

# Astronomia współczesna

## Teleskopy kosmiczne

(głównie na przykładzie Teleskopu Hubble'a)

## Pierwsze pomysły

W 1923 Hermann Oberth, niemiecki pionier raketnictwa, opublikował *Die Rakete zu den Planetenräumen* ("The Rocket into Planetary Space")

W 1922r Uniwersytet w Getyndze odrzucił jego pracę (przez co Oberth uważał, że w niemieckim systemie edukacji panuje wsteczność), uznana została za to w 1923r na rumuńskim Uniwersytecie Babeş-Bolyai.

Lyman Strong Spitzer, Jr. (June 26, 1914 – March 31, 1997)

„Astronomical advantages of an extraterrestrial observatory" (1946)

Teleskopy optyczne od 5.1 do 15.2m (zanim jeszcze na Ziemi zbudowano 5m).

## Pierwsze plany

OA0-3 (Copernicus) – sprawdzono, że teleskop UV o średnicy 82cm można kontrolować z precyzją  $\pm 0.1''$ , działał od 1972 do 1981r

Różne warianty: rakieta Tytan, Saturn, prom kosmiczny  
teleskop samodzielny lub połączony ze stacją kosmiczną

1974r - propozycja teleskopu 3m (+ testowy 1.5m) za 500 mln \$  
odrzucona przez Kongres

1975-77r - wielkie astronomiczne lobbowanie na rzecz teleskopu,  
np. zmieniono nazwę „Large Space Telescope” -> „Space Telescope”  
by nie straszyć kosztami

1975r - zaproszenie ESRO do projektu budowy teleskopu

1977r - redukcja teleskopu do 2.4m i kosztów do ~200 mln \$ - akceptacja Kongresu

rezygnacja z 1.5m testowego teleskopu kosmicznego

ok. połowa budżetu przeznaczona na nieprzewidziane problemy techniczne

## Pierwsze plany

In 1974 the team reduced the telescope's primary mirror from a 3-meter aperture to 2.4 meters. This major change mainly resulted from new NASA estimates of the Space Shuttle's payload delivery capability; the Shuttle could not lift a 3-meter telescope to the required orbit. In addition, changing to a 2.4-meter mirror would lessen fabrication costs by using manufacturing technologies developed for military spy satellites. The smaller mirror would also abbreviate polishing time from 3.5 years to 2.5 years. The redesign also reduced the mass of the support systems module from 24,000 pounds to 17,000 pounds; the SSM moved from the aft of the spacecraft to one-third of the way forward and became a doughnut around the primary mirror. These changes diminished inertia and facilitated steering of the spacecraft, thus permitting a smaller pointing control system. The astronomers chose to reduce the number of scientific instruments from seven to four. Finally, the Marshall team believed that designing for repair would allow for lower quality standards. Together the changes lowered the telescope's cost to \$273 million.

Andrew J. Dunar i Stephen P. Waring

„Power To Explore

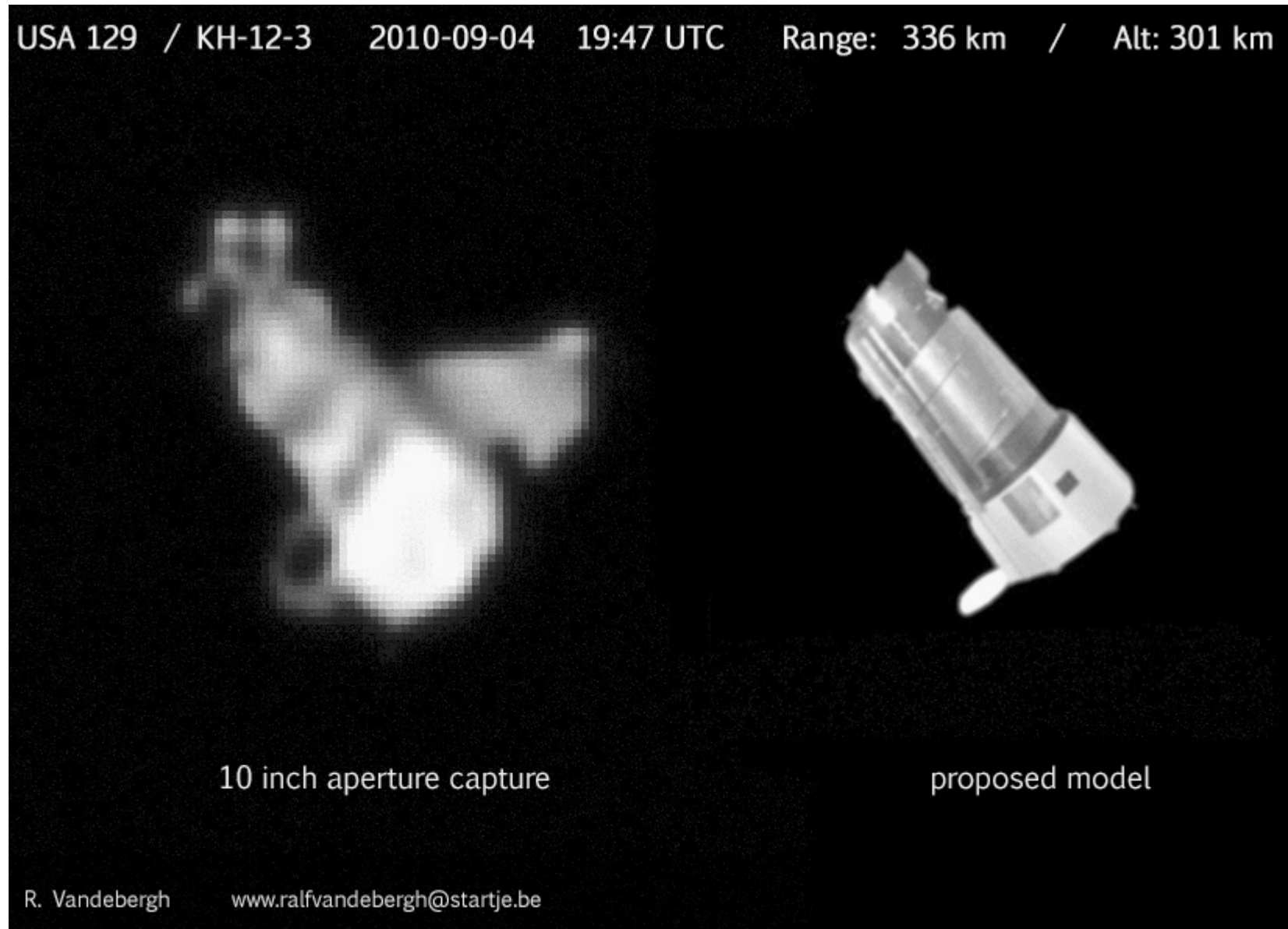
- History of Marshall Space Flight Center 1960-1990 ”

NASA ~1991





## Pierwsze plany



Zdjęcie amerykańskiego satelity szpiegowskiego z serii Key Hole KH-11, KH-12 (od 1976) wykonane przez miłośnika astronomii za pomocą teleskopu o średnicy 25cm.

## Projekt i budowa

Projekt i budowa teleskopu: NASA George C. Marshall Space Flight Center

Zdalne sterowanie i obsługa: NASA Goddard Space Flight Center



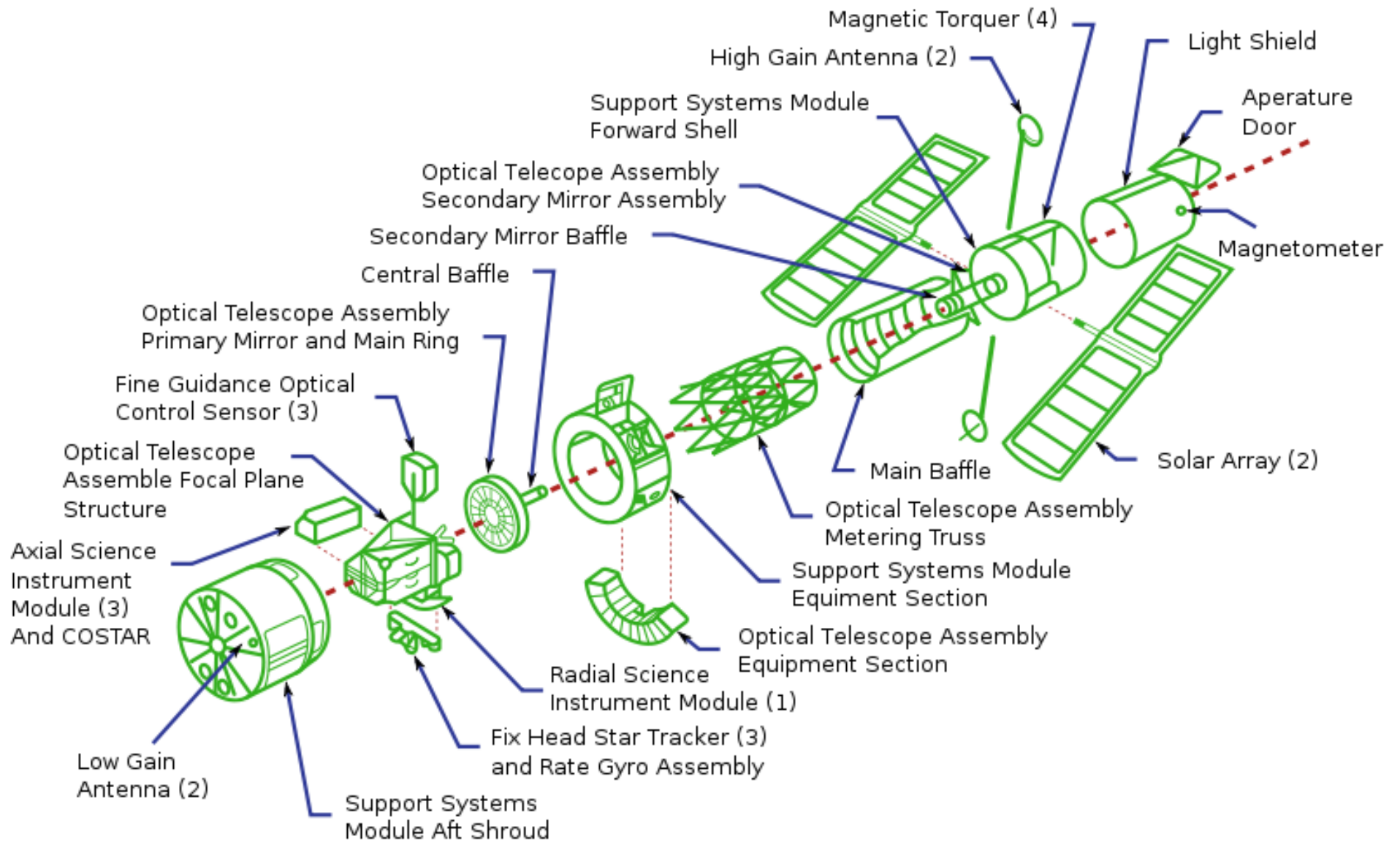
Kontrakty na budowę elementów teleskopu:

Perkin-Elmer Corporation - optyka

Lockheed Missiles and Space Company - pojazd kosmiczny

ESRO - panele słoneczne i jeden z instrumentów naukowych (w zamian za 15% czasu)

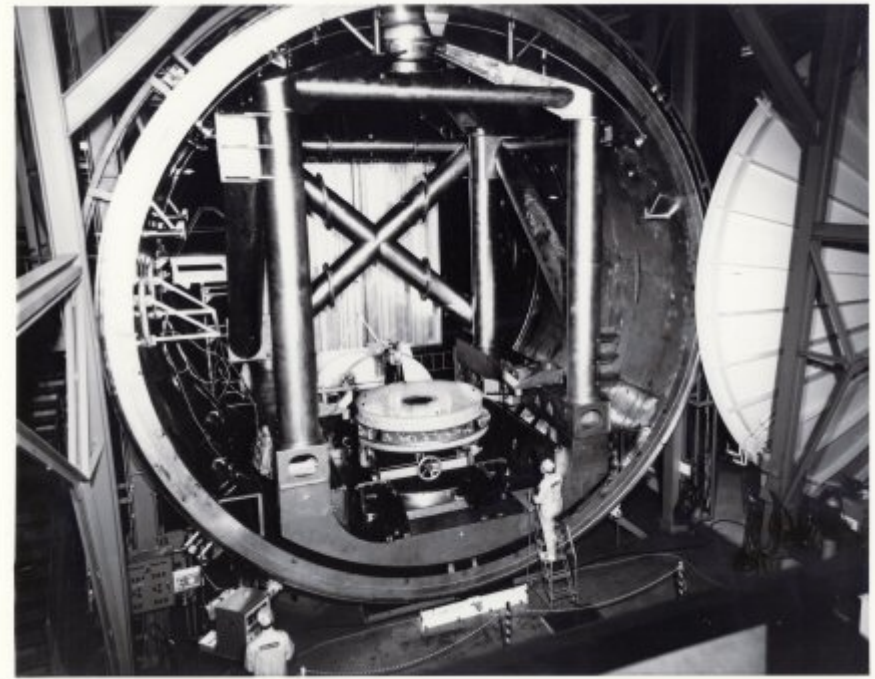
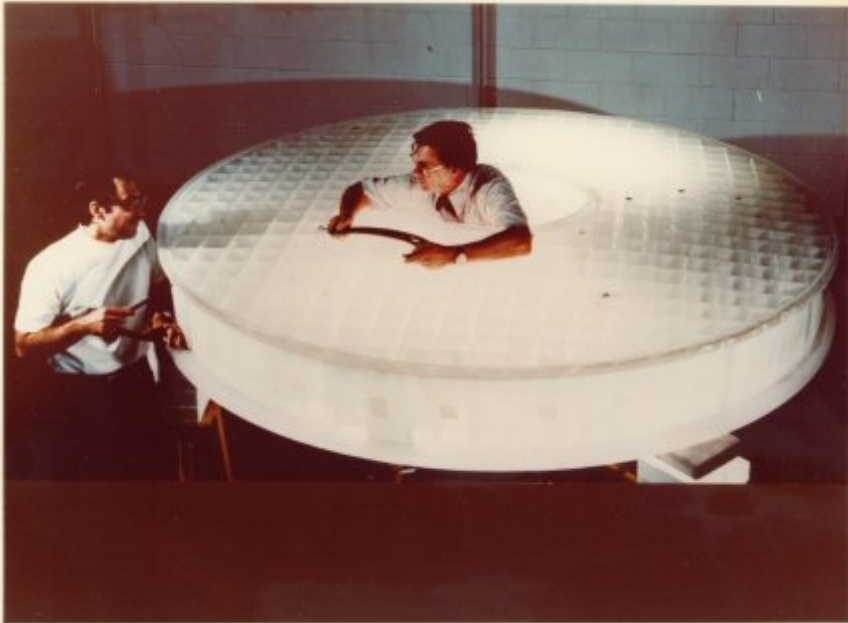
# Projekt i budowa





# Lustro główne teleskopu Hubble'a

SPACE TELESCOPE — FLIGHT MIRROR BLANK (94 INCH)





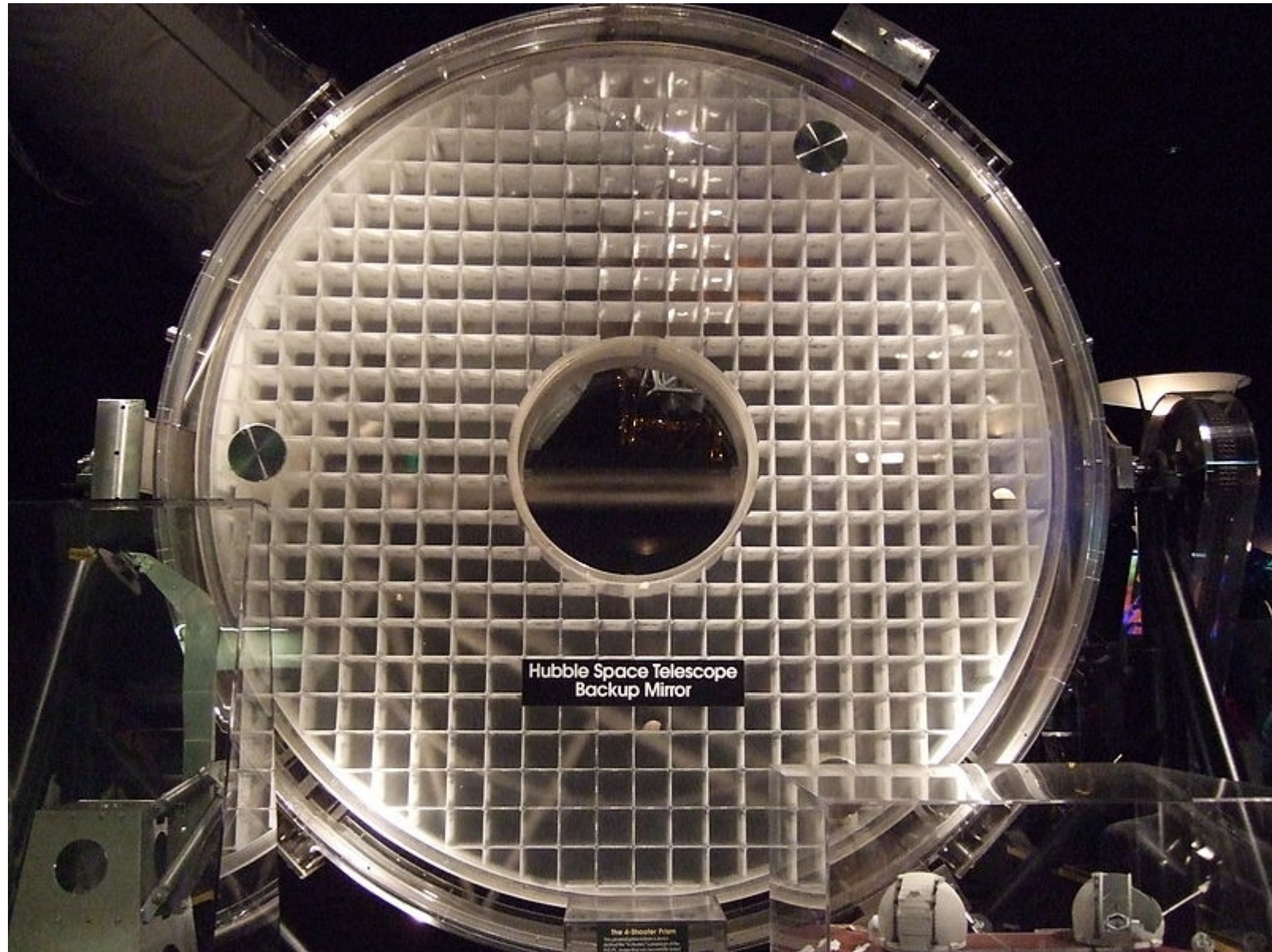
## Lustro główne teleskopu Hubble'a



Specjalnie dla HST skonstruowano laserowo-komputerowy system szlifowania.  
Przygotowanie lustra głównego zajęło ok. 2 lata.



## Lustro główne teleskopu Hubble'a



Zapasowe lustro Hubble'a zbudowane przez Eastman Kodak.  
National Air and Space Museum, Washington.



## Lustro główne teleskopu Hubble'a



Trzecie zapasowe lustro zbudowane przez: Itek Corporation

## Lustro główne teleskopu Hubble'a

Wymagana precyzja szlifowania optyki: ok.  $1/65$  długości światła czerwonego (10 nm)

Tak duża precyzja wymagana ze względu na obserwacje w UV.

Lustra są stale podgrzewane do temperatury 15 stopni C.

W ten sposób zmniejsza się efekty zmiany temperatury teleskopu.

Kształt luster był testowany w symulowanych warunkach mikrogravitacji.

Budowa luster zapasowych została przerwana dla oszczędności.

Powłoki: aluminium 65nm, fluorek magnezu 25nm.

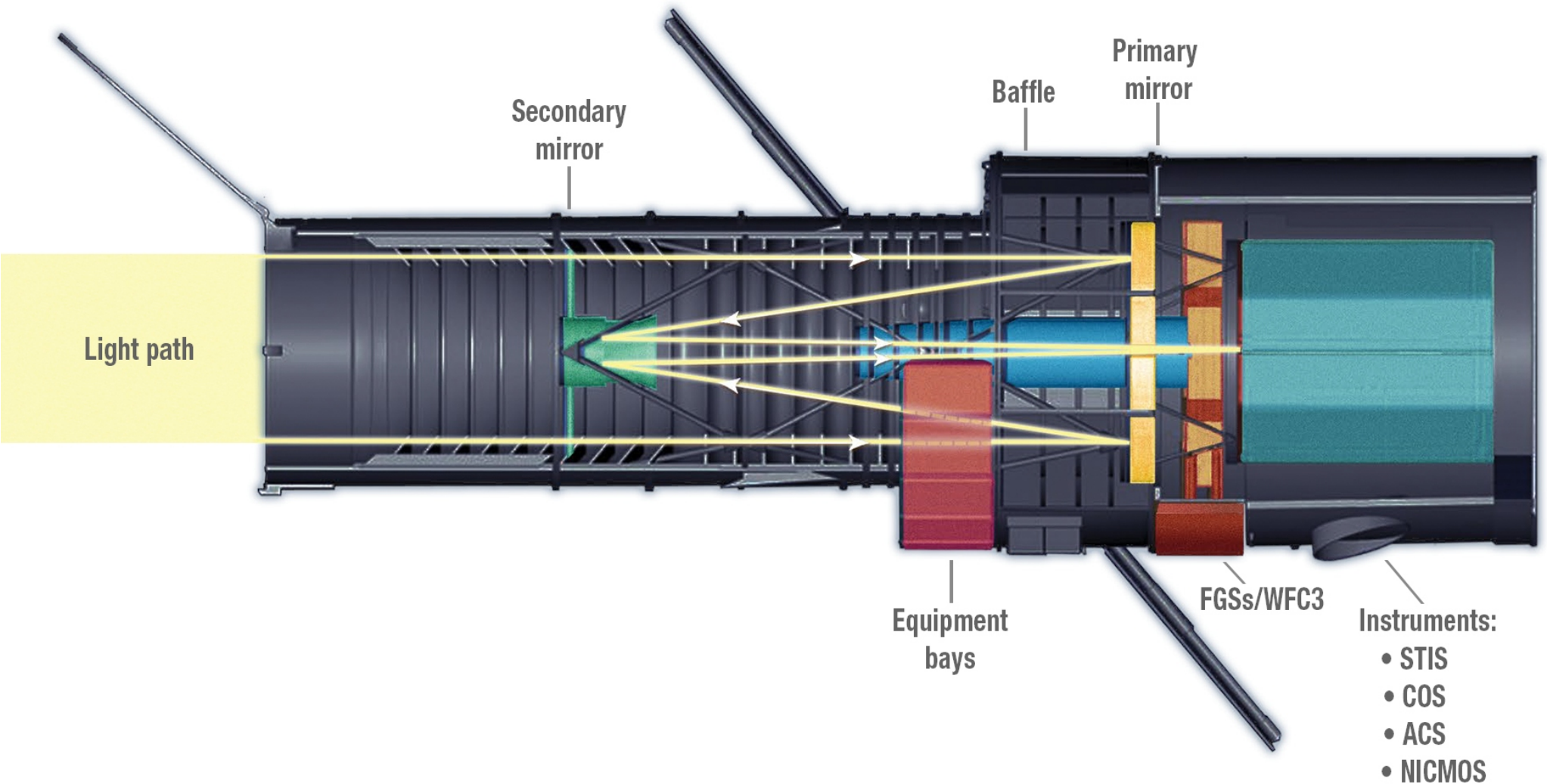


## Projekt i budowa



Kratownica z włókna węglowego wewnątrz tubusu teleskopu.

## Budowa wewnętrzna i system optyczny



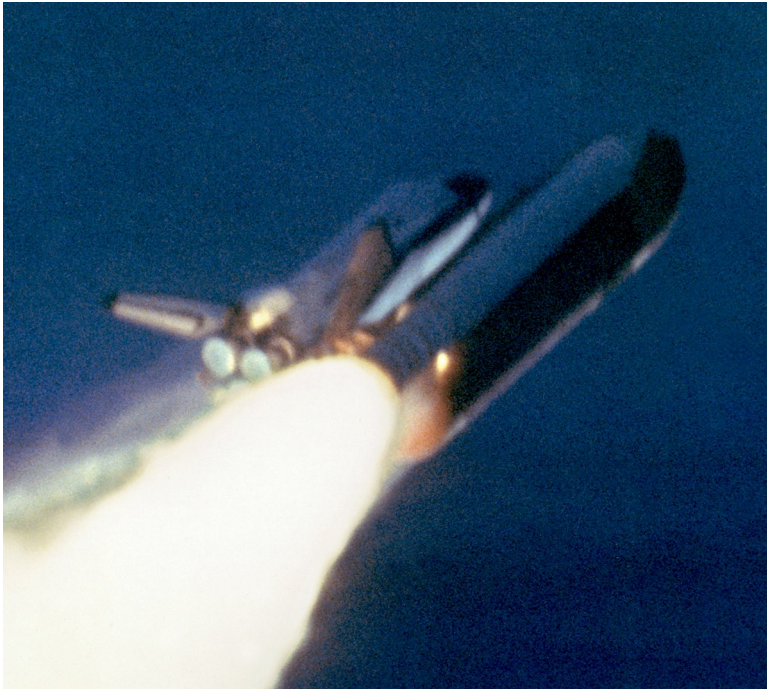
Teleskop Hubble wykorzystuje system optyczny Cassegraina w wariacie Richie-Chretien: dwa lustra o kształcie hiperboli.



## Start teleskopu

1984r - jedna z pierwszych planowanych dat wystrzelenia teleskopu Hubble'a

1986r - plan po licznych opóźnieniach



27.01.1986r - prom Challenger

Opóźnienie związane z promem kosmicznym zamaskowało opóźnienie, które wynikało z problemów technicznych po testach termiczno-próżniowych wykonywanych w tym samym czasie.

## Start teleskopu



24.04.1990r - prom Discovery

## Podstawowe parametry

Wymiary zewnętrzne: 4.2m x 13.2m

Masa: 11110 kg

Lustro główne: 2.4m (828 kg) – (przystosowane do stanu nieważkości)

Lustro wtórne: 0.3m (12.3 kg)

Ogniskowa: 57.6m

Zdolność rozdzielcza: 0.05"

Zużycie energii: 2800W

Transmisja danych: 120 GB / tydzień

Koszt produkcji i wystrzelenia: ok. 2.5 mld \$ (ceny z roku 2012)

Całkowity koszt: ok. 4.5-6 mld \$ (+0.5 mld z Europy)



## Orbita teleskopu



$$e = 0.0003$$

$$i = 28.46 \text{ deg}$$

$$\text{apogeum} = 562 \text{ km}$$

$$\text{perigeum} = 557 \text{ km}$$

$$\text{okres} = 96 \text{ min}$$

## Instrumenty pokładowe

6 żyroskopów

3 guidery interferometryczne

koła reakcyjne

Wide Field/Planetary Camera (WF/PC)

Goddard High Resolution Spectograph (GHRS)

Faint Object Camera (FOC)

Faint Object Spectograph (FOS)

High Speed Photometer (HSP)

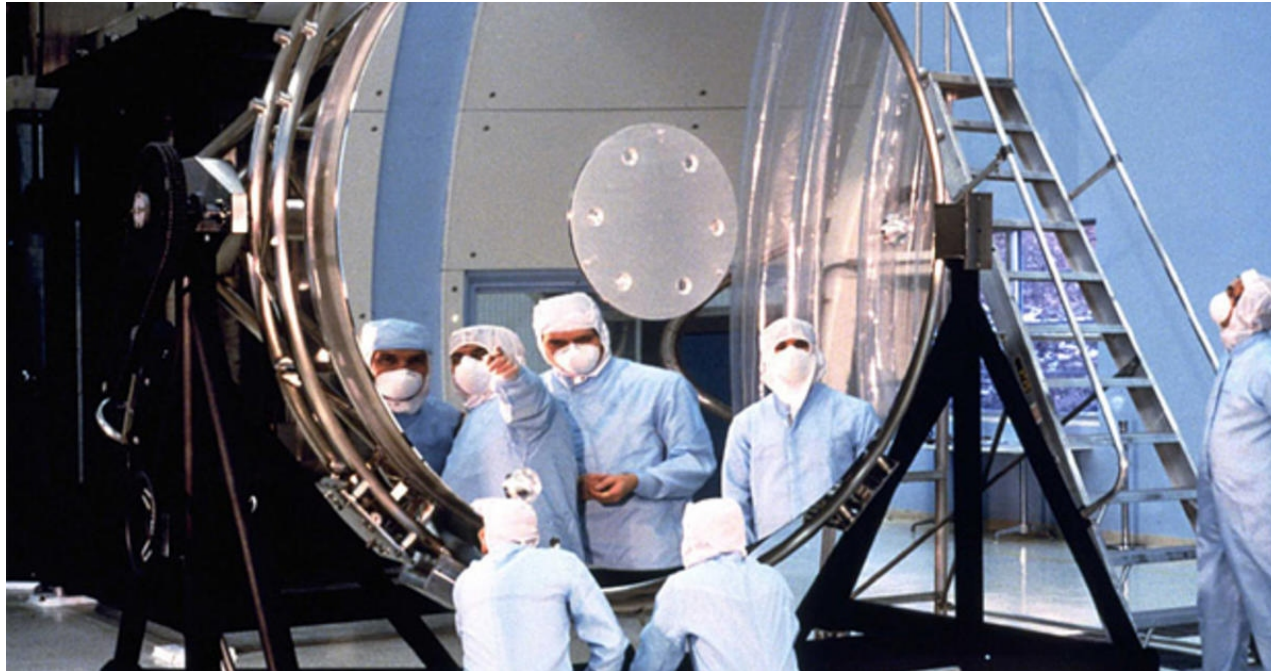
Teoretycznie dostępny zakres widmowy: 110nm do 1000nm

47 filtrów

Naprowadzanie i śledzenie z precyzją 0.01" w ciągu wielu godzin.

## Problem z lustrem głównym

Lustro główne zostało źle wyszlifowane – odchyłki sięgają 0.002 mm.  
Telekop ma solidną aberrację sferyczną – zdjęcia są nieostre.  
Błędny kształt wyszlifowano z fenomenalną precyzją 10 nm!

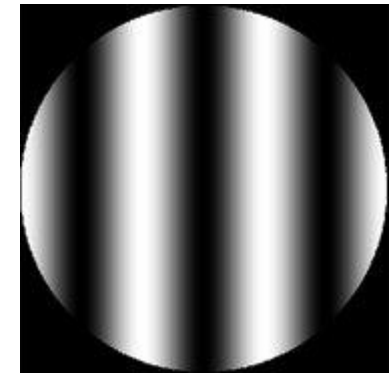
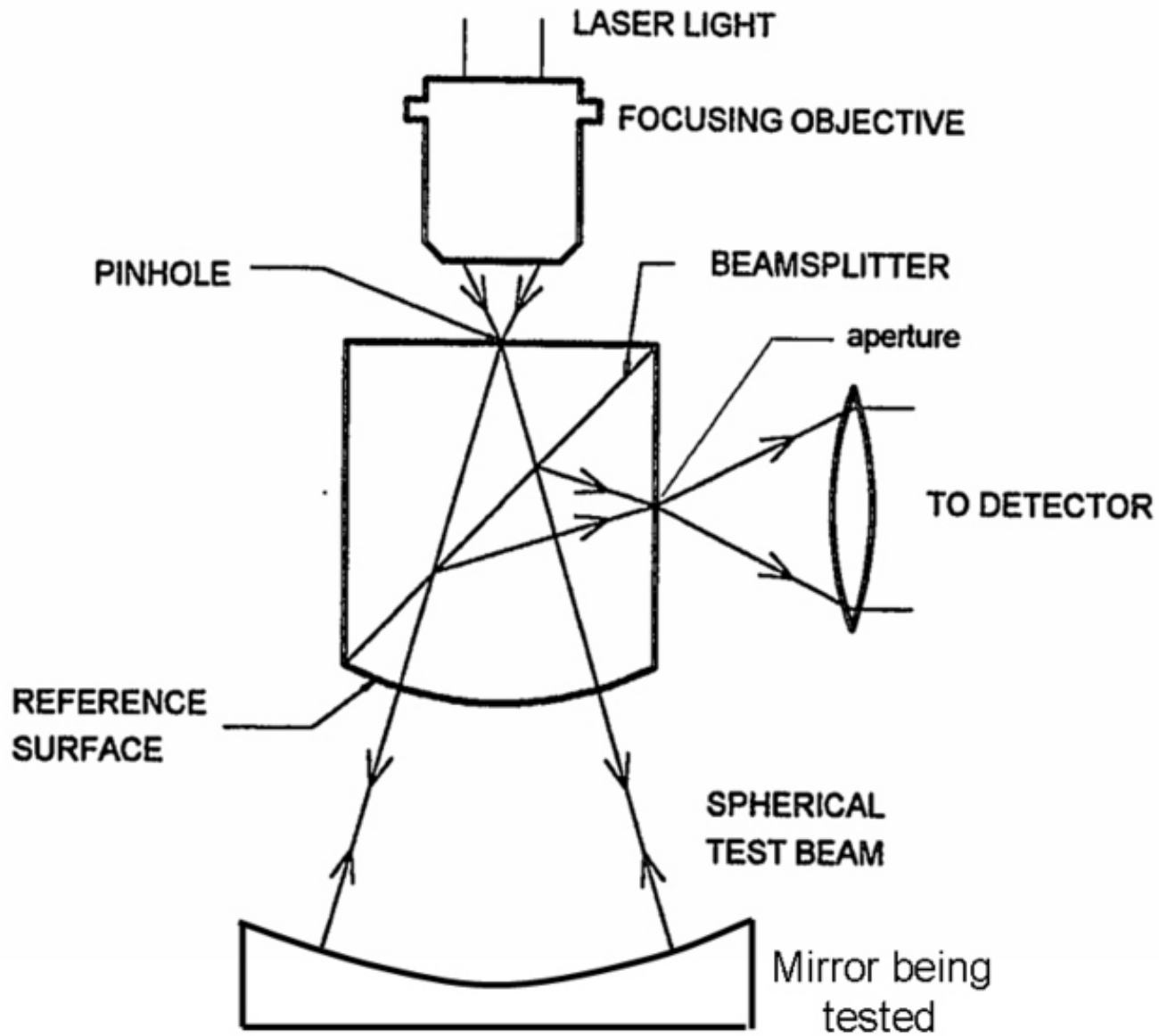


Dochodzenie wykazało, że błąd byłby odkryty gdyby:

1. Perkin-Elmer Corporation nie zignorował pomiarów z 2/3 urządzeń testowych
2. NASA nie zarzuciła testów porównawczych z innymi lustrami

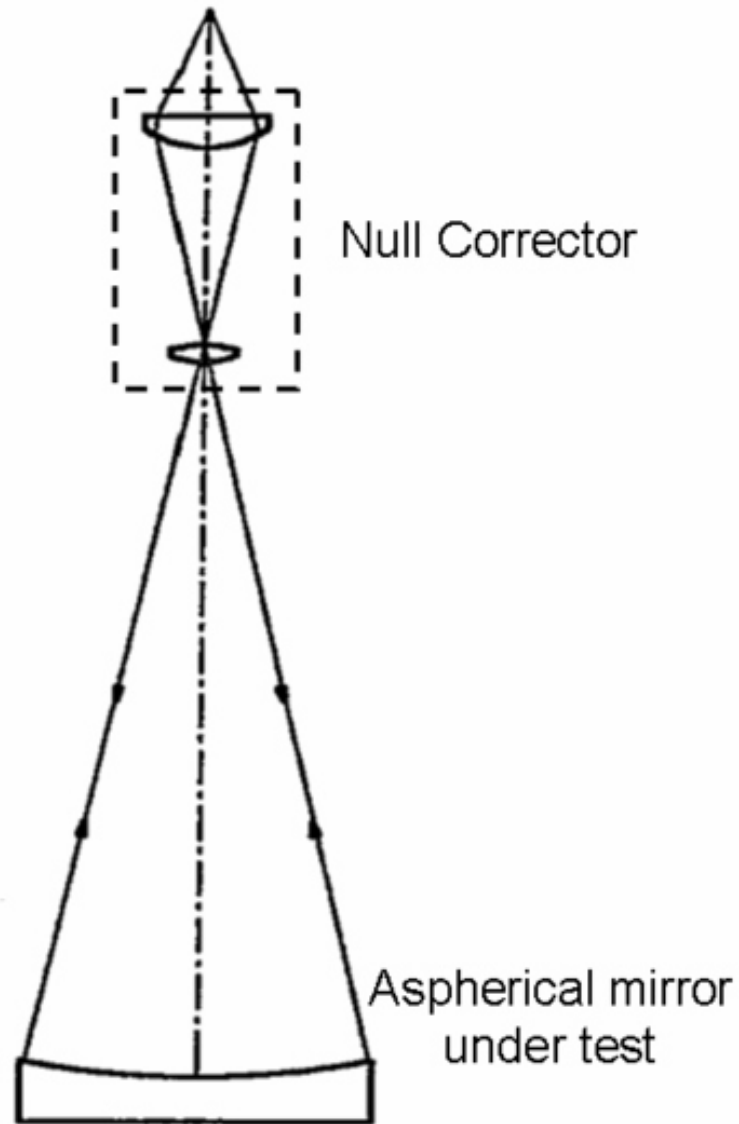


# Testowanie lustra teleskopu kosmicznego



Interferometryczny tester lustra sferycznego.

## Testowanie lustra teleskopu kosmicznego



Lustro asferyczne wymaga jeszcze „null correctora”, który przekształci wiązkę światła z lustra asferycznego do takiej wiązki jakby to lustro było sferyczne.

Null corrector używany do testów teleskopu Hubble’a miał błędne odstępki pomiędzy soczewkami (same soczewki były ok).

## Poprawianie obrazu

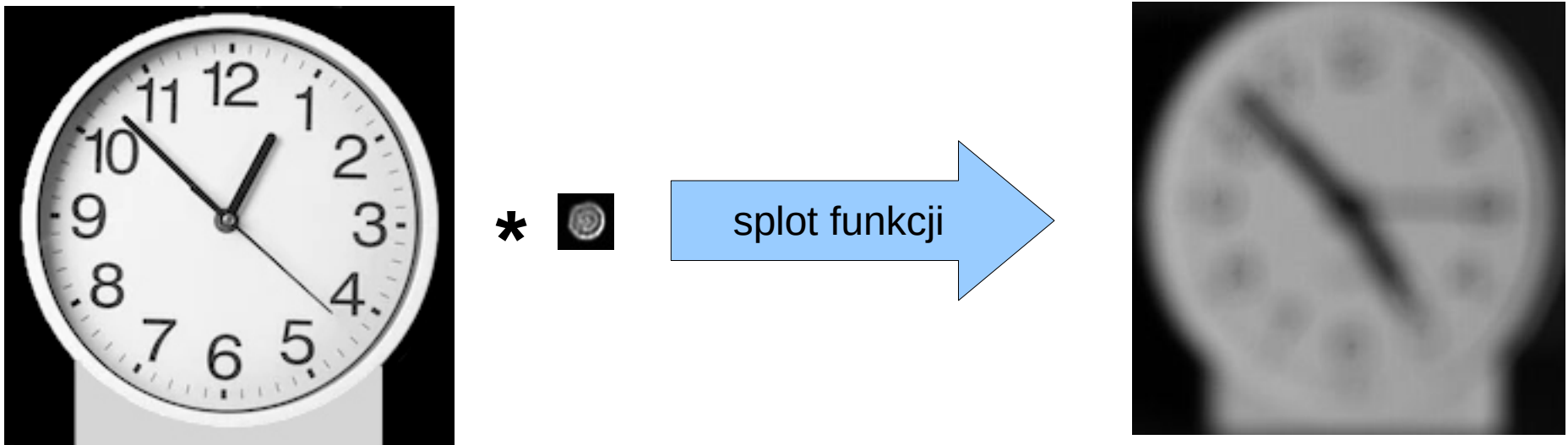
### Dekonwolucja – rozplot funkcji

(OBRAZ W TELESKOPIE) = (OBRAZ IDEALNY) \* (ZNIEKSZTAŁCENIA)

Zniekształcenia mogą mieć różne źródła np. wady optyczne.

Jeśli znamy funkcję opisującą zniekształcony obraz punktu świetlnego możemy próbować odtworzyć dowolny obraz sprzed zniekształceń.

Proces ten jest niejednoznaczny (odtworzony obraz nie jest w 100% pewny). Dlatego istnieją różne algorytmy dekonwolucji.

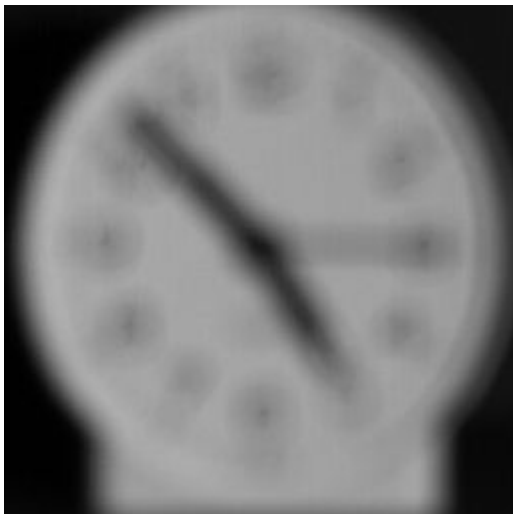
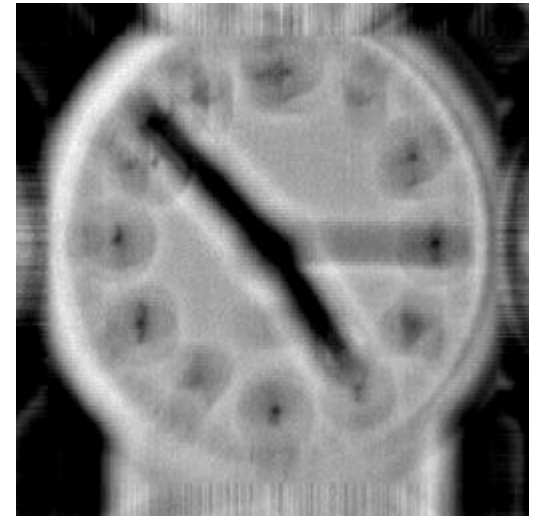


# Poprawianie obrazu

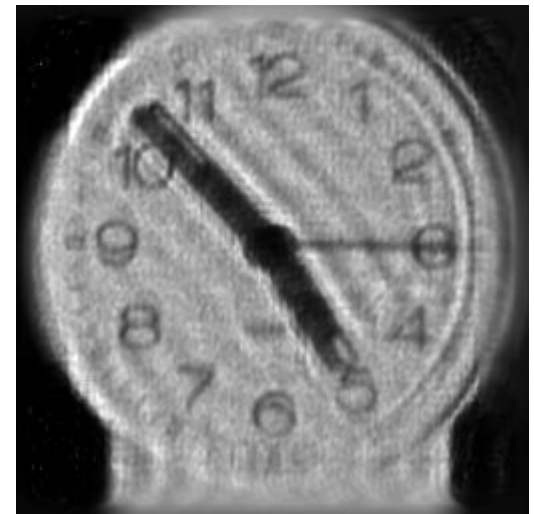
## Dekonwolucja – rozplot funkcji



wyostrzenie obrazu

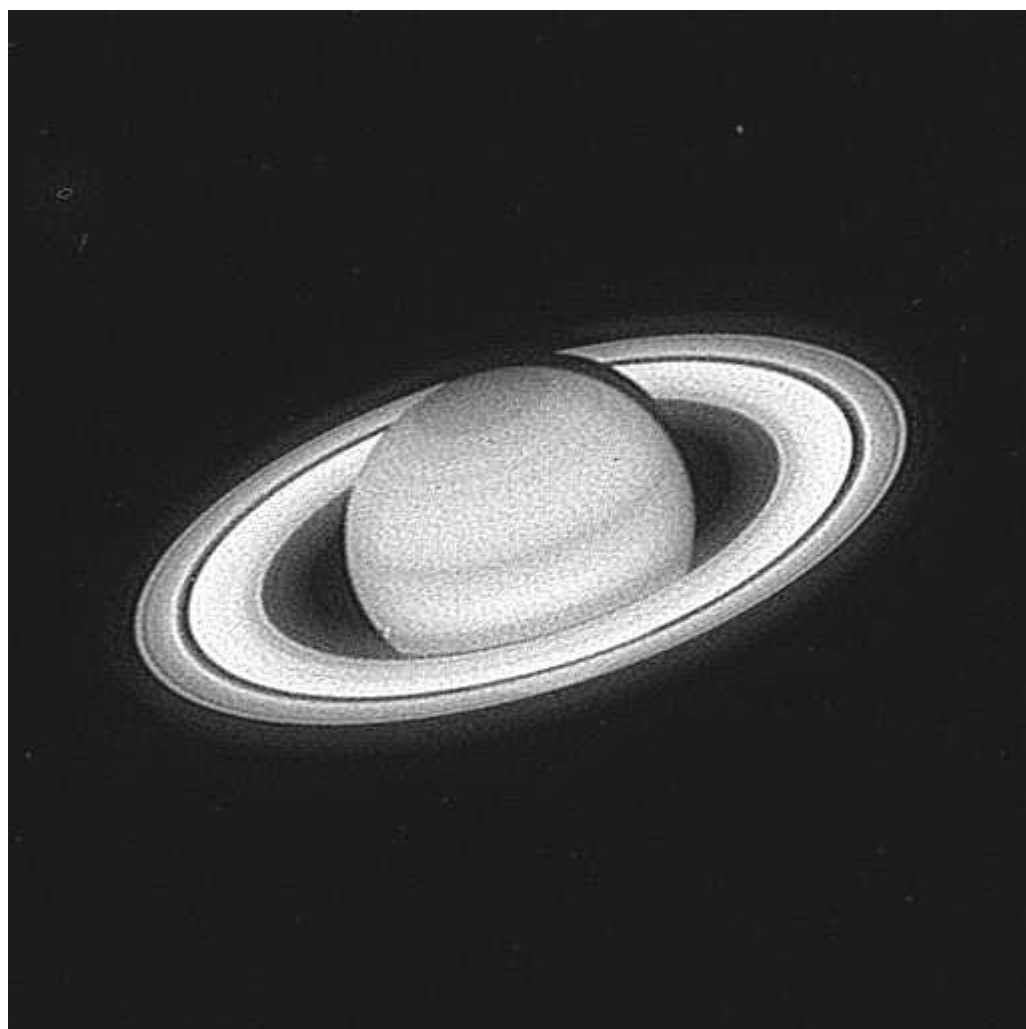


dekonwolucja / rozplot



## Poprawianie obrazu

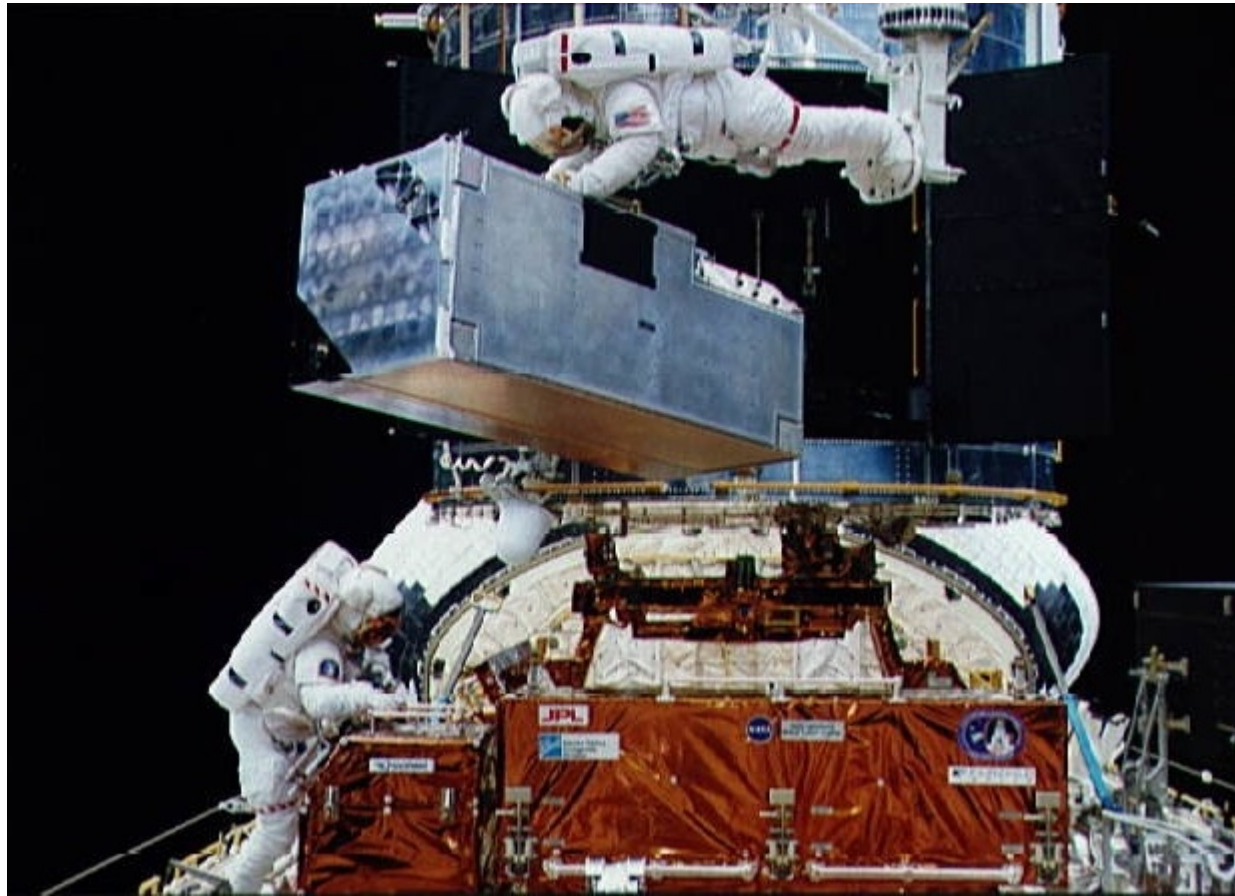
Przykład zastosowanie algorytmu dekonwolucja do obrazu z teleskopu Hubble'a



## Optyka korekcyjna

WFPC -> WFPC 2

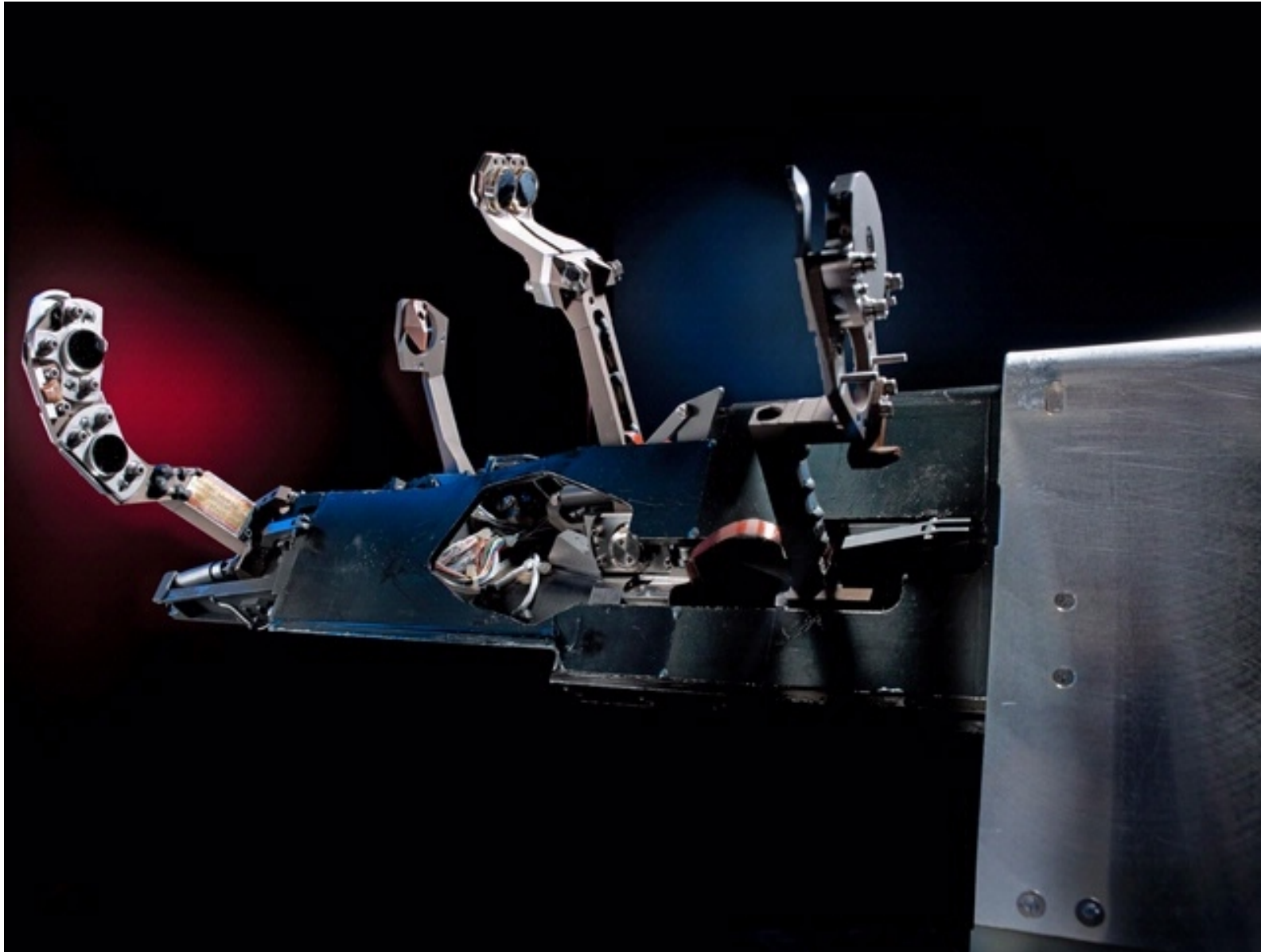
Pozostałe instrumenty -> Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement (COSTAR)



Grudzień 1993r

# Optyka korekcyjna

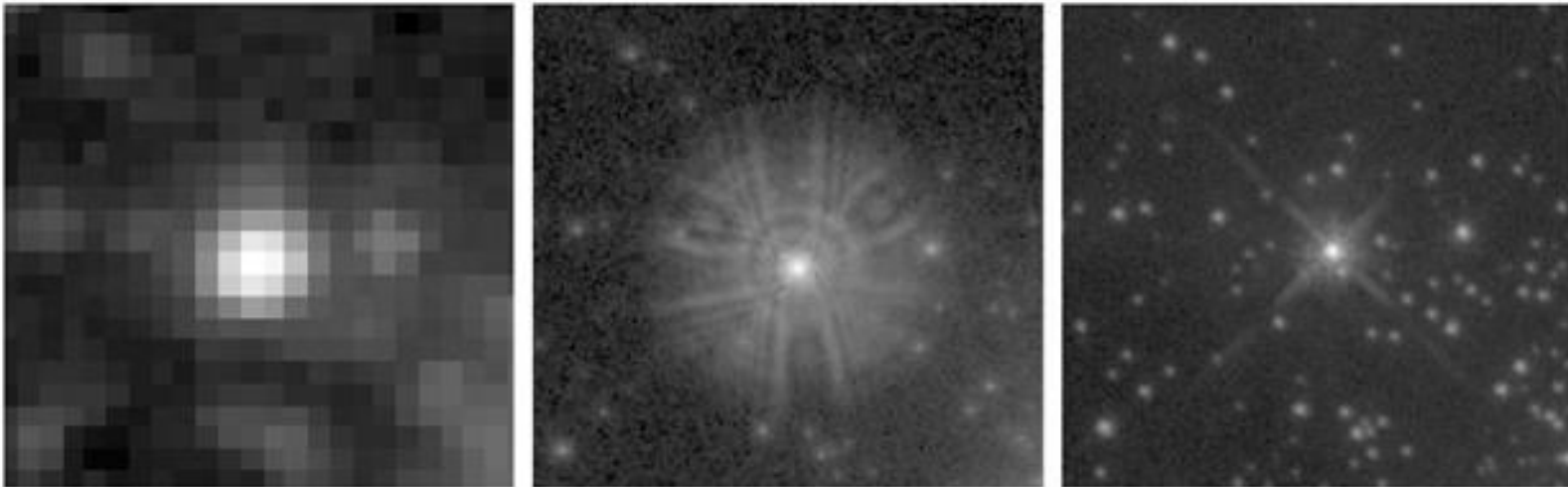
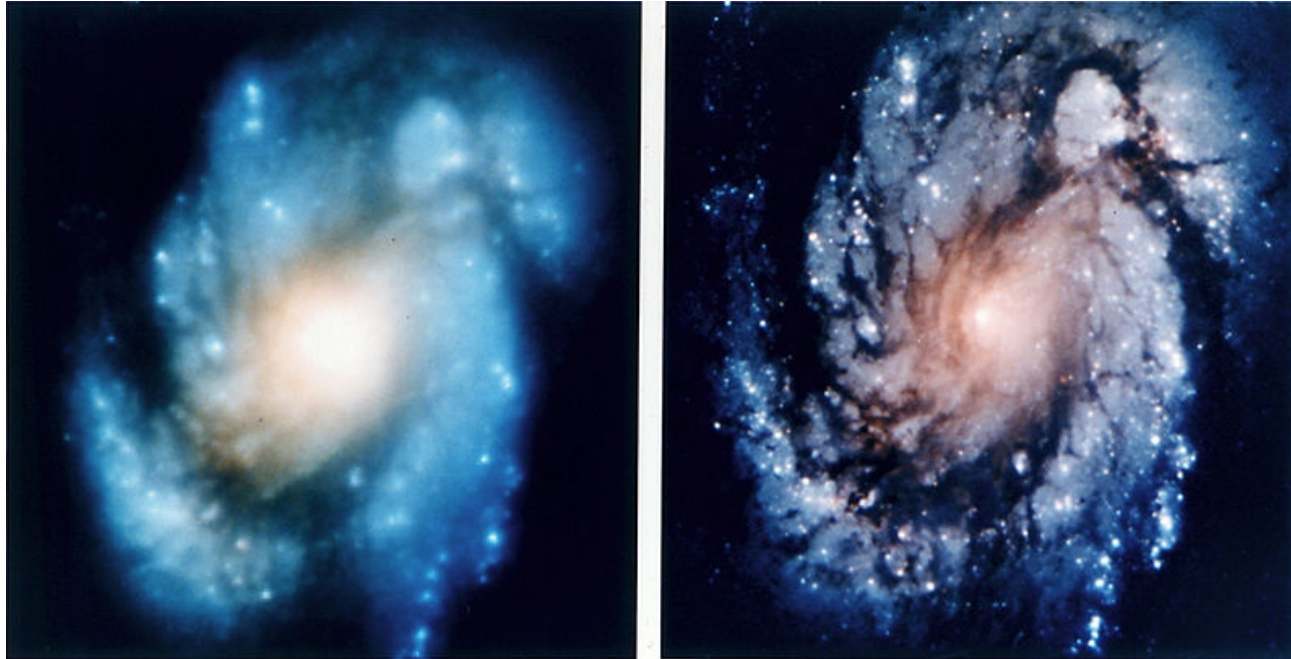
## Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement (COSTAR)



National Air and Space Museum, Washington



## Optyka korekcyjna

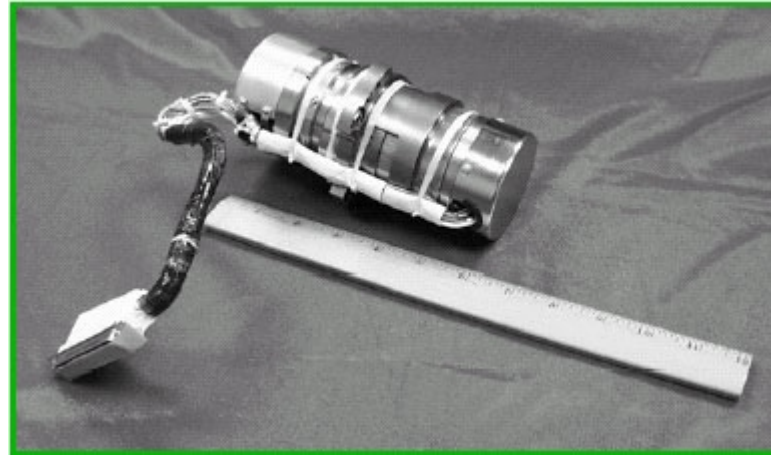


Porównanie zdjęć: naziemne (bez optyki adaptacyjnej),  
HST przed naprawą (bez dekonwolucji), HST po naprawie.



## Inne problemy

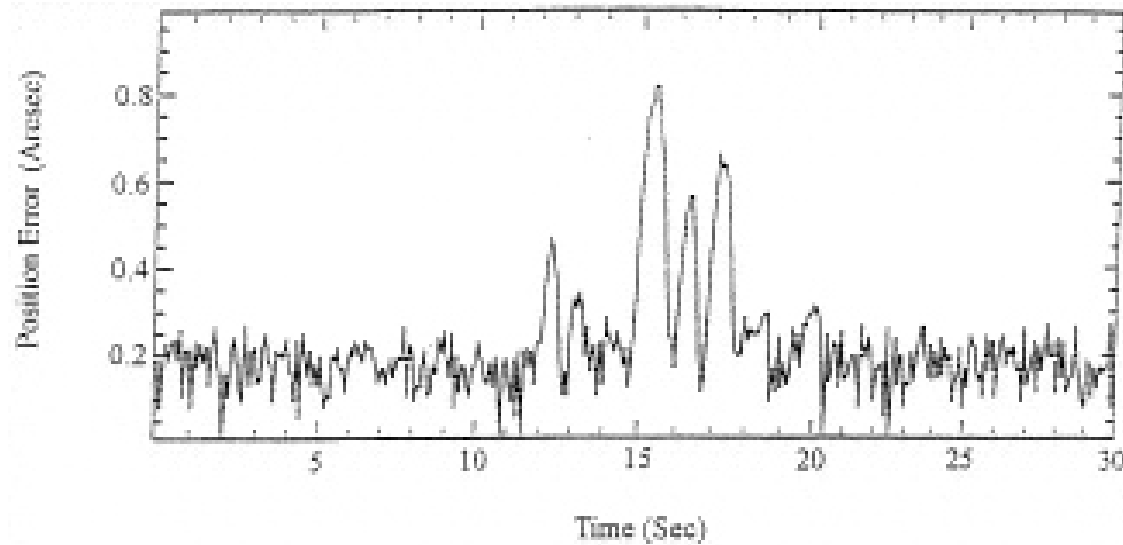
Awarie żyroskopów:  
(1990, 1991, 1992)



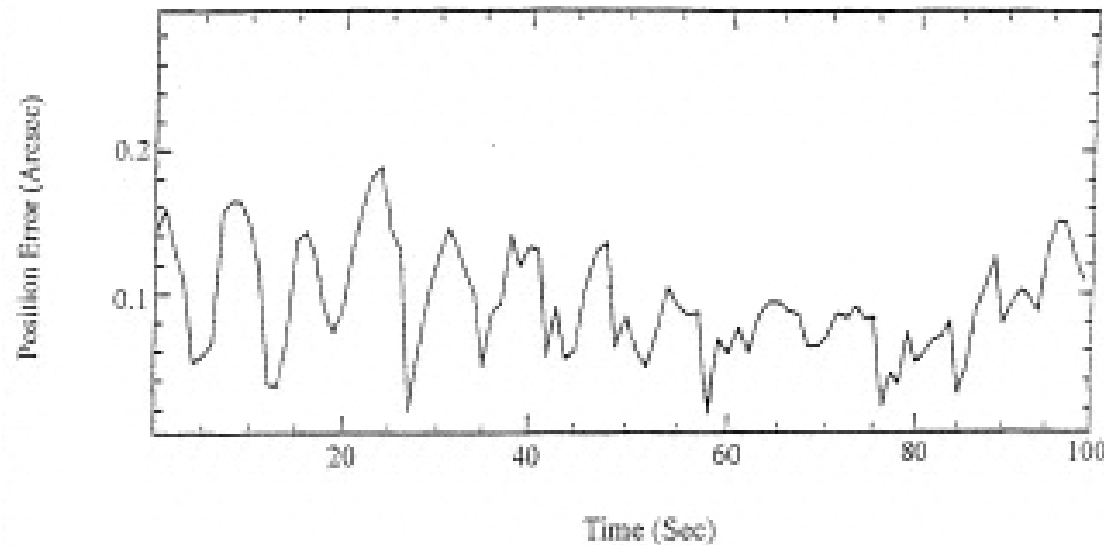
Wibracje:  
(przez 8 min po każdym  
przekroczeniu termintora)



## Problemy ze śledzeniem



drgania  
przypadkowe

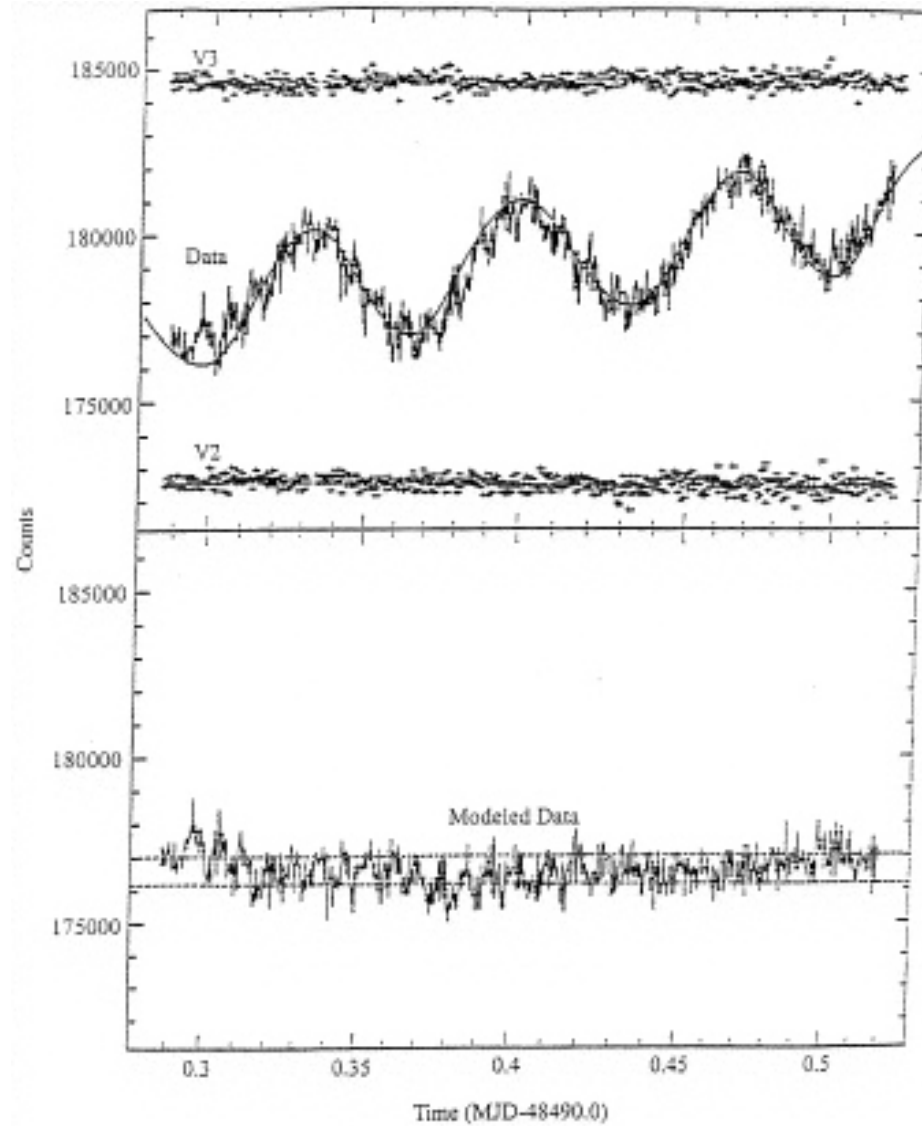


drgania  
„regularne”

Początkowe problemy w większości usunięto zmieniając oprogramowanie sterujące.

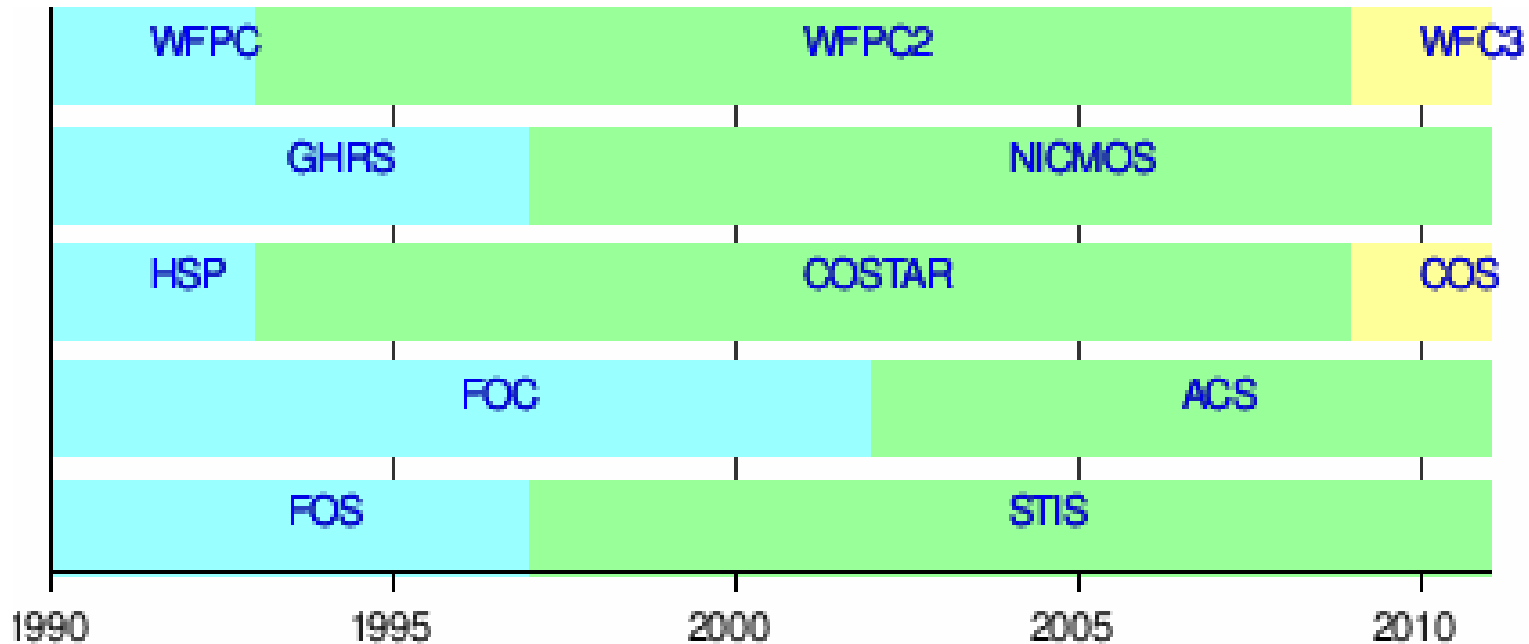
# Problemy z pomiarami jasności

## High Speed Photometer (HSP) „breathing”



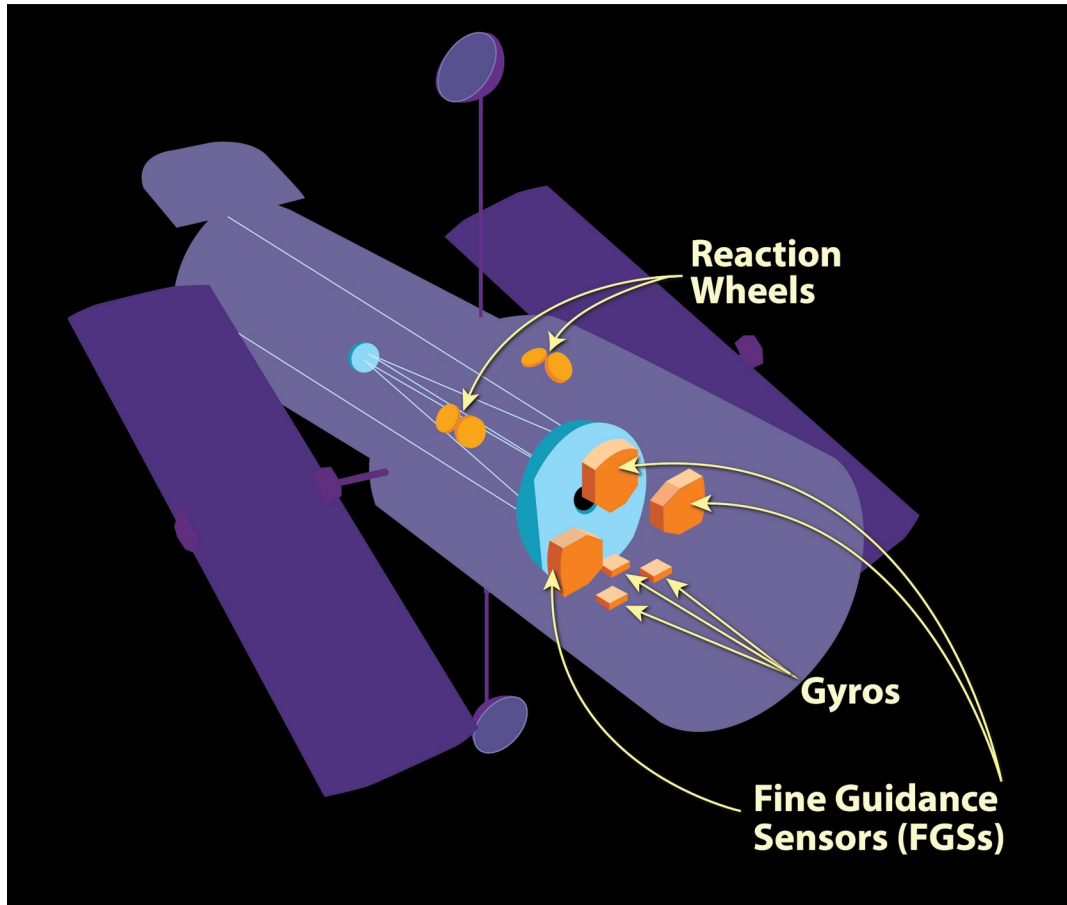
Fotometria gwiazdy HD60435 (data) oraz pozycja na auto-guiderze (V1, V2)

## Misje serwisowe



SM-1	1993	COSTAR, WFPC2, 2 komputery, 4 żyroskopy, panele słoneczne
SM-2	1997	STIS, NICMOS
SM-3A	1999	6 żyroskopów, guider, izolację termiczną, 486 25MHz 2MB RAM, elektronikę baterii słonecznych
SM-3B	2002	ACS, nowe chłodzenie detektorów, panele słoneczne, przekaźniki zasilacza
SM-4	2009	WFPC3, COS, naprawa ACS i STIS, wymiana pokładowej bazy danych

## Jak wycelować i ustabilizować teleskop kosmiczny?



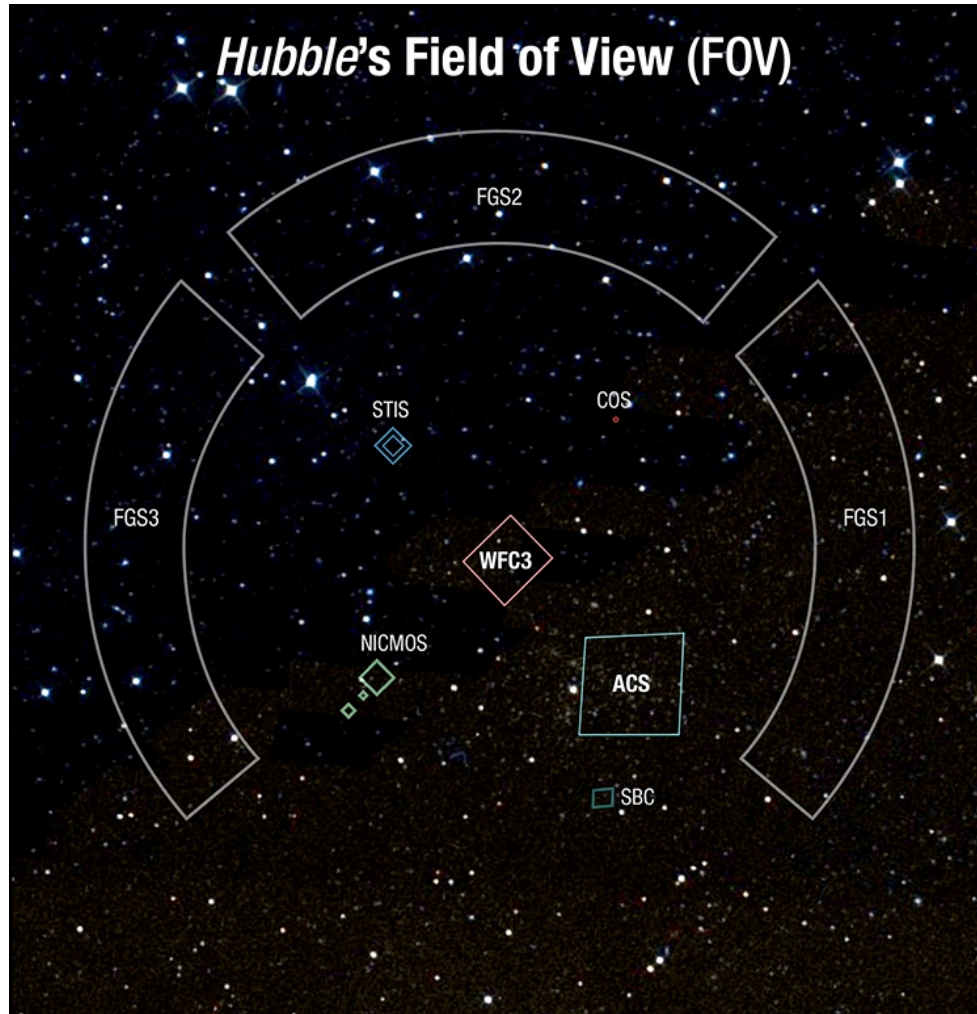
System sterowania Hubblem składa się z:

- żyroskopów
- kół reakcyjnych
- elektromagnesów
- czujników Słońca
- star trackerów
- fine guidance system

[https://youtu.be/n\\_6p-1J551Y?t=73](https://youtu.be/n_6p-1J551Y?t=73)

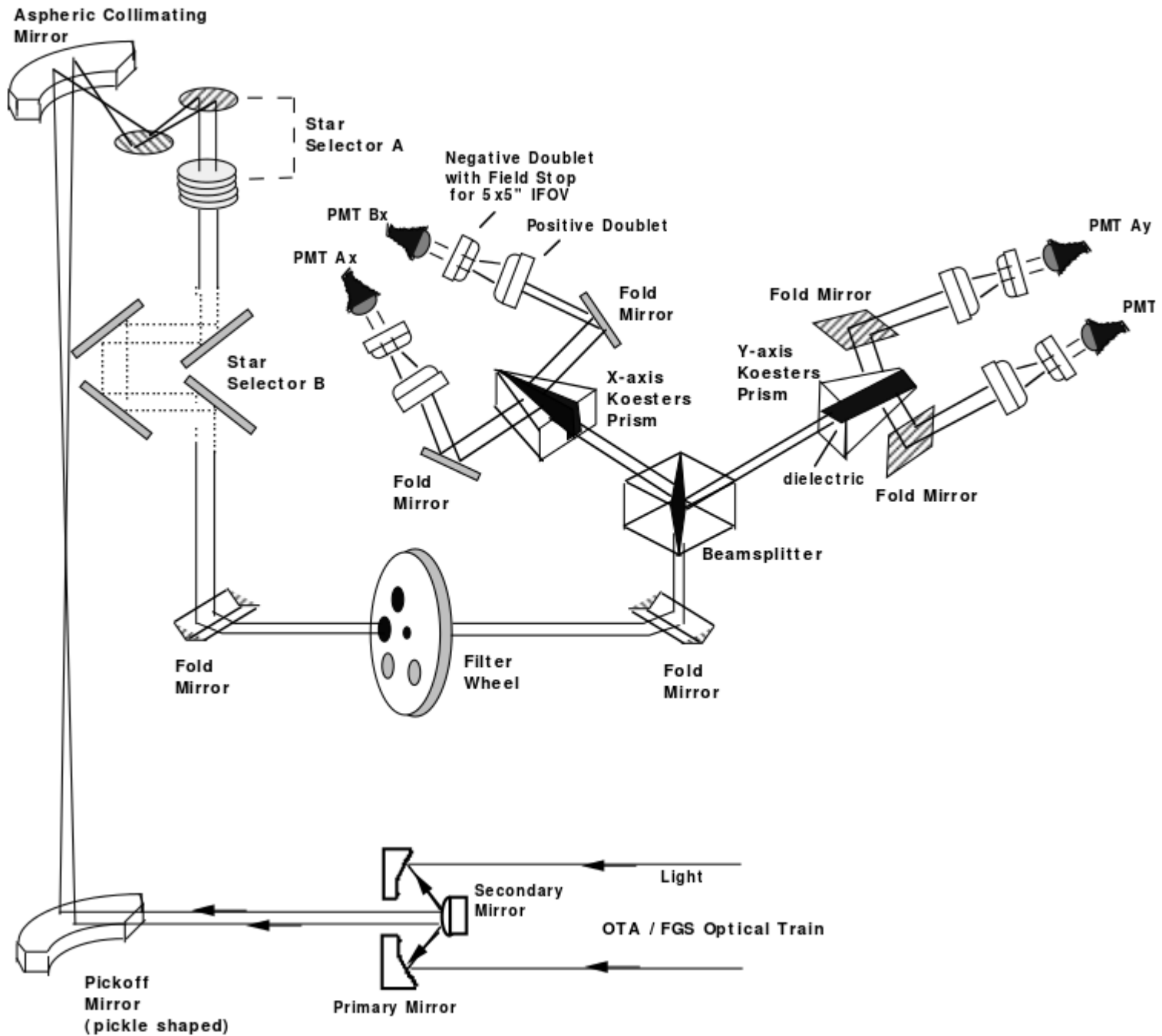
## Fine Guidance Sensor

System stabilizacji (śledzenia obiektów na niebie).



Minimalna ilość pracujących czujników: 2 z 3.  
Minimalna odległość od Słońca: 50 stopni.  
Dokładność pozycjonowania teleskopu: 0.01" !!!

# Fine Guidance Sensor





Przykładowe wyniki

SN1987A

Najbliższa eksplozja supernowa od XVI wieku: SN1978A

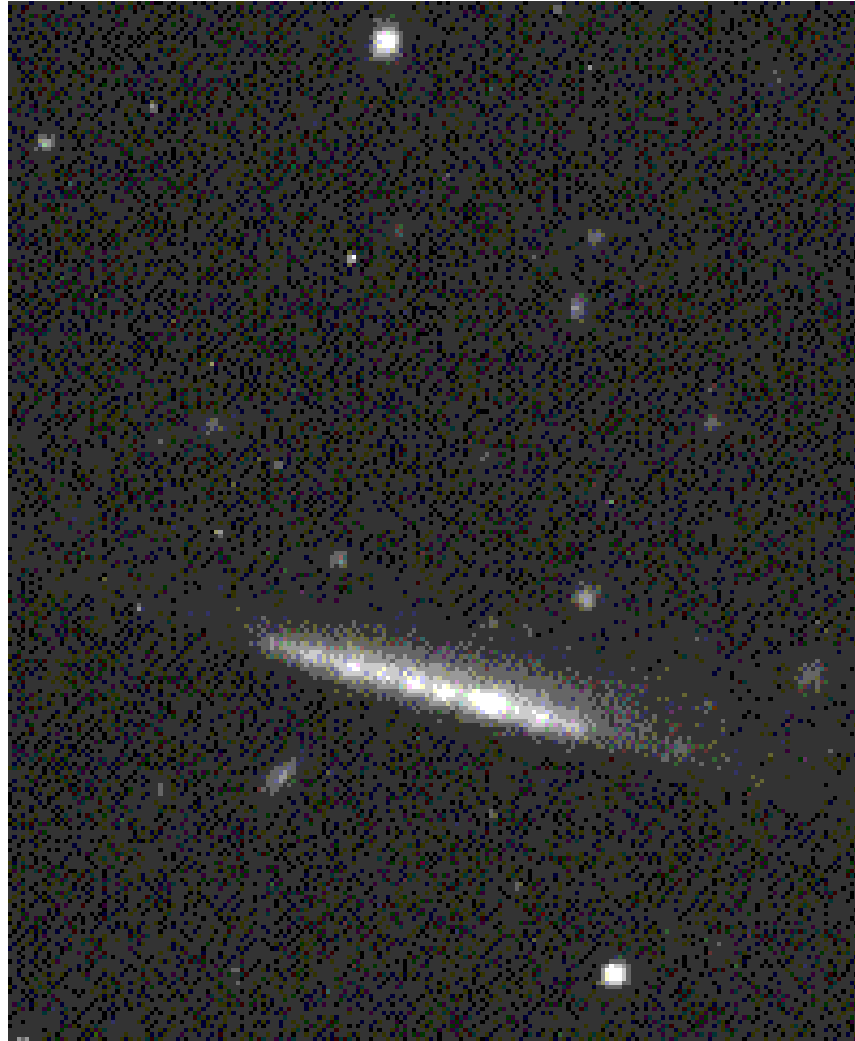


Wieloletnia sekwencja zdjęć miejsca wybuchu z teleskopu Hubblea.

Jaśniejący pierścień jest skutkiem zderzenia materii wyrzuconej podczas eksplozji supernowej z materią wyrzuconą przez gwiazdę ok. 20 tyś lat wcześniej.

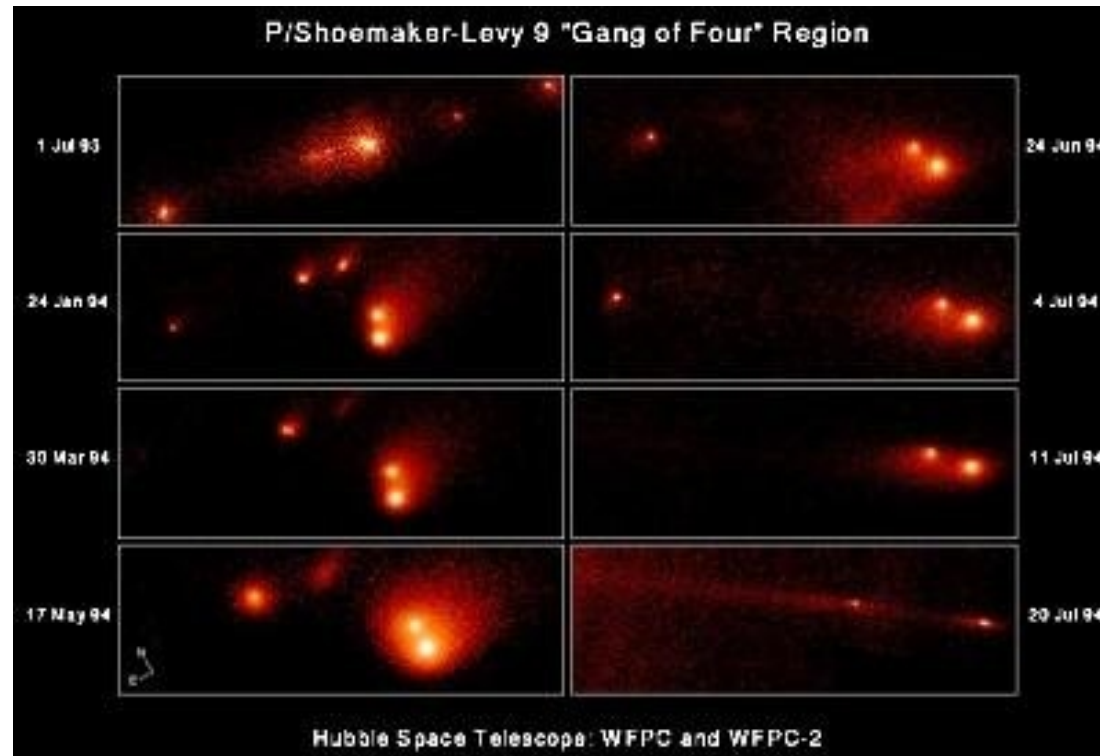
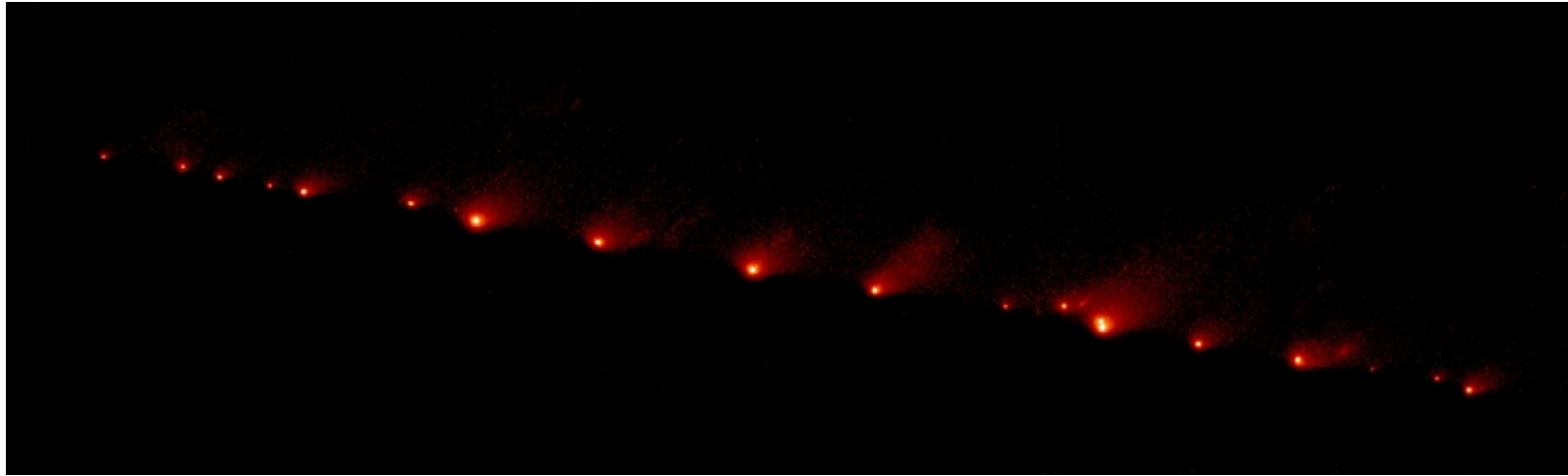


Przykładowe wyniki  
Shoemaker-Levy 9

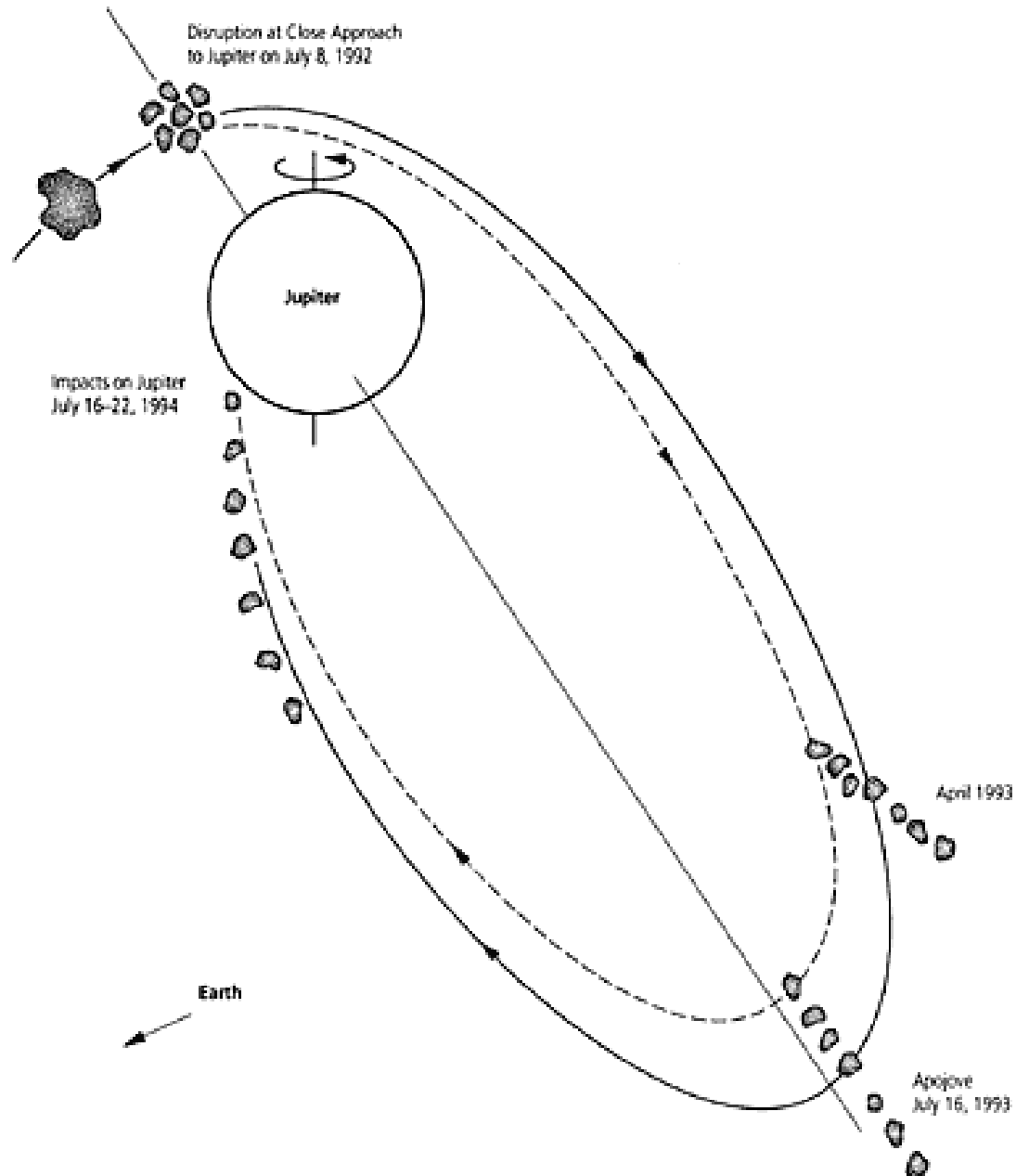


Przypadkowe odkrycie komety podczas poszukiwań planetoid w pobliżu Jowisza.

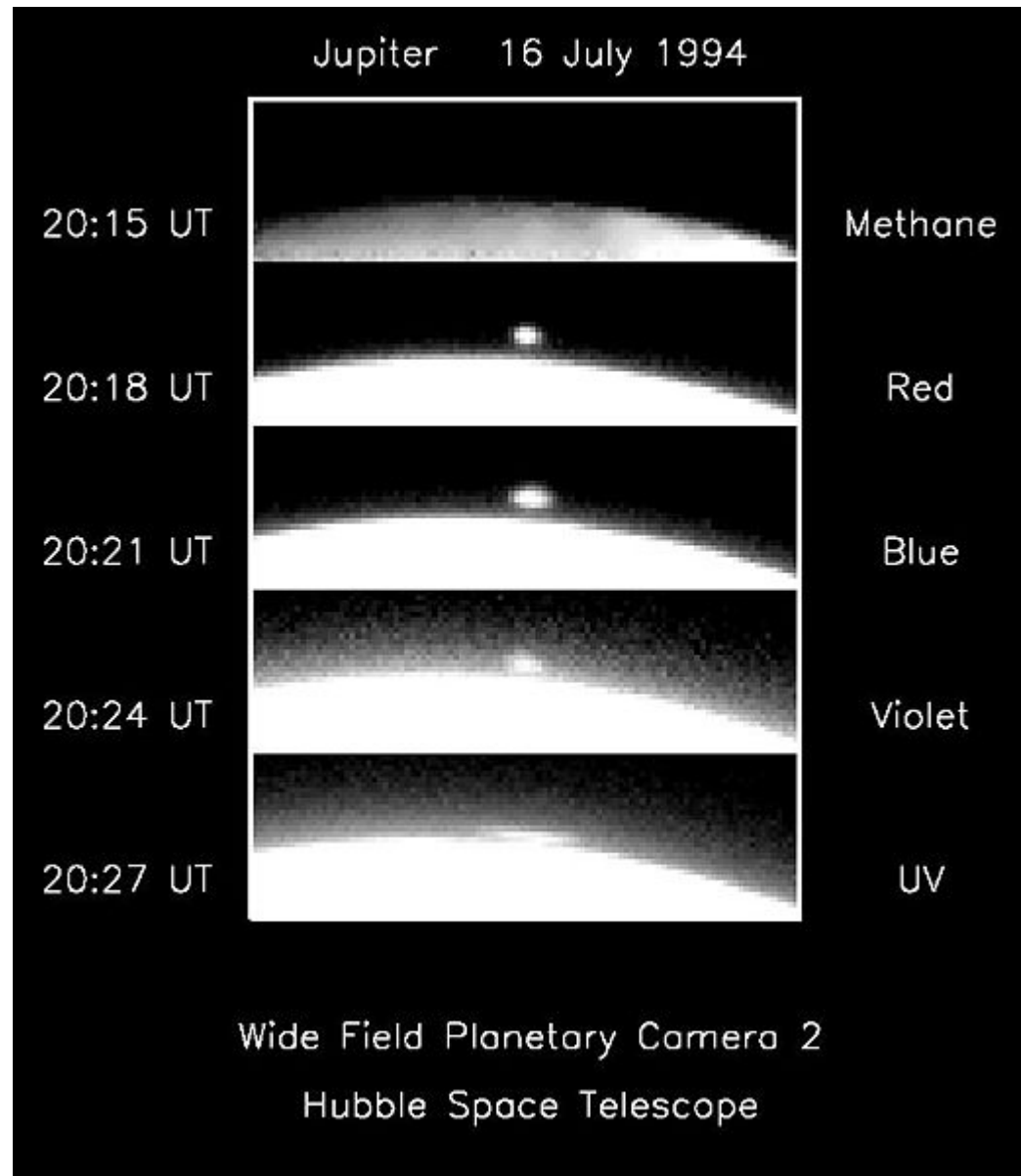
# Przykładowe wyniki Shoemaker-Levy 9



# Przykładowe wyniki Shoemaker-Levy 9

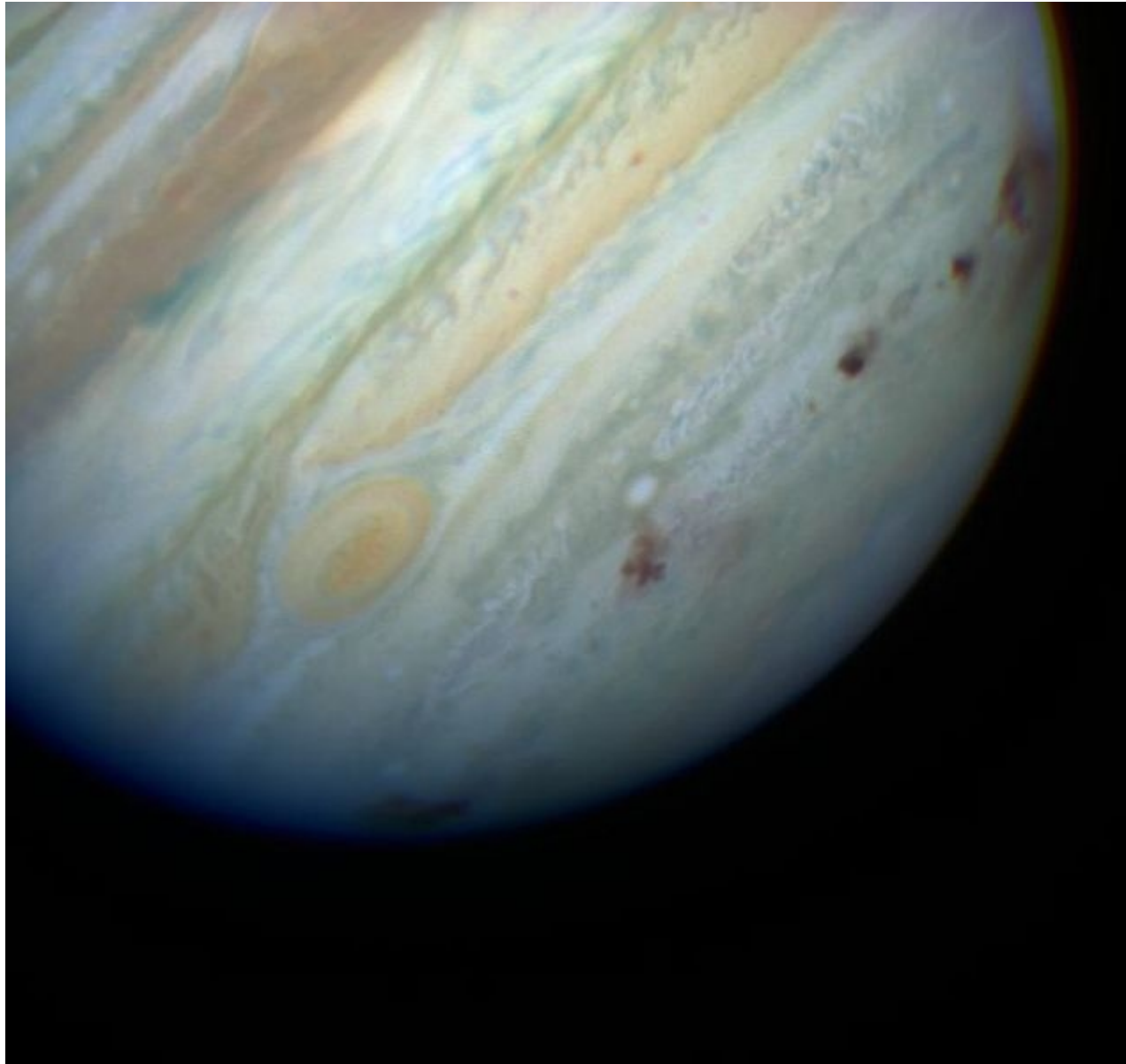


Przykładowe wyniki  
Shoemaker-Levy 9



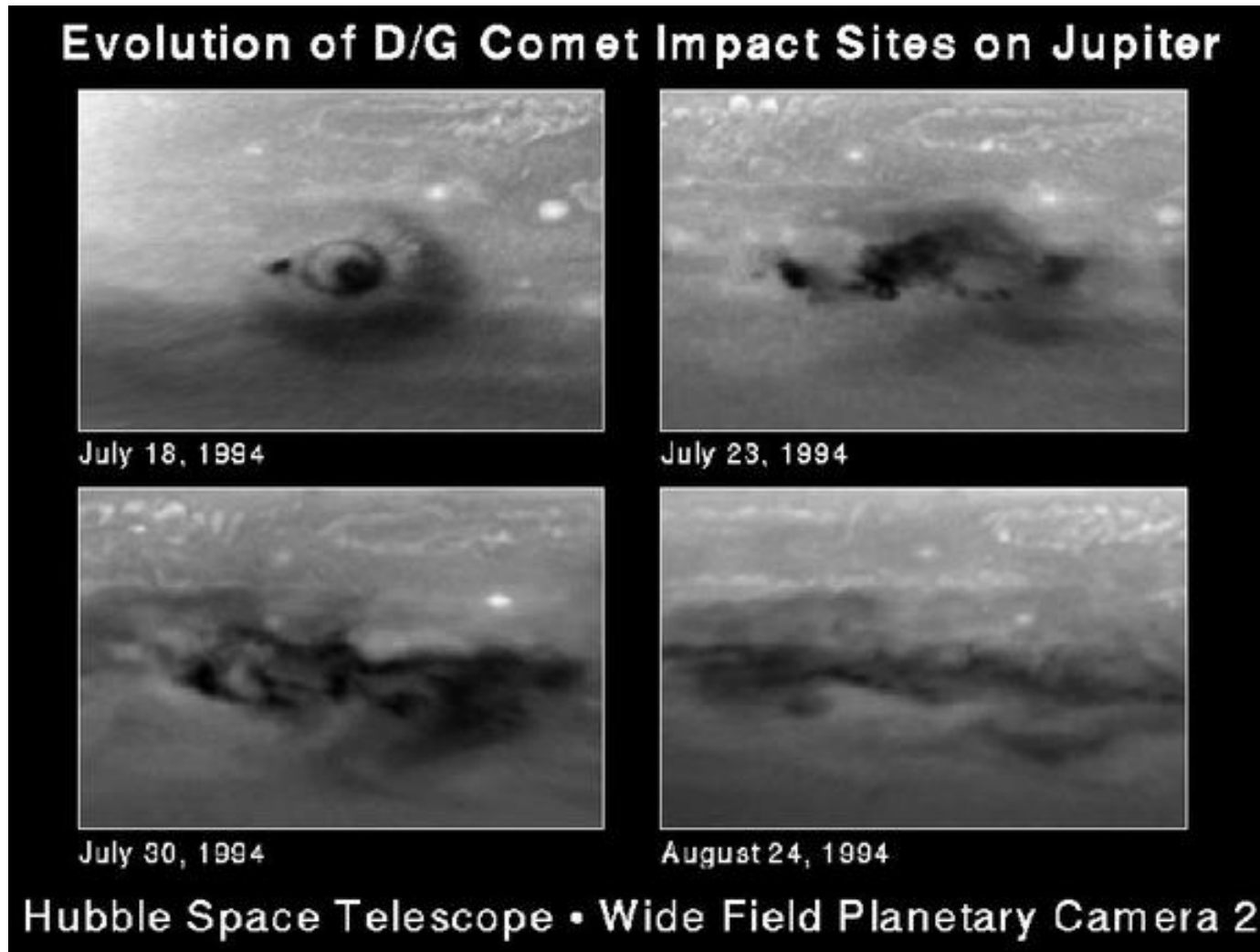


Przykładowe wyniki  
Shoemaker-Levy 9



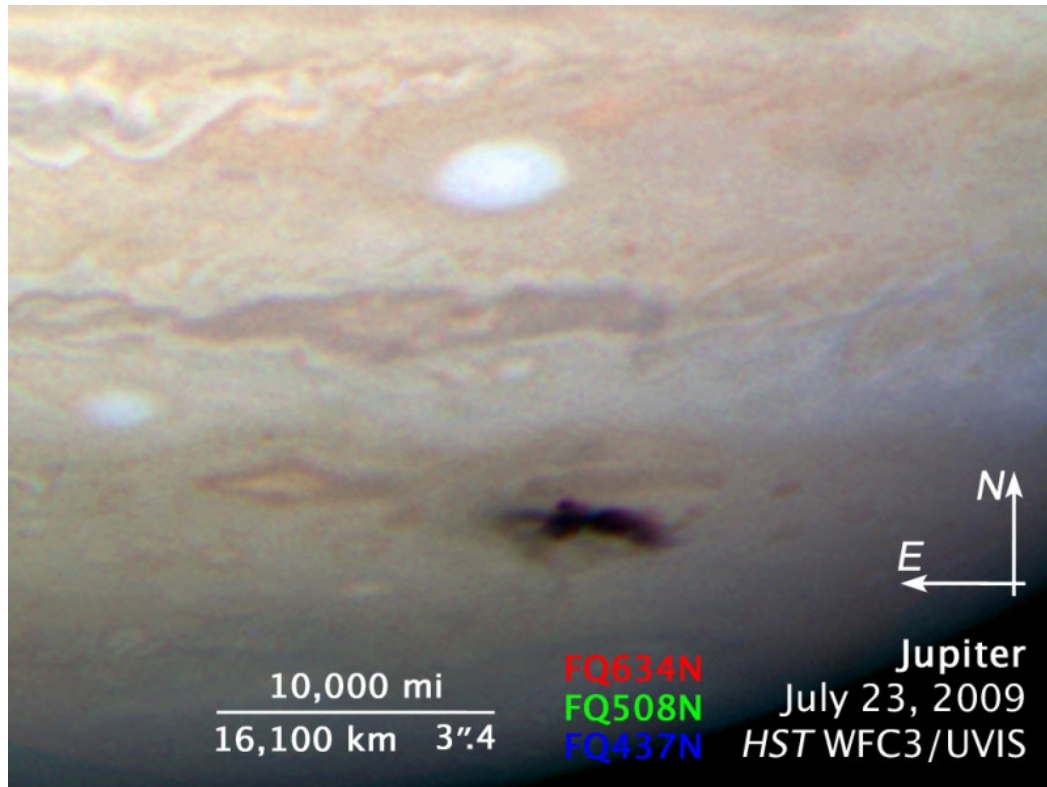
Ślady po serii zderzeń z odłamkami komety S-L 9.

Przykładowe wyniki  
Shoemaker-Levy 9



Rozmycie śladów zderzenia w atmosferze Jowisza.

## Inne zderzenia z kometami



Ślad spadku komety na Jowisza  
odkryty przez miłośnika Antoniego Wesley'a



Łańcuch kraterów na księżycu Jowisza  
Ganimedesie.

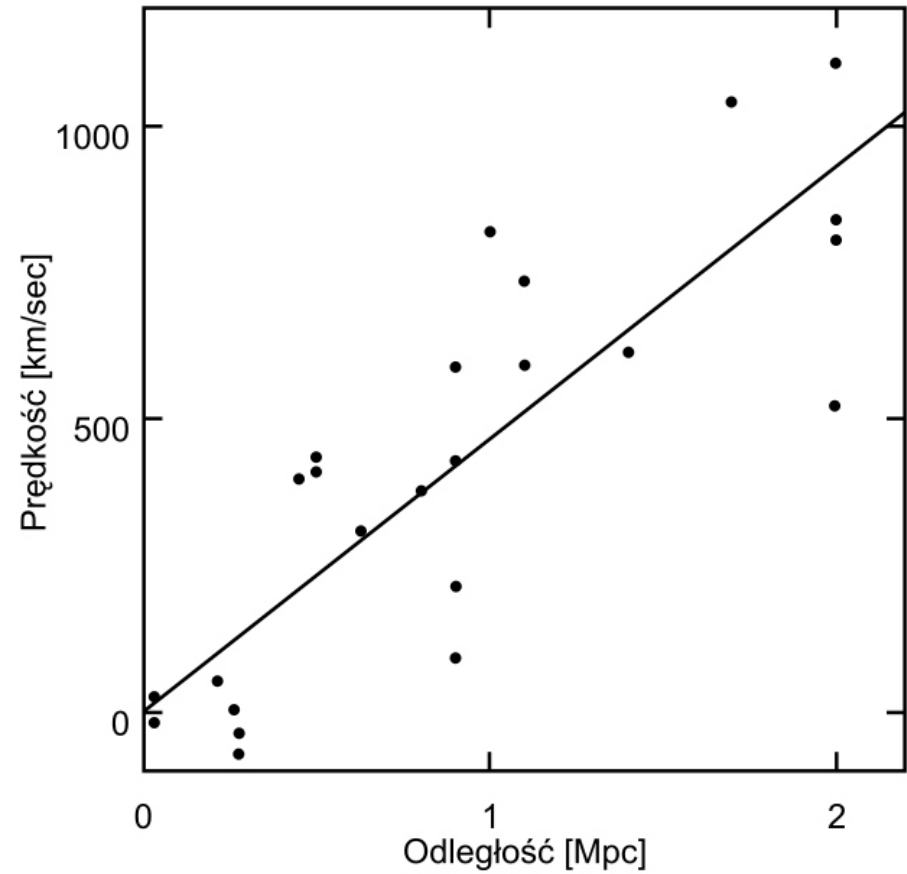
## Przykładowe wyniki

### Stała Hubble'a

Prawo Hubble'a:

$$v = H_0 r$$

$$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$$



Oryginalna praca Hubble'a (1929)



Przykładowe wyniki  
Pomiary stałej Hubble'a

Table 14. Overall Systematic Errors Affecting All Methods

Source of Uncertainty	Description	Error (%)
LMC zero point	error on mean from Cepheids, TRGB, SN1987A, red clump, eclipsing binaries	$\pm 5\%$
WFPC2 zero point	tie-in to Galactic star clusters	$\pm 3.5\%$
Reddening	limits from NICMOS photometry	$\pm 1\%$
Metallicity	optical, NICMOS, theoretical constraints	$\pm 4\%$
Bias in Cepheid PL	short-end period cutoff	$\pm 1\%$
Crowding	artificial star experiments	$+5, -0\%$
Bulk flows on scales >10,000 km/sec	limits from SNIa, CMB	$\pm 5\%$

Adopted final value of  $H_0$ :

$$H_0 = 72 \pm 3 \text{ [random]} \pm 7 \text{ [systematic]} \text{ km/sec/Mpc}$$

# Przykładowe wyniki

## Hubble Deep Field

Data: 18-28.12.1995r

Detektor: WFPC2, całkowity czas naświetlania 30-43h, 4 filtry

Lokalizacja: UMa



# Przykładowe wyniki

## Hubble Ultra Deep Field

Data:

październik 2003, styczeń 2004,

Detektor:

Advanced Camera for Surveys, 38 filtrów 380 - 1070 nm

Tryb pracy: Wide Field Channel: 4096x4096, 15  $\mu\text{m}$ , 0.05"/pix, 202" x 202"

Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer, 800 - 2400 nm

0.1"/pix, 135" x 127"

Lokalizacja: Fornax (Piec), poza obszarem ciągłej widoczności  
fragment Chandra Deep Field - South (3h 32m -27° 50')

Filtry: F435W, F606W, F775W, F850LP (ACS)  
F105W, F125W, F160W (WFC3)

Czasy ekspozycji:

Od 37h do 96h w 116 lub 288 kawałkach po 1200s



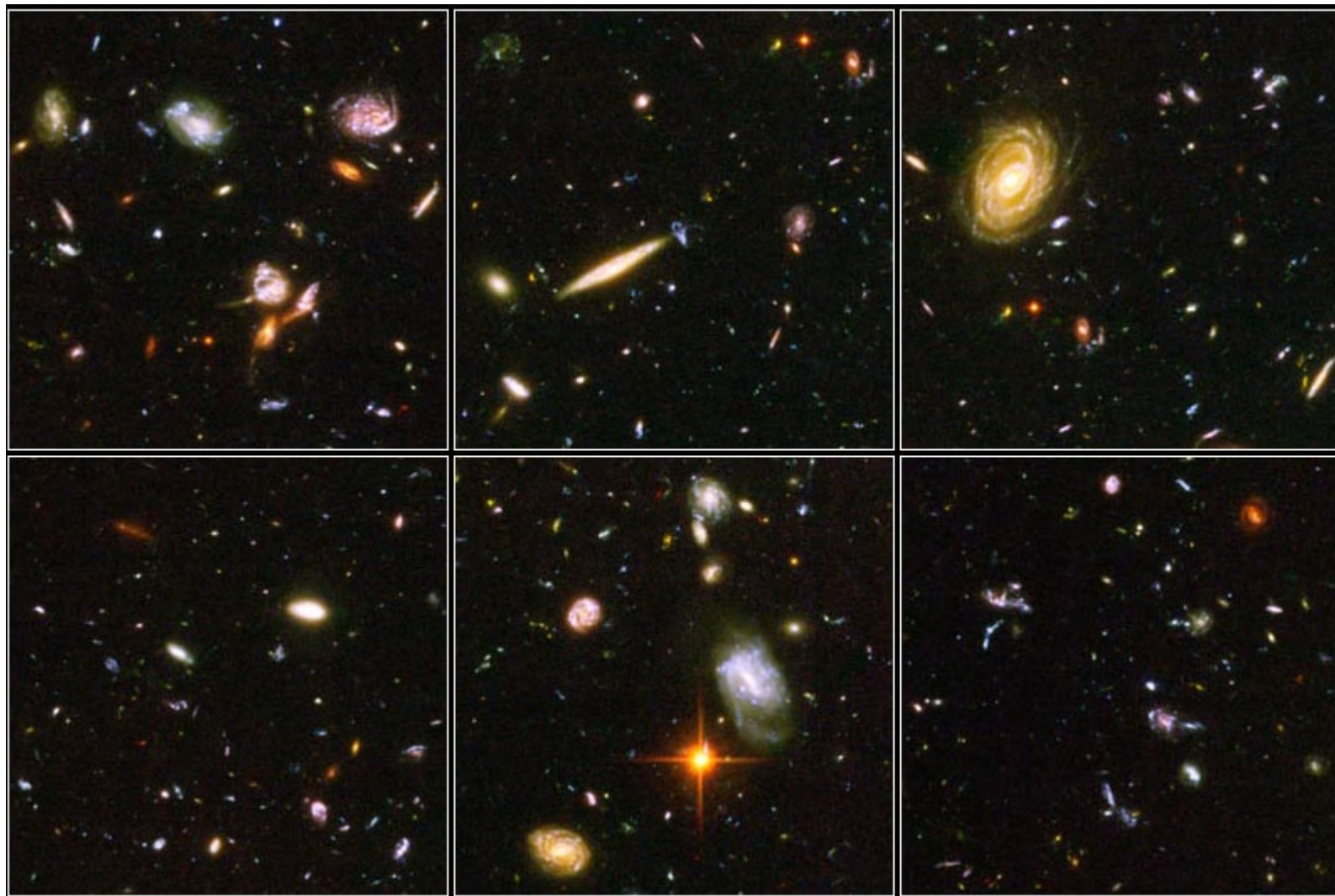


ACS



Przykładowe wyniki

Hubble Ultra Deep Field

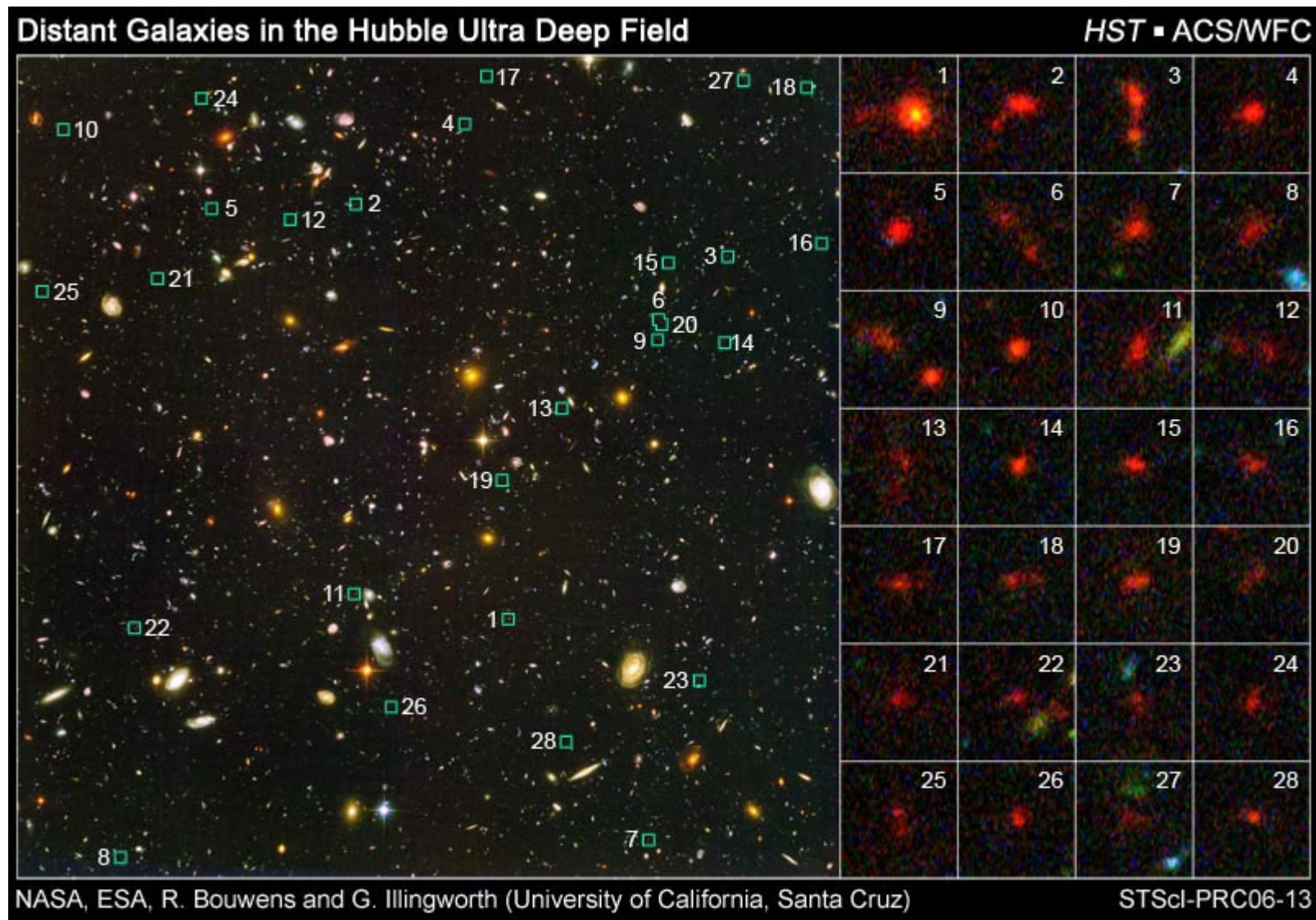


animacja



# Przykładowe wyniki

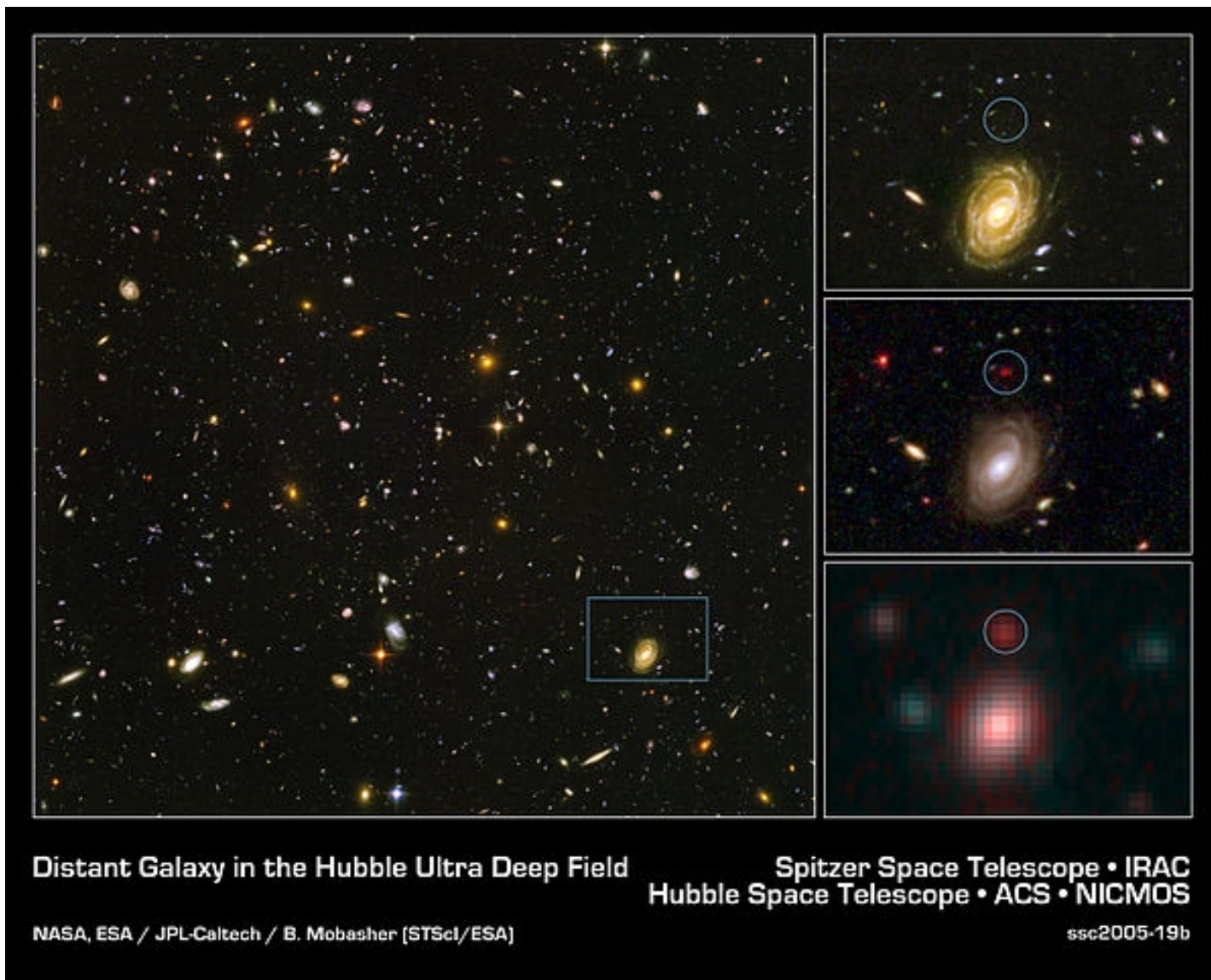
## Hubble Ultra Deep Field



Bardzo młode galaktyki we wczesnym Wszechświecie

# Przykładowe wyniki

## Hubble Ultra Deep Field

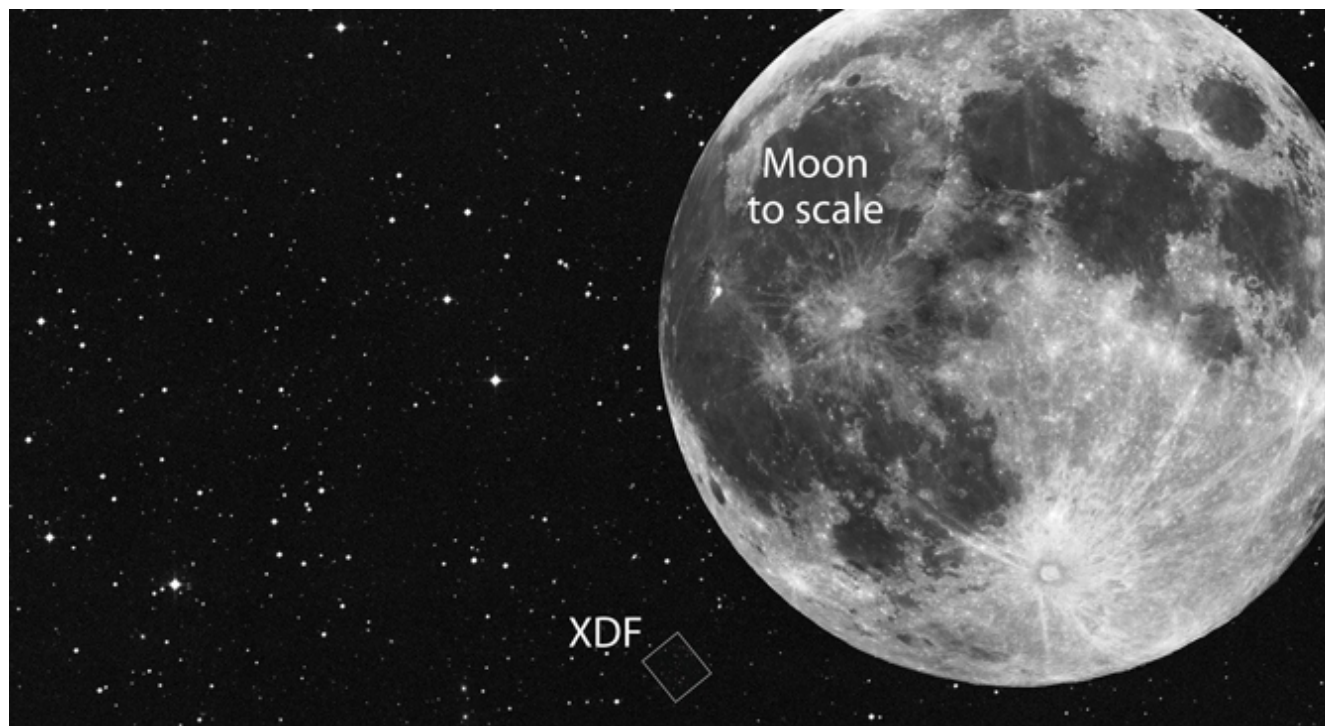


Galaktyka  $z \sim 6$  (12.8 Gly, 800 mln lat po W.W.)



## Przykładowe wyniki

### Hubble eXtreme Deep Field (XDF) - 2012



Ten same fragment nieba co UDF, tylko nieco mniejsze pole.

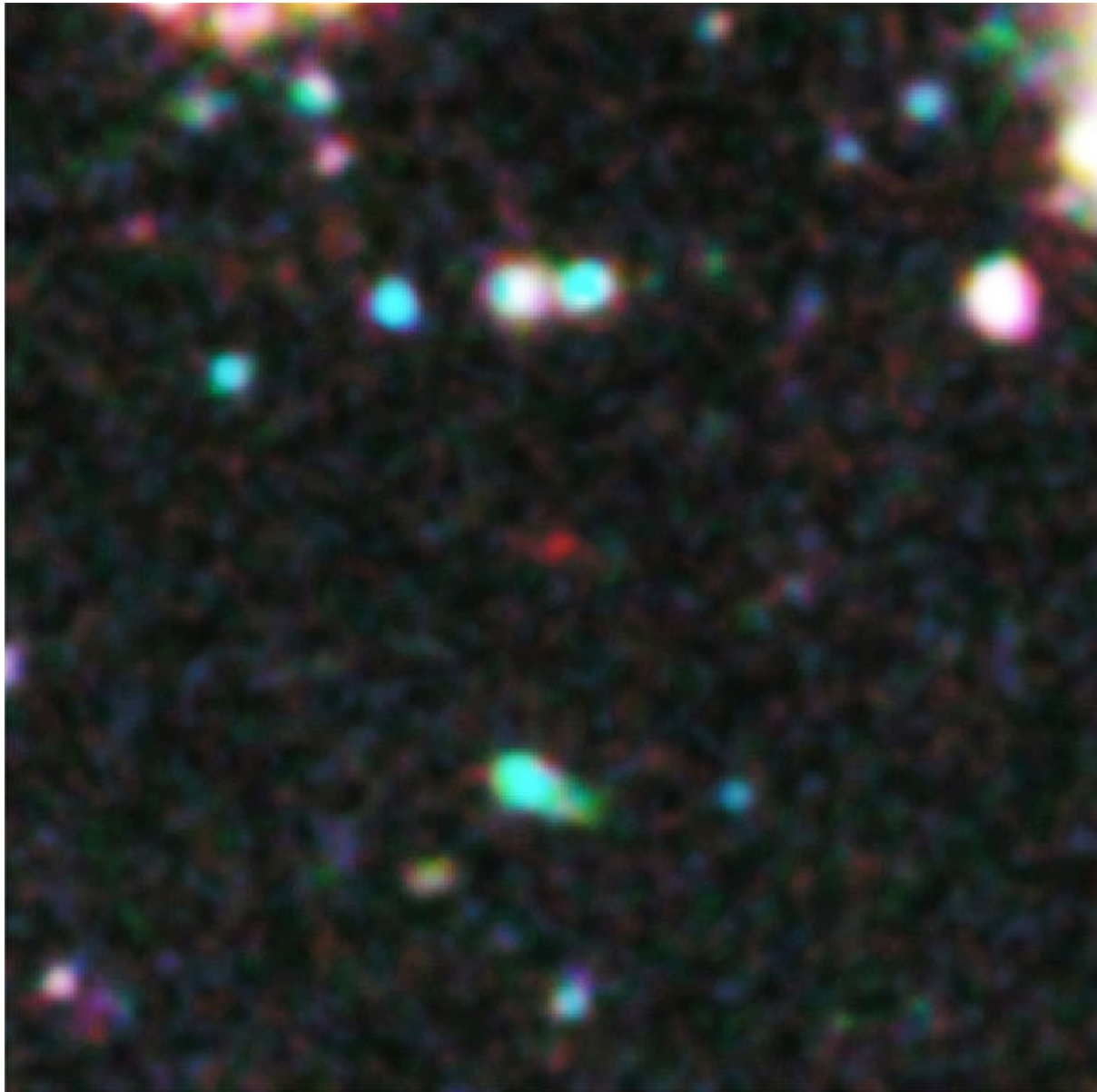
Połączone zdjęcia z okresu 10 lat!

Ponad 5000 nowych galaktyk.

Łączny czas naświetlania: 2 mln sekund!

## Przykładowe wyniki

Hubble Ultra Deep Field (UDF), Hubble eXtreme Deep Field (XDF)



UDFj-39546284,  $z \sim 11.9$  (13.3 Gly) albo  $z \sim 2.2$  (10.7 Gly)

## Pomiar stopnia sukcesu w nauce

Dane z Hubble'a wygenerowały 15x więcej publikacji niż z 4m teleskopu Hershela.

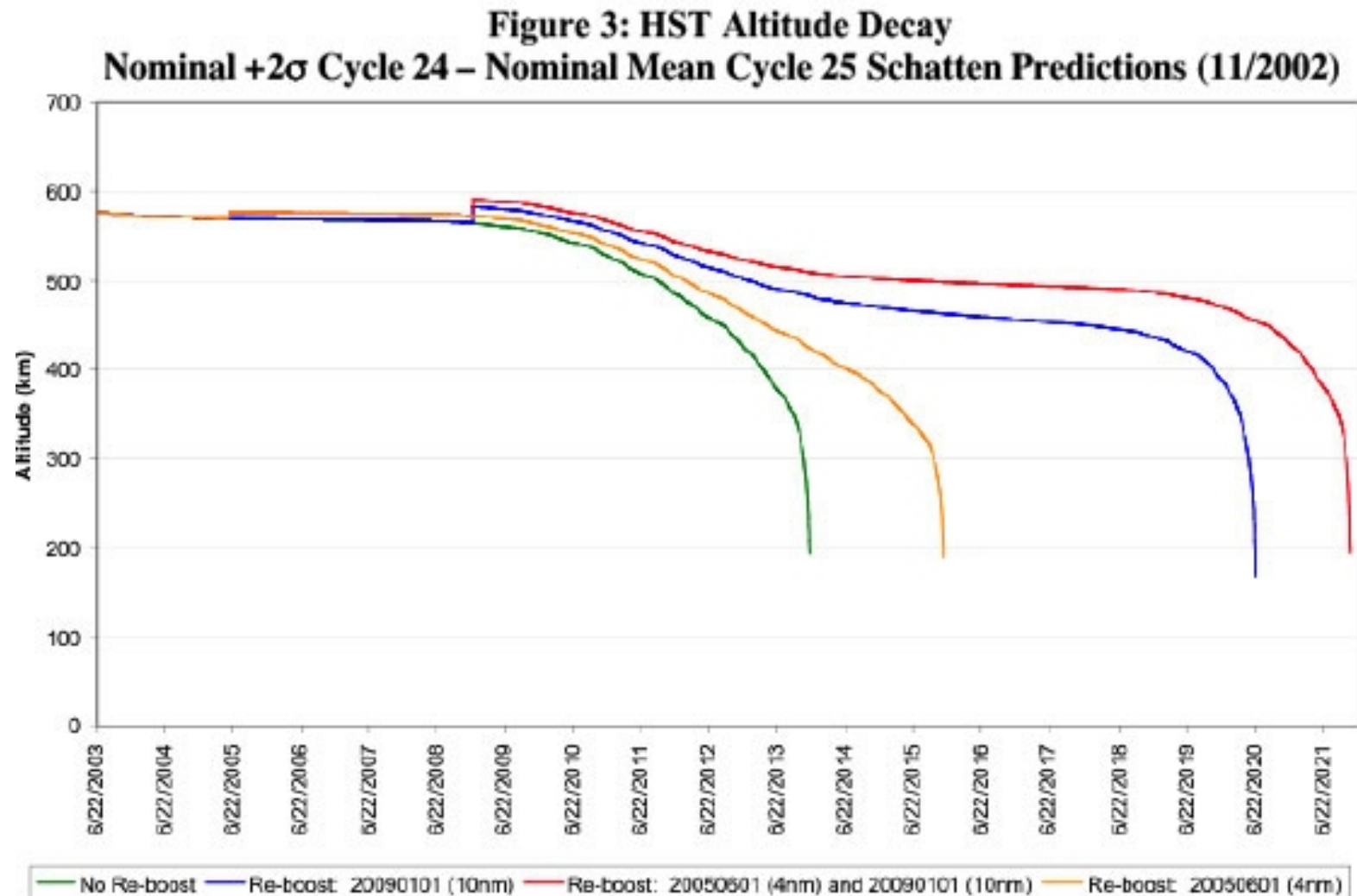
Ale teleskop Hubble'a był 100x droższy :)

Ale tylko 2% publikacji z Hubble'a nie ma cytowań (odniesień),  
podczas gdy wśród innych publikacji astronomicznych cytowań nie ma 30% prac.

...



# Misje serwisowe



Aktualne analizy wskazują datę wejścia w atmosferę jako: 2027-2040

Wybrane inne teleskopy kosmiczne  
pracujące w zakresie światła widzialnego

Hipparcos	29 cm
COROT	27 cm
Kepler	95 cm
MOST	15 cm
BRITE	2 cm
GAIA	2x prostąką 0.5 x 1.5 m
Tess	4 x 10 cm
JWST	650 cm

# Kepler

Czas pracy:

pierwszy okres: 2009-2013 (awaria kół reakcyjnych)

drugi okres: 2013-2018 (koniec paliwa)

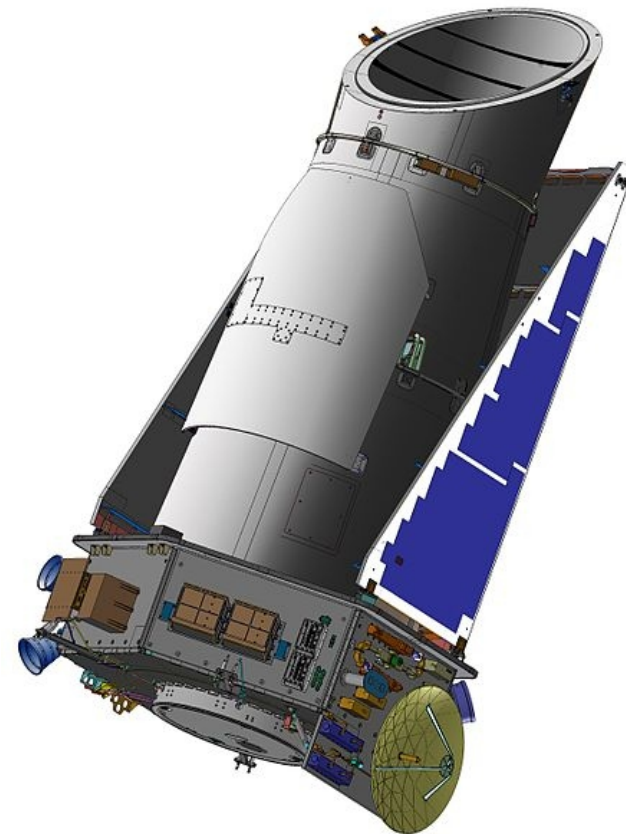
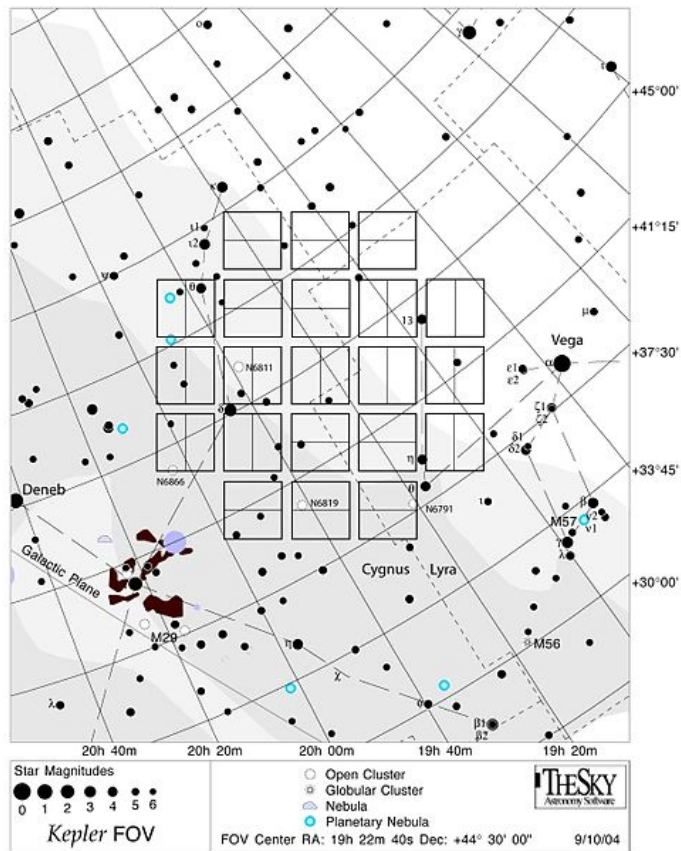
Efektywna średnica lustra głównego: 0.95m

Masa: 1039 kg

Koszt: 600 mln \$

Orbita: wokółsłoneczna „sonda podążająca za Ziemią”.

Profil misji: wieloletnie pomiary jasności ok. 150 tysięcy gwiazd

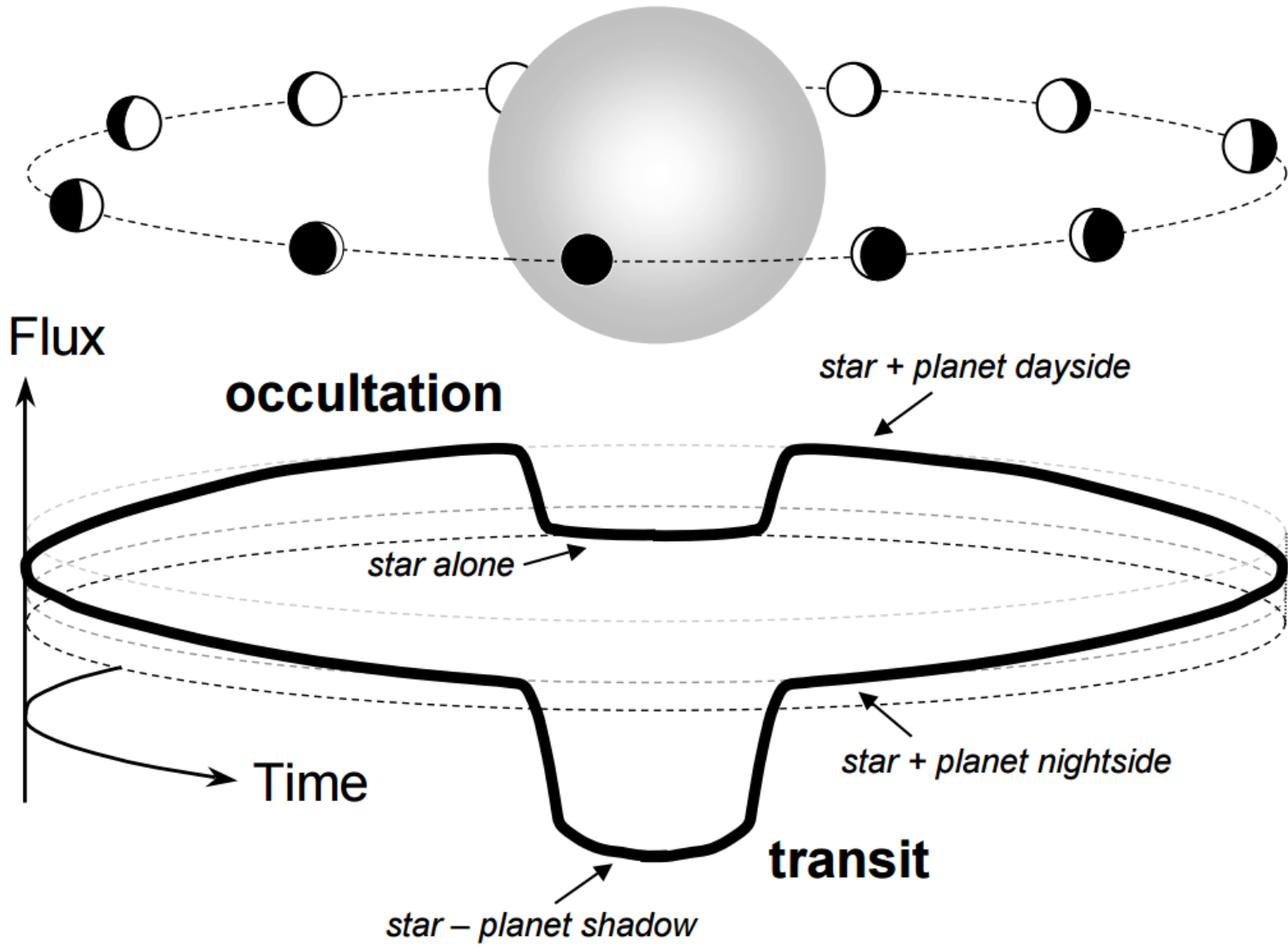


# Kepler



Mozaikowa kamera mająca łącznie 95 Mpix.  
Detektory ułożone na wypukłej powierzchni, dopasowane do krzywizny pola teleskopu.

# Kepler





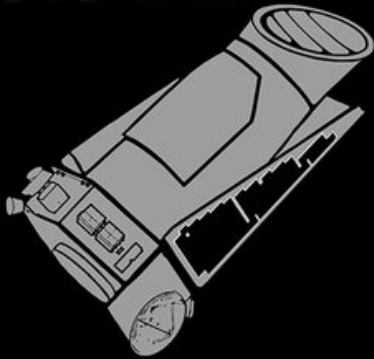
# Kepler



# Kepler

BY THE NUMBERS

**9.6 YEARS** IN SPACE

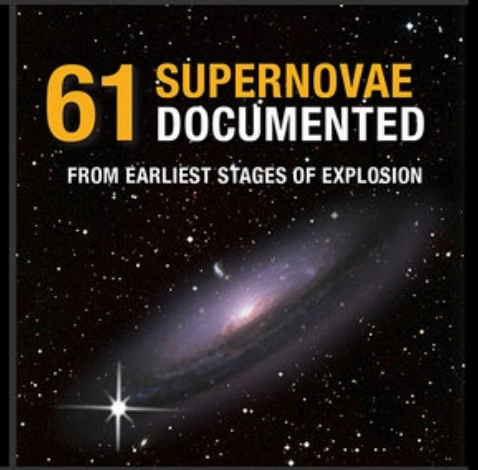


**530,506**  
STARS OBSERVED

**2,662**  
PLANETS CONFIRMED

**61 SUPERNOVAE**  
DOCUMENTED

FROM EARLIEST STAGES OF EXPLOSION



**2 MISSIONS**  
COMPLETED

**678 GB** SCIENCE DATA COLLECTED

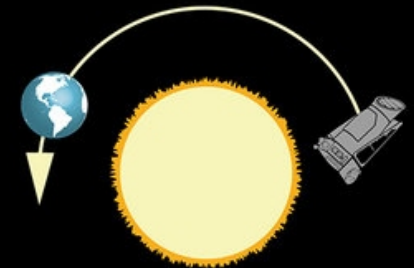
**2,946** SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED

**94 MILLION MILES** AWAY

**3.12 GALLONS** FUEL USED



**732,128**  
COMMANDS EXECUTED

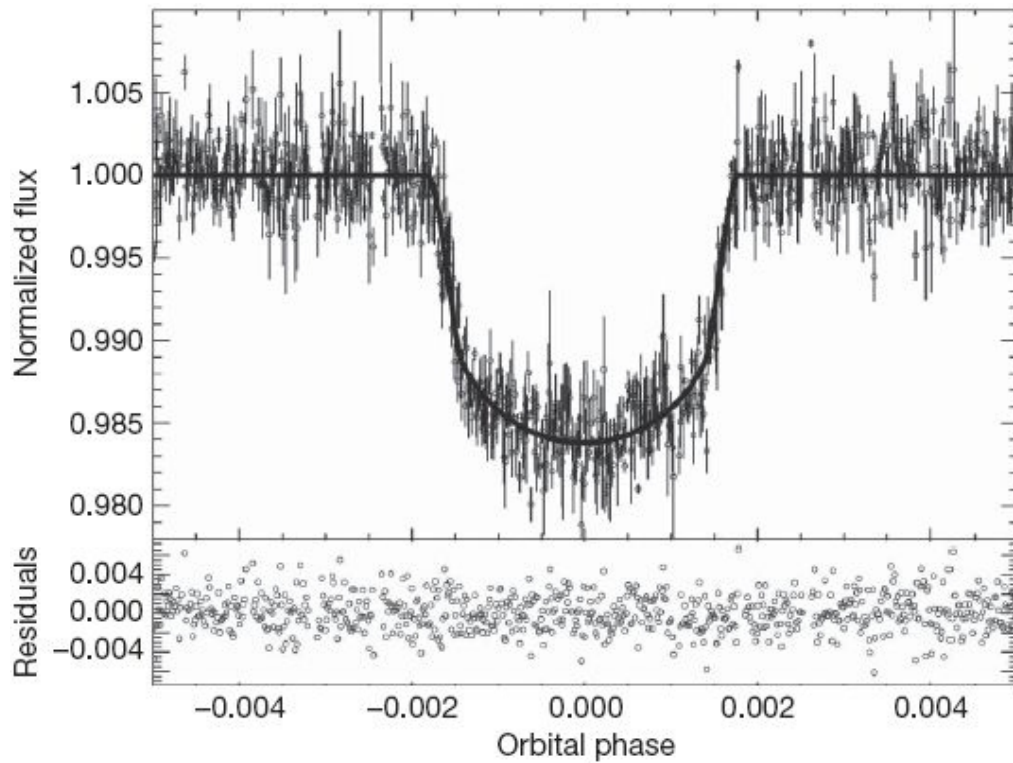


[www.nasa.gov/kepler](http://www.nasa.gov/kepler)

As of October 24, 2018

@NASAKepler

# CoRoT CONvection ROTation and planetary Transits



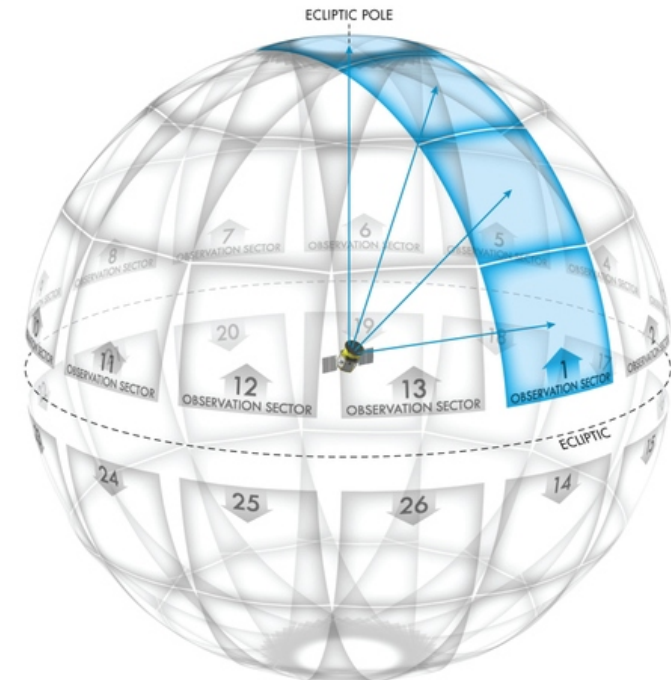
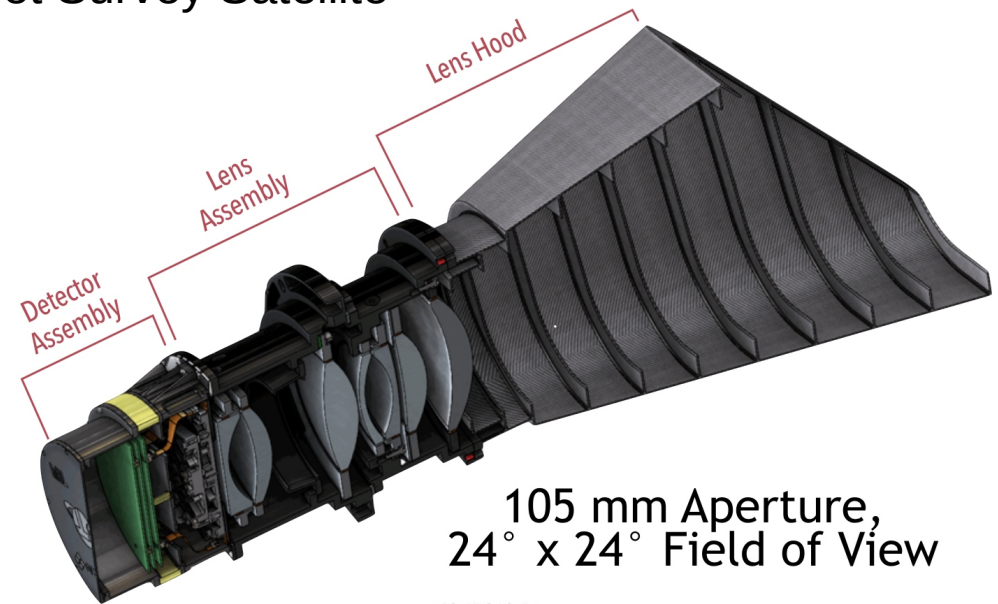
2006-2012

Odkryto kilkadziesiąt planet pozasłonecznych.



# TESS

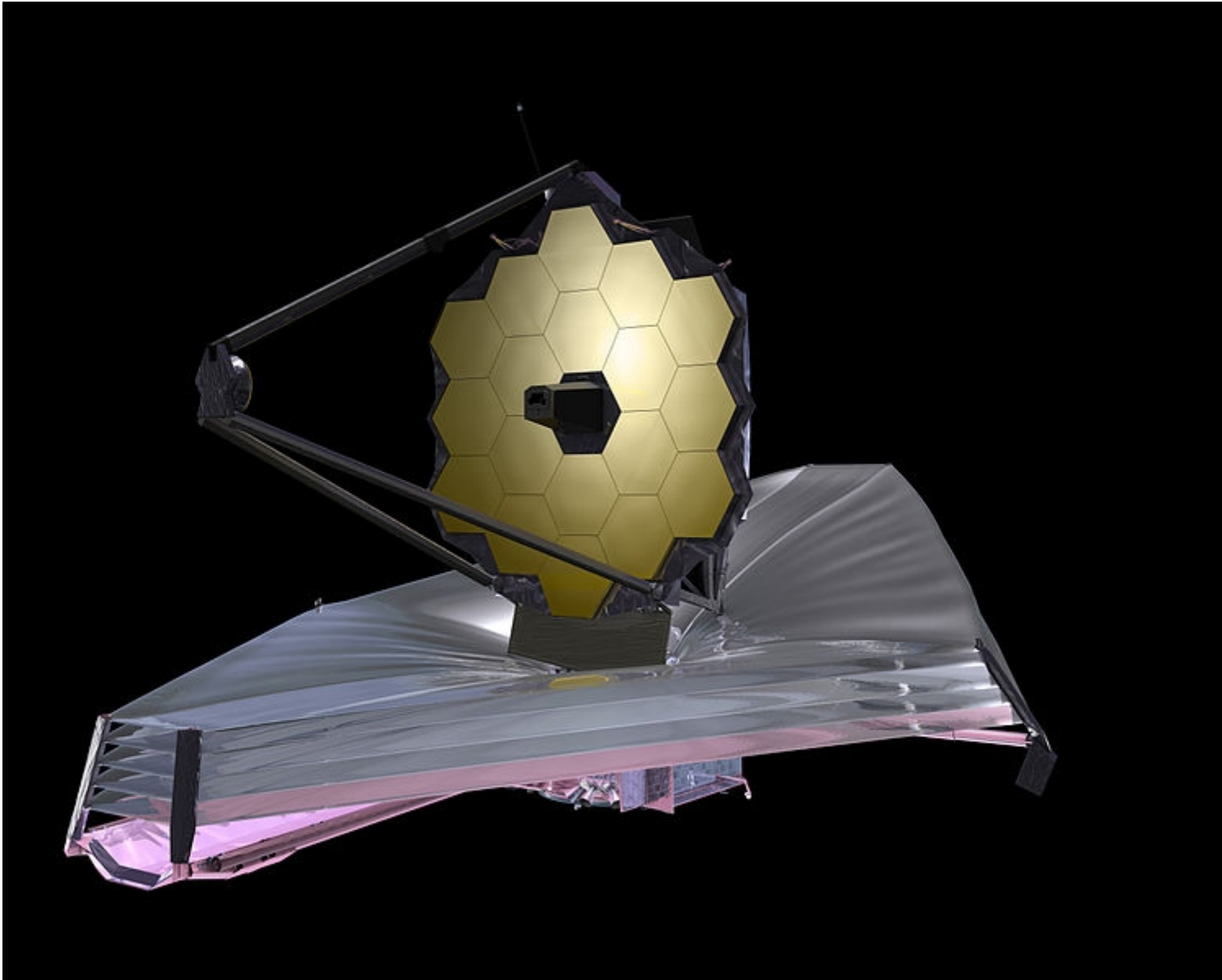
## Transiting Exoplanet Survey Satellite



Start: 2018  
Koszt: 200mln \$  
4 teleskopy 10cm  
Plan: pomiary jasności 200 tys.  
gwiazd na niemal całym niebie.

Na razie potwierdzono 66 nowych planet i 2100 kandydatów (01.2021).

„Następcą”



James Webb Space Telescope (2021??)



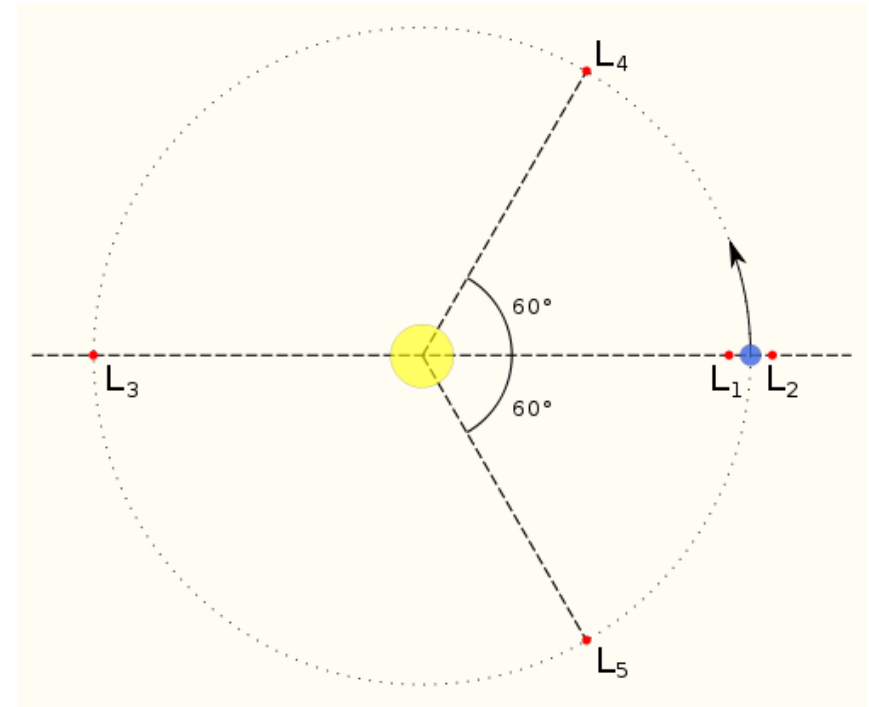
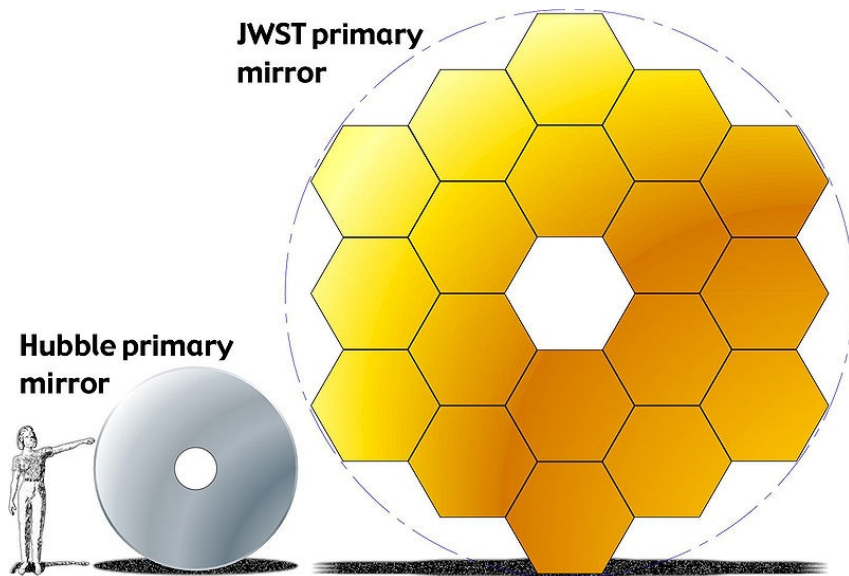
# James Webb Space Telescope



Makieta w skali 1:1, Goddard Space Flight Center, 2005



# James Webb Space Telescope



Średnica efektywna: 6.5m

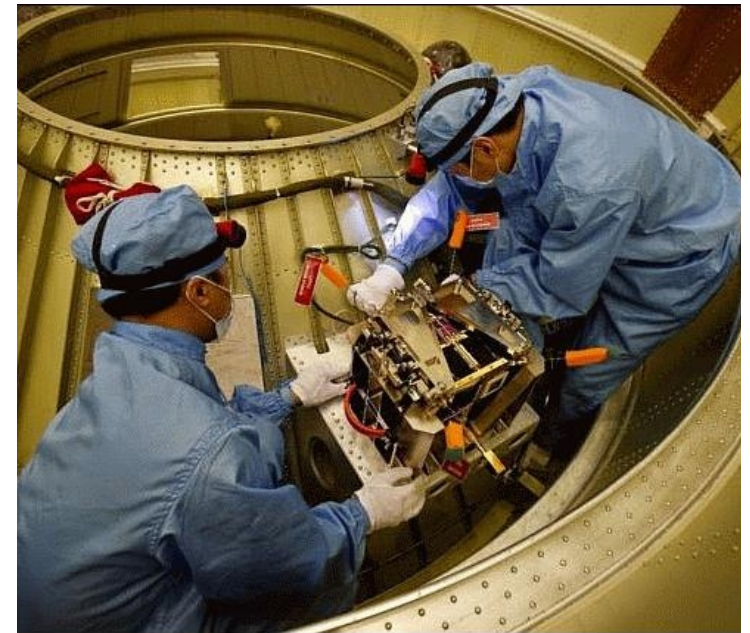
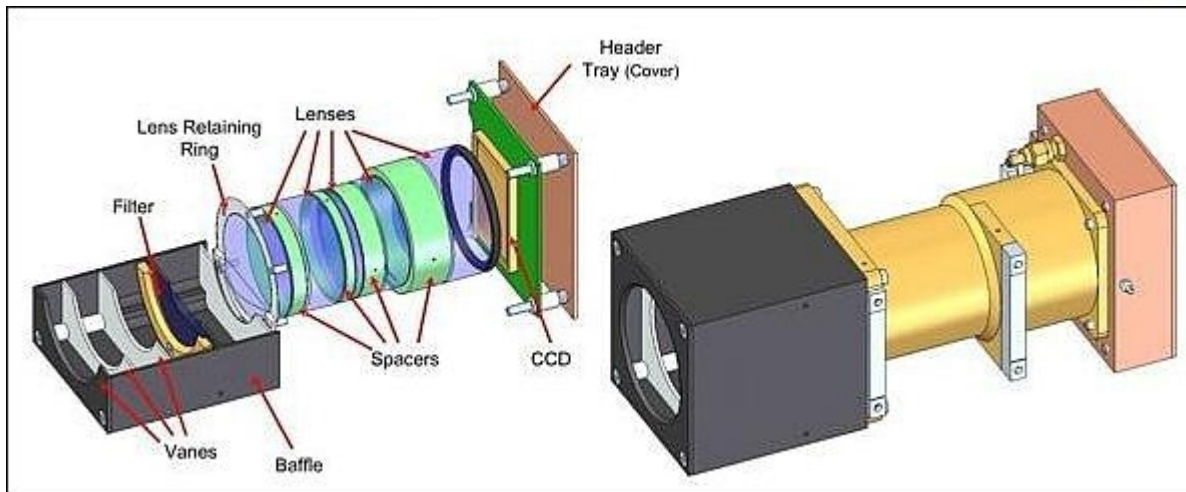
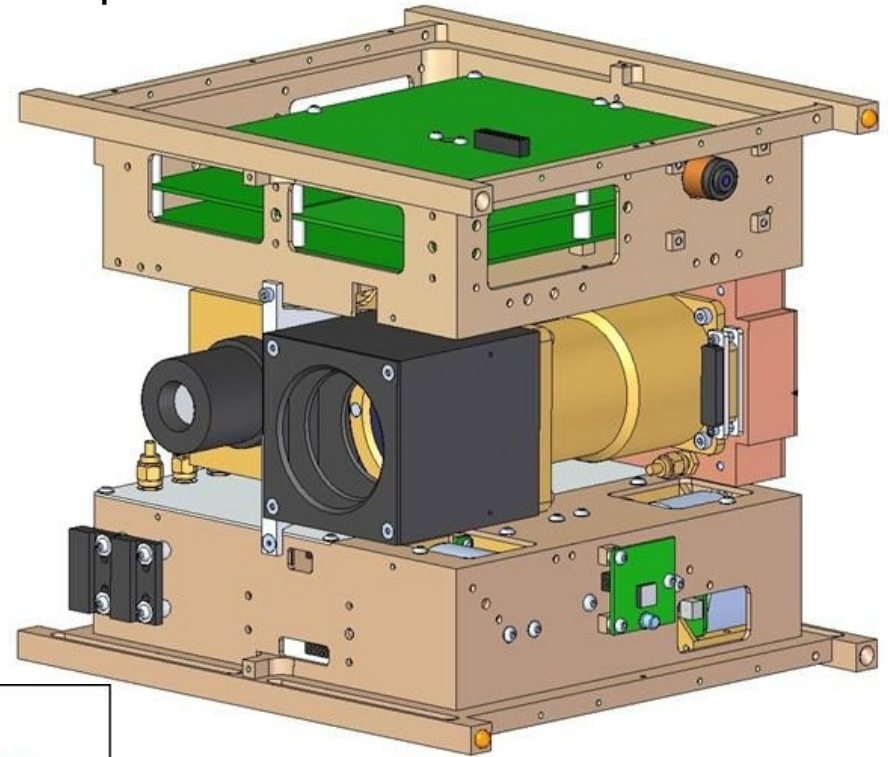
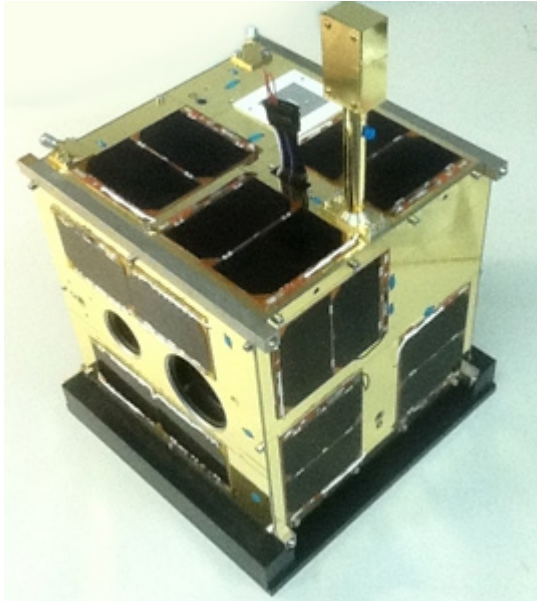
Zakres widmowy: 600 - 28500 nm

Główny cel: badanie ewolucji pierwszych galaktyk oraz gwiazd

Koszt: 8.8 mld \$ (+ utrzymanie)

Orbita: punkt Lagrange'a L2

# BRITE: Lem, Heweliusz + 3 pozostałe



Start: 2013/14

Masa: 10kg

Koszt: 16 mln zł (za dwa)

Orbita: LEO ok. 600km

Teleskop: 2cm