

ŰRCSILLAGÁSZAT

A HUBBLE-ŰRTÁVCSŐ

Összeállította: Szabados László

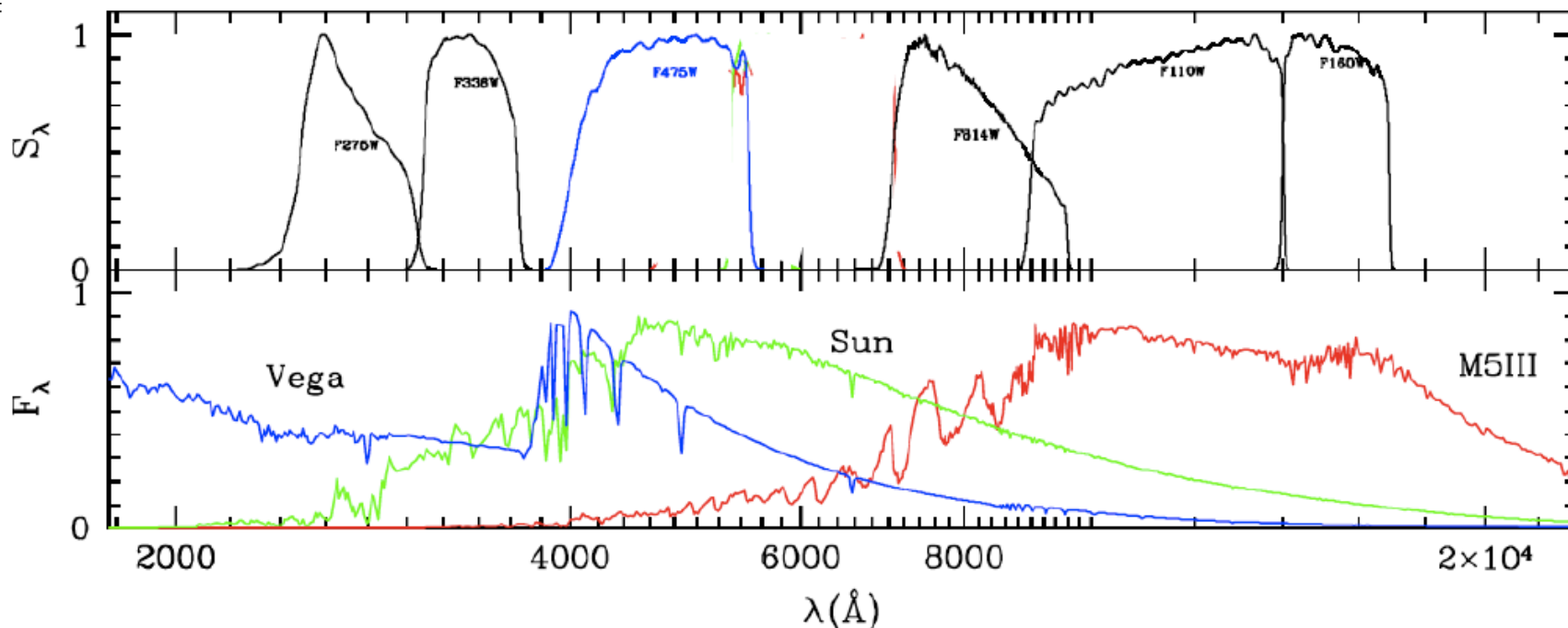
Szegedi Tudományegyetem
2019

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 milliót meghaladó felvétel több mint 40000 célpontból + a helyzetérzékelő (FGS) fotometriája. Naponta 15 Gbyte adat.



A HST főbb jellemzői

Moduláris rendszerű (a műszerekről később).

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- α , 121,6 nm is!); 2-3 nagyságrenddel érzékenyebb az IUE-nél.

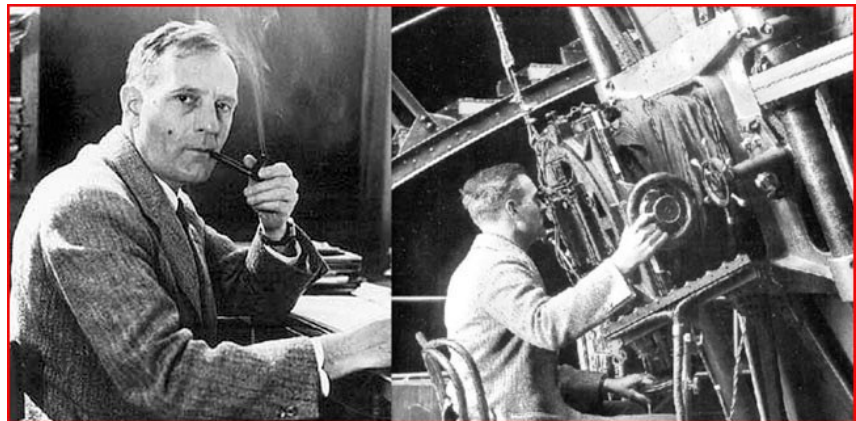
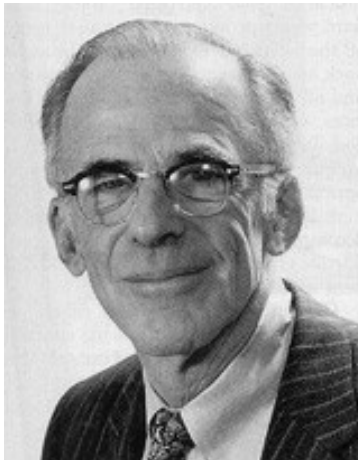
Nem egy konkrét kutatási feladatra ($\leftrightarrow$ COBE, WMAP), ezért **univerzális:**

- Új felfedezések (pl. proplid);
- 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.



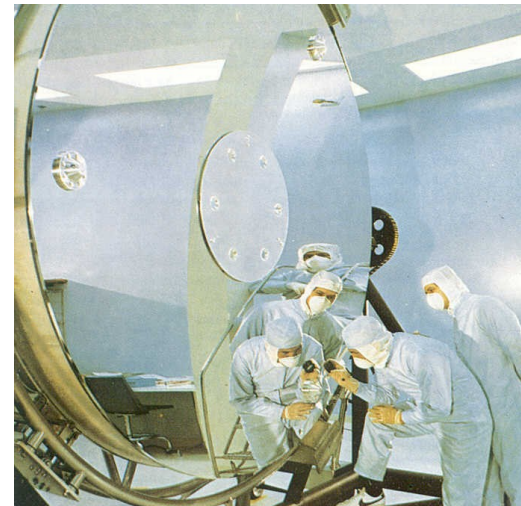
A HST tükrének elkészítése

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

A PerkinElmer csúszott a határidővel, és emelte az árat. 1981 végére lett kész a tükrök + 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, MD): 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.

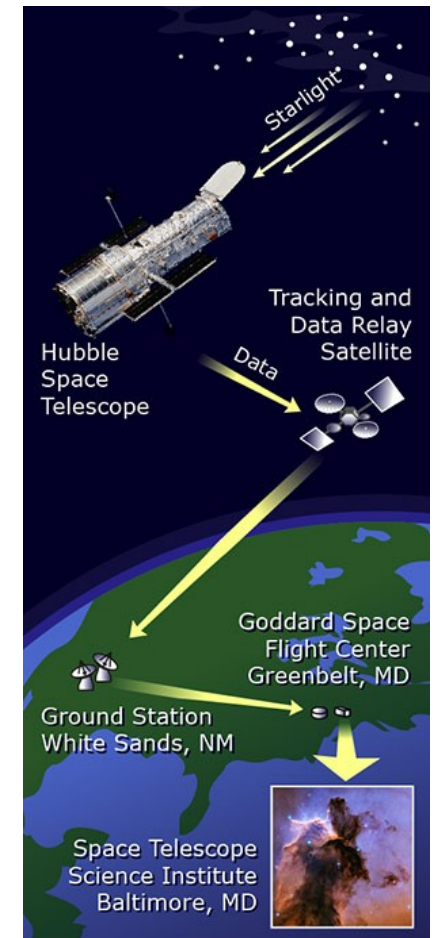
Műszaki irányítás: NASA GSFC, 50 km-re az STScI-től, 6 óránként váltó 4 csoporttal.

1984: ST-ECF (Garching) megalakul (2011-től az ESAC [Vilspa] veszi át a szerepét).

1986. jan.: Challenger-katasztrófa – újabb késés.

1990. ápr. 24–25.: LEO-pályára helyezés.

Költsége: 400 M USD helyett 4700 M USD + a folyamatos üzemeltetés (2006-ig 5-6 milliárd USD + 500 M EUR).



A HST kezdeti műszerei

Axiális műszerek:

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

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

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

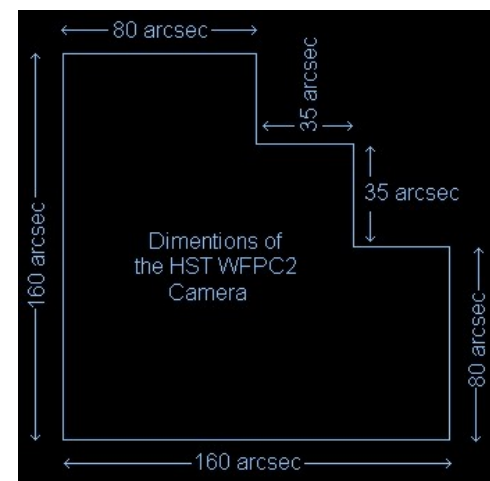
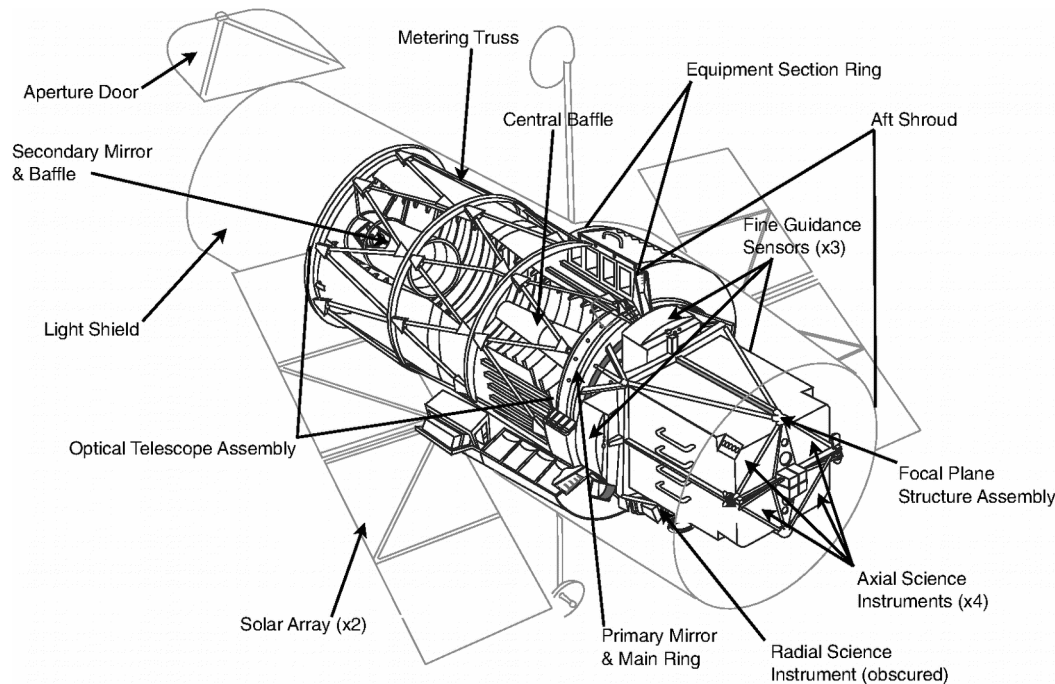
FOS: 115-800 nm, asztrofizikai források spektroszkópiája

A két spektrográf és a FOC érzékelője digicon képerősítő.

Radiális műszerek:

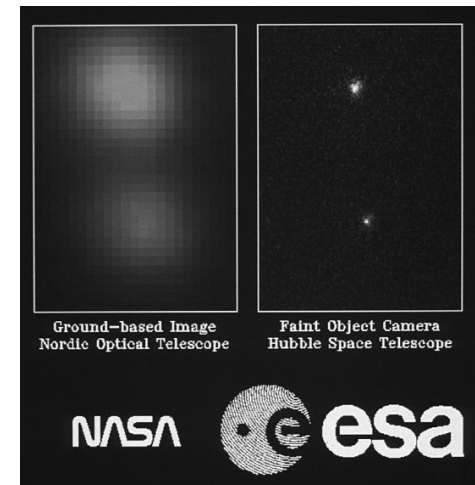
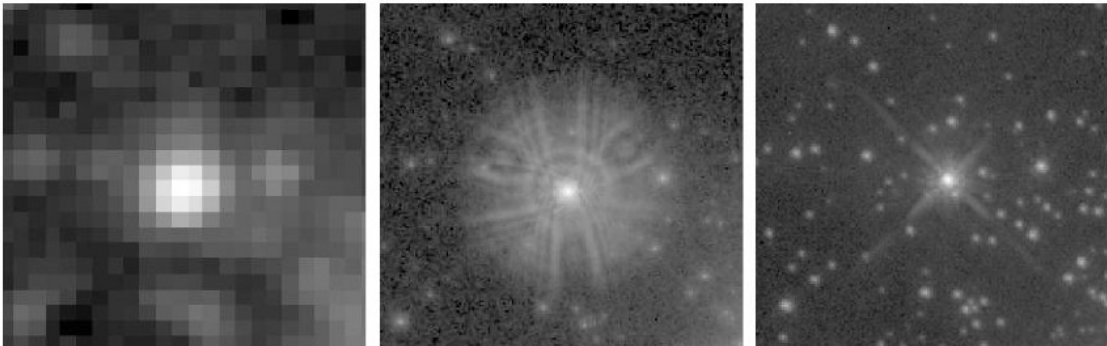
WFPC: Ly- α és 1,1 μ m között érzékeny, 48 szűrővel; 8 db 800 $\times$ 800 CCD (4 bolygókhoz, 0,046"/px, 4 nagy látószögű, 0,092"/px)

+ 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).

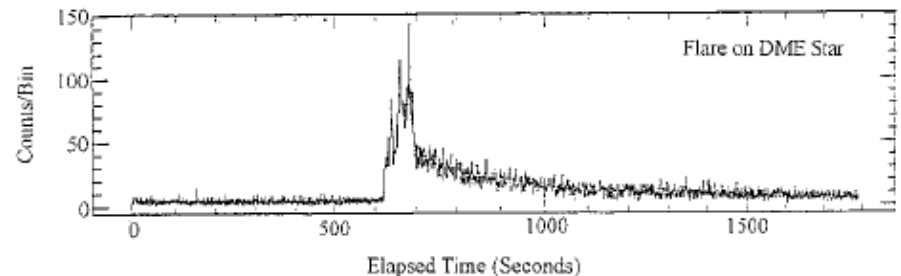
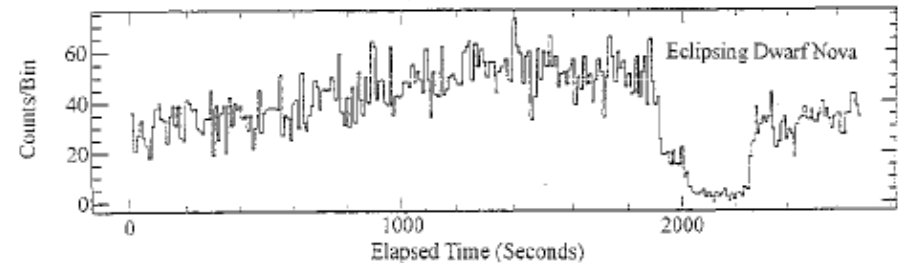
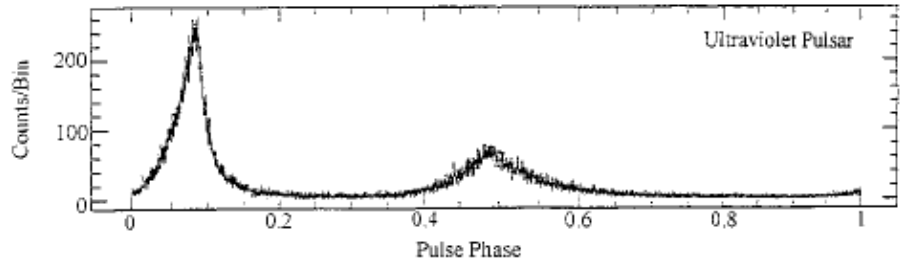
Megoldás: új optikai rendszer behelyezése a fényútba, ellenkező irányú szferikus aberrációval.

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 korrigálja az aberrációt.

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

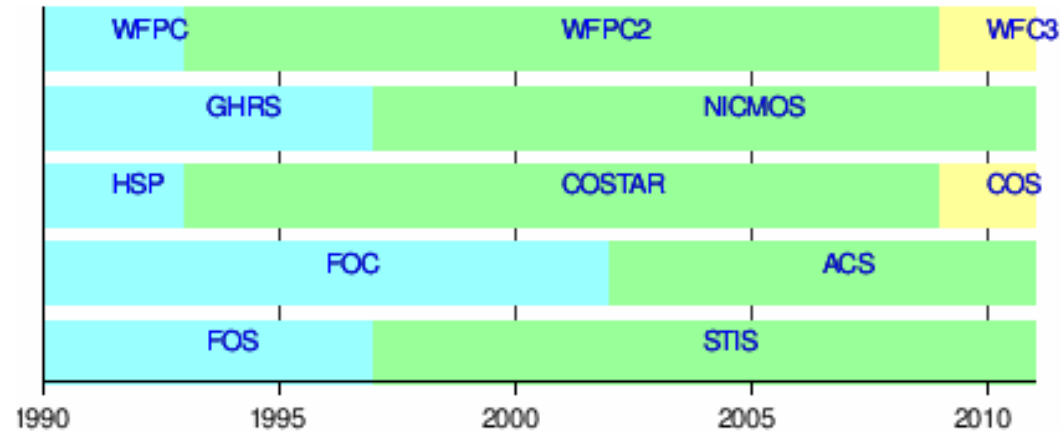
Samples of HSP Photometry



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

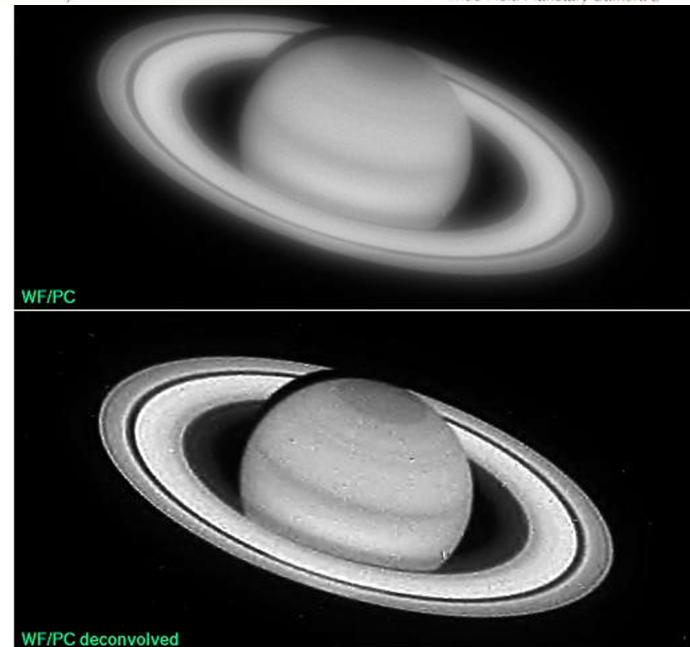
Az M100 spirálgalaxis közvetlenül a HST indítása után készített képen (WFPC, 1990) és az első szerviz után, a WFPC2-vel 1993-ban készített felvételen (a felső képpáron).

A Szaturnusz WFPC-vel készített felvétele (az alsó képpár felső képe), illetve a nyers kép dekonvolúciós eljárással végzett javítása után előállt felvétel (az alsó felvételpár alsó képe).



Wide Field Planetary Camera 1

Wide Field Planetary Camera 2



2. szerviz

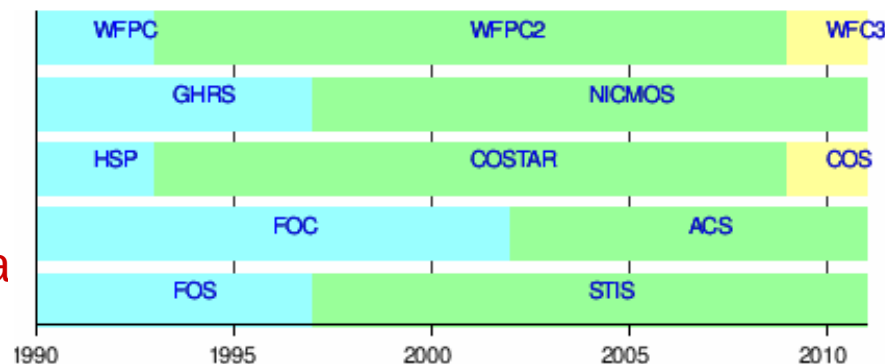
SM-2 (1997. febr. 11–21.):

- GHRS és FOS helyett STIS és NICMOS;
- szalagos magnetofonok cseréje szilárdtest-rögzítésűekre;
- a hőszigetelés sérülésének javítása
- a pályamagasság helyreállítása.

STIS (Space Telescope Imaging

Spectrograph): leképezés + spektroszkópia, 115-1100 nm között; CCD-üzem módban 0,05"/px, Cs₂Te 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 μ 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 N. De a hőtágulás miatt a hűtőtartály hozzáért más alkatrészhez, folyamatos melegítéshez vezetve. 4,5 év helyett akkor csak 2 évig lehetett használni.



3. szerviz

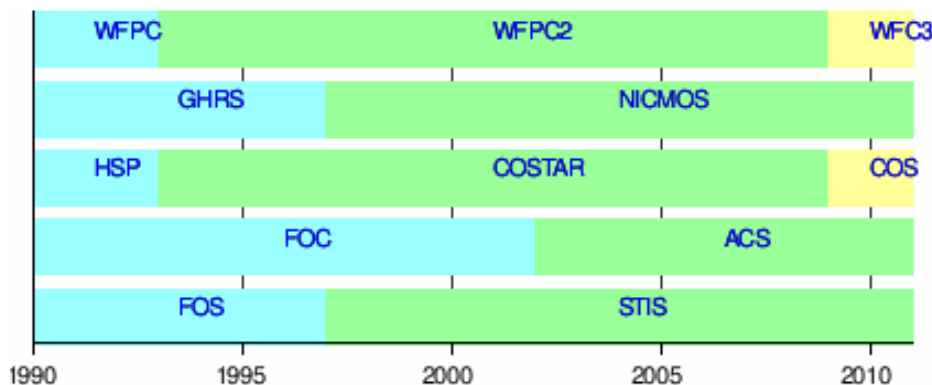
Két alkalomra bontották, amikor a 6 giroszkóp közül már 3 tönkrement (sőt a karbantartásig még egy 4. is).

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.):

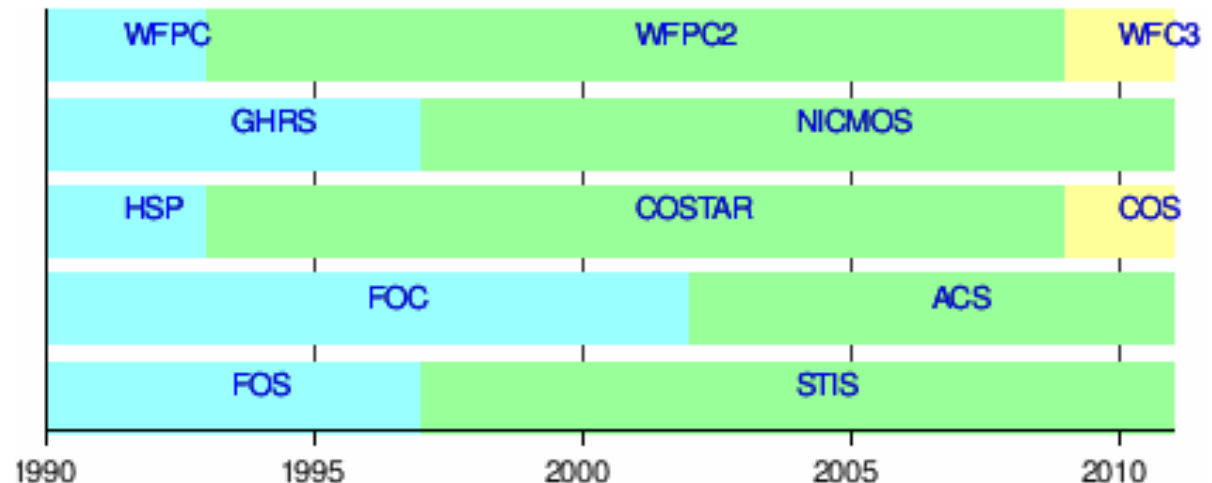
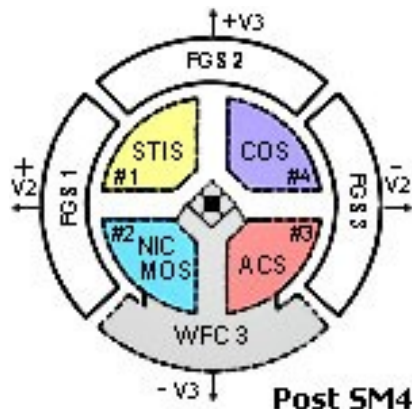
- FOC helyett ACS (Advanced Camera for Surveys, korszerű felmérőkamera, az optikaitól távoli UV-ig érzékeny), már 21. századi technika; 2007 elején elromlott az elektronikája;
- a NICMOS újraélesztése (új hűtés, de nem az eredeti hőmérsékletig);
- a napelemek ismételt cseréje (kisebbre, hogy gyengébben 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)



4. szerviz: deklaráltan az utolsó

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- α -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

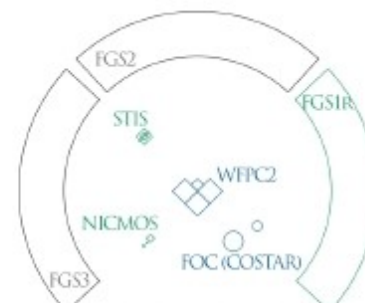
High Speed Photometer
Wide-Field/Planetary Camera
Faint Object Camera
Faint Object Spectrograph
Goddard High Resolution Spectrograph
Fine Guidance Sensors (3)



Servicing Mission 1, December 1993

1994-1996

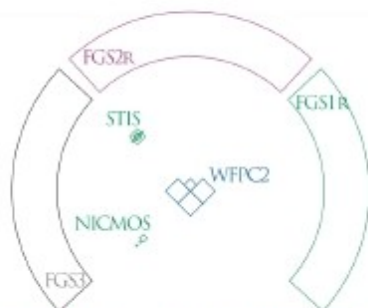
Corrective Optics ST Axial Replacement (COSTAR)
Wide-Field Planetary Camera 2
Replacement Redesigned Solar Arrays (SA2)
Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades



Servicing Mission 2, February 1997

1997-1999

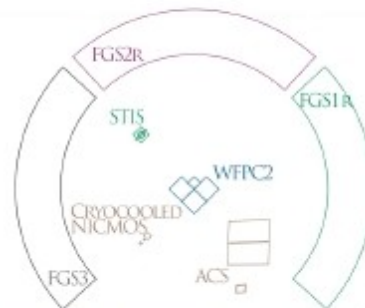
ST Imaging Spectrograph
Near-IR Camera & Multi-Object Spectrometer
Replacement Fine Guidance Sensor
Other Spacecraft Upgrades



Servicing Mission 3A, December 1999

2000-2001

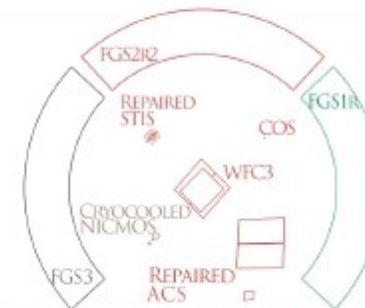
Replacement Fine Guidance Sensor
Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades



Servicing Mission 3B, March 2002

2002-2008

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

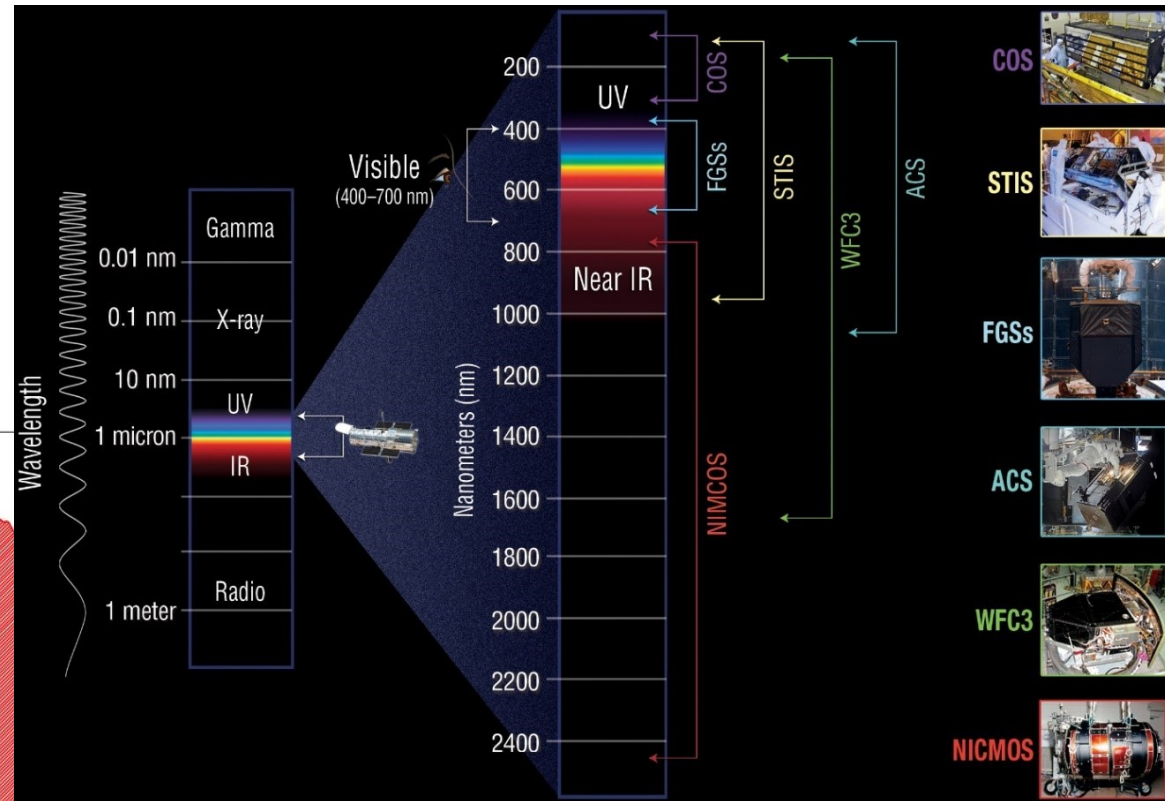
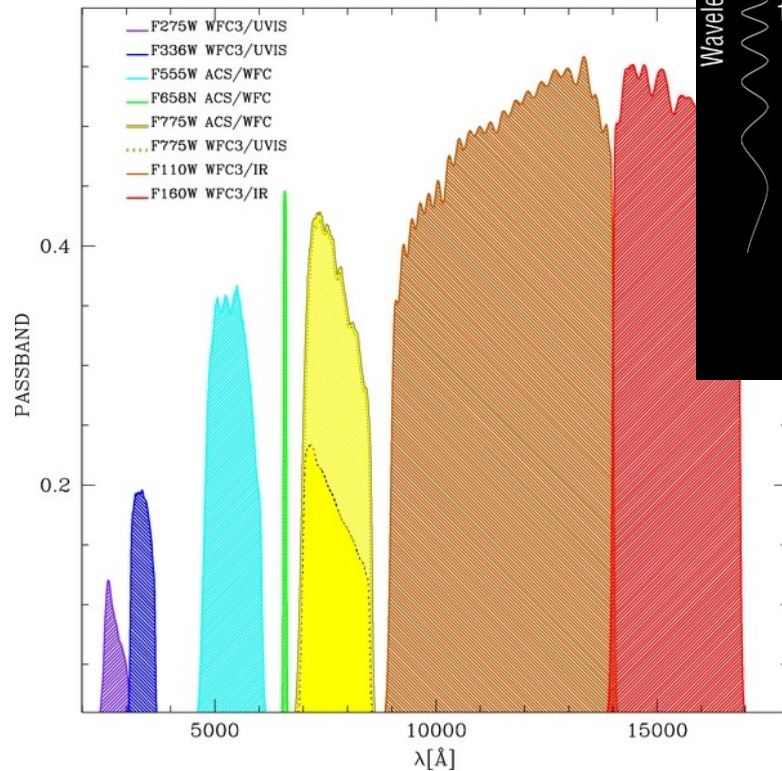


Servicing Mission 4, May 2009

2009-

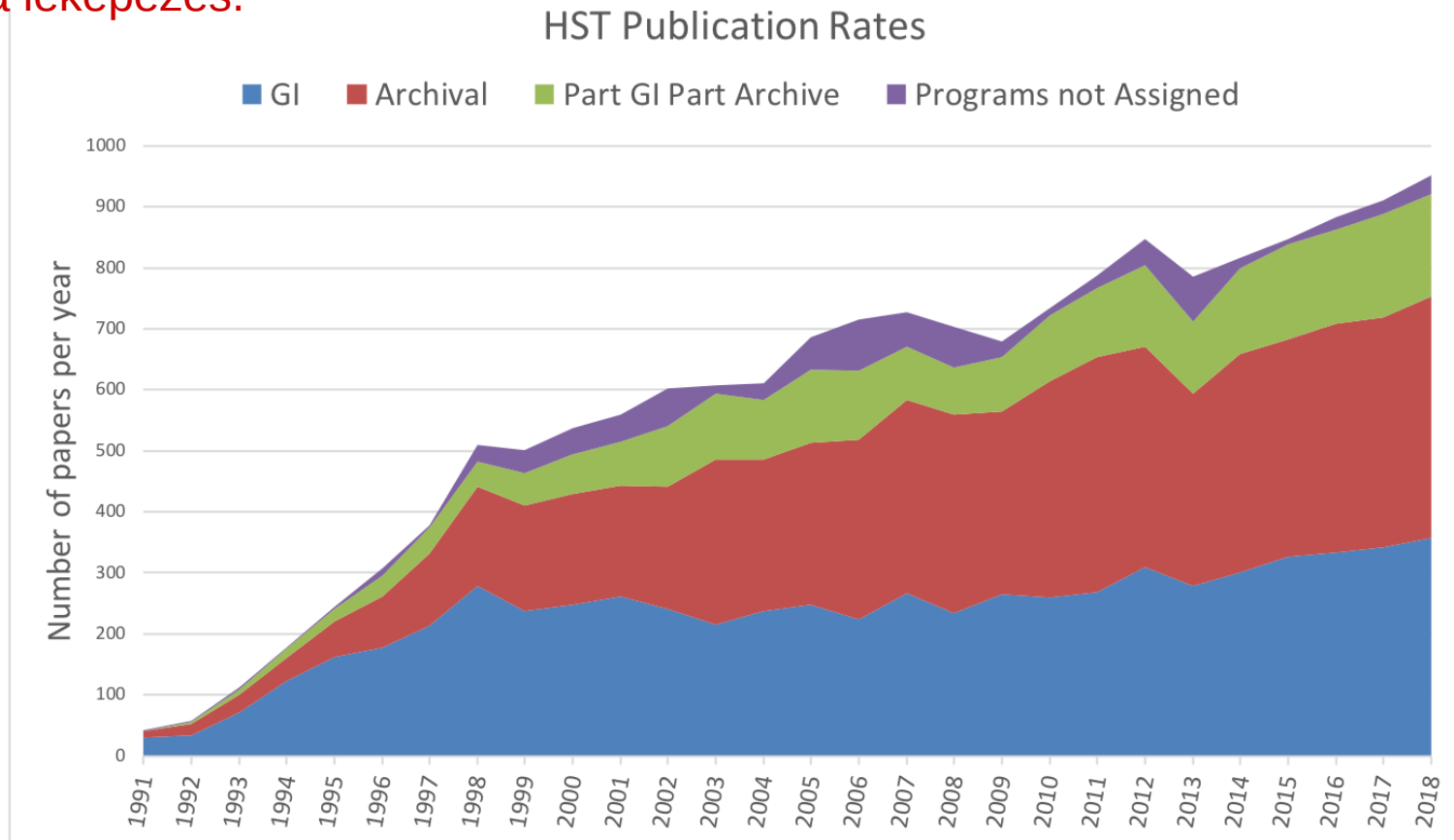
Wide Field Camera 3
Cosmic Origins Spectrograph
Replacement Fine Guidance Sensor
ACS repair
STIS repair
SI C&DH replacement
Batteries, Gyroscopes
Other Spacecraft Upgrades

A HST jelenlegi műszerezettsége



A szervizek után

2011-re 10000 fölé nőtt a HST adatain alapuló tudományos cikkek száma. Évek óta 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. Szükség van-e rá ilyen áron? Adaptív optikával csak az optikai tengely mentén jó a leképezés.



A publikációs statisztika összehasonlításban

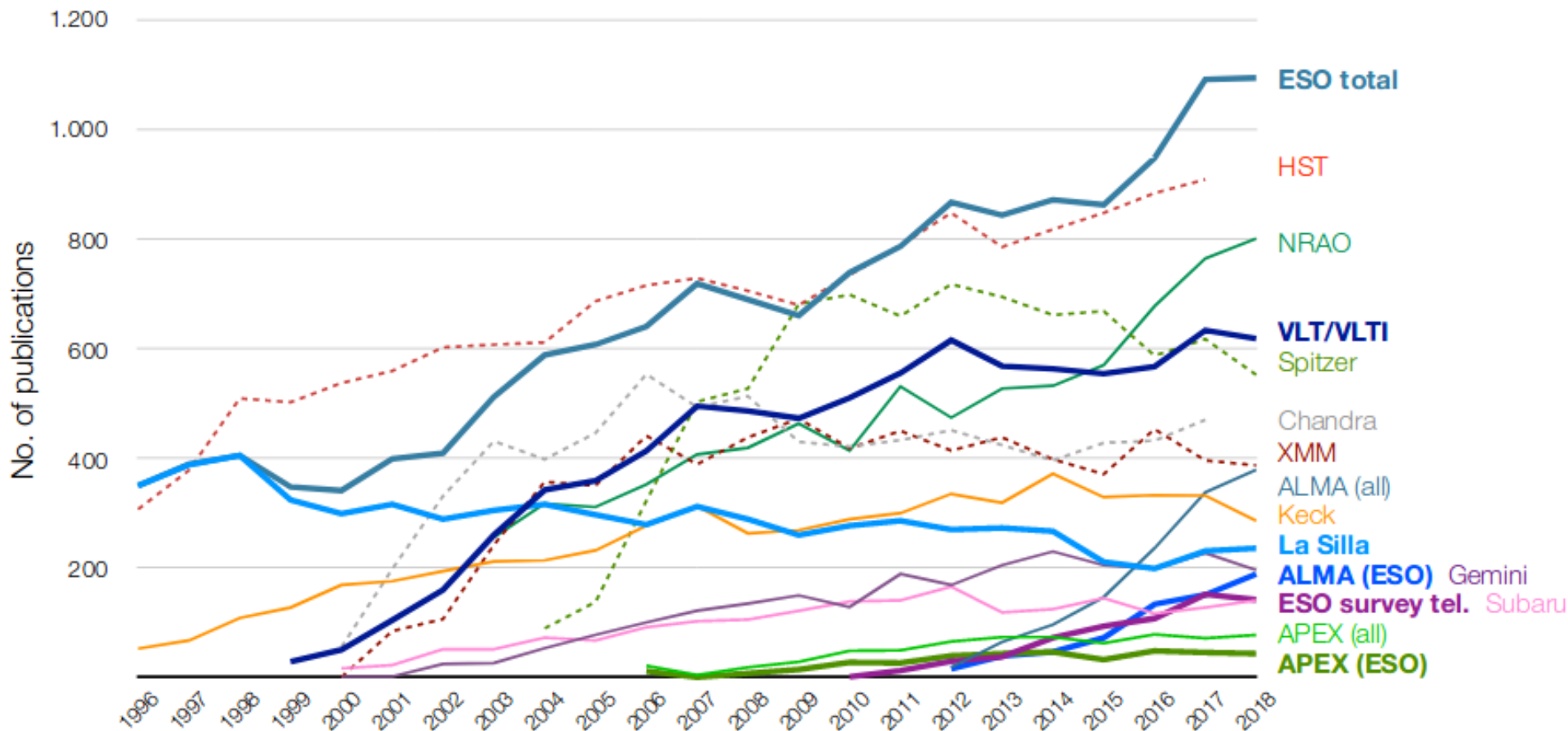


Fig. 3: Refereed publications by ESO and other observatories (as of Feb. 2019; info for 2018 may still be preliminary.)

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

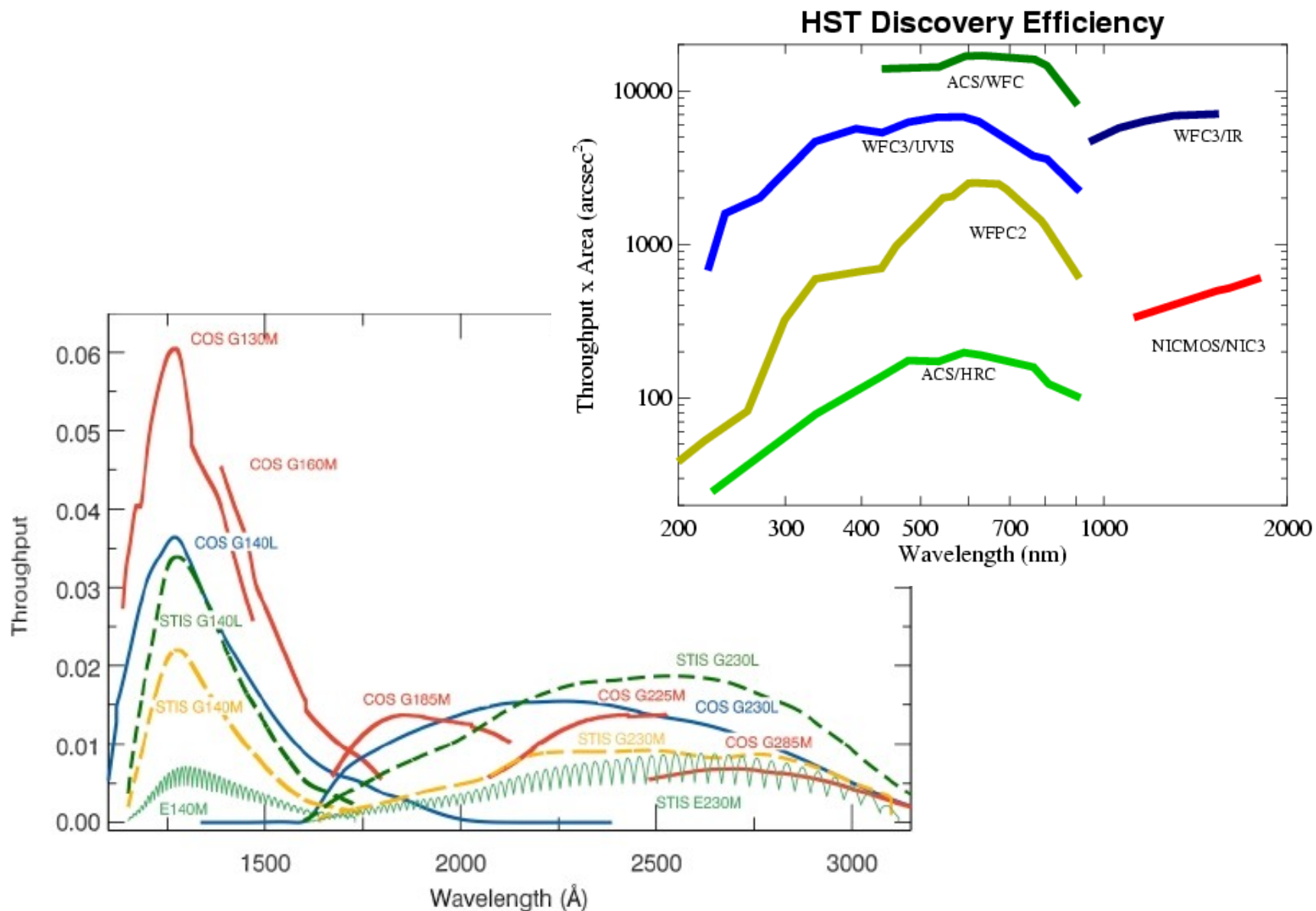
Number of papers per instrument

Number of papers per year

Legend:

- WFC3
- WFCP2
- WFPC
- STIS
- NICMOS
- HSP
- HRS
- FOS
- FOC
- FGS
- COS
- ACS

A HST-műszerek „összehasonlítása”



Észlelés a HST-vel

Obszervatóriumként működik. Távcsőidőre pályázás félévenként. A téma alapján illetékes szakmai zsűri bírálja el. A távcsőidő tervezése, beosztása bonyolultabb, mint a földi obszervatóriumoké.

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

A felsőléggör 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:

- 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.

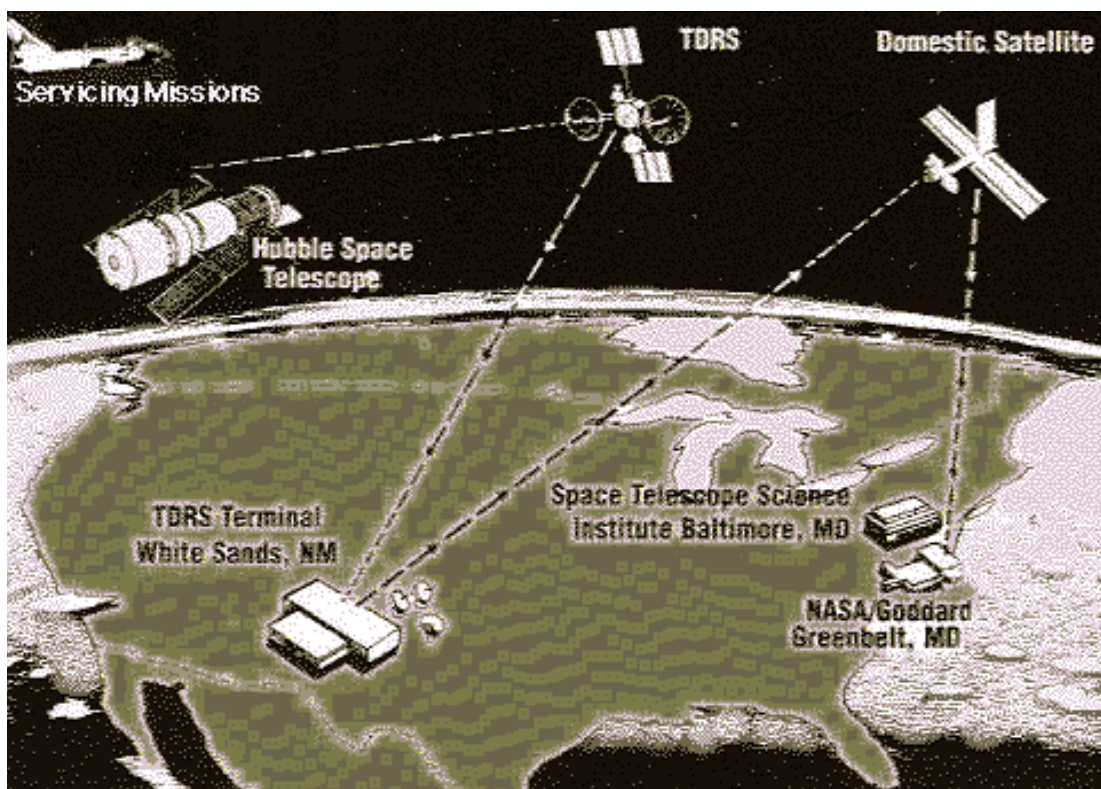
Adattárolás:

FITS-formátumban.

A feldolgozás könnyebb,
de nem alkalmas
közvetlen képnézésre.

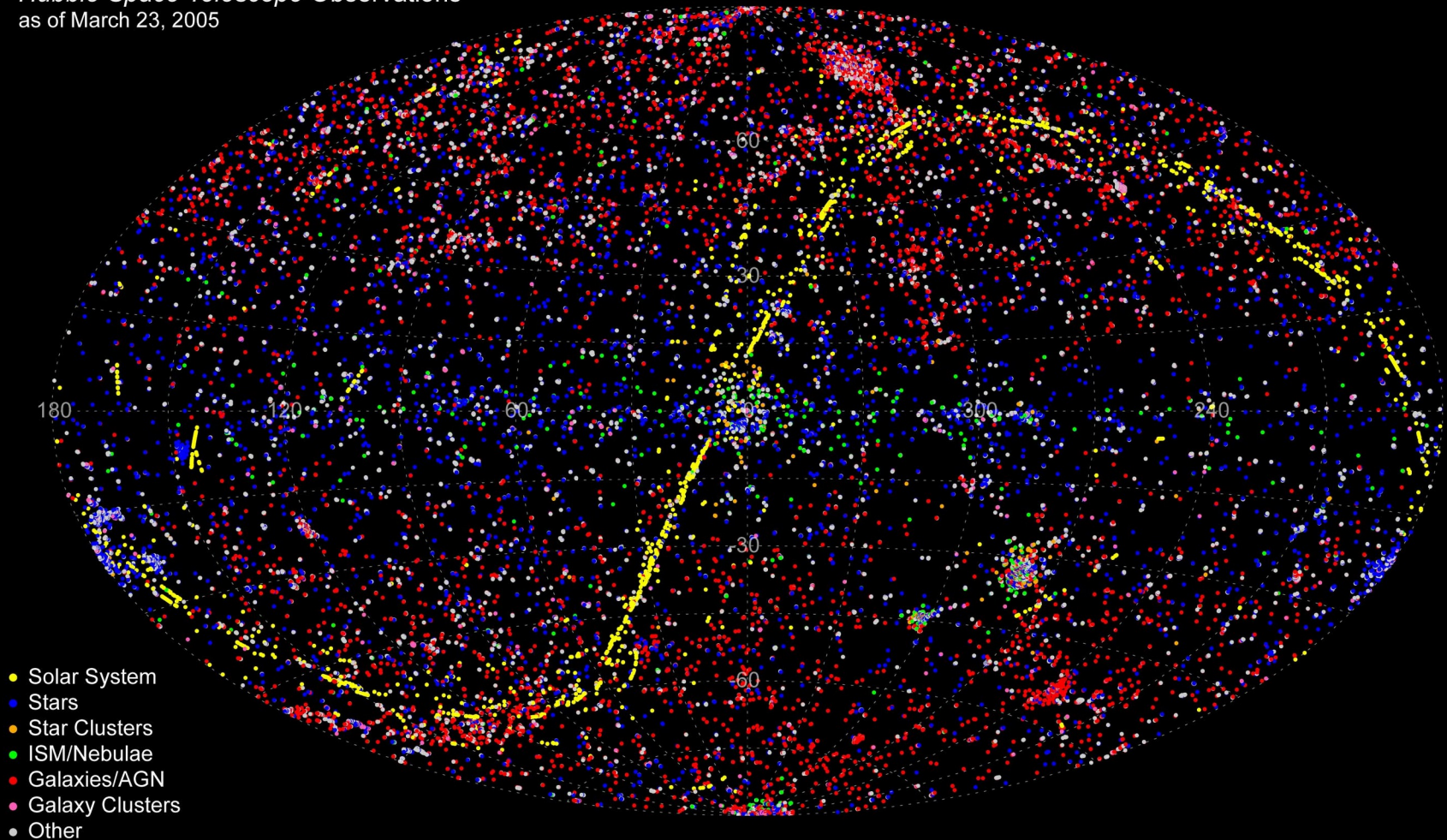
Ezért is hozták létre a
Hubble Heritage Projectet
(Hubble-örökség).

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 megkezdí működését
1983: az LST nevét Hubble-ra változtatják
1984: az ST-ECF megkezdí működését
1985: elkészül a HST
1986: a Challenger-katasztrófa, késés a HST indításában
1990. ápr. 24-25: a HST pályára helyezése
1990. jún. 25.: a főtükrő csiszolási hibájának felfedezése
1993. dec.: SM1: COSTAR (le HSP), WFPC2 (le WFPC1)

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 galaxis, mint csillag a látómezőben)
1996: a kvazárok gazdagalaxisainak felbontása
1997. feb.: SM2: STIS (le FOS), NICMOS (le GHRS)
1999. dec.: SM3A: általános karbantartás, giroszkópok cseréje
2001: HD 209458b exobolygó légkörének összetétele
2002. márc.: SM3B: ACS, NICMOS hűtőrendszere
2004: az STIS energiaellátása megszűnik
2004: a HUDF közzététele
2005: a Plútó két újabb holdjának felfedezése

A HST rövid kronológiája

2006: az Eris törpebolygó
nagyobb a Plútónál

2007: az ACS energiaellátása
megszűnik

2008: Fomalhaut b-ről képalkotás
(az 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 (az addigi
leghalványabb SN azonosítása
gammakitöréssel)

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; Barbara A. Mikulski
Archive for Space Telescopes)

2017: a harmadik legnagyobb
törpebolygónak (2007 OR₁₀)
holdja van

2018: a Coma-halmazban 22
gömbhalmazt találtak a
galaxisközi térben

Naprendszerkutatás a HST-vel

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

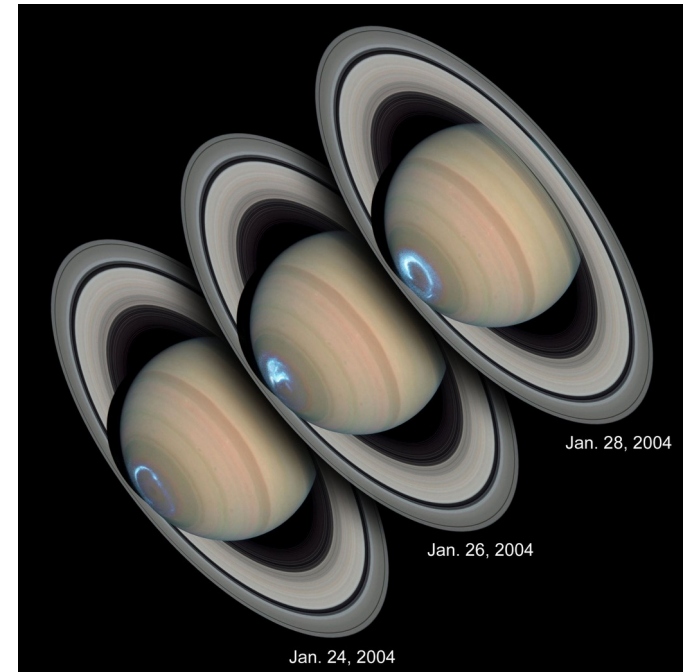
A korábbi űrmissziók (pl. Voyager) eredményeivel való összehasonlítás: bolygófelszínek és -léggörök dinamikus viselkedése;

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.

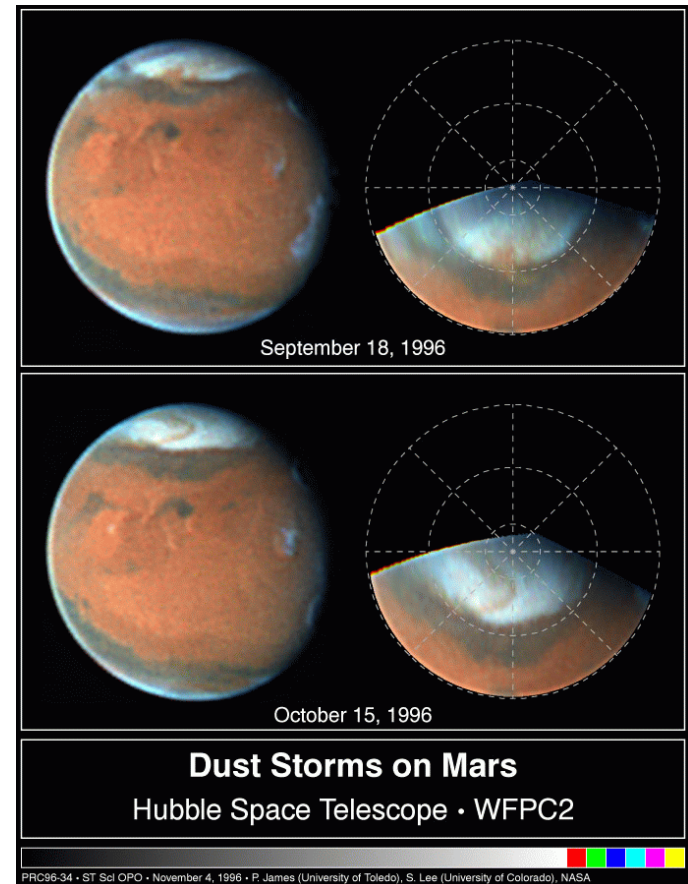
Minden műszerrel észleltek bolygókat (HSP-vel is, amikor a Szaturnusz gyűrűje elfedett egy 12 magnitúdós csillagot).

Koordinált megfigyelések földi és űreszközökkel.



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.



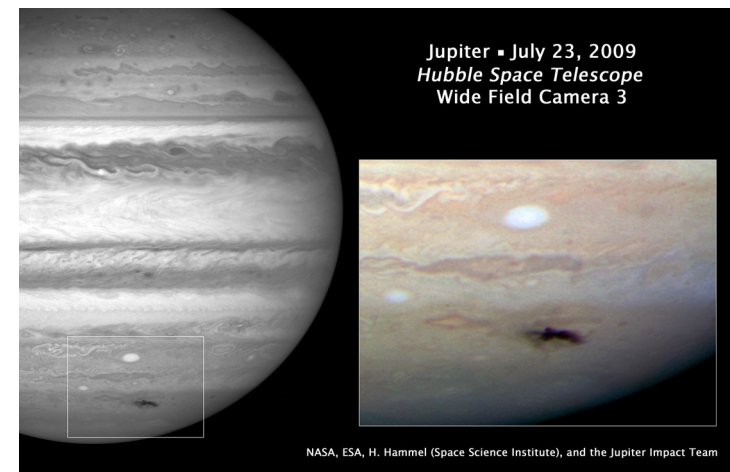
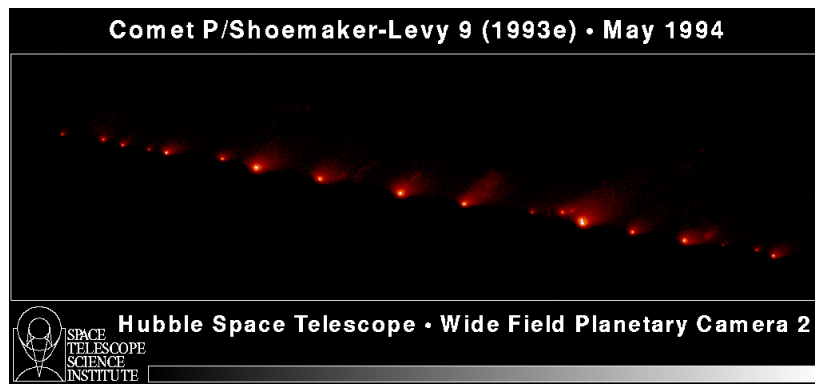
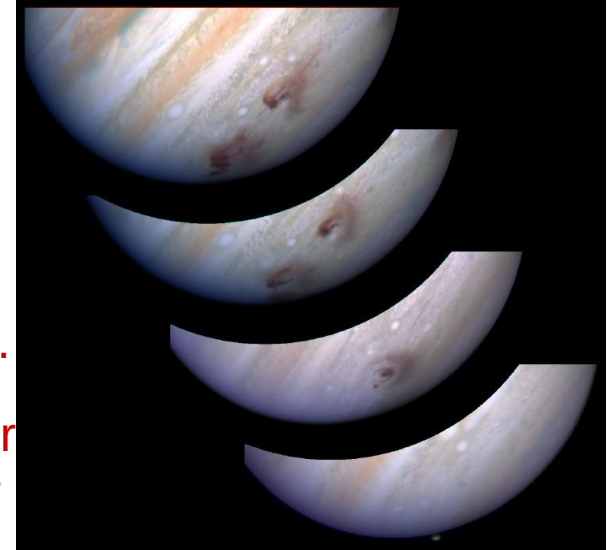
A Jupiter kutatása a HST-vel

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. Kétféle darabból álló lánc + változások. Becsapódás 1994. júl. 16-tól. Légkör „gombafelhők” 3000 km magasra emelkedtek 6-8 perc alatt, 10 perc alatt szétoszlottak, visszaestek. Látszott a hullámterjedés is.

Újabb becsapódás volt: 2009. július 23.

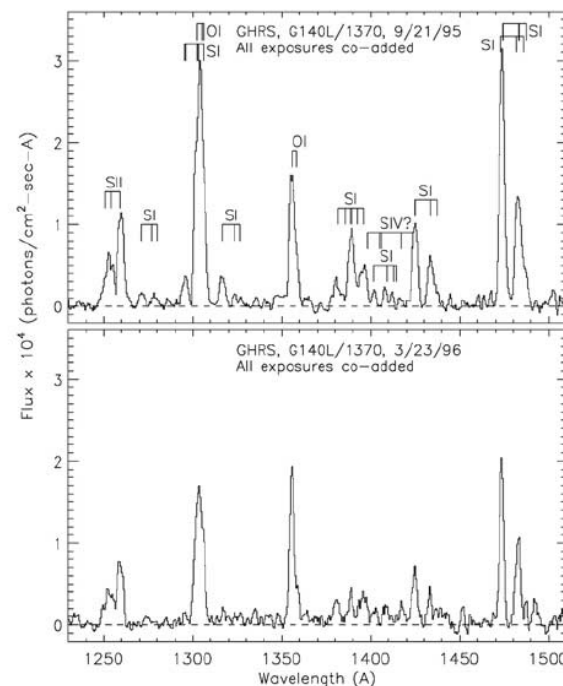
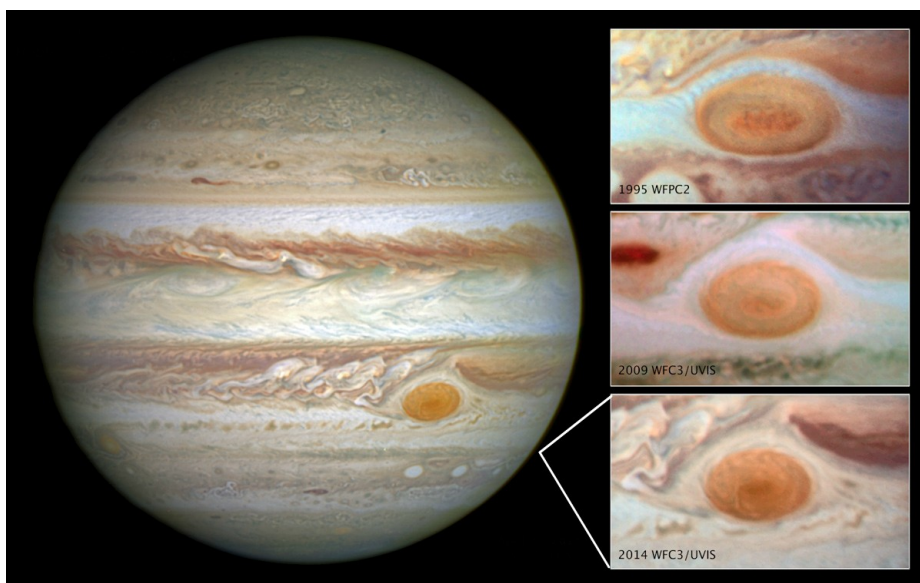


A Jupiter kutatása a HST-vel

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 szélesebbesség akkora, mint a Voyagerek 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- α emissziós vonal profiljában. Ez szuperszonikus mozgásra utal a nagy magasságban.



A Szaturnusz kutatása a HST-vel

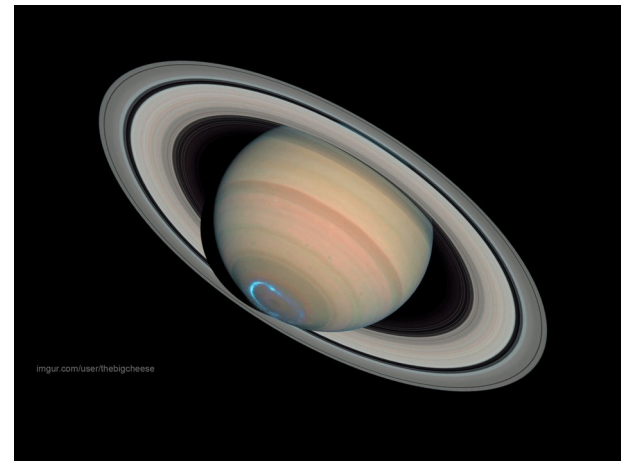
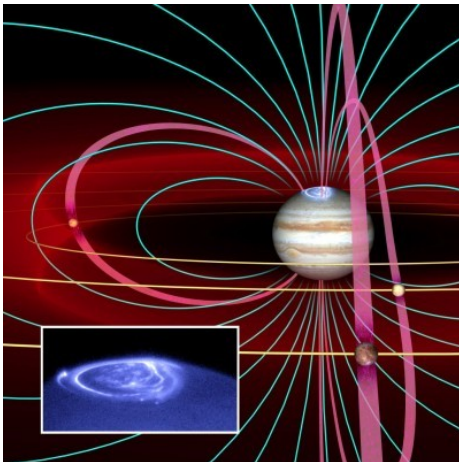
A Voyager által 1980-81-ben észlelt sarki hexagon nem tranziens jelenség.

A sötét sávok és világos zónák profilja viszont változott a Voyager 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 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).

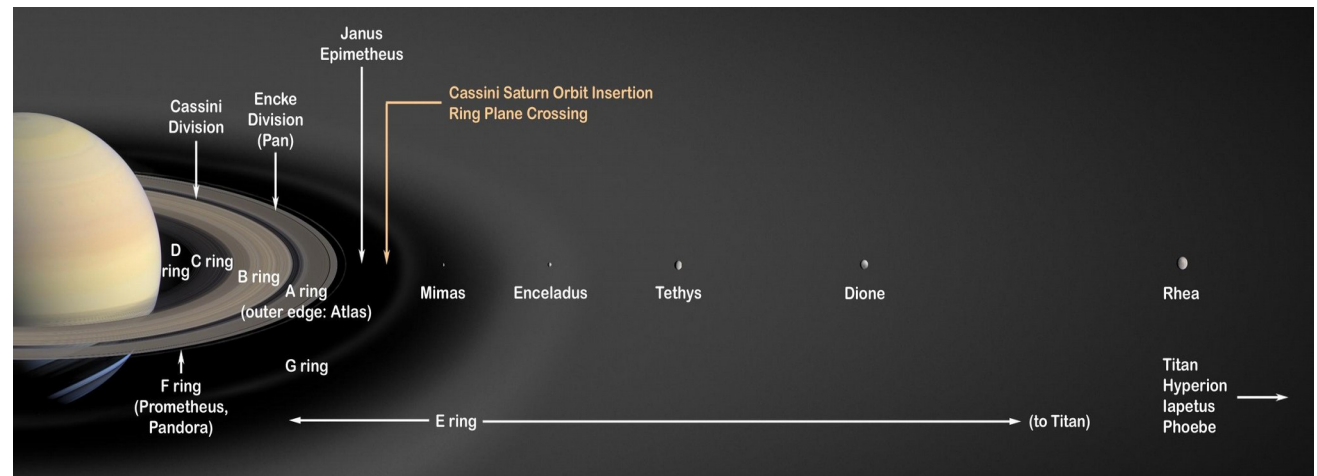
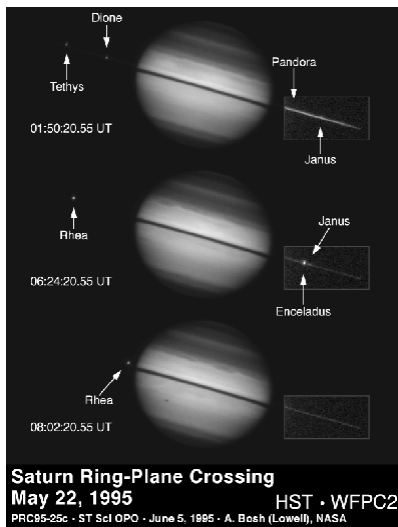


A Szaturnusz kutatása a HST-vel

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.

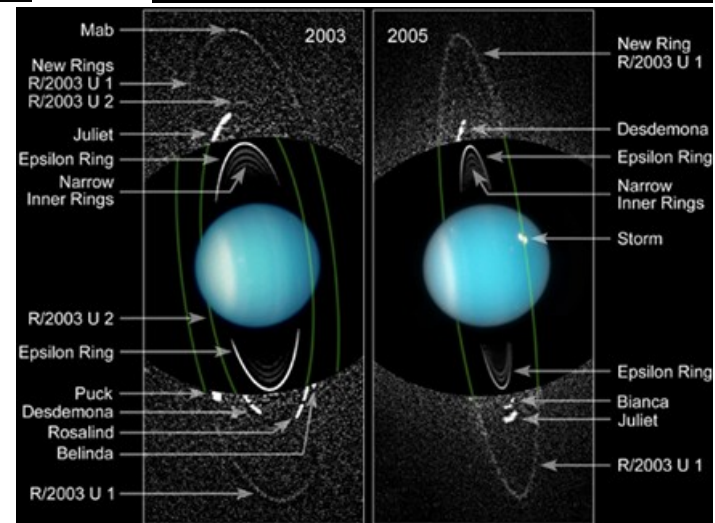
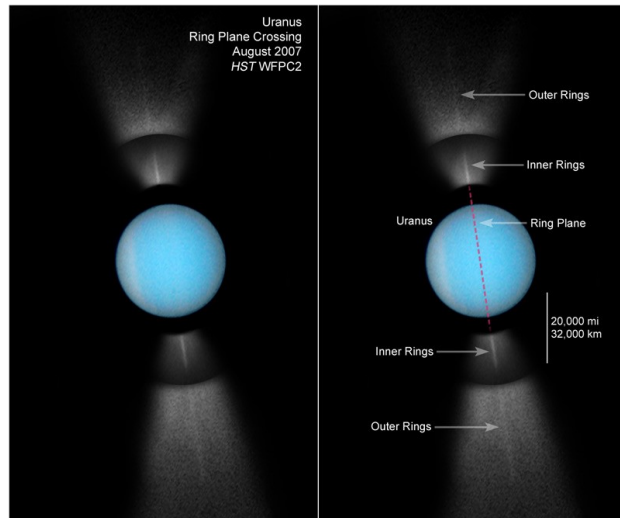
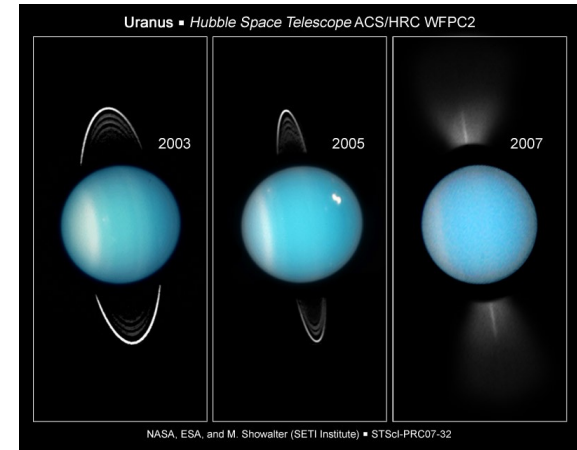
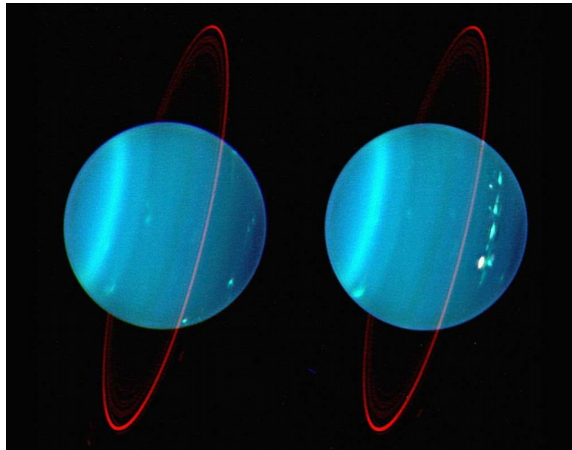


Az Uránusz kutatása a HST-vel

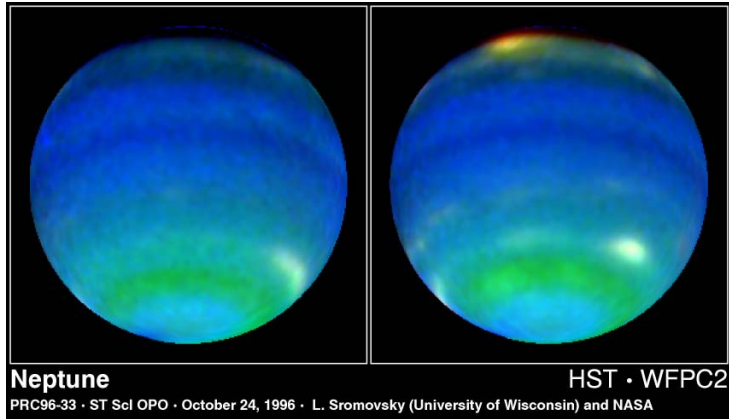
Hét felhő alapján vizsgálták a rotációját. A déliek azonos ütemben forogtak, mint a Voyager idején, az északiak lassabban forognak, ám azokról nincs Voyager-adat.

Új hold: 2003;

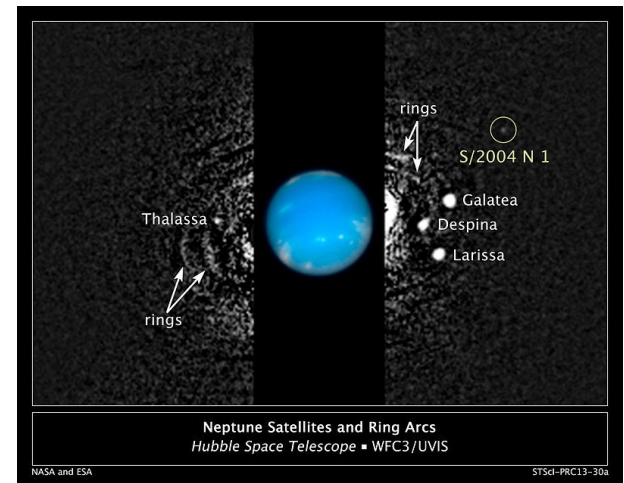
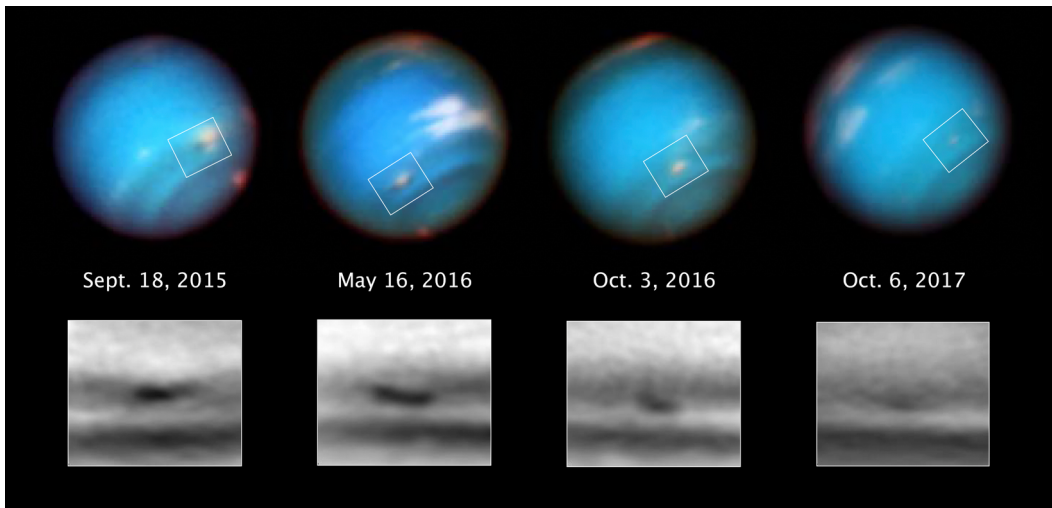
Új gyűrű: 2005.



A Neptunusz kutatása a HST-vel



Dinamikus a légköre: nagy sötét folt (GDS) volt -22° 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 kísért. Új felvételek egy megszűnő nagy viharról (2015–2017).
A XIV. Neptunusz-hold felfedezése (2013): Hippocamp.

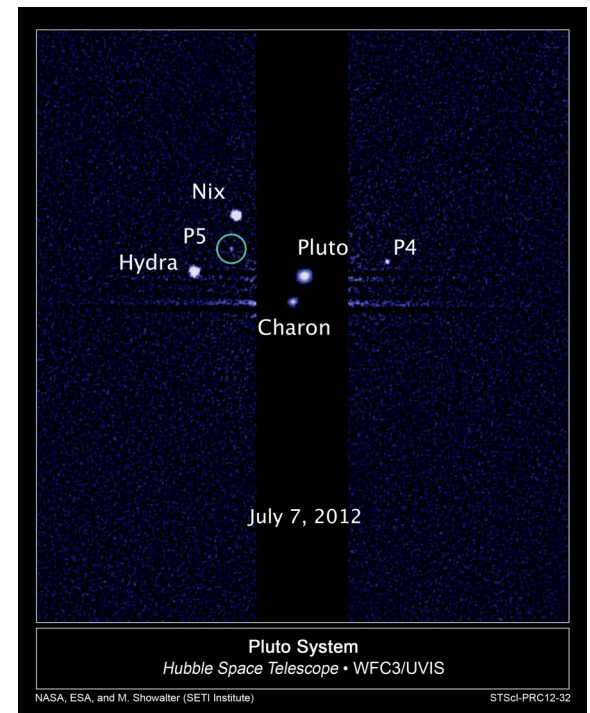
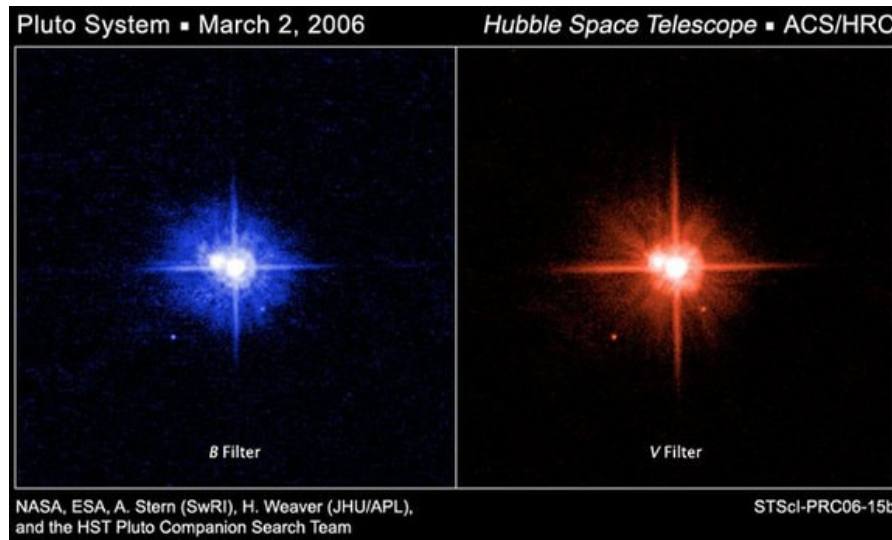
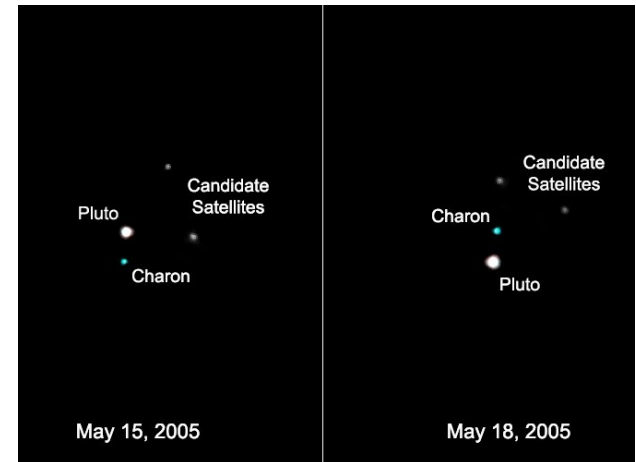


A Plútó kutatása a HST-vel

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 mindet tisztázott.



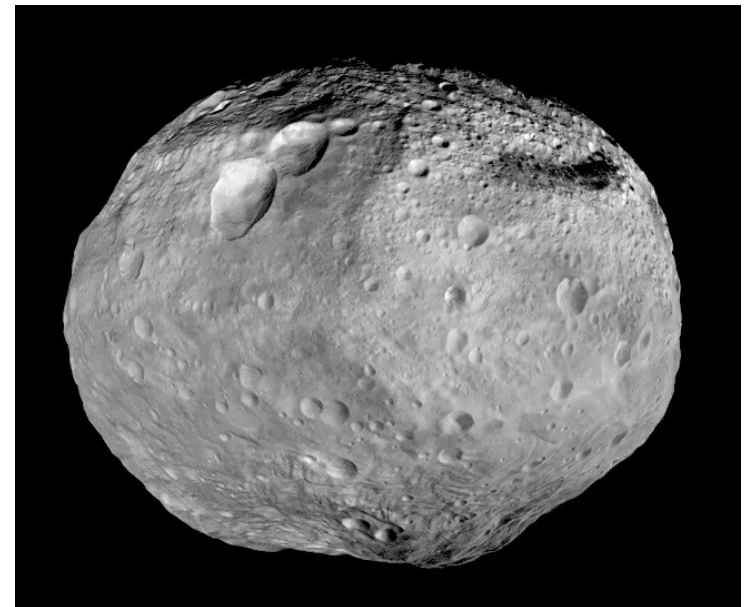
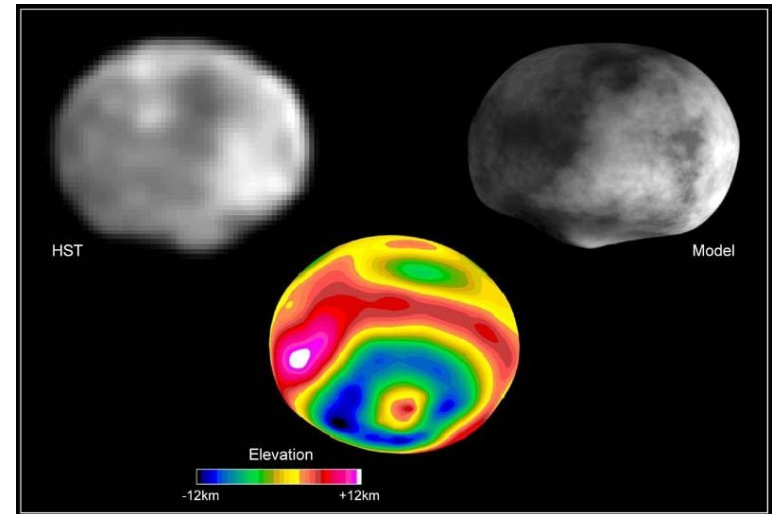
Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

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 $\varnothing$) becsapódási kráter (ellipszoidnak véve a Vesta fél nagytengelyei: 289, 280, 229 km). A kráter pereme és központi csúcsa 13 km-rel emelkedik a kráteraljzat fölé.

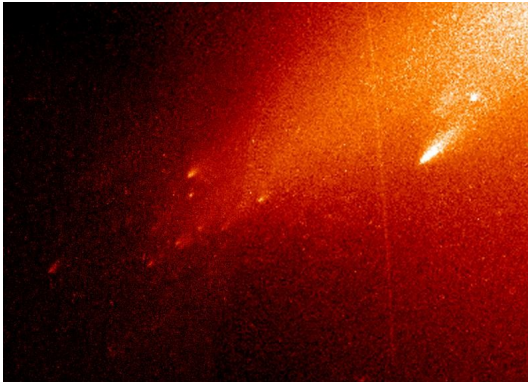
Szűrőkkel a kémiai összetétel: piroxénben gazdag kéreg az olivinból álló köpenyen. A nagyobb aszteroidák között egyedülálló, bazaltos felszín. Modell: 1%-nyi tömeget veszített a Vesta a becsapódáskor. A meteoritok 6%-ának szülőégitestje a Vesta.

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

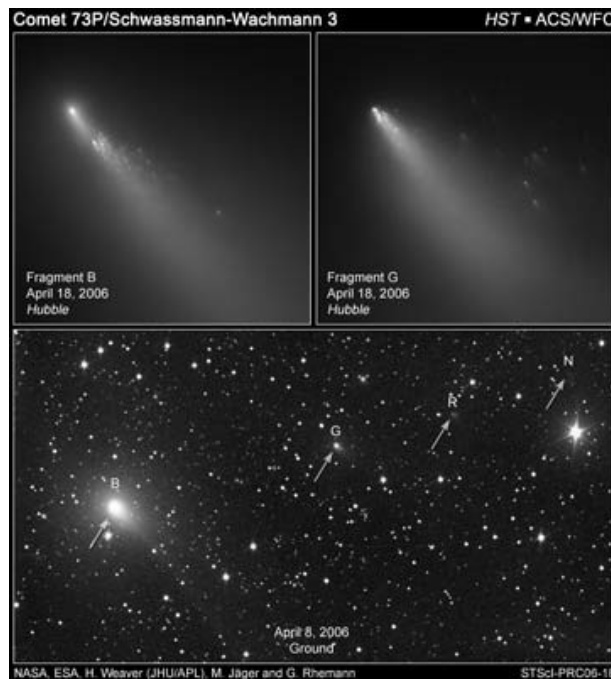
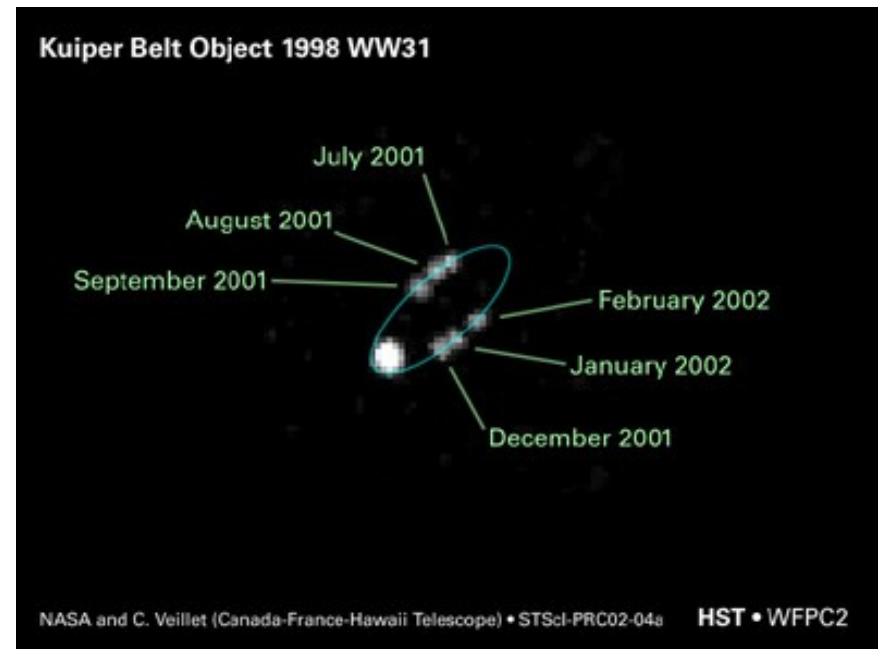


Naprendszerbeli kis égitestek a HST-vel

LINEAR-üstökös szétesése 2001-ben



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

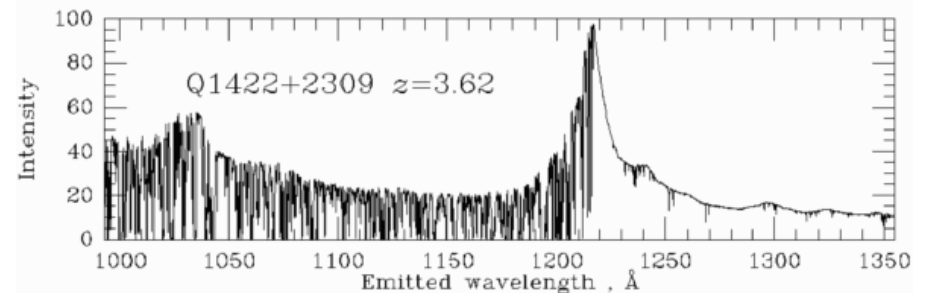
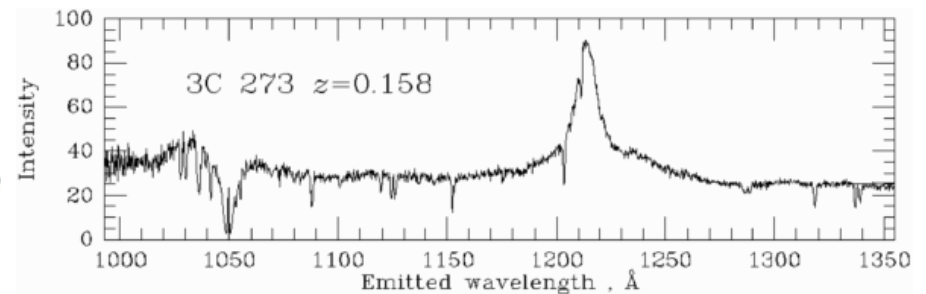
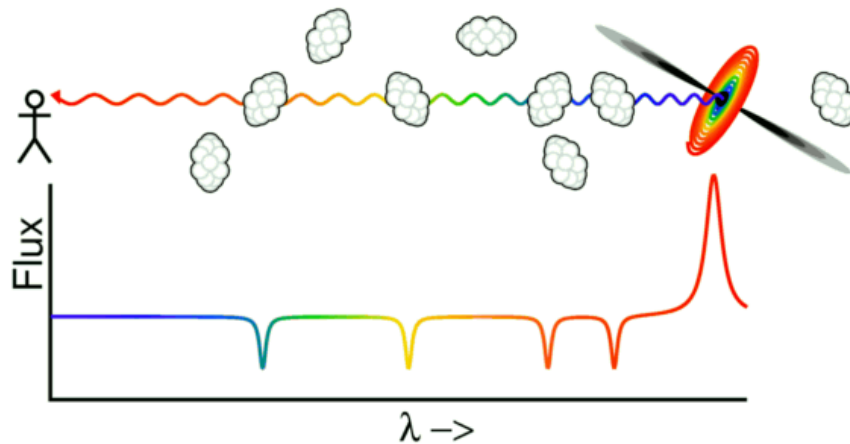


A 73P/Schwassmann-Wachmann üstökös feldarabolódása 2006-ban. Tóth Imre a kutatócsoport tagja volt.

Nagy projektek a HST-vel

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);
- **Medium Deep Survey**: WF-kamerával, amíg a többi műszer éppen mást mér (parallel mező);
- A Hubble-állandó meghatározása legalább 10% pontosan.



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 40 projekt (36–834 keringés észlelési idővel)

Archival Legacy Program: eddig 45 projekt (csak régebbi archivált adatok új vagy új szempontok szerint történő feldolgozása)

Large Program: eddig 113 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: 2019-ig 40 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 ;
<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 45 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 113 (!) projekt (40–520 keringés észlelési idővel)

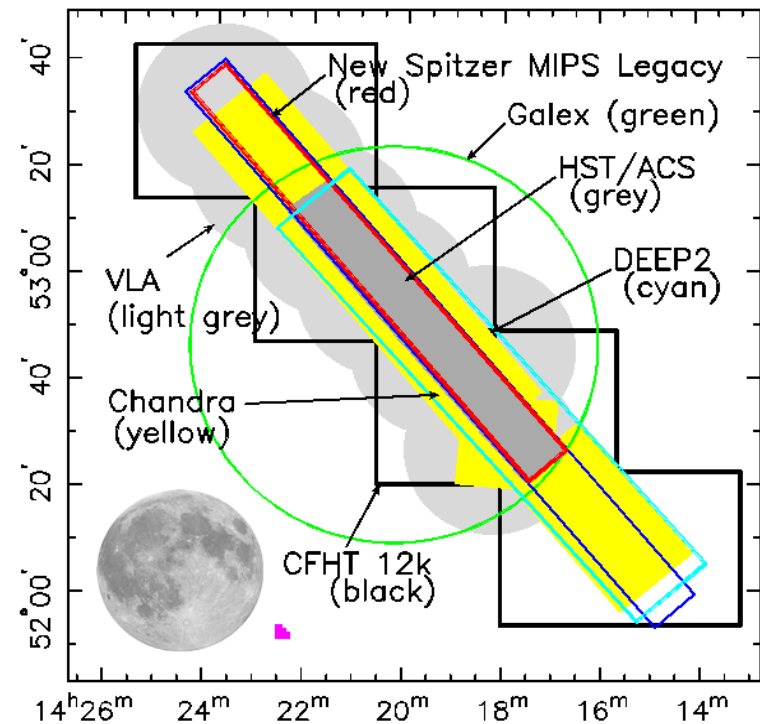
- The Atmospheric Structure of Giant Hot Exoplanets (115 keringés)
- Galaxies at $z \sim 7-10$ in the Reionization Epoch: Luminosity Functions from Deep IR Imaging of the HUDF and HUDF05 fields (193 + 192 keringés); <http://archive.stsci.edu/prepds/hudf09>
- Panchromatic WFC3 survey of galaxies at intermediate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

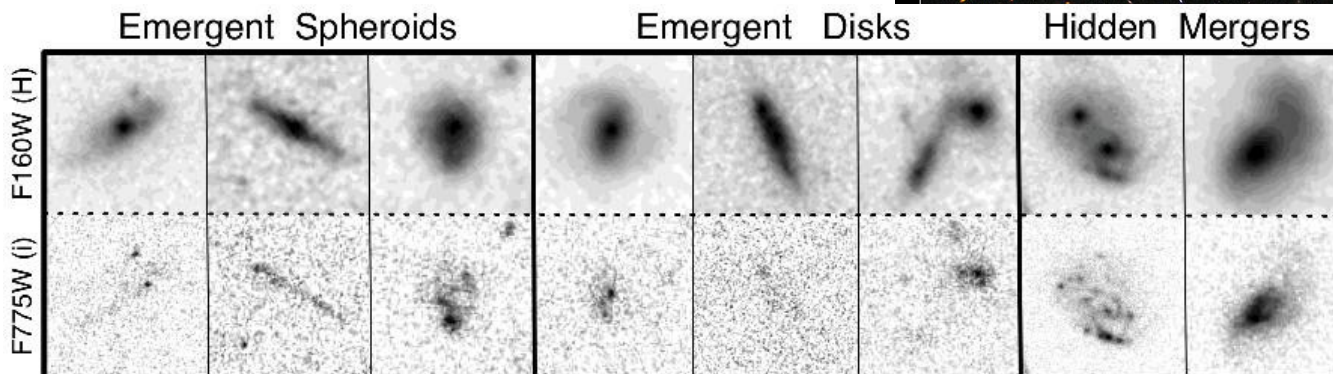
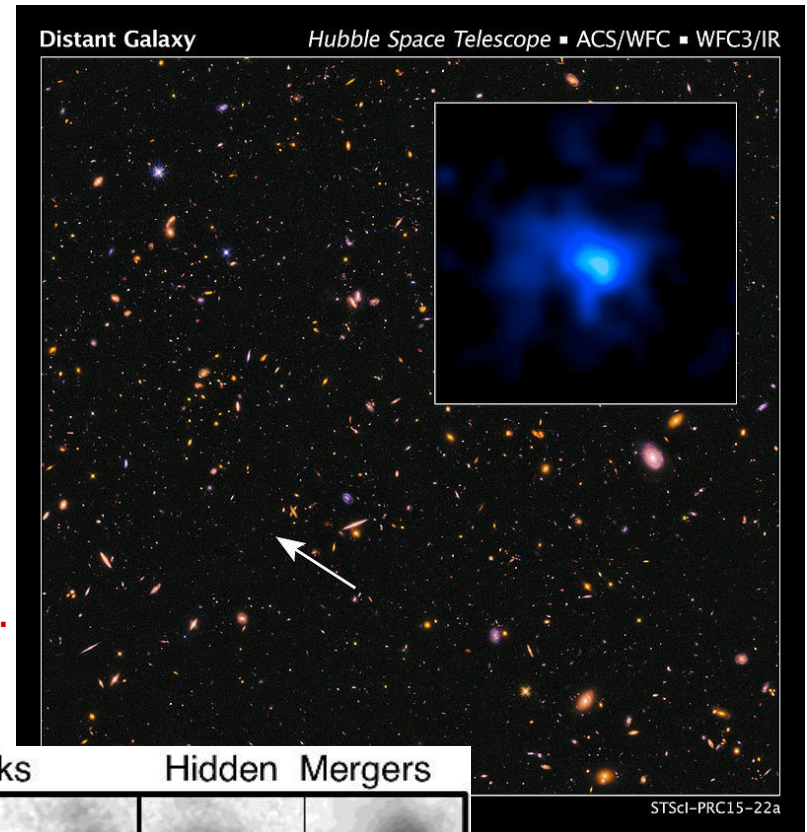


Nagy projektek a HST-vel

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

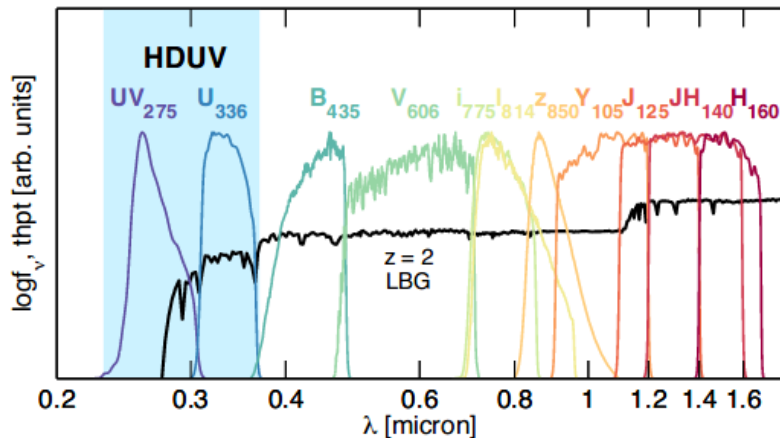


FIG. 1.— The *HST* imaging filter set in the two HDUV survey fields. Combining the data of the two workhorse cameras on *HST*, WFC3 and ACS, these fields are now covered with 11-band data spanning a wavelength range from $\sim 0.25 - 1.7 \mu\text{m}$ at excellent spatial resolution of 100-160 mas. The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

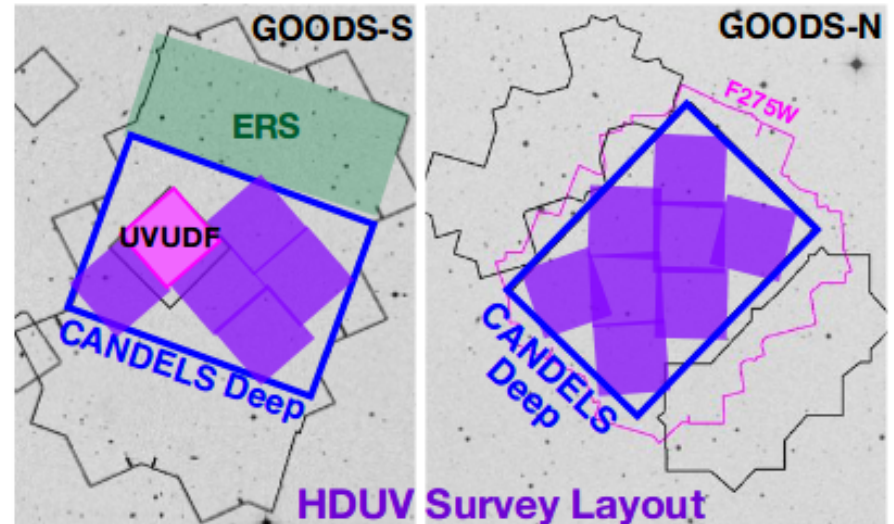


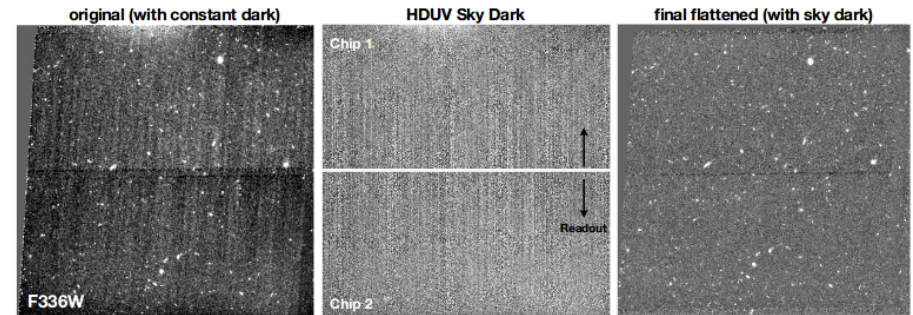
FIG. 2.— Layout of the HDUV Survey with respect to previous datasets in the GOODS-South (left) and -North (right) fields. The HDUV was designed to optimally build on and extend the pre-existing data to provide deep F275W and F336W imaging over most of the CANDELS-Deep area (blue outline). In GOODS-S, 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 5σ . The data release described here includes the F275W images from the CANDELS survey in GOODS-N.

Nagy projektek a HST-vel

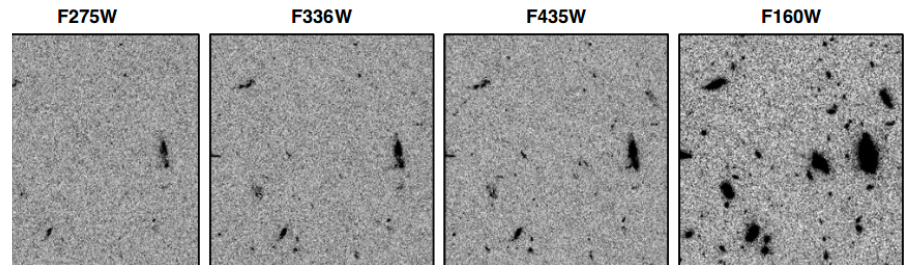
Képkotás halvány csillagképző galaxisokról 27,5-28,0 határfényességig az $1 < z < 3$ tartományban.

HDUV SUMMARY

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



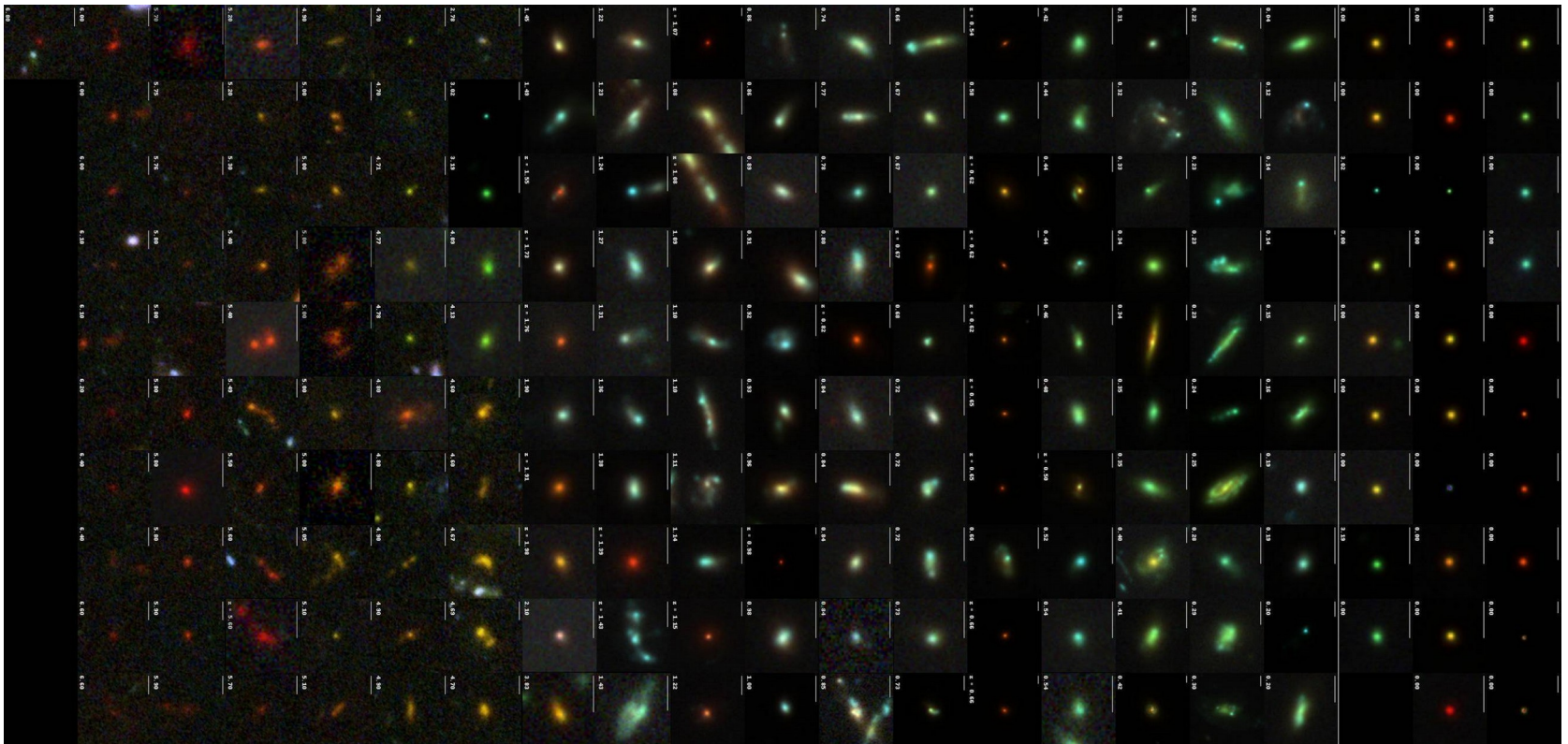
4.— The improvement in image quality thanks to the use of a sky dark image in the HDUV data reduction. The left panel shows a visit of F336W data drizzled using the standard dark frame. Significant residual structure is clearly visible, including severe striping in the readout direction (i.e. hot and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

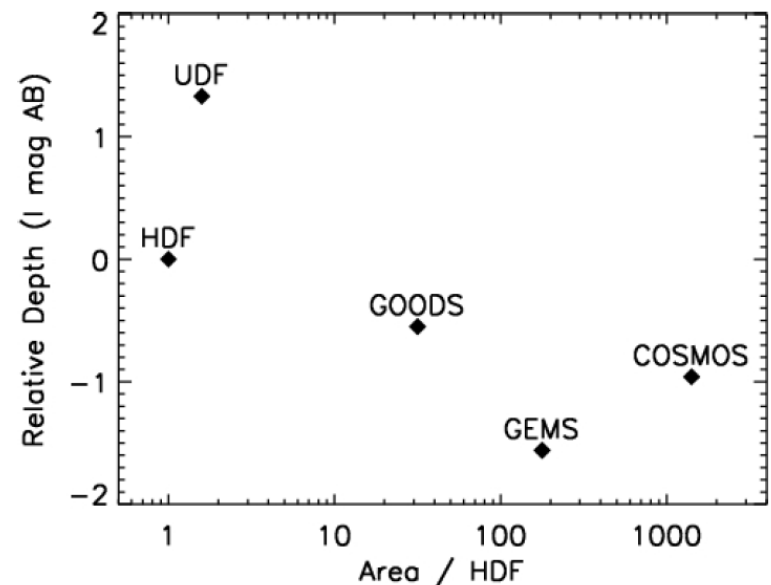
$$m_{AB} = -2,5 \lg(f_v) - 48,60$$

(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 μm -en)



Nagy projektek a HST-vel

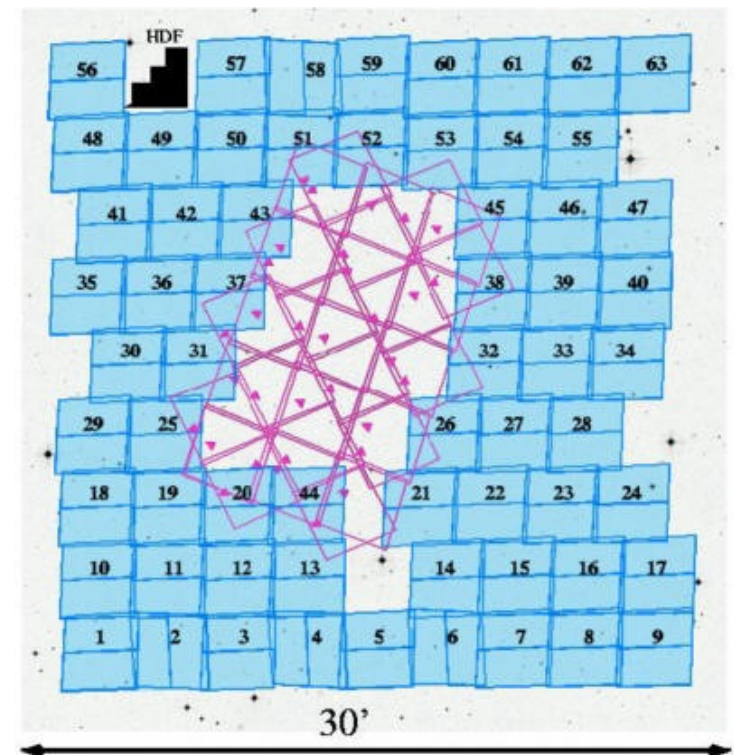
GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs): A HST-vel leképezett legnagyobb összefüggő terület ($900 \square'$) E-CDS (extended);

Mozaik 9×9 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, MPA, 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 gazdagaxisainak fejlődése az elmúlt 10 milliárd évben.



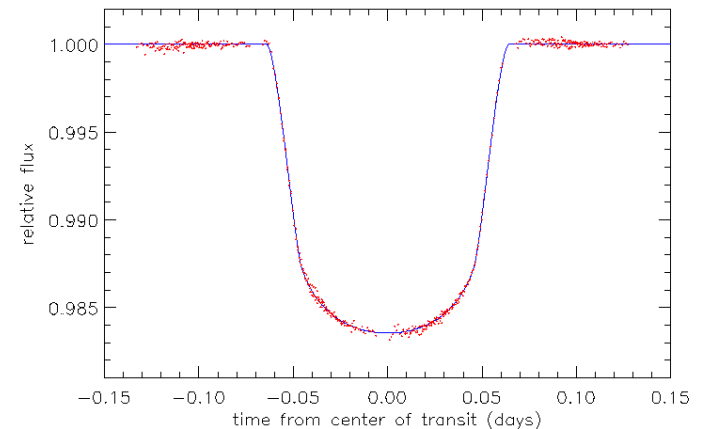
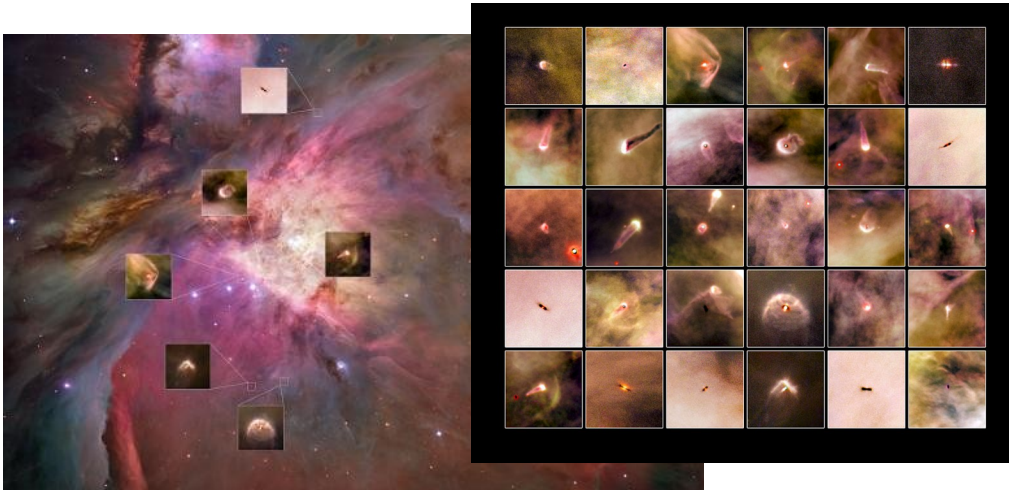
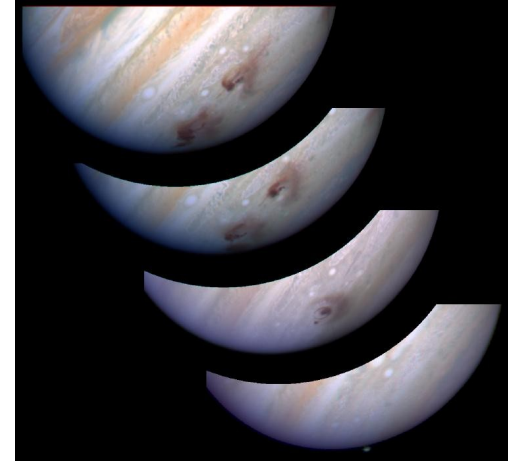
Fontos előrelépések az ezredfordulóra

	1990-beli ismeret	a HST alapján 2000-ben
Protocsillagok környezete	akkréciós korong (IR)	a korong tereli a kilövellést
SN 1987A	a változások folyamata 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

A HST főbb eredményei

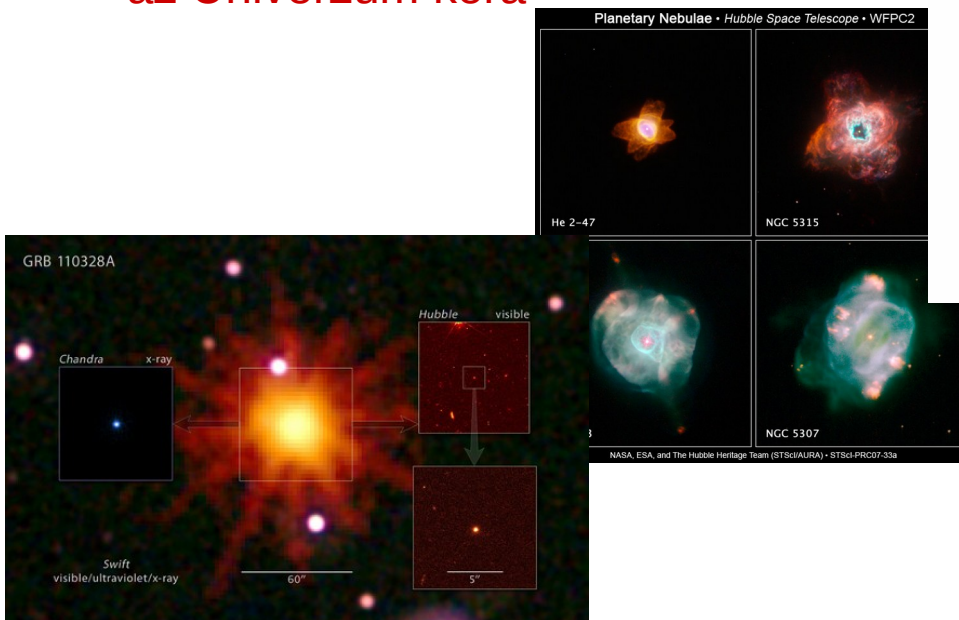
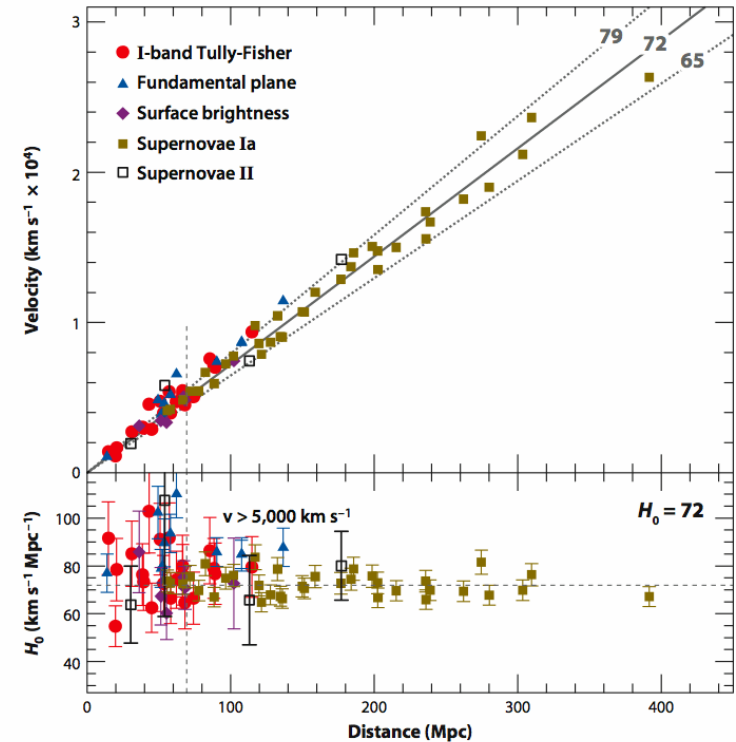
A HST 15 éves jubileumára (2005) az STScI által közölt összeállítás szerint:

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



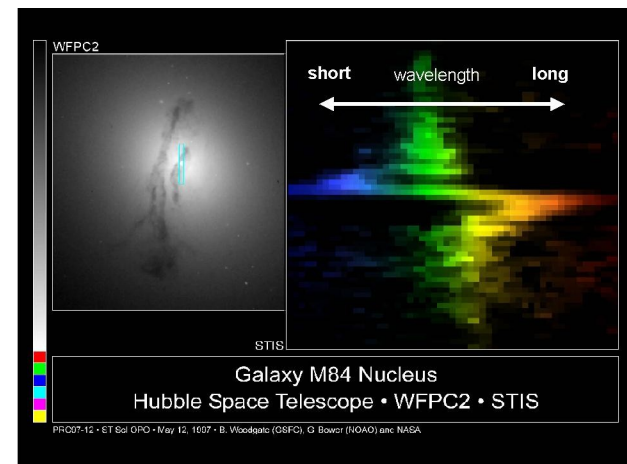
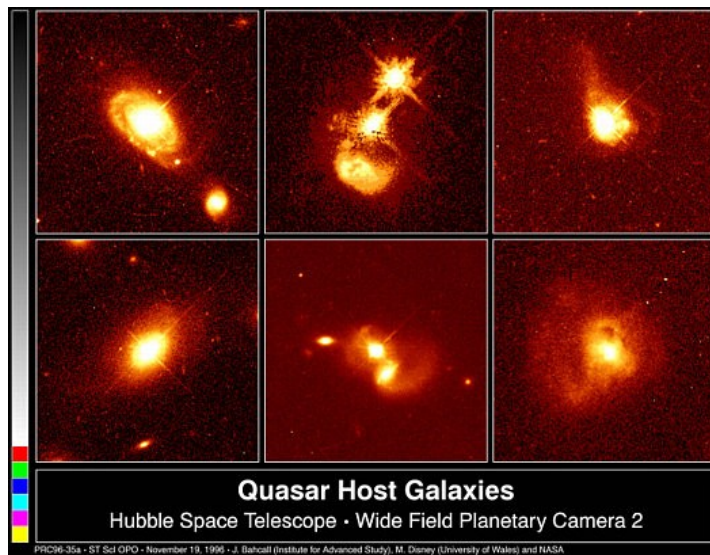
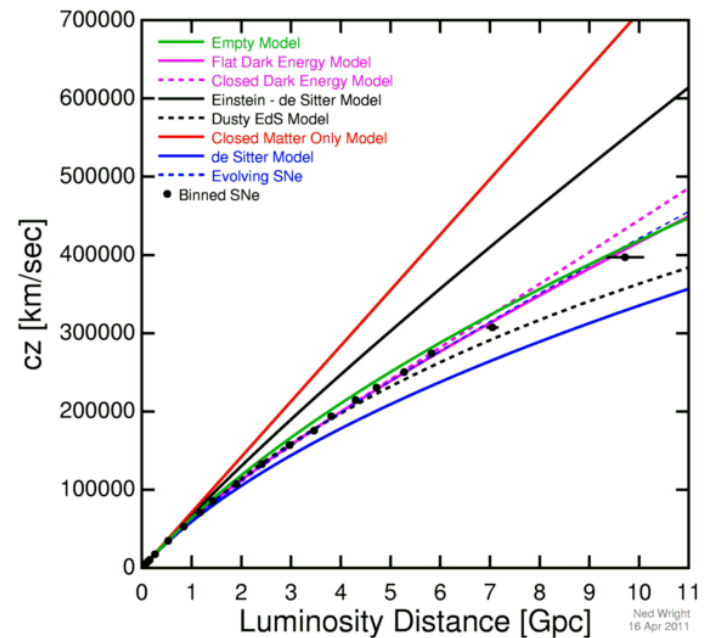
A HST főbb eredményei

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 főbb 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

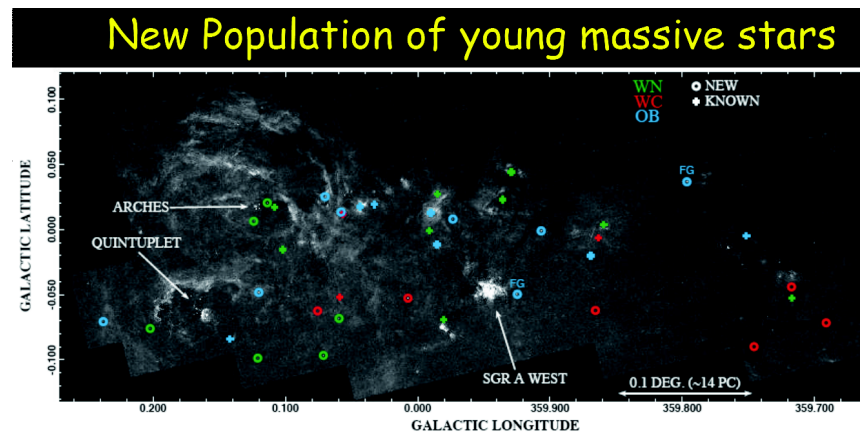
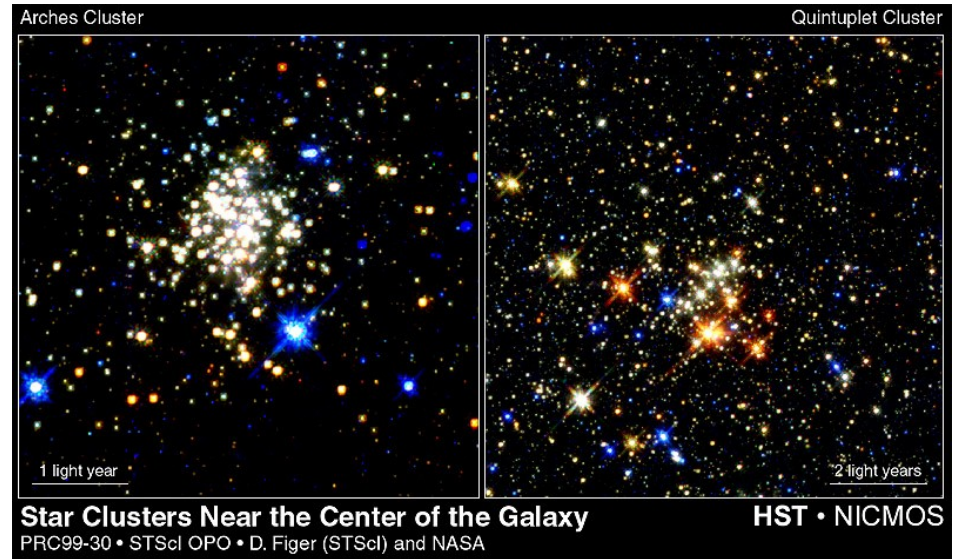


A HST főbb eredményei

A 10 közé nem fért be, de nagyon fontos eredmény: 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!



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. Ezek a legtávolabbra néző képek: $V=30^m$ -ig látszanak a galaxisok. 100-szor annyi galaxis látszik, mint ahány előtér csillag.

Deep field = mélyvizsgálat: konkrét térség minél részletesebb vizsgálata.

1995. dec. 18-28.; HDF-N: $\alpha=12^h 36^m 49,4^s$;

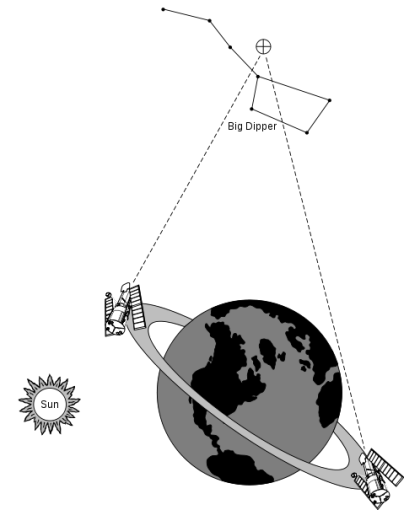
$\delta=+62^\circ 12' 58''$ (J2000); UMa, 342 exp.

1998. okt. (10 nap); HDF-S: $\alpha=22^h 32^m 56,2^s$

$\delta=-60^\circ 33' 03''$ (J2000); Tuc

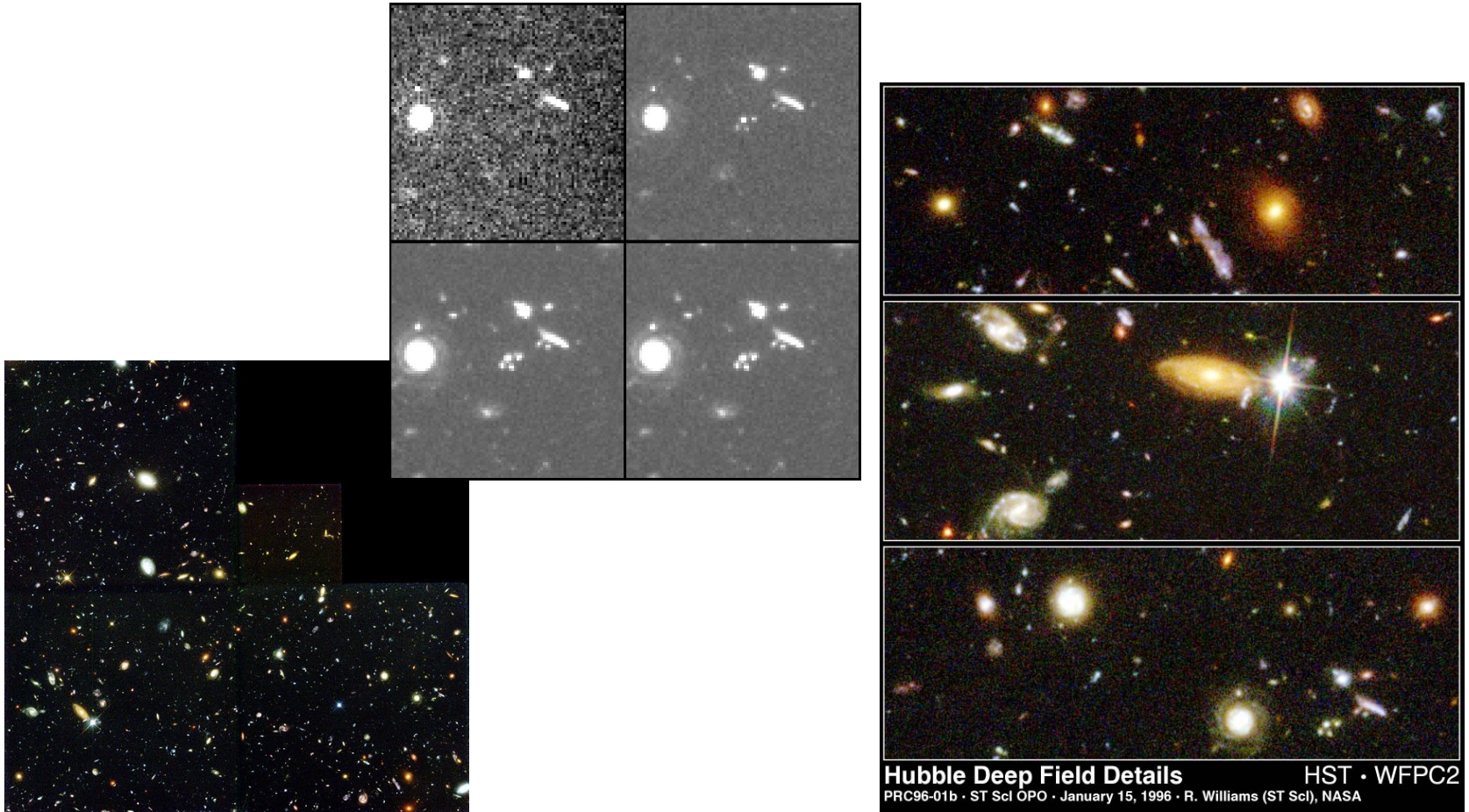
Kiválasztási szempontok: fényes csillag és közeli galaxis nélküli mező legyen kis elnyeléssel az adott irányban, folyamatos észlelési lehetőséggel.

Cél: kozmológiai következtetések megfigyelések alapján (primordiális sűrűségfluktuációk, sötét anyag a galaxisok és galaxishalmazok halójában, galaxisok kölcsönhatása).



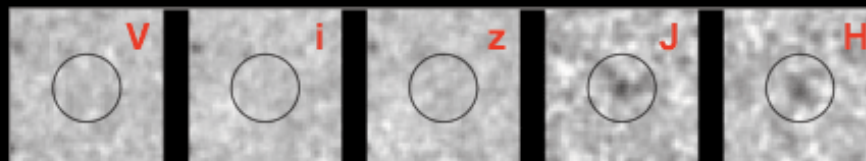
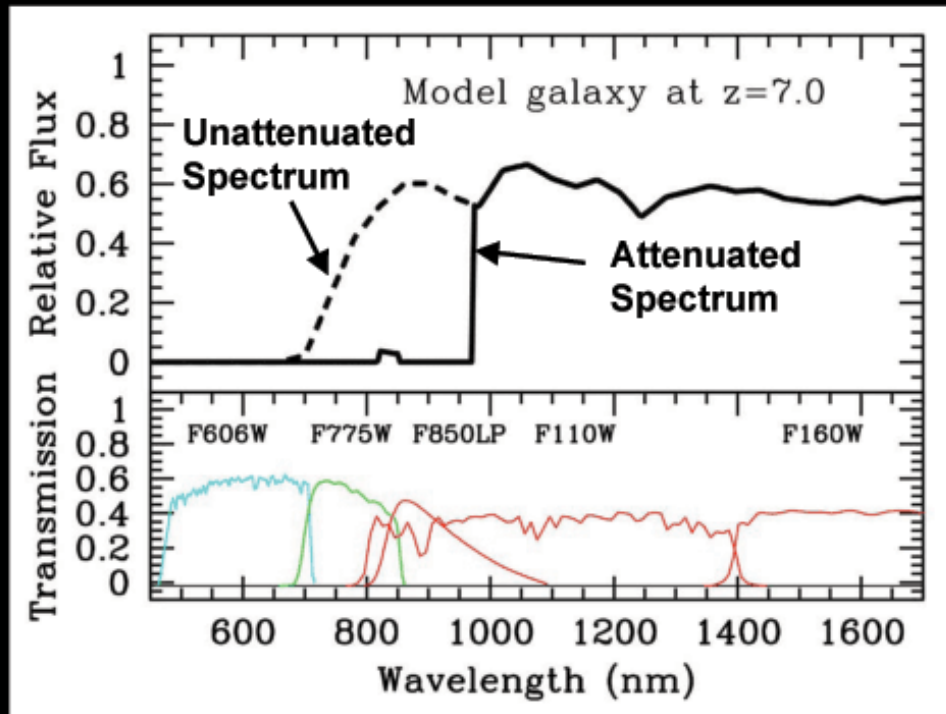
HDF-N

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



HDF

Lyman-alfa-erdő. Színinformáció és a Lyman-ugrás alapján vöröseltolódás (példa, de nem a mélyvizsgálati mezőből).



HDF-S

NICMOS: 1,1 és 1,6 μm + WFPC2. A mező közepén a QSO J2233-606 kvazár.

Kozmológiai jelentőség: mindkét irányban azonos viselkedésű galaxisok.

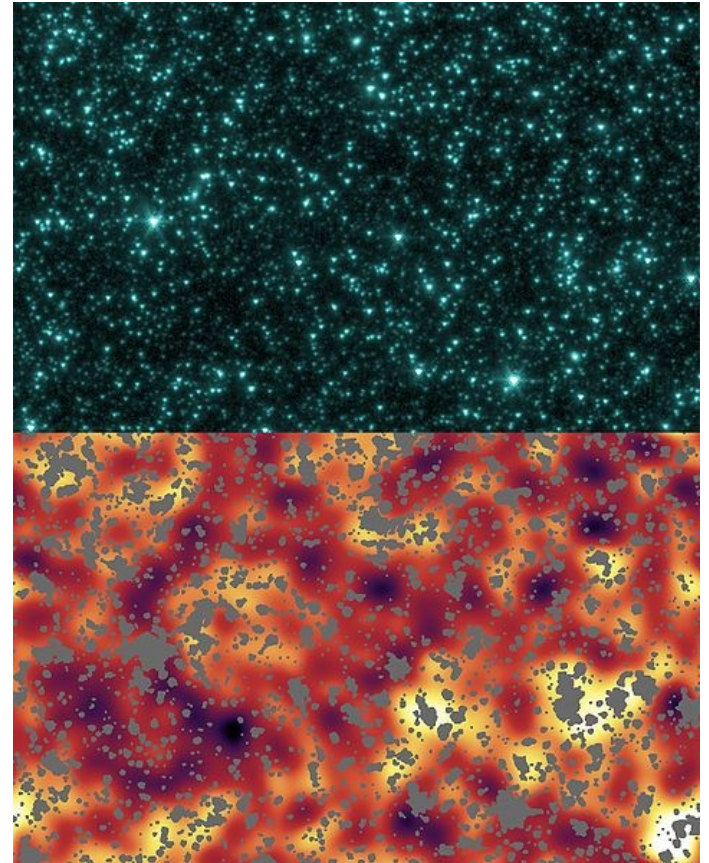
Observations made of the HDF-S with the HST.^[3]

Camera	Filter	Wavelength	Total exposure time	Exposures
WFPC2	F300W	300 nm (U-band)	140,400 s	106
WFPC2	F450W	450 nm (B-band)	103,500 s	67
WFPC2	F606W	606 nm (V-band)	99,300 s	53
WFPC2	F814W	814 nm (I-band)	113,900 s	57
NICMOS NIC3	F110W	110 nm (J-band)	162,600 s	142
NICMOS NIC3	F160W	160 nm (H-band)	171,200 s	150
NICMOS NIC3	F222M	222 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



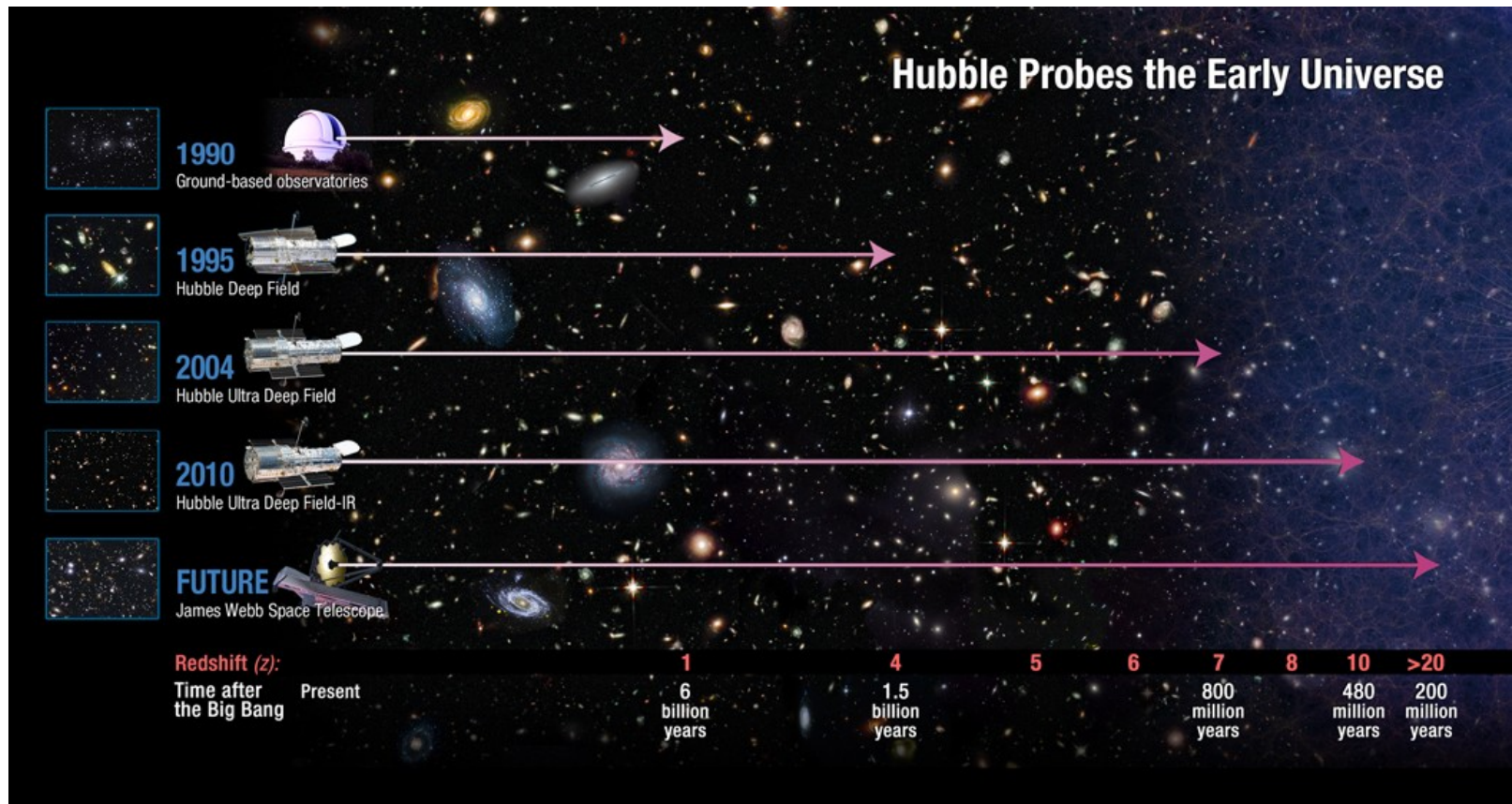
HDF-S

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



A HDF-S Spitzer-képe

A HST ultramélyvizsgálata



Hubble Ultra-Deep Field: 2003. IX. - 2004. I.
És 2012-ben a Hubble Extreme Deep Field

A HST ultramélyvizsgálata

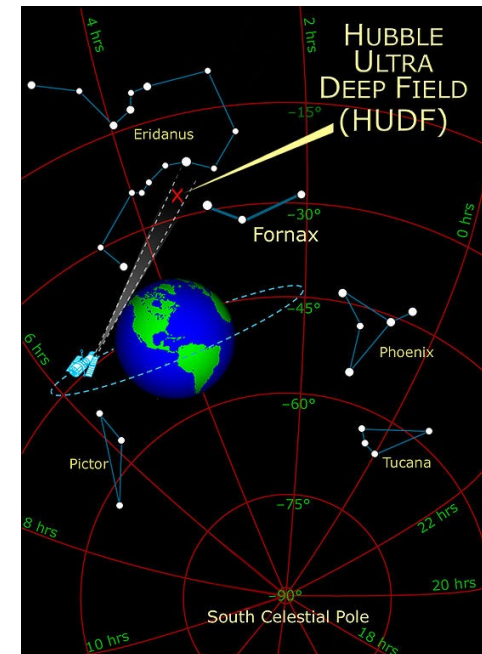
Hubble Ultra-Deep Field: 2003. IX. - 2004. I.

$\alpha=3^h 32^m 39^s$; $\delta=-27^\circ 47' 29''$ (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). A felbontás javítása 'dithering' technikával. (Ditherelés: véletlenszerű zaj hozzáadása, megakadályozza a kiterjedt mintázatok [sávok] megjelenését a képen.)

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).



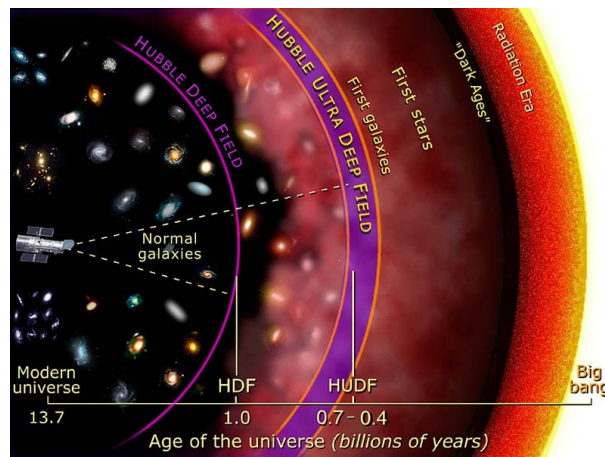
Camera	Filter	Wavelength	Exposure time
WFC3	F105W	1050 nm $\pm$ 150	16 orbits, 14 usable
WFC3	F125W	1250 nm $\pm$ 150	16 orbits
WFC3	F160W	1600 nm $\pm$ 150	28 orbits

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

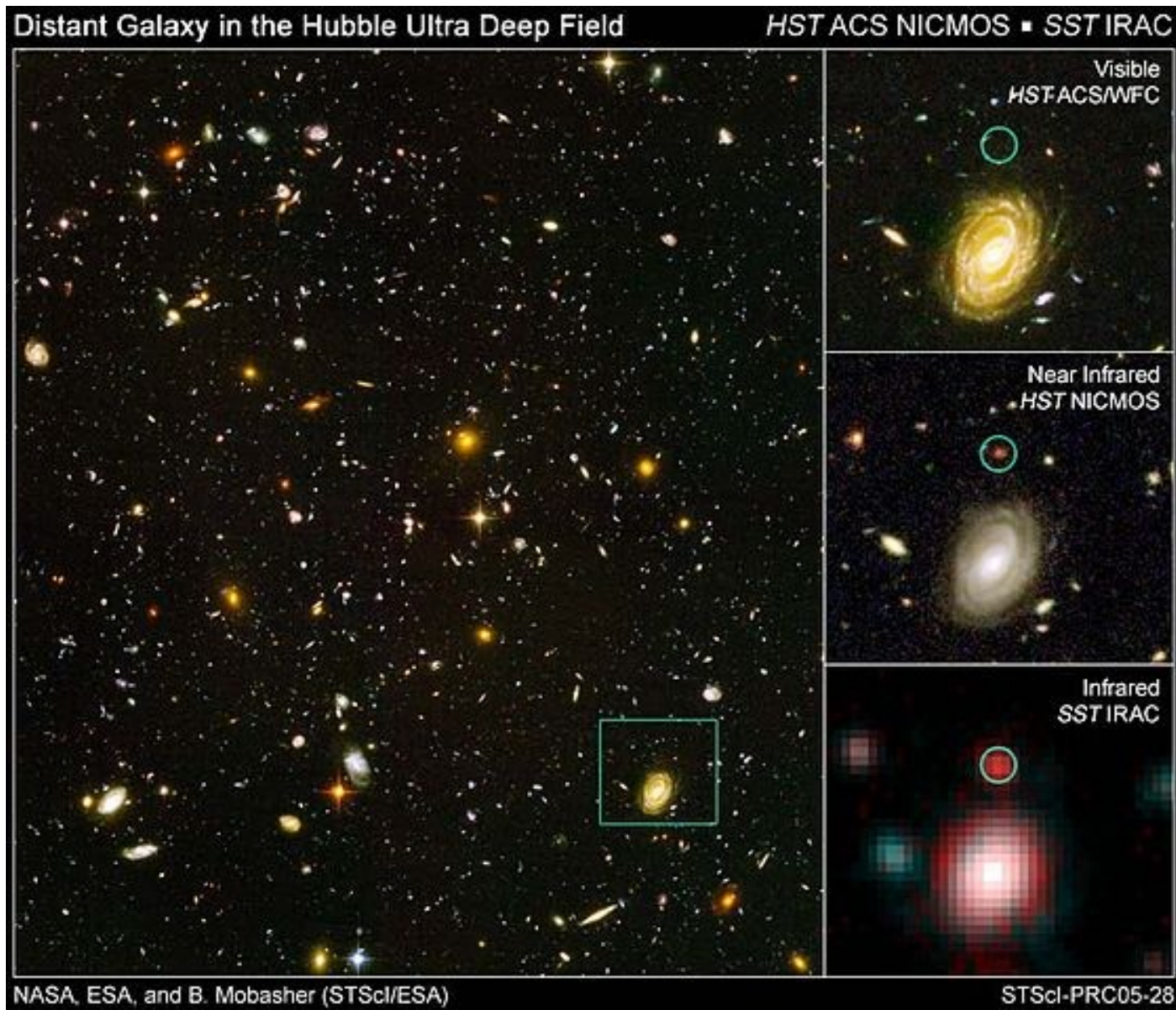
A HUDF

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



A HST XDF

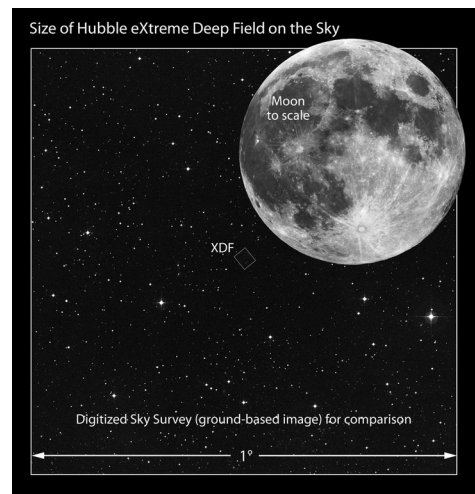
További finomítás: Extreme Deep Field (XDF).

2012-ben jelentették be. Ugyanaz a kép közepé,
de kisebb mező. 10 év alatt kapott képekből
2 millió s (23 nap) expozíciós idő.

Hullámhossz-lefedettség: UV-től közeli IR-ig.

5500 galaxis tűnt elő, közte 13,2 milliárd évesek.

Apró, fiatal galaxisok, amelyek később
nagyobb galaxisokká olvadnak össze.



XDF SUMMARY

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

XDF EXPOSURES

Filter	Exposure Time (ks)	# of Exposures
ACS/WFC		
F435W	152.4	164
F606W	174.4	286
F775W	377.8	460
F814W	50.8	362
F850LP	421.6	700
<i>ACS Total</i>	1177.0	1972
WFC3/IR		
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

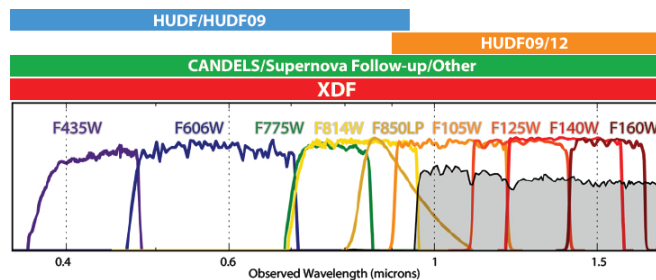
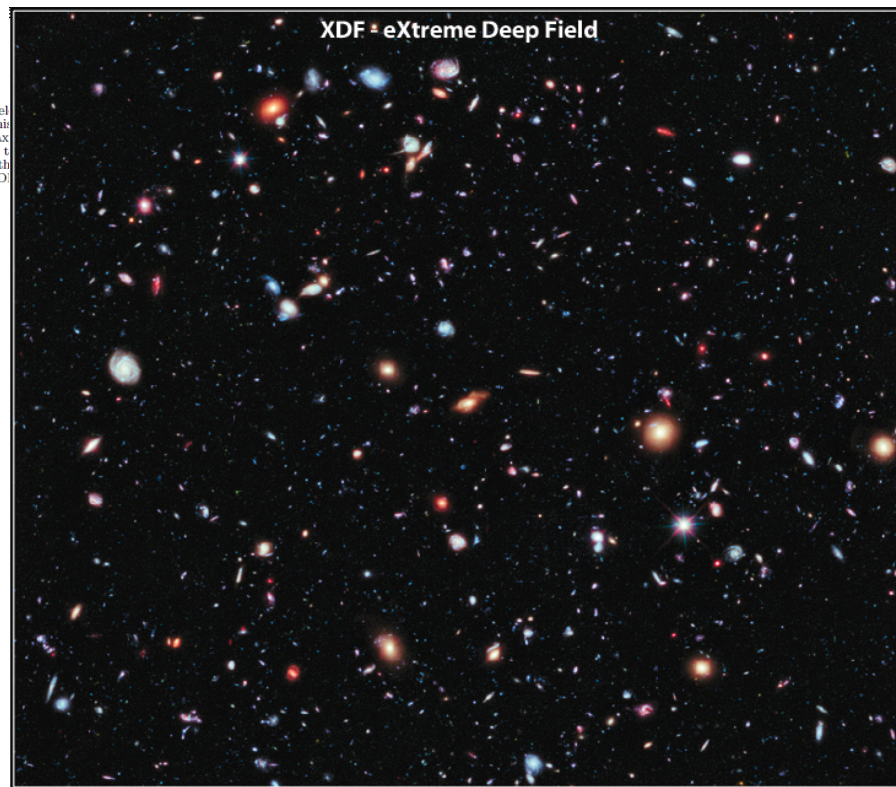
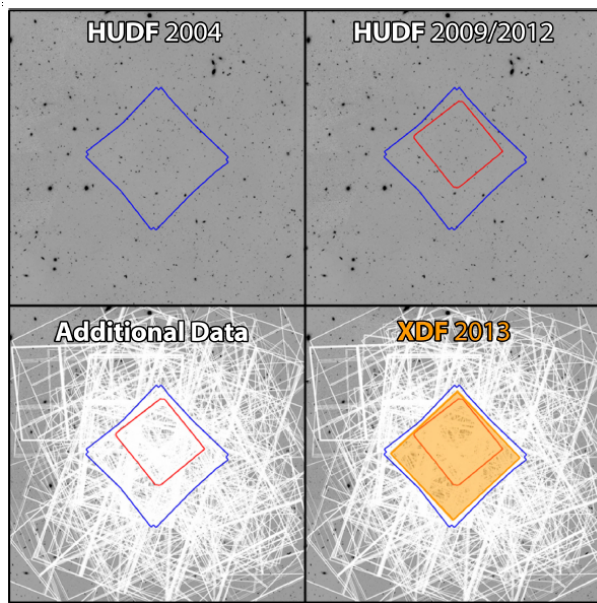
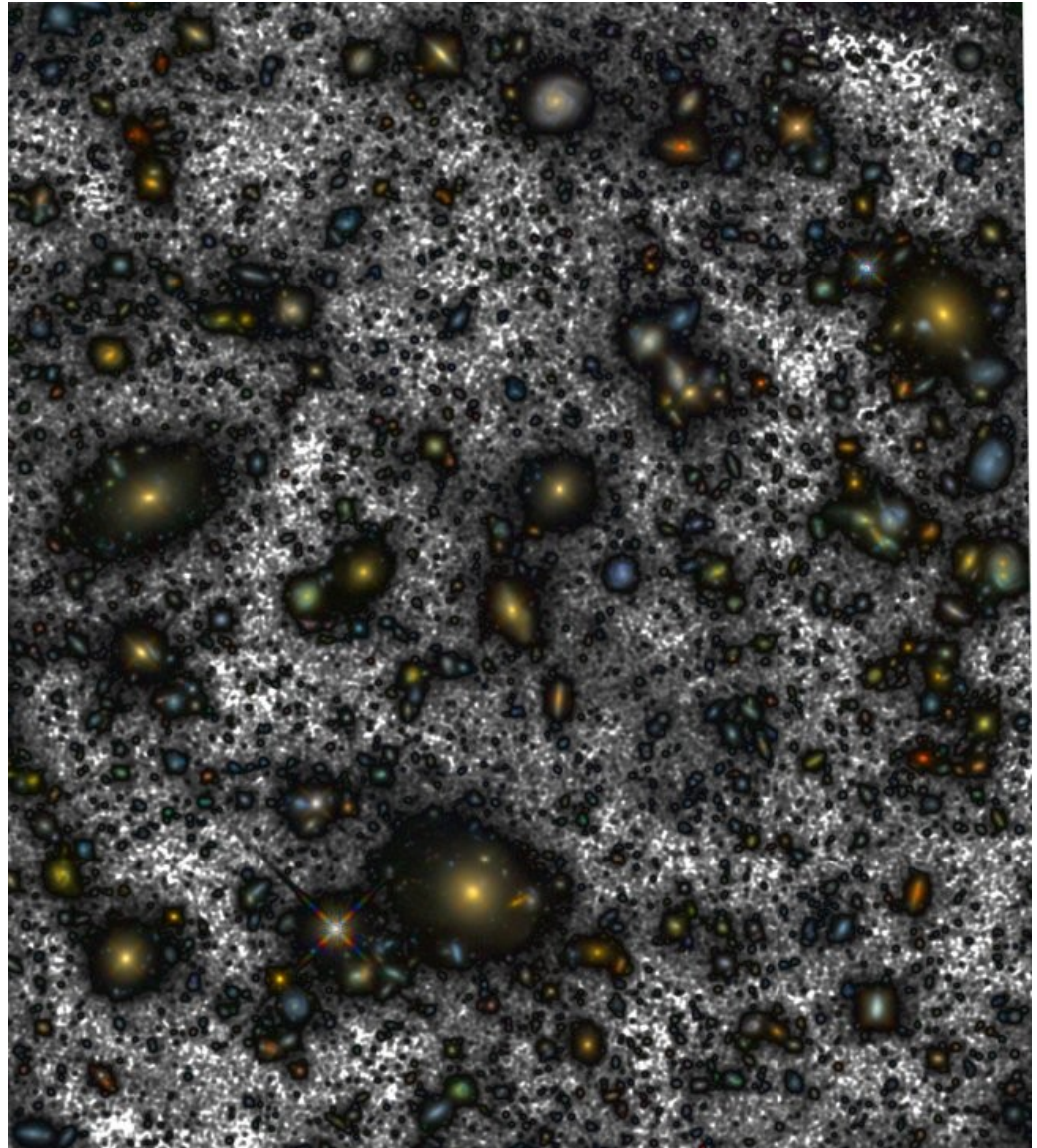


FIG. 1.— The XDF input datasets and spectral elements. The XDF combines *all* the data that have been taken on the HUDF field between 2002 and 2013 - this means HUDF, HUDF09, CANDELS, HUDF12 and many other programs. No other release has done this. This makes the deepest image from HST ever, with the 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 wavelengths probed by the ACS camera and it can only be seen in the near-infrared with the new WFC3/IR. The wide wavelength coverage of the 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 újraredukálásával, gondosabb háttérlevonással még „mélyebb” képet állítottak elő: ABYSS Ultra Deep Field. Ezen a képen néhány galaxis kiterjedése a korábbiaknál nagyobb.



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 1. Numbers of Cepheid Calibrators for Secondary Methods

Secondary Method	σ %	N (pre-HST)	σ_{mean} %	N (post-HST)	σ_{mean} %	ncertainties in H_0 for Secondary Methods
Tully-Fisher relation	$\pm 20\%$ ^a	5 ^b	$\pm 10\%$	21	$\pm 5\%$	
Type Ia supernovae	$\pm 8\%$ ^c	0	n/a	6 ^d	$\pm 4\%$	
Surface brightness fluctuations	$\pm 9\%$ ^e	1	$\pm 9\%$	6	$\pm 4\%$	
Fundamental plane	$\pm 14\%$	0	n/a	3 ^f	$\pm 10\%$	
Type II supernovae	$\pm 12\%$ ^g	1	$\pm 12\%$	4	$\pm 6\%$	

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 :

$H_0 = 72 \pm 2$ [random] km/sec/Mpc	[Bayesian]
$H_0 = 72 \pm 3$ [random] km/sec/Mpc	[frequentist]
$H_0 = 72 \pm 3$ [random] km/sec/Mpc	[Monte Carlo]

A Hubble-állandó a HST alapján

Freedman et al.:

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

rand. sziszt. hiba

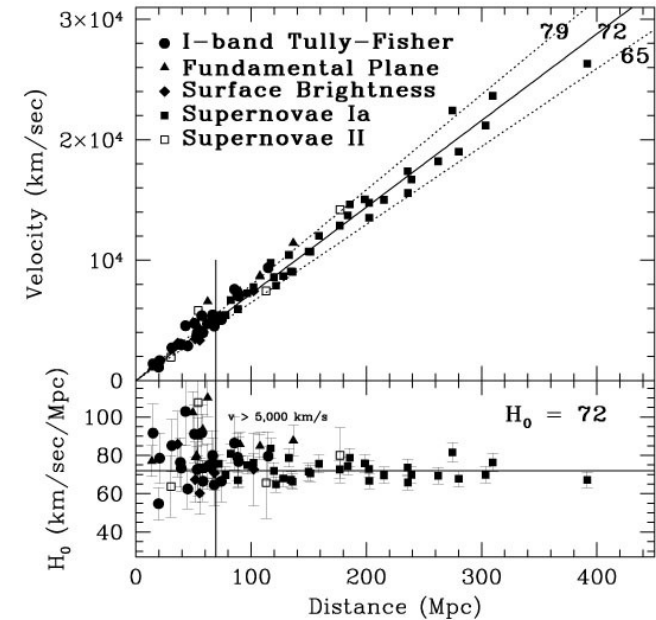
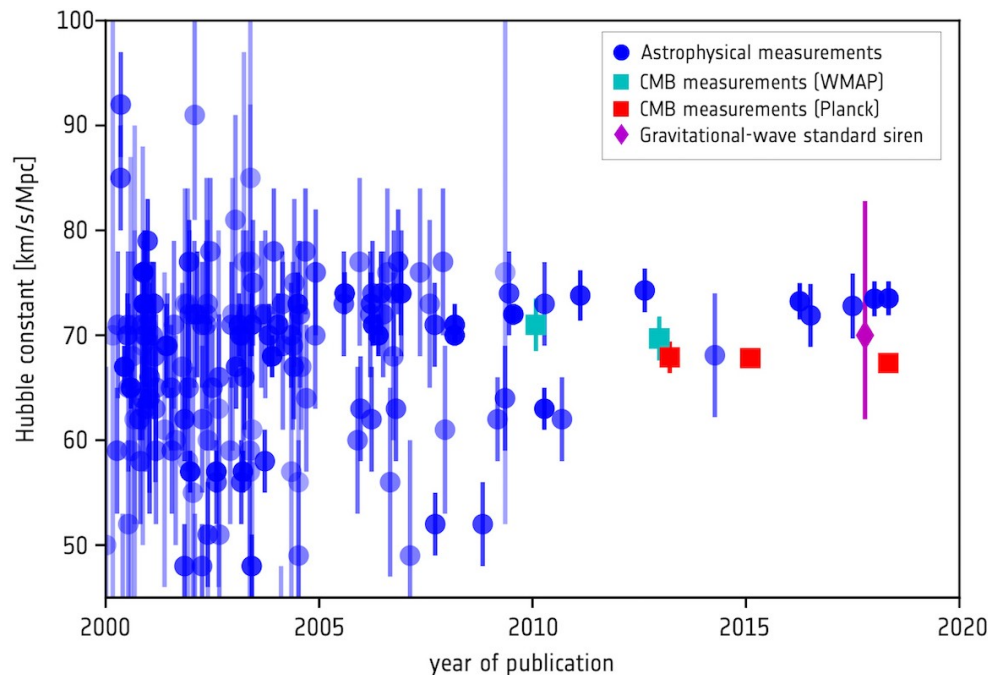
(viszont Sandage et al. SNIa alapján:

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

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

Viszont a Planck 2018-ban közölt eredménye:

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



Exobolygók a HST-vel

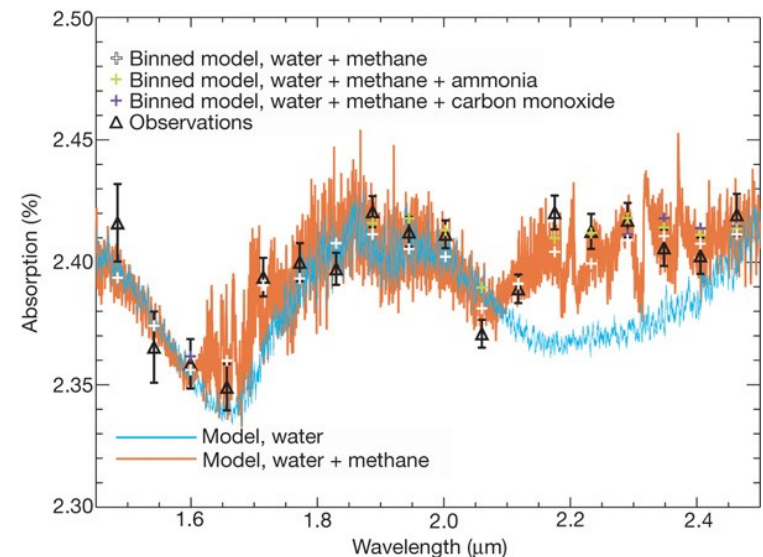
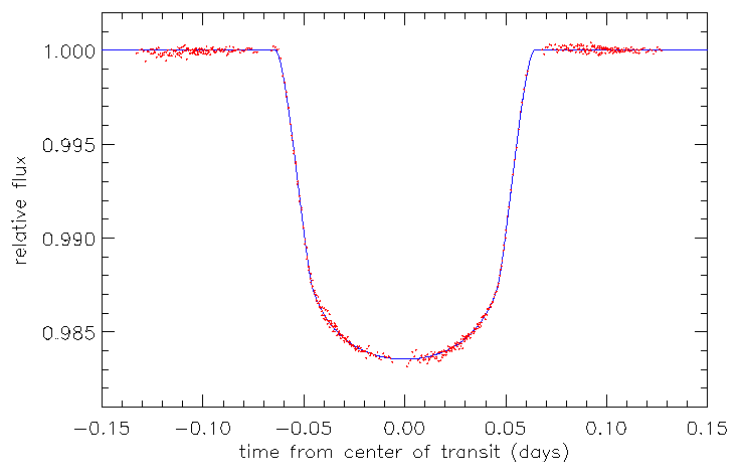
Az exobolygó kutatás korai aspektusai a HST-vizsgálatok alapján:
cirkumsztelláris korong, proplid.

1995: 51 Peg, v_{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_{plan}/R_* négyzetével arányos), a v_{rad} méréséből pedig a bolygó tömege is ($i=90^\circ$).

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

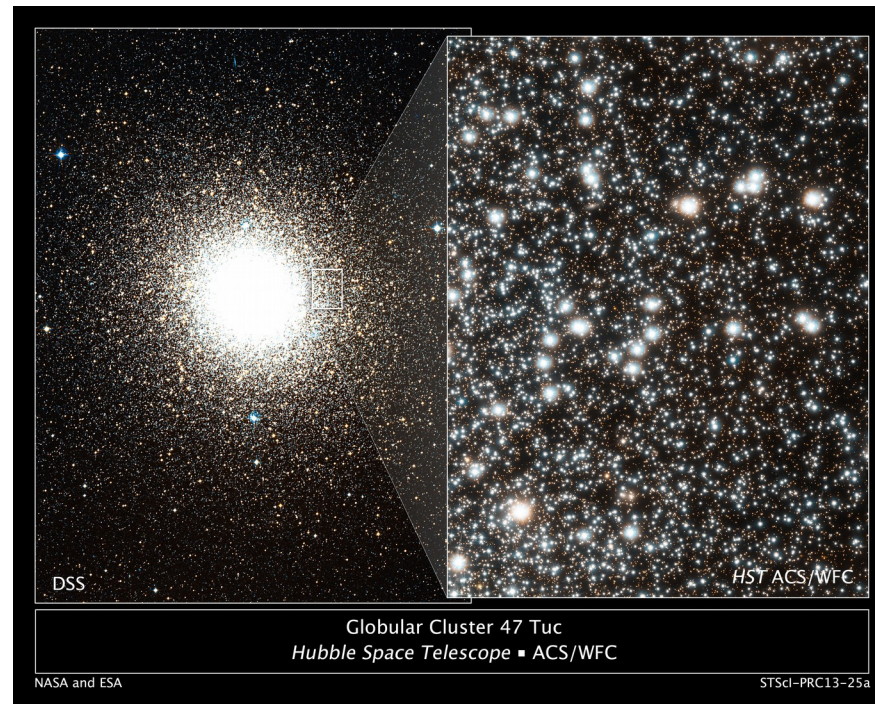
Az átvonulás valószínűsége: $Pr_{\text{tran}} \simeq 23.8\% \frac{[M_{\text{nap}}]}{M_*} \frac{[R_{\text{nap}}]}{R_*} \frac{[P_{\text{nap}}]}{P_{\text{orb}}} \simeq 23.8\% M_*^{-1/3} R_* P_{\text{orb}}^{-2/3}$

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).

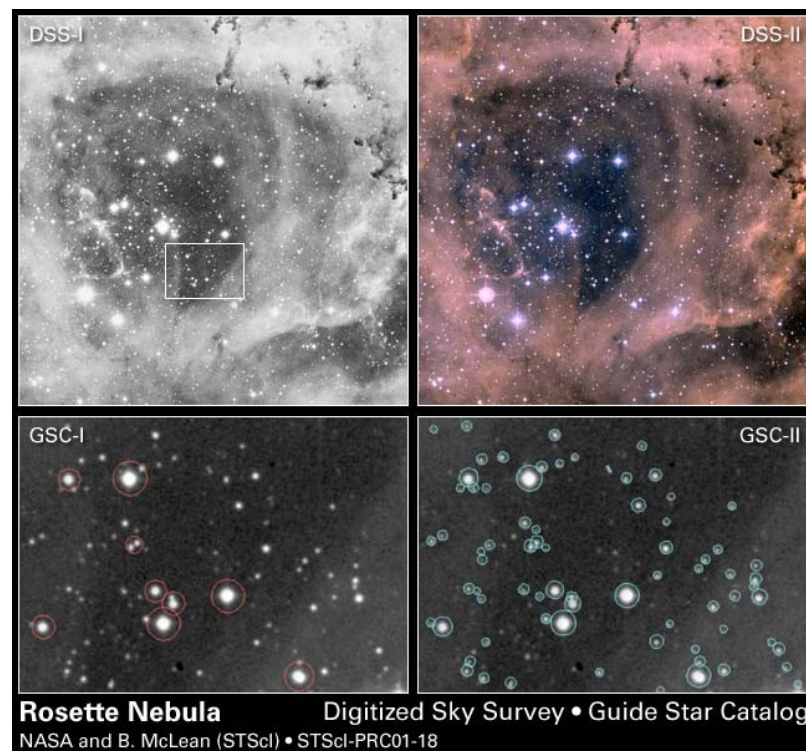
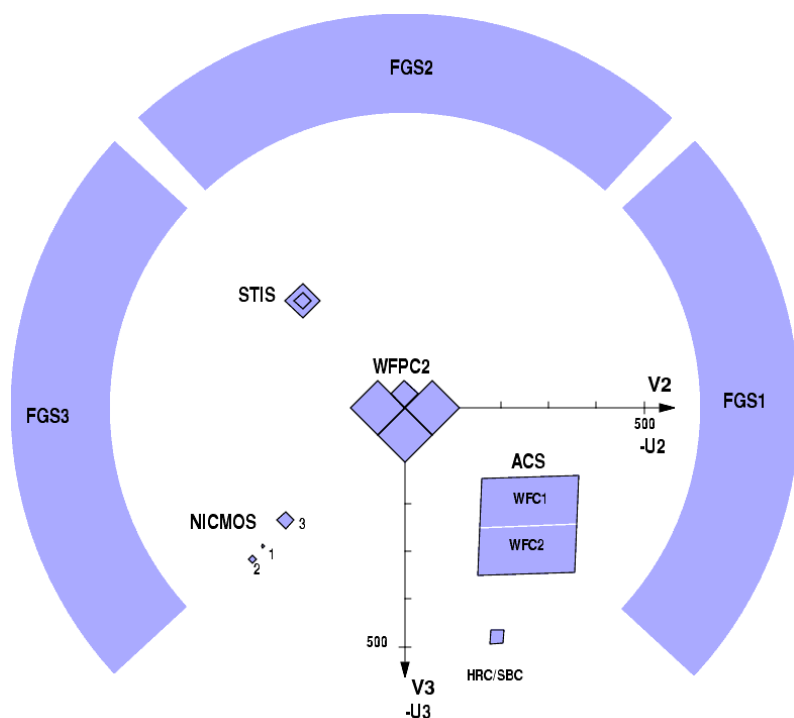


Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

GSC: Guide Star Catalogue - 1989-ben 15^m-ig.

2001-ben: GSC II - 19^m-ig 500 millió csillag.

A HST már 29 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.

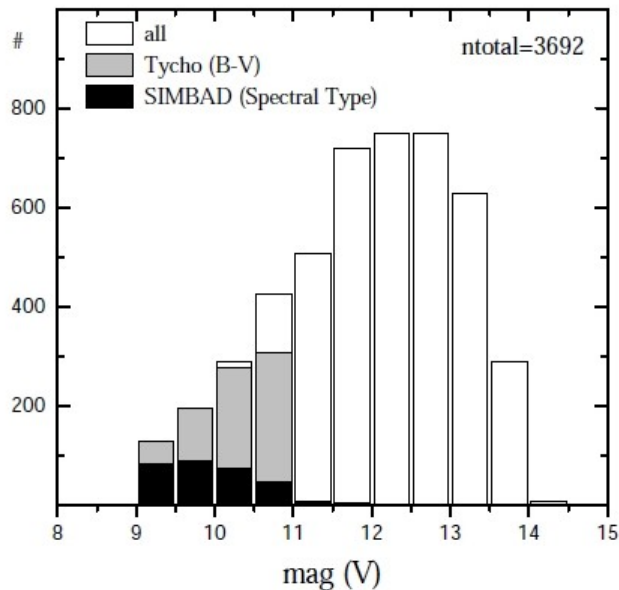
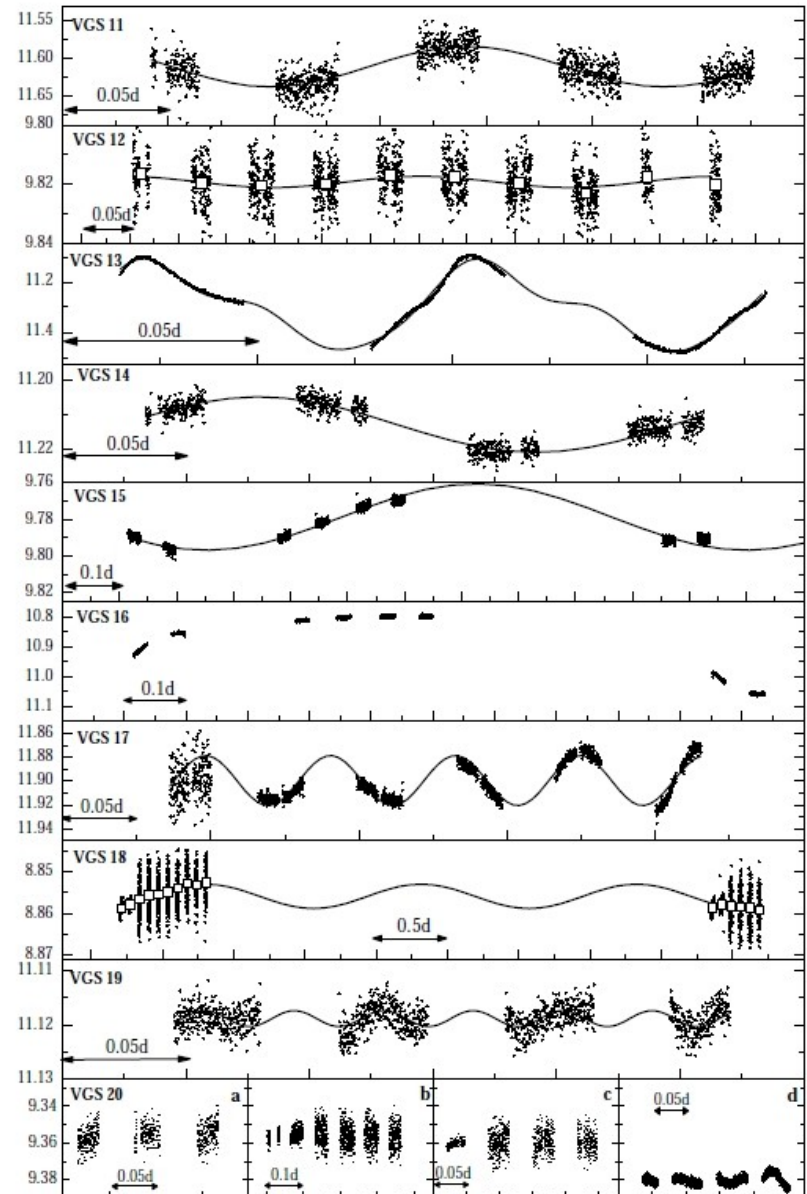
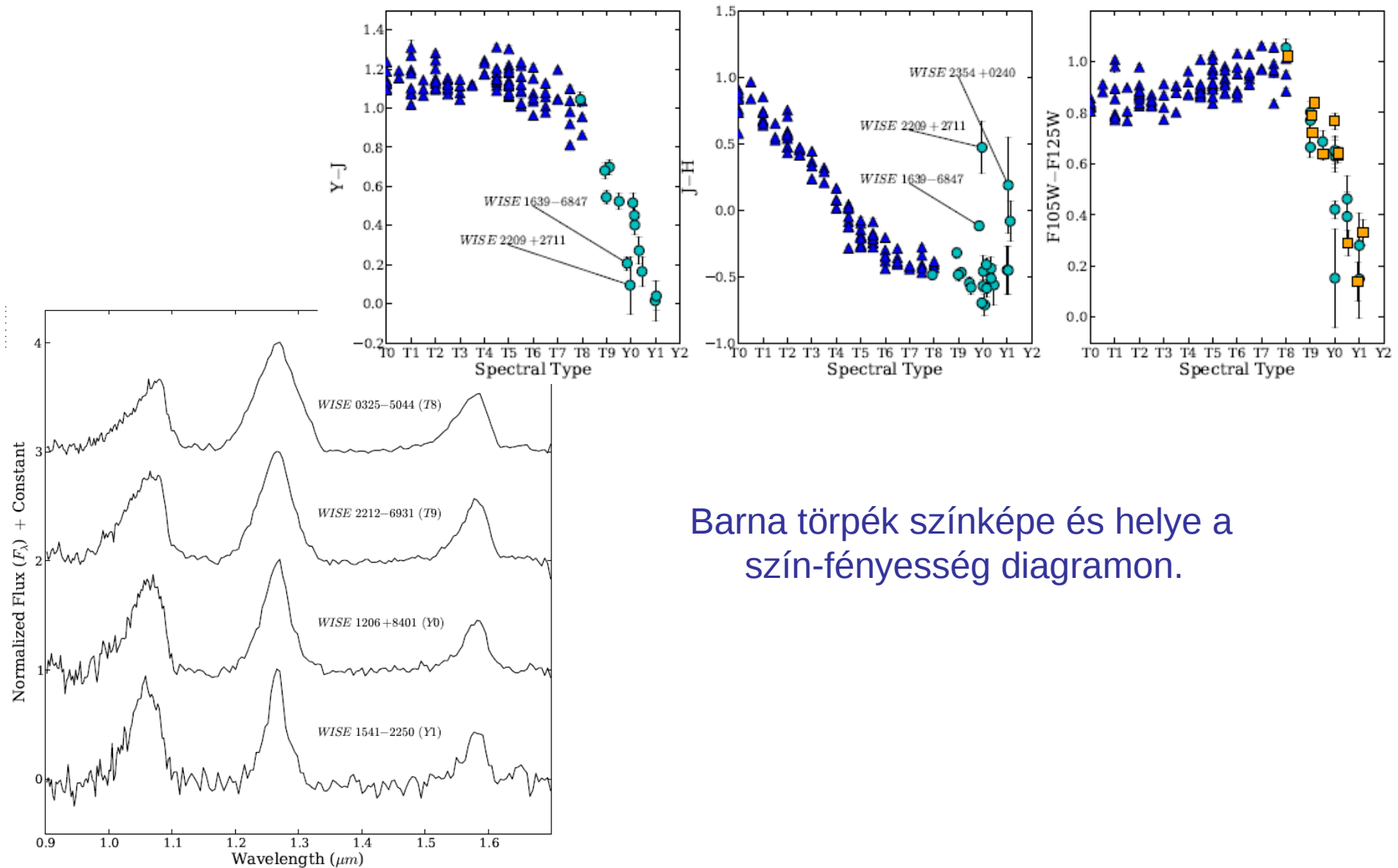


Fig.1. Brightness distribution of total sample of 3692 guide stars analyzed to date (white columns), of guide stars with TYCHO $B - V$ values (grey columns), and of guide stars with published spectral types (black columns)



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)

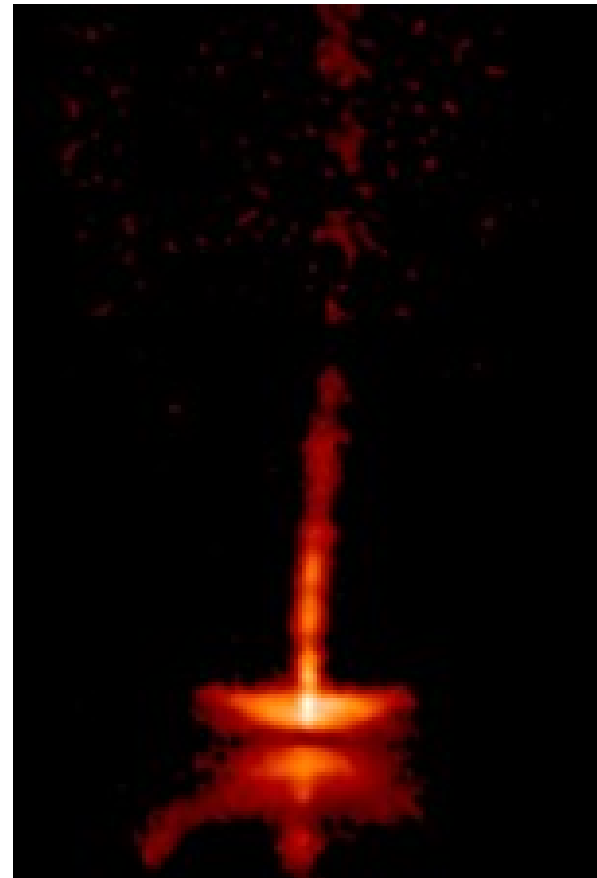
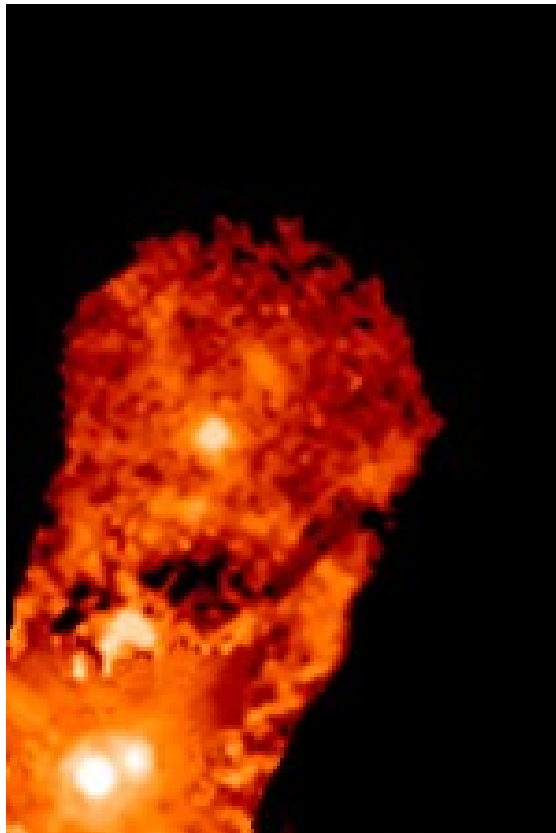
Orion-köd: 3000 csillag + barna törpék, 1500 fényévre. A kép telehold méretű (jobbra lent).



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

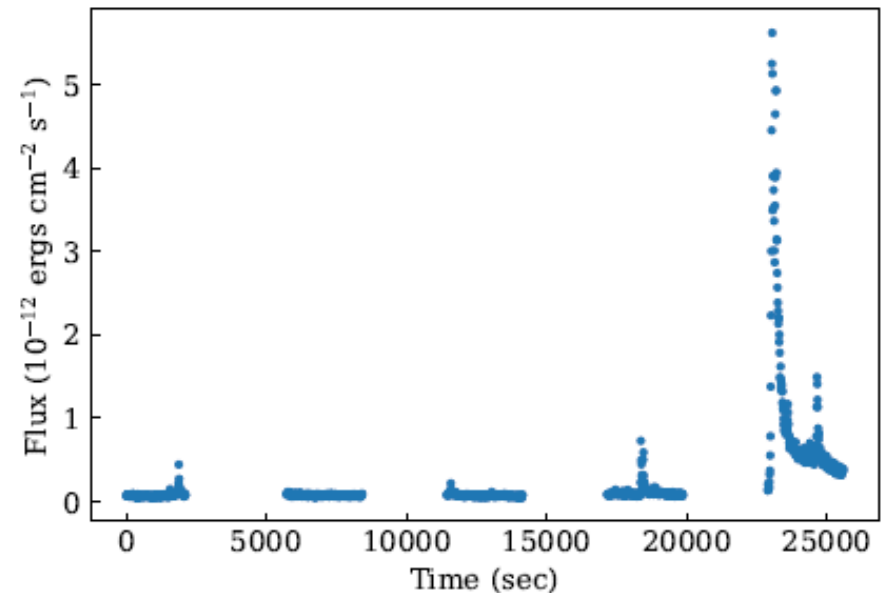
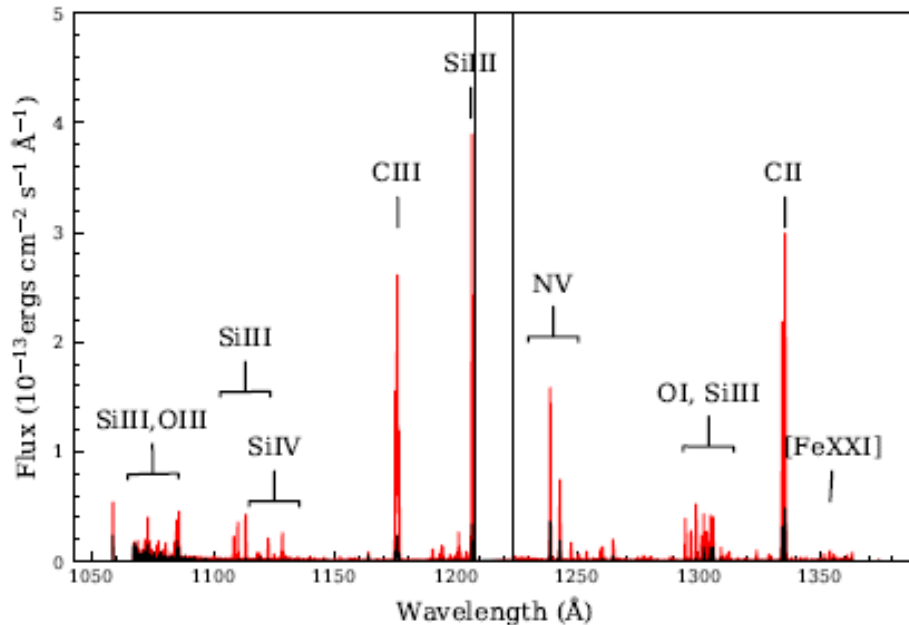
XZ Tauri: vizuális kettős, párja (40 CSE-re) a HL Tauri, a Tau–Aur molekulafelhőben (alig 1 millió éves). A gázfelhő 600 CSE méretű, 180 km/s sebességgel távolul, 30 éve alakult ki. (balra lent)

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



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

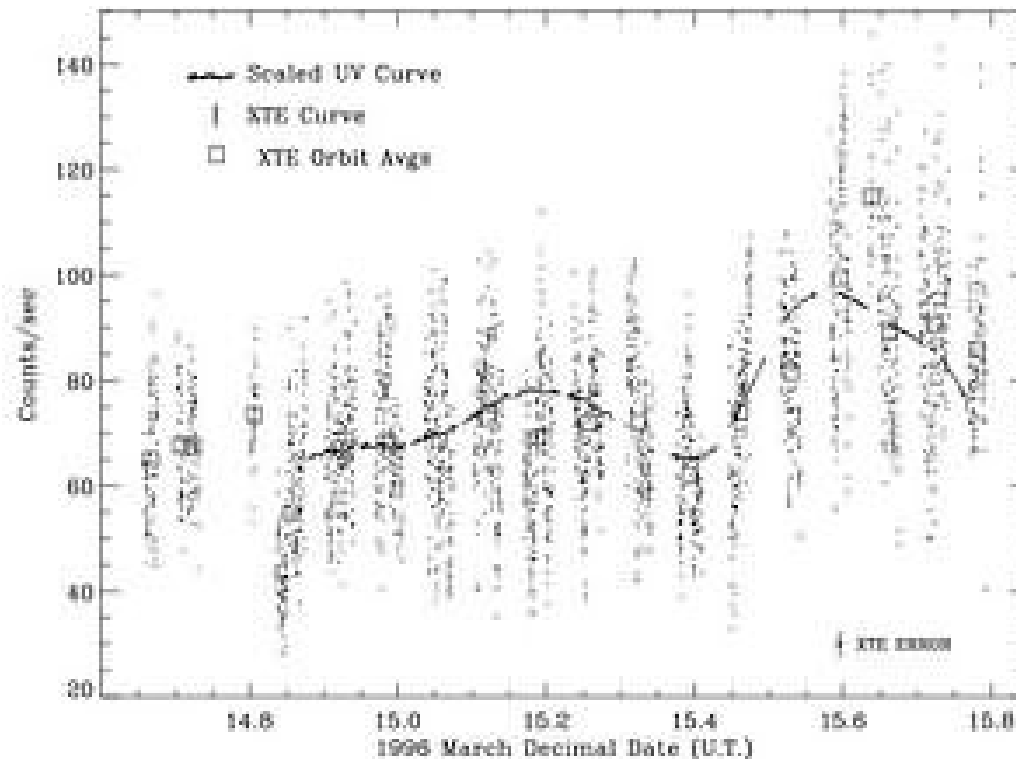
Nagy energiájú UV fler a **GJ 674** törpecsillagon (M2,5V színeképtípusú).
Sok kis fler után egy majdnem egyórás kitörés a távoli UV-ben $10^{30,75}$ erg energiával.



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Gamma Cas: az első ismert Be-csillag (600 fényévre, 2 magnitúdós).

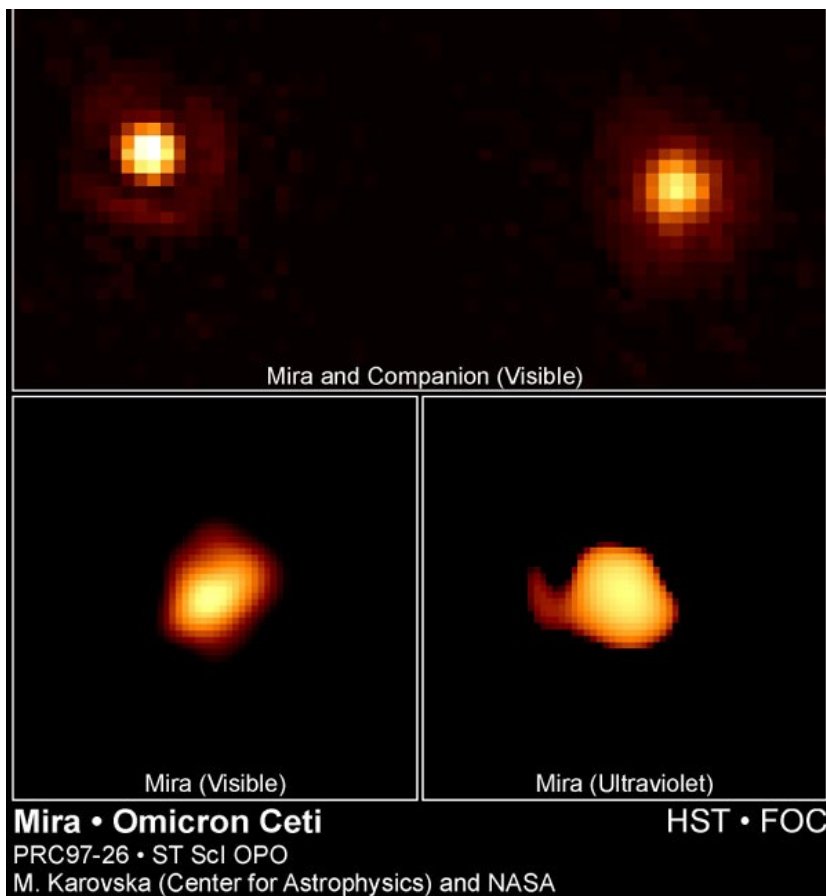
Rossi-XTE (röntgen) + IUE (UV) + HST (UV): 100 millió fokal (tízszor forróbb, mint a napkitöréseknél), a 27 órás rotációs periódus felismerhető az intenzitásoknál (szimultán változás UV-ban és röntgenhullámhosszakon).



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

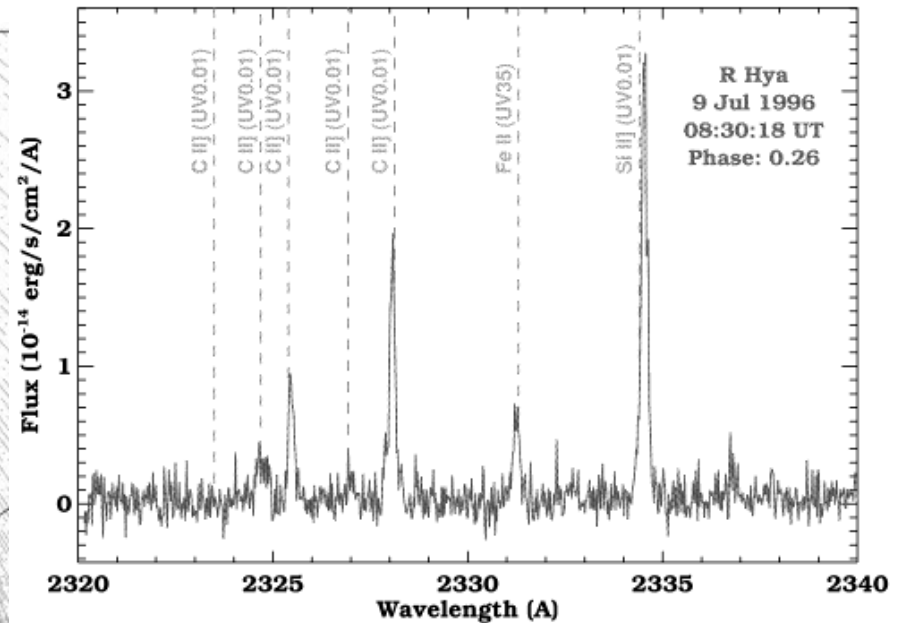
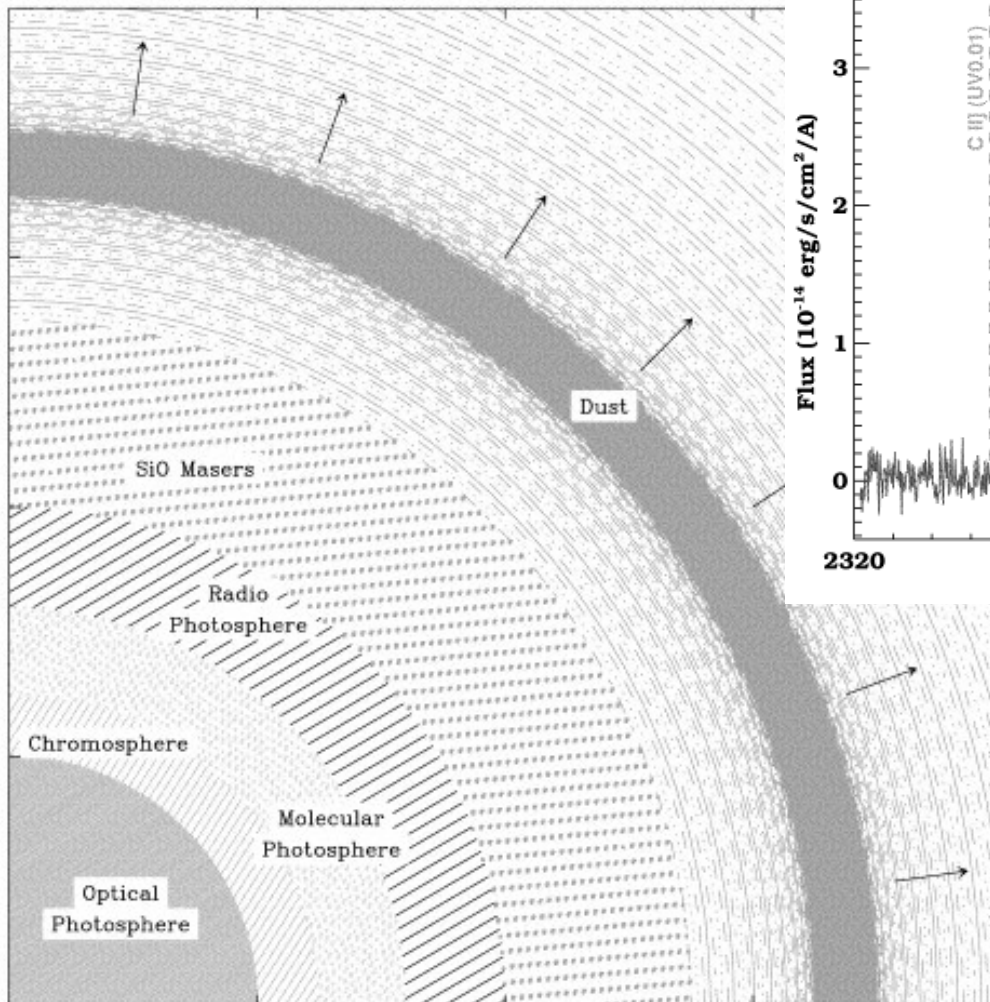
Mira Ceti: $P=332$ nap, 400 fényévre, $R=700R_{\text{Nap}}$;
szeparáció: $0,6''$. UV-ben nyúlvány a Mira B (VZ Ceti)
felé. A Mira uszályát a GALEX ismerte fel (UV-ben).

VZ Ceti (fehér törpe + akkréciós korong).
Az A-B pár keringési periódusa kb. 400 év.



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

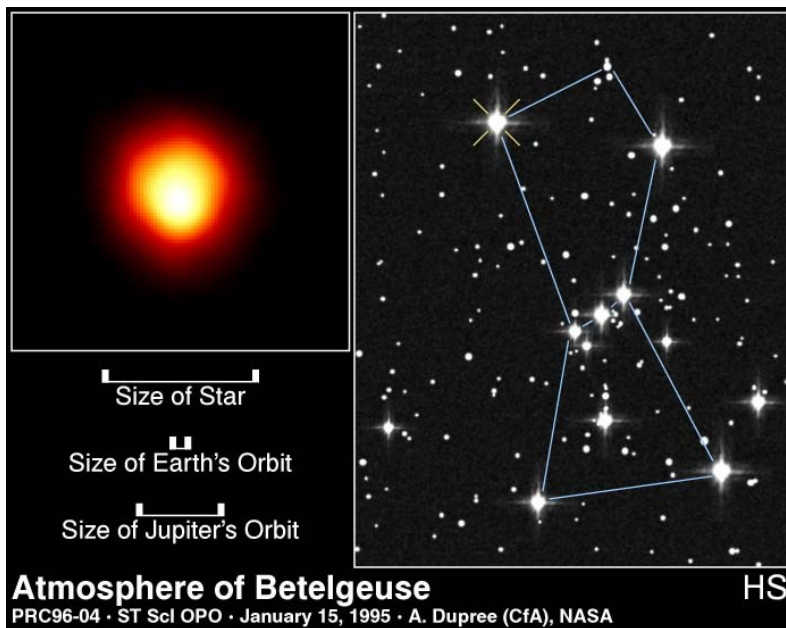
R Hya GHRs-színképe: emissziós vonalak (C, Si, Mg) a mirák légköri rétegződésére utalnak.



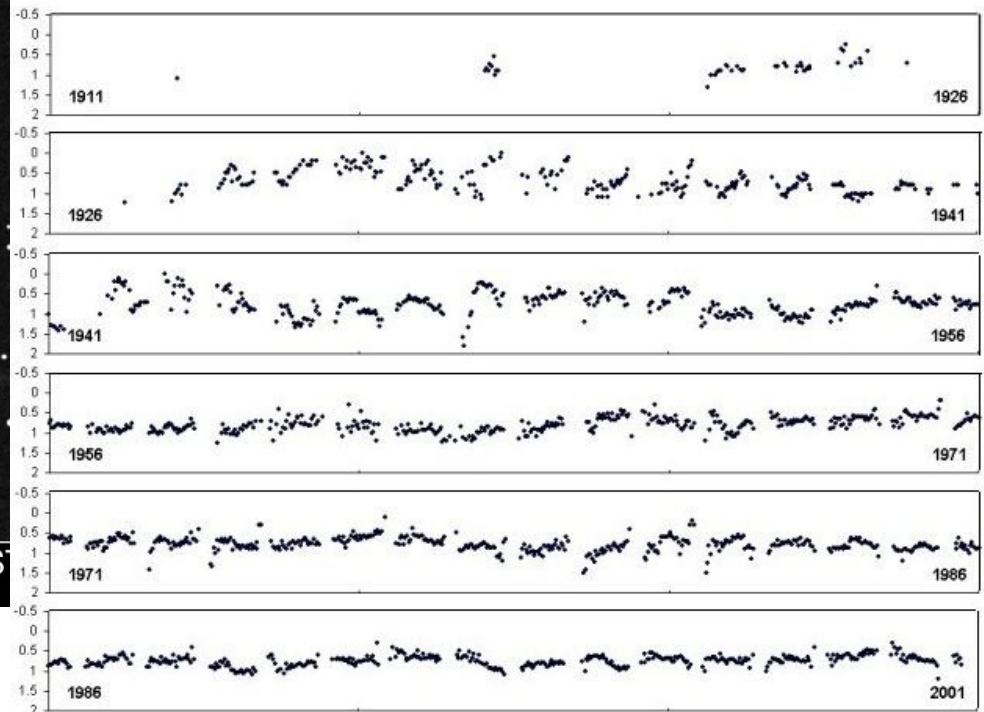
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Betelgeuze: 0,4-1,2 magnitúdó közötti fényességingadozás (SR).

John Herschel fedezte fel a fényváltozását 1836-ban. 425 fényévre levő, 3100 K hőmérsékletű (M2Iab) szuperóriás. Forró folt a felszínén. UV-ben kétszer akkora, mint látható fényben (kiterjedt kromoszféra). IUE-vel 420 napos oszcillációt is találtak.

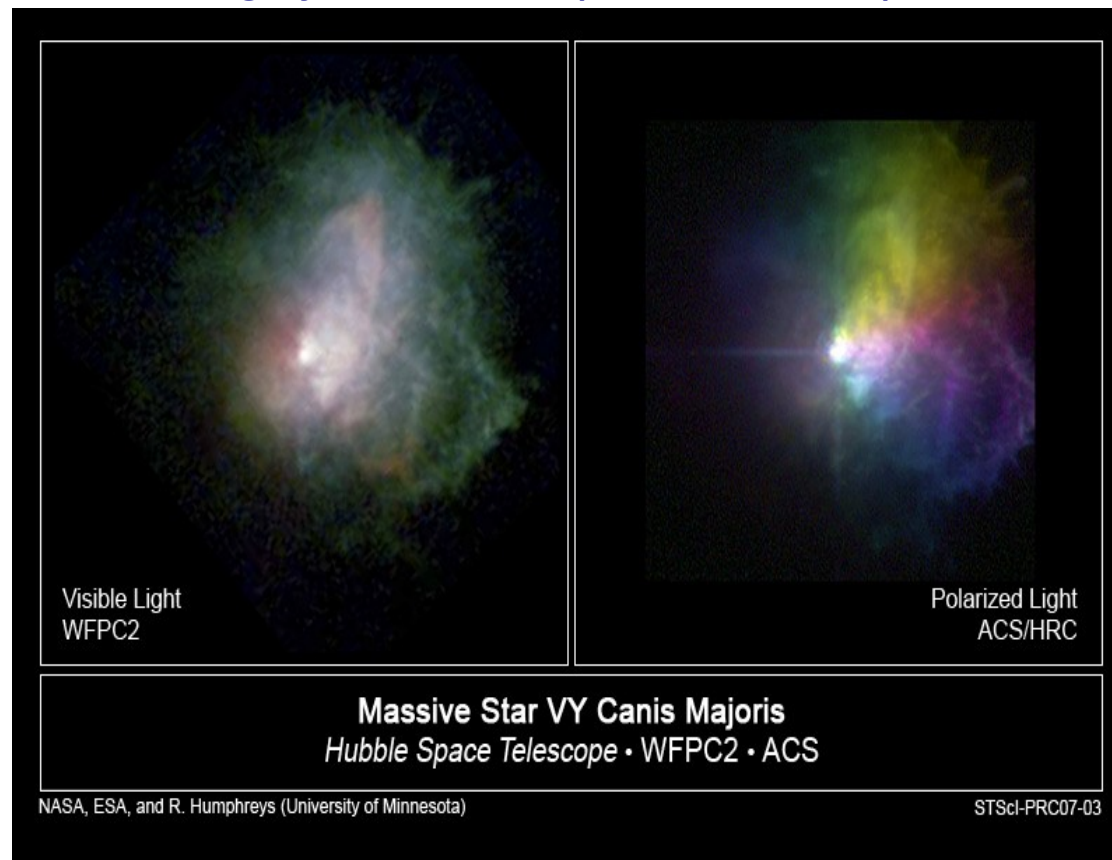


Alpha Orionis (Semiregular)
1911-2001 (10-day means)



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

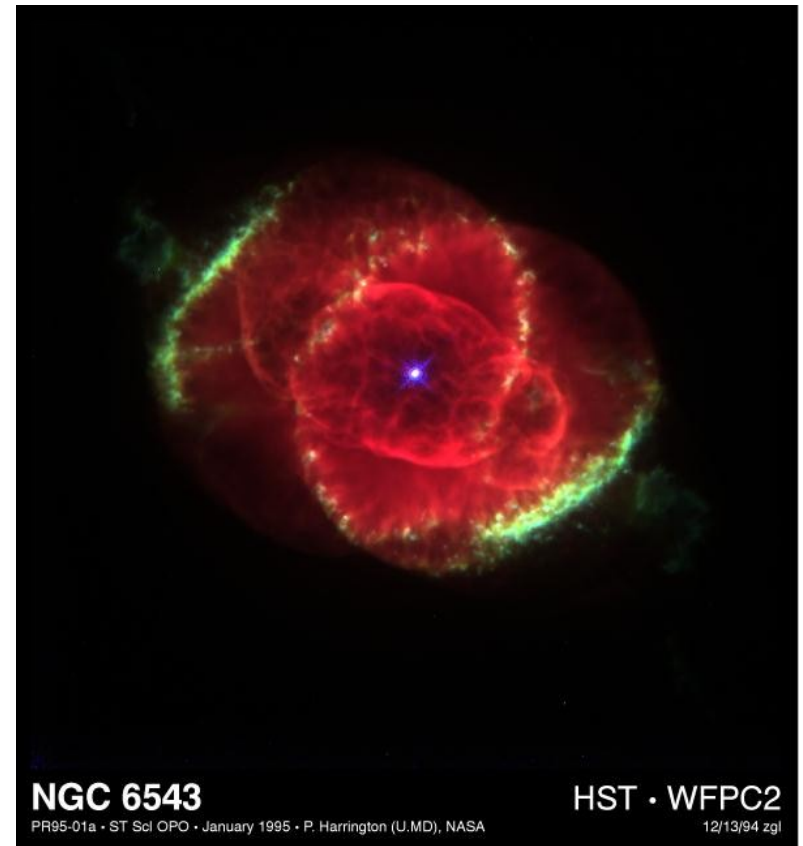
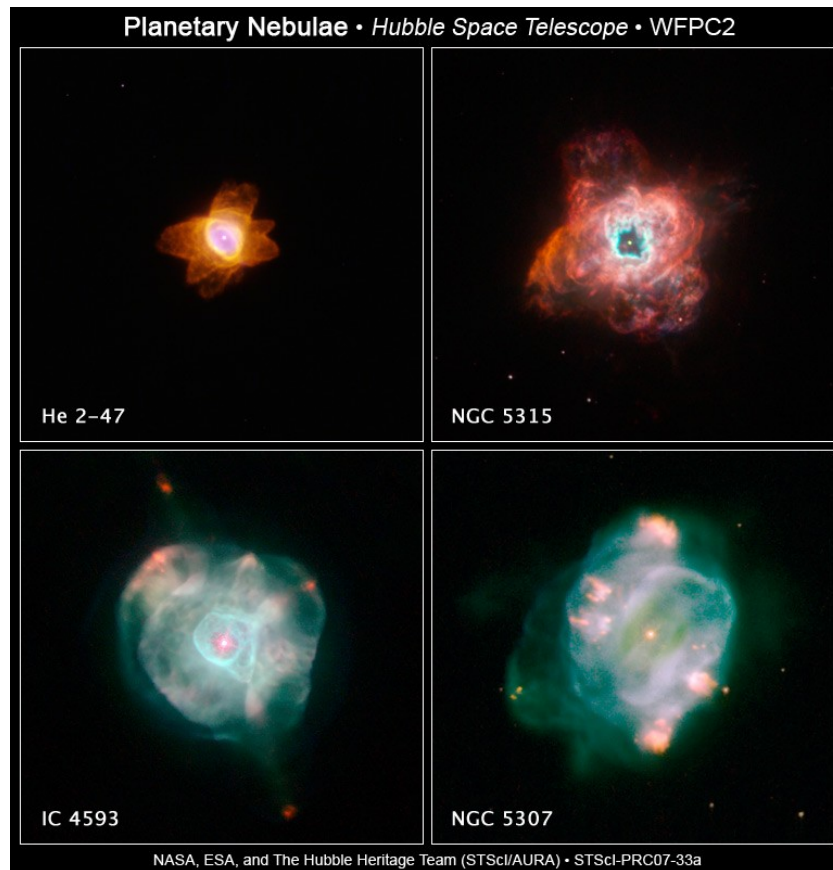
VY Canis Majoris: 2000 R_{Nap} sugarú hiperóriás, 5000 fényévre. 4500 CSE sugarú reflexiós köd veszi körül. 1801 óta szekuláris halványodás + hónapos-éves időskálán 0,5-3 magnitúdós fényességingadozás. A kitörések során tízszeresére nő a tömegvesztés, és a csomók alapján 3D-ban rekonstruálható is. Tengelyszimmetria (PN, SN1987A).



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. Kettős.



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Planetáris ködök szimbiotikus mira
társcsillaggal

He 2-147: V347 Nor (jobbra)

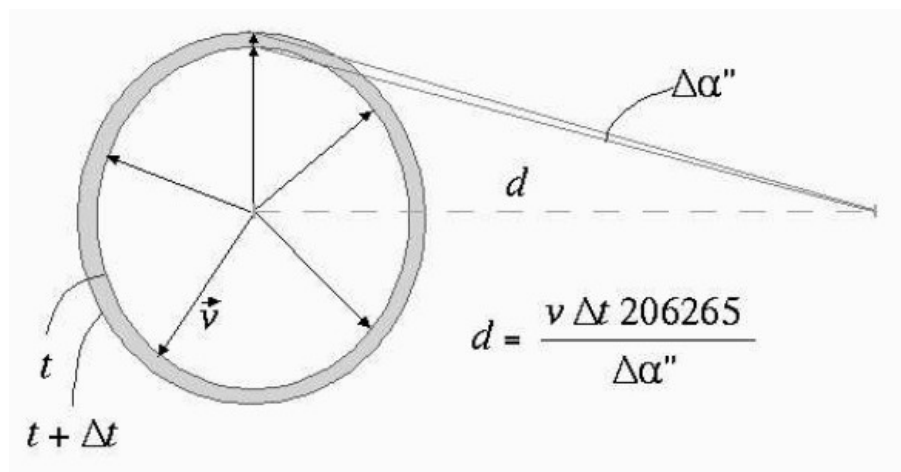
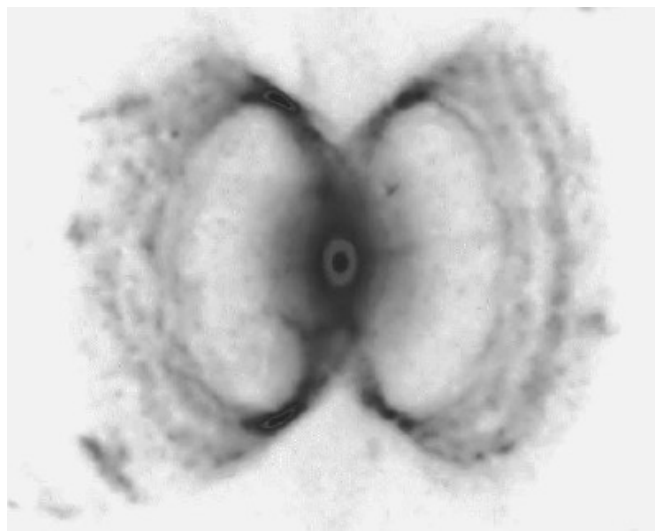
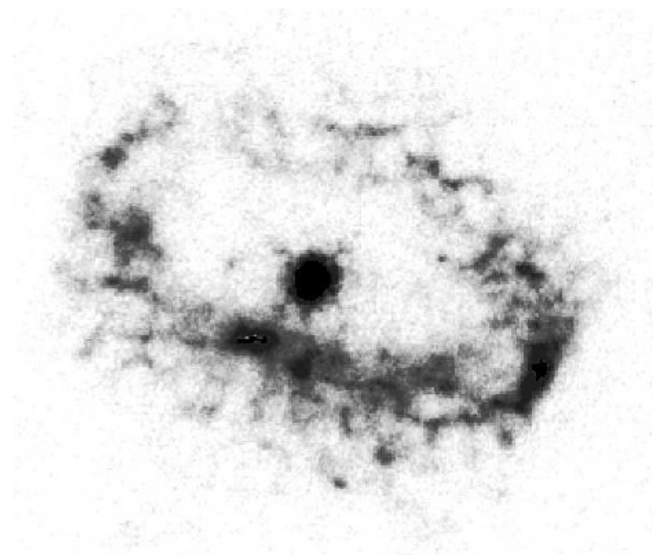
P>250 nap, A = 1 mag J-ben

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

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

Távolságmeghatározásra jó!

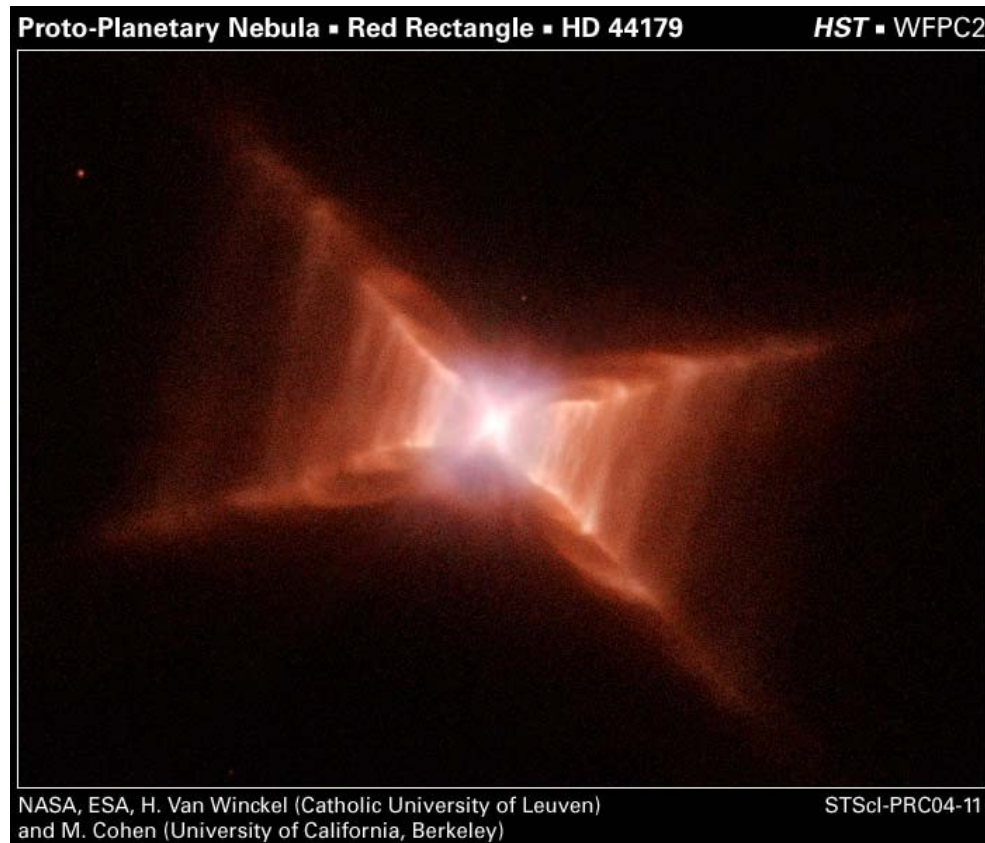
(tágulási parallaxis – majd a növőknál is)



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

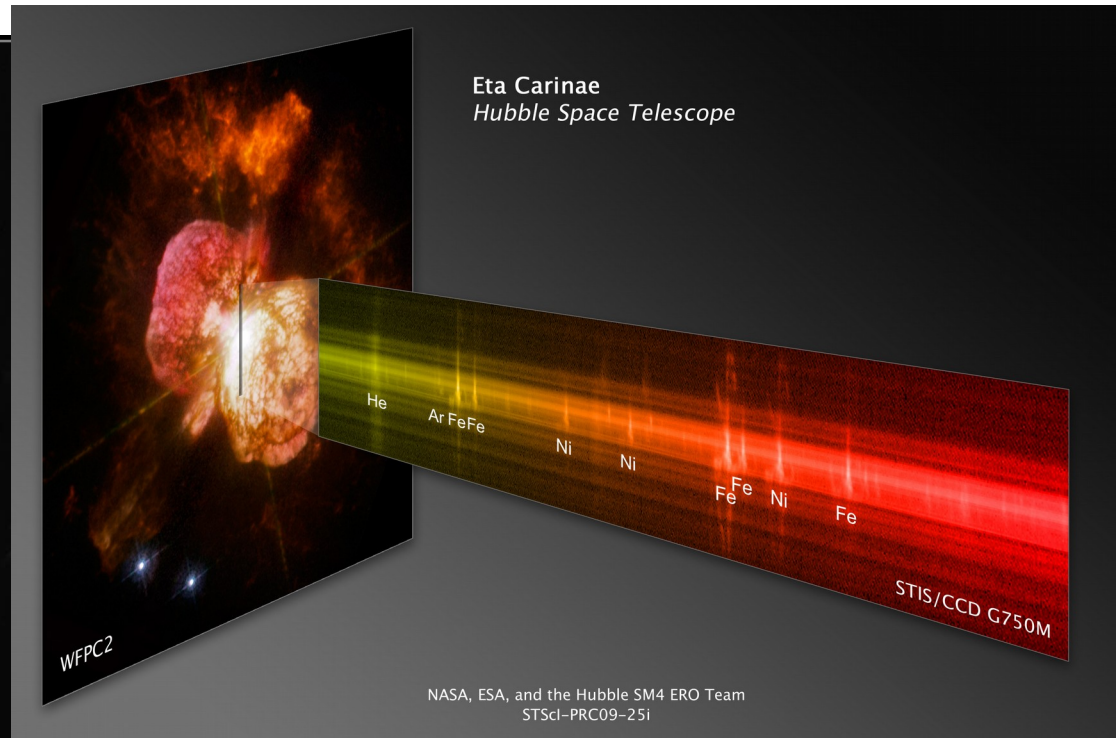
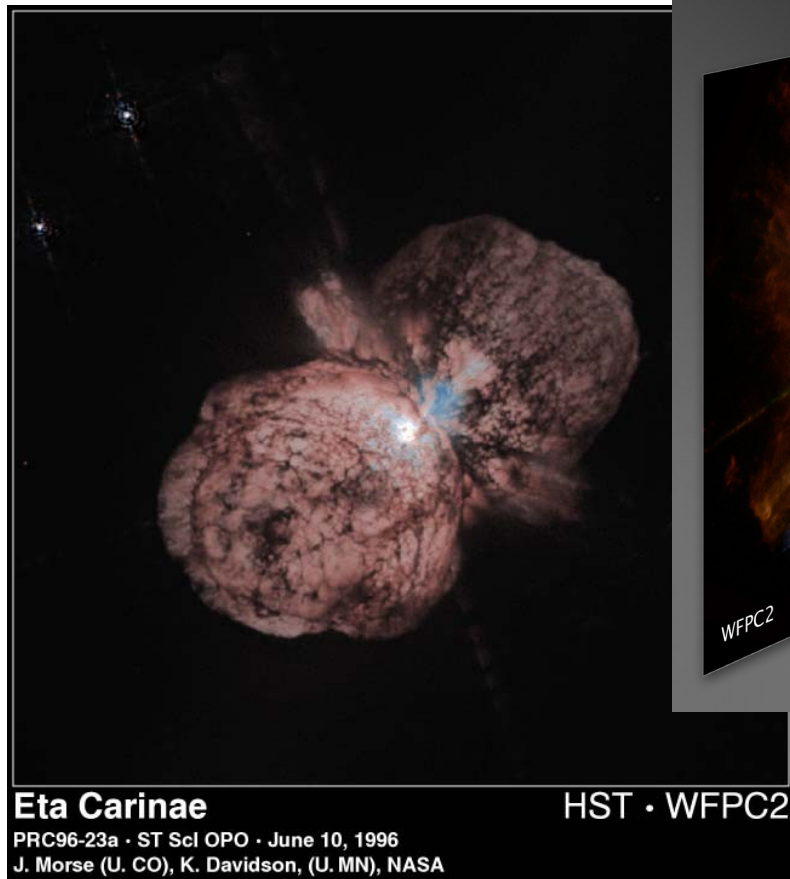
Vörös négyszög: protoplanetáris köd a HD 44179 kettőscsillag körül. Színe a porfelhőbeli molekuláktól származik (szénhidrogénektől). X alakú, nem négyszög: bipoláris kiáramlás + tömegvesztési epizódok.

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



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

η Carinae: 8000 fényévre. Jobbra: 3 fényévnyi rész a 200 fényév kiterjedésű Carina-ködből. UV: kék, optikai: **zöld**, IR: **vörös**



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Az η Carinae környezeti hatásai



Figure 2. The color Hubble Heritage image of the inner Carina Nebula including the Tr 14 and Tr 16 clusters, the Keyhole, and η 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

Az η Carinae környezeti hatásai

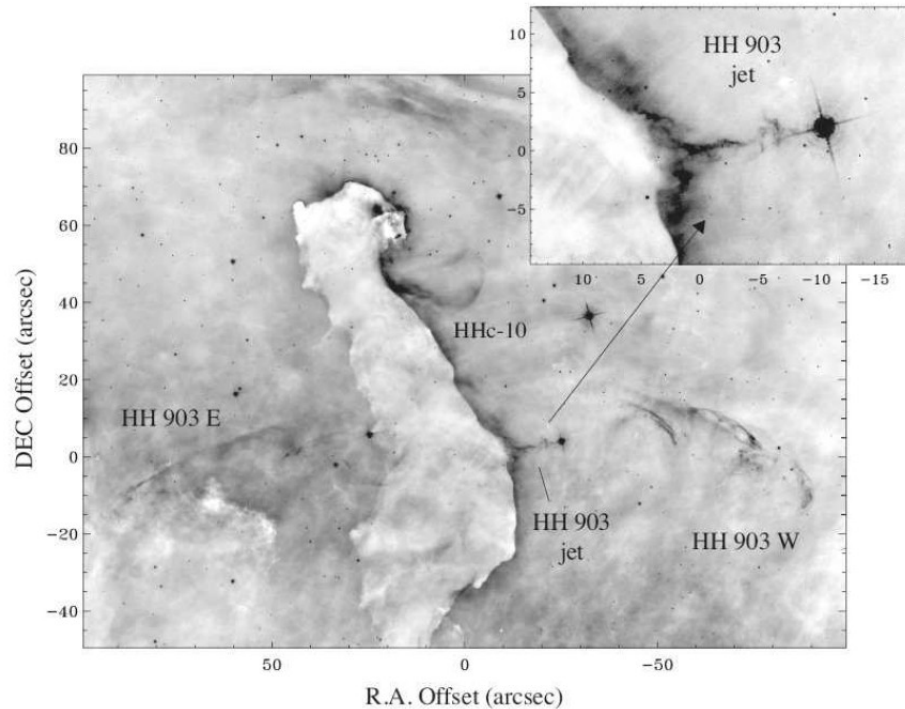


Figure 6. ACS H α image of the large dust pillar (G287.88-0.93) in the South Pillars of Carina. The field contains the parsec-scale bipolar outflow HH 903, which flows east and west to either side of the middle of the pillar and is over 2 pc in length. The field also contains the candidate jet HHc-10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

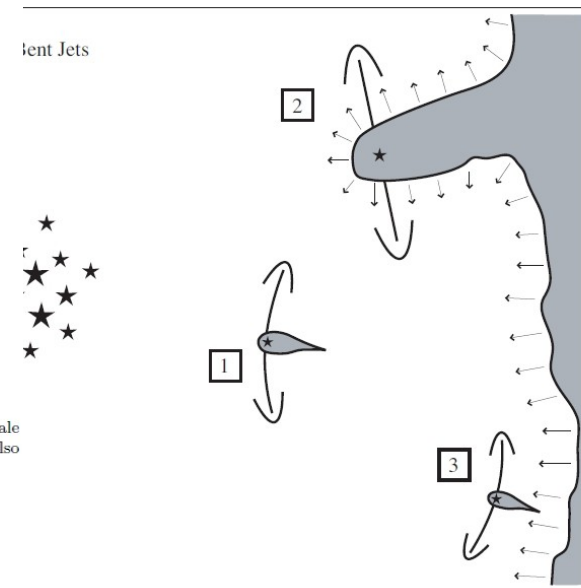


Figure 33. A schematic illustration referring to how HH jet axes may get bent by external mechanisms, as discussed in §6.2. A cluster of massive stars is located at left. Case 1 refers to a jet that is bent away from the massive stars by radiation or winds. Case 2 refers to a jet whose axis is not bent 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.

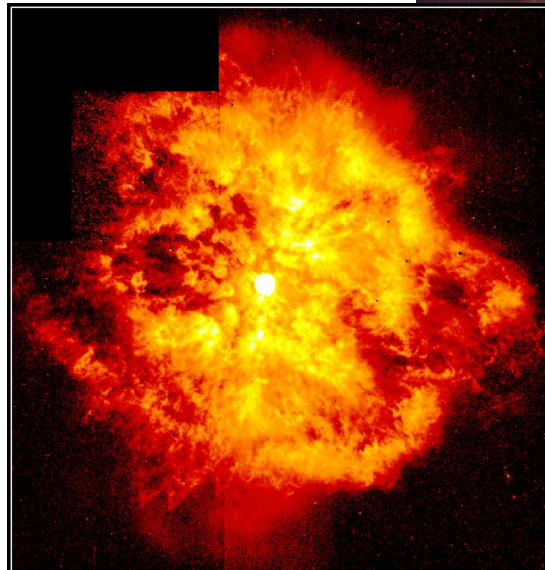
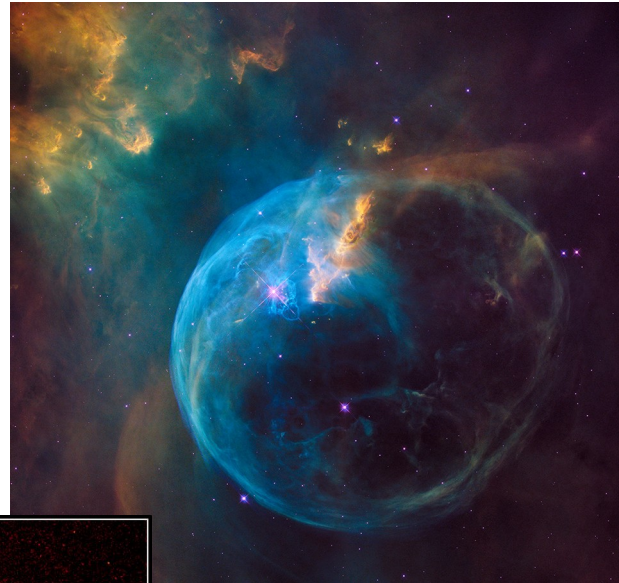
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Buborék-köd (NGC 7635):

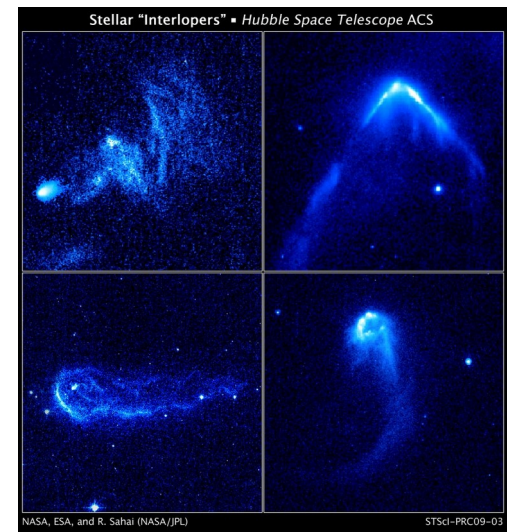
Nagy tömegű, forró csillag körül
7100 fényévre,
7 fényév átmérőjű
(jobbra fent)

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



NASA, ESA, and R. Sahai (NASA/JPL) STScI-PRC09-03

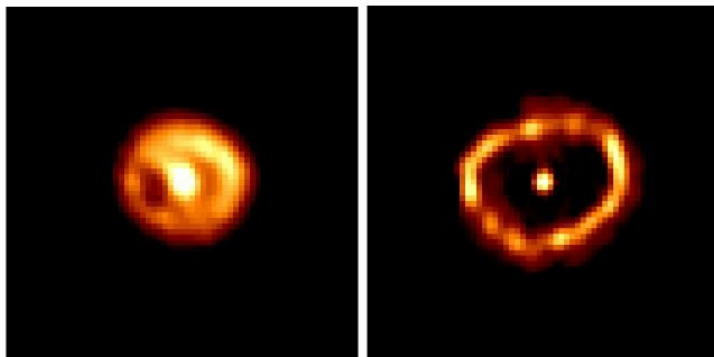
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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

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

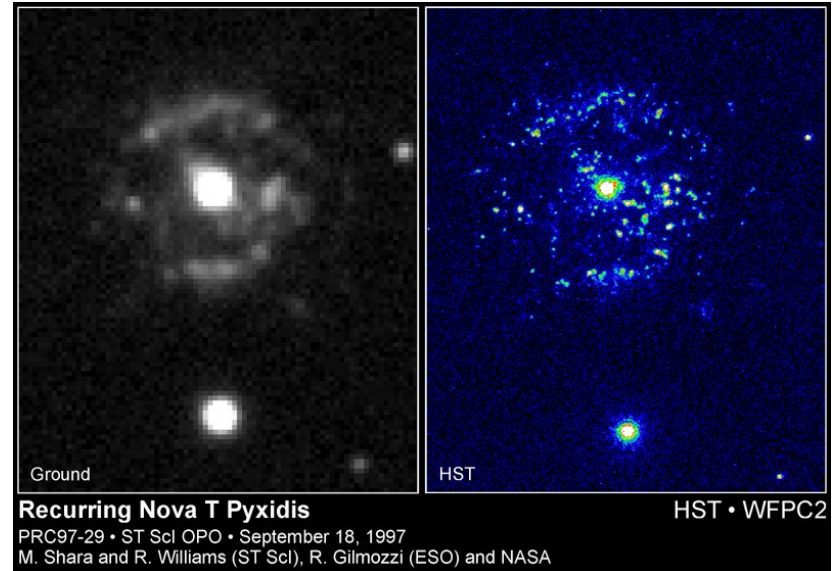
Nova Cygni 1992

Hubble Space Telescope
Faint Object Camera



Pre-COSTAR
Raw Image

With COSTAR
Raw Image

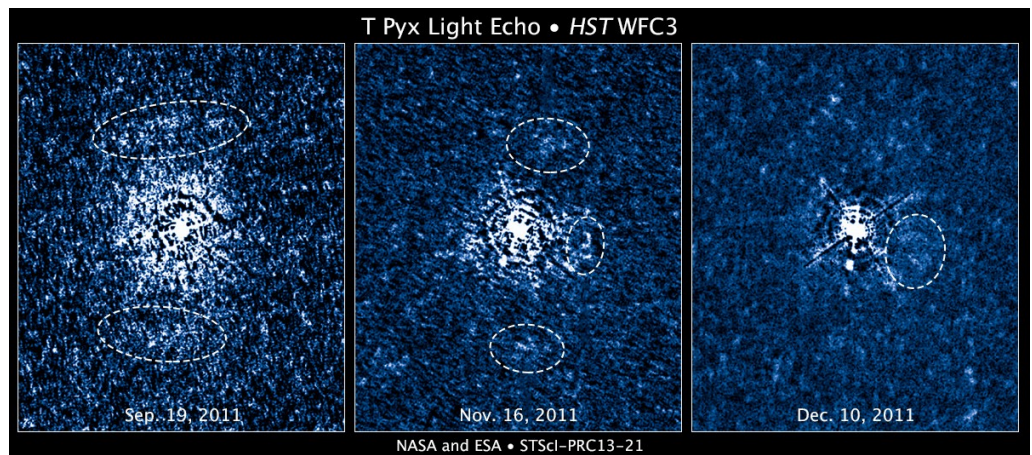


Recurring Nova T Pyxidis

PRC97-29 • ST ScI OPO • September 18, 1997

M. Shara and R. Williams (ST ScI), R. Gilmozzi (ESO) and NASA

HST • WFPC2



T Pyx Light Echo • HST WFC3

Sep. 19, 2011

Nov. 16, 2011

Dec. 10, 2011

NASA and ESA • STScI-PRC13-21

Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

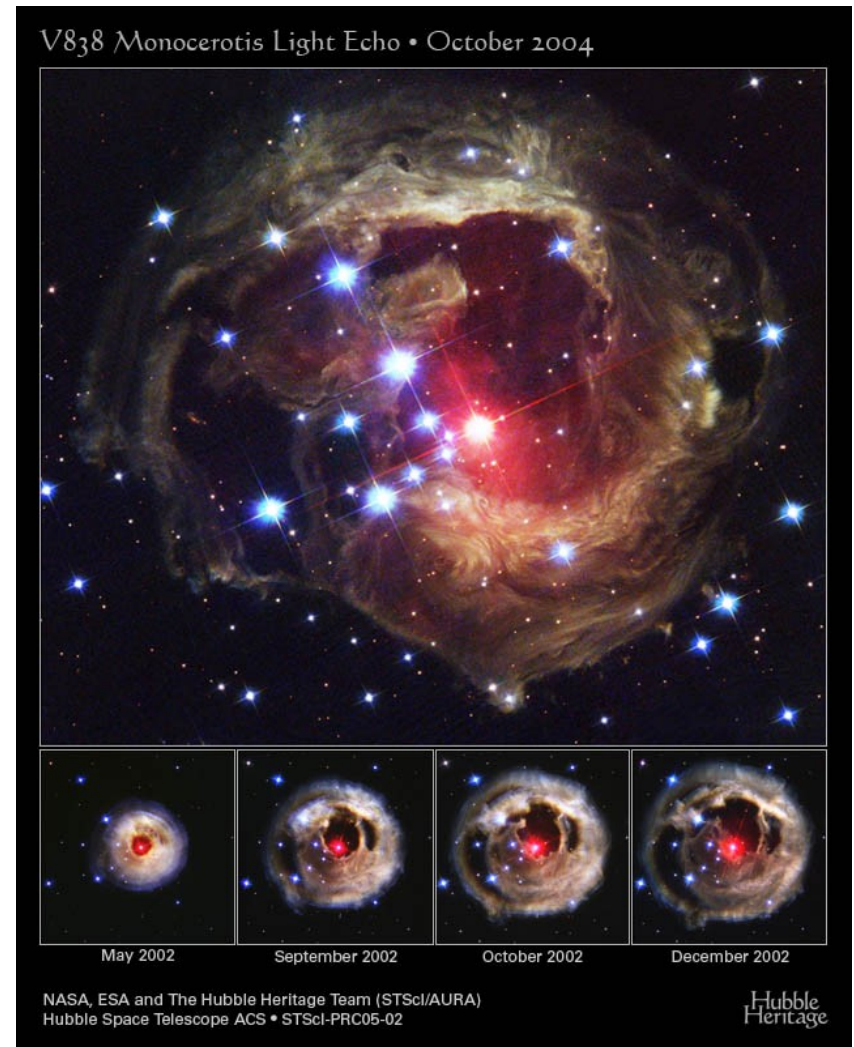
V838 Mon = Nova Mon 2002

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, fősorozat előtti párjával.

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



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

Cefeidák 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.

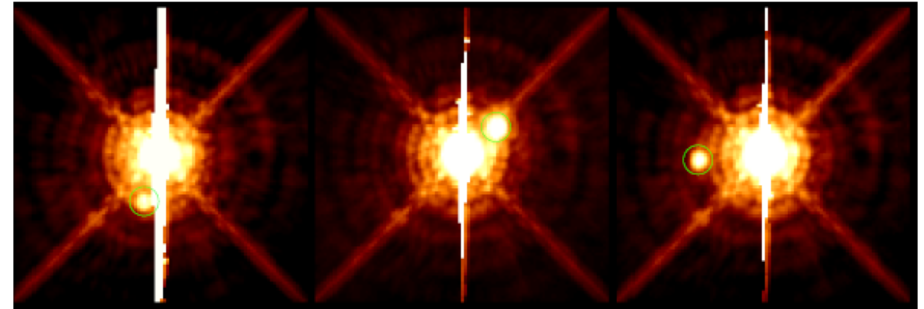
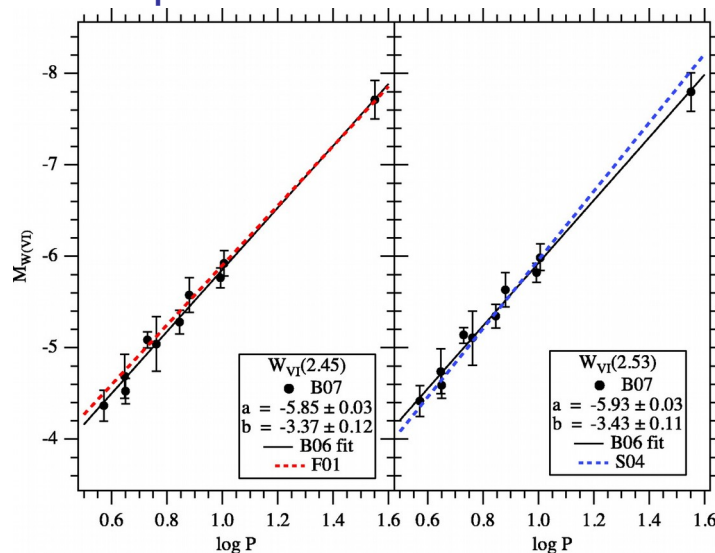
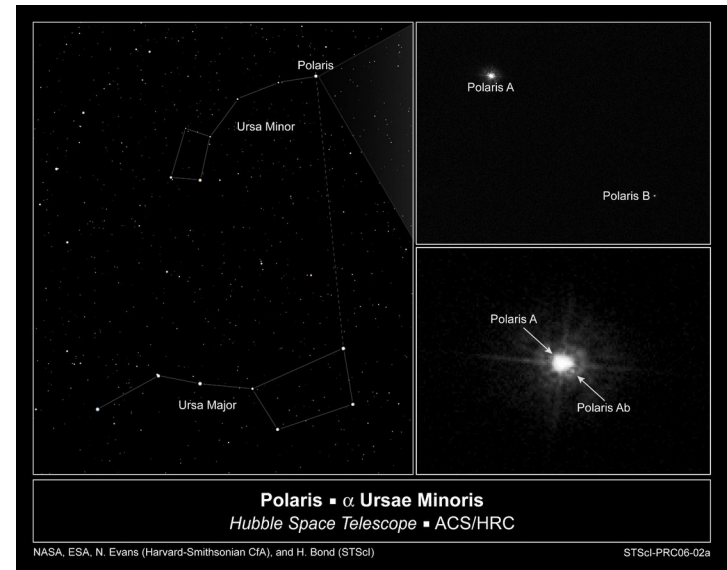


Fig. 1.— *HST* images of three Cepheids whose hot companions were resolved in WFC3 images: η Aql (left), V659 Cen (center), and S Nor (right). These are *V*-band images, with a logarithmic stretch. Each frame is $4'' \times 4''$. Companions are circled in green.



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

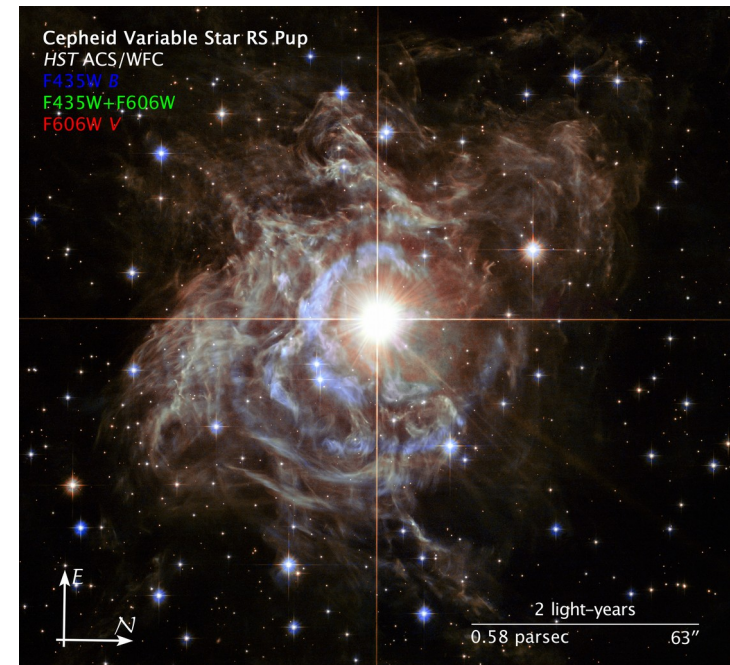
Egyedi cefeida távolságának eddigi legpontosabb meghatározása:

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).

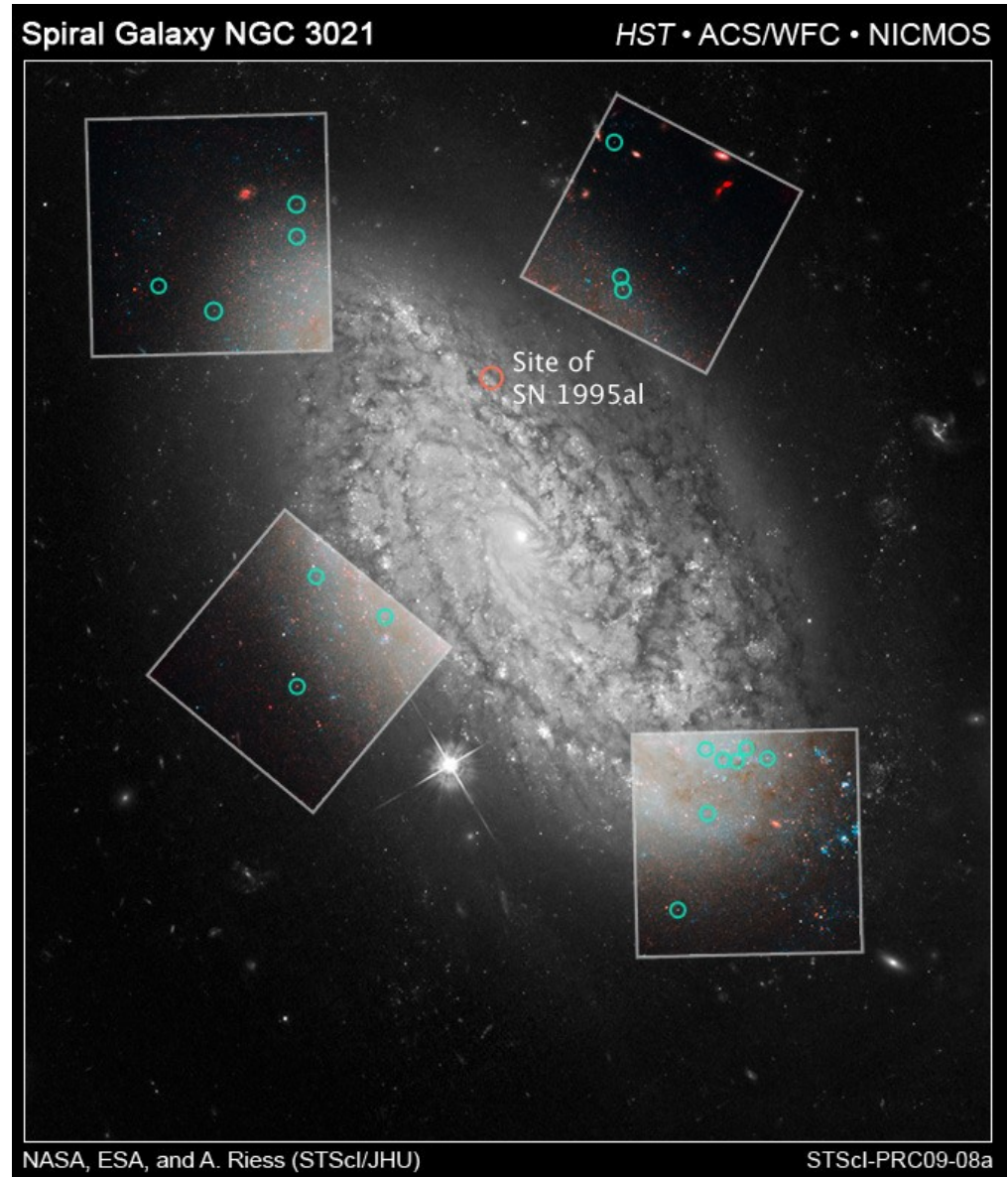
Az ebből meghatározott távolság:
1992 +/- 28 pc (1,4%-os bizonytalanság).

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



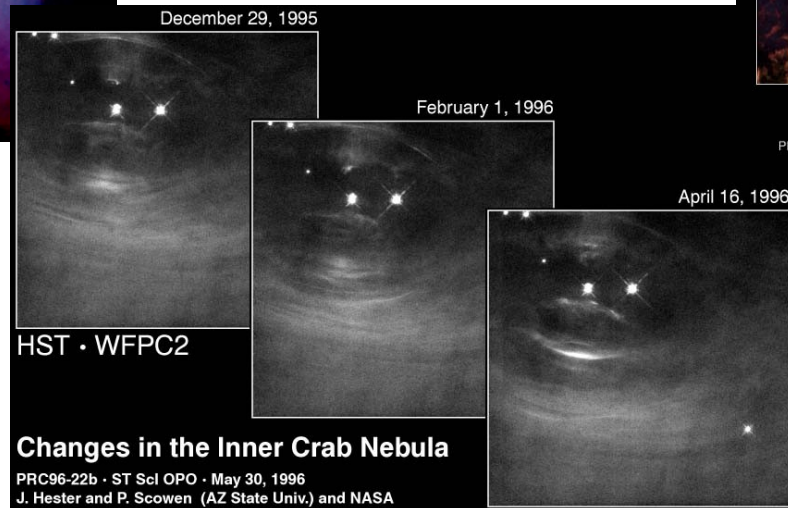
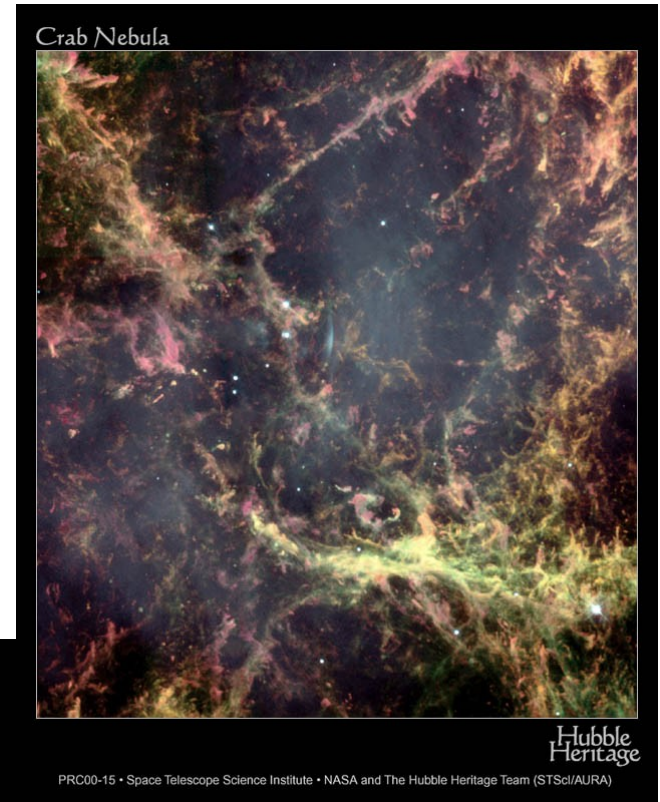
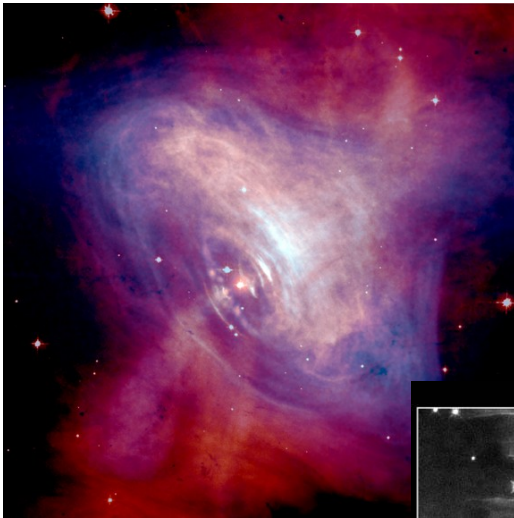
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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

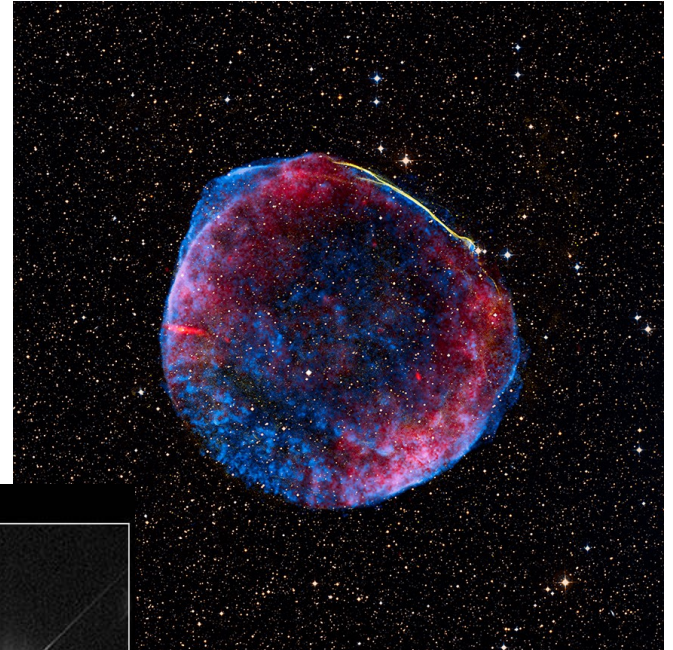
Szupernóvák és környezetük: a tejútrendszerbeli minta eléggé szegényes, de alaposan vizsgálták. Együttműködve nagyenergiás kutatásokkal.



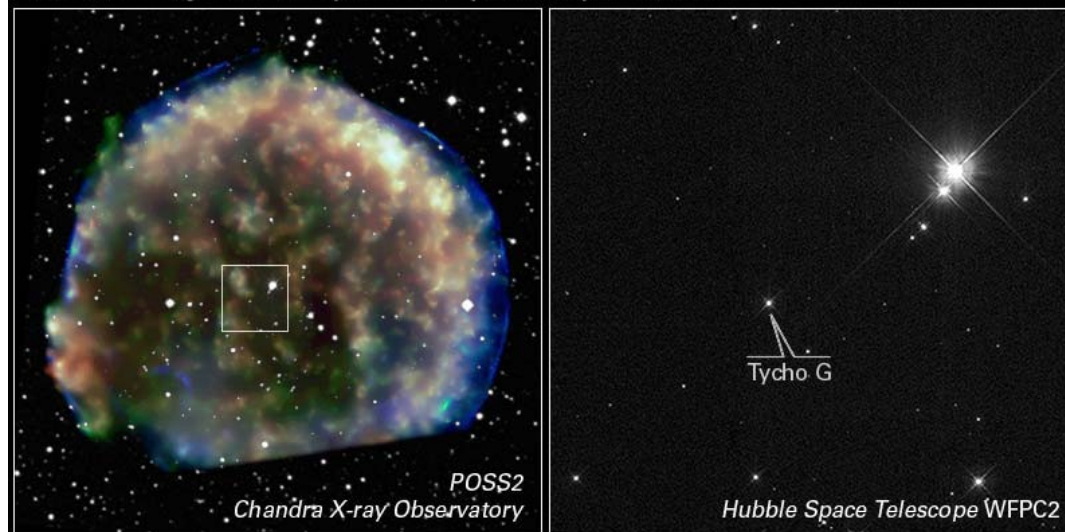
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

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)

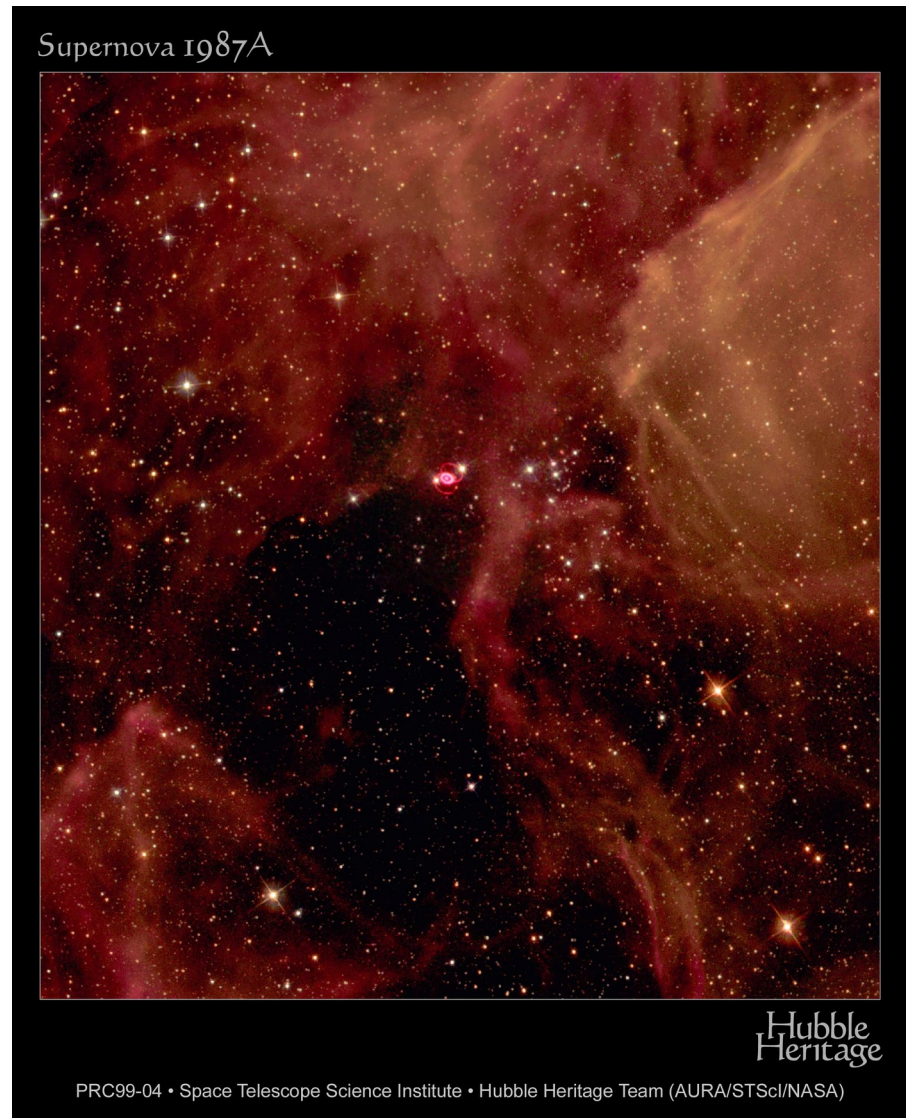
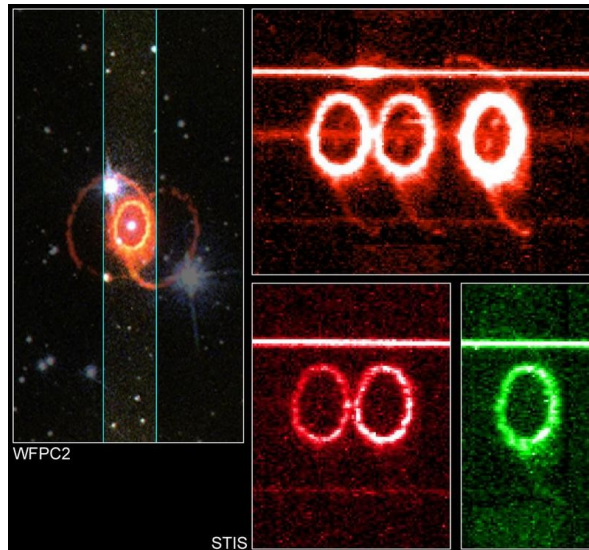


Candidate Progenitor Companion to Tycho's Supernova 1572

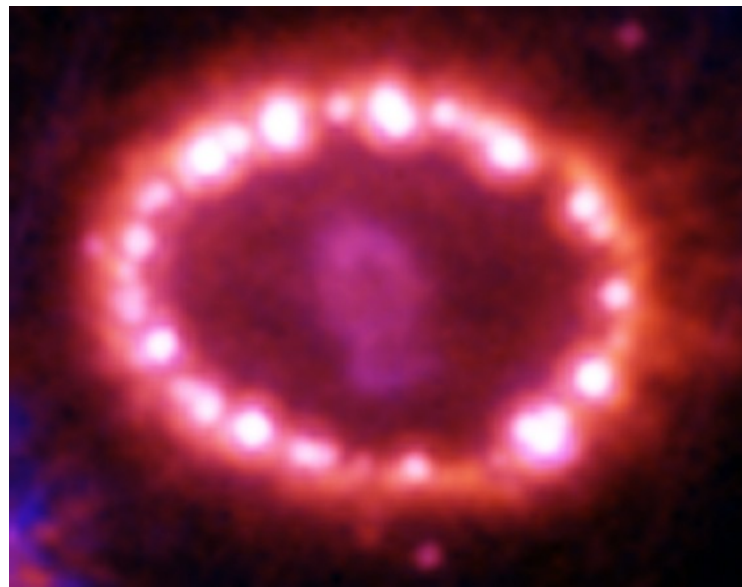
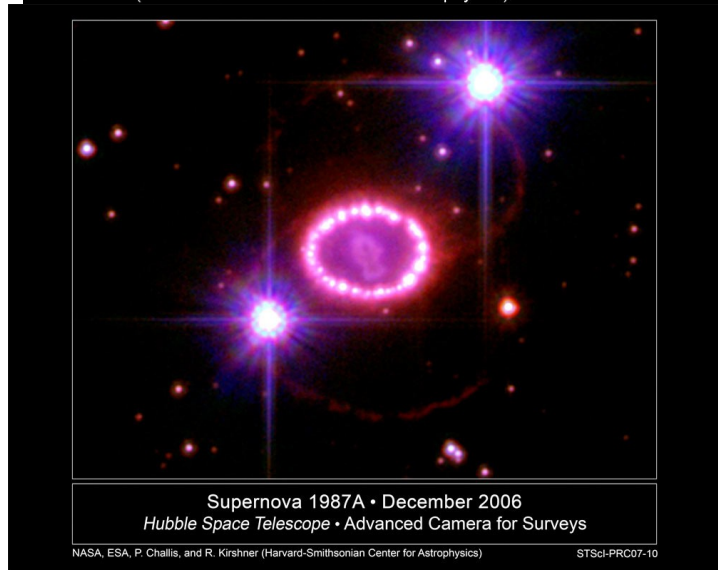
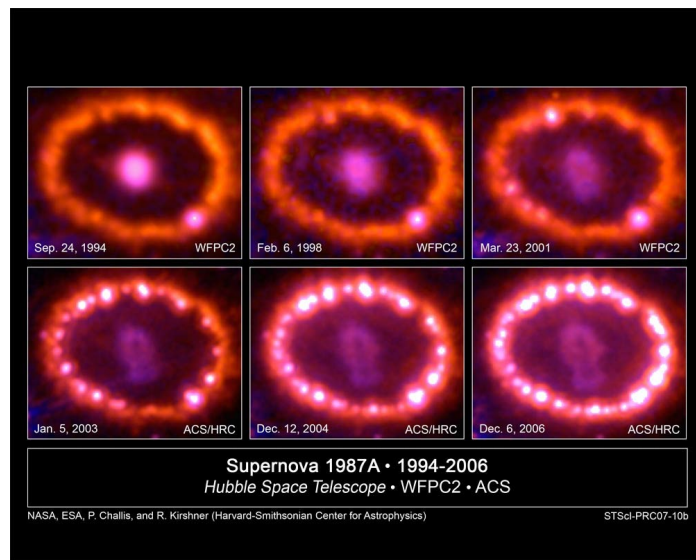
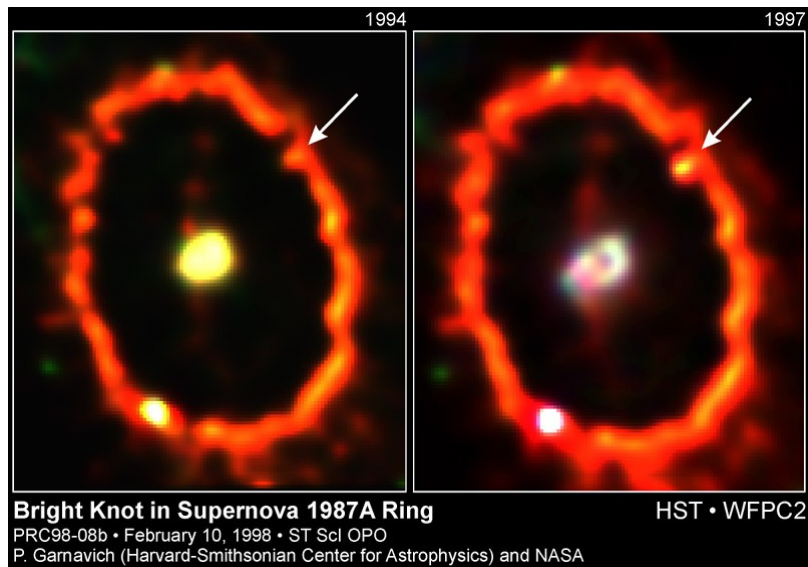


Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel

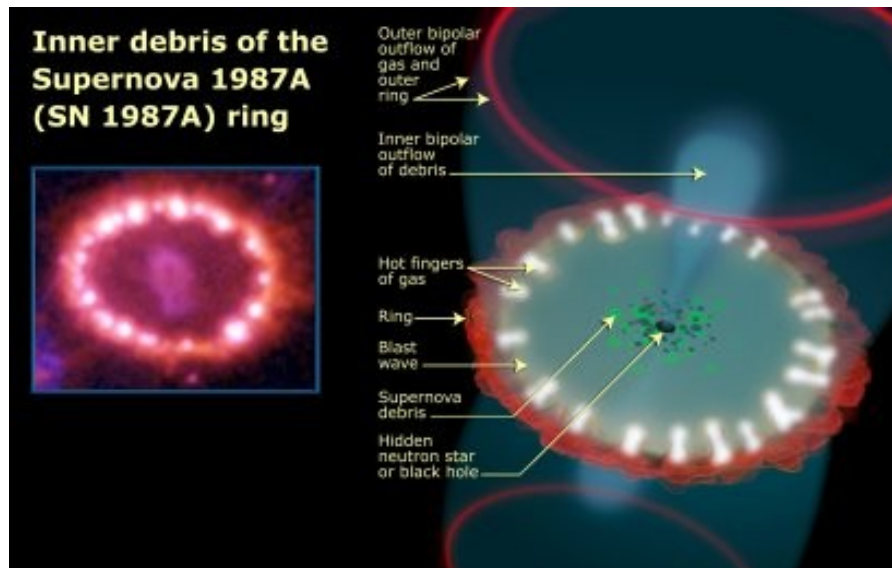
Az SN1987A szupernóva a Nagy-Magellán-felhőben: kék szuperóriás robbant, de 10000 éve még vörös szuperóriás volt. A visszamaradt neutroncsillag még nem látszik. Az észlelések az $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ bomlási sort igazolták (kb. 0,08 naptömegnyi vas).



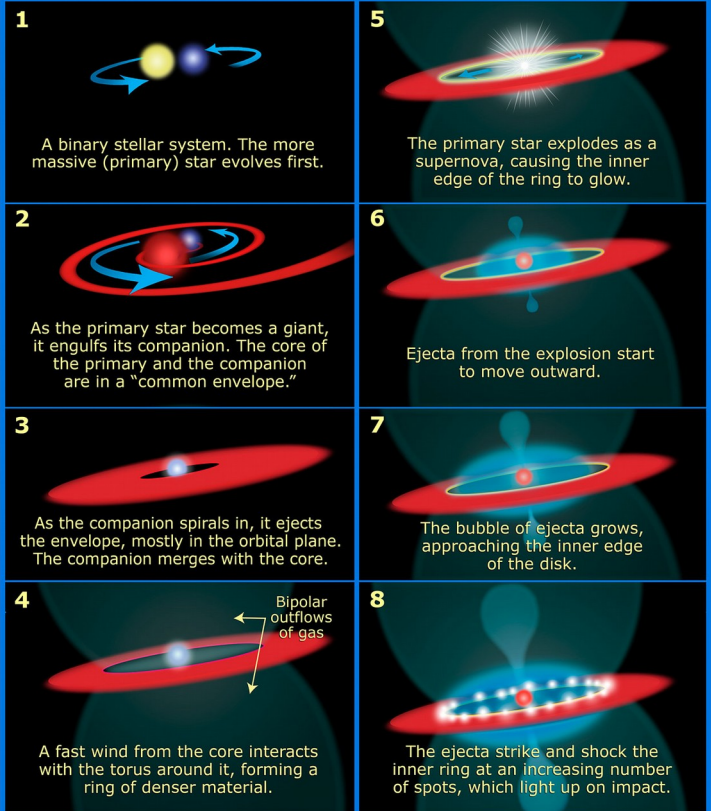
Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel



Csillagfejlődési epizódok észlelése a HST-vel



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

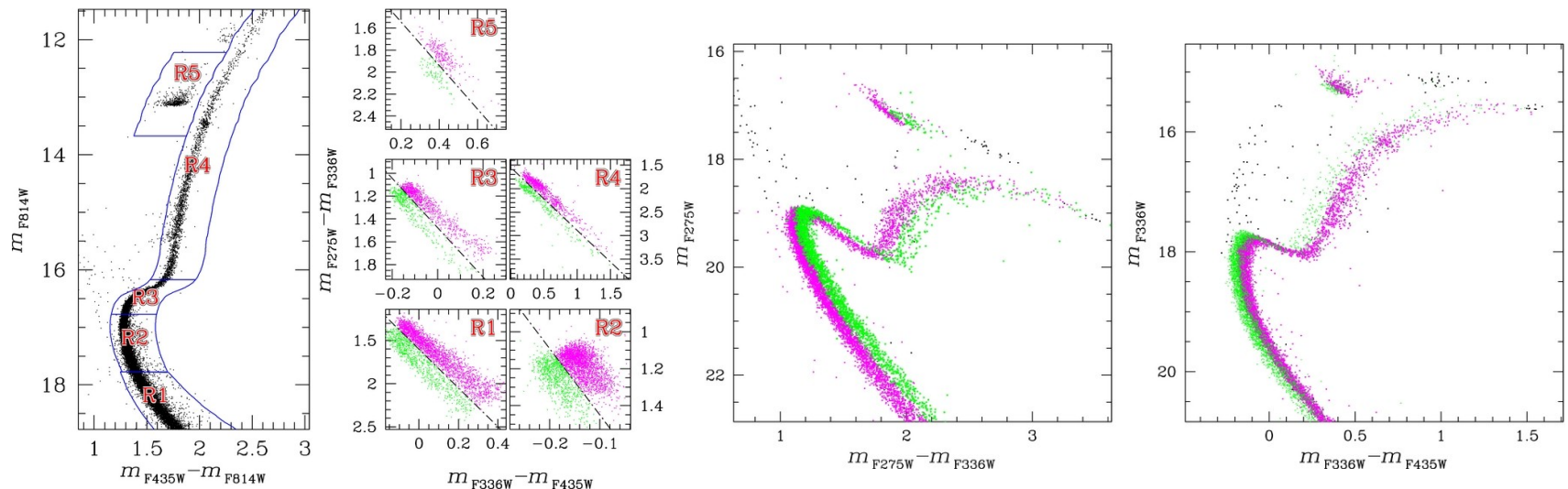


Halmazok további vizsgálata

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

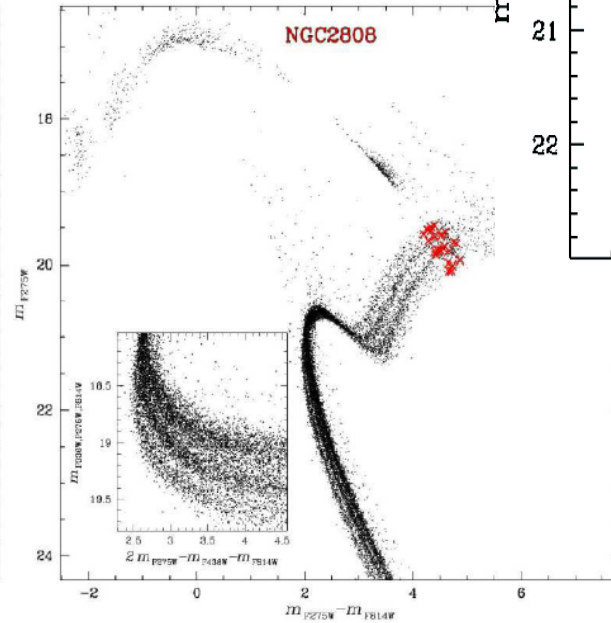
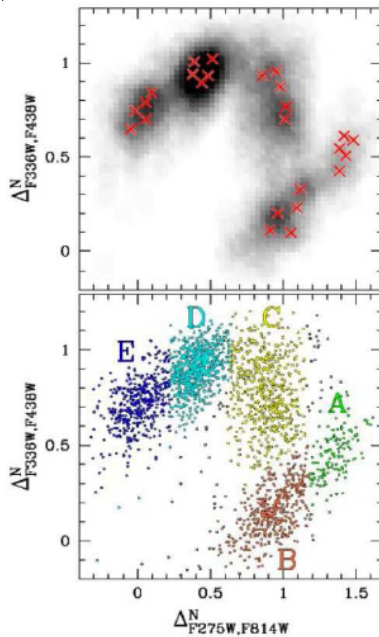
Az idősebb vörösebb, kisebb fémtartalmú, véletlen eloszlású körpályán mozgó csillagokból áll. A fiatalabb kékebb, nagyobb fémtartalmú és elliptikus pályán mozgó csillagokból áll. A korkülönbség 100 millió év.

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

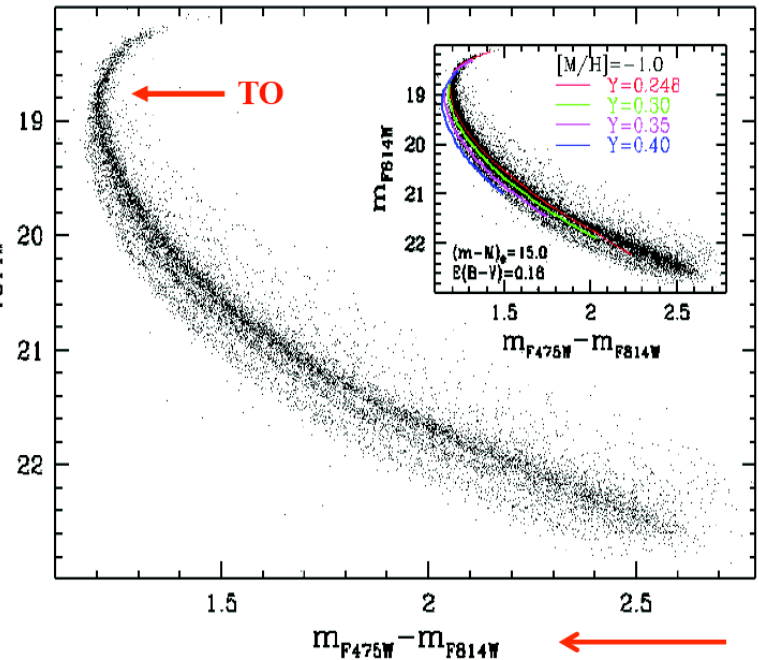


Halmazok szín-fényesség diagramja

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



NGC 2808



Halmazok szín-fényesség diagramja

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

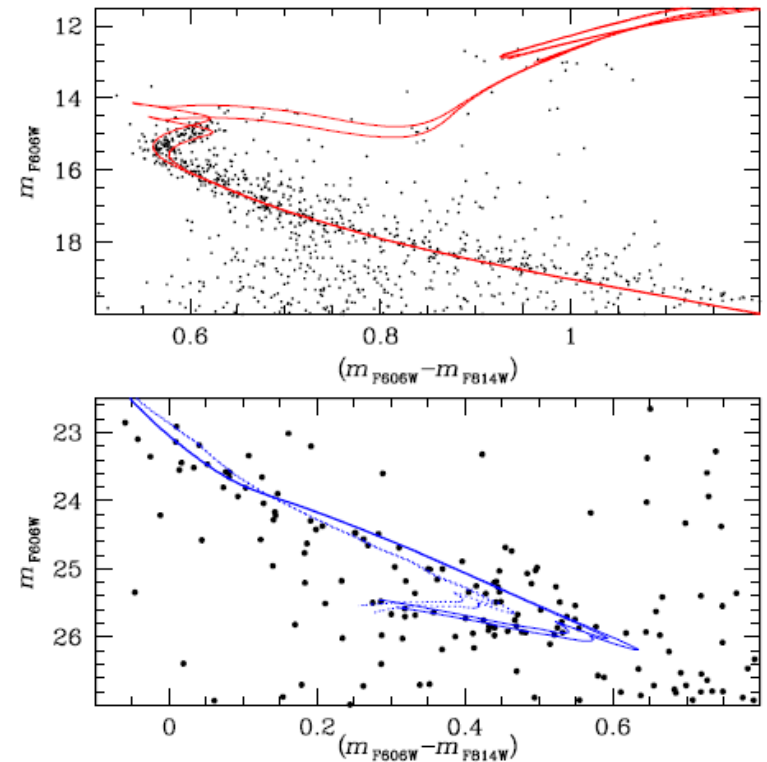
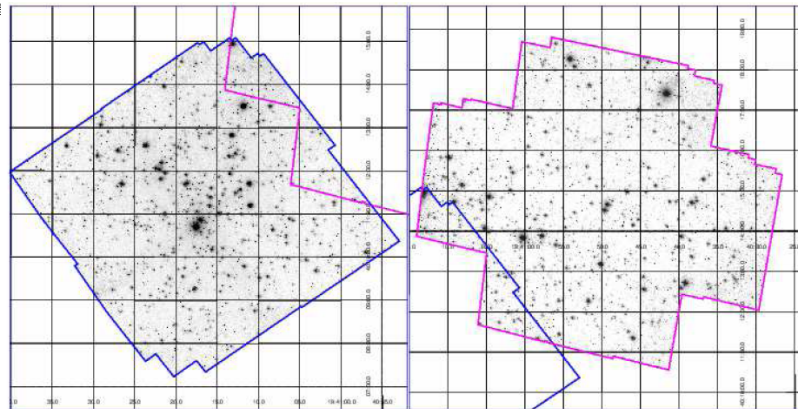
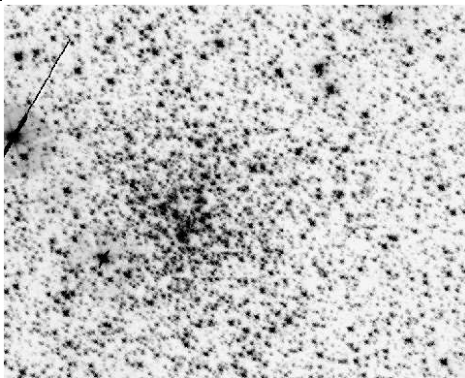


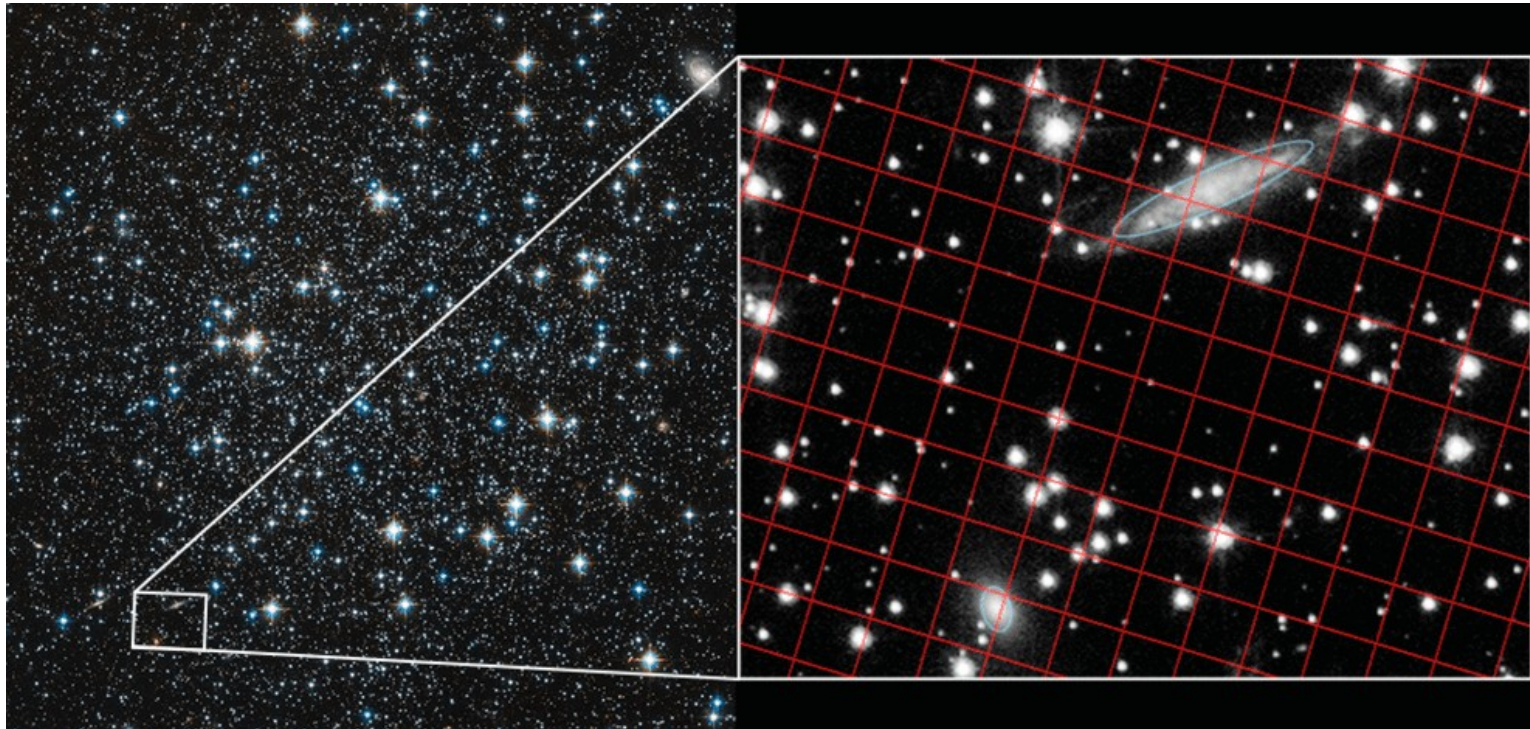
Figure 3. (*Upper panel:*) Fit of theoretical isochrones [1.95 Gyr, $(m - M)_0 = 11.99$, $E(B - V) = 0.18$ and 2.55 Gyr, $(m - M)_0 = 11.77$, $E(B - V) = 0.16$] to the cluster MS in the $m_{F606W} - (m_{F606W} - m_{F814W})$ CMD (see text for details). (*Lower panel:*) Fit of WD isochrones to the observed 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).

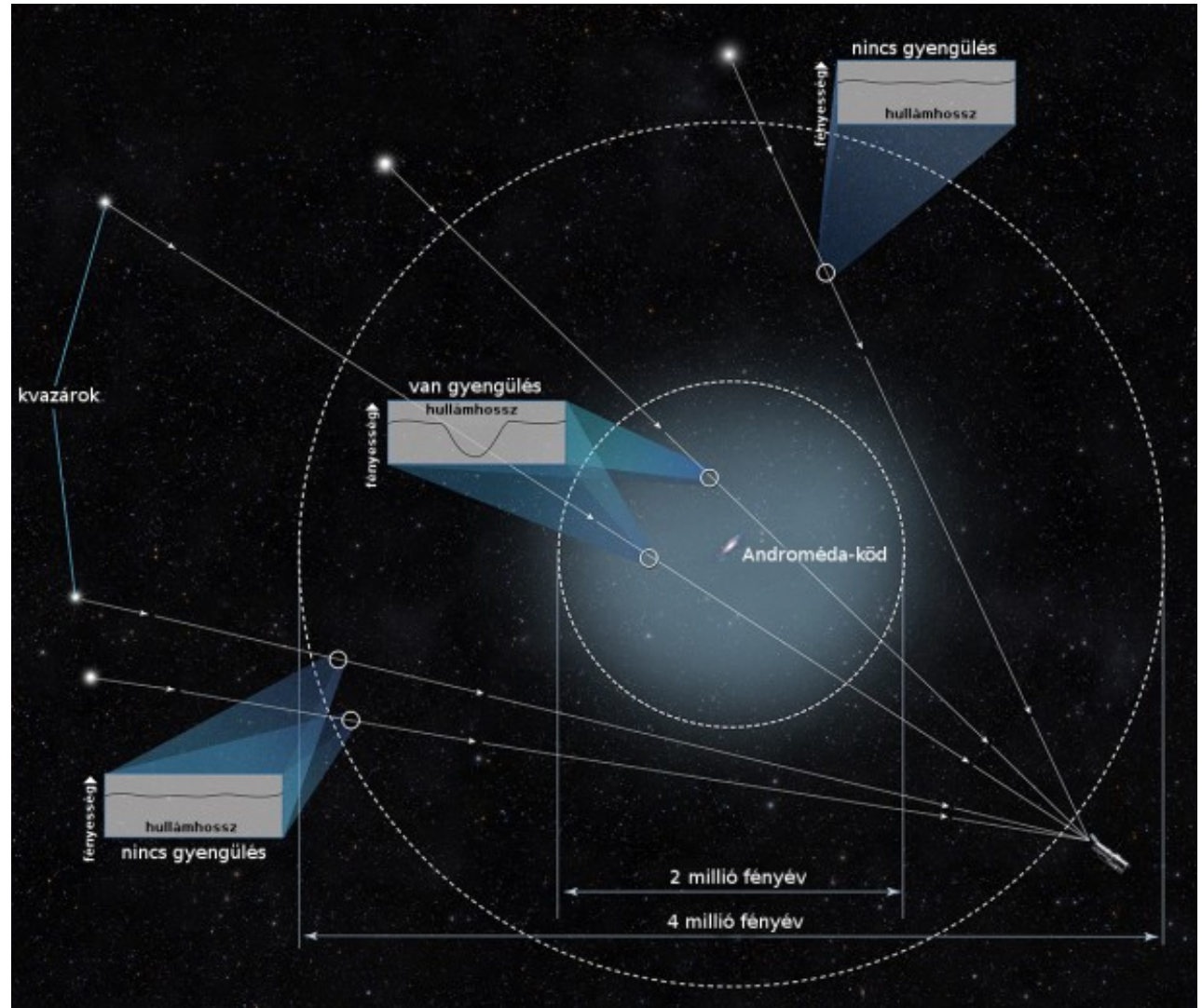


A sötét anyag nyomában

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.



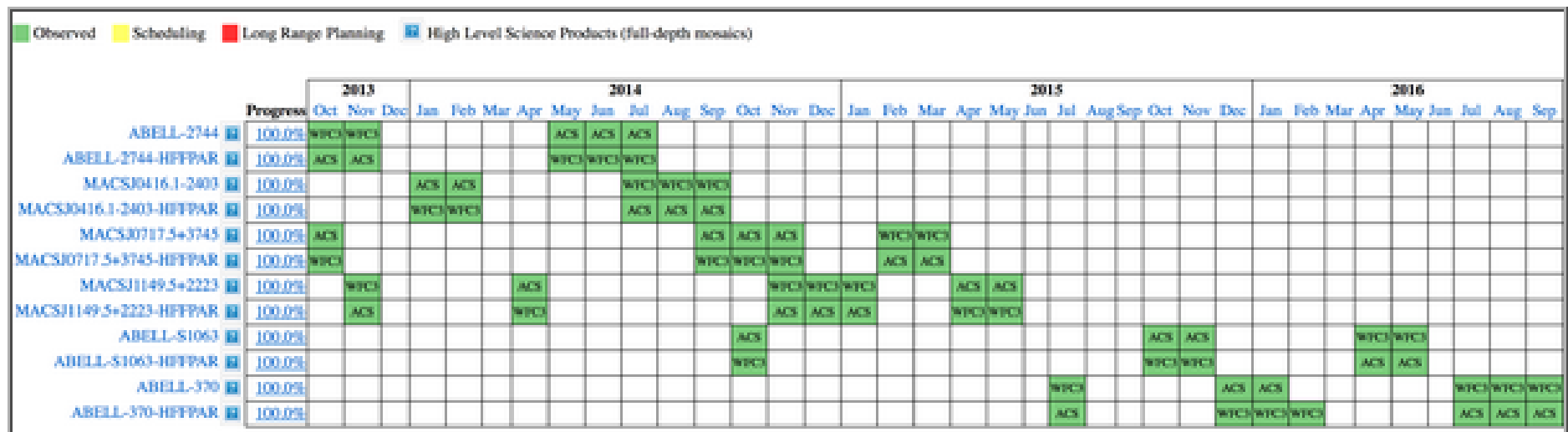
A sötét anyag nyomában

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)

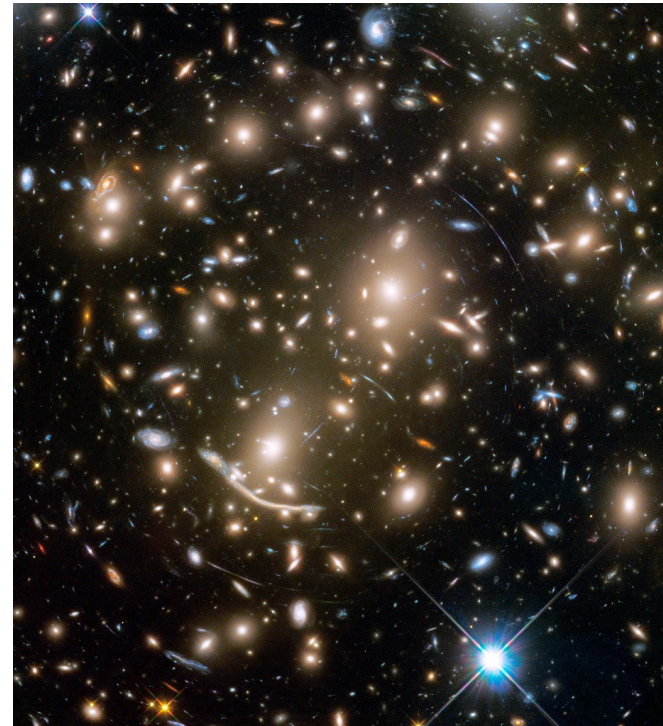


A sötét anyag nyomában

A HST Frontier Fields két célpontja

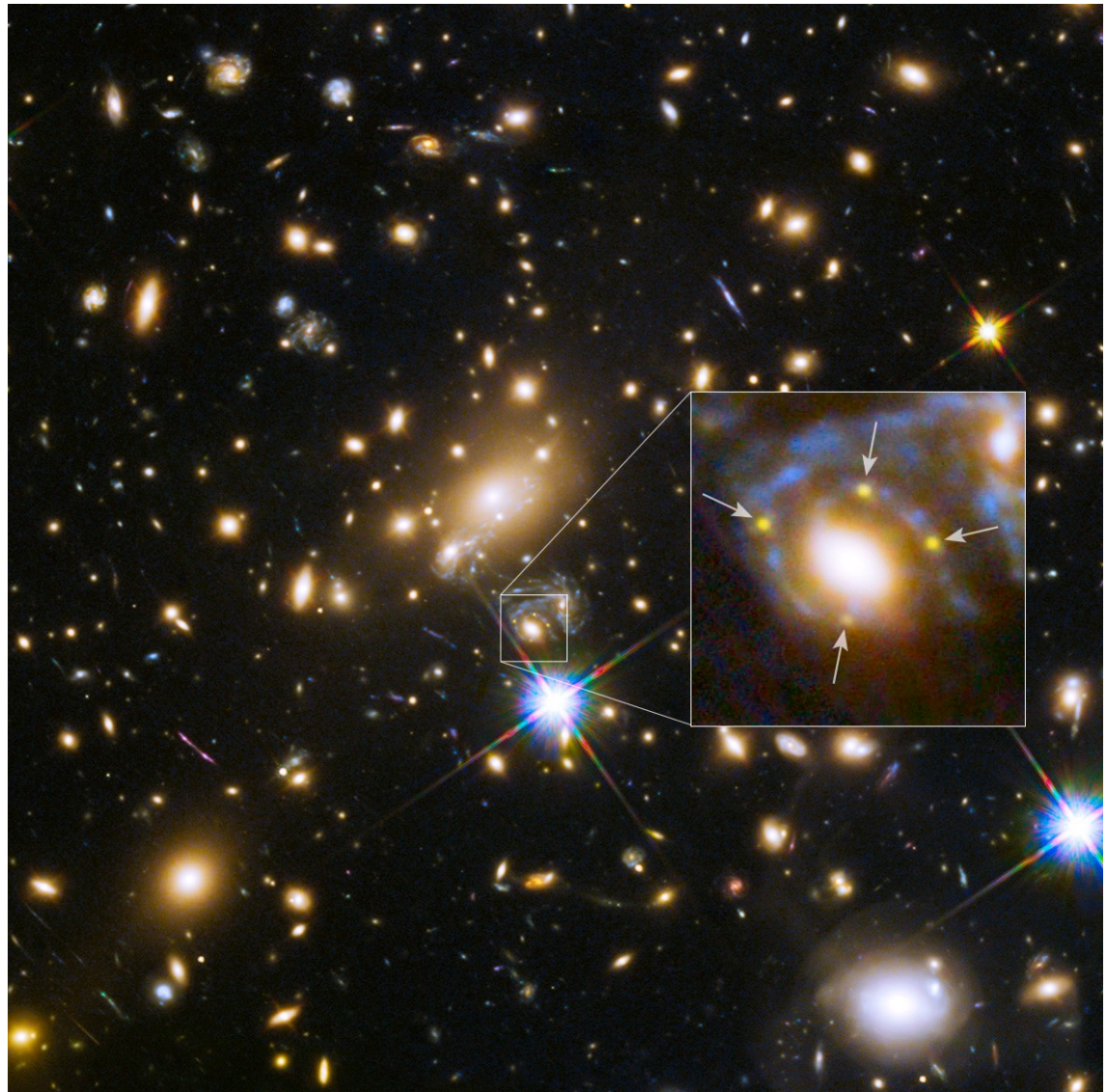
Az **Abell S1063** galaxishalmazban a halmazközi fénylést a galaxisokból kidobódott csillagok okozzák. A halmazközi csillagok a sötét anyag nagy skálájú eloszlását rajzolják ki (balra lent).

Az **Abell 370** galaxishalmaz (jobbra lent) két domináns galaxisa óriás elliptikus galaxis. A galaxishalmaz gravitációs-lencse-hatása szembetűnő.



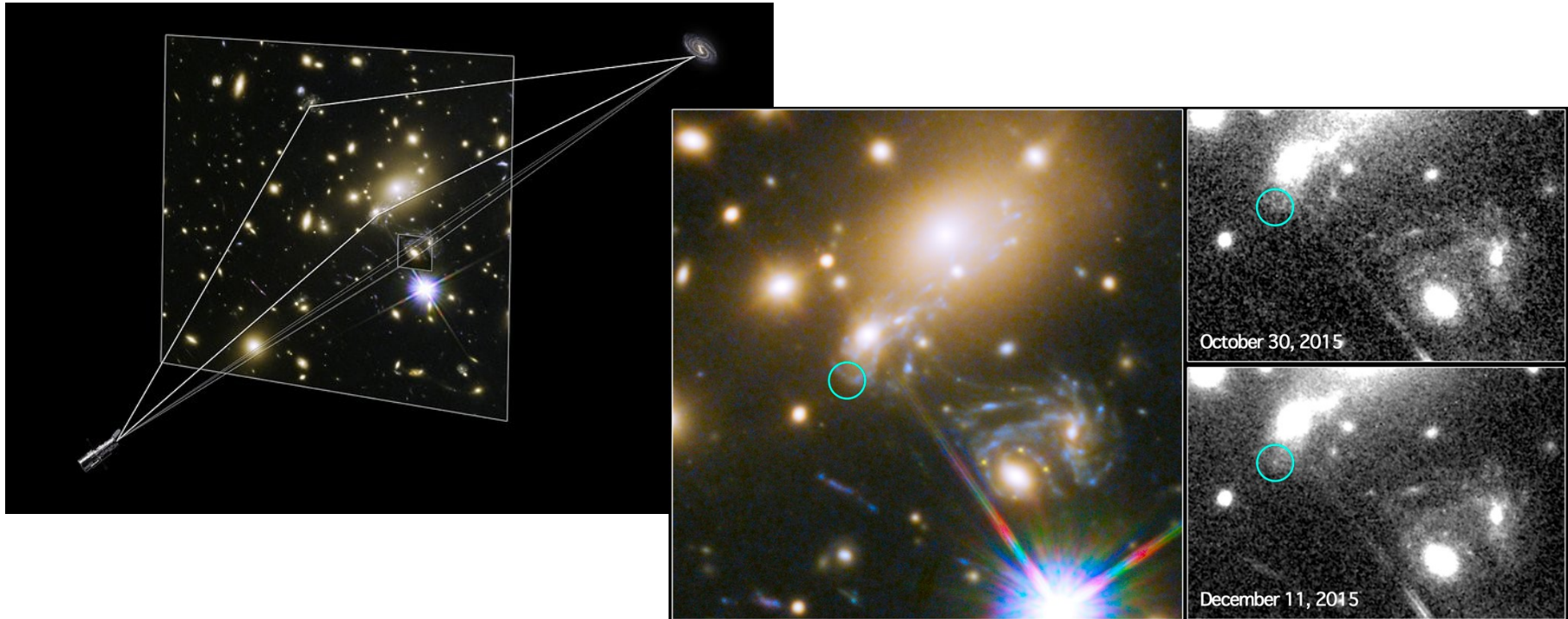
Gravitációs lencse-hatás

Távoli szupernóva
4 példányban



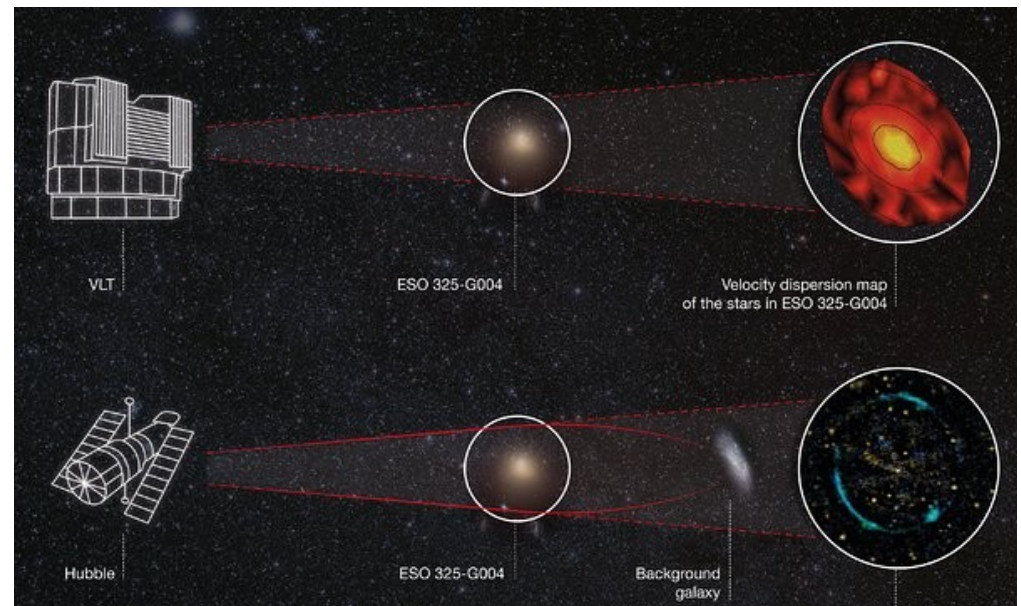
Szupernóva-robbanás „megrendelésre”

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



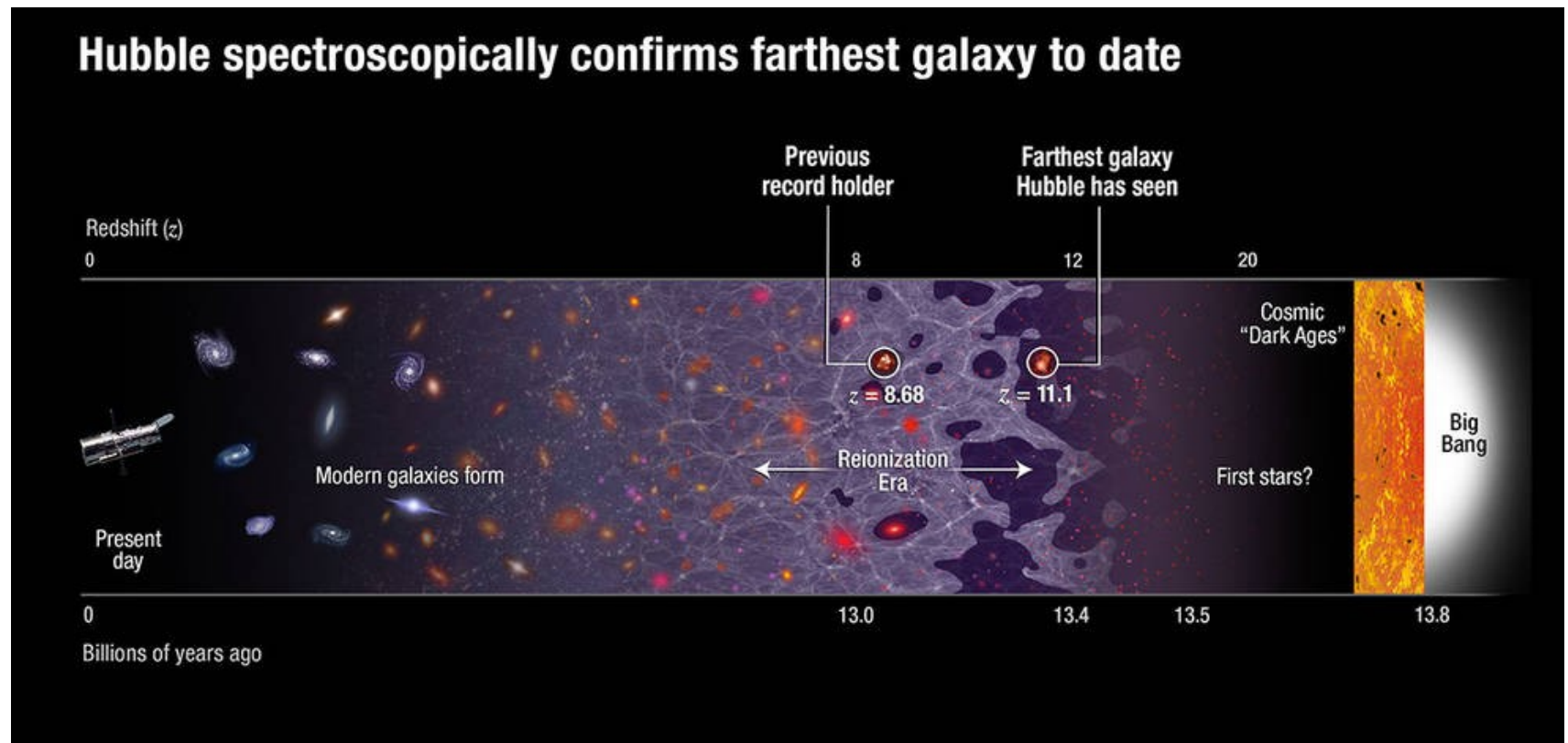
Einstein elméletének igazolása a HST-vel

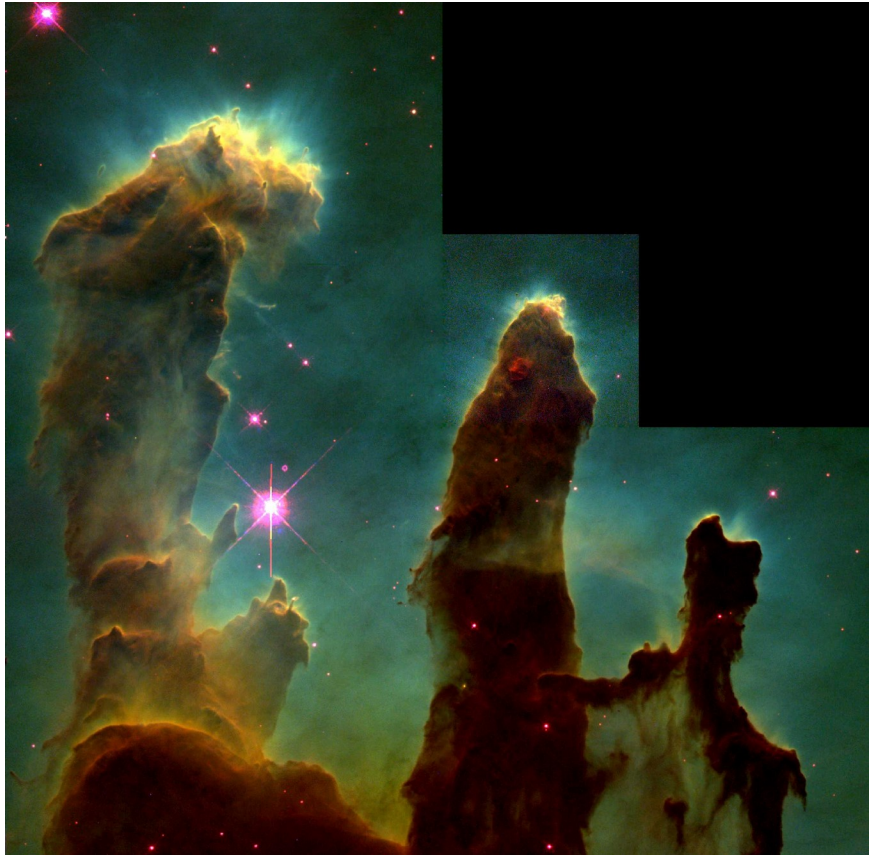
A gravitációs lencse-hatás észlelése az általános relativitáselmélet igazolására is szolgált. A lencséző objektum az ESO 325-G004



A 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.





Mi lesz a HST után?

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

Mi lesz a HST sorsa? Irányított megsemmisítés vagy visszahozatal. A továbbműködtetésre is van esély, ha a HST állapota megengedi.

