006-ban. Tóth Imre a kutatócsoport tagja volt.

# 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 előőrese; a WF-kamerával, amíg a többi műszer éppen mászt mér (parallel mező);
- A **Hubble-állandó** meghatározása legalább 10% pontosan.

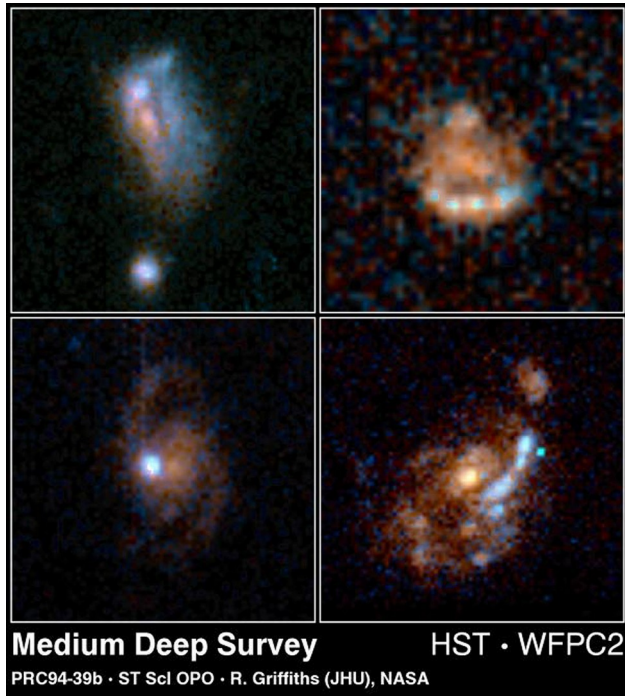
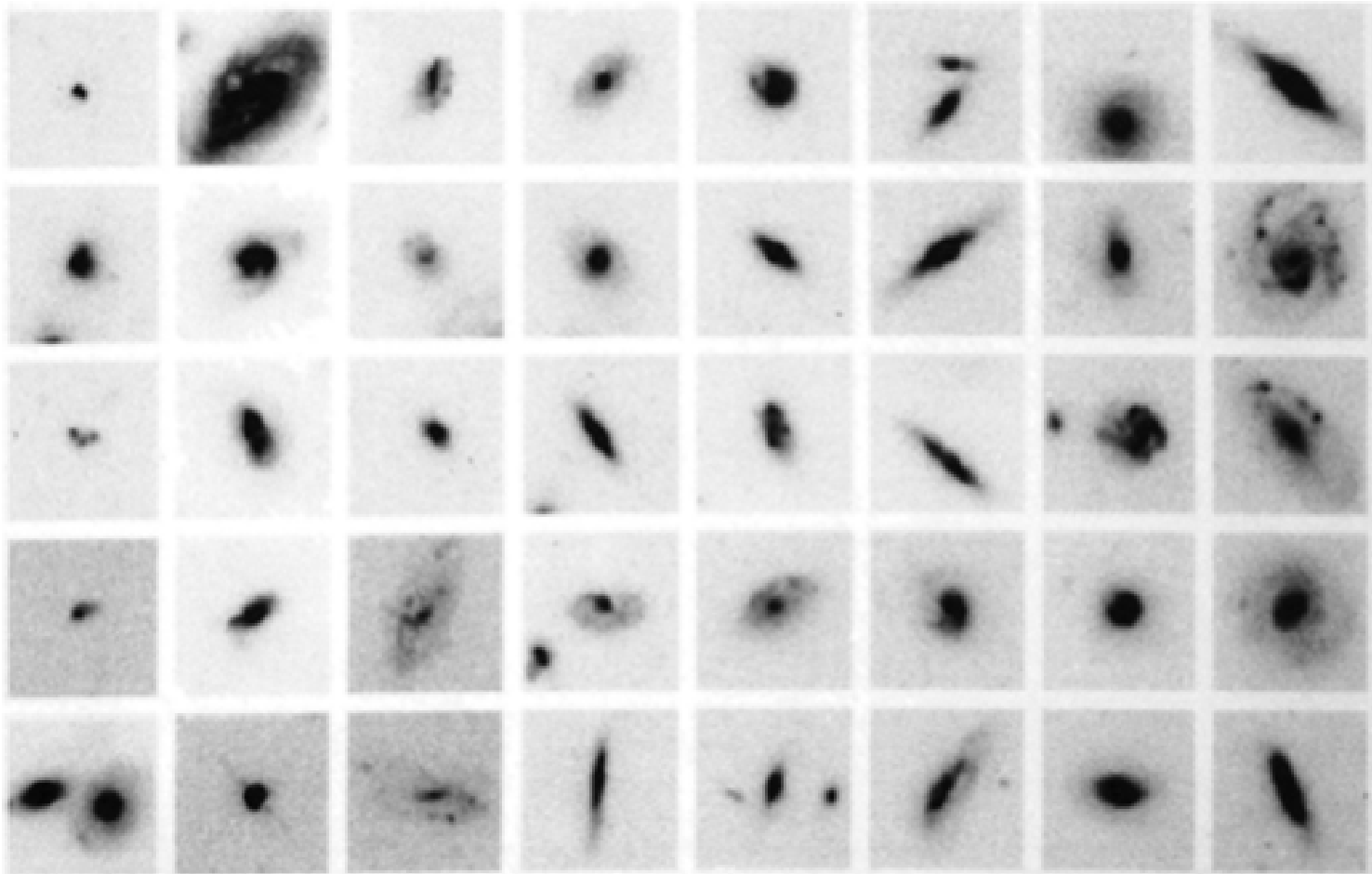


Table 1. Numbers of Cepheid Calibrators for Secondary Methods

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

# A HST kulcsprojektjei

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



# Fontos előrelépések az ezredfordulóra

	<b>1990-beli ismeret</b>	<b>a HST alapján 2000-ben</b>
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 10-20 milliárd év	kb. 70 km/s/Mpc 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 42 projekt (36–834 keringés észlelési idővel)

**Archival Legacy Program:** eddig 48 projekt (csak régebbi archivált adatok új vagy új szempontok szerint történő feldolgozása)

**Large Program:** eddig 119 projekt (40–520 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:** 2020-ig 42 projekt (36–834 keringés észlelési idővel)

- 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  $z \sim 0.5-2$  (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](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:** eddig 48 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:** eddig 119 projekt (40–520 keringés észlelési idővel)

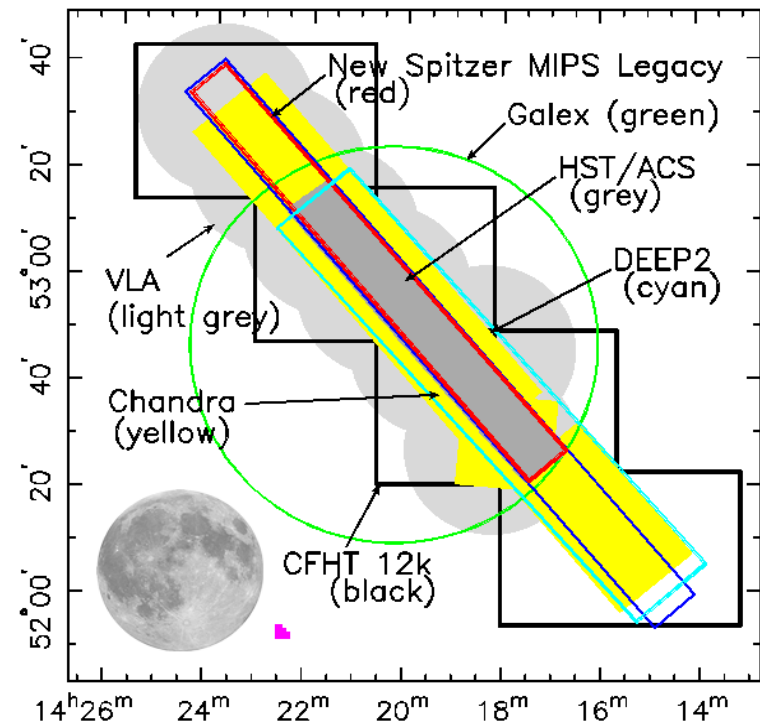
- The Atmospheric Structure of Giant Hot Exoplanets (115 keringés)
- Galaxies at  $z \sim 7-10$  in the Reionization Epoch: Luminosity Functions from Deep IR Imaging of the HUDF and HUDF05 fields (193 + 192 keringés); <http://archive.stsci.edu/prepds/hudf09>
- Panchromatic WFC3 survey of galaxies at 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).

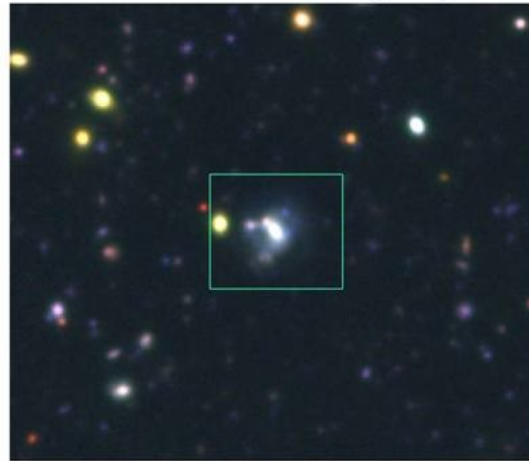


# Nagy projektek a HST-vel

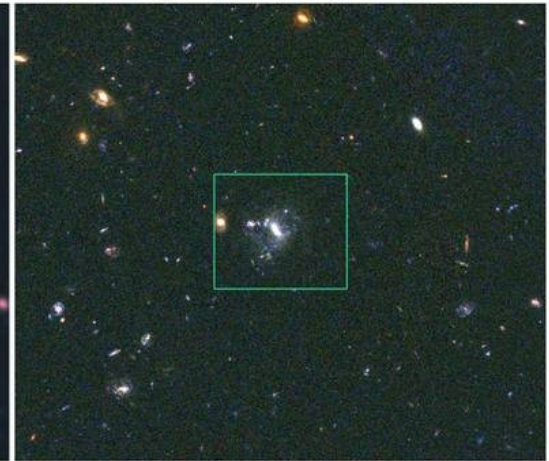
GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey (a HDF-N és a CDF-S mezőkre).



Ground: Subaru (8m)



Space: *HST* (2.4m)

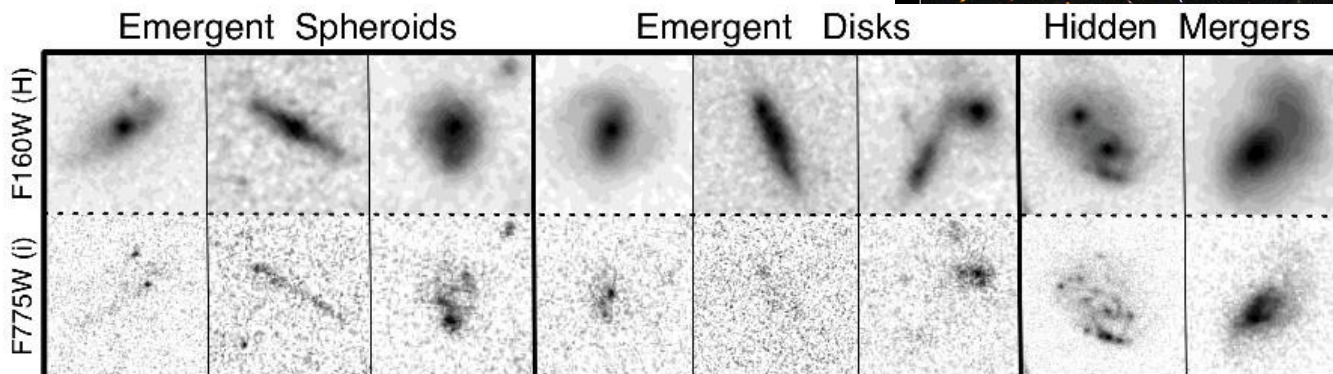
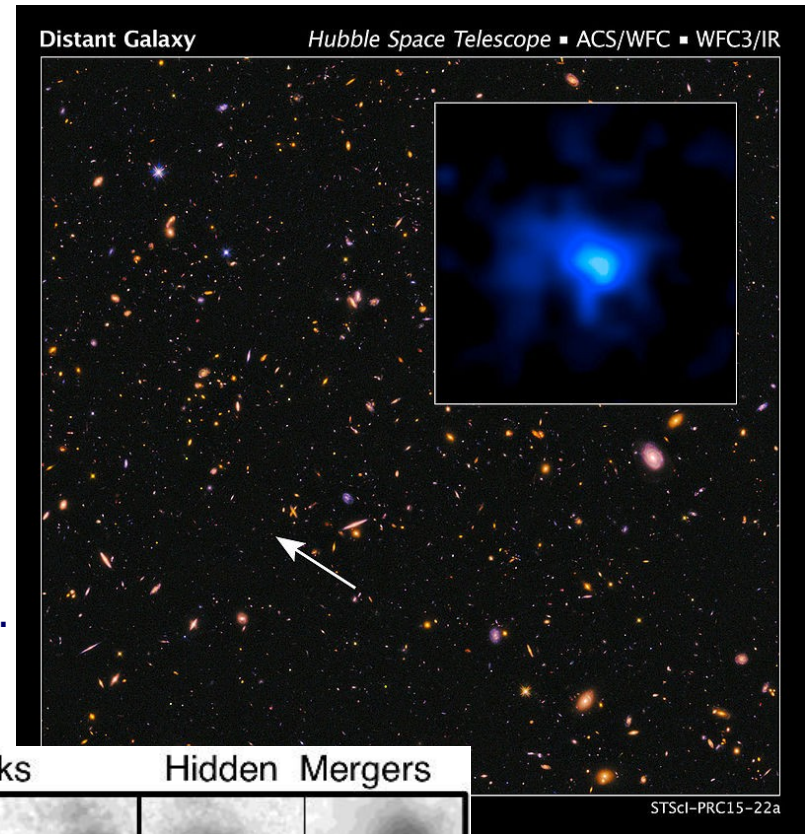


# Nagy projektek a HST-vel

**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 (optikai). 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  $\mu\text{m}$  között.

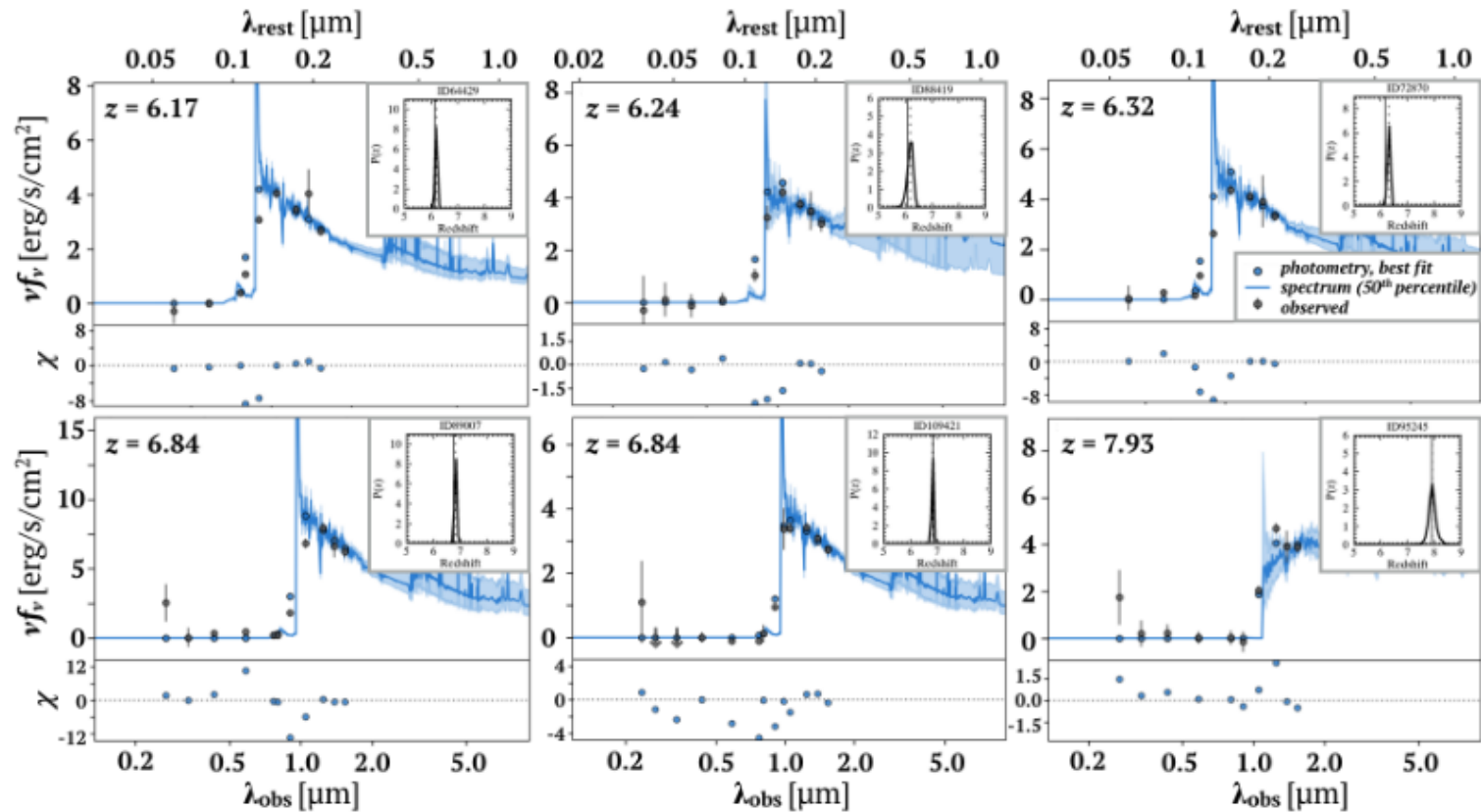


FIG. 22.— Spectral energy distributions for six galaxies at  $z > 6$ , with observed photometry (grey) and the best-fit model (blue). inset panels shows the photometric redshift probability distribution for each target, all with single, well-defined solutions.



# Nagy projektek a HST-vel

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

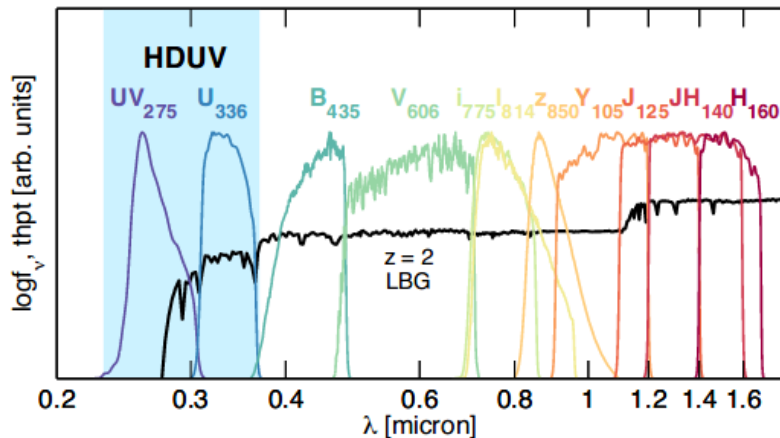


FIG. 1.— The *HST* imaging filter set in the two HDUV survey fields. Combining the data of the two workhorse cameras on *HST*, WFC3 and ACS, these fields are now covered with 11-band data spanning a wavelength range from  $\sim 0.25 - 1.7 \mu\text{m}$  at excellent spatial resolution of 100-160 mas.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

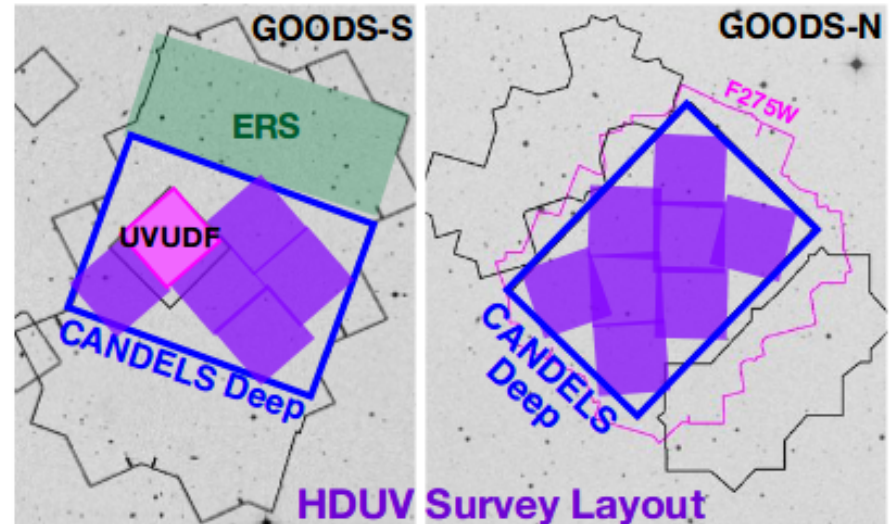


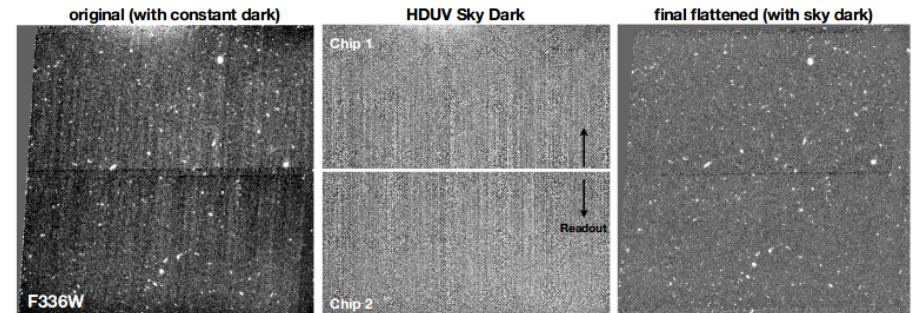
FIG. 2.— Layout of the HDUV Survey with respect to previous datasets in the GOODS-South (left) and -North (right) fields. The HDUV was designed to optimally build on and extend the pre-existing data to provide deep F275W and F336W imaging over most of the CANDELS-Deep area (blue outline). In GOODS-S, 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  $\sim 100 \text{ arcmin}^2$  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

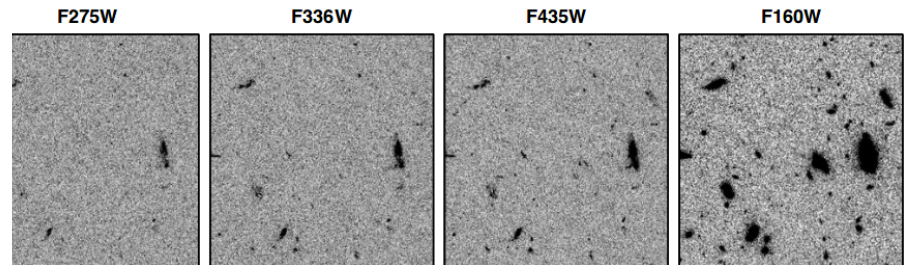
Képkotás halvány csillagképző galaxisokról 27,5-28,0 határfényességig az  $1 < z < 3$  tartományban.

## 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 <sup>2</sup>	56.5 arcmin <sup>2</sup> (39.1 arcmin <sup>2</sup> )*
Exposure Time <sup>†</sup>	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 <sup>2</sup>	56.5 arcmin <sup>2</sup>
Exposure Time	9.1 orbits	8.4 orbits
Depth	28.0 mag	27.8 mag
FWHM	91 mas	95 mas



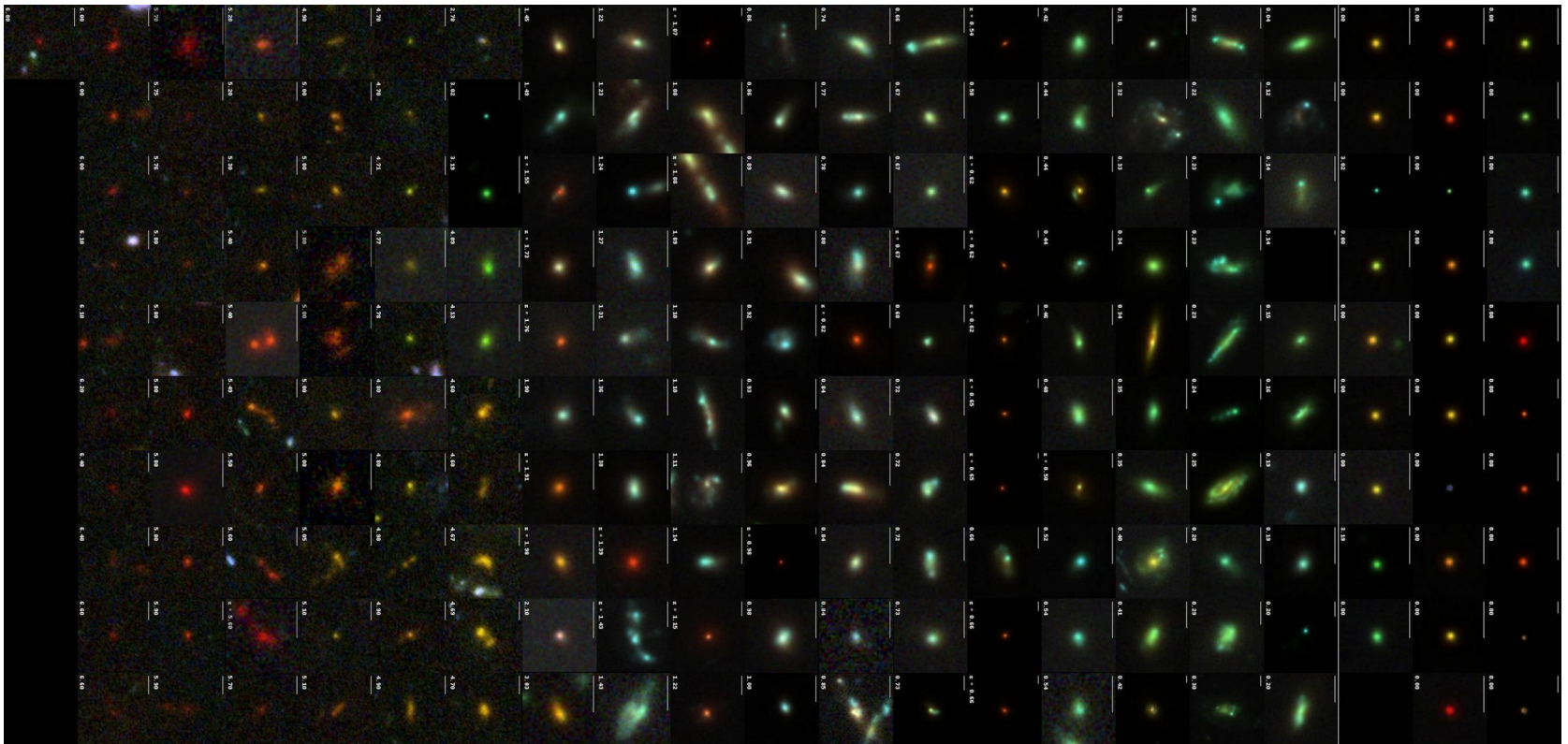
4.— The improvement in image quality thanks to the use of a sky dark image in the HDUV data reduction. The left panel shows a visit of F336W data drizzled using the standard dark frame. Significant residual structure is clearly visible, including severe striping in the readout direction (i.e. hot and 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.



5.— Examples of images from the HDUV (left two panels; F275W and F336W) and ancillary data (right two panels; F435W and F160W) in the GOODS-South field. The images are 0.5 arcmin on a side. Note the flat background in the WFC3/UVIS data, which was achieved after subtraction of the sky dark. Clearly, the surface density of sources decreases to shorter wavelengths as the average redshift of the sources increases. The GOODS-South field exhibits 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=10h 00m, D=2°12', kicsi és homogén extinkciójú, fényes rádió-, UV és röntgenforrások nélküli terület az egyenlítő környékén, mindenhol látszik ( $E_{B-V} \approx 0,02$  magnitúdó).

A HST addigi legnagyobb programja, két éven át az észlelési idő 10%-át fordították rá. 2005. júl.-ban 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.

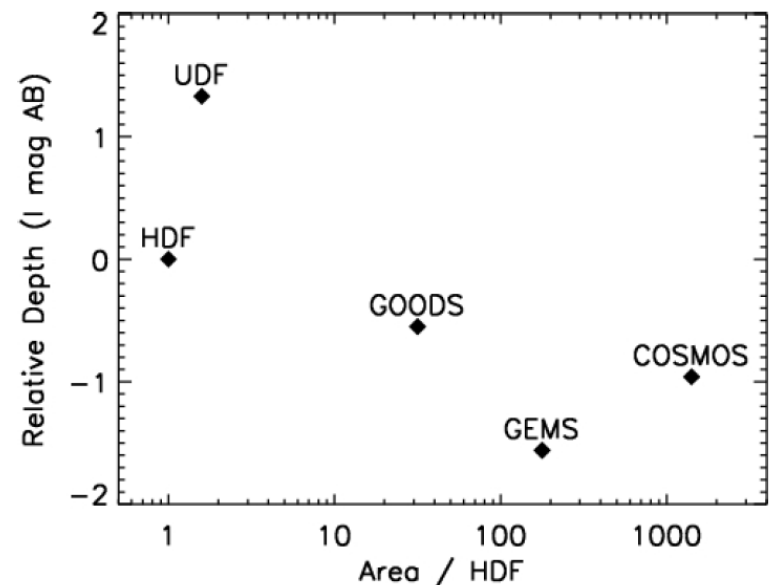
$$m_{AB} = -2,5 \lg(f_v) - 48,60$$

( $f_v$  fluxussűrűség;

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz})$$

(HUDF  $I_{AB}=29$ -ig, Spitzer GOODS

AB=26,6-ig 3,6  $\mu\text{m}$ -en)

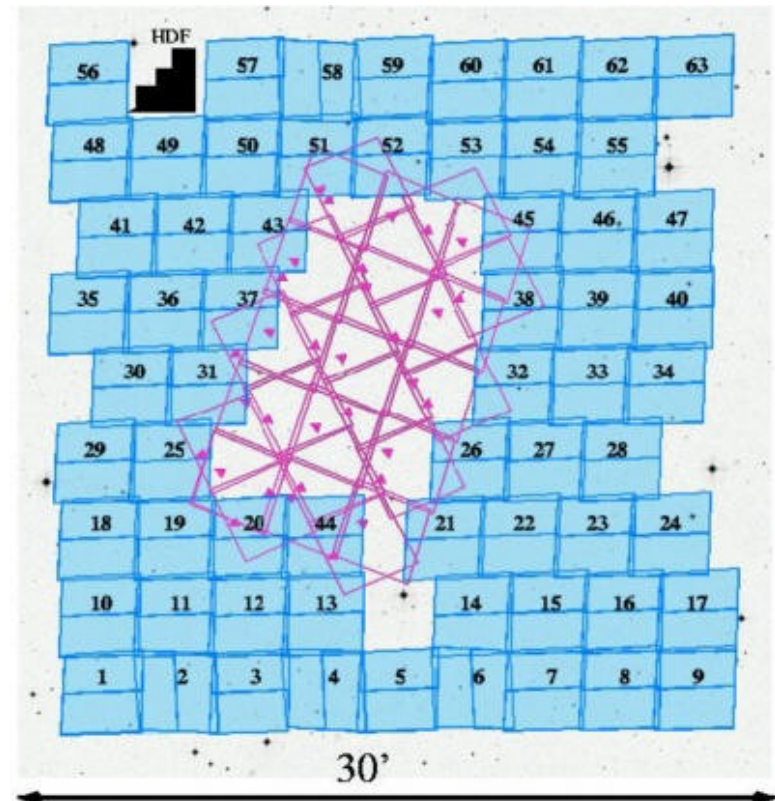


# Nagy projektek a HST-vel

**GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs):** A HST-vel leképezett legnagyobb összefüggő terület ( $900 \square'$ ) E-CDS (extended); Mozaik  $9 \times 9$  ACS-látómezőből; V (F606W) és Z (F850LP) szűrőkkel; 10000 vöröseltolódás és SED (350 és 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:

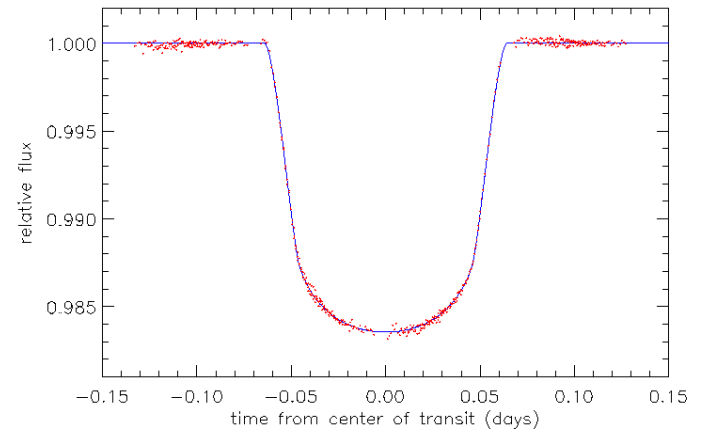
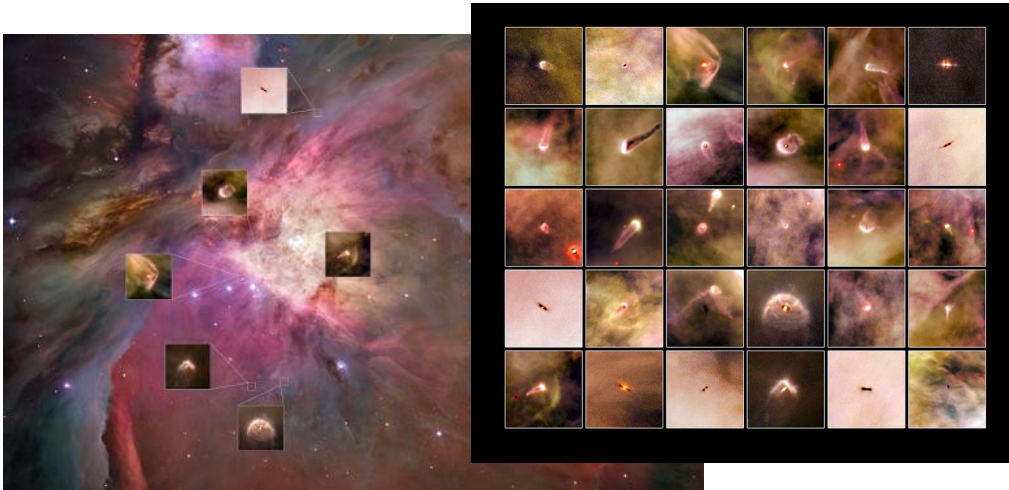
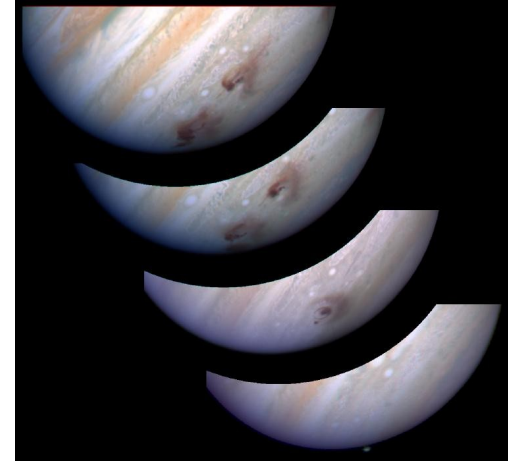
- Miért csengett le hamar a csillagkeletkezés  $z \sim 1$  óta?;
- kölcsönhatási és összeolvadási ráta változása;
- csillagkeletkezés egyre kisebb tömegű rendszerekben;
- a galaxiskorong és bulge időbeli fejlődése (küllők fejlődése is);
- az AGN gazdagalaxisainak fejlődése az elmúlt 10 milliárd évben.



# A HST kiemelkedő eredményei

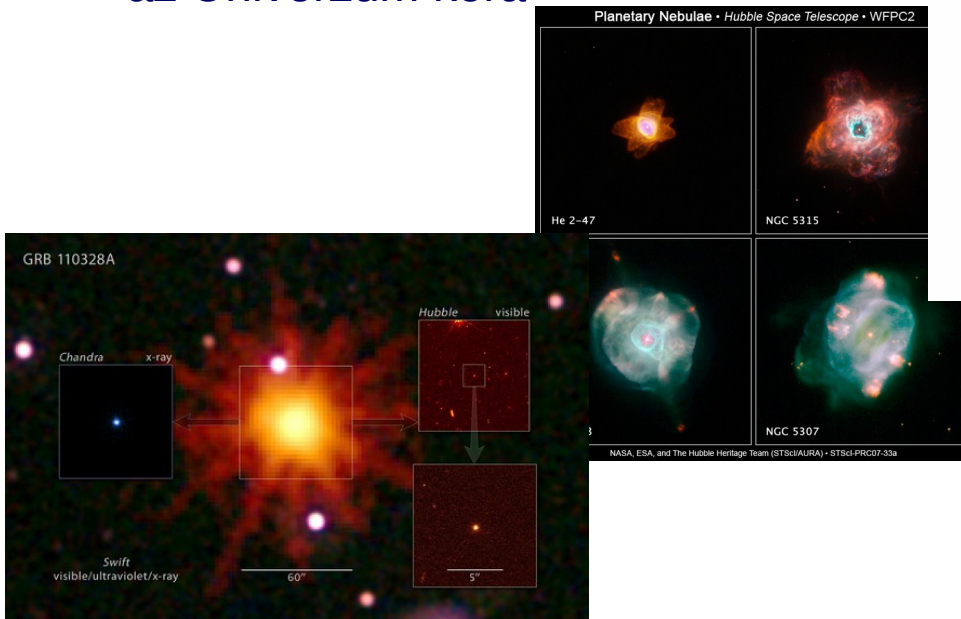
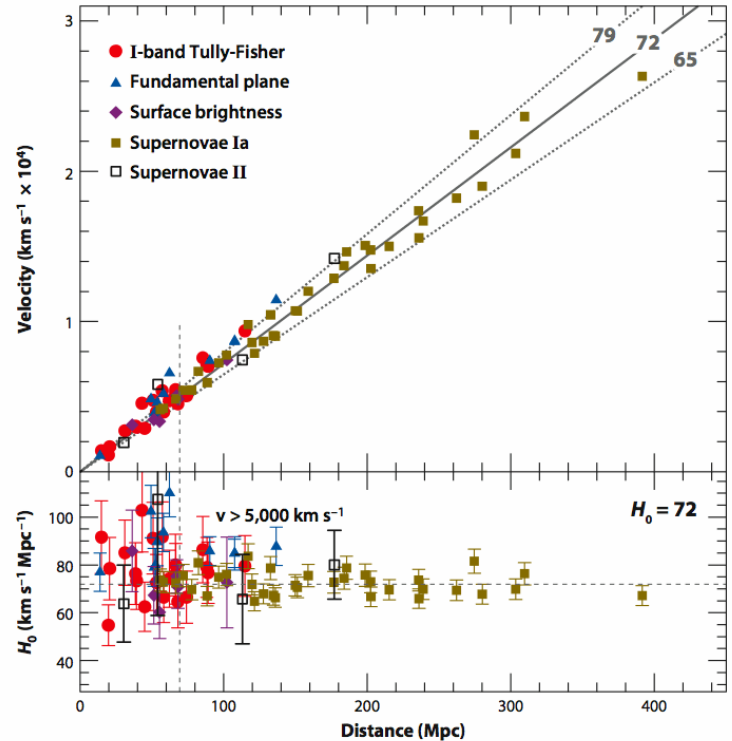
A HST 15 éves jubileumára (2005) az STScI által közölt összeállítás szerint:

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



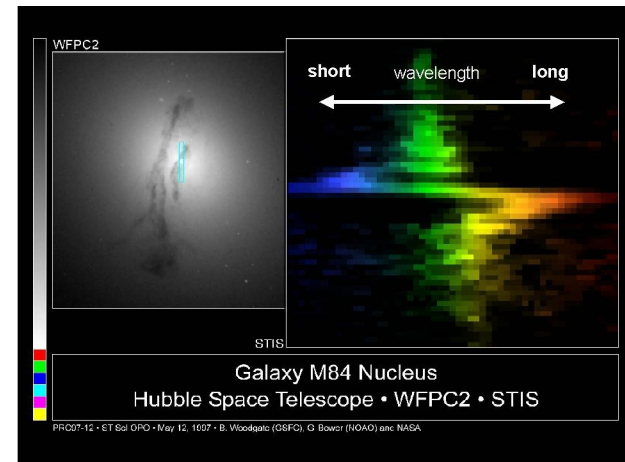
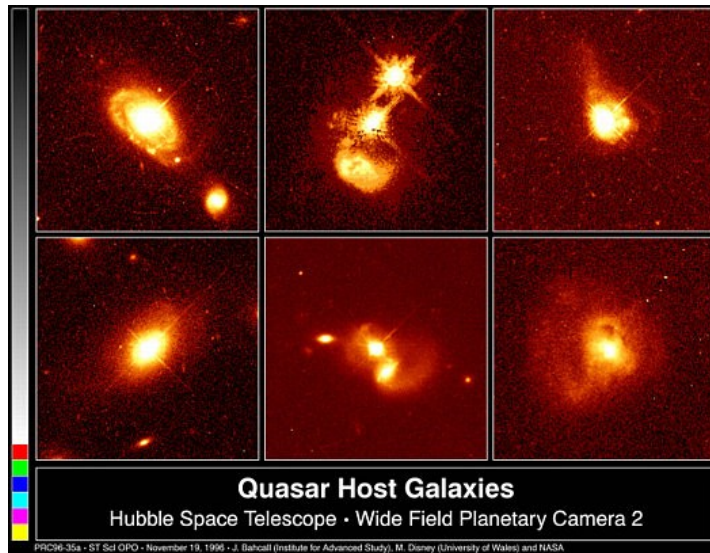
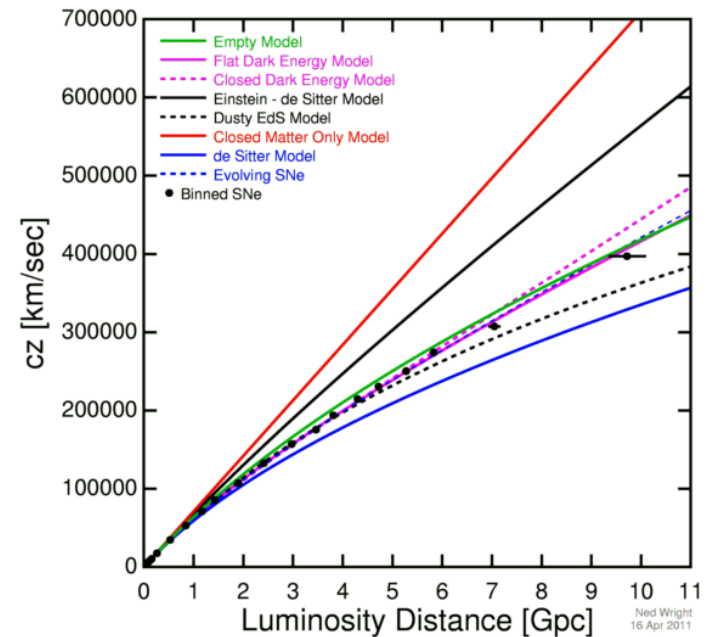
# A HST kiemelkedő eredményei

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)
10. Az Univerzum gyorsuló tágulása SNIa-k alapján





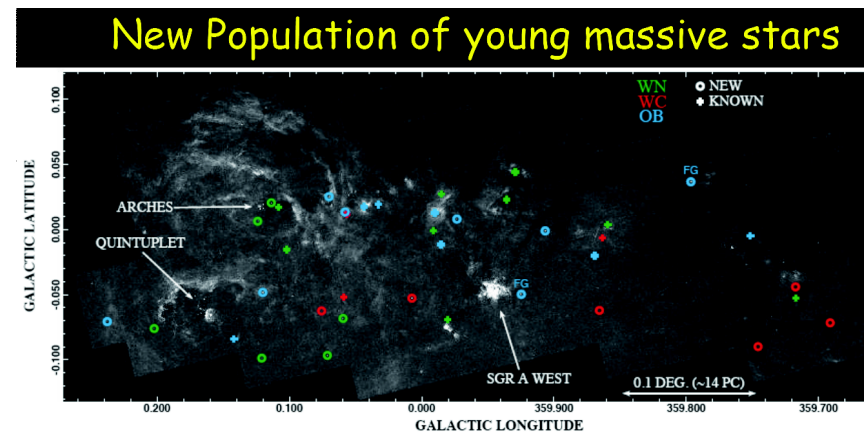
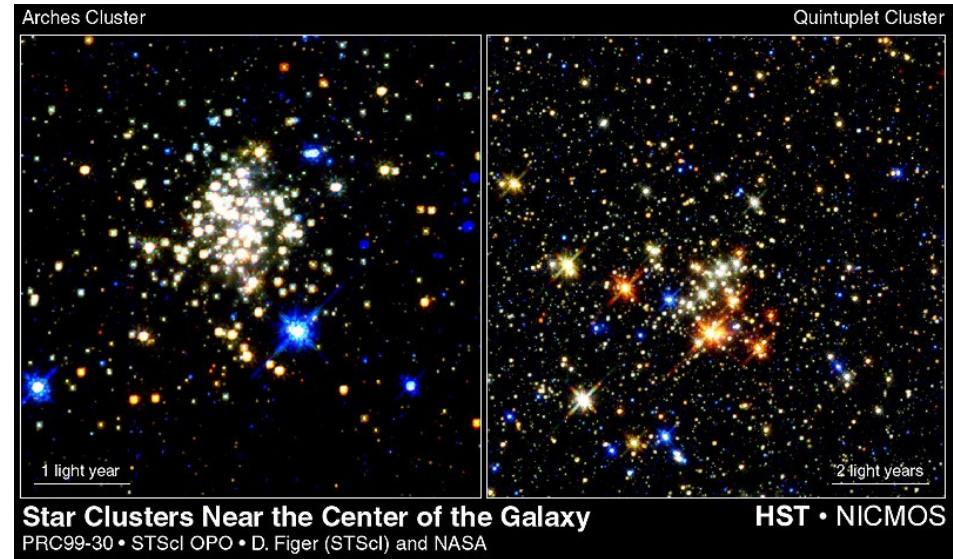
# A HST további kiemelkedő eredményei

További nagyon fontos eredmények:

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!



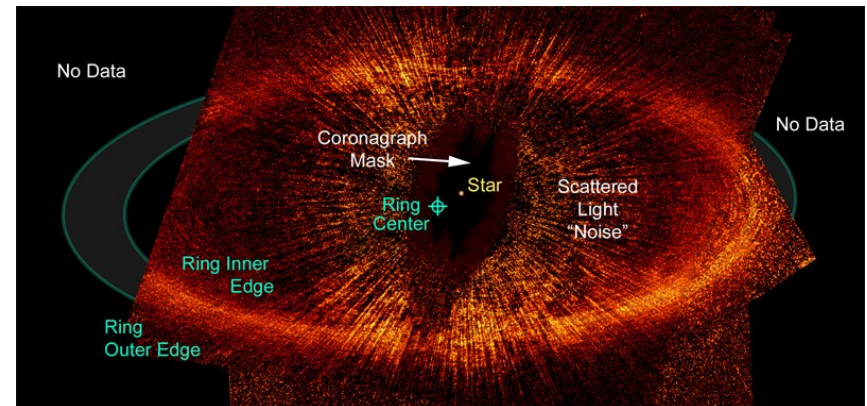
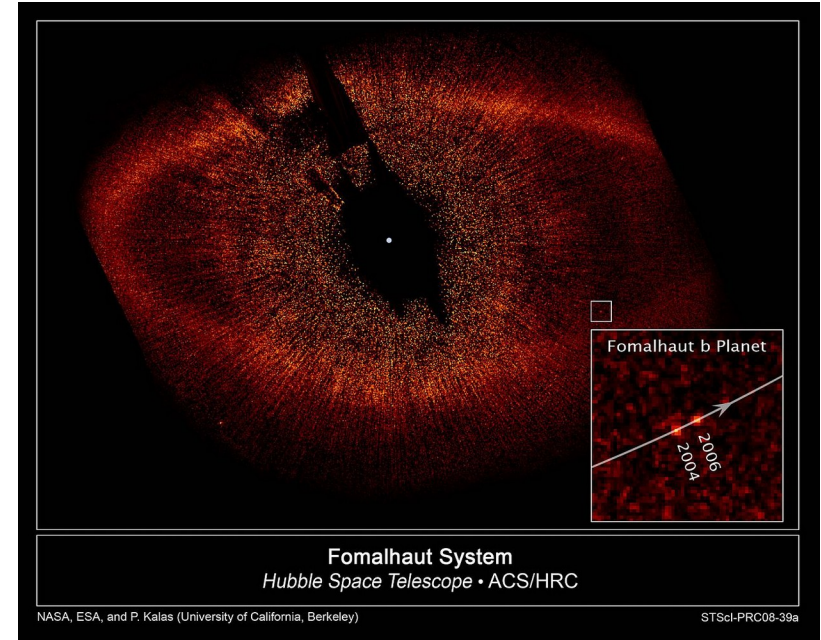
# A HST további kiemelkedő eredményei

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) léteire 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.



# Hubble-mélyvizsgálatok

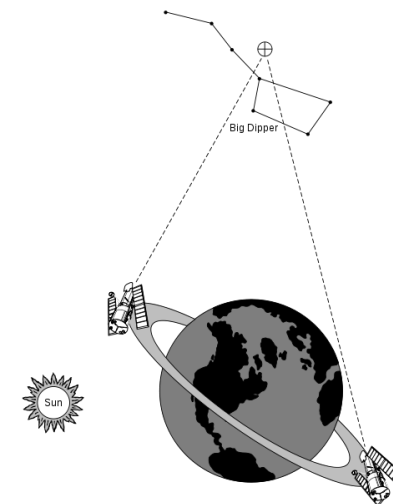
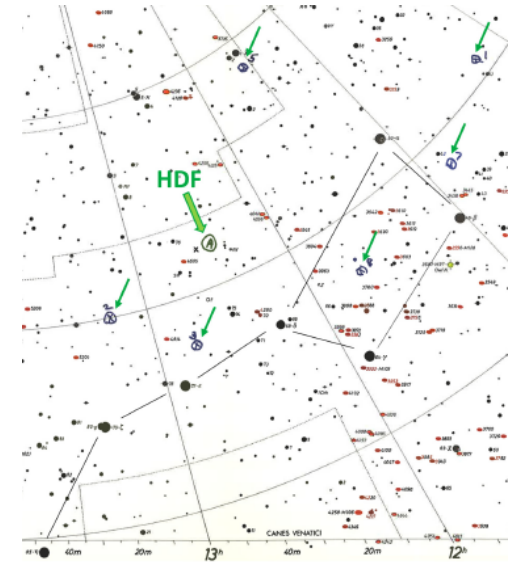
A SM1 után kiderült, hogy jó leképezéssel érdekes halvány galaxisok látszanak. Kis szögméretűek, morfológiájuk a Földről nem vizsgálható. Robert Williams, az STScI igazgatója a DDT műszeridő egy részéből mélyvizsgálatot kezdeményezett. A legtávolabbra néző képek:  $V=30^m$ -ig tűnnek elő a galaxisok. 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.

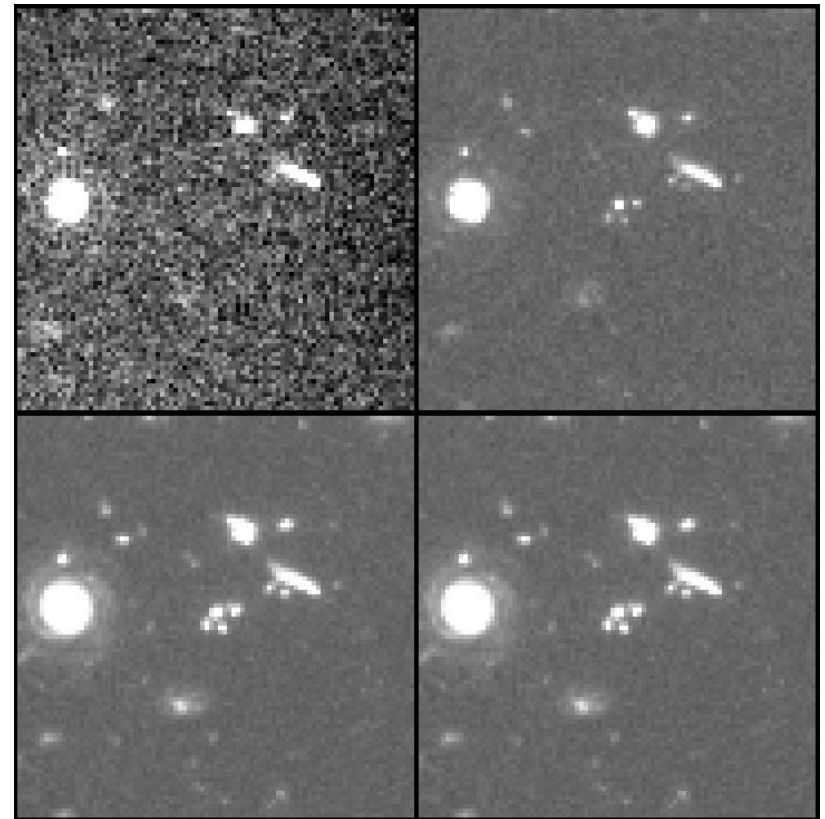
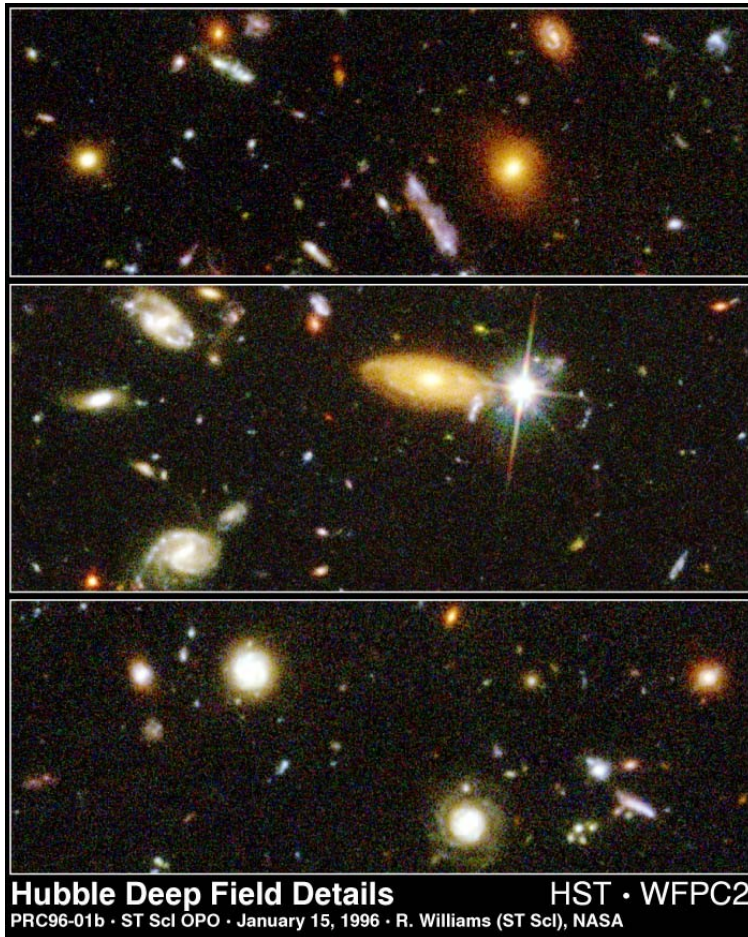
1995. dec. 18–28.; HDF-N:  $\alpha=12^h 36^m 49,4^s$ ;  
 $\delta=+62^\circ 12' 58''$  (J2000); UMa, 342 exp.

1998. okt. (10 nap); HDF-S:  $\alpha=22^h 32^m 56,2^s$   
 $\delta=-60^\circ 33' 03''$  (J2000); Tuc

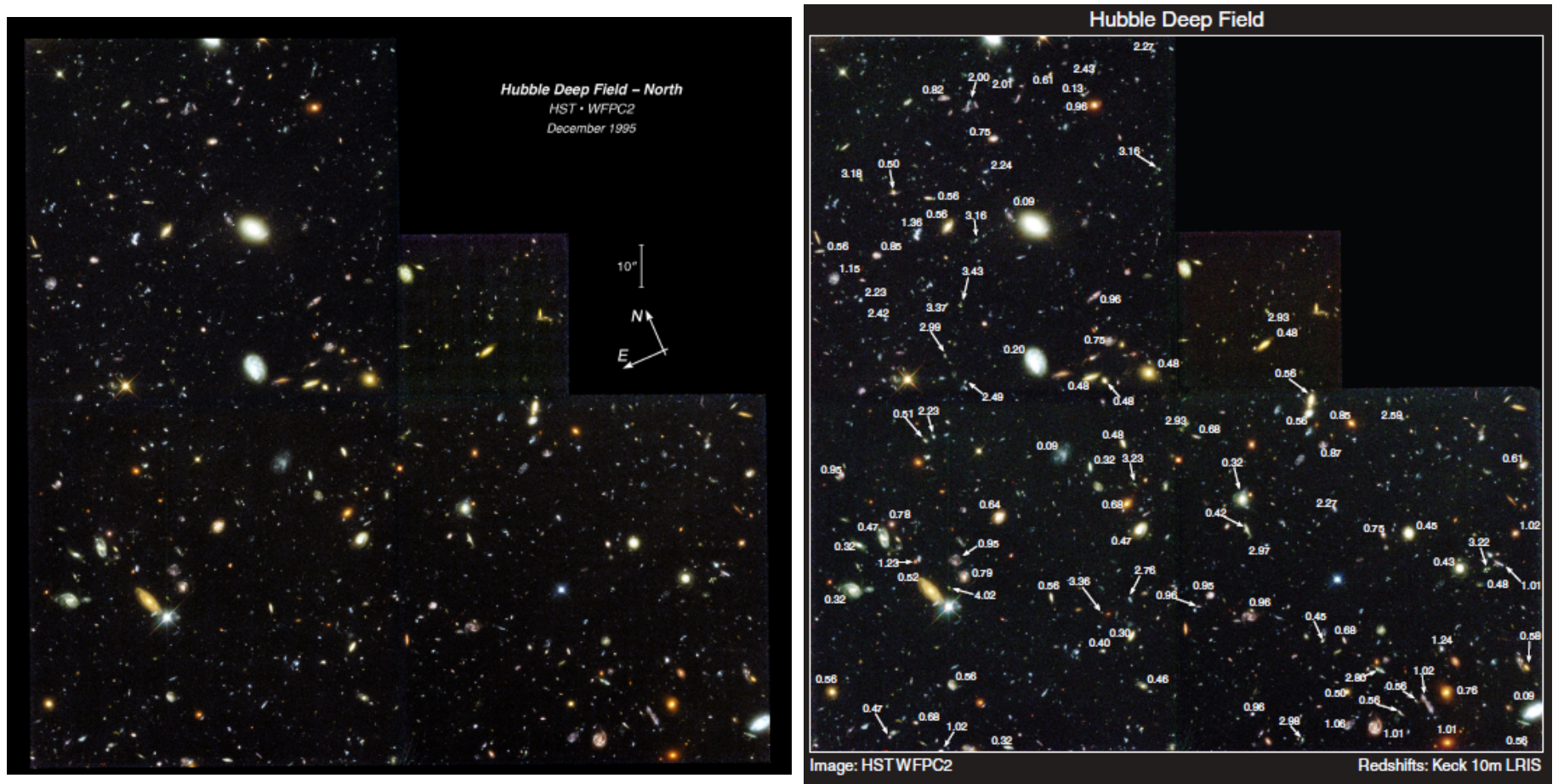


# HDF-N

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



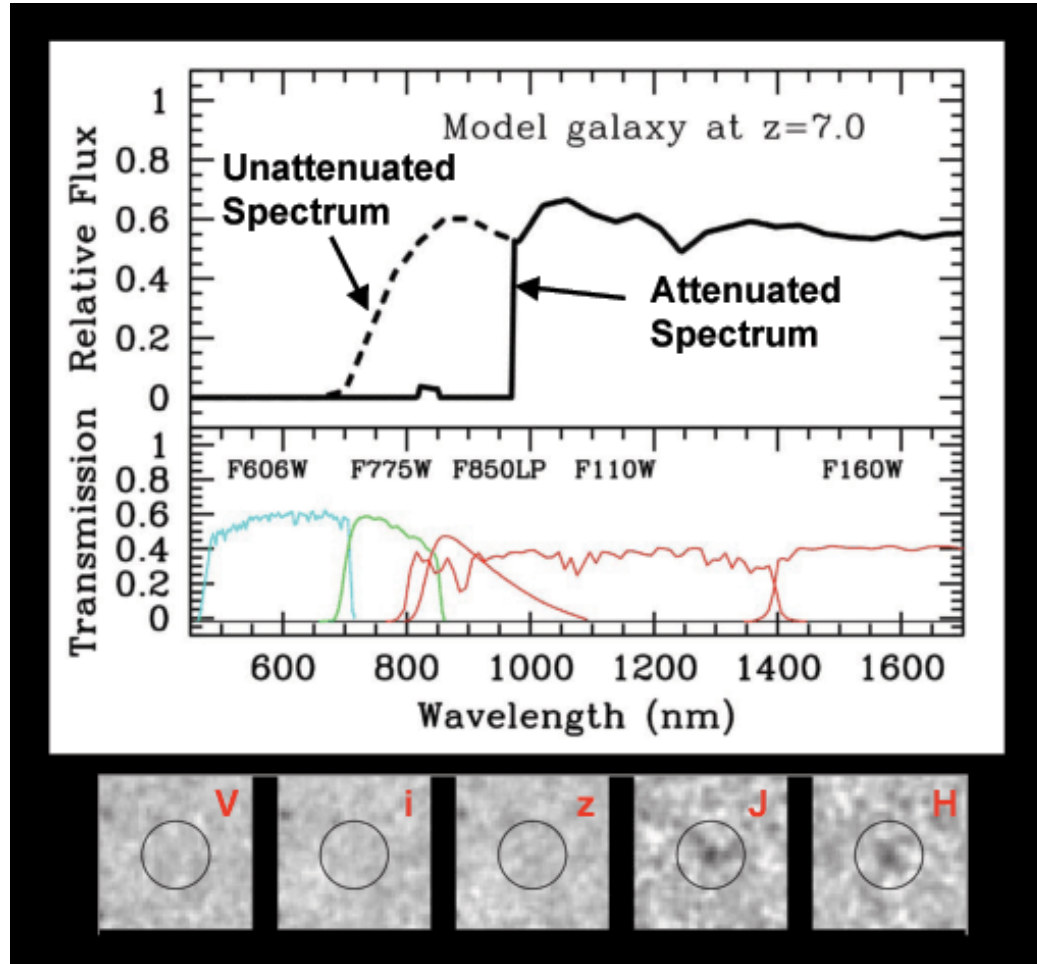
# HDF-N



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).

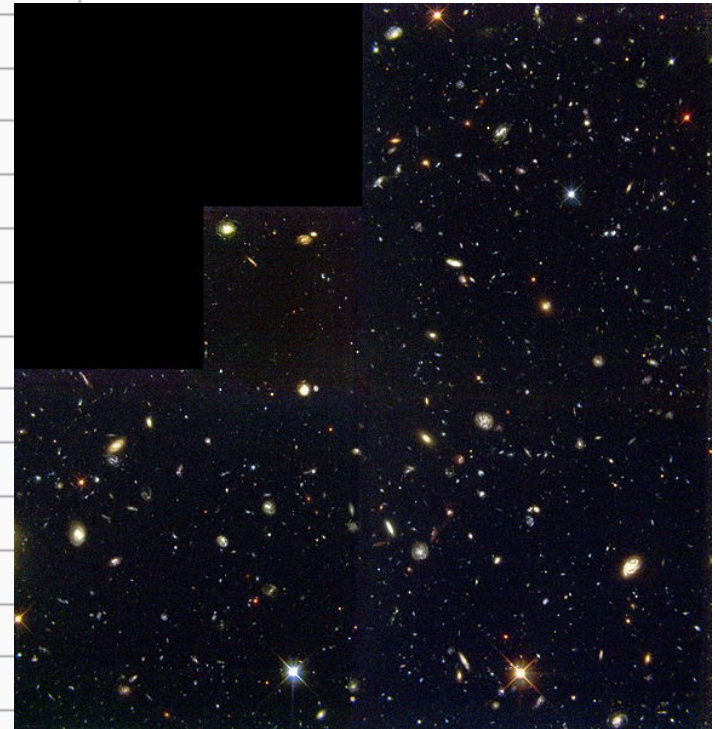


# HDF-S

NICMOS: 1,1 és 1,6  $\mu\text{m}$  + WFPC2. A mező közepén a QSO J2233-606 kvazár.  
Kozmológiai jelentőség: mindkét irányban azonos viselkedésű galaxisok.

Observations made of the HDF-S with the HST.<sup>[3]</sup>

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 nm (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.

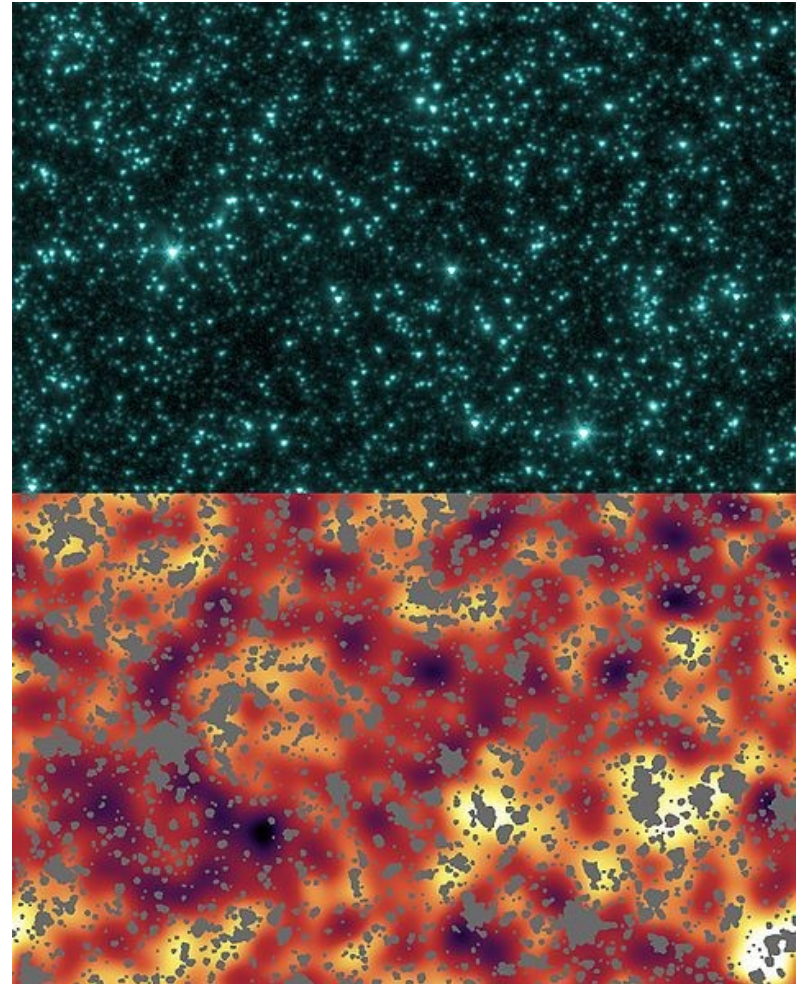
A HDF-S területén 500 rádiógalaxis (3–20 cm hullámhossztartomány).

Optikai és rádióluminozitásuk aránya szerint nem hagyományos csillagontó vagy rádióhangos galaxisok, hanem a lokális

Univerzumban ritka galaxisok nagy rádió/optikai luminozitásarányal.

Ha a 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

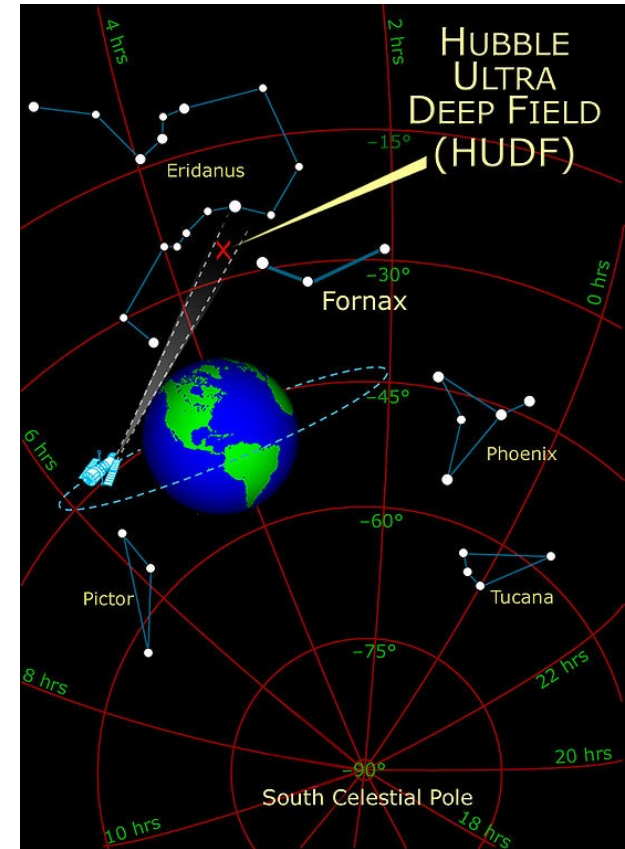


# A HST ultramélyvizsgálata

Hubble Ultra-Deep Field: 2003. IX. – 2004. I.  
 $\alpha=3^{\text{h}} 32^{\text{m}} 39^{\text{s}}$  ;  $\delta=-27^{\circ} 47' 29''$  (J2000);  
 Fornax, hogy mindkét félgömről  
 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  $z = 12$  is).



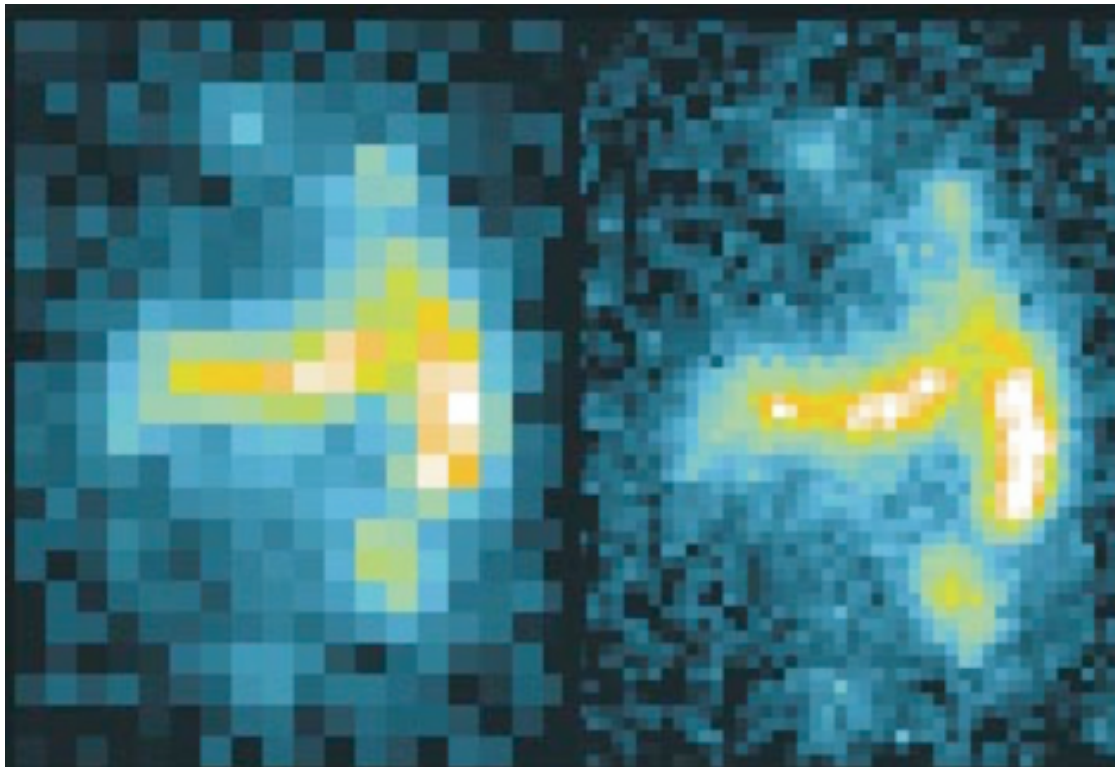
Camera	Filter	Wavelength	Exposure time
WFC3	F105W	1050 nm $\pm$ 150	16 orbits, 14 usable
WFC3	F125W	1250 nm $\pm$ 150	16 orbits
WFC3	F160W	1600 nm $\pm$ 150	28 orbits

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:

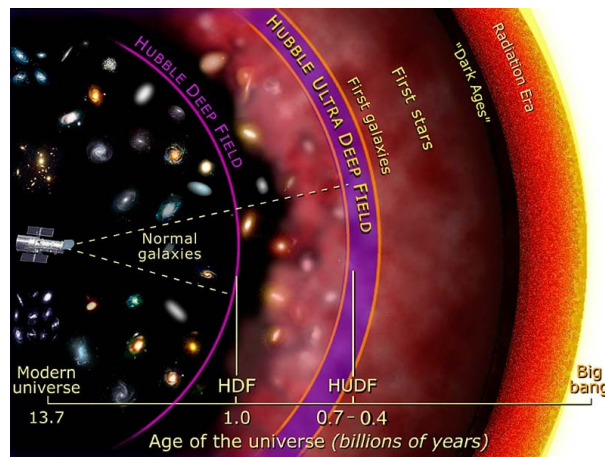
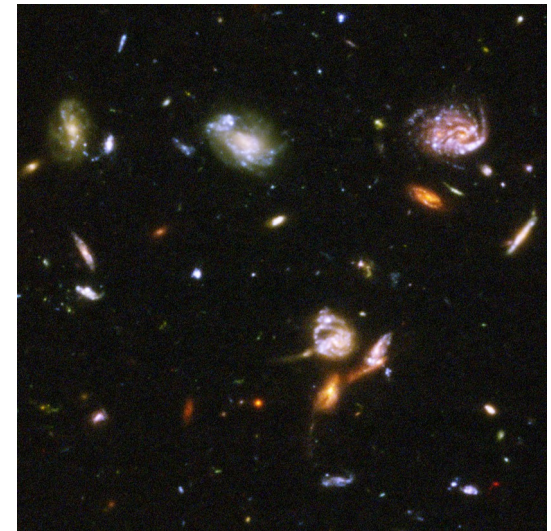
- dithering [remegtetés]: véletlenszerű zaj hozzáadása, megakadályozza a kiterjedt mintázatok [sávok] megjelenését;
- drizzling [szitálás]: változó pixelű lineáris rekonstrukció alulmintavételezett képen (**lent balra**). IRAF alatt fut, az STScI weboldaláról letölthető szoftver (amatőrök is használják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



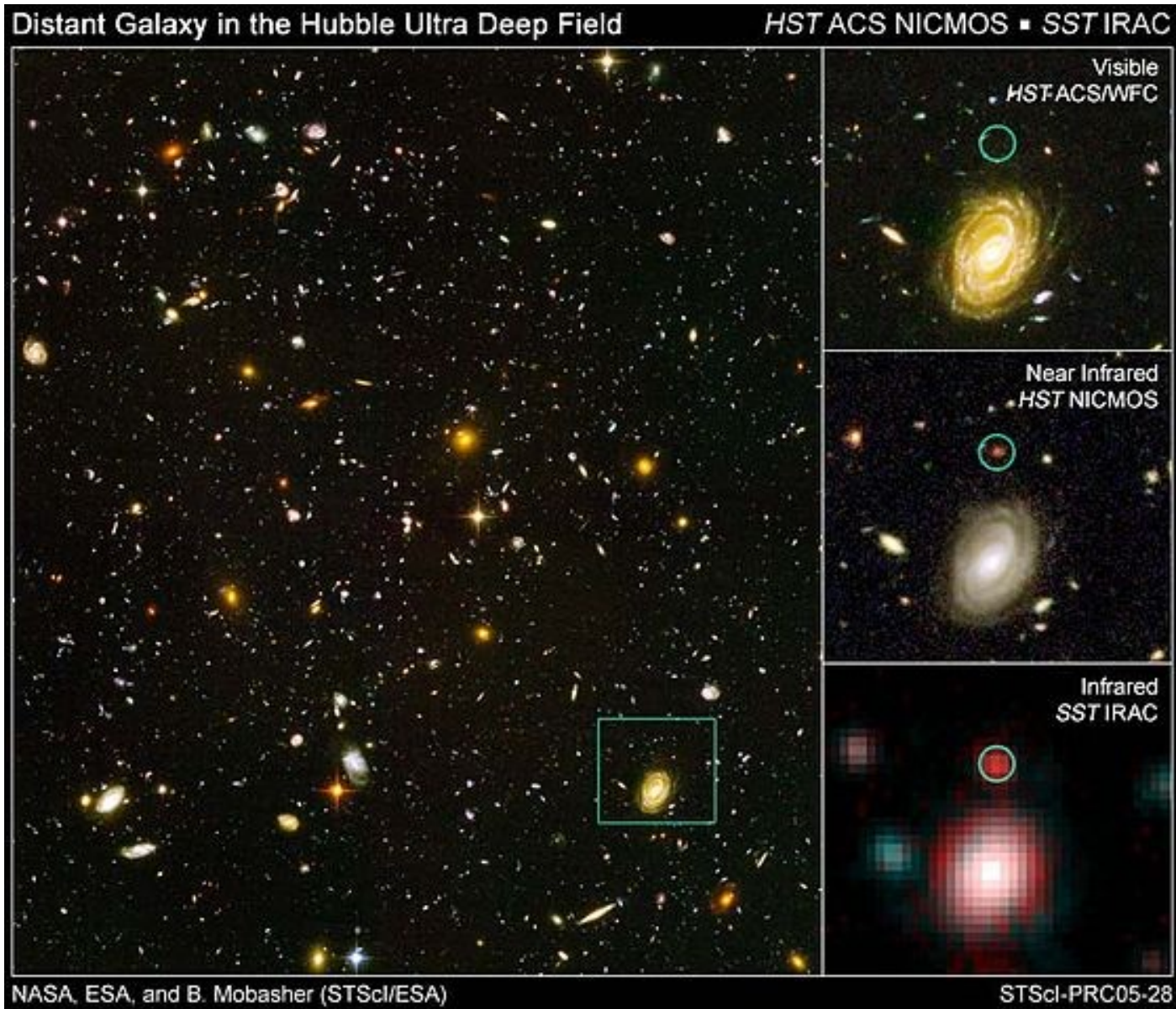
# A HUDF

## Eredmények:

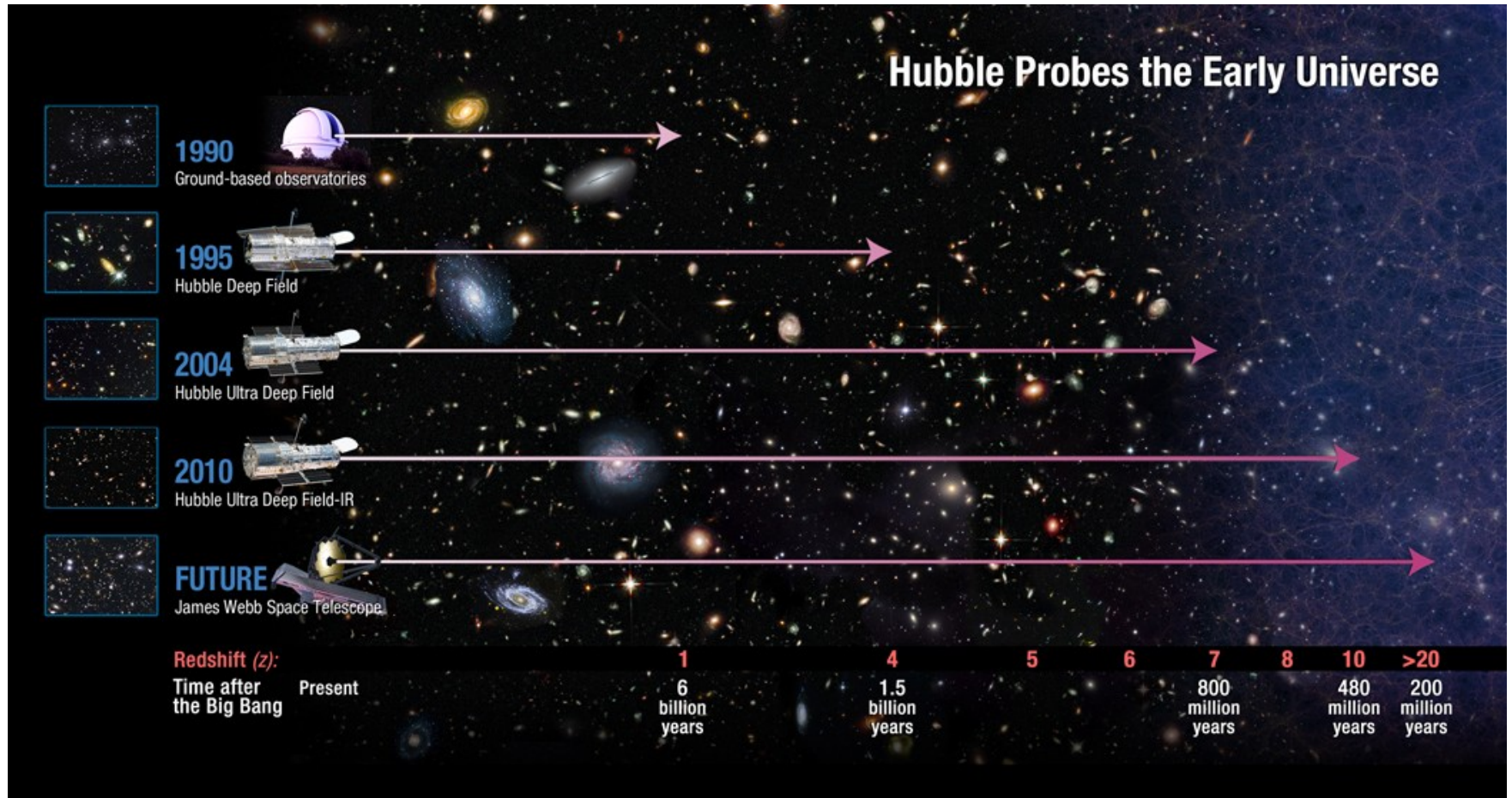
- A galaxisképződés elején (az ősrobbanás után 1 milliárd évvel) nagy csillagkeletkezési ütem;
- A galaxisok eloszlása szám, méret, luminozitás szerint az idő függvényében (galaxisfejlődés);
- Megerősítette, hogy a nagy z-jű galaxisok kisebbek és szabálytalanabbak, mint a kis z-jűek (eleinte gyors galaxisfejlődés).



# Optikaiban láthatatlan galaxis a HUDF-képen



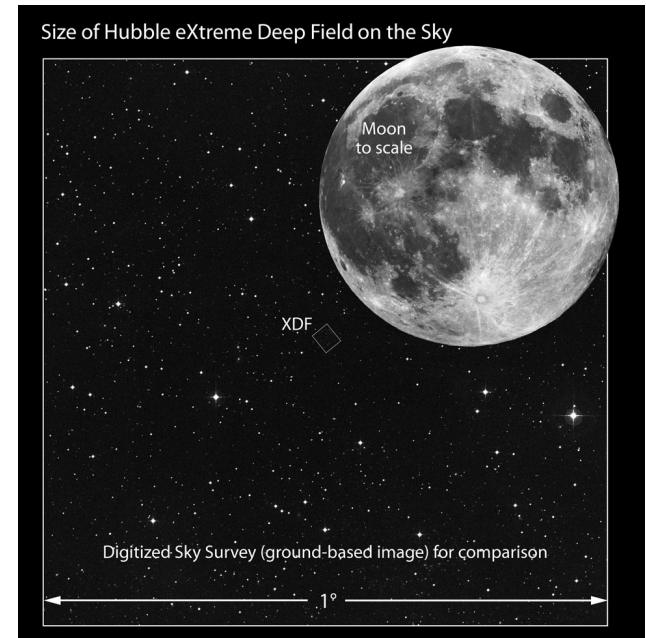
# Kozmoarcheológia mélyvizsgálatokkal



És 2012-ben a Hubble Extreme Deep Field

# 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,  
 hullámhossz-lefedés: UV-től közeli IR-ig.  
 5500 galaxis tűnt elő, közte 13,2 milliárd  
 évesek. Apró, fiatal galaxisok, amelyek  
 később nagyobb galaxisokká olvadnak  
 össze.



XDF EXPOSURES

## XDF SUMMARY

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

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

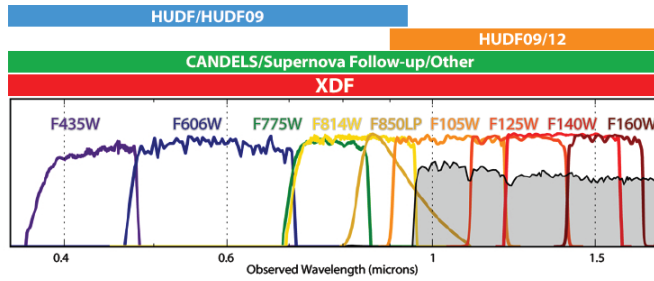
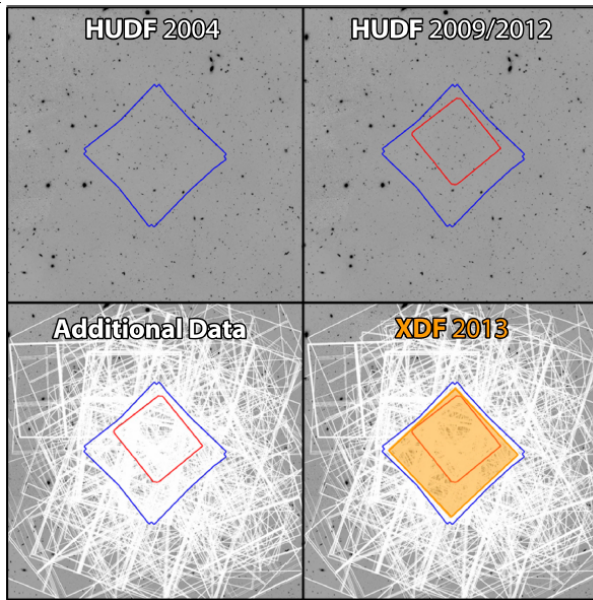
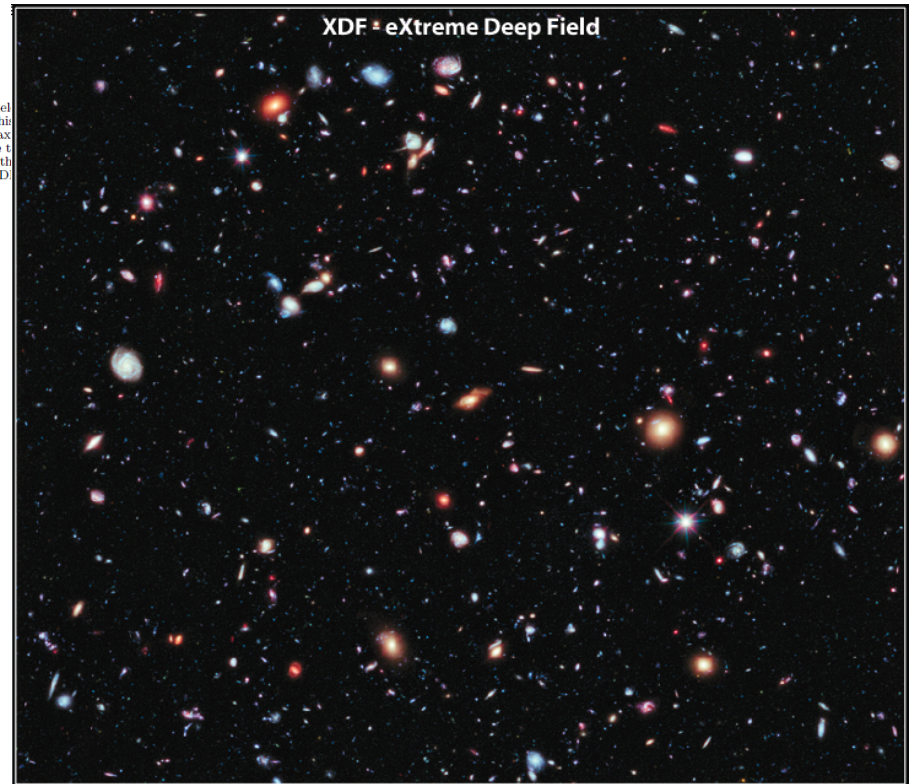


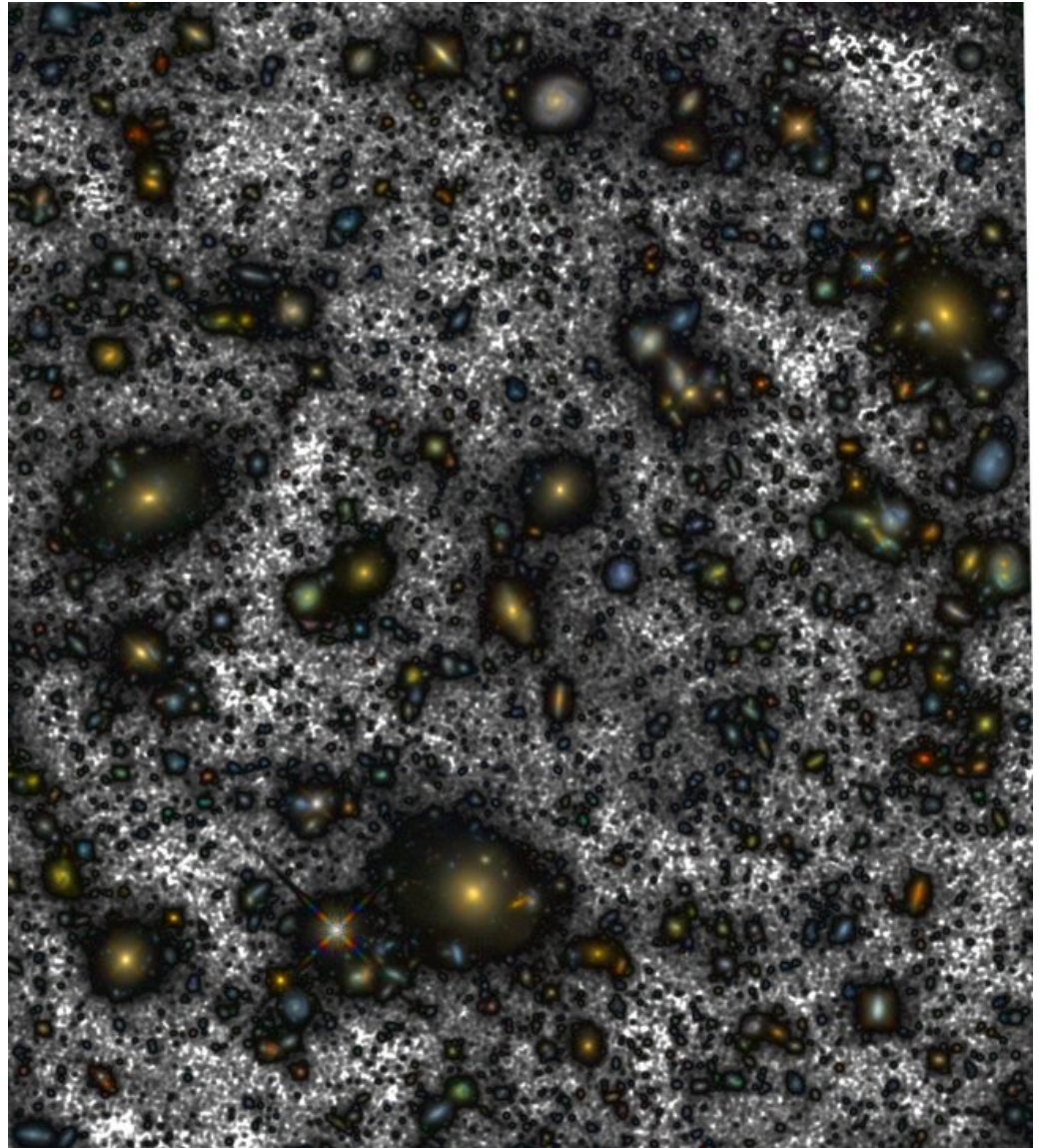
FIG. 1.— The XDF input datasets and spectral elements. The XDF combines *all* the data that have been taken on the HUDF field between 2002 and 2013 - this means HUDF, HUDF09, CANDELS, HUDF12 and many other programs. No other release has done this. This makes the deepest image from HST ever, with the widest spectral coverage image from HST on the HUDF. An example galaxy 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 to the high fraction of neutral hydrogen present at this early cosmic time, the source is essentially completely invisible at optical wavelength and it can only be seen in the near-infrared with the new WFC3/IR. The wide wavelength coverage of the XDF 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 újredukálásával, gondosabb háttérlevonással 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).

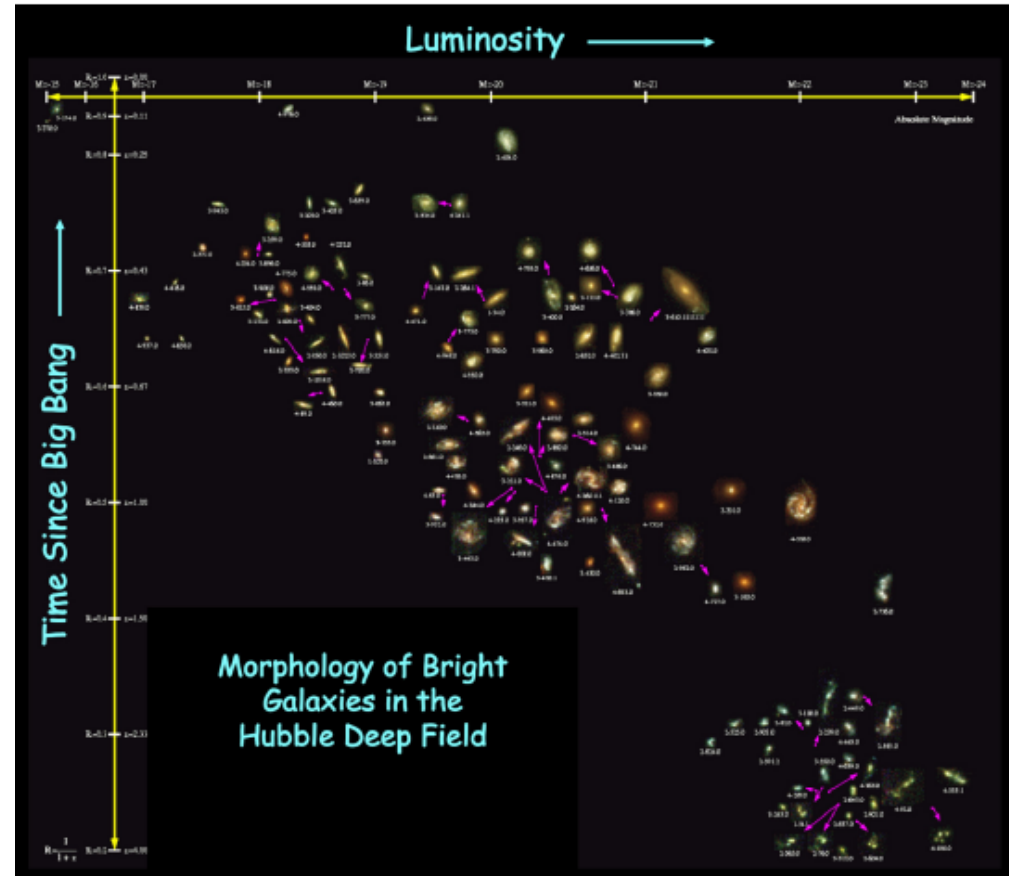
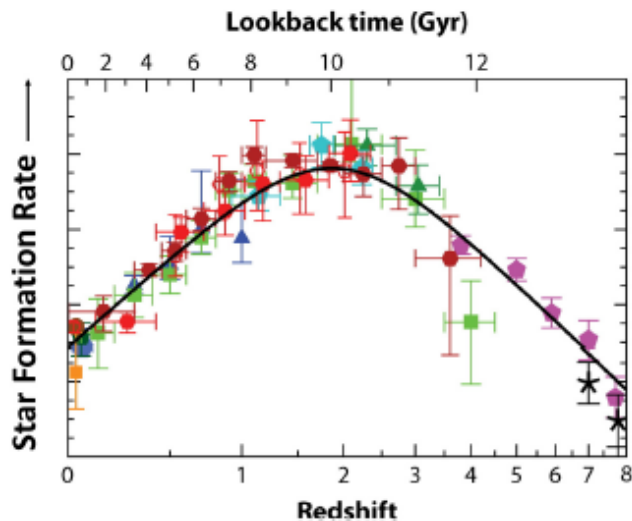


Figure 10.5. HDF galaxies with measured redshifts are placed according to their distance (lookback time) and intrinsic brightness (luminosity). The image of each galaxy is displayed on a scale that shows the relative sizes and morphologies of galaxies at different lookback times [credit: Y. Park/R. Allen/H.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

# A Hubble-állandó a HST alapján

A Hubble-állandó ( $H_0$ ) fontos az Univerzum mérete és kora szempontjából is. A HST előtt a  $H_0$  értékét 50-100 km/s/Mpc közöttinek tartották.

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}, \quad \frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_R a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda$$

A  $H_0$  pontossága a távolságmérés pontosságától függ.

Távolságmeghatározási módszerek; trigonometria; standard gyertya; standard vonalzó; cefeidák; távolságlétra.

HST KP:

- 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 luminozítás 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 4,000 < cz < 30,000 km/sec	71	$\pm 2_r \pm 6_s$	Hamuy et al. (1996), Riess et al. (1998), Jha et al. (1999), Gibson et al. (2000)
21 Tully–Fisher clusters 1,000 < cz < 9,000 km/sec	71	$\pm 3_r \pm 7_s$	Giovanelli et al. (1997), Aaronson et al. (1982, 1986), Sakai et al. (2000)
11 FP clusters 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 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 1,900 < cz < 14,200 km/sec	72	$\pm 9_r \pm 7_s$	Schmidt et al. (1994)

Combined values of  $H_0$ :

$$H_0 = 72 \pm 2 \text{ [random] km/sec/Mpc} \quad \text{[Bayesian]}$$

$$H_0 = 72 \pm 3 \text{ [random] km/sec/Mpc} \quad \text{[frequentist]}$$

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

# A Hubble-állandó a HST alapján

HST Key Project (Freedman et al.):

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

rand. sziszt. hiba

(de Sandage et al. SNIa alapján:

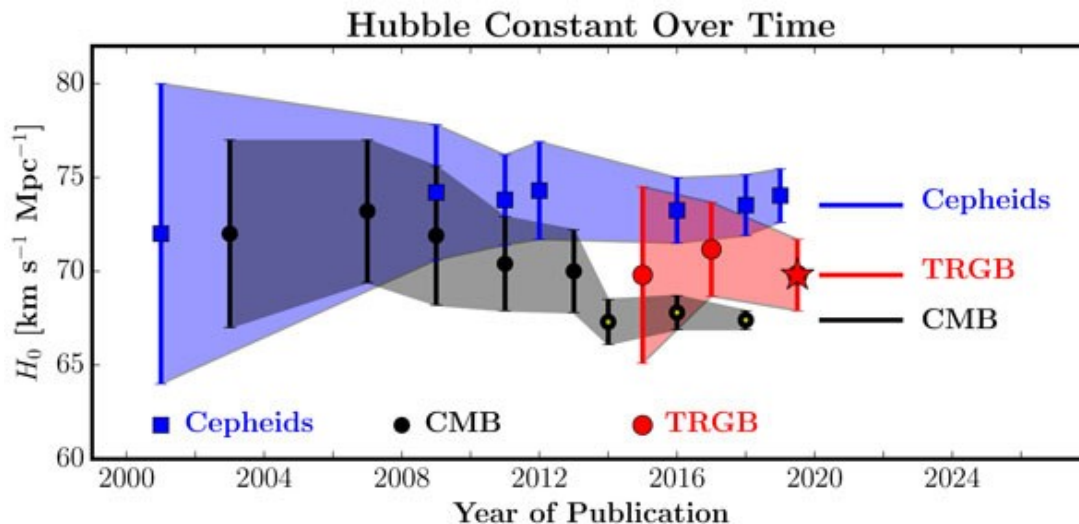
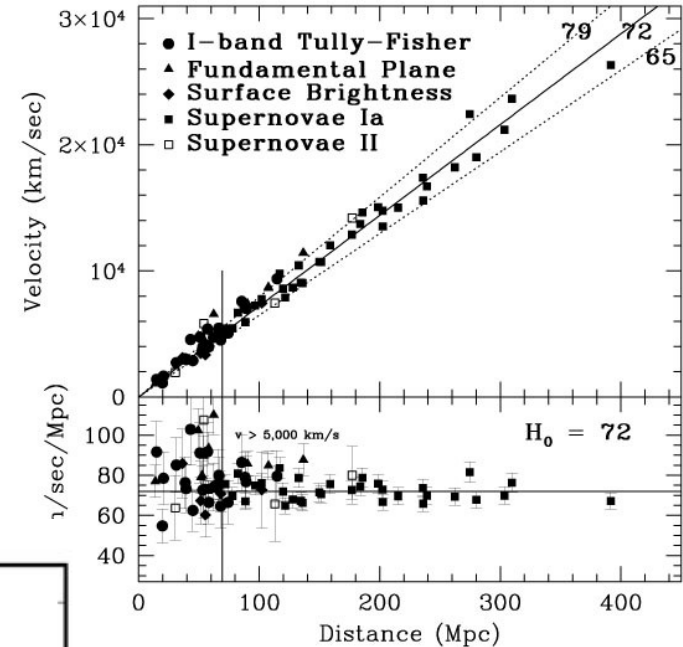
$$H_0 = 62,3 \pm 1,3 \pm 5,0 \text{ km/s/Mpc}$$

A WMAP szerint:  $H_0 = 72 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$

Vizont a Planck 2018-ban közölt

eredménye:

$$H_0 = 67,4 \text{ km/s/Mpc}$$



Ez a napjainkban  
diszkutált  
Hubble-feszültség  
(Hubble tension)

# Exobolygók a HST-vel

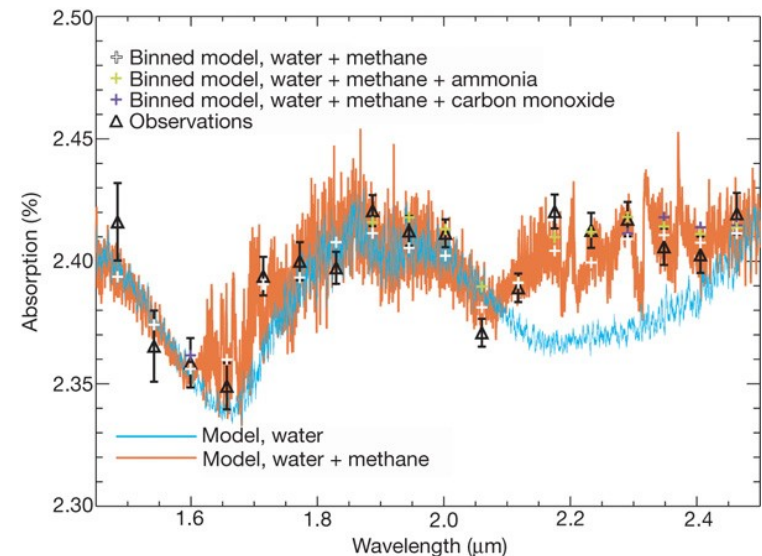
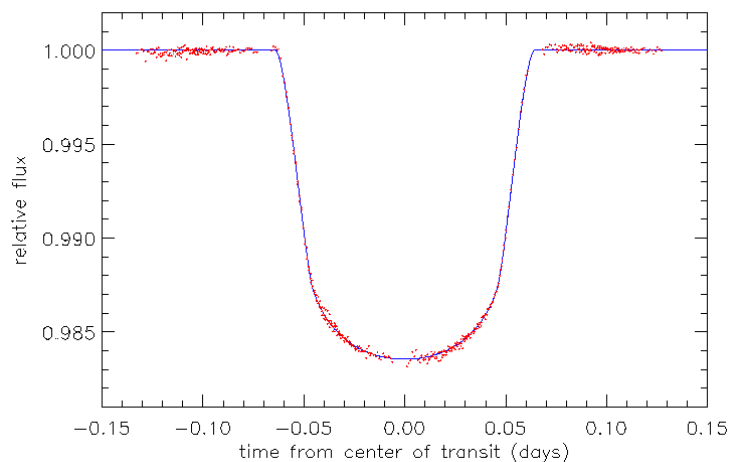
Az exobolygó kutatás korai aspektusai a HST-vizsgálatok alapján:  
cirkumsztelláris korong, proplid.

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

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

A HST-vel a fedési exobolygók légköre is tanulmányozható. Az első eset  
ugyancsak a HD 209458 volt.

Kezdetben forró jupiterek, most már kisebb tömegűek is, de közel a  
csillagukhoz.



# Exobolygók a HST-vel

A fotometriai módszer előnye: az átvonulás idősorából megkapható a bolygó mérete (a minimum mélysége  $R_{\text{plan}}/R_*$  négyzetével arányos), a  $v_{\text{rad}}$  méréséből pedig a bolygó tömege is ( $i=90^\circ$ ).

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

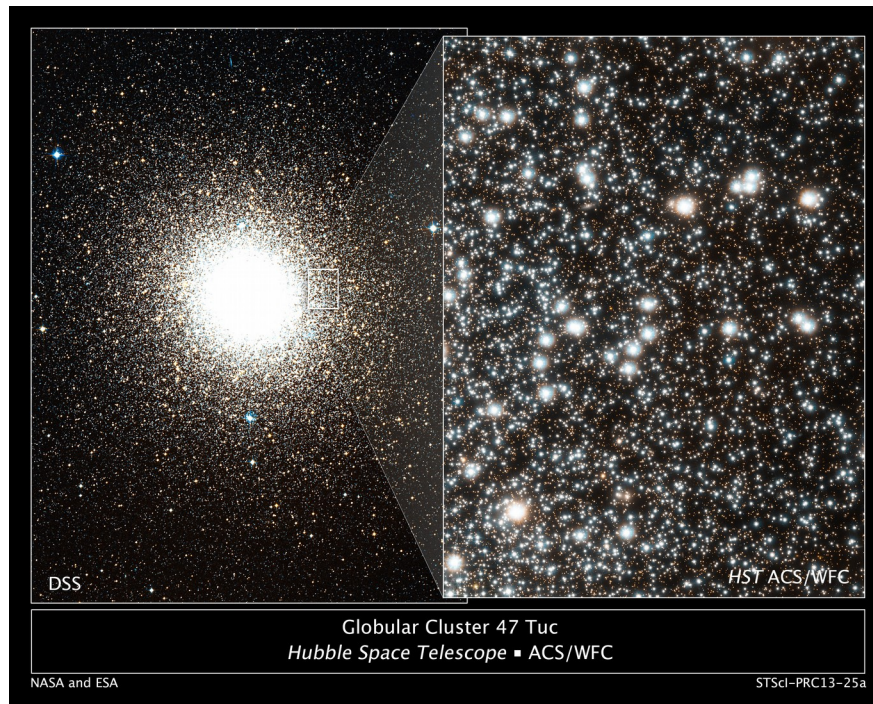
Az átvonulás valószínűsége:  $Pr_{\text{tran}} \simeq 23.8\% \frac{[M_{\text{nap}}] [R_{\text{nap}}] [\text{nap}]}{M_*^{-1/3} R_* P_{\text{orb}}^{-2/3}}$

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 ( $0,81 M_{\text{nap}}$ ,  $0,92 R_{\text{nap}}$ ) 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 3%-os fedési mélységgel (nem bolygó, mert a mellékminimum is látszik, K törpe kísérő).

A forró jupiterek száma lehet kicsi a 47 Tuc-ban. Oka lehet a kis fémtartalom vagy a korong elbontása a közeli forró csillagok UV-sugárzása által (10,5 milliárd éves).





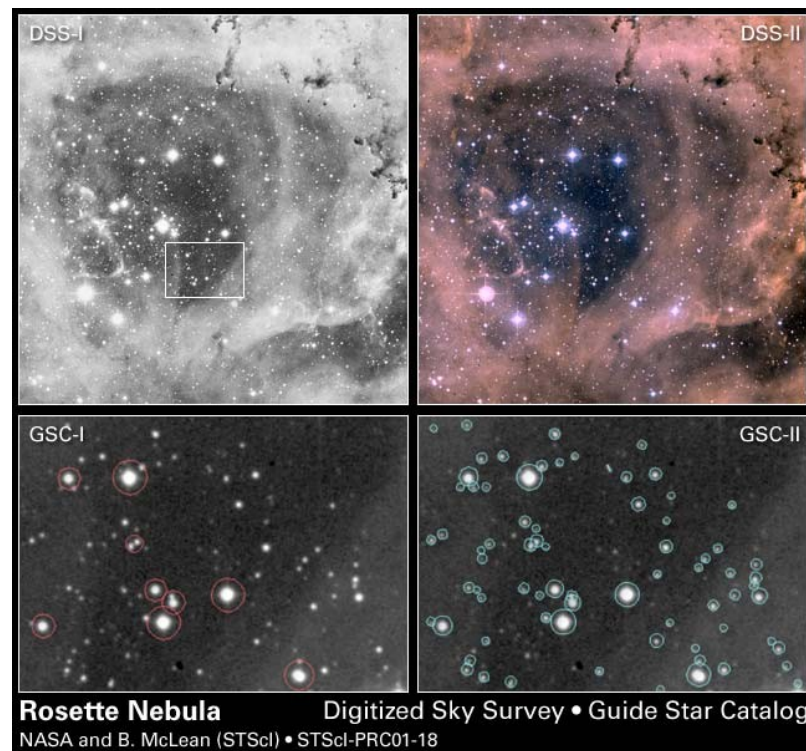
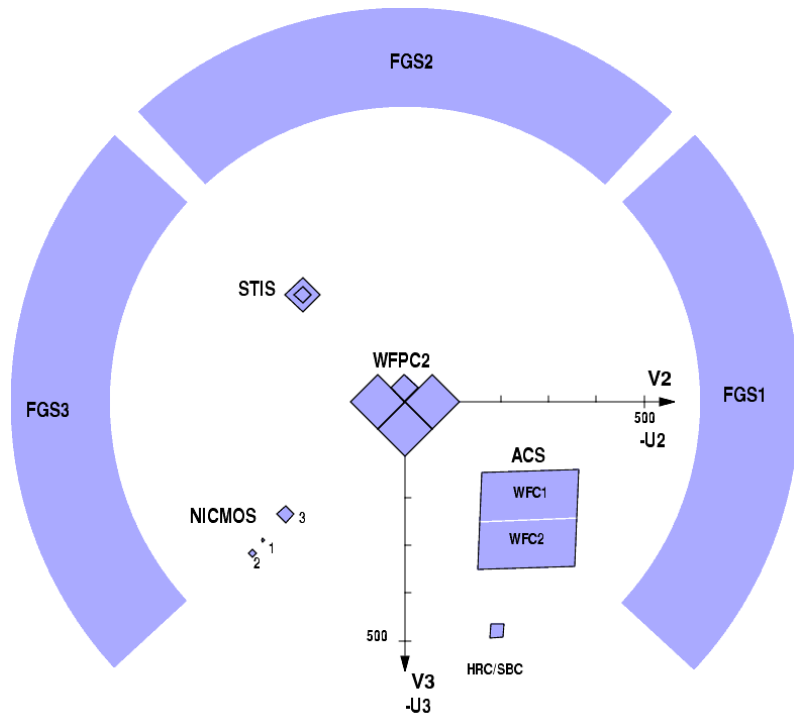


# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

GSC: Guide Star Catalogue – 1989-ben 15<sup>m</sup>-ig.

2001-ben: GSC II – 19<sup>m</sup>-ig 500 millió csillag.

A HST már 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.

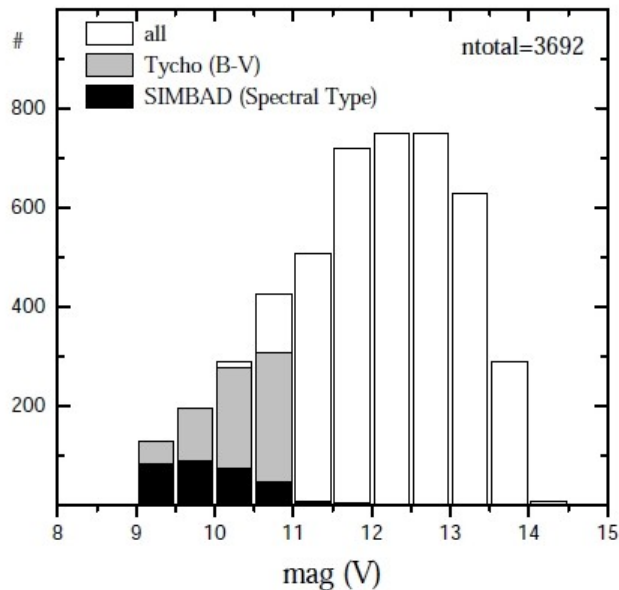
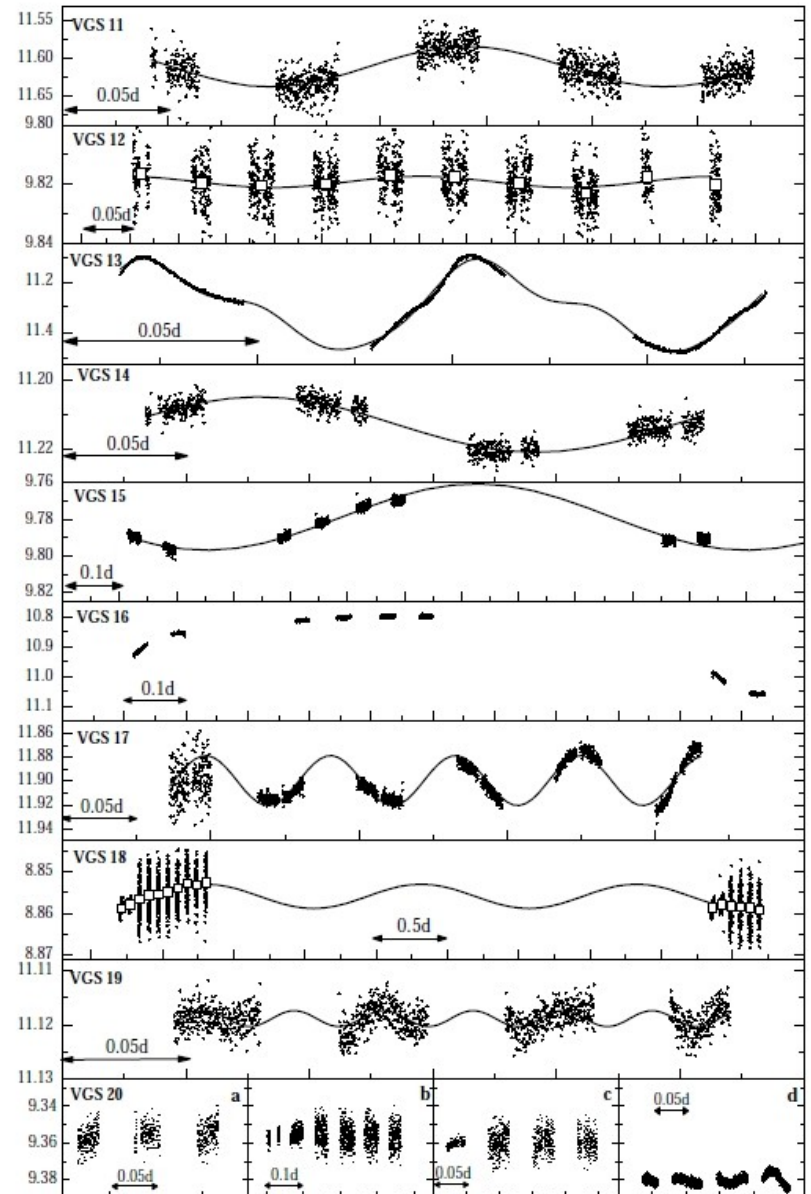
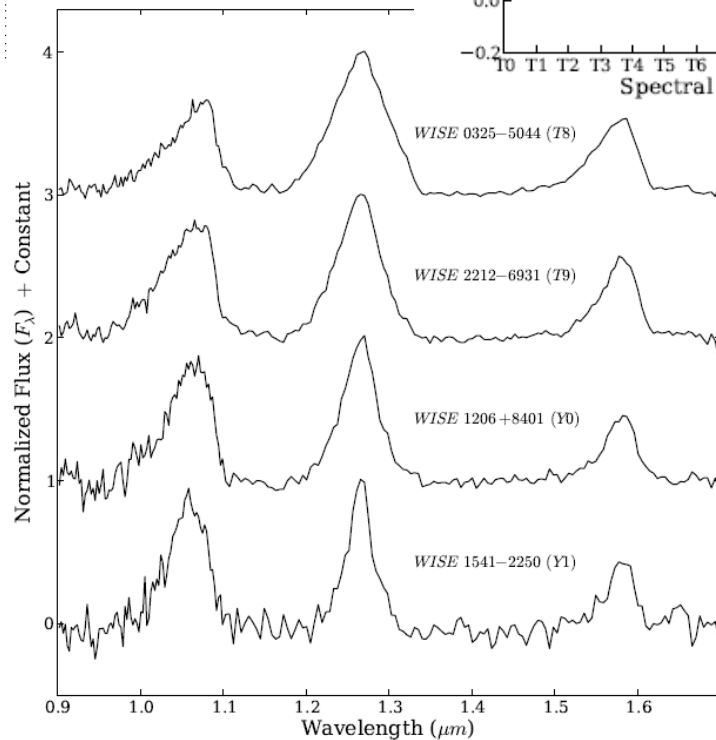
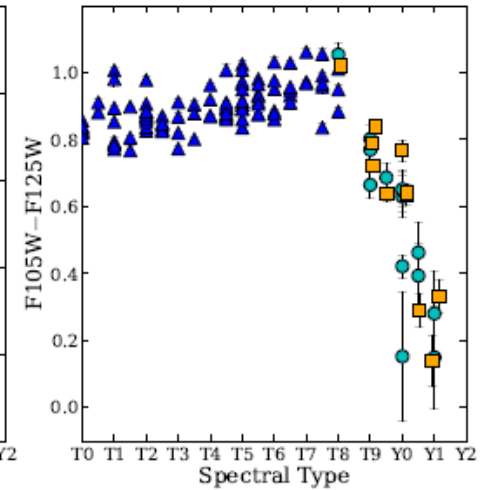
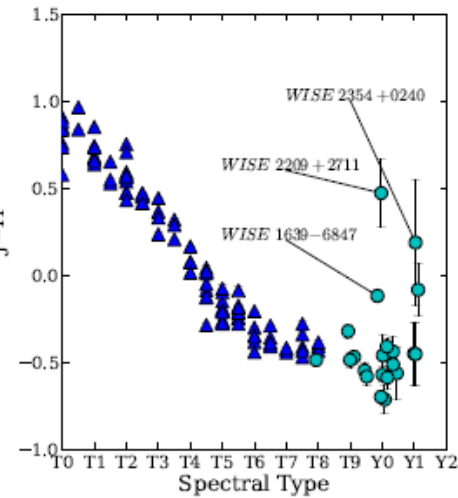
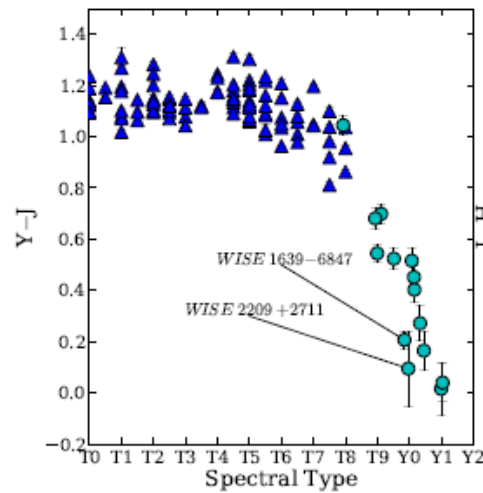


Fig.1. Brightness distribution of total sample of 3692 guide stars analyzed to date (white columns), of guide stars with TYCHO  $B - V$  values (grey columns), and of guide stars with published spectral types (black columns)



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel



Barna törpék színe és helye a szín-fényesség diagramon.

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az **LL Orionis** körüli fejhullám (balra lent)

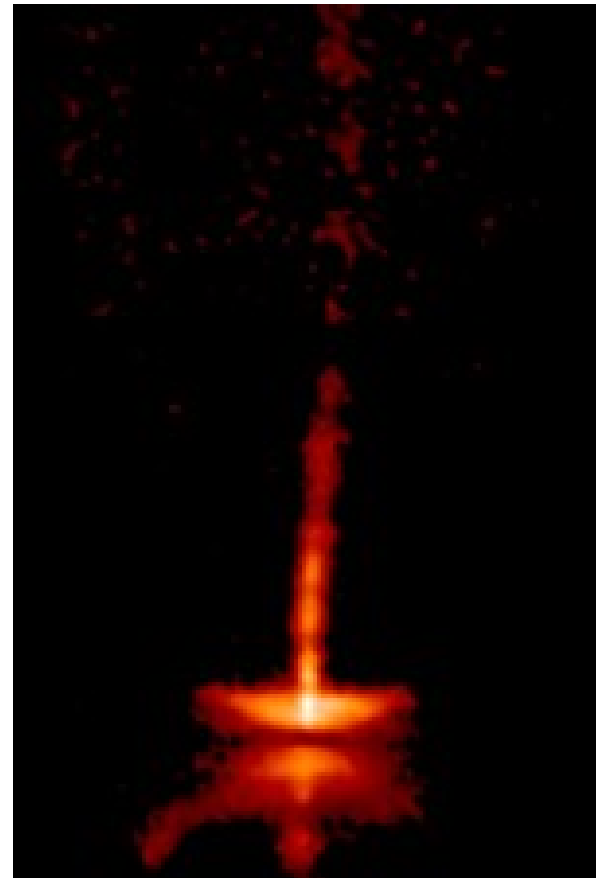
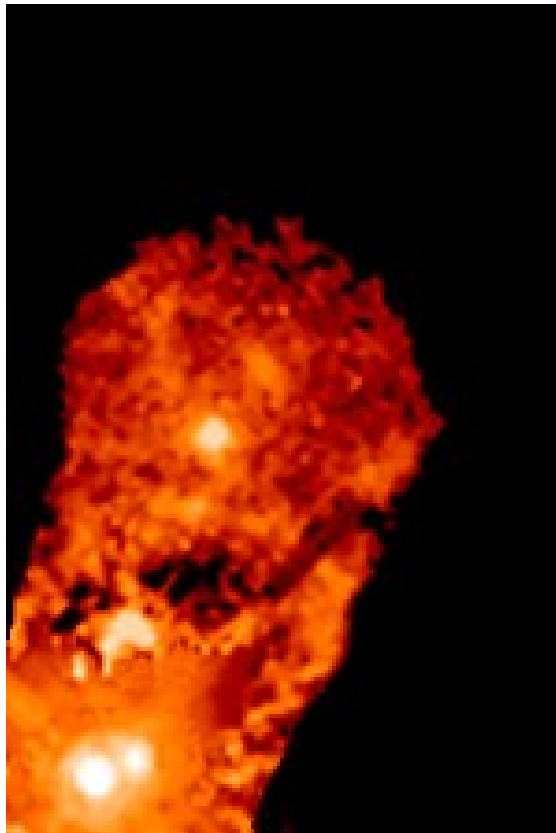
**Orion-köd:** 3000 csillag + barna törpék, 1500 fényévre. A kép telehold méretű (jobbra lent).



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

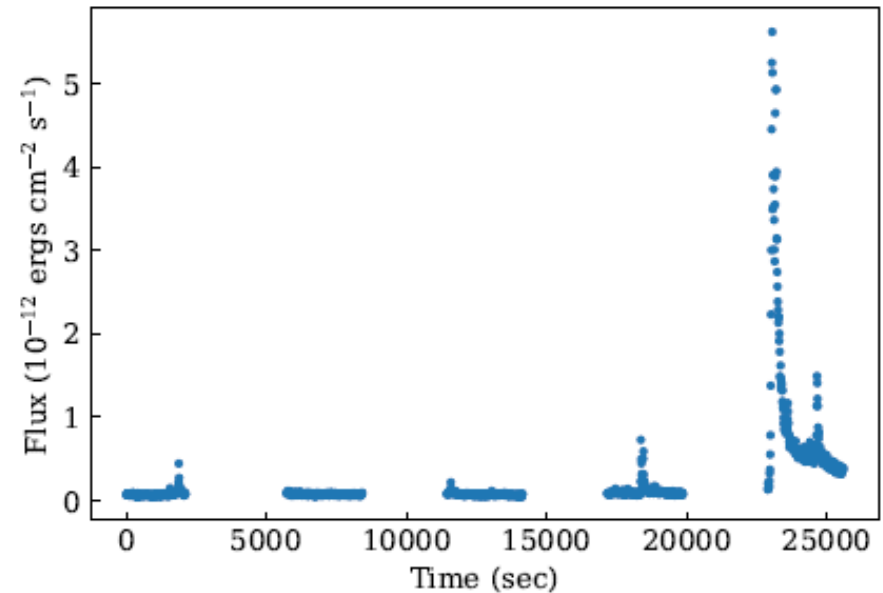
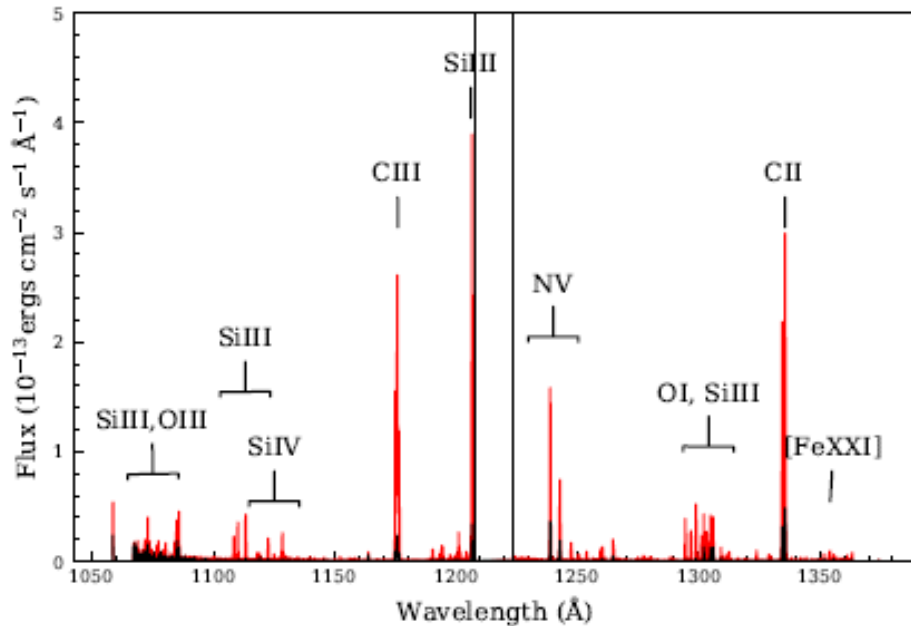
**XZ Tauri:** vizuális kettős, párja (40 CSE-re) a HL Tauri, a Tau–Aur molekulafelhőben (alig 1 millió éves). A gázfelhő 600 CSE méretű, 180 km/s sebességgel távolul, 40 éve alakult ki. (balra lent)

**HH 30:** Herbig–Haro-objektum (jobbra lent)



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

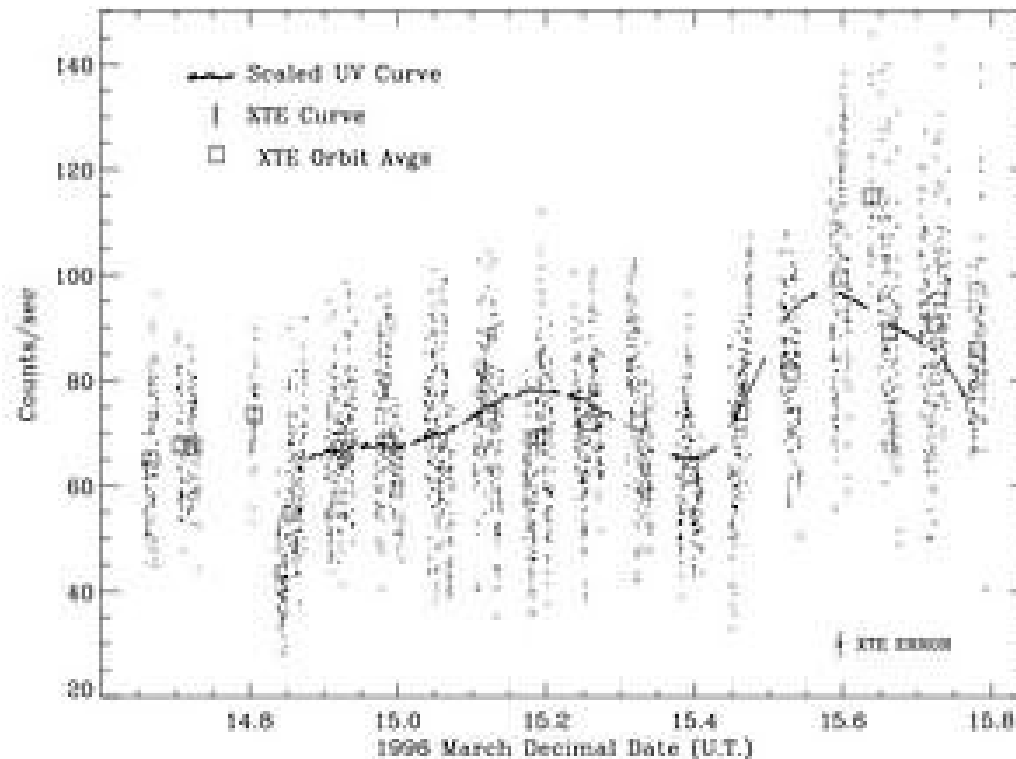
Nagy energiájú UV fler a **GJ 674** törpecsillagon (M2,5V színképtípusú).  
Sok kis fler után egy majdnem egyórás kitörés a távoli UV-ben kb.  $10^{31}$  erg energiával.



# 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 (tízszor forróbb, mint a napkitöréseknél), a 27 órás rotációs periódus felismerhető az intenzitásoknál (szimultán változás UV-ban és röntgenhullámhosszakon).

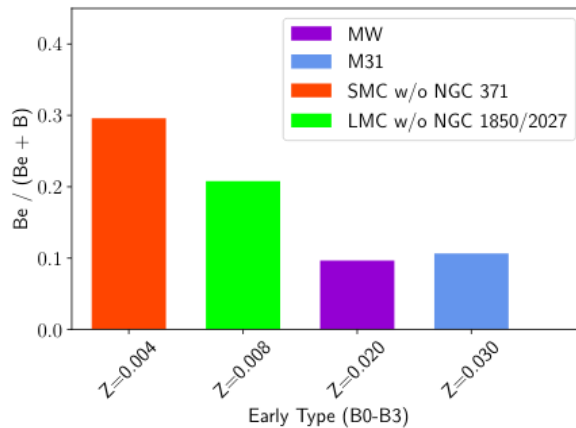




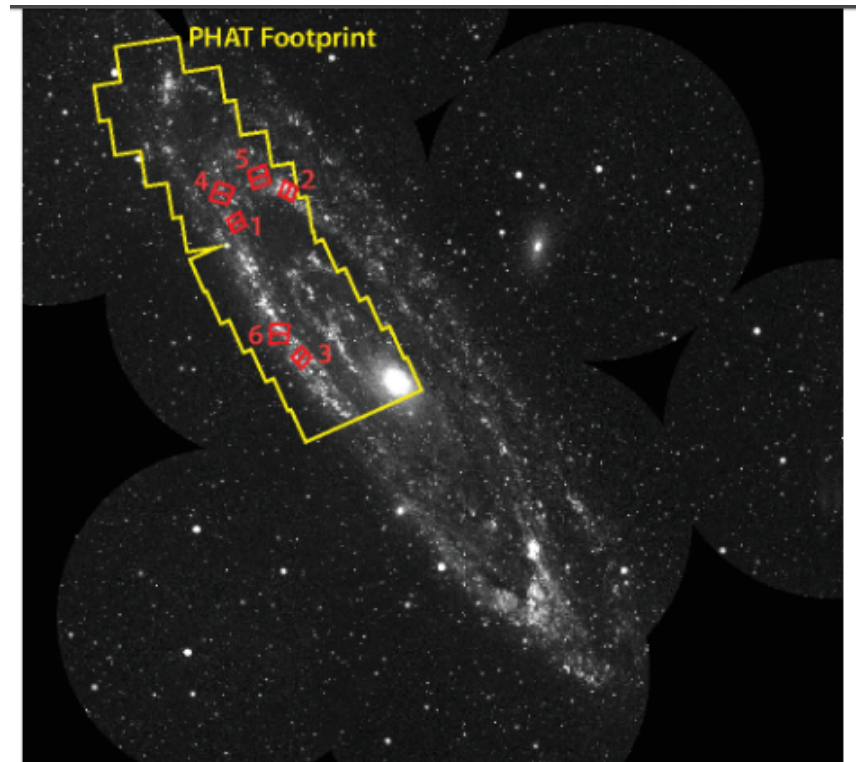
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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



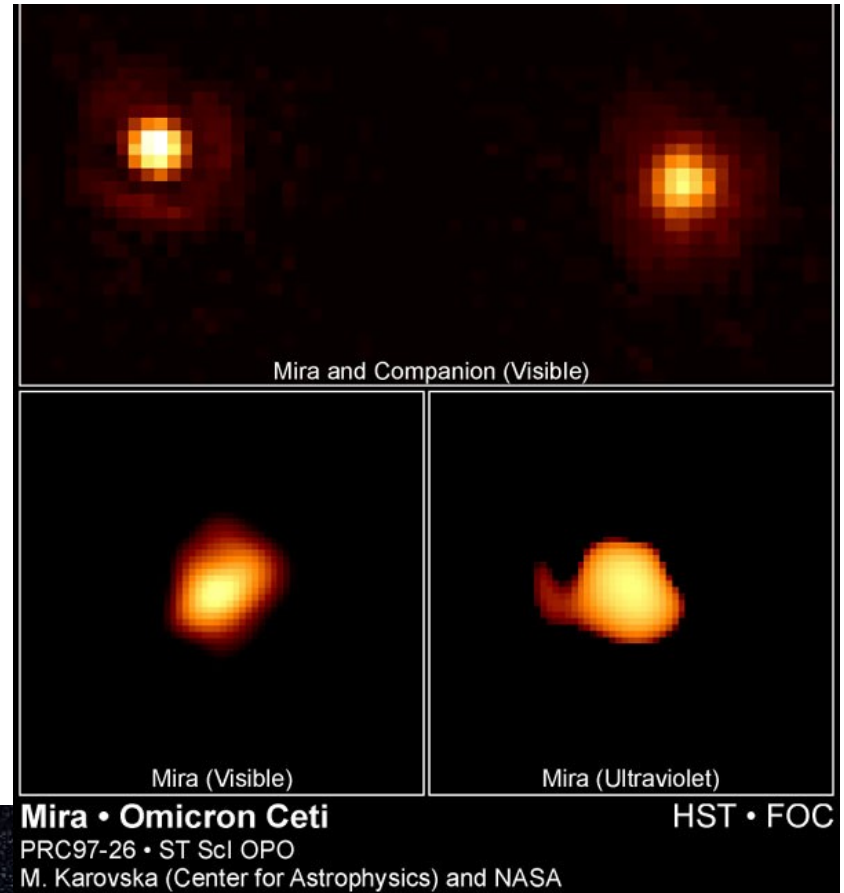
**Figure 1.** The footprint of our HST emission line survey pointings of M31 are depicted in **red**, and labeled by pointing number compiled in Table 1. Also shown here in **yellow** is the overlay of the full PHAT survey (Dalcanton et al. 2012a).

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

**Mira Ceti:**  $P=332$  nap, 400 fényévre,  
 $R=700R_{\text{Nap}}$ ;  
szeparáció:  $0,6''$ . UV-ben nyúlvány a  
Mira B (VZ Ceti) felé. A Mira  
uszályát a GALEX ismerte fel  
(UV-ben).

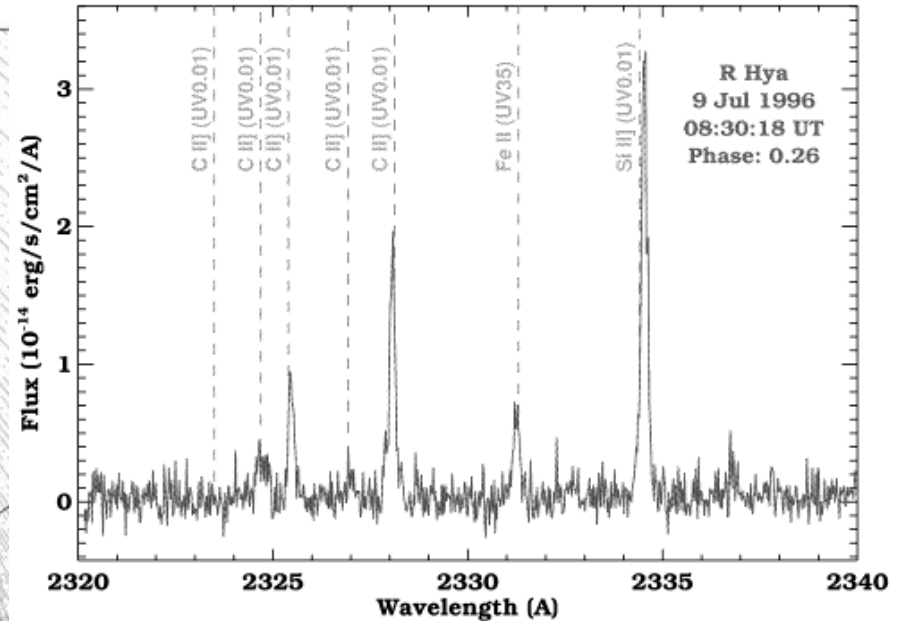
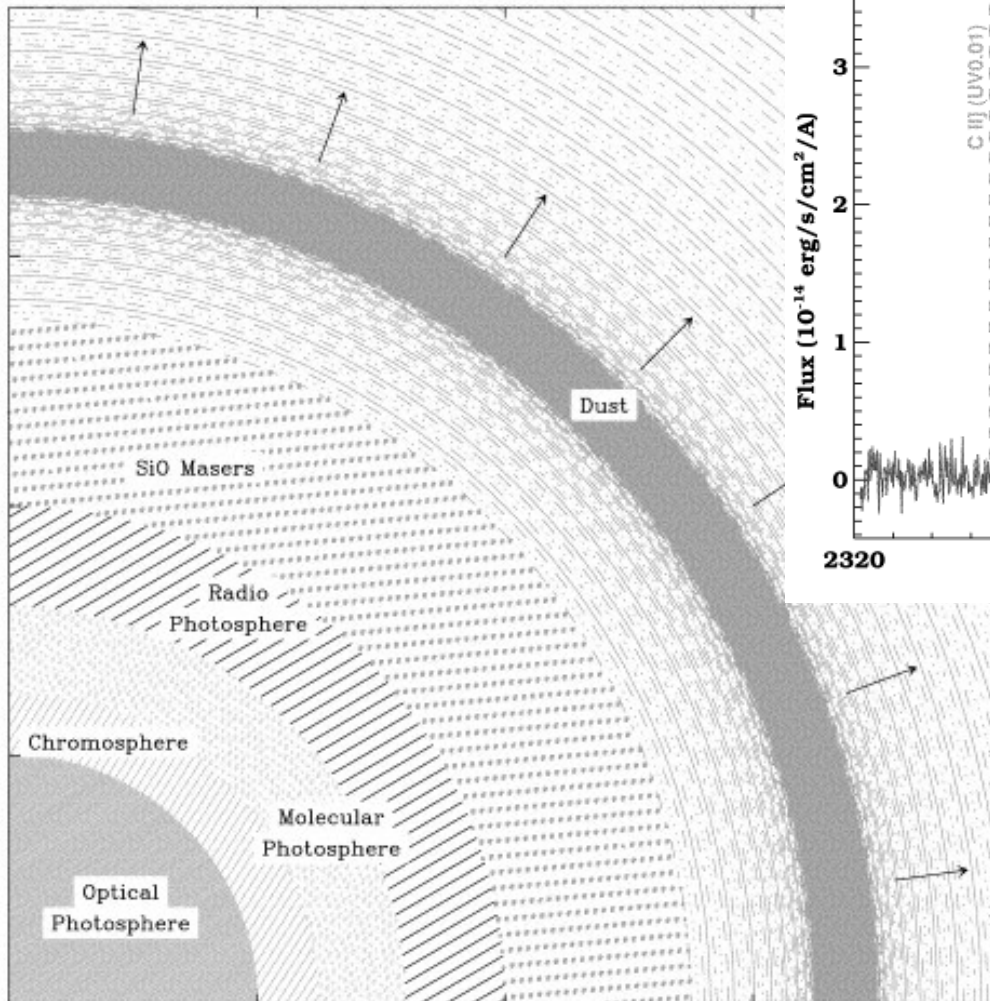
**VZ Ceti** (fehér törpe + akkréciós  
korong).

Az A-B pár keringési periódusa kb.  
400 év.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

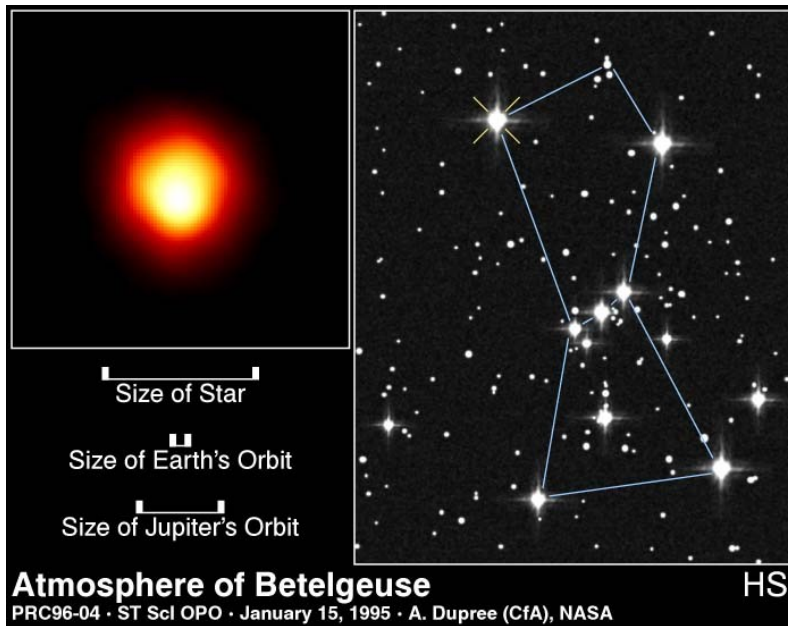
**R Hya** GHRs-színképe: emissziós vonalak (C, Si, Mg) a mirák légköri rétegződésére utalnak.



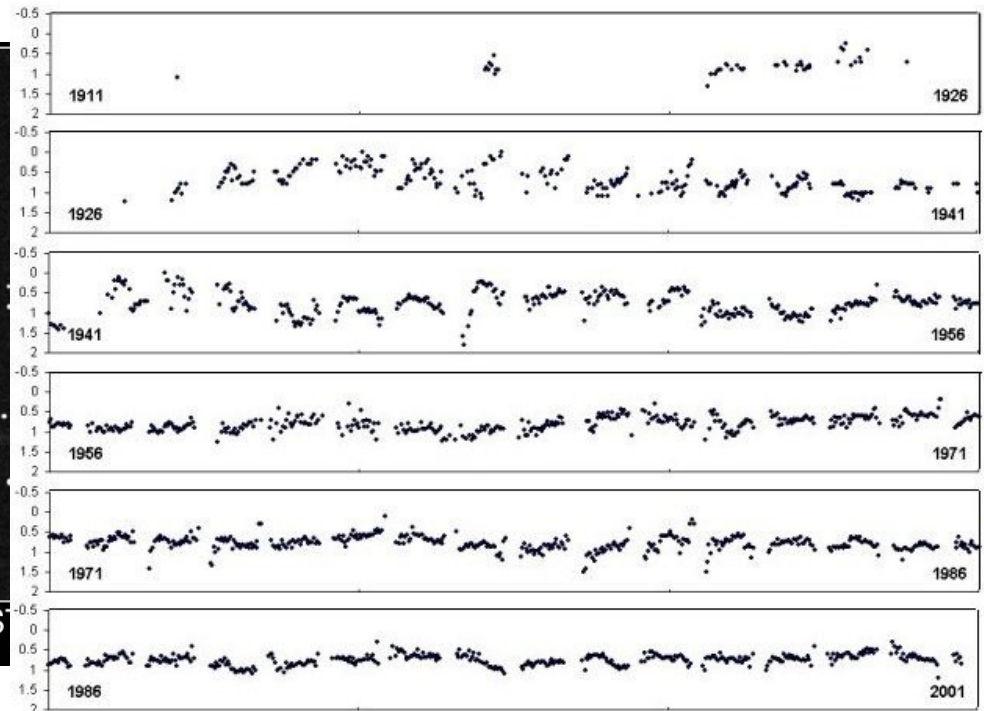
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

**Betelgeuze:** 0,4-1,2 magnitúdó közötti fényesség-ingadozás (SR).

John Herschel fedezte fel a fényváltozását 1836-ban. 3100 K hőmérsékletű (M2lab) szuperóriás 425 fényévre. Forró folt a felszínén. UV-ben kétszer akkora, mint látható fényben (kiterjedt kromoszféra). Az IUE-vel 420 napos oszcillációt is találtak.



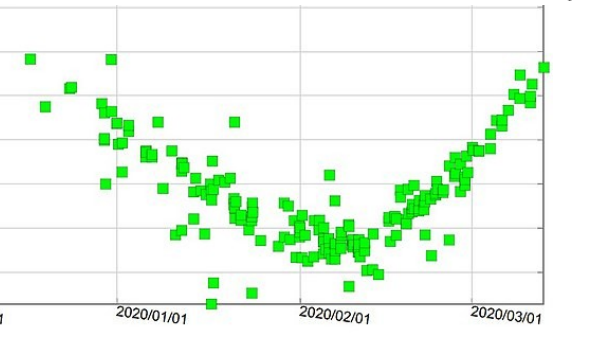
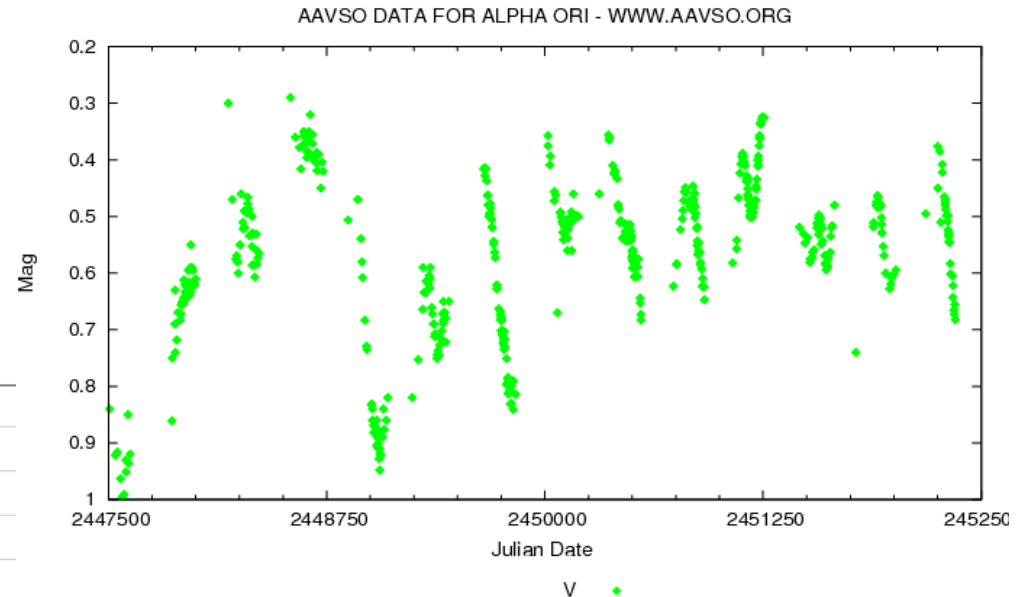
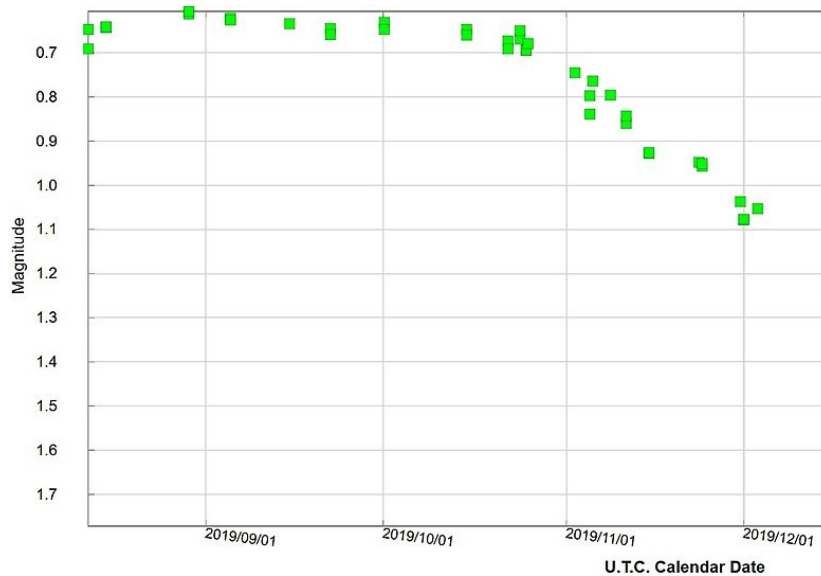
**Alpha Orionis (Semiregular)**  
1911-2001 (10-day means)



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

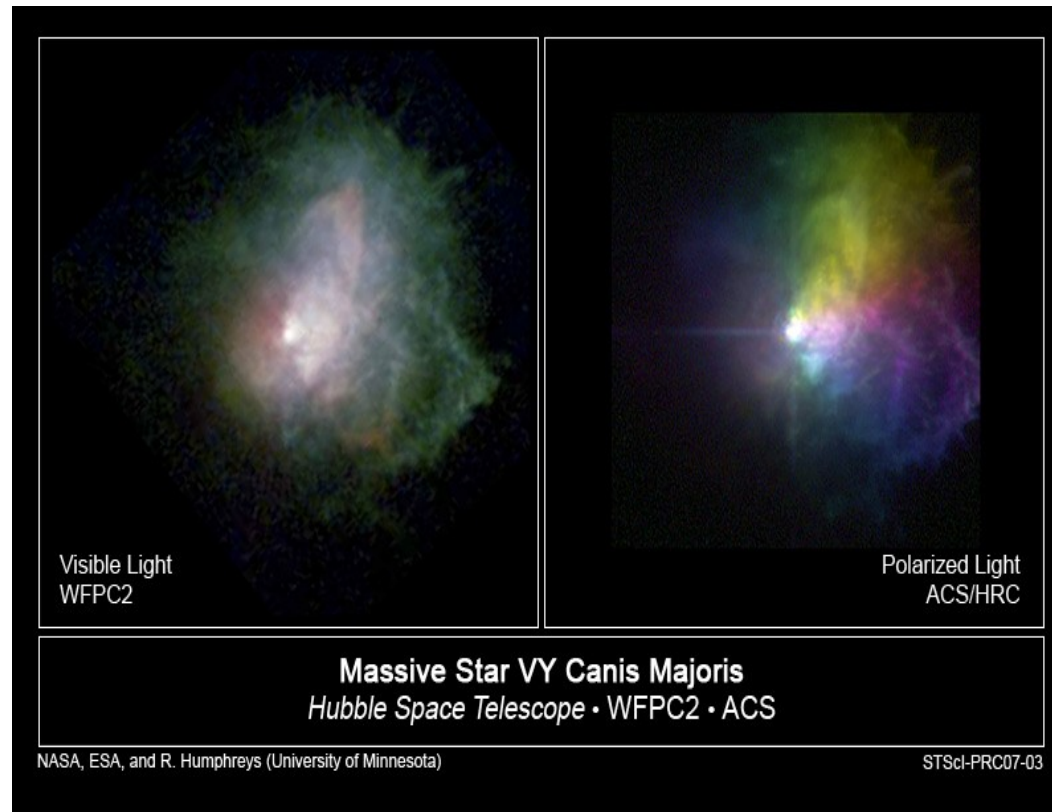
2019-ben erősen halványodni kezdett a Betelgeuze, de a fényesség csökkenése 2020-ra megállt, sőt visszafordult.

A közeljövőben szupernóva lesz?



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

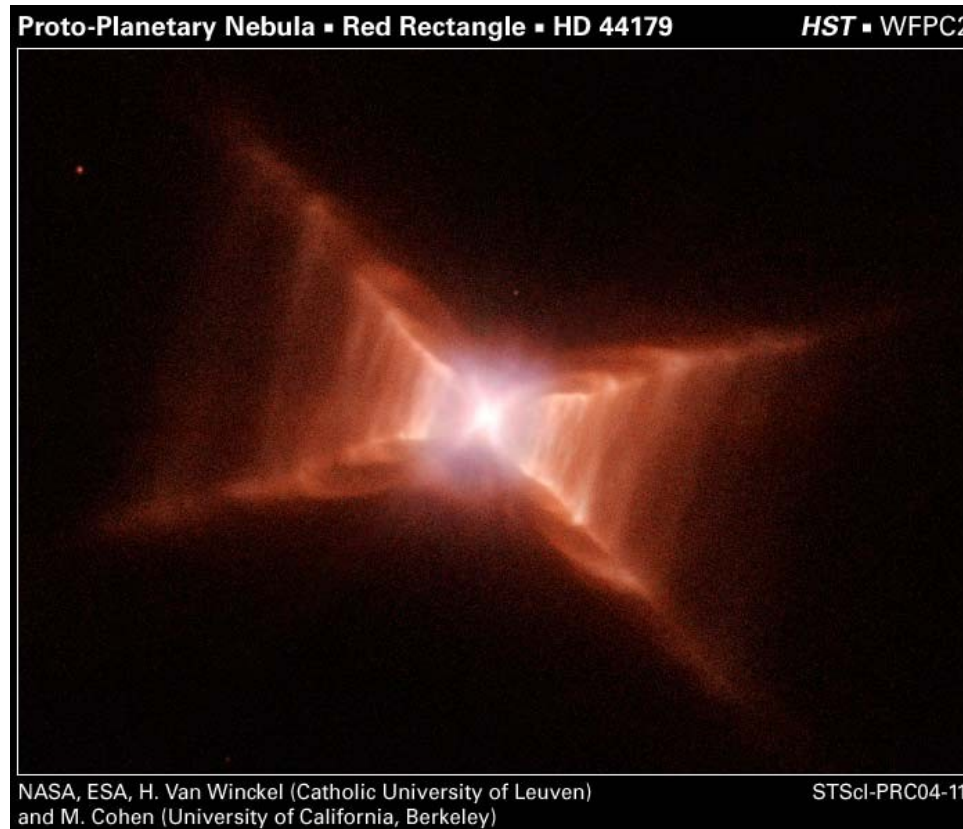
**VY Canis Majoris:** 2000  $R_{\text{Nap}}$  sugarú hiperóriás, 5000 fényévre. 4500 CSE sugarú reflexiós köd veszi körül. 1801 óta szekuláris halványodás + hónapos-éves időskálán 0,5-3 magnitúdós fényesség-ingadozás. A kitörések során tízszeresére nő a tömegvesztés, és a csomók alapján 3D-ban rekonstruálható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



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

**Vörös négyszög:** protoplanetáris köd a HD 44179 kettőscsillag körül. Színe a porfelhőbeli molekuláktól származik (szénhidrogénektől). X alakú, nem négyszög: bipoláris kiáramlás + tömegvesztési epizódok.

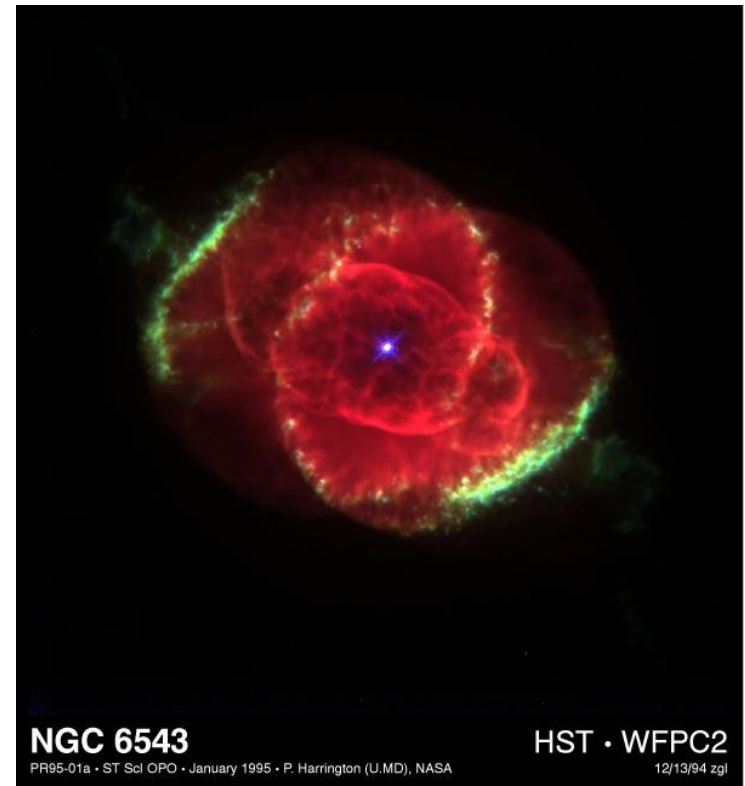
Hasonló szerkezetű köd van az  $\eta$  Carinae körül, de abban a kettős rendszerben a csillagok nagyobb tömegűek.



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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 Dracóban, 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)

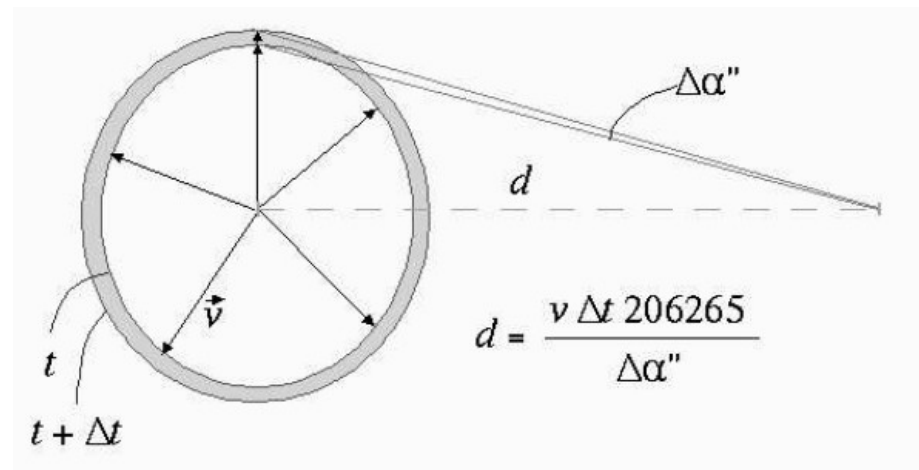
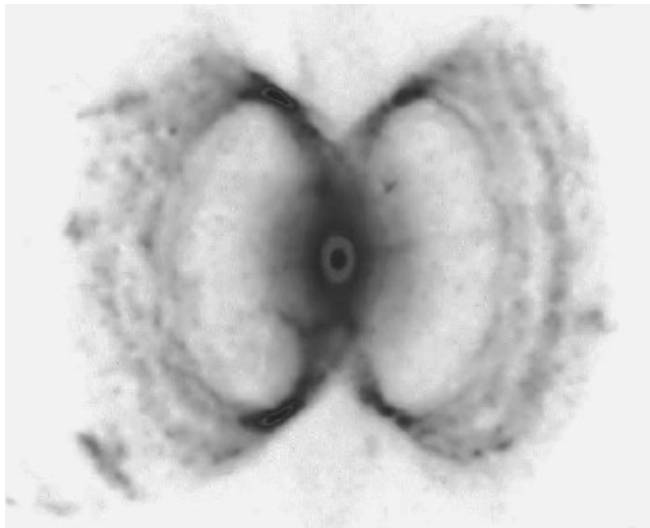
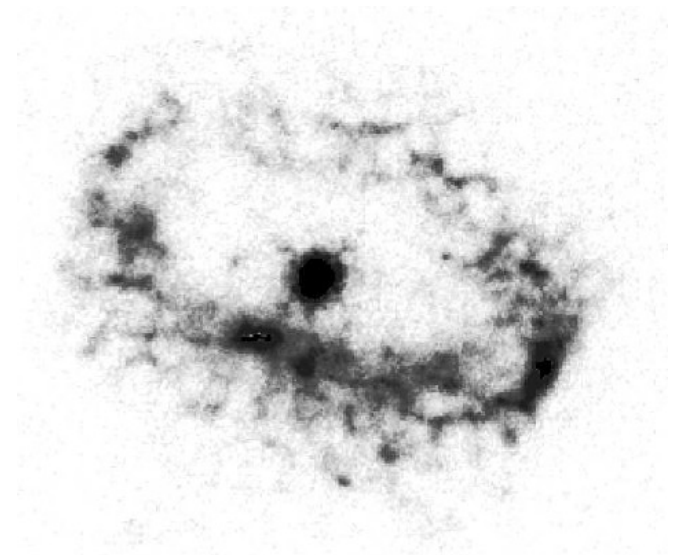
P > 250 nap, A = 1 mag J-ben

He 2-104 (Déli Rák-köd): V852 Cen (lent)

P ~ 400 nap, A = 0,4 mag K-ban

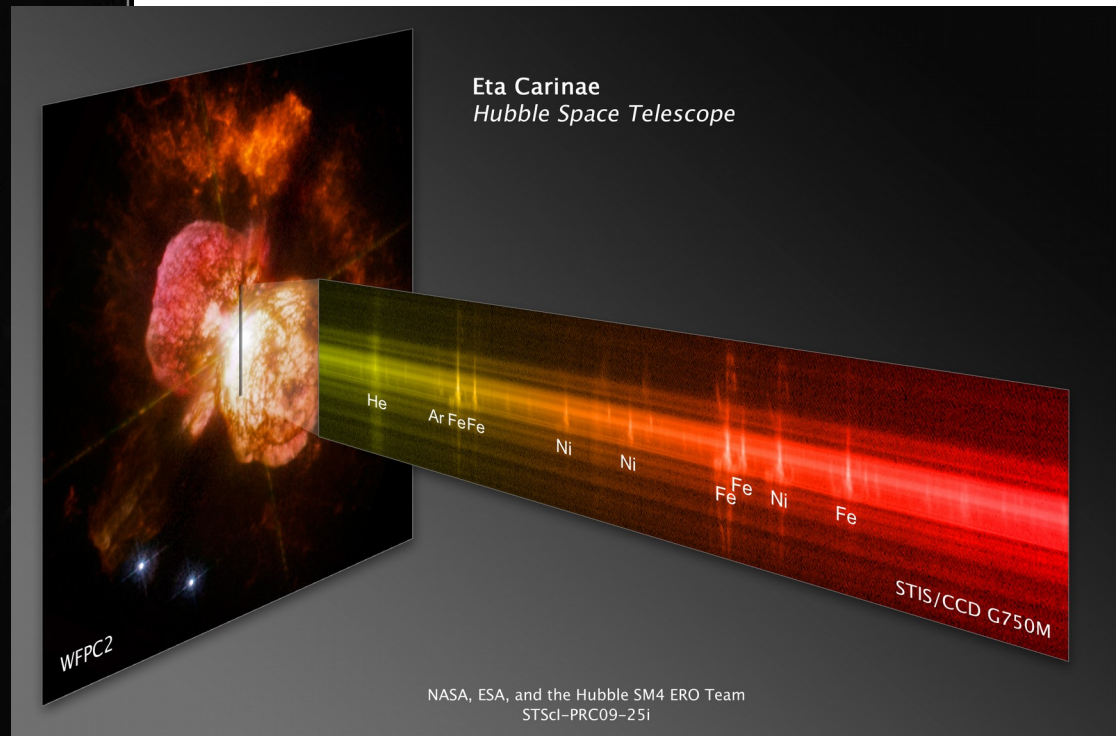
Távolságmeghatározásra jó!

(tágulási parallaxis – majd a növőknál is)



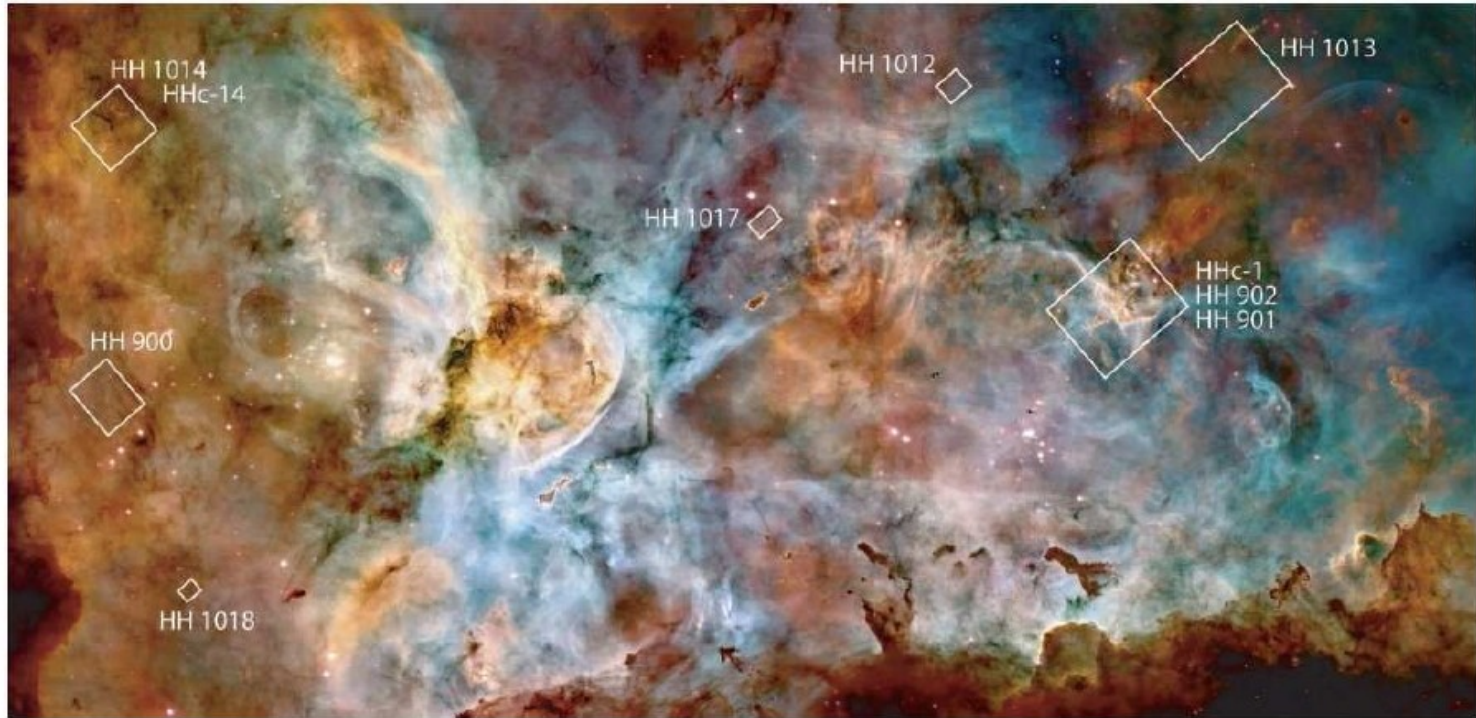
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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



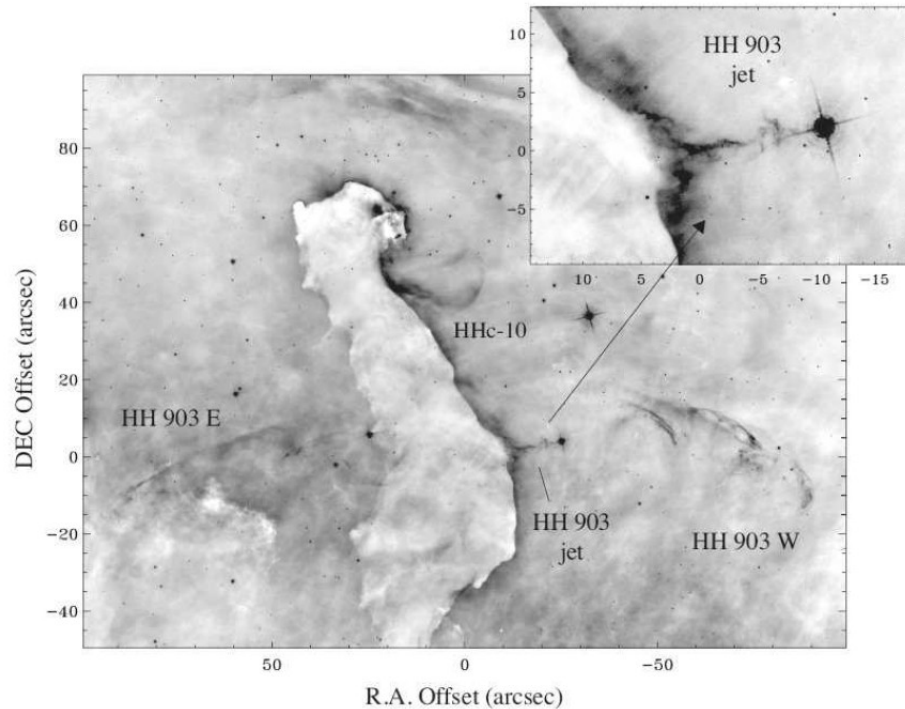
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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



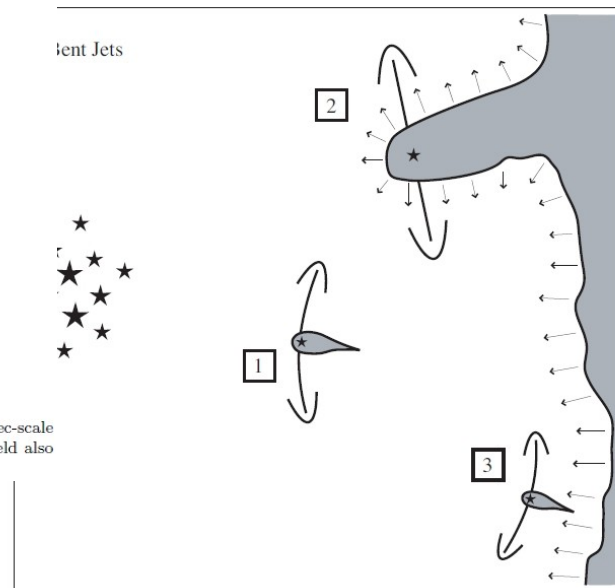
**Figure 2.** The color Hubble Heritage image of the inner Carina Nebula including the Tr 14 and Tr 16 clusters, the Keyhole, and  $\eta$  Carinae, plus several newly discovered HH jets. This is made from a large ACS H $\alpha$  mosaic used for the intensity scale in the image, while the color coding 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 H $\alpha$  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.

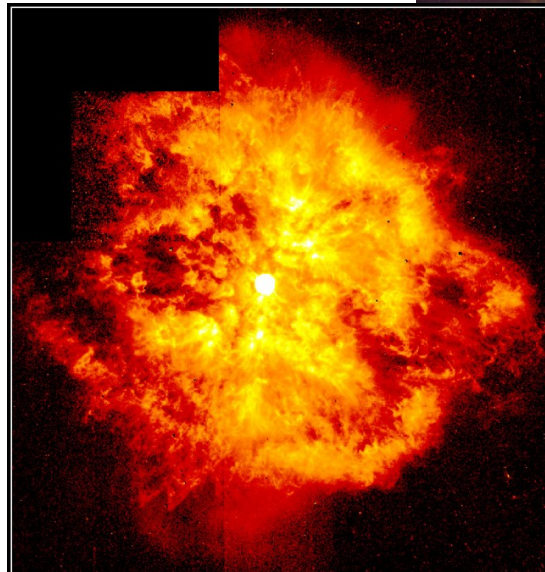
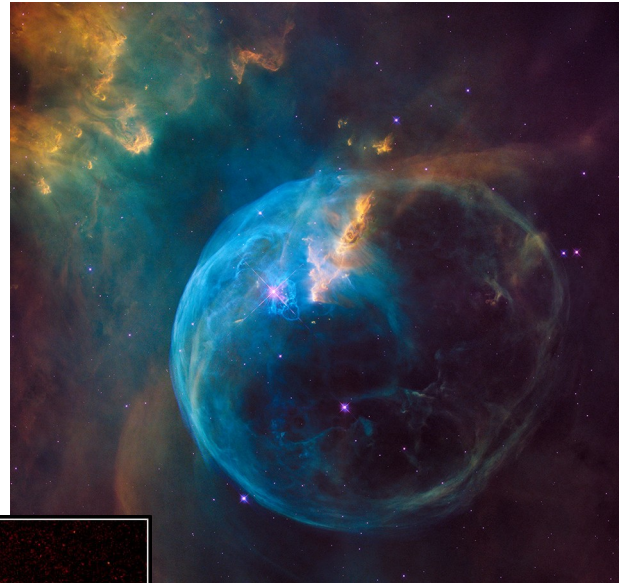
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

## Buborék-köd (NGC 7635):

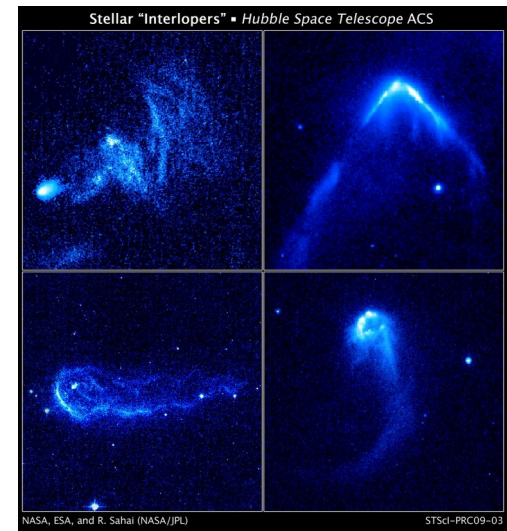
Nagy tömegű, forró csillag körül  
7100 fényévre,  
7 fényév átmérőjű  
(jobbra fent)

## WR 124 = QR Sge:

Wolf–Rayet-csillag.  
Nagy kezdeti tömegű,  
forró csillag  
15000 fényévre. Erős  
( $10^{-5}$  naptömeg/év),  
de nem egyenletes  
tömegvesztés  
(balra lent).  
Nagy sebességű,  
de nem fiatal  
**szökevény-csillagok**  
tömegvesztéssel  
(jobbra lent).



Nebula M1-67 around Star WR124 HST • WFPC2  
PRC98-38 • STScI OPO • November 5, 1998  
Y. Grosdidier and A. Moffat (University of Montreal) and NASA

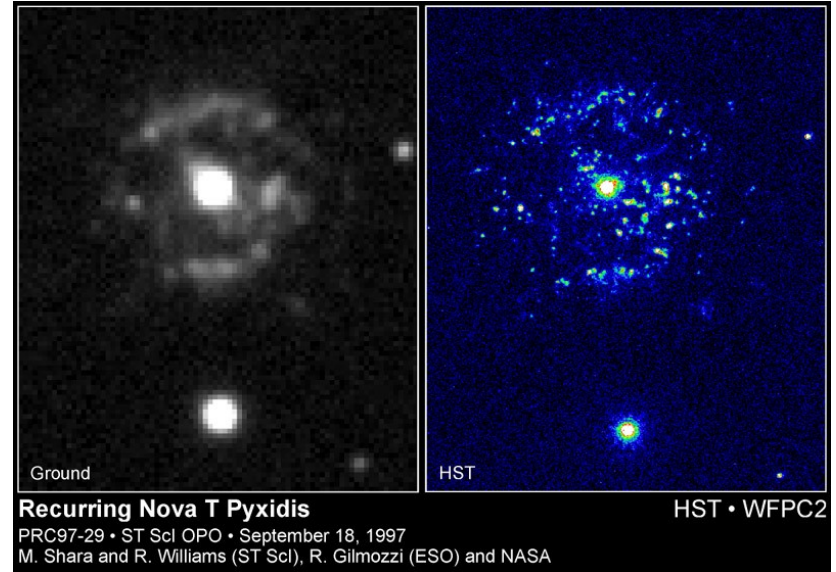


Stellar "Interlopers" • Hubble Space Telescope ACS  
NASA, ESA, and R. Sahai (NASA/JPL) STScI-PRC09-03

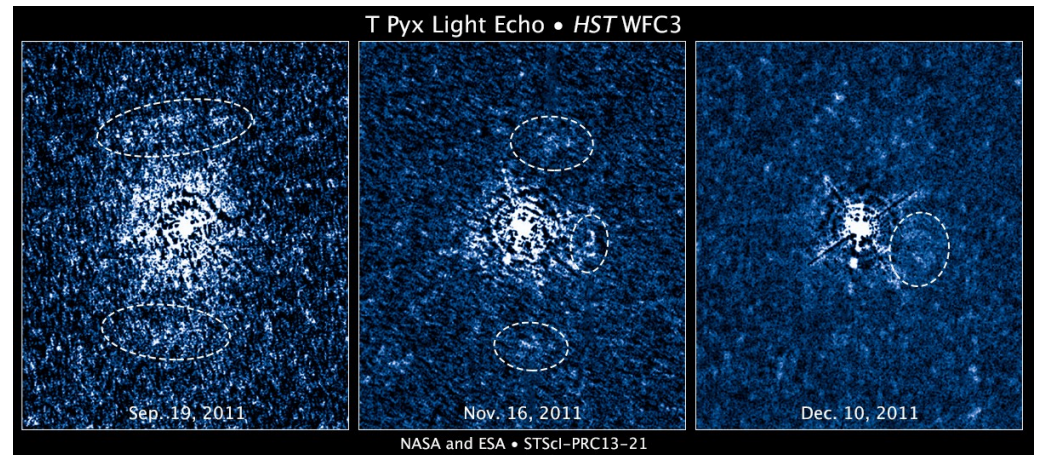
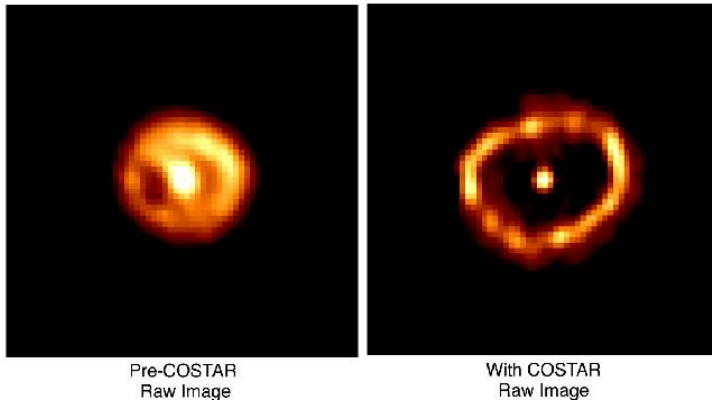
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

**Nova Cyg 1992 = V1974 Cygni:** a burok tágulása alapján 10430 fényév távolságra (467 nap időkülönbségű két felvétel alapján).

**T Pyxidis:** ismétlődő nóvakitörések (1890, 1902, 1920, 1944, 1967, aztán „késett”: 2011). 8 koncentrikus gyűrű – az előző kitörések lenyomata.



**Nova Cygni 1992**  
Hubble Space Telescope  
Faint Object Camera



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

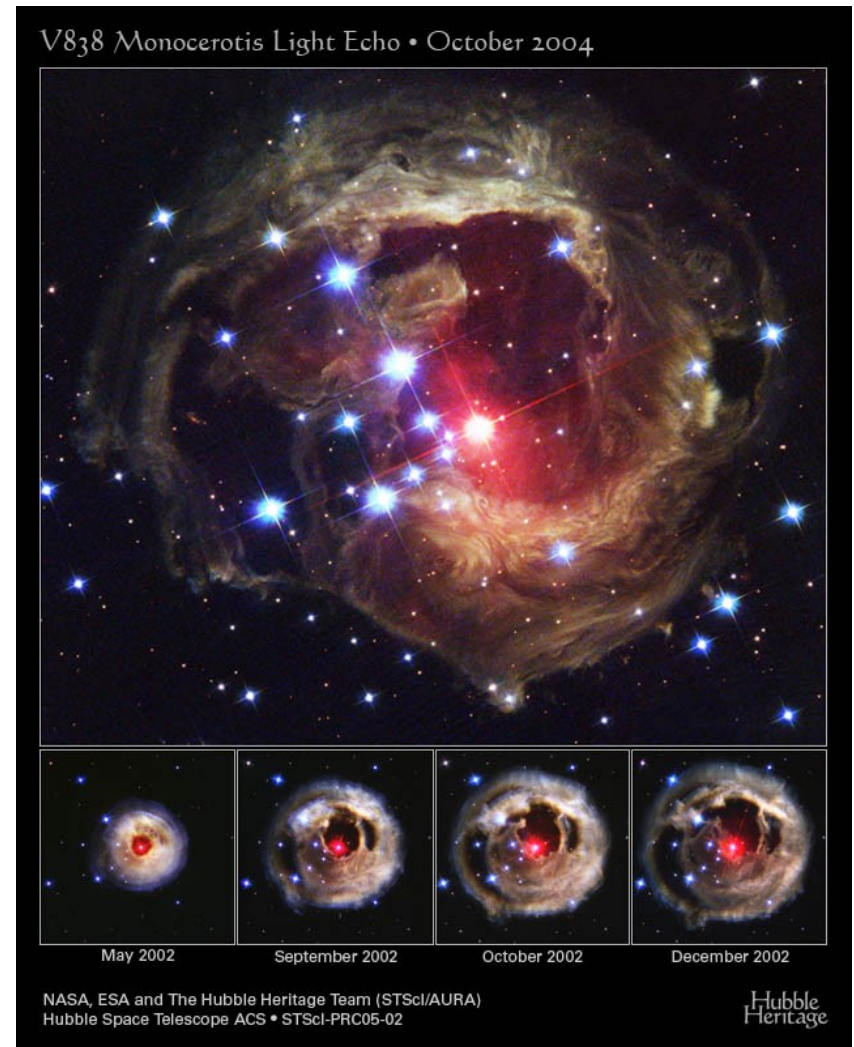
## V838 Mon = Nova Mon 2002

6000 fényévre,  $600000 L_{\text{Nap}}$ , 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, főszorozat előtti párjával.

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



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Cefeidák (szuperóriás csillagok)  
kísérőinek közvetlen kimutatása.

Trigonometrikus parallaxis a közeli  
cefeidákra.

Távolságmeghatározás a P-L  
összefüggés alapján. HST-  
kulcsprogram: a Hubble-állandó  
extragalaktikus cefeidák alapján  
(20 Mpc-en belül 18 galaxisban  
800 cefeida):  $H_0 = 72 \pm 8$   
km/s/Mpc.

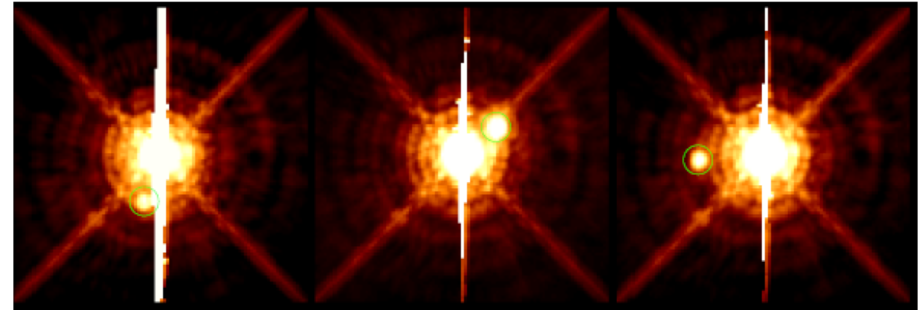
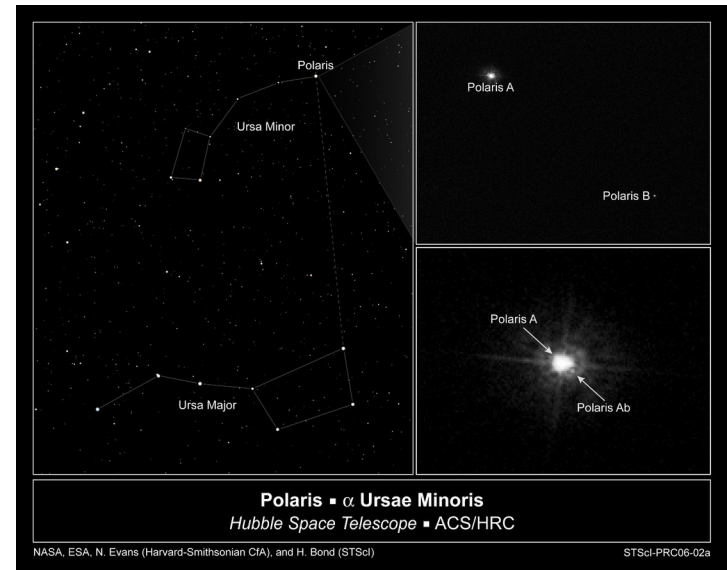
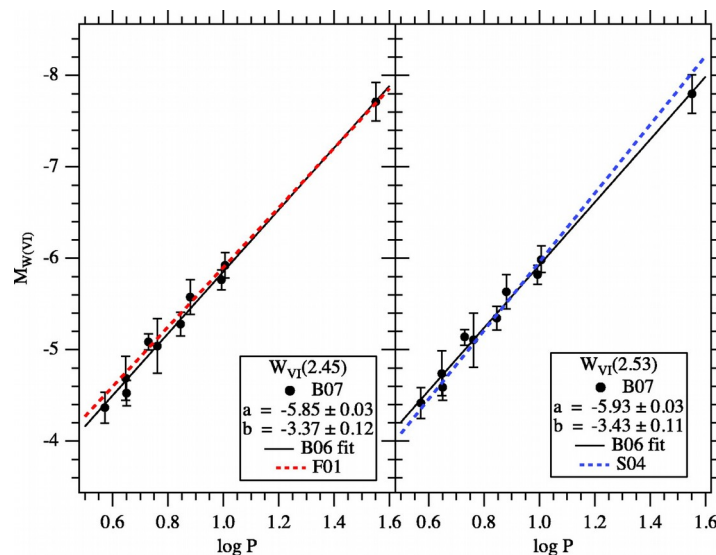


Fig. 1.— *HST* images of three Cepheids whose hot companions were resolved in WFC3 images:  $\eta$  Aql (left), V659 Cen (center), and S Nor (right). These are *V*-band images, with a logarithmic stretch. Each frame is  $4'' \times 4''$ . Companions are circled in green.





# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

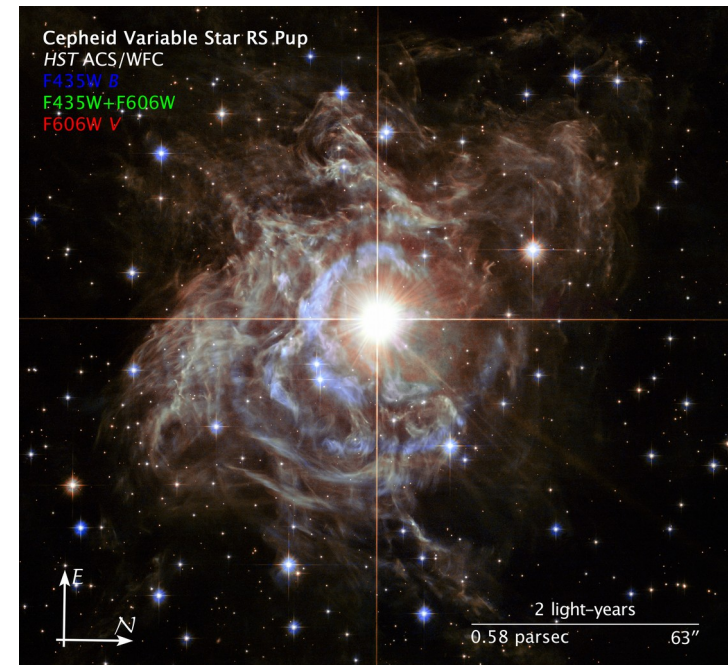
Egyedi cefeida távolságának eddigi legpontosabb meghatározása:

**RS Puppis**

Porburokba ágyazódva (a burkot nem a csillag dobta le, sokkal nagyobb a burk tömege), de a csomók látszó fényessége fáziskéséssel követi a cefeida 41 nap periódusú fényességváltozását (fényechó).

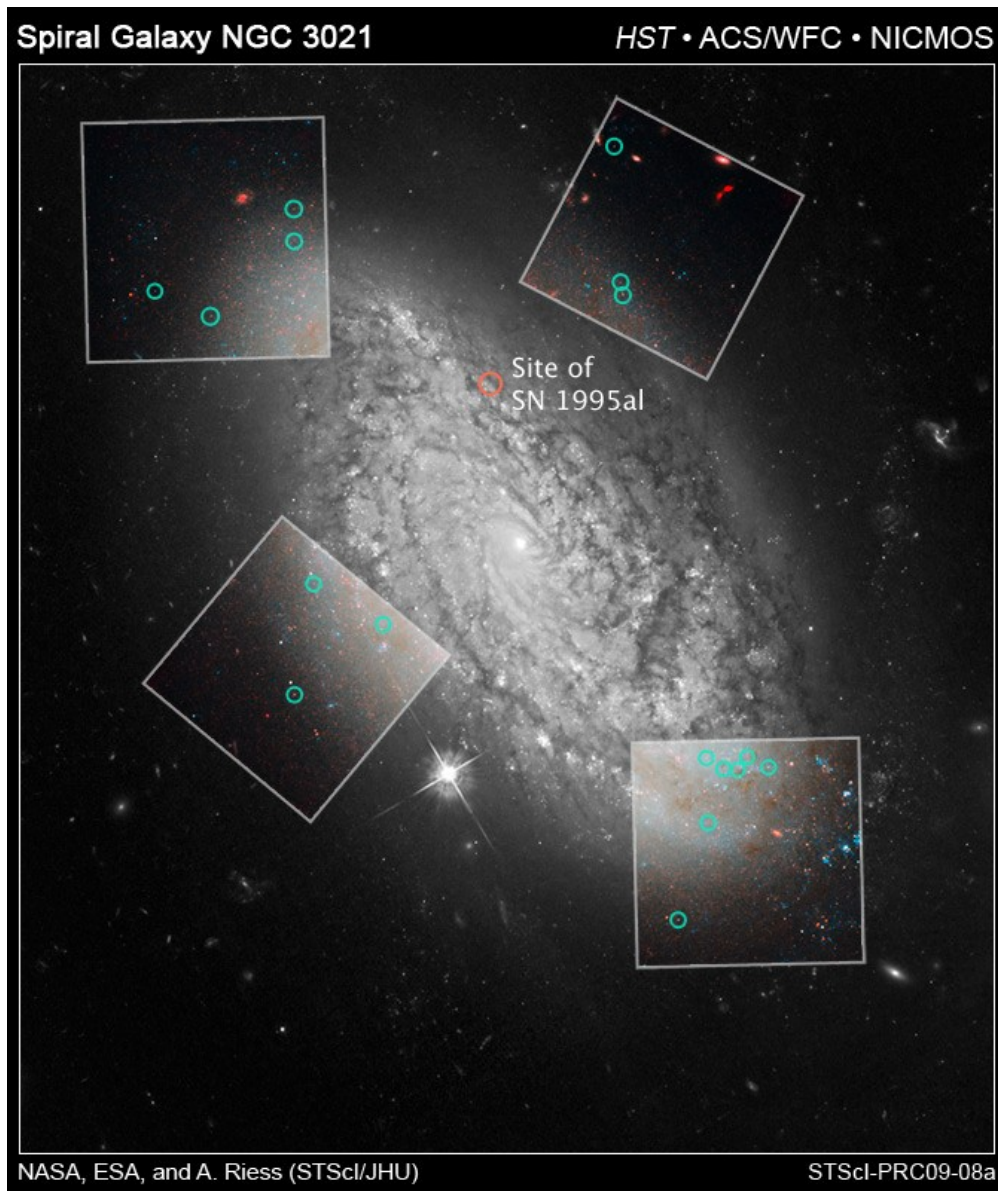
Az ebből meghatározott távolság:  
 $1992 \pm 28$  pc (1,4%-os bizonytalanság).

Később az ESO VLT-vel végzett polarimetriai mérésekkel sikerült pontosítani a távolságot.



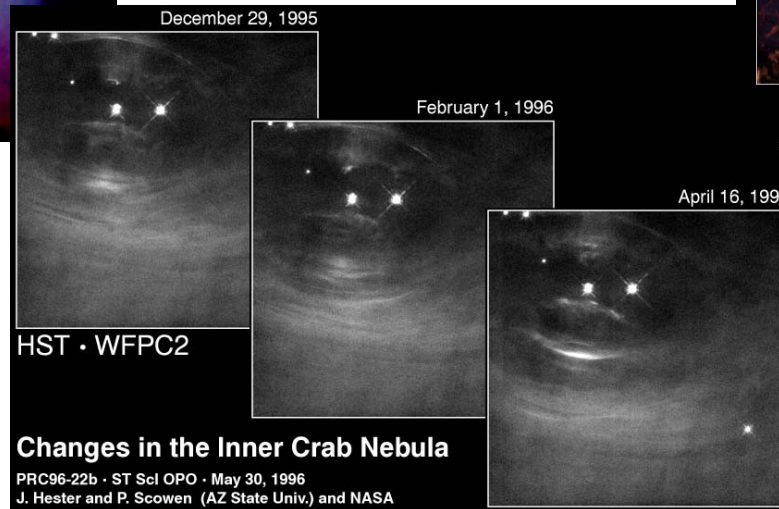
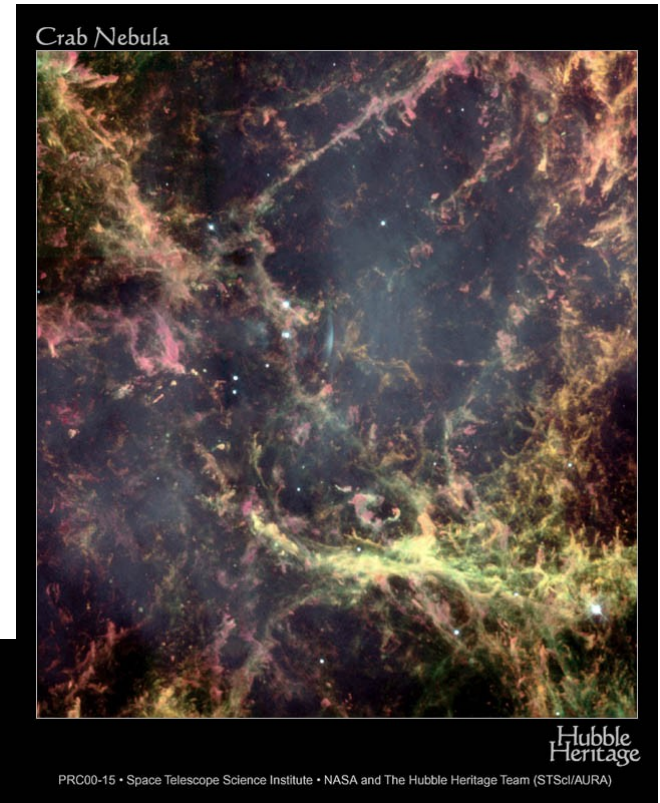
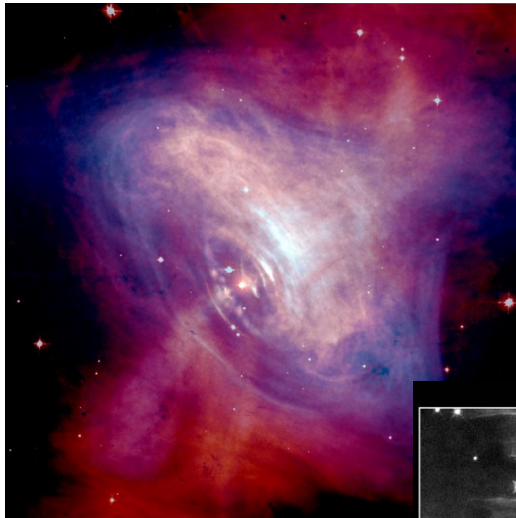
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

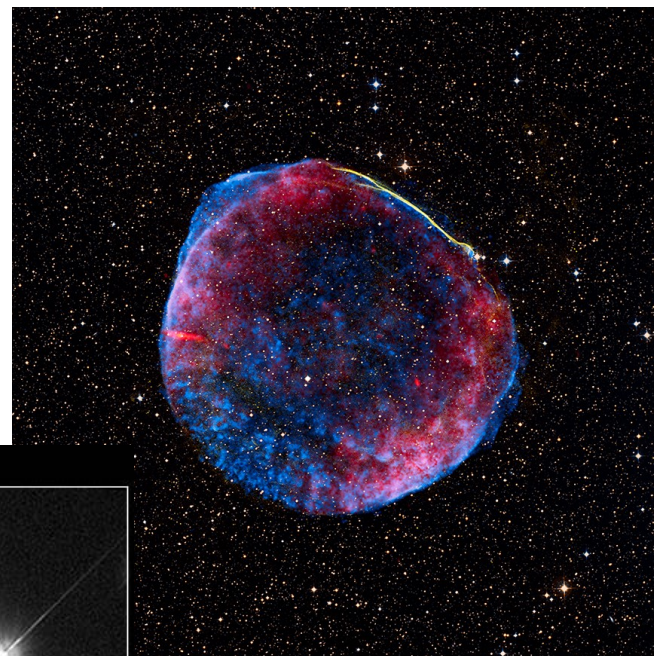
Szupernóvák és környezetük: a tejútrendszerbeli minta eléggé szegényes, de alaposan vizsgálták. Együttműködve nagyenergiás kutatásokkal.



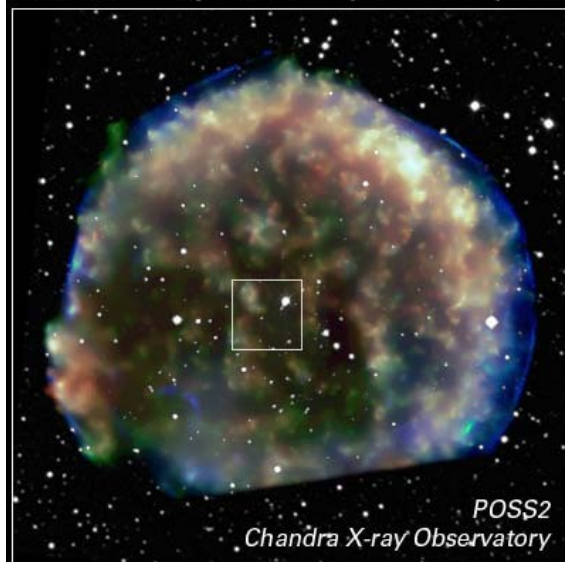
# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az 1006-ban felfénylett szupernóva maradványa (jobbra)

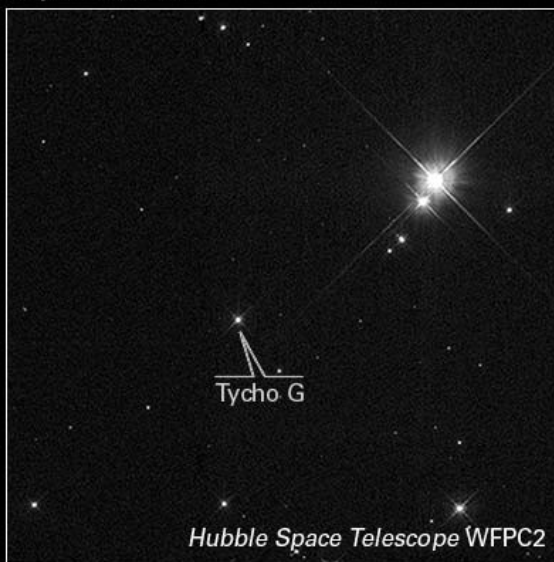
A Tycho-féle szupernóva SNIa volt: a kísérőcsillag nagy sebességgel távolodik a SN-maradványtól (a sajátmozgás és a kémiai összetétel igazolja). Bizonyíték a robbanás aszimmetrikus voltára.



Candidate Progenitor Companion to Tycho's Supernova 1572



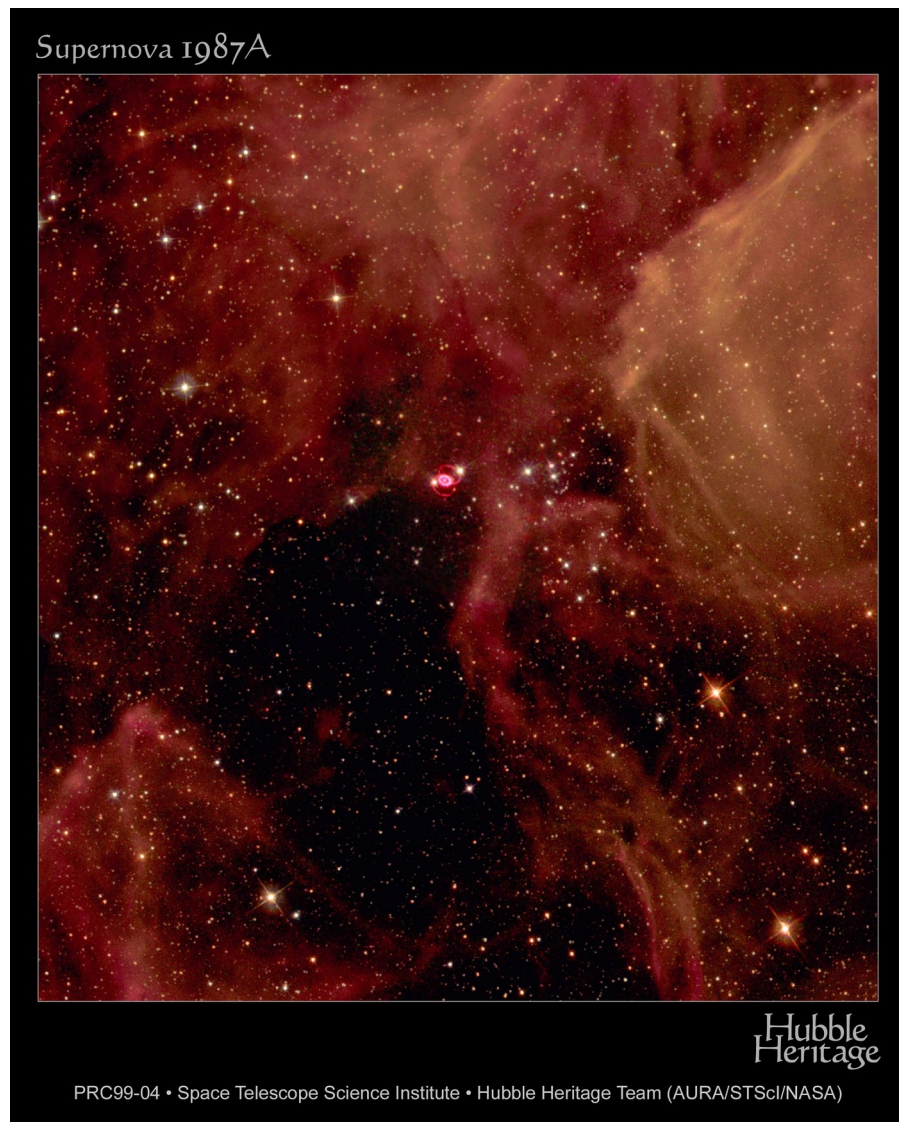
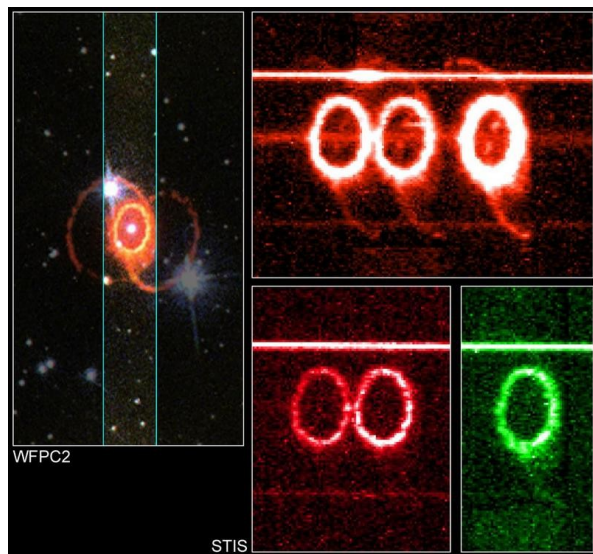
POSS2  
Chandra X-ray Observatory



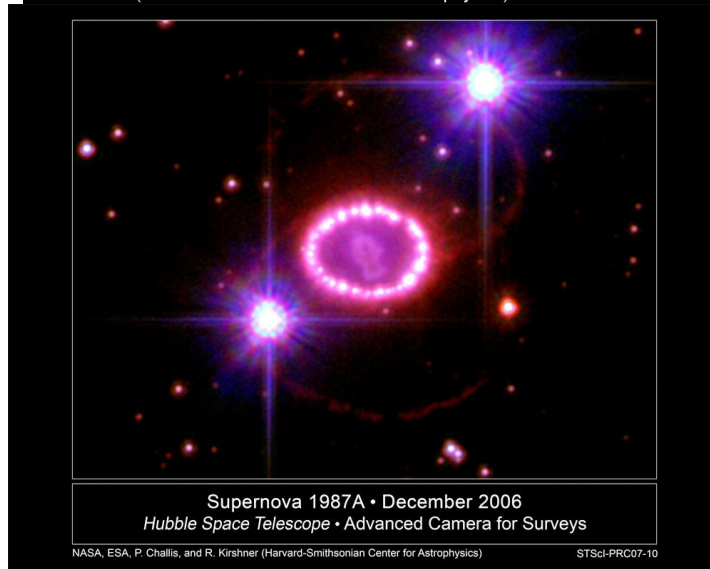
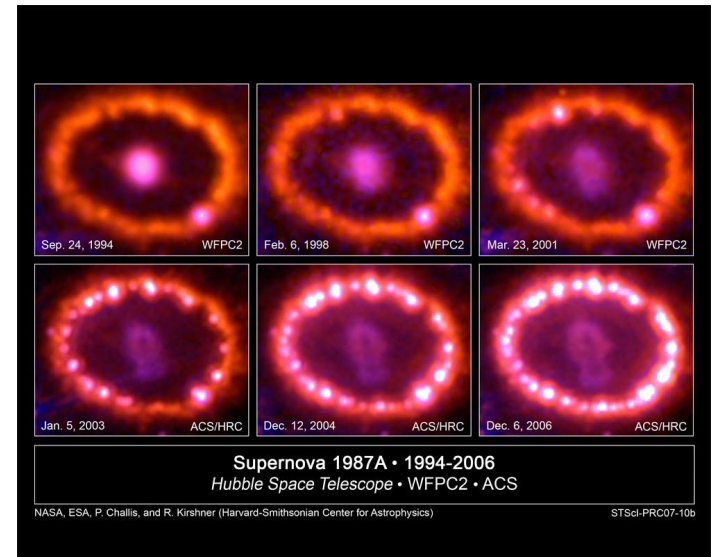
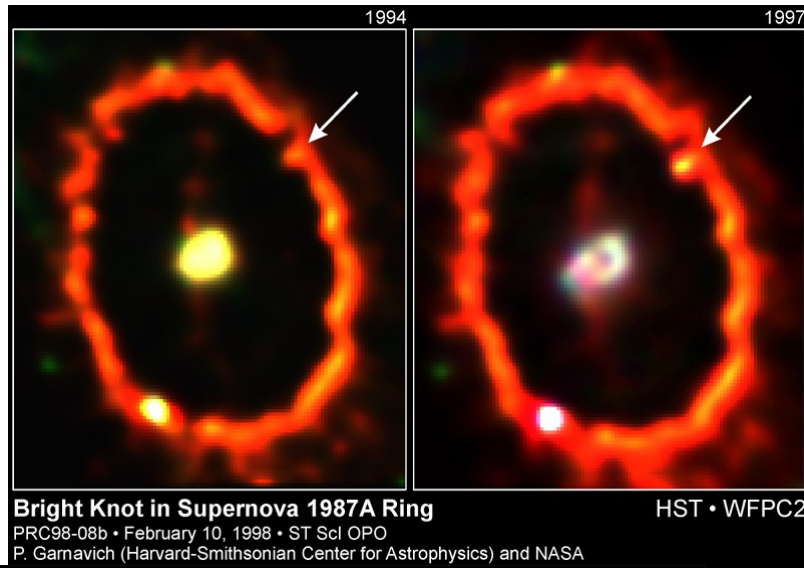
Hubble Space Telescope WFPC2

# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

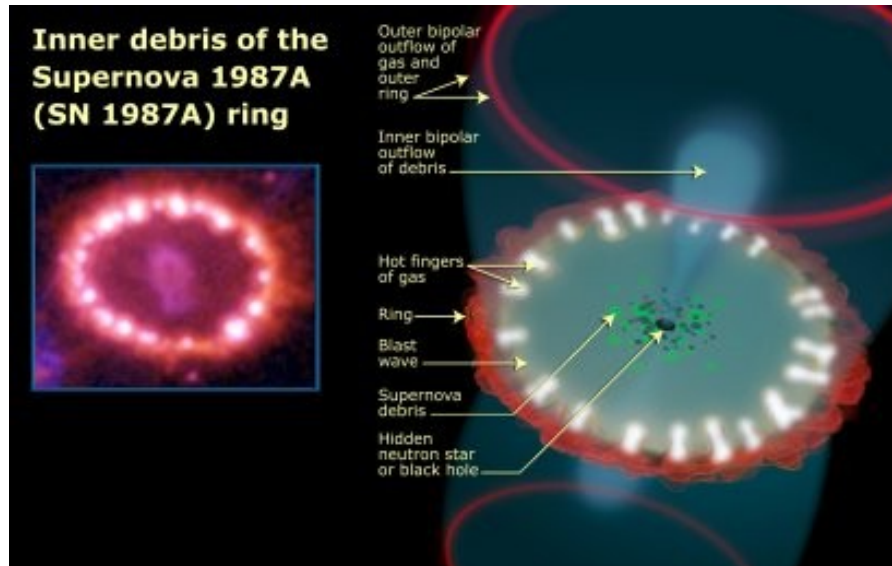
Az SN1987A szupernóva a Nagy-Magellán-felhőben: kék szuperóriás robbant, de 10000 éve még vörös szuperóriás volt. A visszamaradt neutroncsillag még nem látszik. Az észlelések az  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  bomlási sort igazolták (kb. 0,08 naptömegnyi vas).



# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

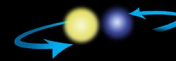


# Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel



## One theory of the evolution of Supernova 1987A (SN 1987A)

1



A binary stellar system. The more massive (primary) star evolves first.

5



The primary star explodes as a supernova, causing the inner edge of the ring to glow.

2



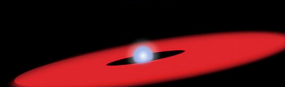
As the primary star becomes a giant, it engulfs its companion. The core of the primary and the companion are in a "common envelope."

6



Ejecta from the explosion start to move outward.

3



As the companion spirals in, it ejects the envelope, mostly in the orbital plane. The companion merges with the core.

7



The bubble of ejecta grows, approaching the inner edge of the disk.

4



A fast wind from the core interacts with the torus around it, forming a ring of denser material.

Bipolar outflows of gas

8



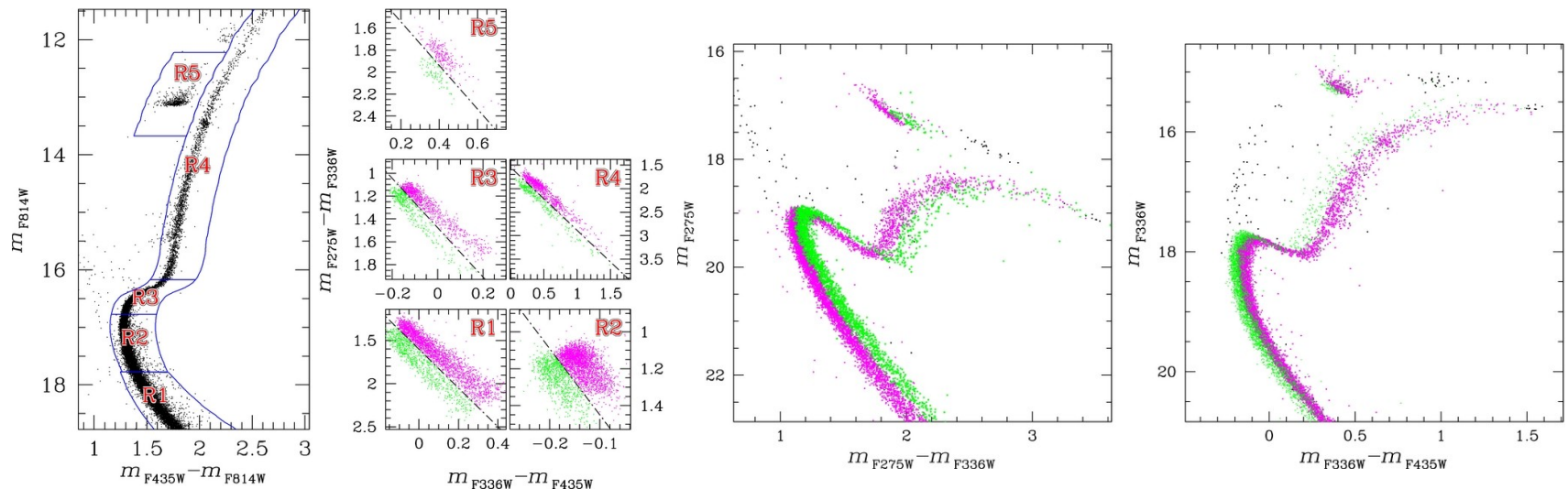
The ejecta strike and shock the inner ring at an increasing number of spots, which light up on impact.

# Csillaghalmazok további 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.

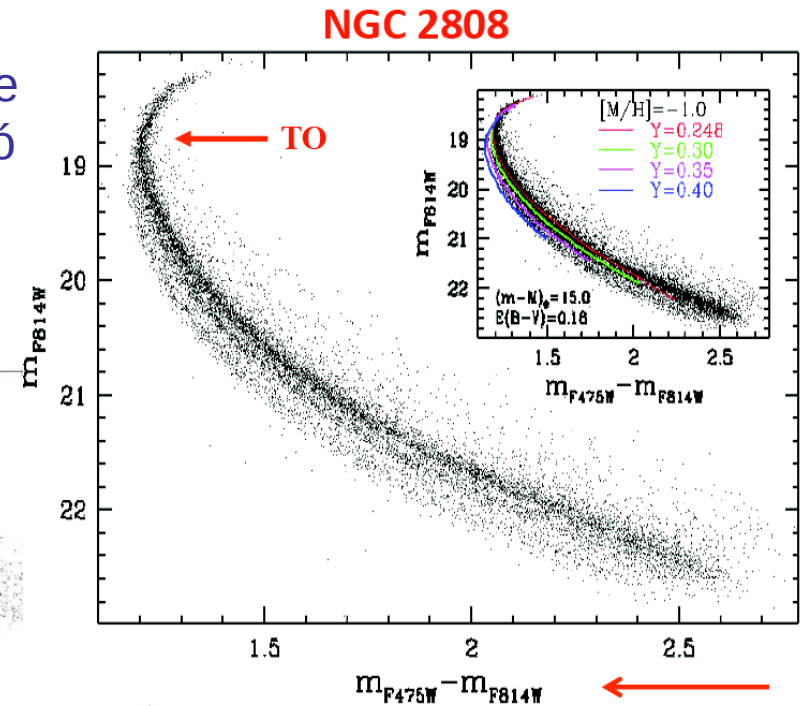
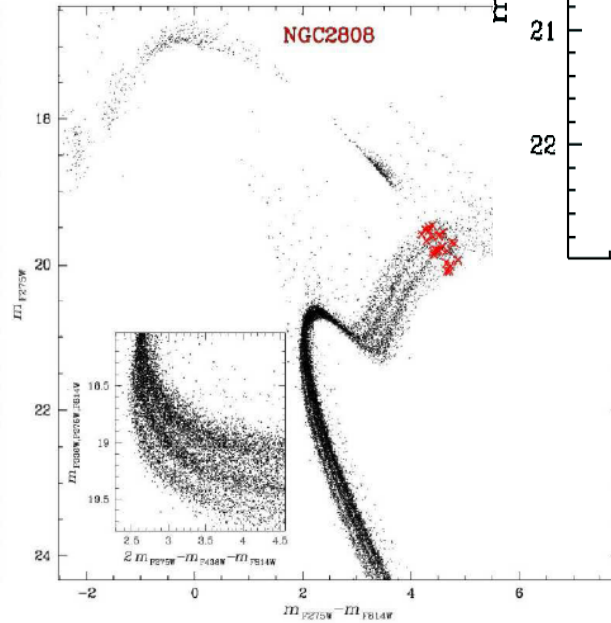
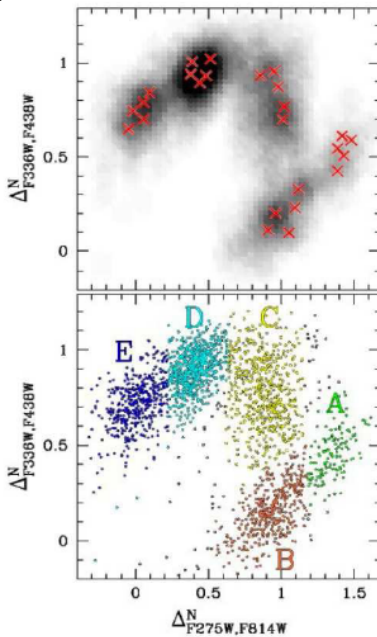
Kétkomponensű fősorozatot már korábban is találtak más gömbhalmazoknál, de ez az első kinematikai alátámasztása a szín-fényesség diagramon.





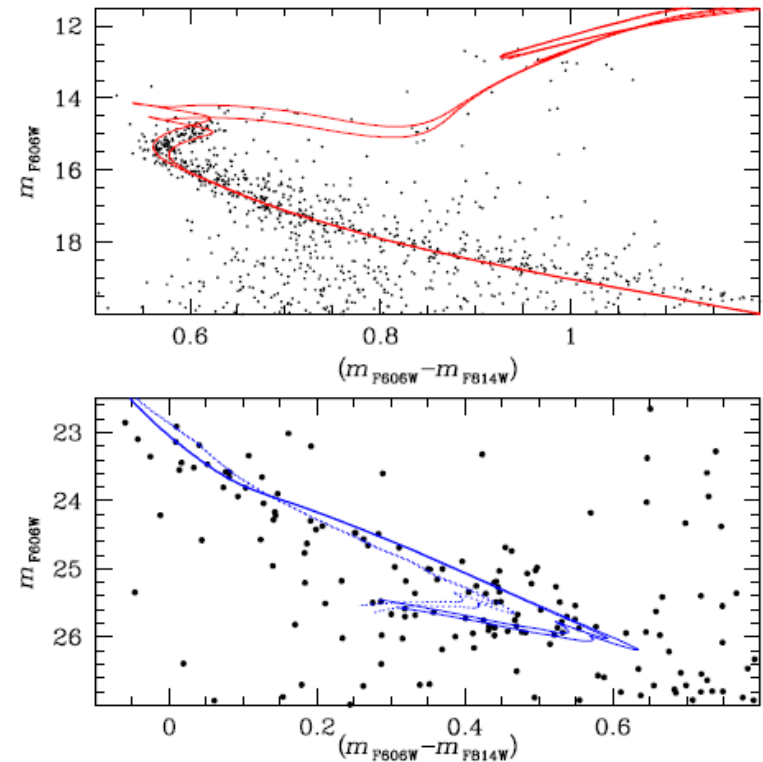
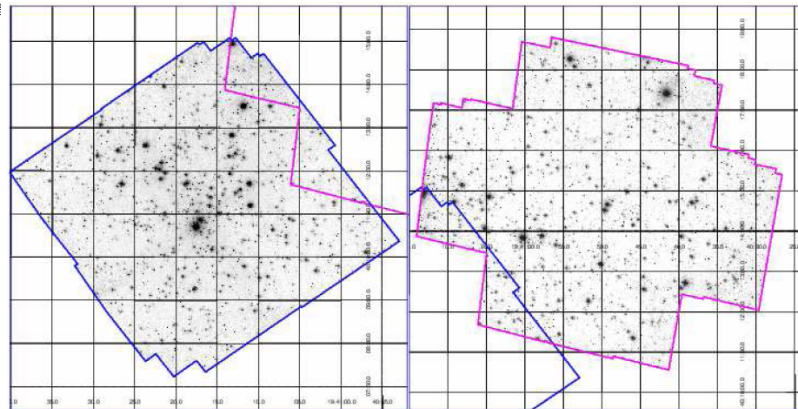
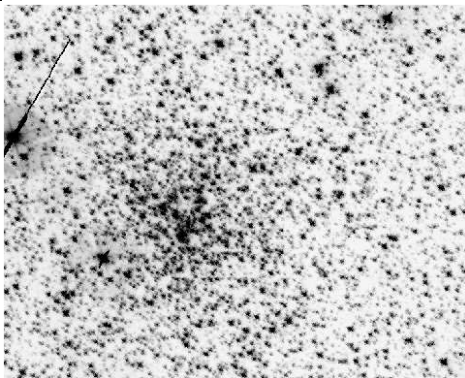
# Csillaghalmazok szín-fényesség diagramja

NGC 2808: az átlagosnál nagyobb tömegű gömbhalmaz (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.



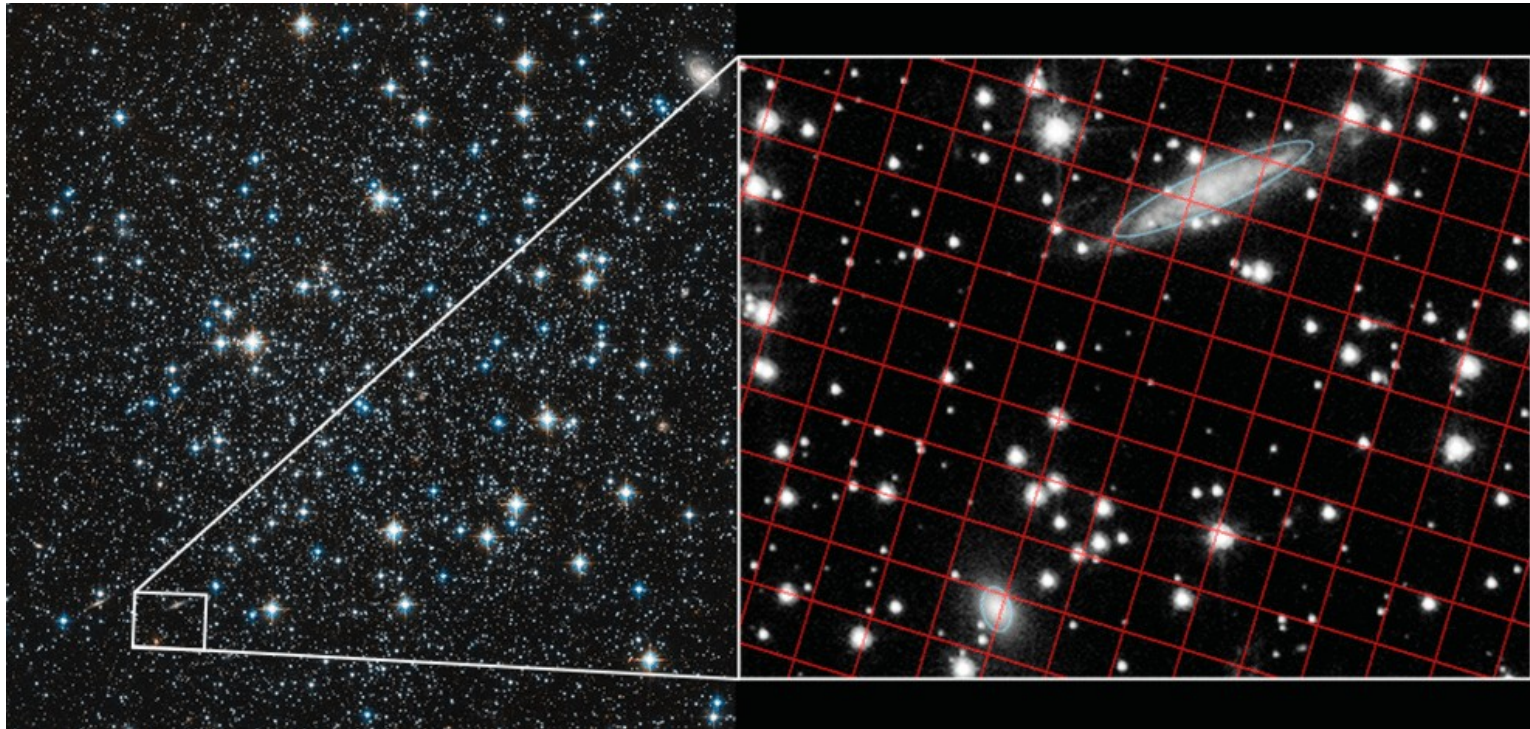
**Figure 3.** (Upper panel:) Fit of theoretical isochrones [1.95 Gyr,  $(m - M)_0 = 11.99$ ,  $E(B - V) = 0.18$  and 2.55 Gyr,  $(m - M)_0 = 11.77$ ,  $E(B - V) = 0.16$ ] to the cluster MS in the  $m_{F606W} - (m_{F606W} - m_{F814W})$  CMD (see text for details). (Lower panel:) Fit of WD isochrones to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

# 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).

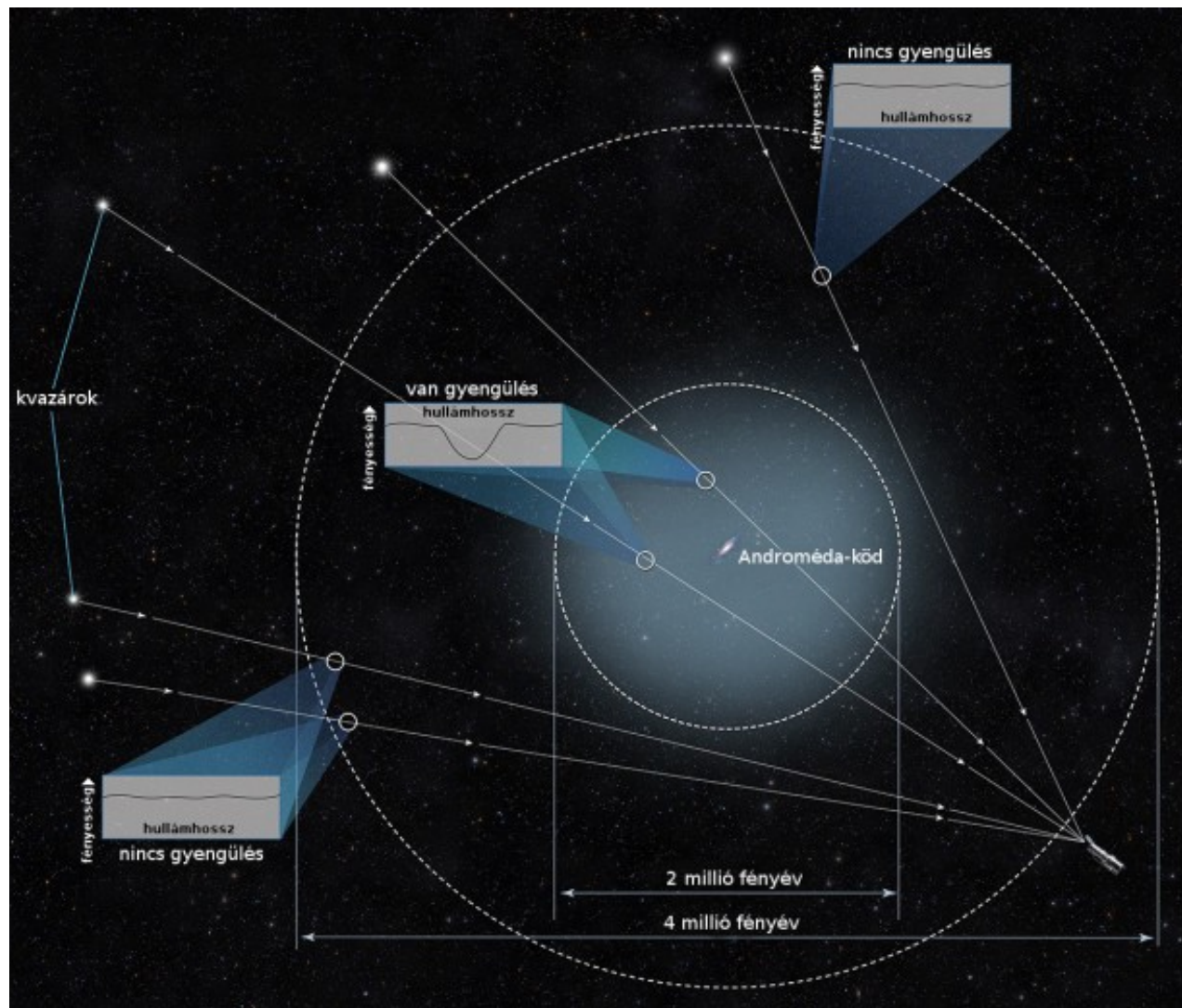


# A sötét anyag nyomában

Az M31 halója háttérbeli 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.



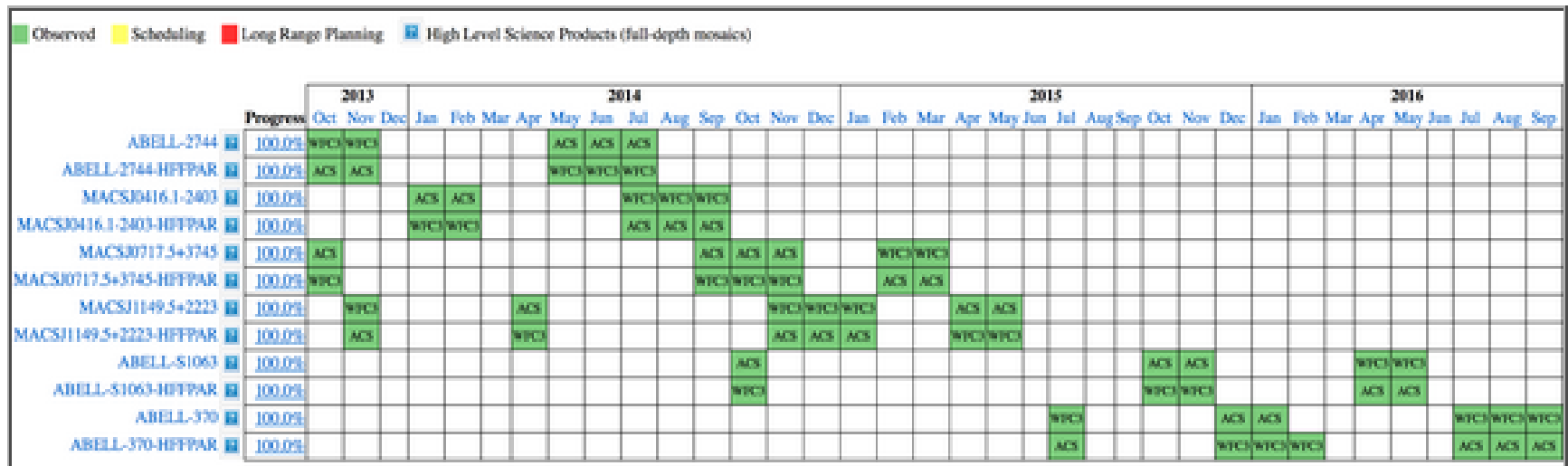
# A sötét anyag nyomában

A **HST Frontier Fields** projektje keretében a gravitációs-lencse-hatás alapján hat erősen lencséző 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 lencséző 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)

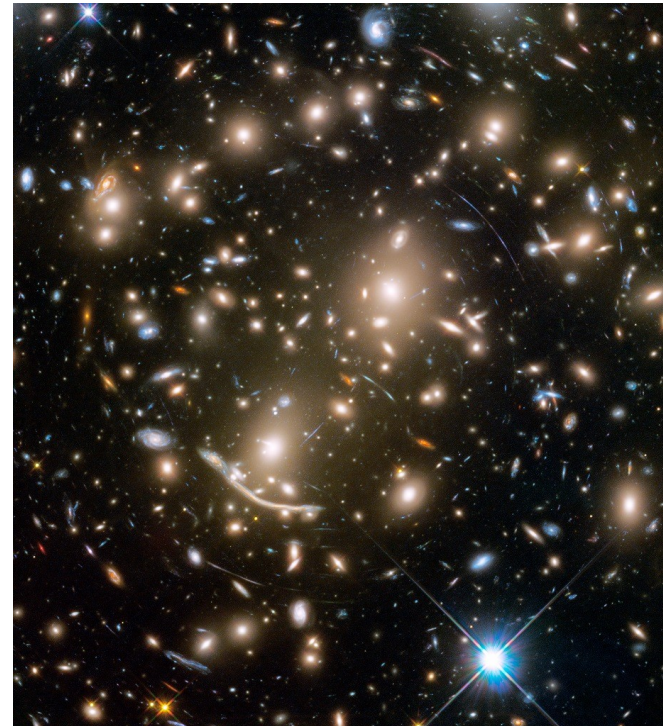


# A sötét anyag nyomában

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 galaxishalmaz gravitációs lencse-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).

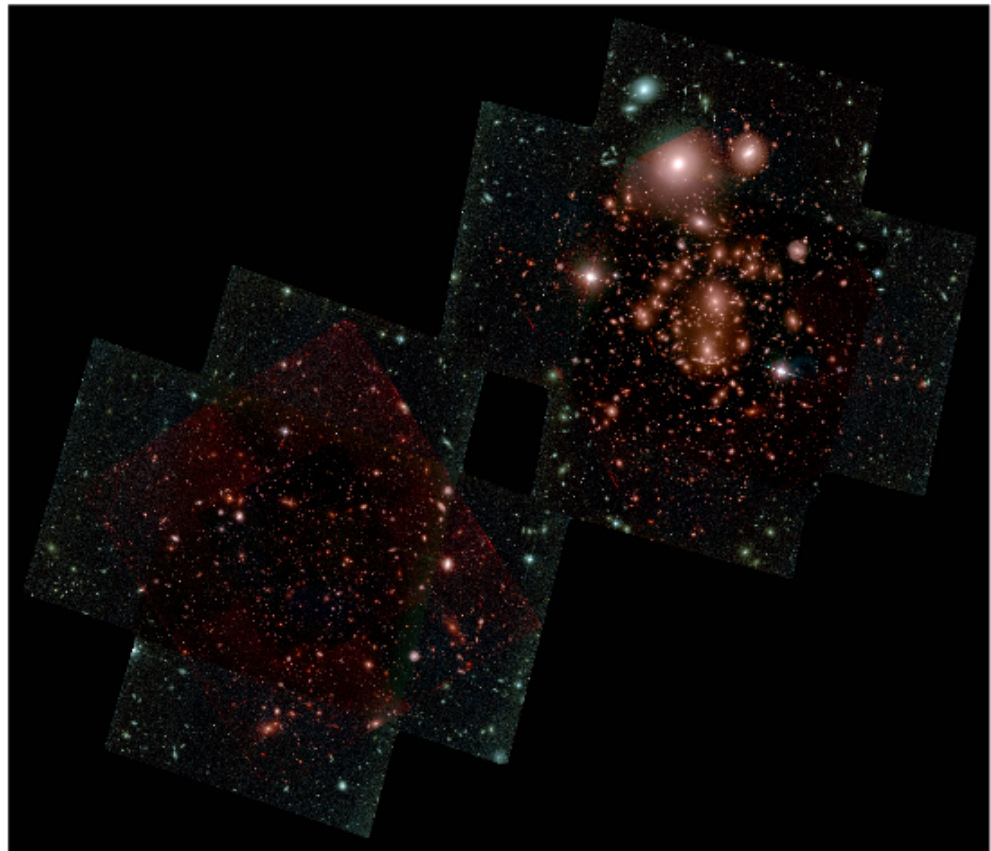
A WFC3 és ACS műszerekkel a Frontier Fields 6 galaxishalmazát és az azokkal szomszédos mezőt vizsgálták.

A projekt célja:

a gravitációs-lencse-hatással az egyébként láthatatlan távoli galaxisok észlelése, 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

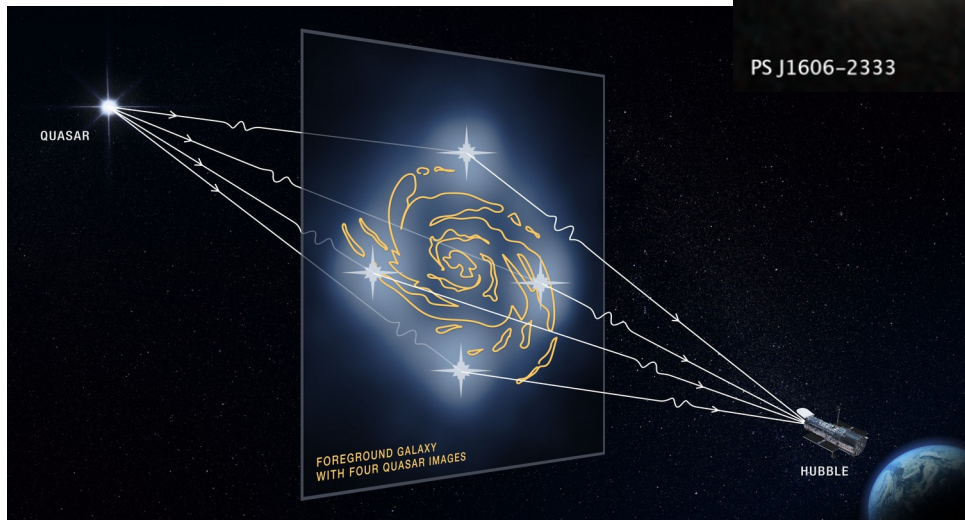
**Table 1.** BUFFALO/Hubble Frontier Fields Clusters and Flanking Fields

Field	Center (J2000)	Flanking Field Center (J2000)	BUFFALO <i>HST</i> WFC3 and ACS Observing Schedule					
Abell 370	02:39:52.9 -01:34:36.5	02:40:13.4 01:37:32.8	Field	Visit Numbers	Main Cluster	Parallel Field	Epoch 1	Epoch 2
MACS J0717.5+3745	07:17:34.0 +37:44:49.0	07:17:17.0 +37:49:47.3	Abell 370	6A-6H	WFC3	ACS	2018 Jul 21-22	2018 Aug 21
MACS J0416.1-2403	04:16:08.9 -24:04:28.7	04:16:33.1 -24:06:48.7		6L-6P	ACS	WFC3	2018 Dec 19	2019 Jan 7
Abell S1063	22:48:44.4 -44:31:48.5	22:49:17.7 -44:32:43.8	MACS J0717.5+3745	3I-3P	ACS	WFC3	2018 Oct 2-3	2018 Nov 22
Abell 2744	00:14:21.2 -30:23:50.1	00:13:53.6 -30:22:54.3		3A-3H	WFC3	ACS	2019 Feb 18	2019 Apr 1
MACS J1149.5+2223	11:49:36.3 +22:23:58.1	11:49:40.5 +22:18:02.3	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



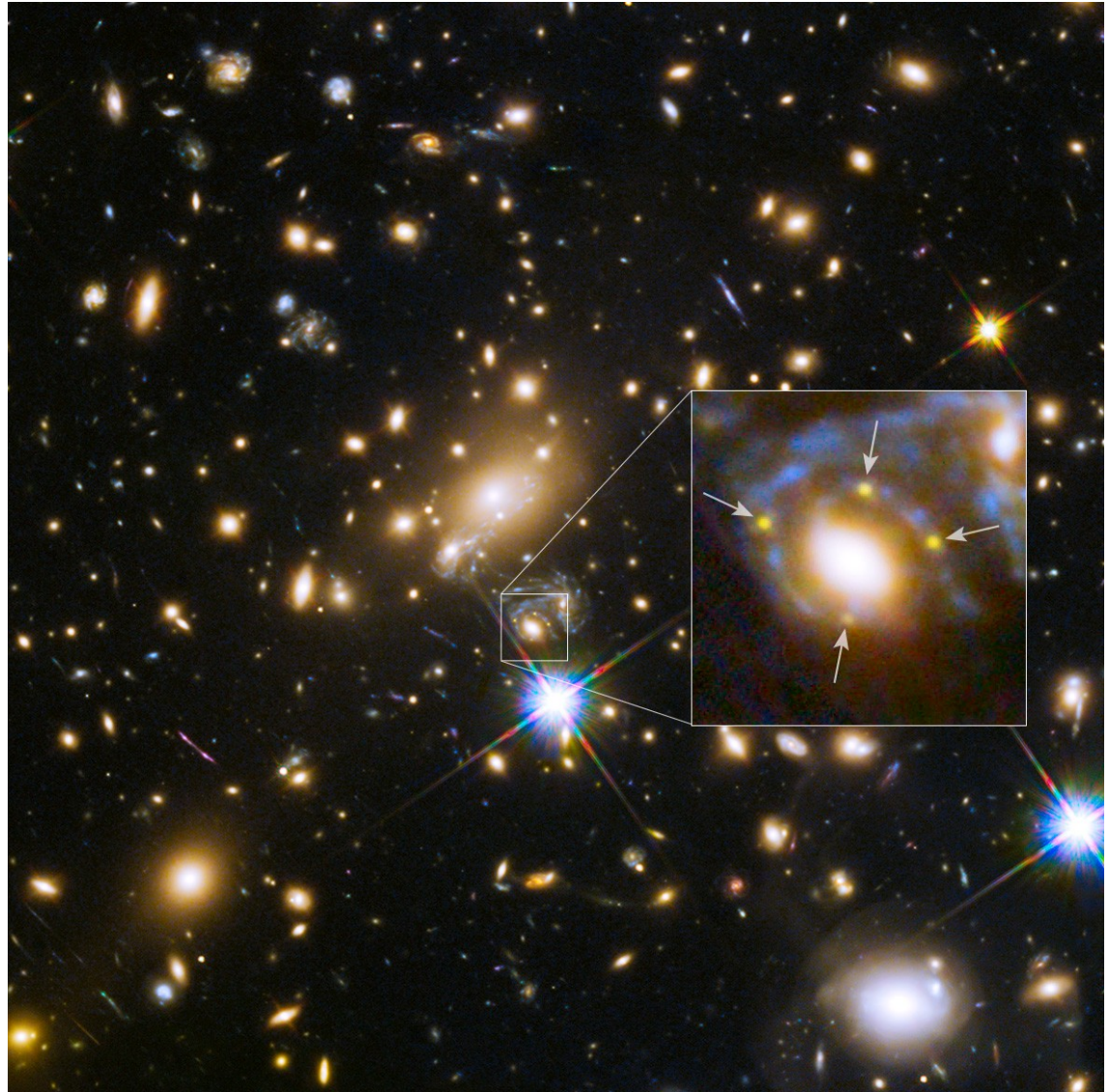
# Gravitációs lencse-hatás

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



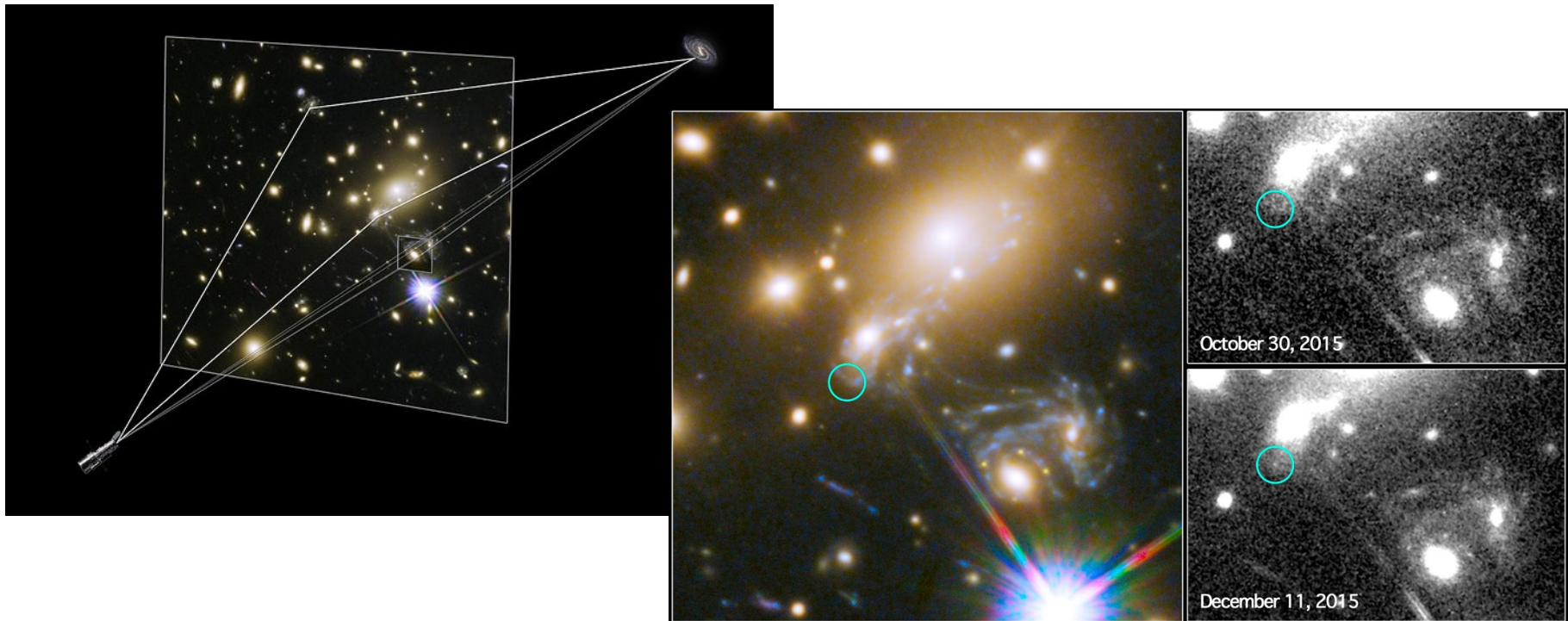
# Gravitációslencse-hatás

Távoli szupernóva  
4 példányban



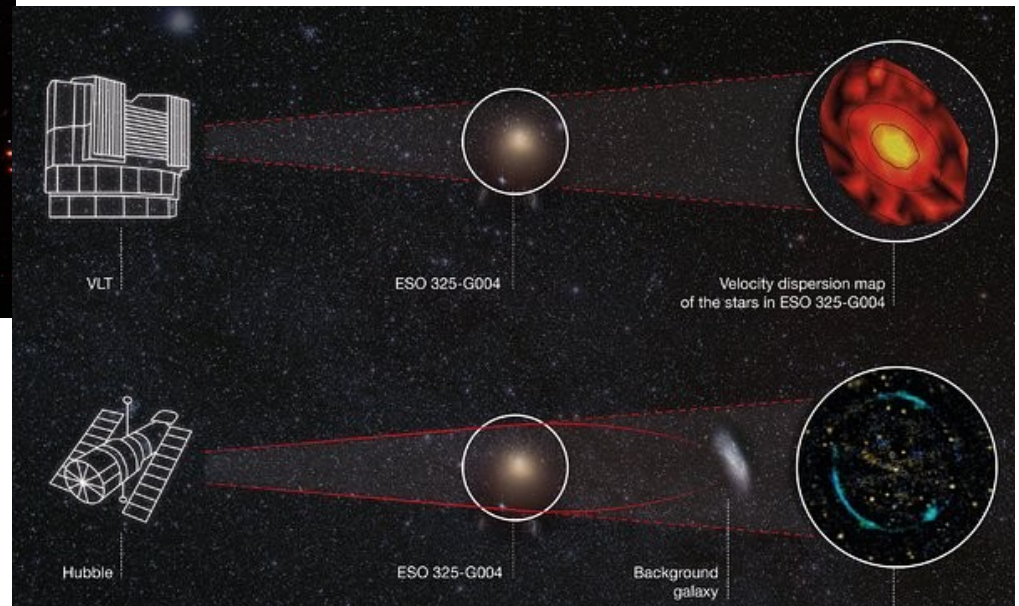
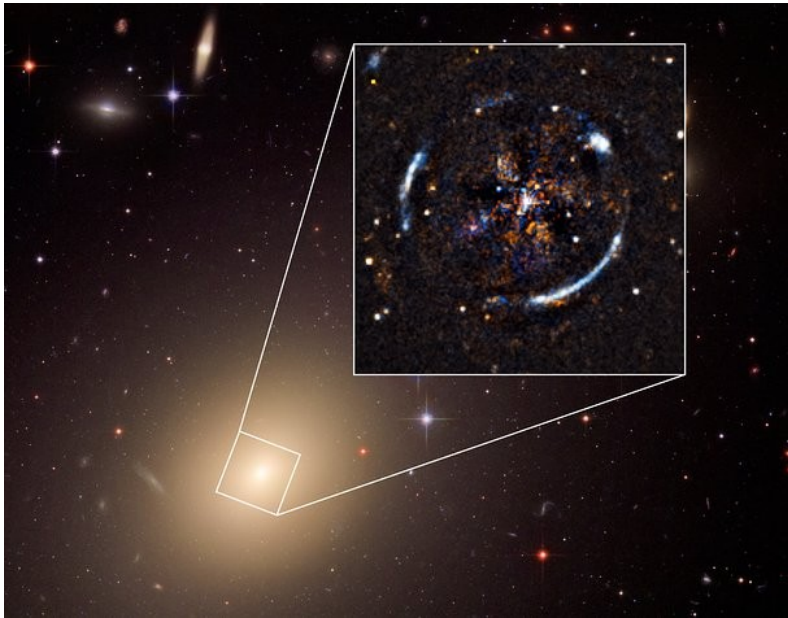
# Szupernóva-robbanás „megrendelésre”

**SN Refsdal:** Refsdal javasolta 1964-ben, hogy az univerzum tágulását gravitációsan lencsézett szupernóvák időképsével 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.



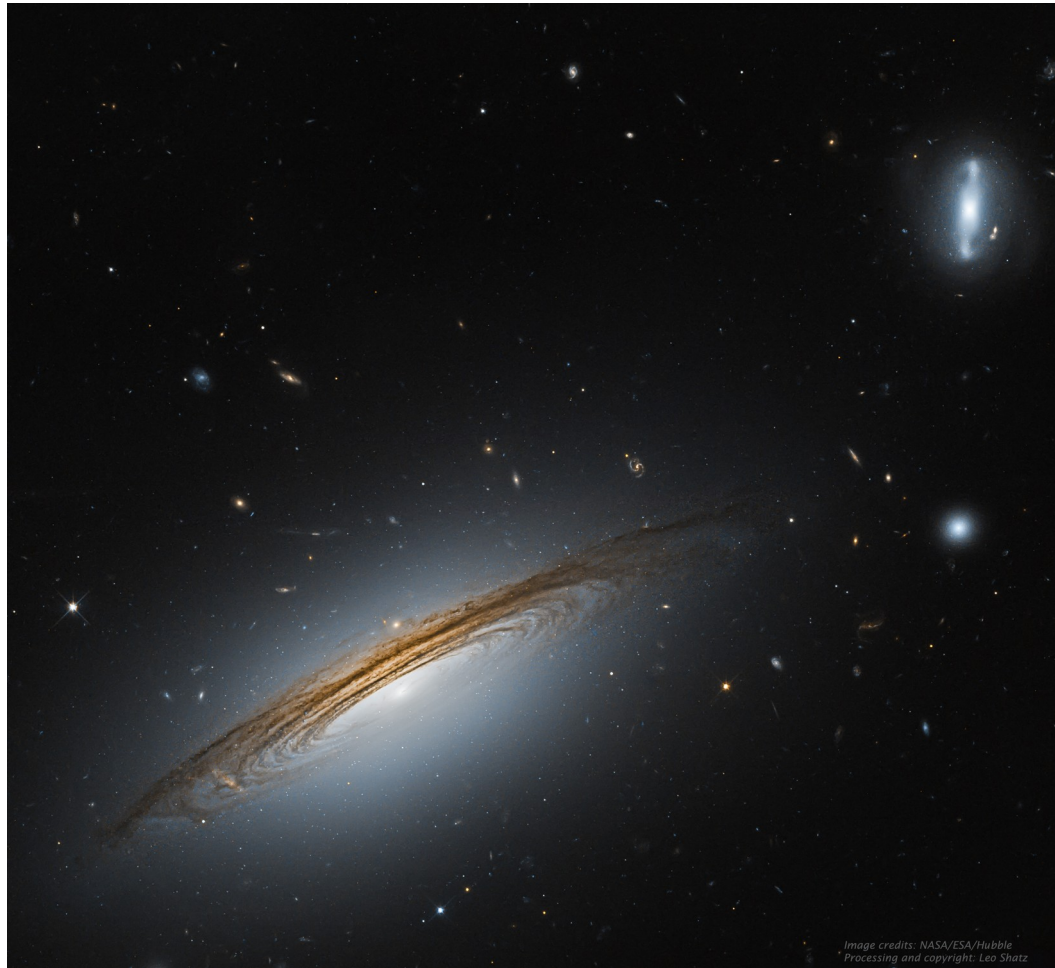
# Einstein elméletének igazolása a HST-vel

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



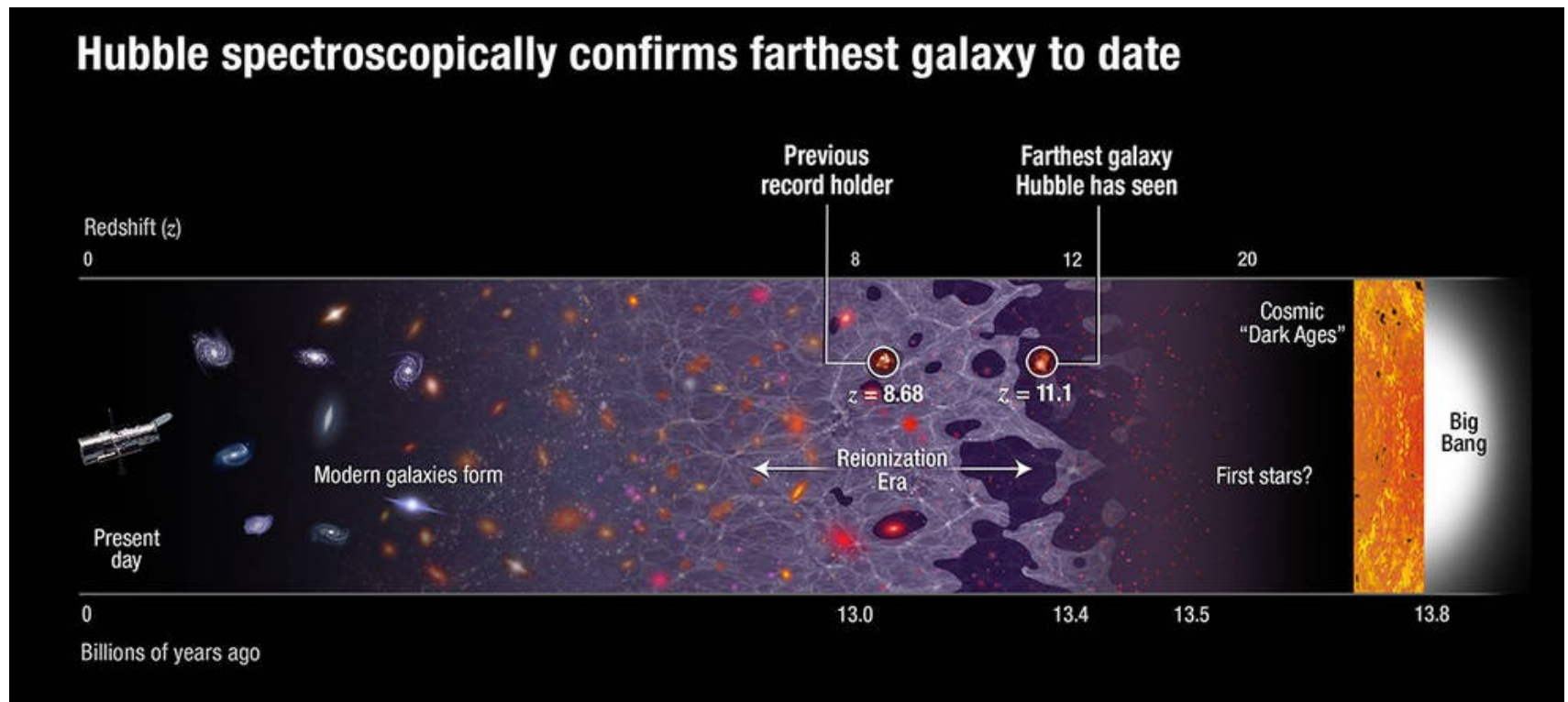
# A leggyorsabban forgó galaxis

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



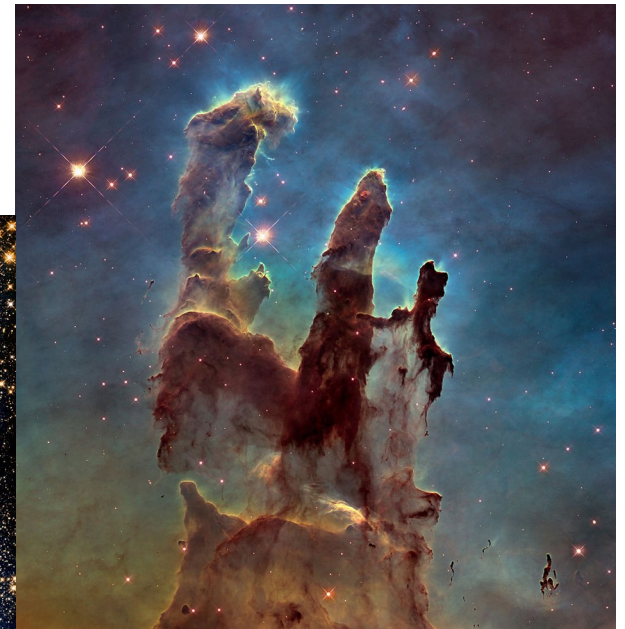
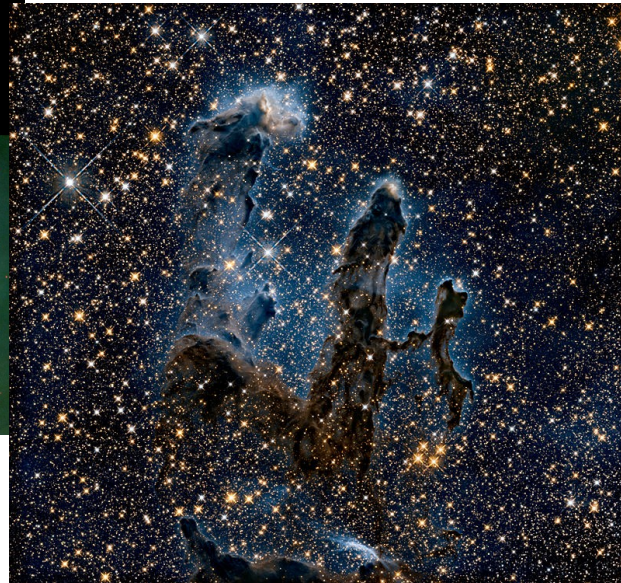
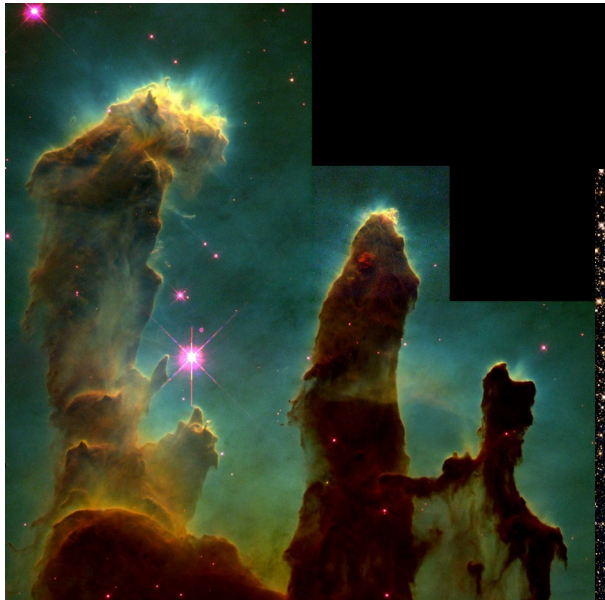
# A legtávolabbi ismert galaxis

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 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 és utódja

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 végezhető észlelések.

A HST utódja a NASA, az ESA és a Kanadai Űrügynökség (CSA) James Webb-űrtávcsöve. Főtükre 6,5 m átmérőjű, de eredetileg (1996-ban) nyolcméterest akartak: NGST (New Generation Space Telescope). 2002-ben nevezték át JWST-re (James E. Webb a NASA egyik vezetője volt az Apollo-program idején).

Ha a JWST működni kezd, nem állítják le a HST-vel végzendő észleléseket.

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, amelyekkel visszahozzák a Földre, ha ezen megoldás mellett döntenek.

Ugyanakkor vannak olyan hangok, hogy újabb szervizküldetést kell előkészíteni és végrehajtani, ezúttal kereskedelmi célú űrrakéta igénybevételével és robot üzemmódban.



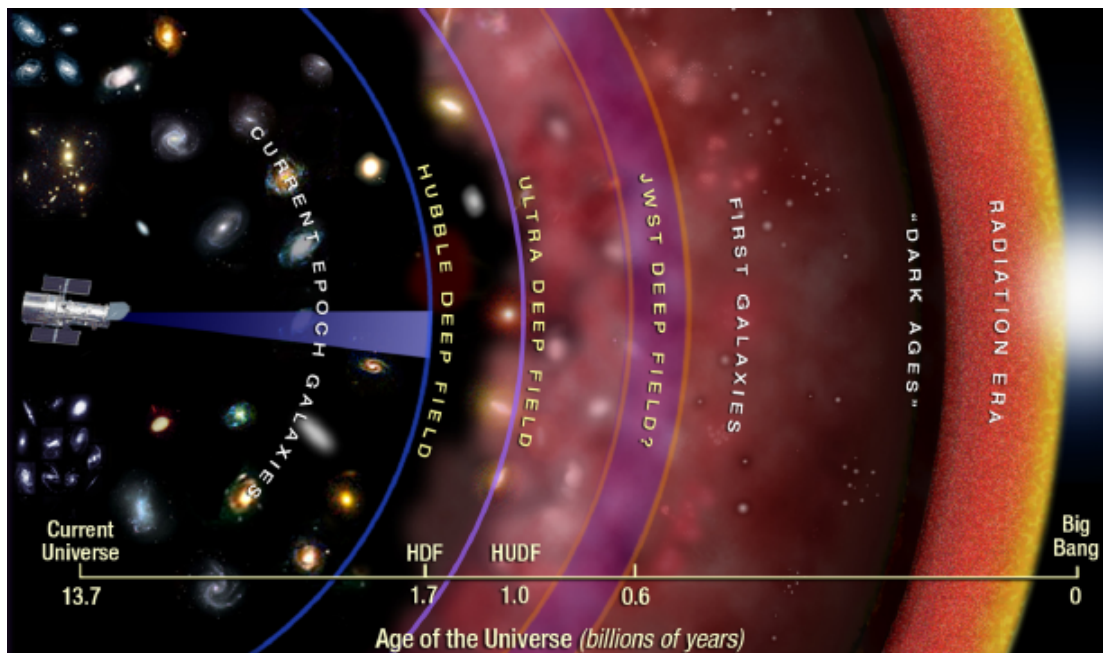
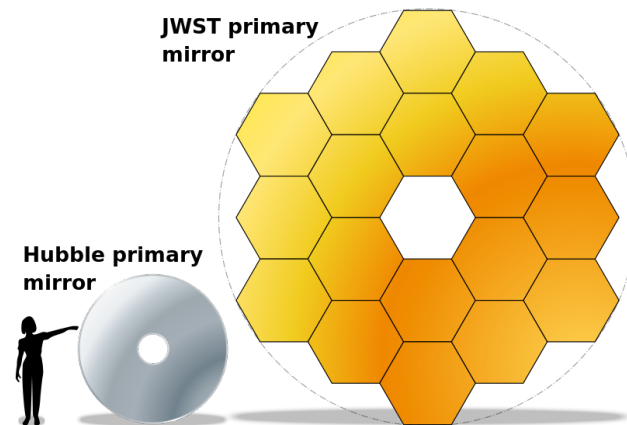
# A James Webb-űrtávcső

.A HST utódja a JWST: James Webb-űrtávcső, a Nap–Föld rendszer L2 librációs pontja köré telepítve, és csak IR-ben észlel majd. Indítását most 2021-re tervezik.

Ha működni kezd, az nem jelenti a HST kikapcsolását. A küldetés időtartama legalább 5 év, de 10 évre is hosszabbítható.

Indítás: az ESA Ariane–5 rakétájával.

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



# A JWST eddigi kronológiája

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

