

# Galaktické centrum

Od Karla Janskeho po objav supermasívnej čiernej diery



**MUNI** Univerzita  
U3V třetího  
věku

28.3. 2023

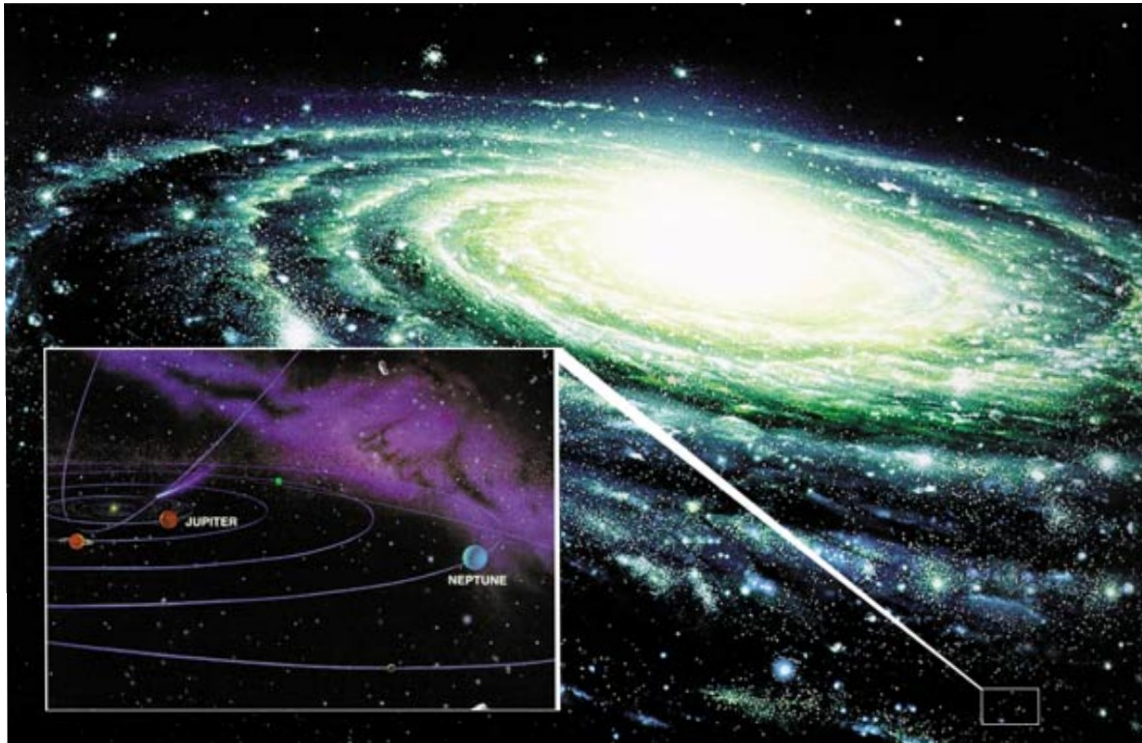
**Michal Zajaček**

Skupina astrofyziky vysokých energií

Masarykova univerzita

# Centrum Mliečnej dráhy (ako si ho každý predstaví)

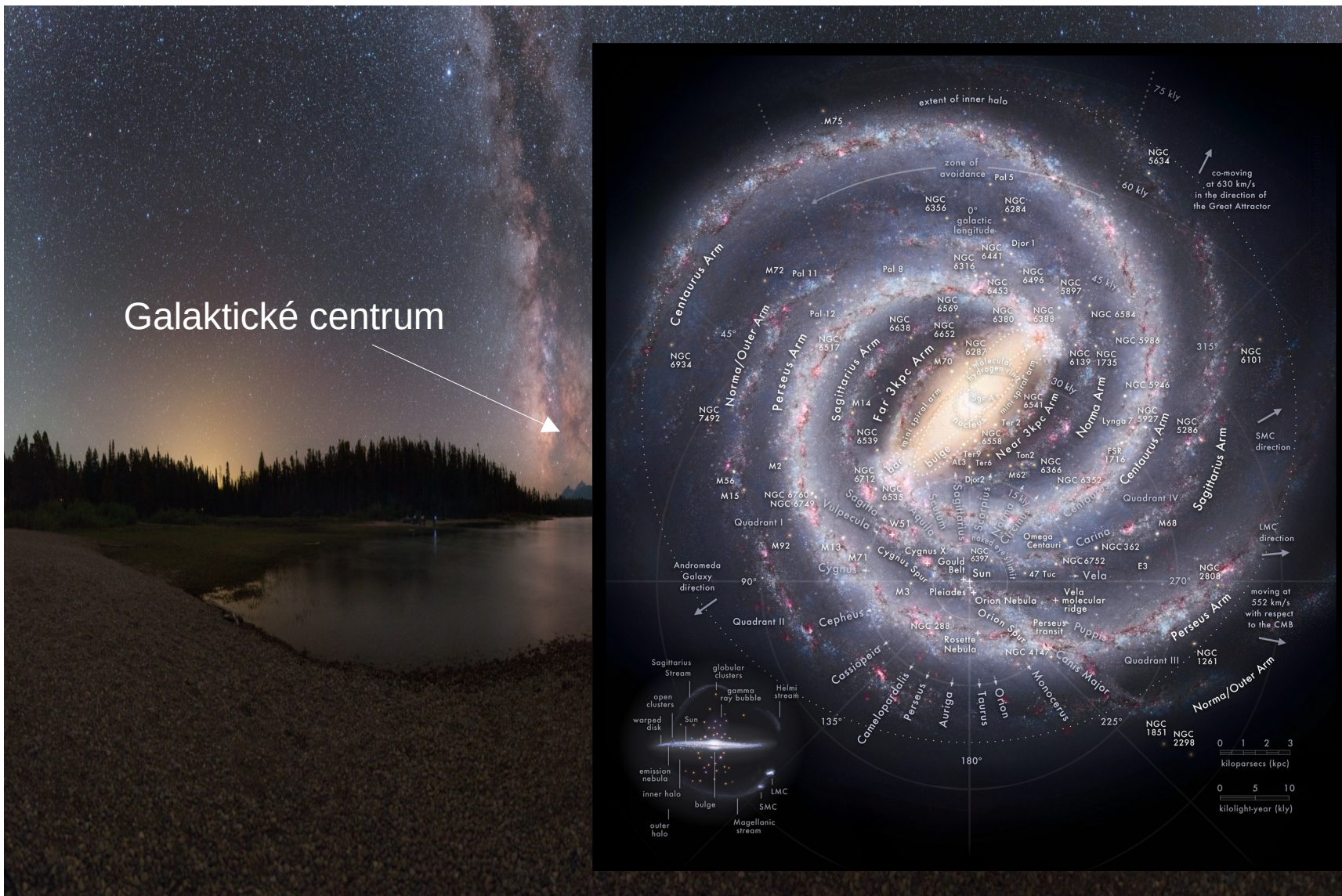
- Dynamické centrum Galaxie
- Galaxia rotuje okolo centra
- Vzdialené 8000 pc ~ 26 000 ly ~ 1650 miliónov AU
- V smere súhvezdia Strelca, Hadonosa a Škorpióna



# Centrum Mliečnej dráhy (ako si ho každý predstaví)

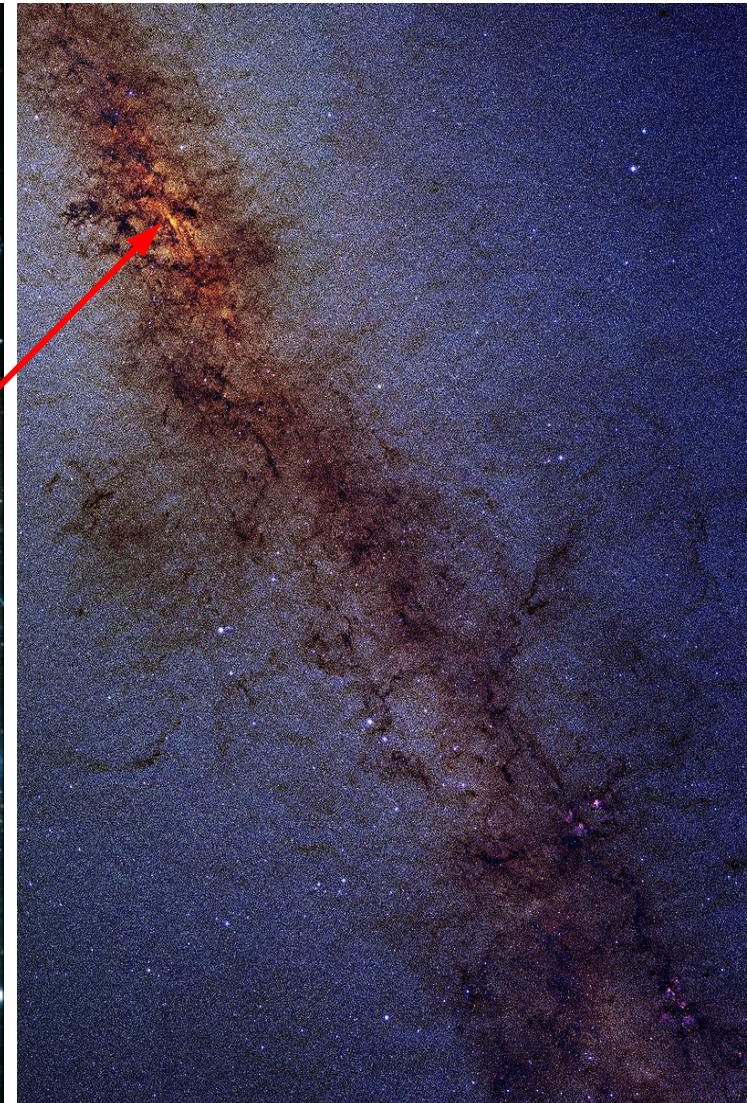
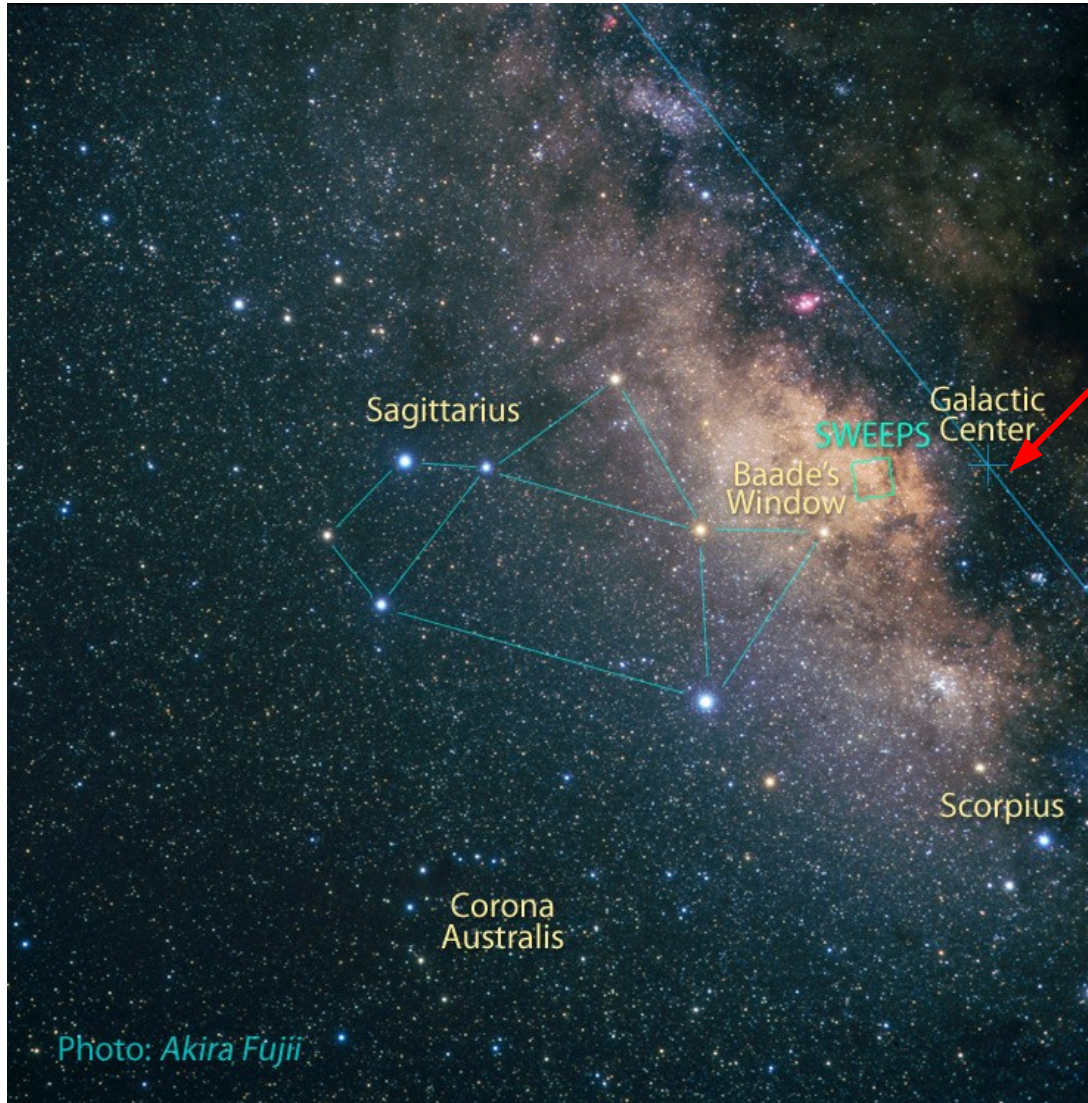


# Centrum Mliečnej dráhy (ako si ho každý predstaví)



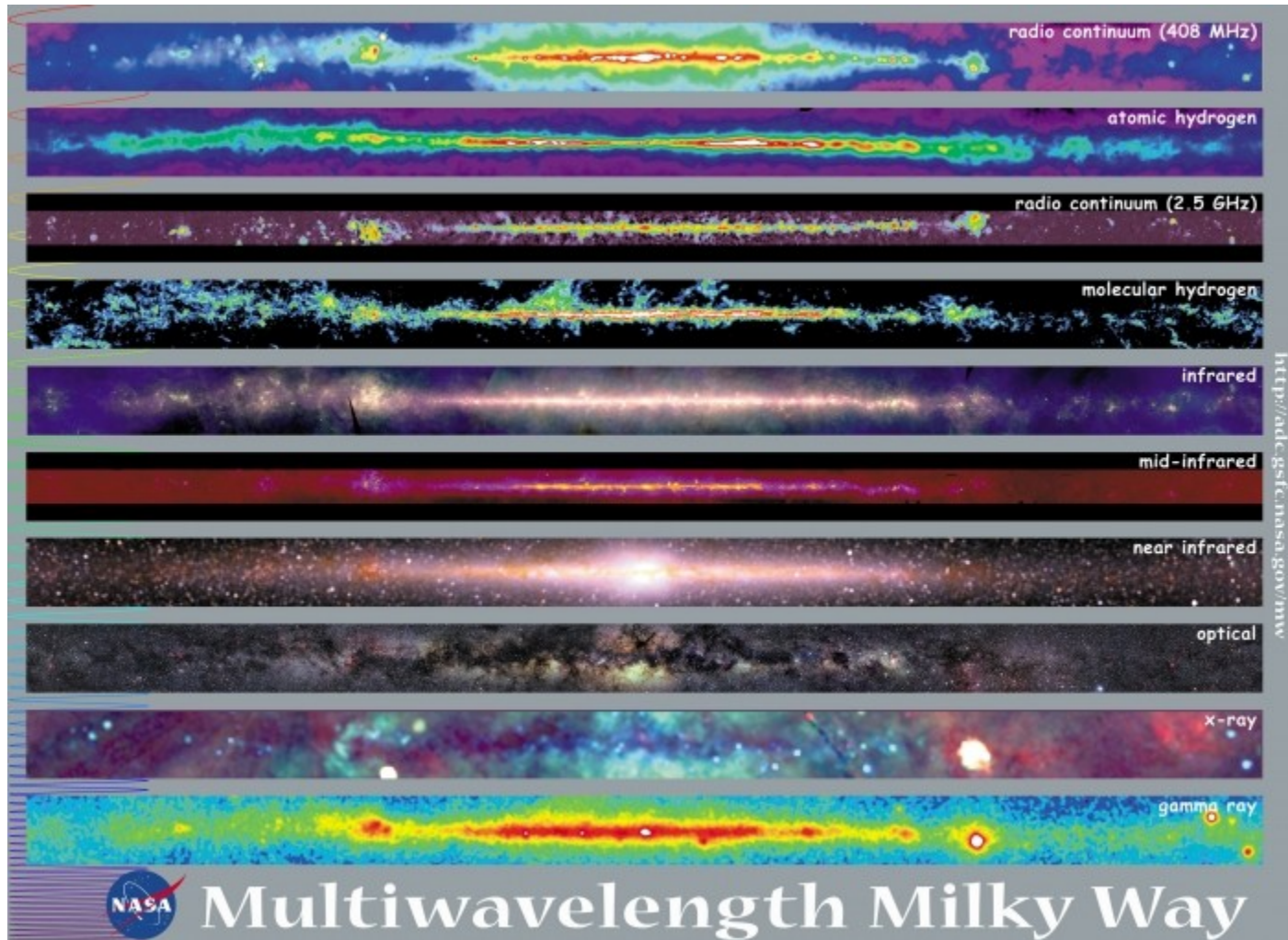
# Centrum Mliečnej dráhy

Vo viditeľnom žiarení veľká absorpcia v rovine Galaxie    V infračervenej oblasti ( $2\ \mu\text{m}$ )



# Centrum Mliečnej dráhy

- Centrum Galaxie je jasne viditeľné vo všetkých spektrálnych oblastiach okrem viditeľnej, UV a mäkkej roentgenovej oblasti
- Silná absorpcia v hustých plynoprachových mračnách v špirálových ramenách



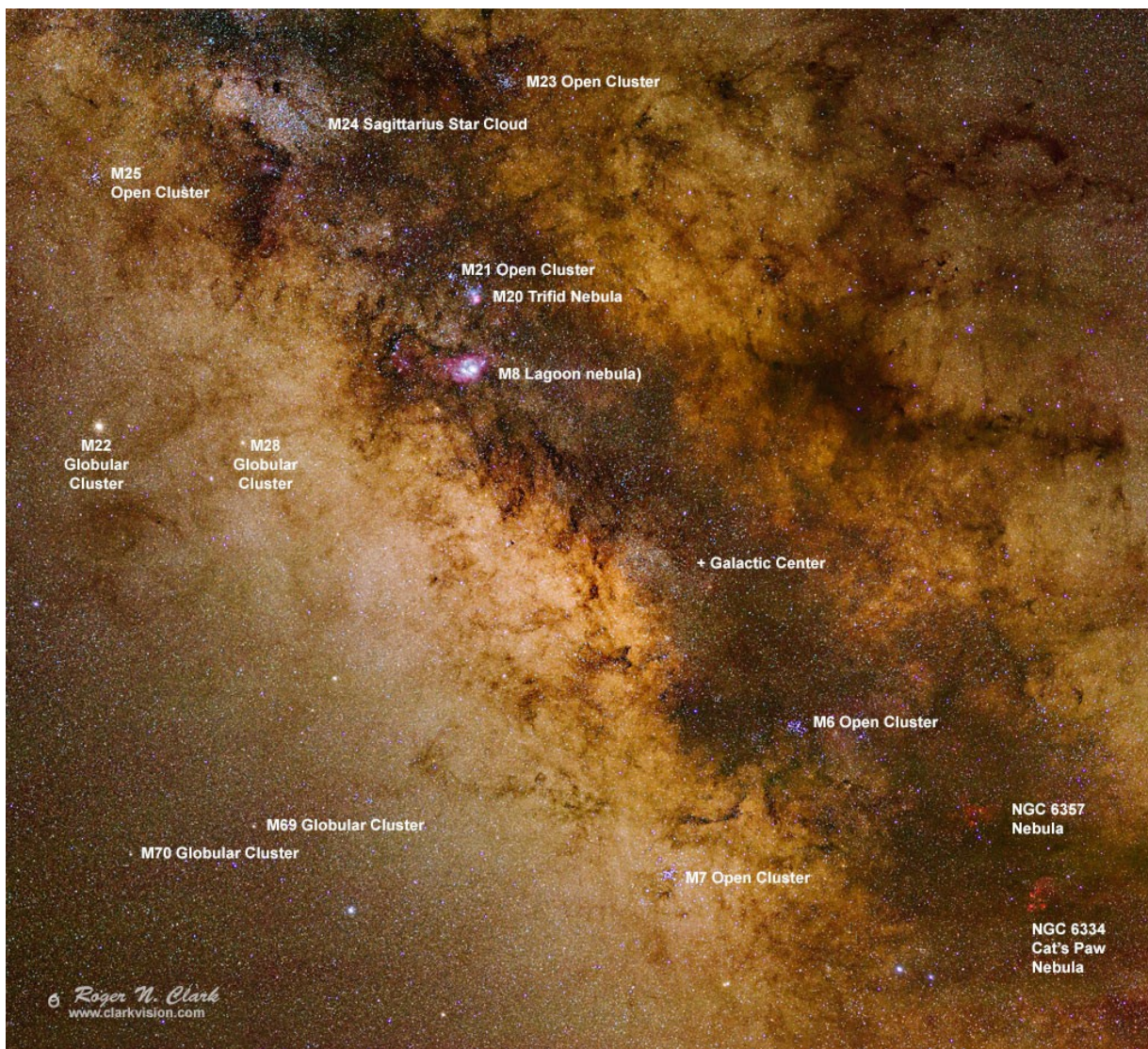
# Centrum Mliečnej dráhy

Veľká koncentrácia hmlovín, otvorených a guľových hviezdokôp



# Centrum Mliečnej dráhy

Veľká koncentrácia hmlovín, otvorených a guľových hviezdokôp – Messierove objekty



1781 – finálna verzia katalógu (103 objektov)



Charles Messier  
(1730-1817)

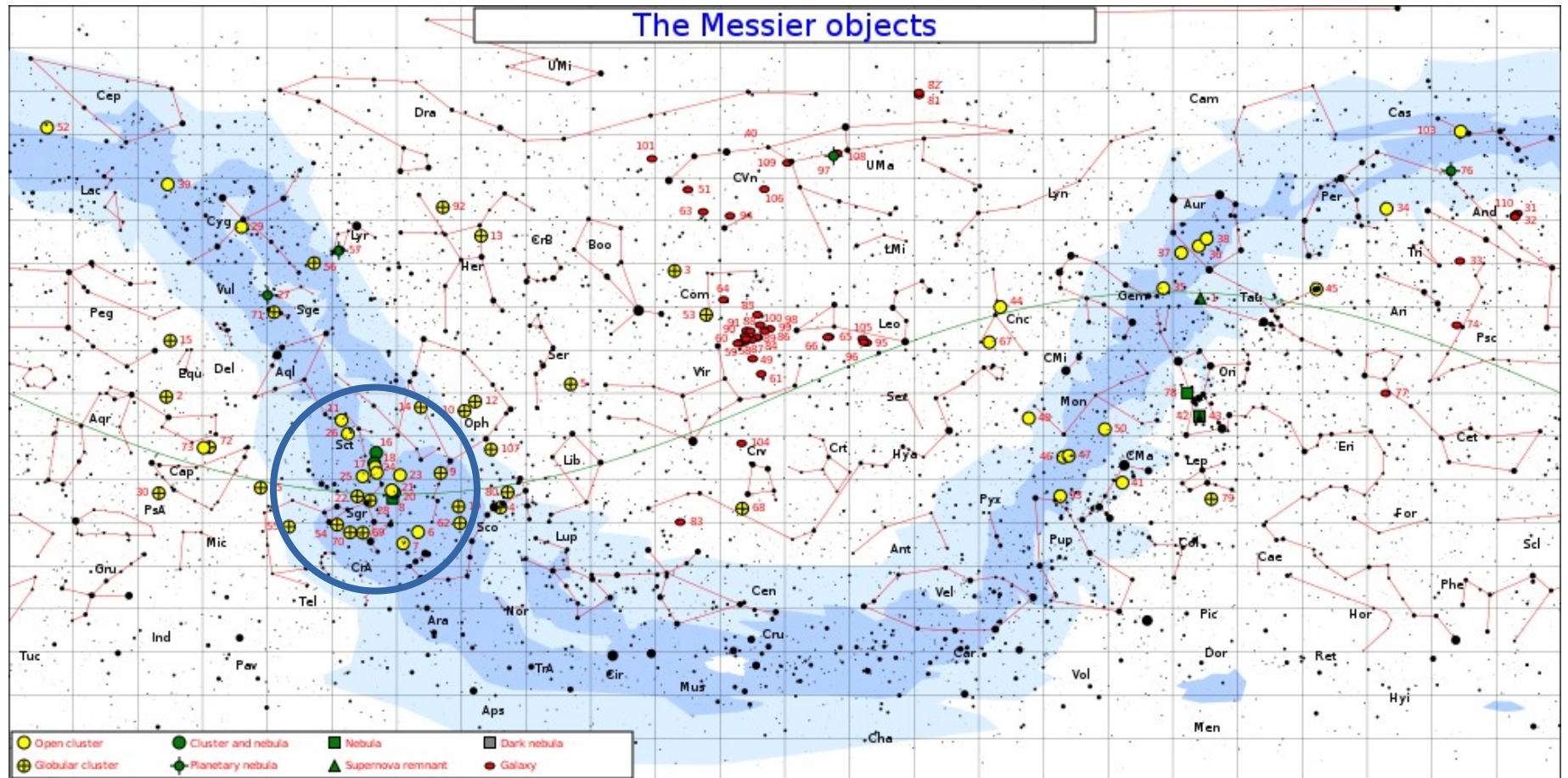


Pierre Méchain  
(1744-1804)



# Centrum Mliečnej dráhy

Veľká koncentrácia hmlovín, otvorených a guľových hviezdokôp – Messierove objekty

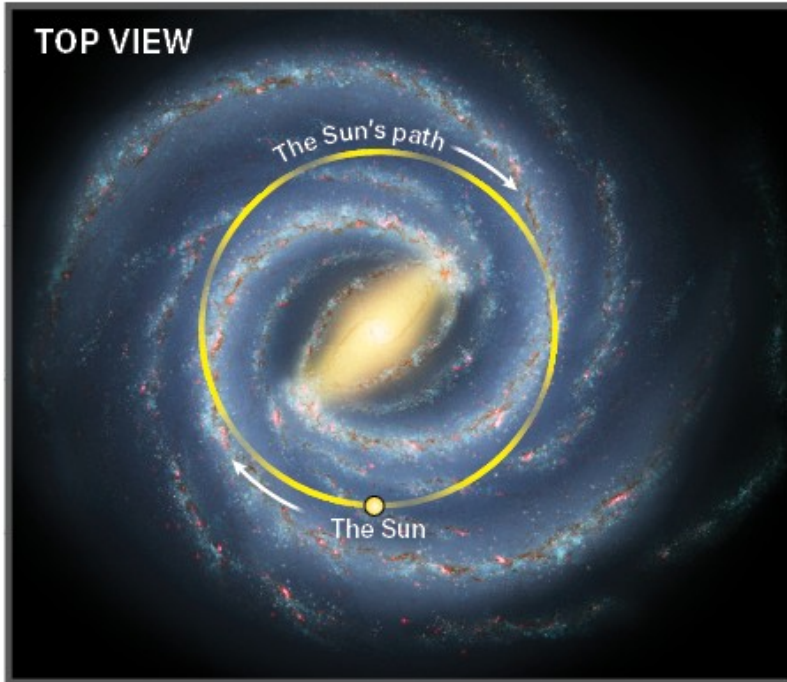


# Centrum Mliečnej dráhy

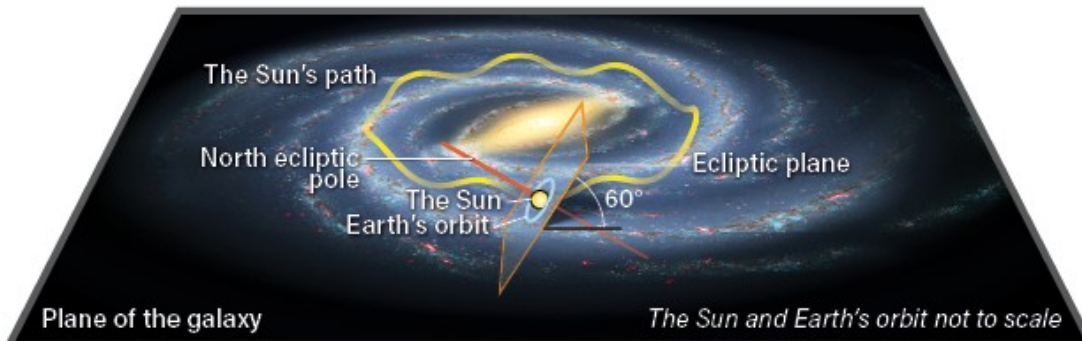
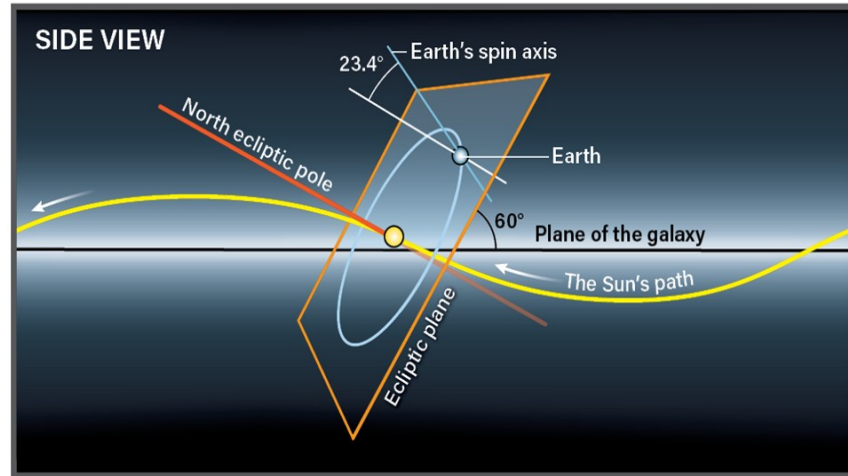
## Pohyb Slnčnej sústavy okolo centra Galaxie

- Jeden obeh trvá približne 250 miliónov rokov (beží 18. obeh)
- Rýchlosť Slnka voči centru Galaxie je 250 km/s

## Pohľad zhora



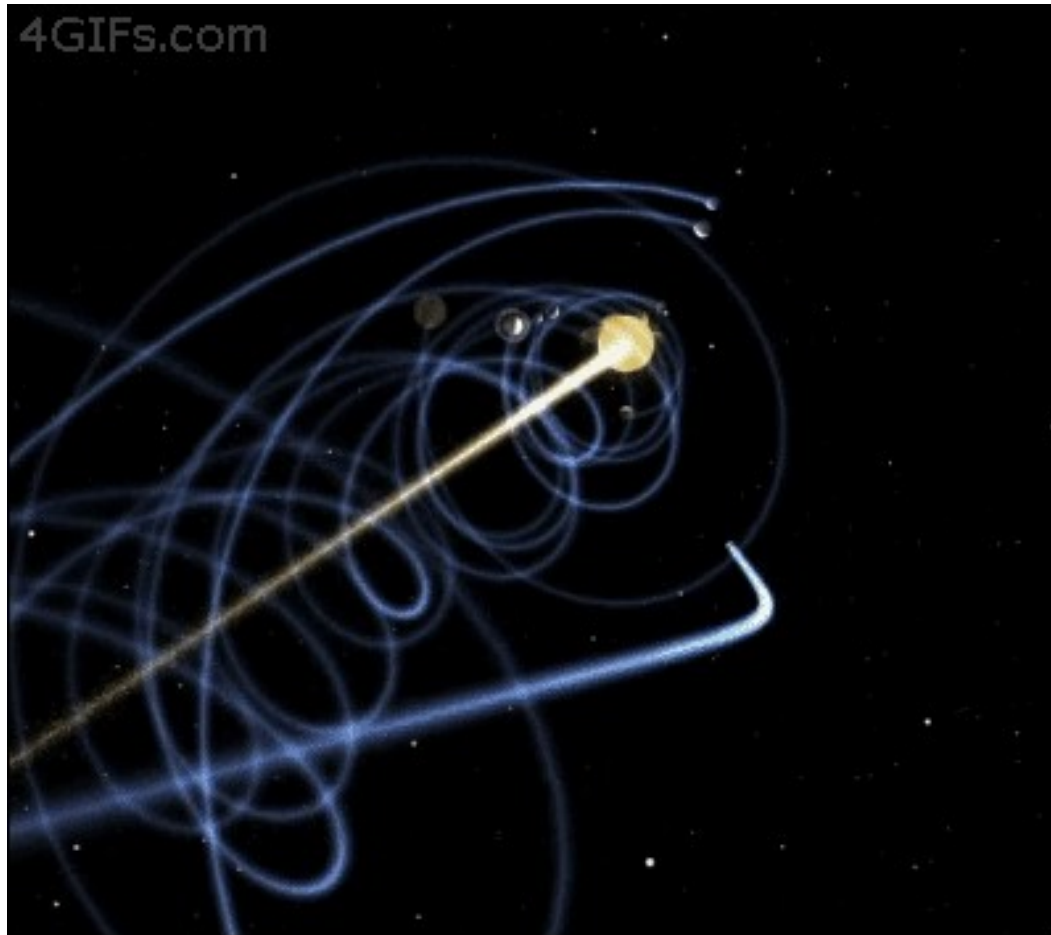
## Pohľad z boku



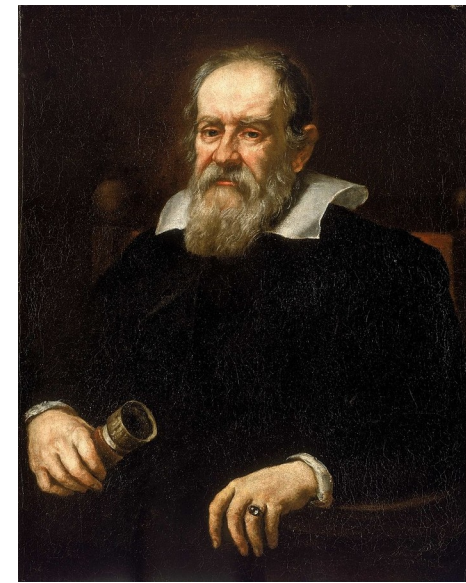
# Centrum Mliečnej dráhy

## Pohyb Slnačnej sústavy okolo centra Galaxie

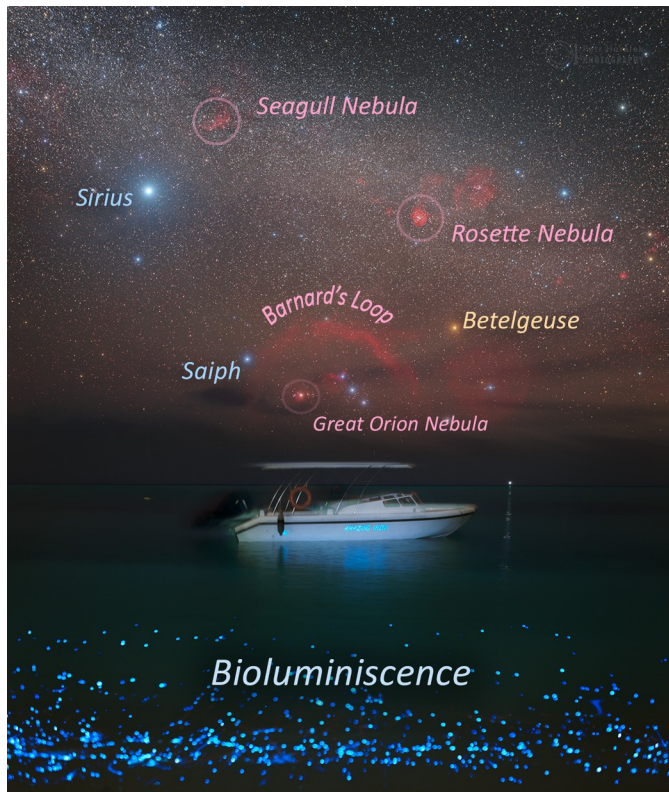
- Jeden obeh trvá približne 250 miliónov rokov (beží 18. obeh)
- Rýchlosť Slnka voči centru Galaxie je 250 km/s
- Zložený pohyb Slnačnej sústavy okolo centra Galaxie (chýba “húpací” pohyb)



# Centrum Galaxie – stručná história

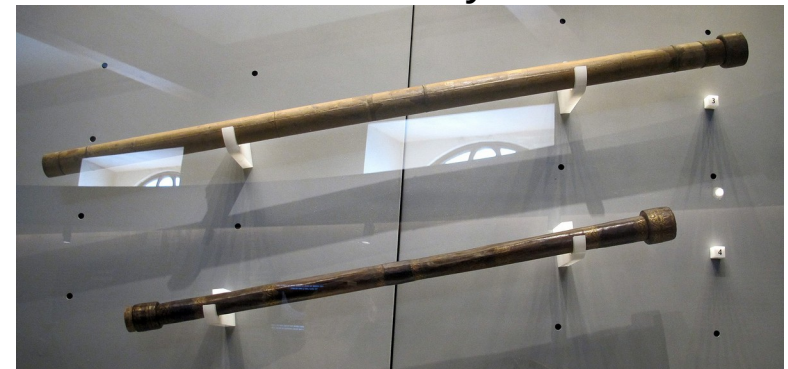


- Galileo Galilei (1564-1642)
  - Pomocou teleskopu rozlíšil Mliečnu cestu na jednotlivé hviezdy
  - Prvé pozorovania v roku 1609
  - V roku 1610 pozorovania publikoval v **Hviezdnom poslovi (Sidereus Nuncius)**
- “Mliečna dráha nie je nič iné ako masa nespočetného množstva hviezd zoskupených do zhlukov.”



Petr Horálek  
“Amazing view”

Galileiho šošovkový ďalekohľad

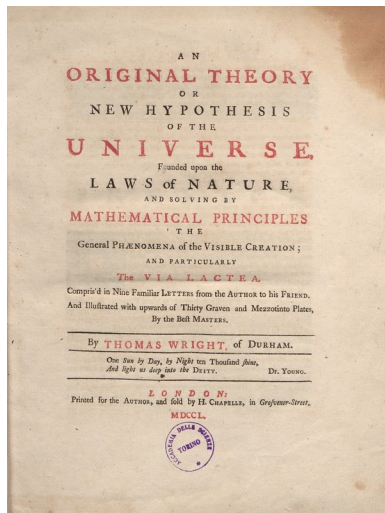
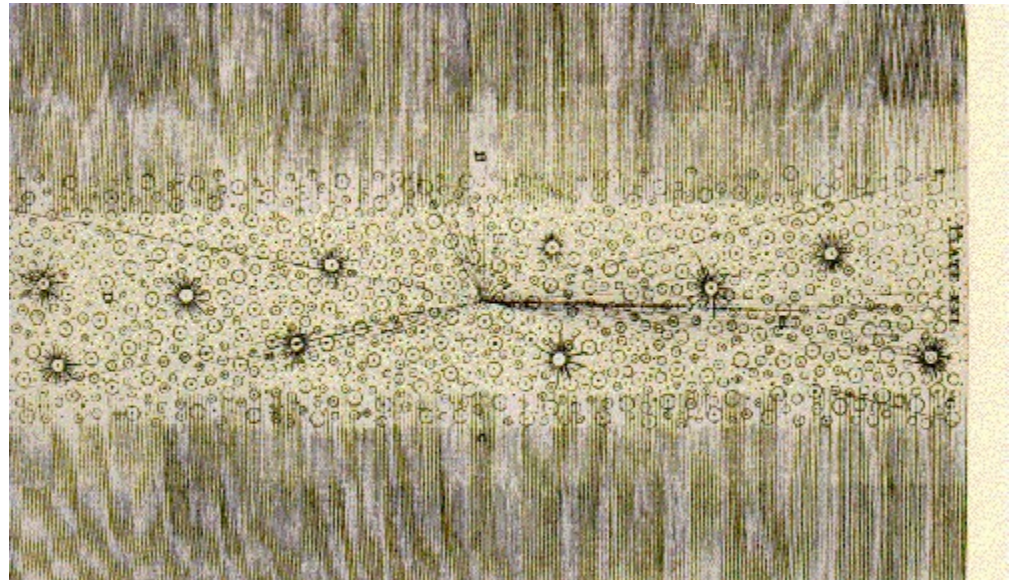
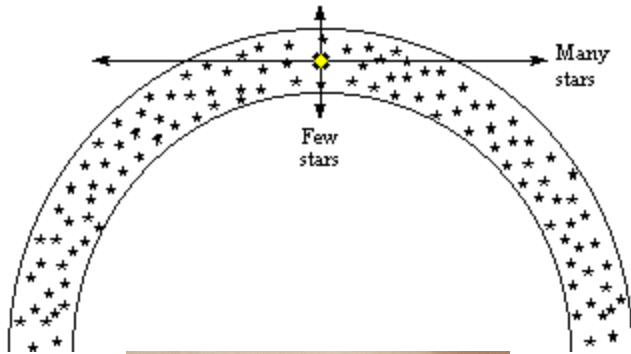


# Centrum Galaxie – stručná história

- **Thomas Wright (1711-1786)**
- Model tenkej “slupky”, resp. kotúča na brúsenie (1750)
- Teologická motivácie, chýbali nové pozorovania

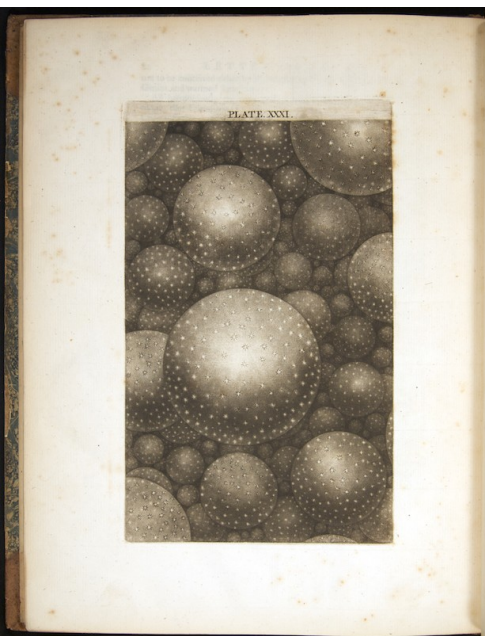


Wright's Milky Way (1750)



# Centrum Galaxie – stručná história

- **Immanuel Kant** (1724-1804) mal predstavu, že v centre Galaxie je obrovská hviezda
- Presadzoval **nebulárnu hypotézu** pôvodu Slnecnej sústavy v spise “Univerzálna prírodná história”
- Galaxiu si predstavoval ako disk resp. šošovku, diskutoval o existenciu mnohých galaxií – teória **Ostrovných vesmírov**
- Inšpirovaný “kotúčovým” modelom **Thomasa Wrighta** (1750)
- Kant presadzoval hypotézu, že v strede Galaxie je najjasnejšia hviezda **Sírius**



“Kotúčový vesmír”  
Thomasa Wrighta



Immanuel Kant  
(1724-1804)



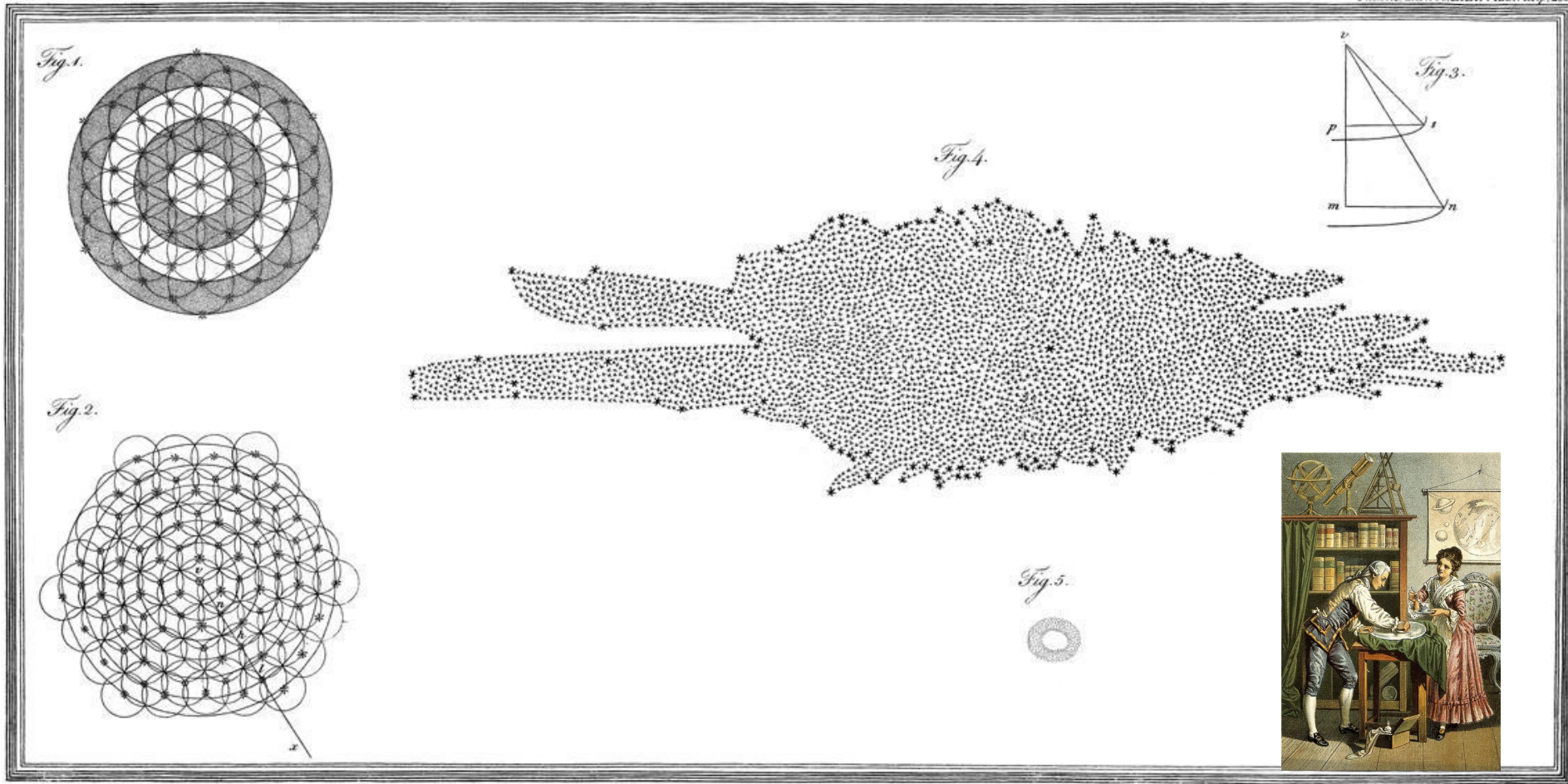
# Centrum Galaxie – stručná história

**William Herschel (1738-1822) a jeho sestra Karolína**

sa zaoberali štruktúrou Mliečnej dráhy pomocou pozorovaní

- Počítal počet hviezd pozdĺž 683 zorných paprskov (metóda “*Star Gage*”)
- Galaxia mala tvar disku – v strede sa nachádzalo Slnko (*heliocentrizmus*)
- Práca “*On the construction of the Heavens*” (publikovaná 1785)

*Philos. Trans. Vol. LXXV. Tab. VIII. p. 266.*



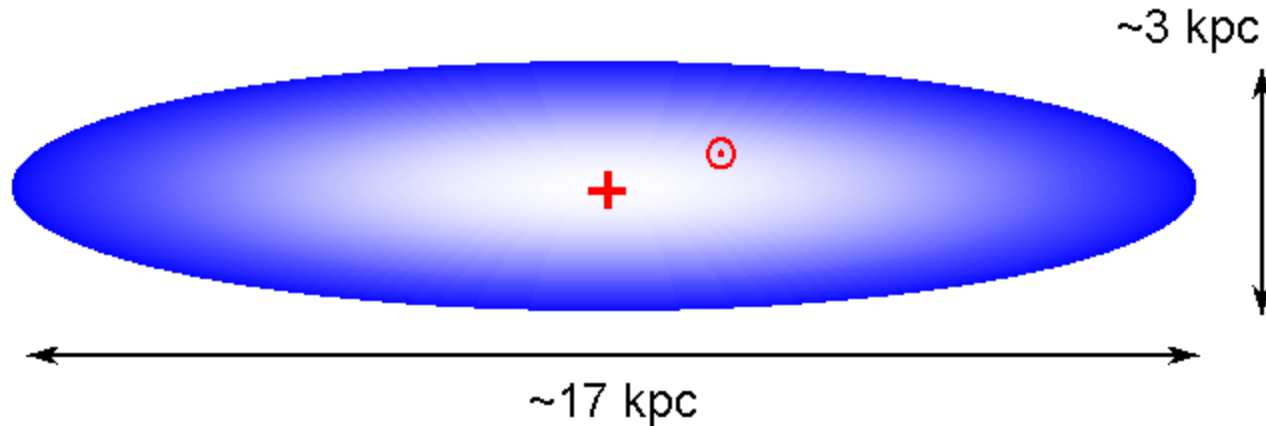
# Centrum Galaxie – stručná história



## Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) a jeho vesmír

- Hviezdy rôznych magnítud počítal na fotografických platniach
- Vzdialenosti počítal štatisticky z paralaxy a vlastného pohybu blízkych hviezd
- Zanedbal medzihviezdnu absorpciu, čím preceňoval vzdialenosti (hviezdy boli slabšie sčasti kvôli absorpcii v dôsledku prachu medzi hviezdou a pozorovateľom)
- Slnko bolo v rámci galaktického disku trochu posunuté mimo stred (len 0.6 kpc)

## Kapteyn Model (1922)



kpc = kiloparsec = 1000 pc



# Centrum Galaxie – stručná história

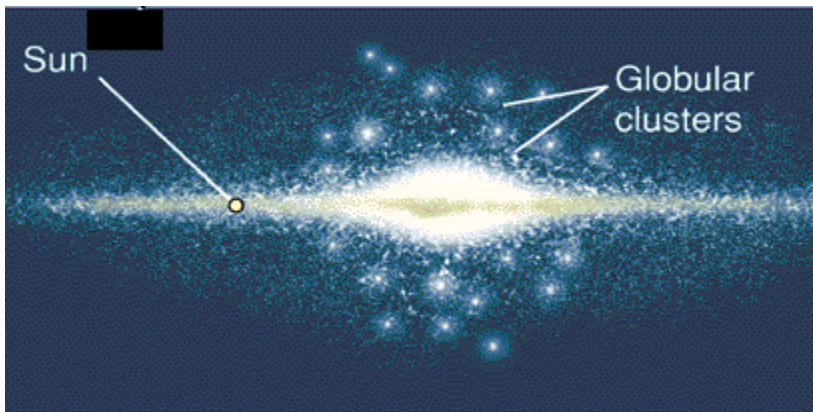


## Nástup galaktocentrizmu

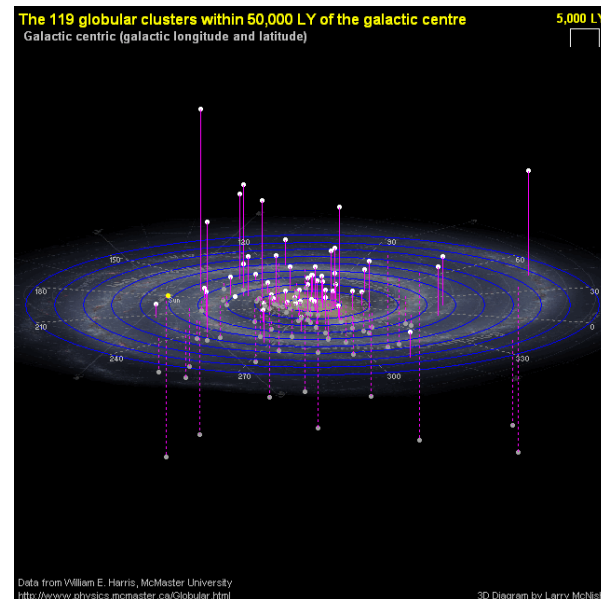
Harlow Shapley (1885-1972)

*"Theories crumble, but good observations never fade."* - Harlow Shapley

- Pozorovania na Mount Wilson v Kalifornii
- V guľových hviezdokopách identifikoval premenné pulzujúce Cefeidy
- Pomocou Leavittovej vzťahu perióda – žiarivý výkon určil vzdialenosti ku guľovým hviezdokopám a zmapoval 3D štruktúru Galaxie
- Model "Veľkej Galaxie" – Slnko bolo vzdialené až 50 000 svetelných rokov od centra, centrum Galaxie Shapley správne umiestnil smerom k súhvezdiu Strelca, kde bola najväčšia koncentrácia guľových hviezdokôp



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP



Data from William E. Harris, McMaster University  
<http://www.physics.mcmaster.ca/Globular.html>

3D Diagram by Larry McNish

# Centrum Galaxie – stručná história

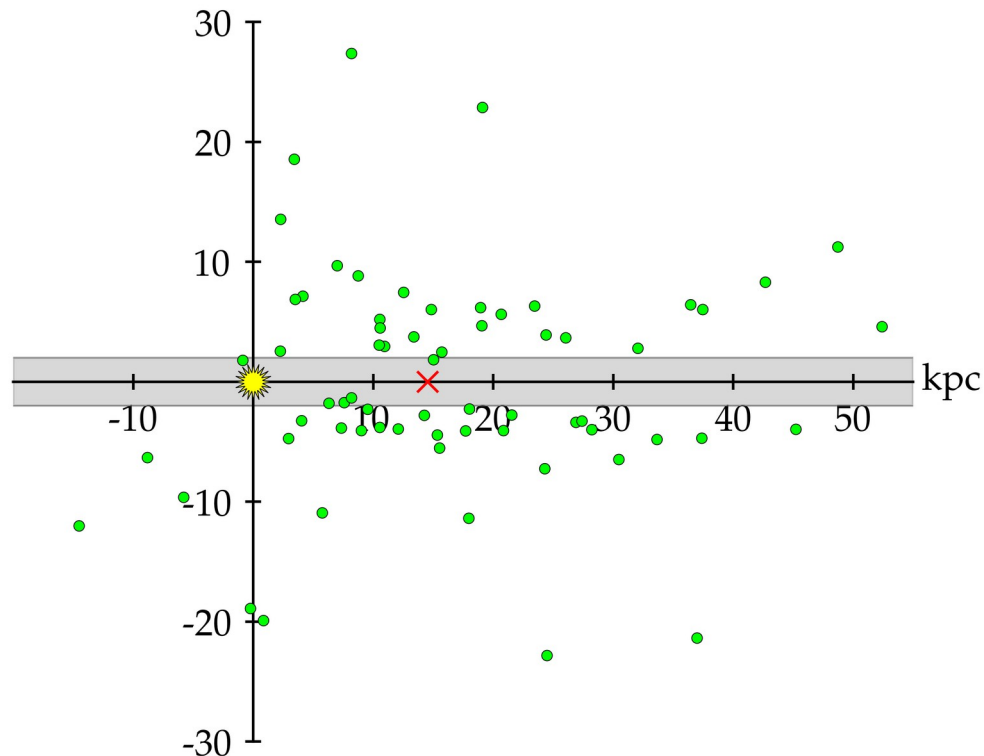


## Nástup galaktocentrizmu

Harlow Shapley (1885-1972)

*"Theories crumble, but good observations never fade."* - Harlow Shapley

- Model "Veľkej Galaxie" – Slnko bolo vzdialené až 50 000 svetelných rokov od centra, centrum Galaxie Shapley správne umiestnil smerom k súhvezdiu Strelca, kde bola najväčšia koncentrácia guľových hviezdokôp
- Galaxie príliš veľká, **zanedbal efekt absorpcie a rozptylu (extinkcie) svetla na prachu**

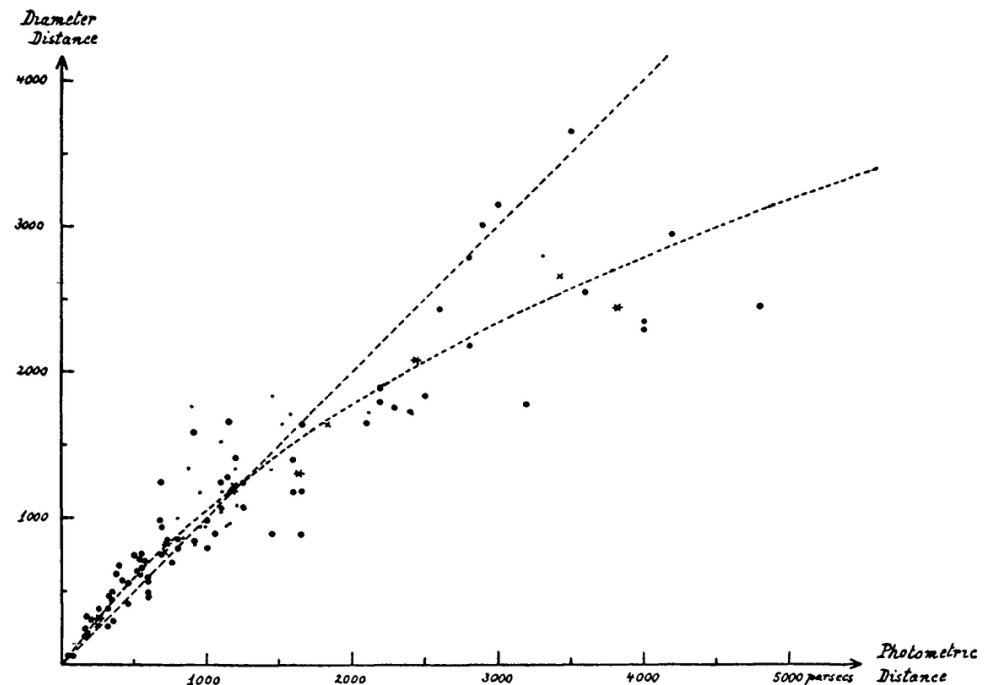


# Centrum Galaxie – stručná história



**Robert Julius Trumpler** (1886-1956) – “zaprášil” Galaxiu

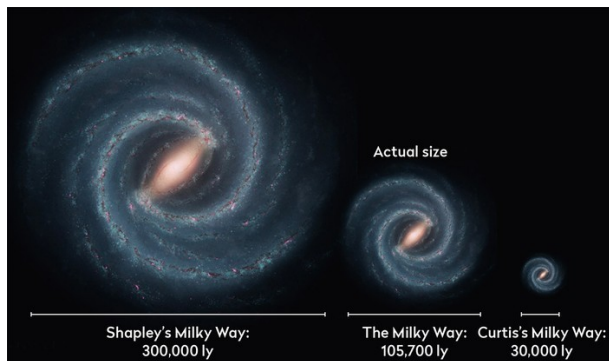
- Bez započítania absorpcie bola Galaxia príliš veľká
- Kapteyn a Shapley o probléme vedeli, ale absorpciu podcenili
- Trumpler študoval otvorené hviezdokupy – vzdialené sa javili slabšie ako mali byť a červenejšie
- Absorpciu správne kvantifikoval v roku 1930 a tým sa Galaxia “zmenšila” – merania na Lickovom observatóriu



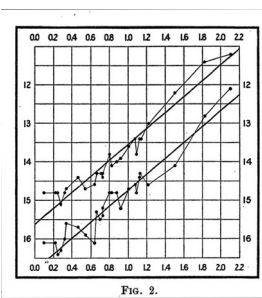
# Centrum Galaxie – stručná história

## Veľká debata – 26. 4. 1920

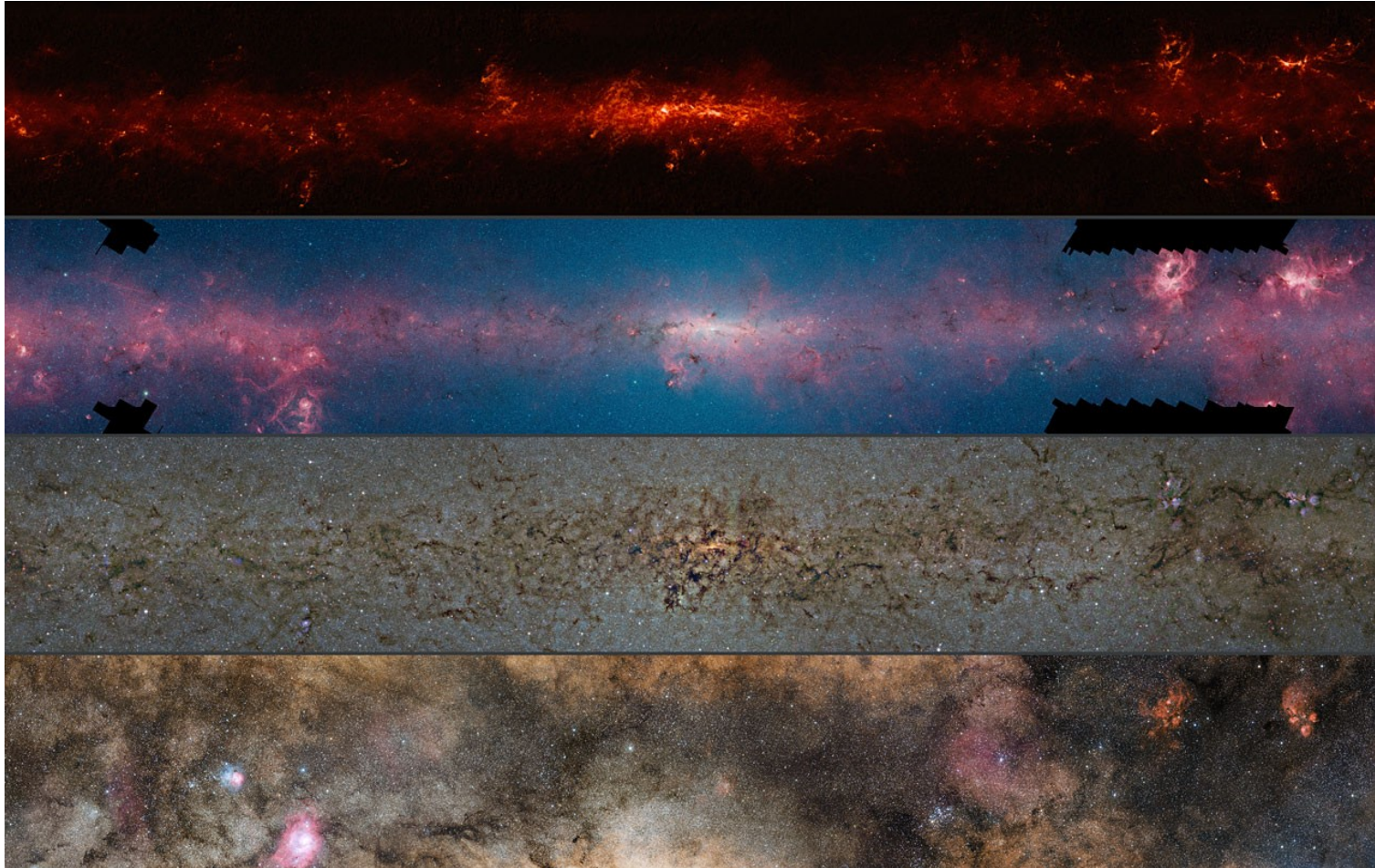
- **Shapley-Curtis Debate**
- Harlow Shapley tvrdil, že špirálové hmloviny sú súčasťou našej Galaxie
- Heber Curtis zastával Kantovu hypotézu o “island universes”
- Debata sa skončila nerozhodne



- Problém hmlovín definitívne rozlúšil **Edwin Hubble** (1889-1953)
- Zmeral periódu Cefeíd (*Leavittovej vzťah*) v blízkych galaxiách (M31, M33), z čoho určil ich vzdialenosť
- Výsledky publikoval v *The New York Times* (23. 11. 1924, 35 ročný)



# Centrum Galaxie – cesta dovnútra Ako tam najlepšie preniknúť?



Submm  
APEX/Planck

Infrachervené  
Spitzer

Blízke infra  
ESO VLT  
VISTA

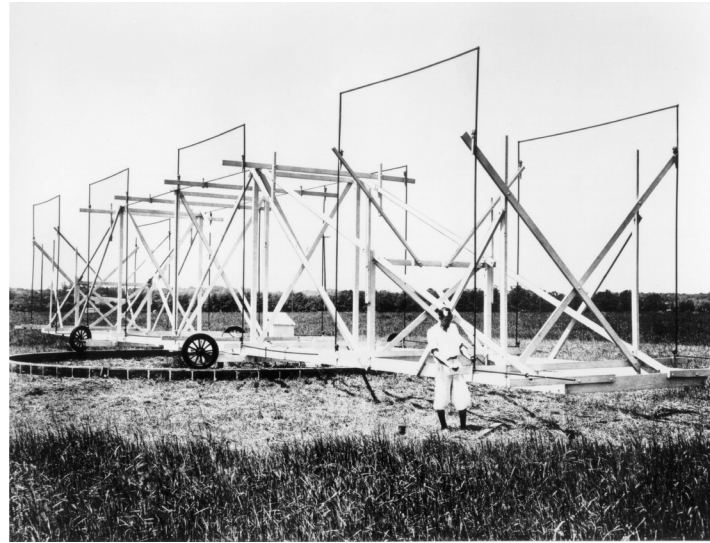
Viditeľné

Na viditeľných dĺžkach je takmer všetko v centre skryté :(

# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

## Ako tam najlepšie preniknúť?

- Prvá detekcia rádiového zdroja smerom k súhvezdiu Strelcia – **Karl Jansky** (1905-1950)
- Apríl 1933 – prvá detekcia na 20.5 MHz (14.6 m)

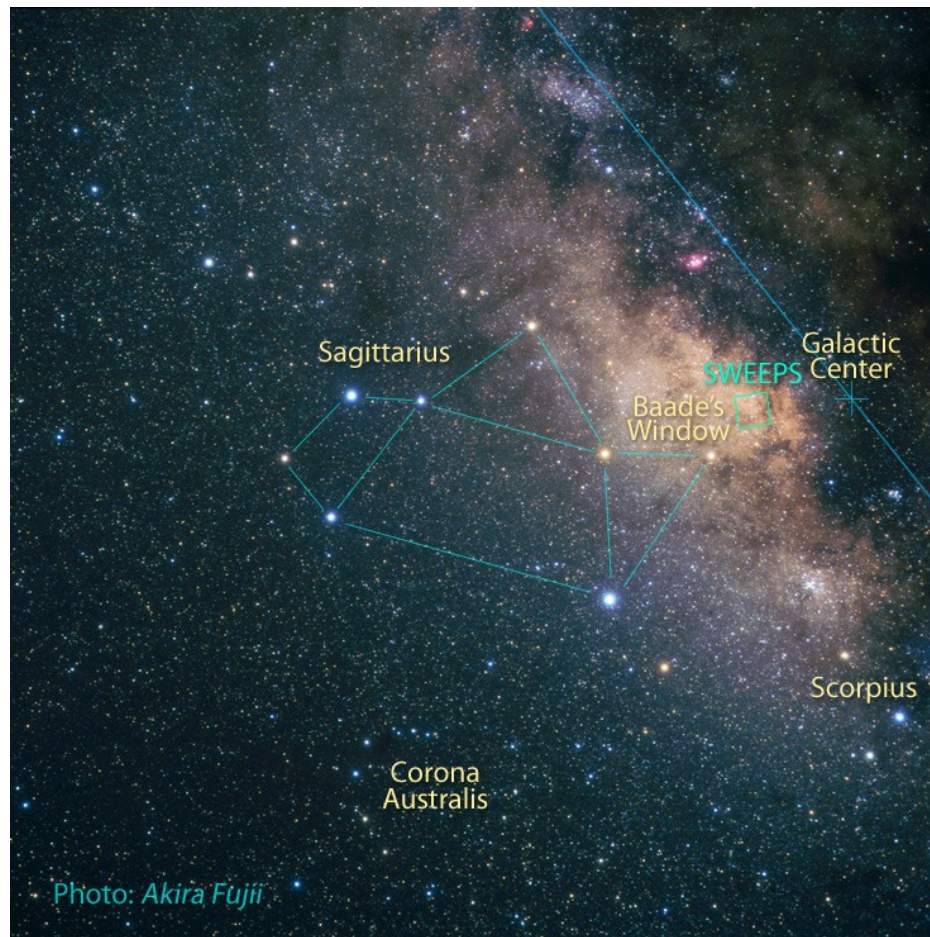


- Pokračovanie rádiových pozorovaní – **Grote Reber** – postavil vlastný rádiateleskop v roku 1937 – **systematická prehliadka oblohy**
- **John D. Krauss** vybudoval rádiové observatórium na OSU

# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

## Ako tam najlepšie preniknúť?

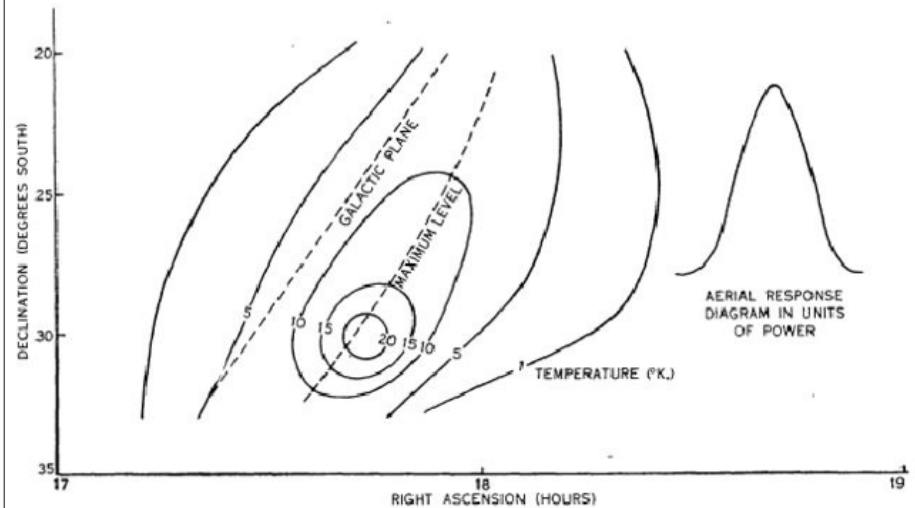
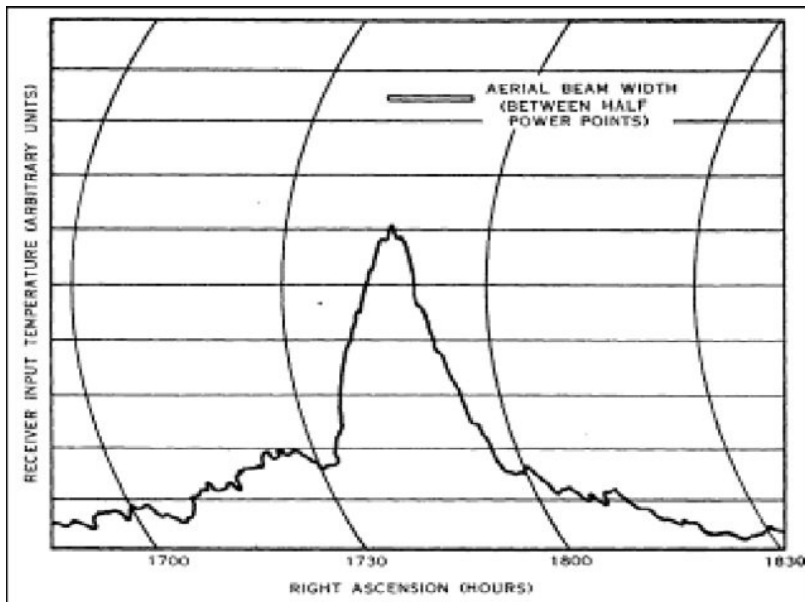
- Počas II. svetovej vojny **Walter Baade** detegoval oblasť so zníženou extinkciou smerom k súhvezdiu Strelca – **Baadeho okno**



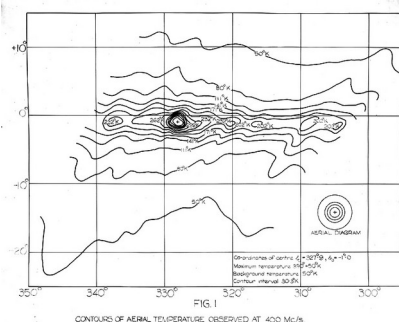
# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

## Ako tam najlepšie preniknúť?

- Detekcia **Sagittaria A** – najjasnejšieho zdroja v súhvezdí Strelca
- **Jack Piddington & Harry Minnett 1951** “Sagittarius-Scorpius source”



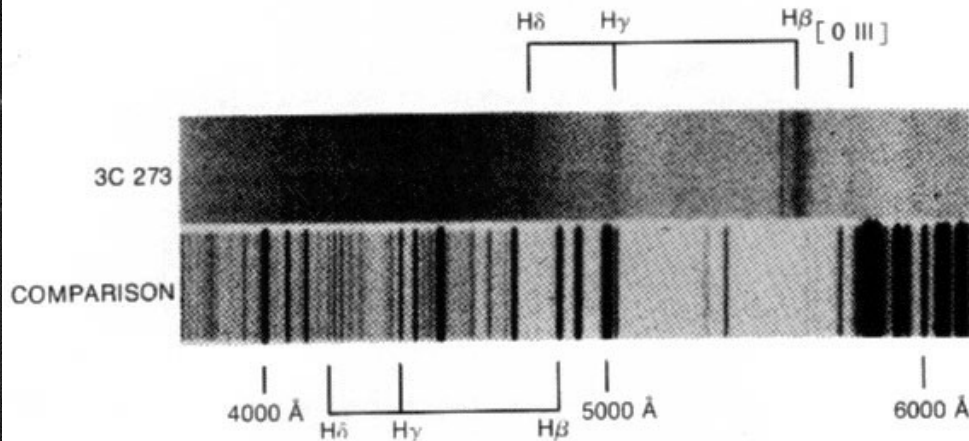
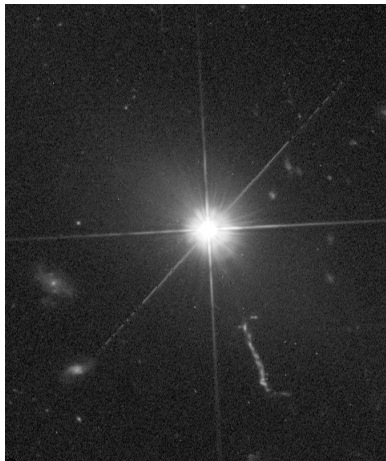
- McGee & Bolton potvrdili existenciu zdroja pomocou “**sea interferometer**” v **Dover Heights v 1954**





# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

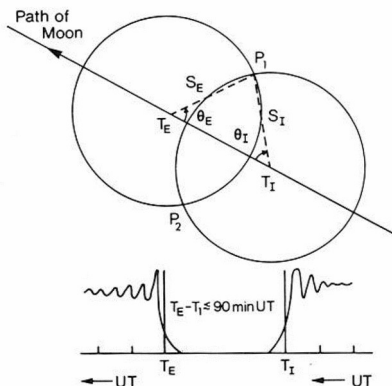
- V 50 rokoch objav veľkého množstva rádiových zdrojov pomocou radarovej techniky po Druhej svetovej vojne
- Thomas Matthews a Alan Sandage identifikovali optický zdroj k rádiovému zdroju 3C 48 so širokými čiarami, “zvláštna vec”
- Podobný zdroj bol 3C 273 – bodové zdroje podobné hviezdám – **kvázistelárne zdroje alebo kvazary**



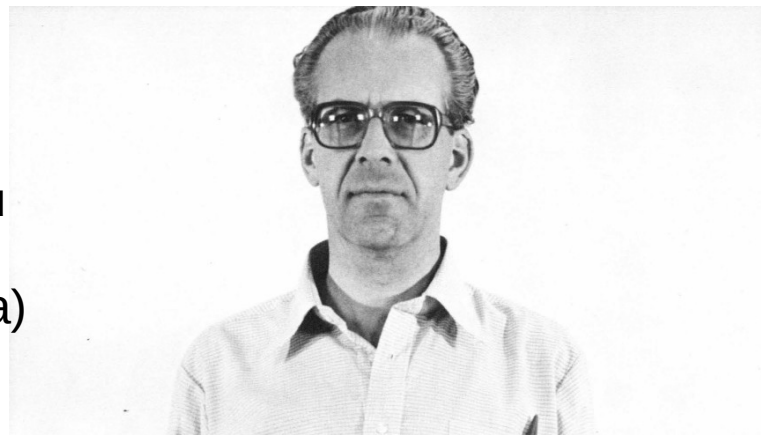
- **Maarten Schmidt** v roku 1963 (publikácia v Nature zo 16.3.) identifikoval v spektre posunuté Balmerovské čiary vodíka
- Zdroj v kozmologickej vzdialenosti 760 Mpc
- Celkový žiarivý výkon ekvivalent 10 000 miliárd Sínk

# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

- **Maarten Schmidt** v roku 1963 (publikácia v Nature zo 16.3.) identifikoval v spektre posunuté Balmerovské čiary vodíka
- Zdroj v kozmologickej vzdialenosti 760 Mpc
- Celkový žiarivý výkon ekvivalent 10 000 miliárd Slnk



Identifikácia  
kvazaru a jetu  
Pomocou zákrytu  
Mesiacom  
(Parkes, Austrália)



NATURE

March 16, 1963

Vol. 197

## 3C 273: A STAR-LIKE OBJECT WITH LARGE RED-SHIFT

By DR. M. SCHMIDT

Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology, Pasadena

**T**HE only objects seen on a 200-in. plate near the positions of the components of the radio source 3C 273 reported by Hazard, Mackey and Shimmins in the preceding article are a star of about thirteenth magnitude and a faint wisp or jet. The jet has a width of 1"–2" and extends away from the star in position angle 43°. It is not visible within 11" from the star and ends abruptly at 20" from the star. The position of the

Table 1. WAVE-LENGTHS AND IDENTIFICATIONS

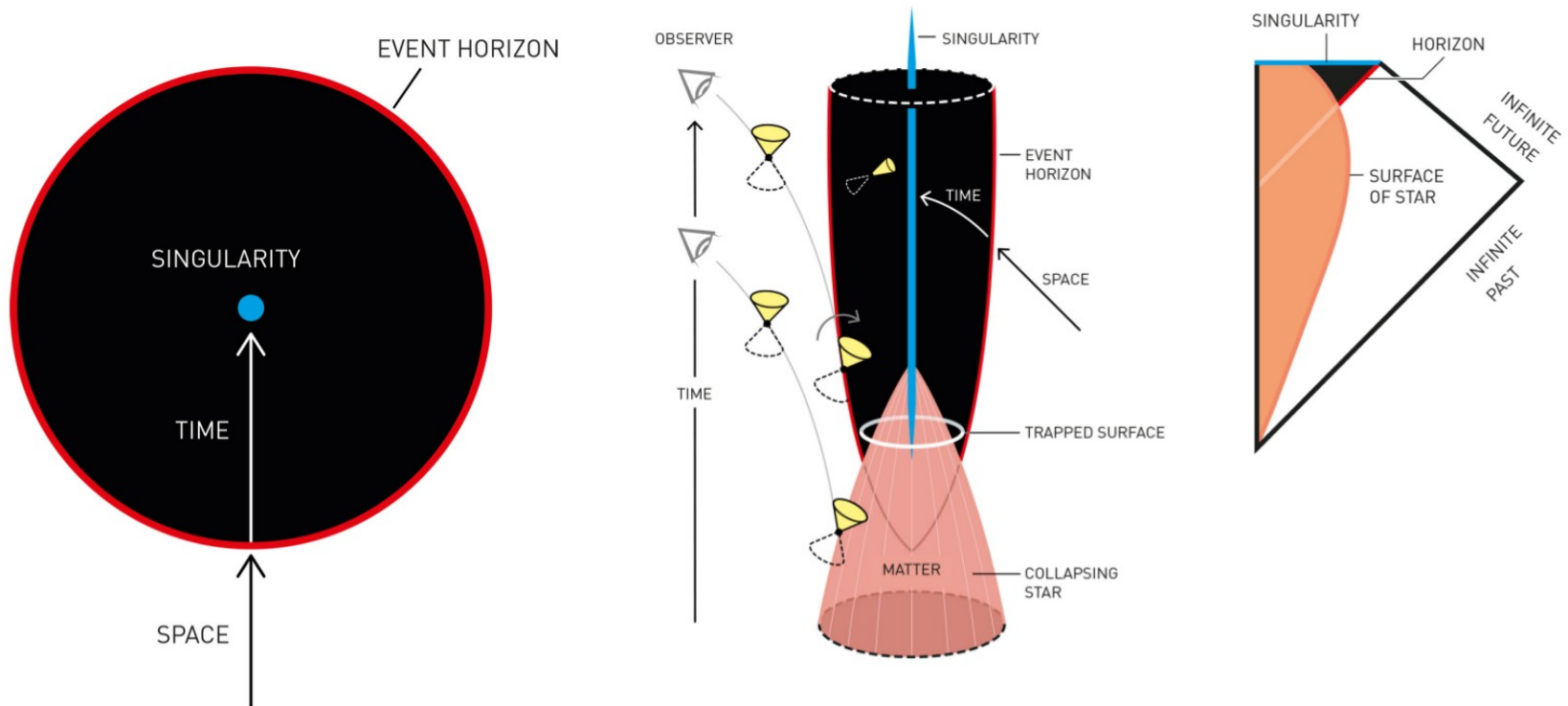
$\lambda$	$\lambda/1.158$	$\lambda_0$	
3239	2797	2798	Mg II
4595	3968	3970	H $\epsilon$
4753	4104	4102	H $\delta$
5032	4345	4340	H $\gamma$
5200–5415	4490–4675		
5632	4864	4861	H $\beta$
5792	5002	5007	[O III]
6005–6190	5186–5345		
6400–6510	5527–5622		

# Centrum Galaxie – cesta dovnútra

- **Maarten Schmidt** v roku 1963 (publikácia v Nature zo 16.3.) identifikoval v spektre posunuté Balmerovské čiary vodíka

## Dôsledky

- **1. TEXAS sympózium** – čierne diery v centrách galaxií sa stávali reálnymi entitami na vysvetlenie obrovských energií (December 1963)
- Roy Kerr - riešenie Einsteinových rovníc poľa pre rotujúcu čiernu dieru (1963)
- Roger Penrose – kolaps masívnej hviezdy do singularity obklopenej horizontom udalostí (1963, 1965, 1965)



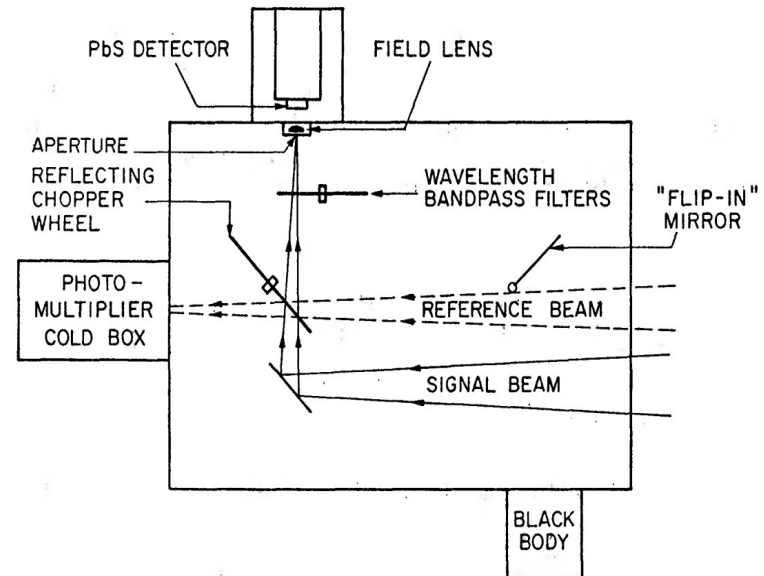
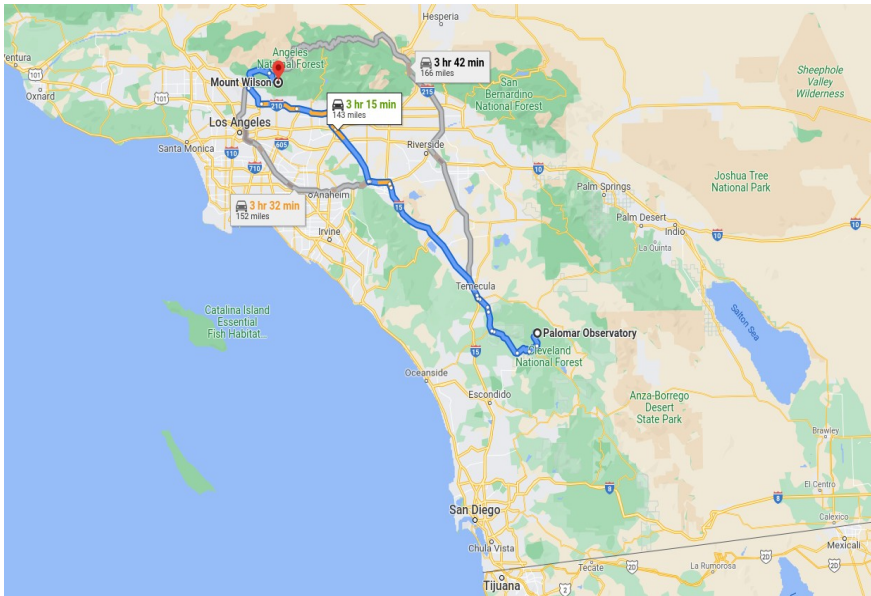
# Prvé pozorovania v infračervenej oblasti



**Eric Becklin (1940-)** a **Gerry Neugebauer (1932-2014)**  
Obidvaja z **Caltechu** – Becklin bol PhD študent

**Eric Becklin** detekoval bodový zdroj v blízkej infračervenej oblasti v **1966** na **2.0-2.4 mikrónoch** – súhlas s pozíciou a rozsahom rádiového zdroja Sagittarius A

Prvé úspešné pozorovania Galaktického centra  
V blízkej infračervenej oblasti na **1.65, 2.2 a 3.4 mikrometra** s uhlovým rozlíšením od 0.08' do 1.8' (1968)



# Prvé pozorovania v infračervenej oblasti



**Eric Becklin (1940-) a Gerry Neugebauer (1932-2014)**  
Obidvaja z **Caltechu** – Becklin bol PhD študent



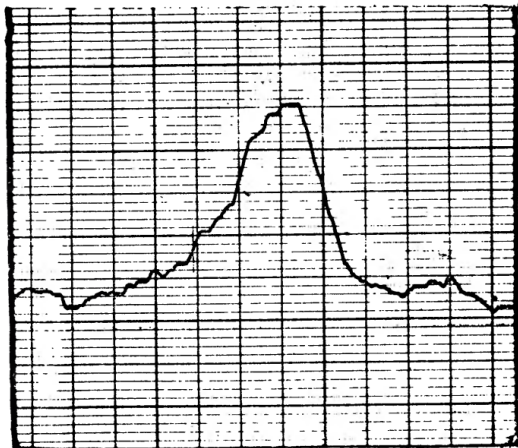
Hooker  
Telescope,  
Mt. Wilson,  
LA



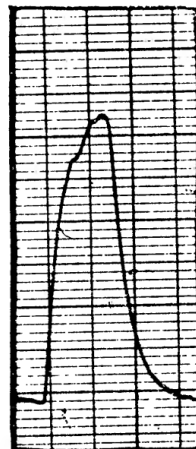
Hale  
Telescope,  
Mt. Palomar,  
San Diego

Záznam pásového grafu podĺž rektascenzie v oblasti Galaktického centra  
na  $2.2 \mu\text{m}$  (Becklin & Neugebauer 1968)

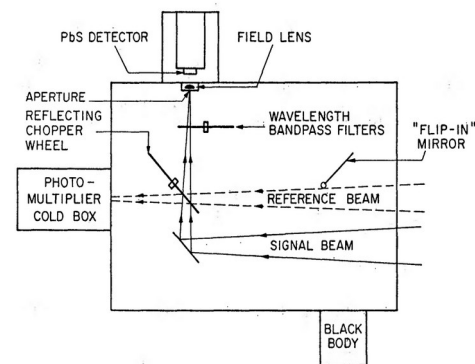
← 3' →



**GALACTIC CENTER**

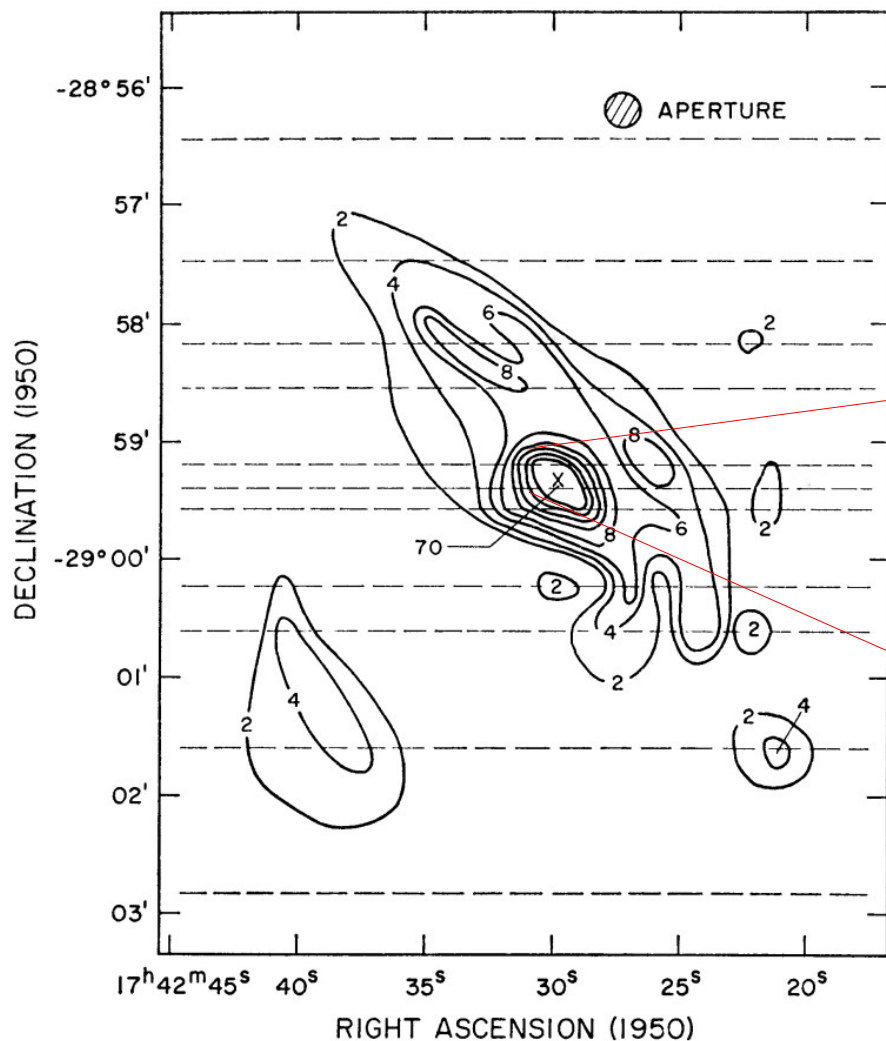


**$\gamma$  SGR.**

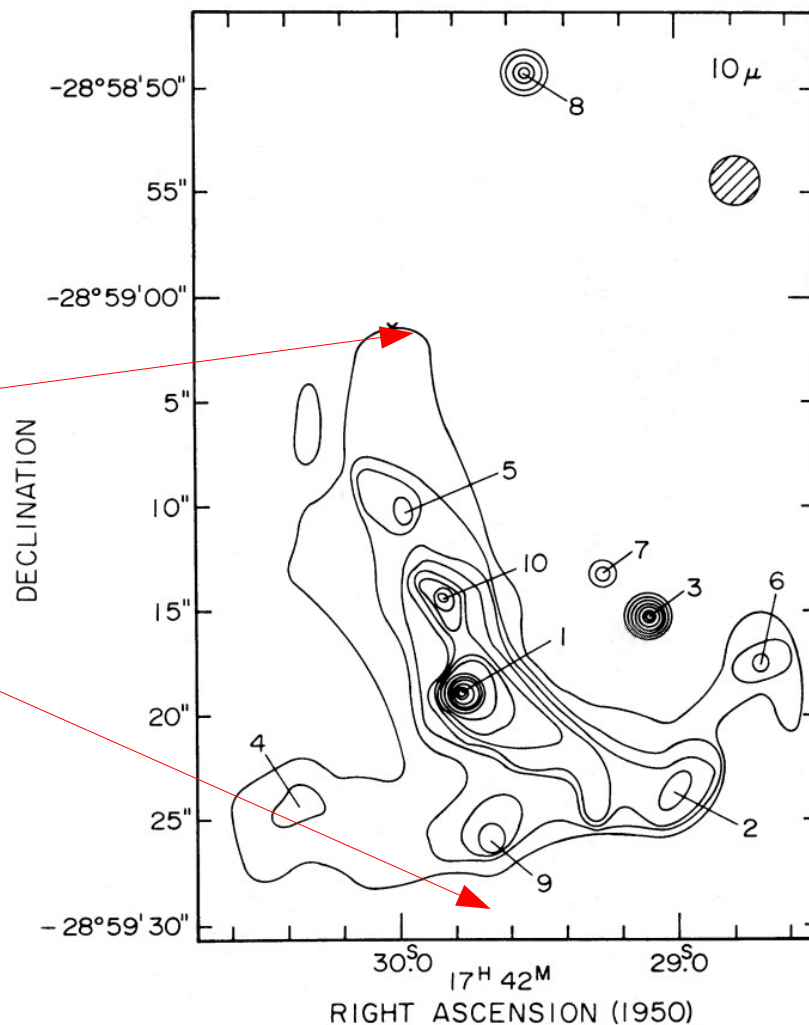


# Prvé pozorovania v infračervenej oblasti

Obrysová mapa na  $2.2\ \mu\text{m}$  s apertúrou  $0.25'$  (Becklin & Neugebauer 1968)



Obrysová mapa na  $10\ \mu\text{m}$  s rozlíšením  $2.3''$  resolution (Becklin et al. 1978)





# Prvé zmienky o čiernej diere v centre Galaxie



- **Donald Lynden-Bell a Martin Rees**
- 1969 – Donald Lynden-Bell prezentoval model, v ktorom väčšina galaxií má v strede supermasívnu čiernu dieru – väčšinou dnes už málo aktívnu (“Galactic nuclei as collapsed old quasars”)

690

NATURE, VOL. 223, AUGUST 16, 1969

## Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars

by

D. LYNDEN-BELL  
Royal Greenwich Observatory,  
Herstmonceux Castle, Sussex

Powerful emissions from the centres of nearby galaxies may represent  
dead quasars.

- 1971 – Donald Lynden-Bell & Martin Rees explicitne predpovedali existenciu supermasívnej čiernej diery v centre Galaxie
- Navrhli použiť interferometriu s dlhou základňou (VLBI) a infračervené pozorovania na jej detekciu

## ON QUASARS, DUST AND THE GALACTIC CENTRE

*D. Lynden-Bell and M. J. Rees*

(Received 1971 January 5)

# Prvé detekcia kompaktného zdroja v centre Galaxie

- Detekcia kompaktného rádiového zdroja – **Bruce Balick a Robert L. Brown**  
13. a 15.2. 1974 pomocou interferometra s 35 km základňou
- Green Bank – Huntersville, West Virginia
- Jasný zdroj  $\sim 0,5$  Jy, s vysokou žiarivou teplotou  $> 10$  miliónov Kelvinov, bodový zdroj, nerozlíšený na škále  $< 0.1$  oblúkových uhlových sekúnd

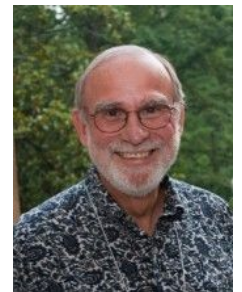
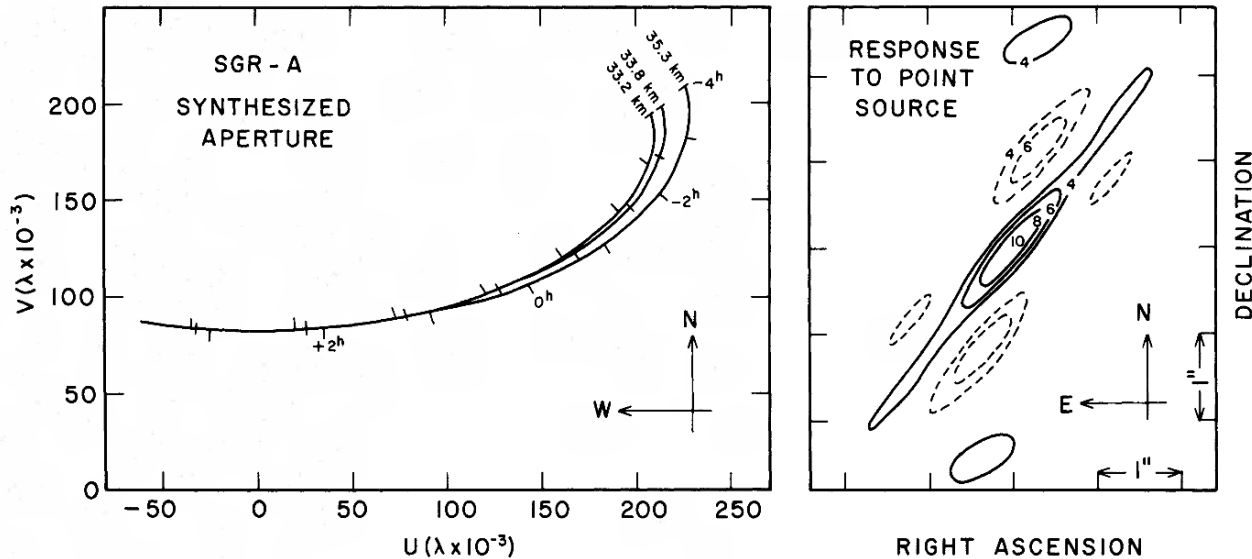


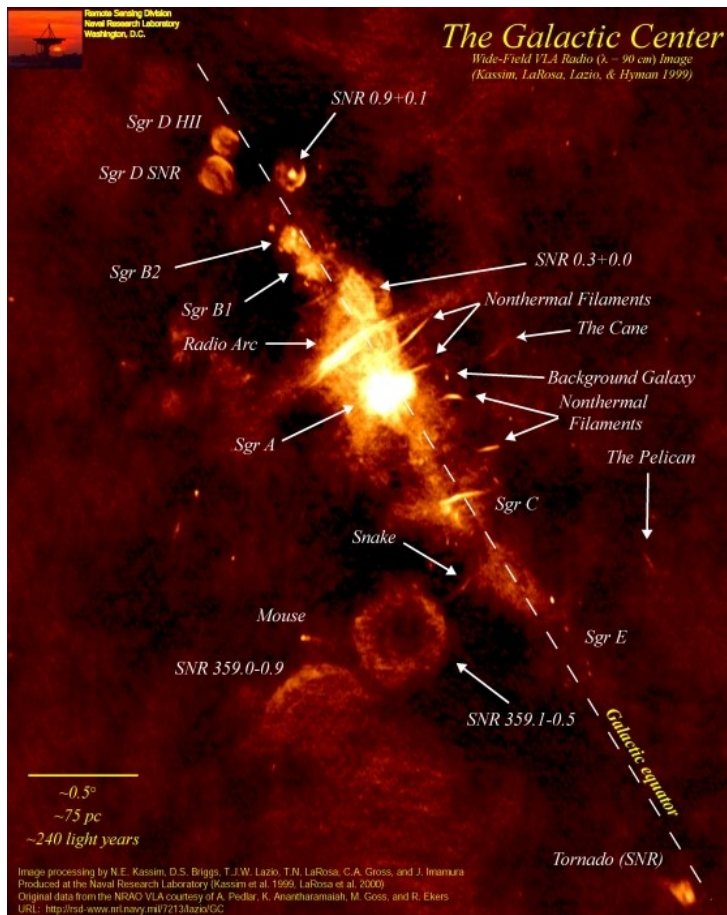
FIG. 1.—The projected baseline coverage and resulting synthesized beam pattern available for Sgr A at 2695 MHz. Hour angles are indicated along the ellipses. The axes are  $u$ , the east-west, and  $v$ , the north-south projections of the baseline, measured in wavelengths. At 8085 MHz the ellipses are identical in shape but larger by a factor of 3 so that the resulting synthesized beam is smaller by a factor of three.

- V 1982 označil Robert Brown kompaktný zdroj **Sgr A\*** na odlíšenie od rozľahlejšej rádiovkej oblasti **Sgr A**

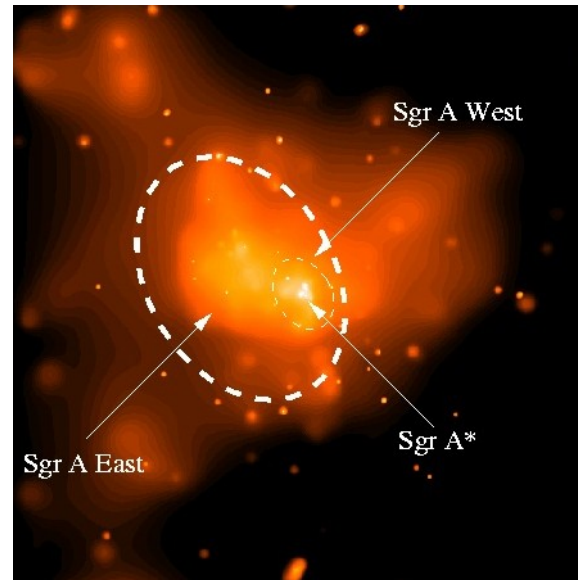


# Prvé detekcia kompaktného zdroja v centre Galaxie

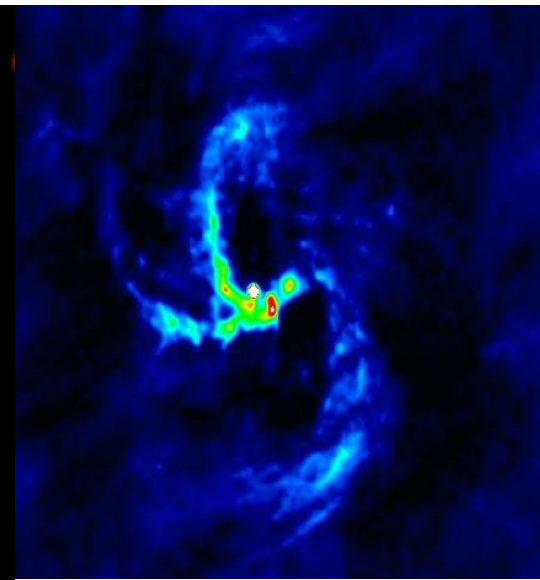
- Detekcia kompaktného rádiového zdroja – **Sgr A\*** – **Bruce Balick a Robert L. Brown** 13. a 15.2. 1974 pomocou interferometra s 35 km základňou
- Green Bank – Huntersville, West Virginia
- Jasný zdroj  $\sim 0,5$  Jy, s vysokou žiarivou teplotou  $> 10$  miliónov Kelvinov, bodový zdroj, nerozlíšený na škále  $< 0.1$  oblúkových uhlových sekúnd



Roentgen

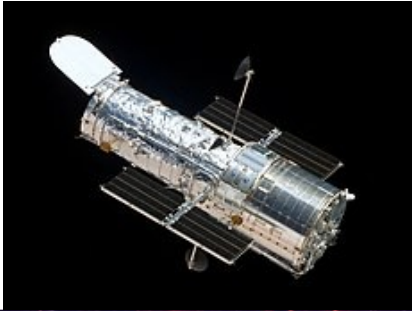


Rádiové vlny

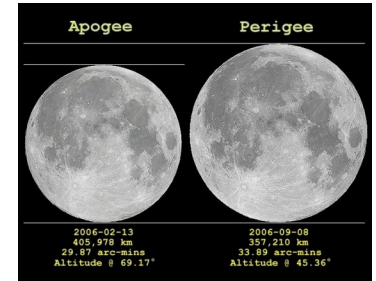


# Cesta do Galaktického centra

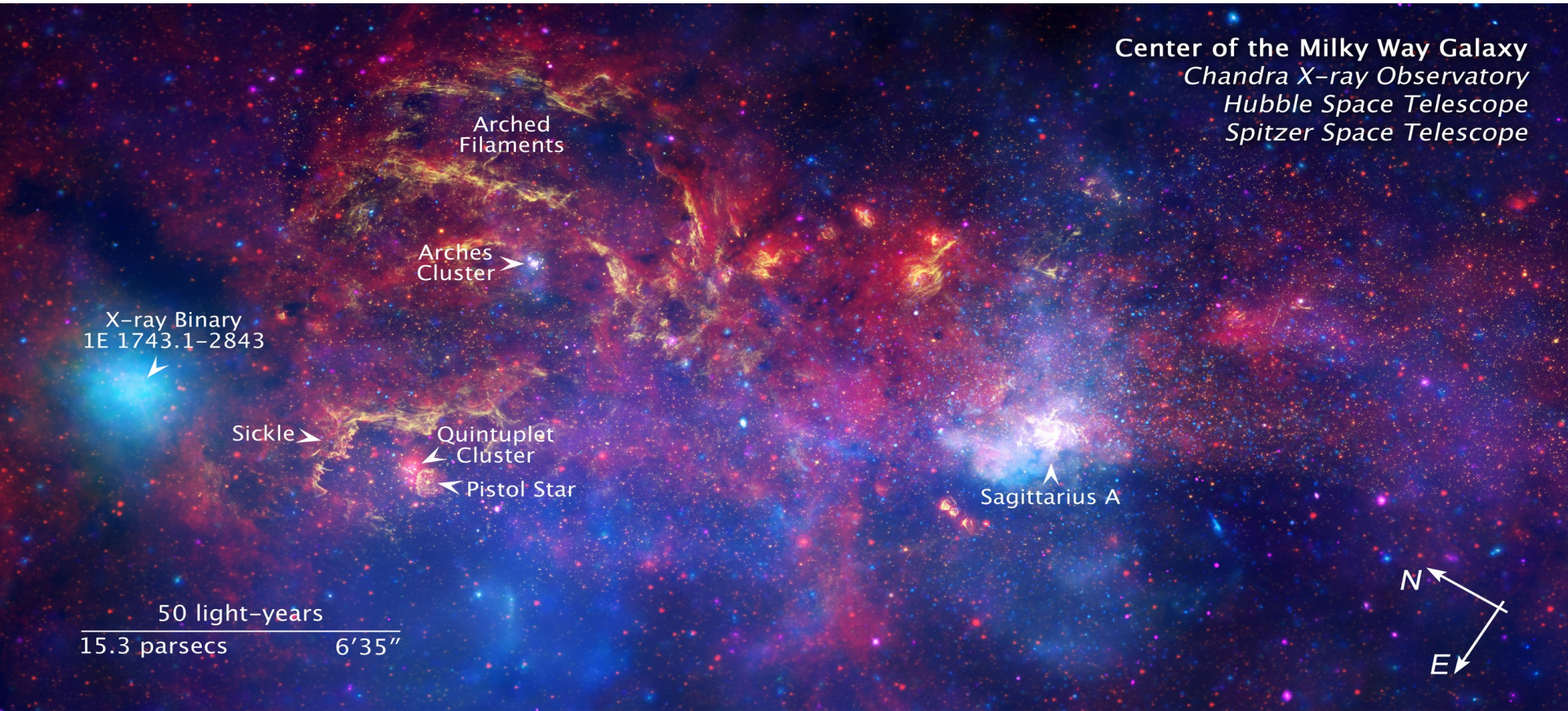
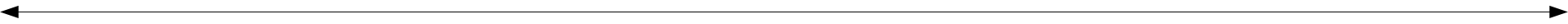
ESO video



# Cesta do Galaktického centra

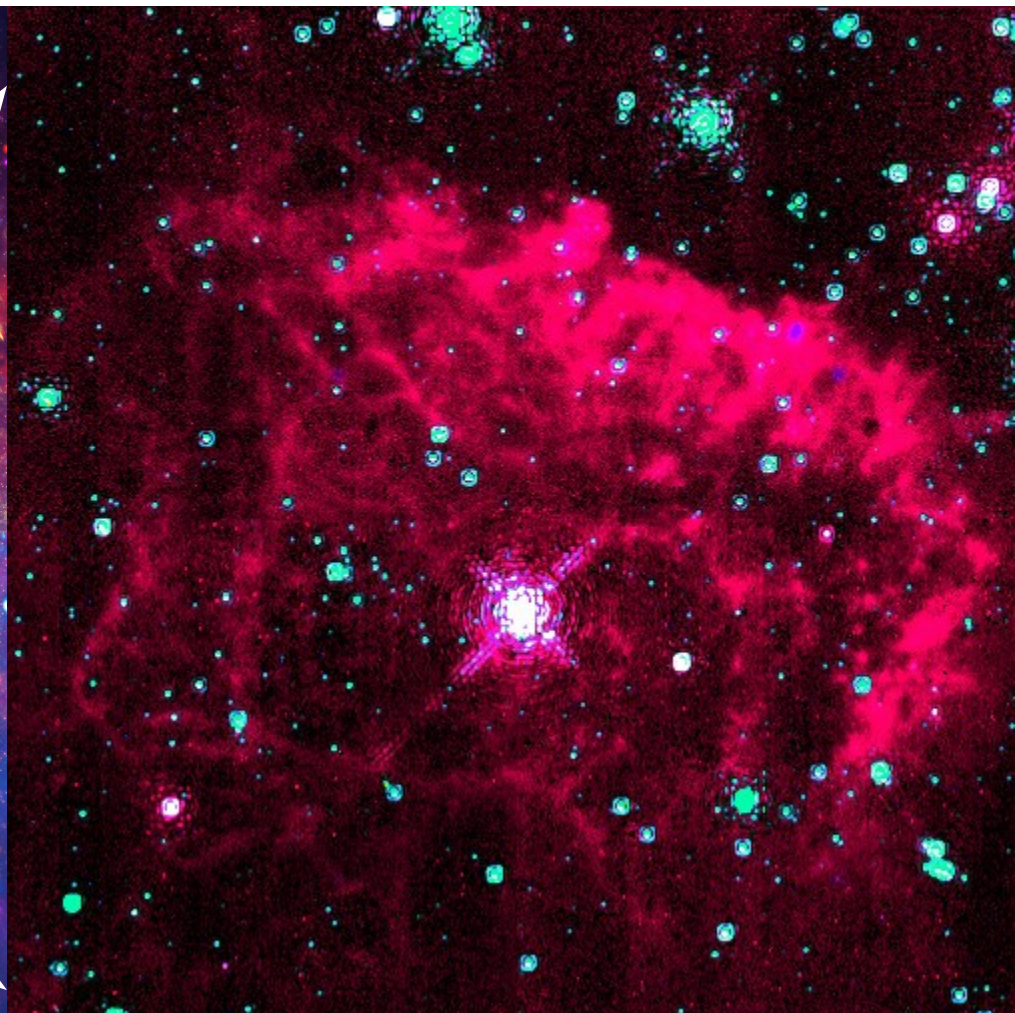
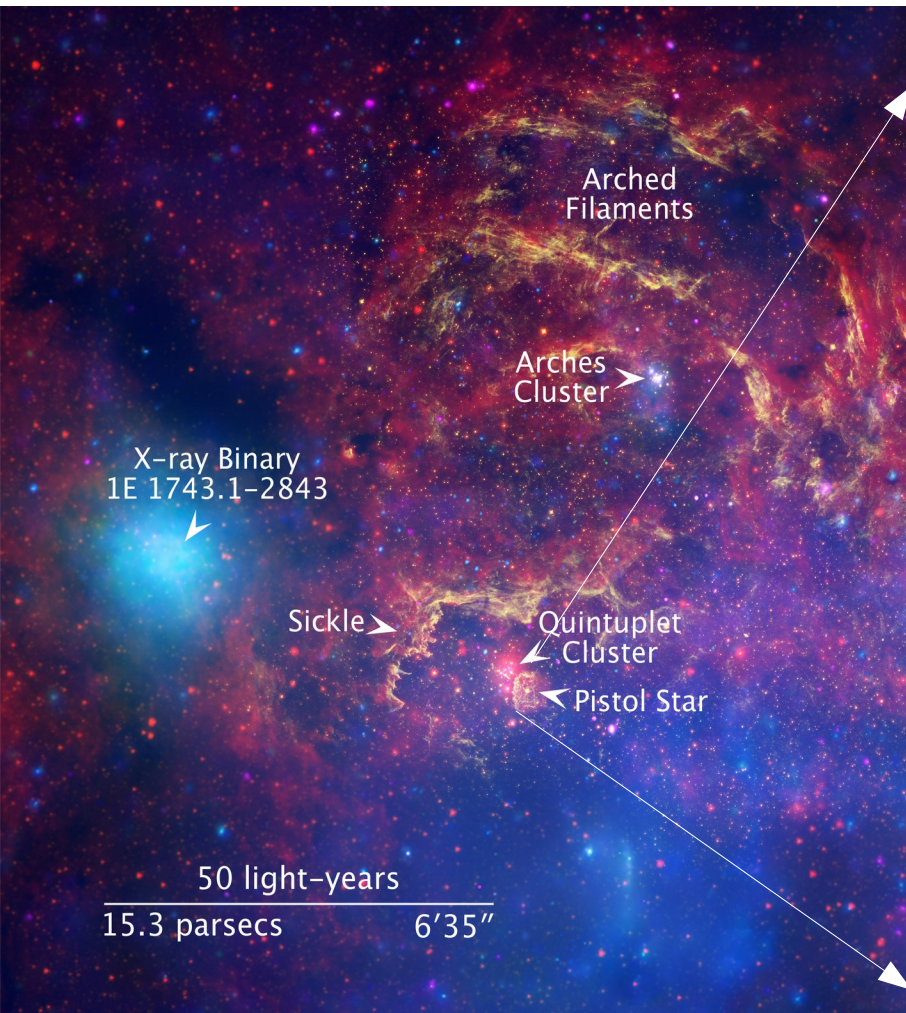


Škála 38 uhlových minút = 1,2 uhlového priemeru Mesiaca

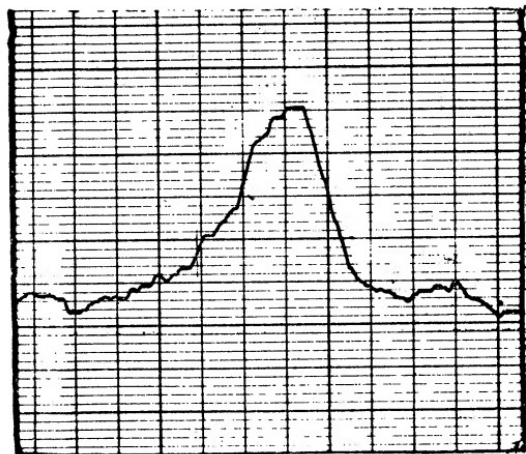
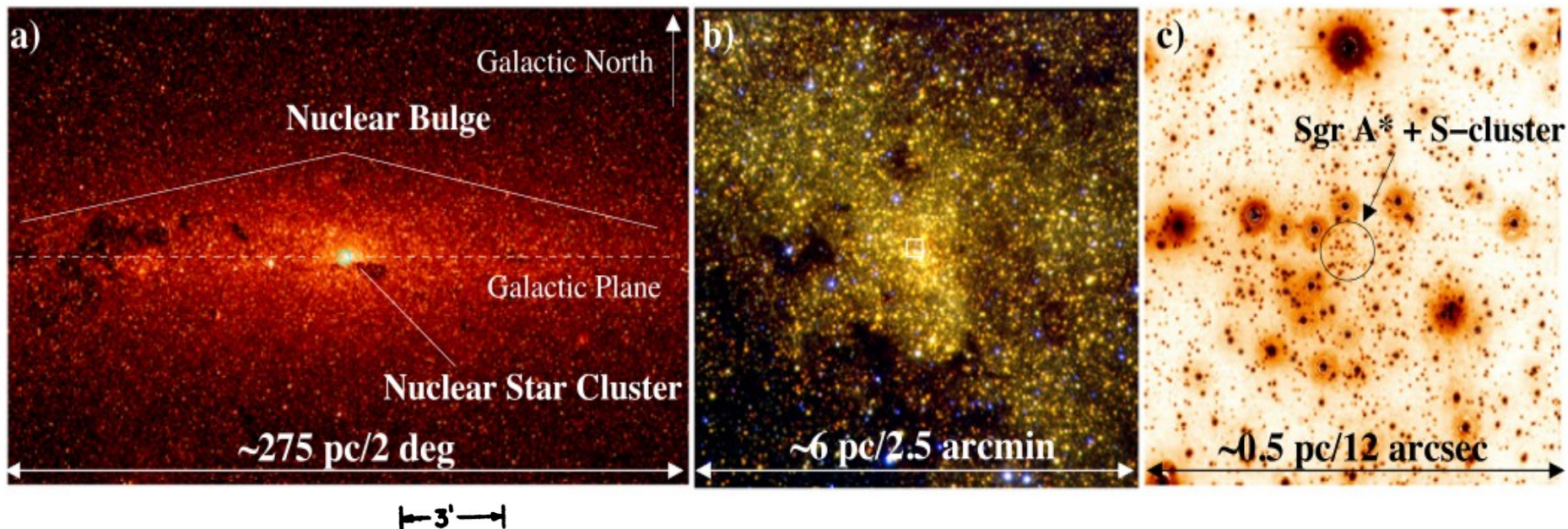


# Cesta do Galaktického centra

- Nachádzajú sa tu najhmotnejšie a najviac žiarivé hviezdy v Galaxii
- Pištolová hviezda – žiarivý výkon 3 miliónov Slnk (za 10 s vyžiari ekvivalent Slnčného výkonu)

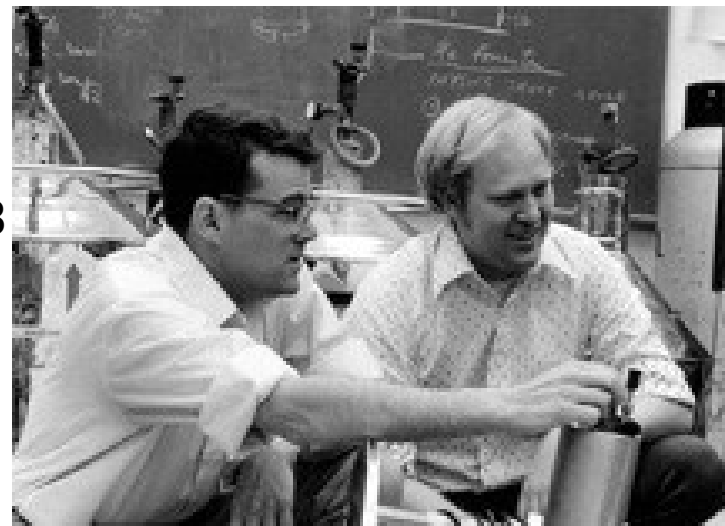


# Galaktické centrum v infračervenej spektrálnej oblasti - hustá centrálna nukleárna hviezdokopa



GALACTIC CENTER

Eric Becklin &  
Gerry Neugebauer 1968



# Multispektrálne Galaktické centrum

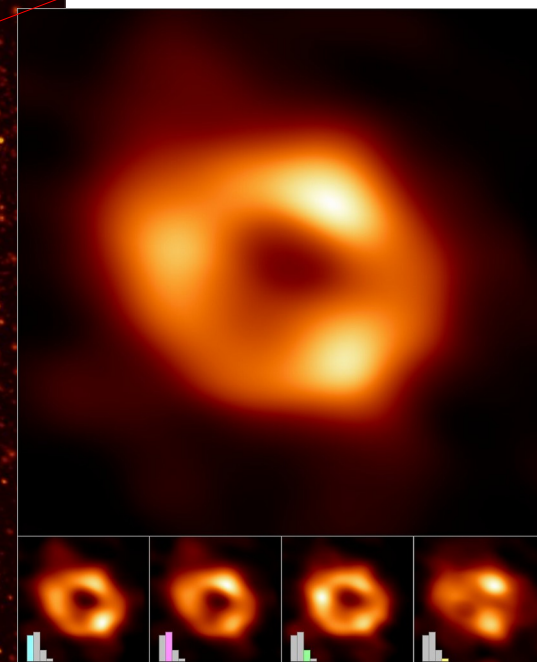
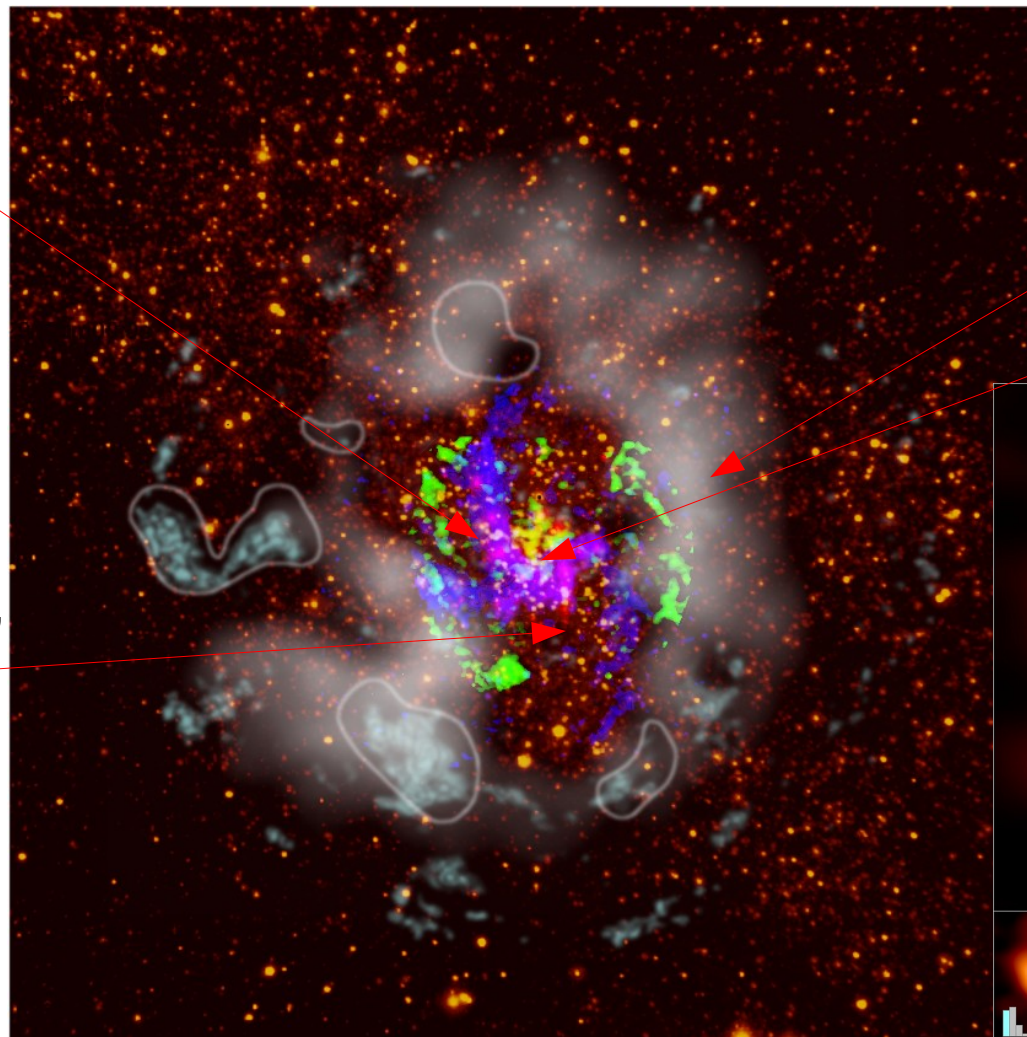
- hustá centrálna nukleárna hviezdokopa a obiehajúci ionizovaný, neutrálny a molekulový plyn

minišpirála

Cirkumnukleárny ring

Sgr A\*

Centrálna "kavita"



# Čierna diera v centre veľmi pravdepodobná

Presná hmotnosť približne 4 miliónov hmotností Slnka určená z monitorovania hviezd

Reinhard Genzel



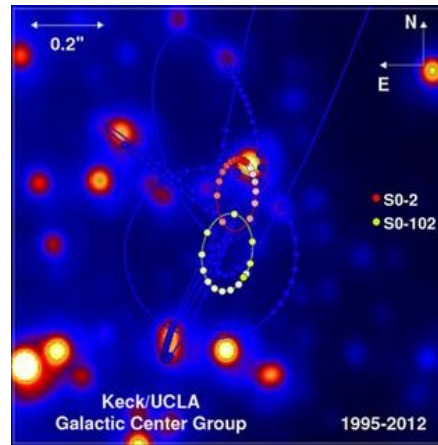
Andreas Eckart



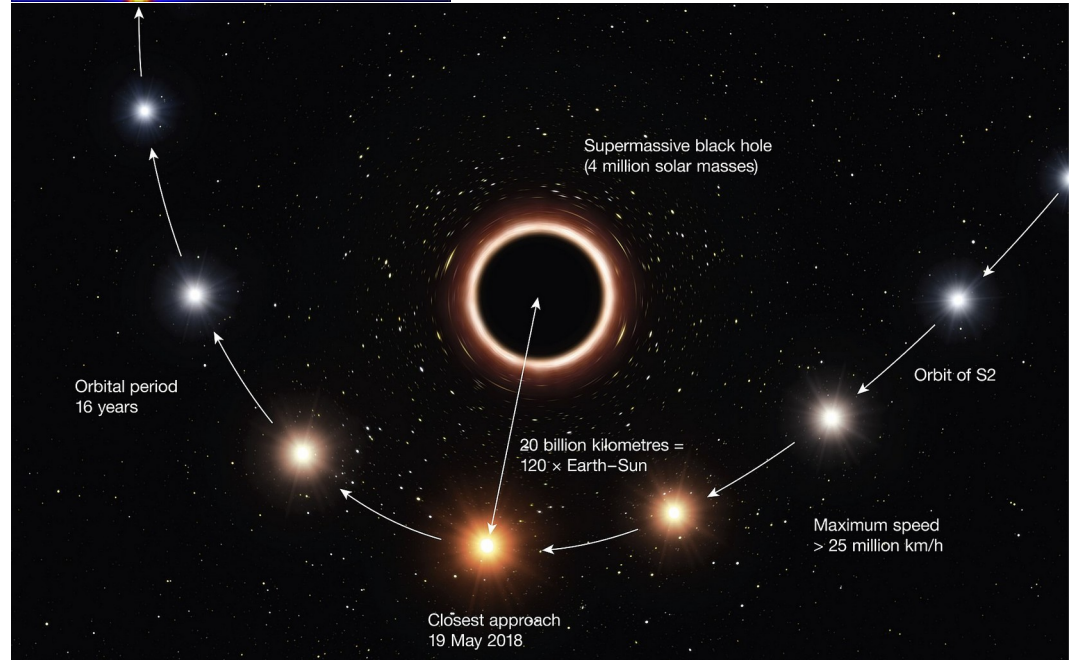
Andrea Ghez



Rainer Schödel



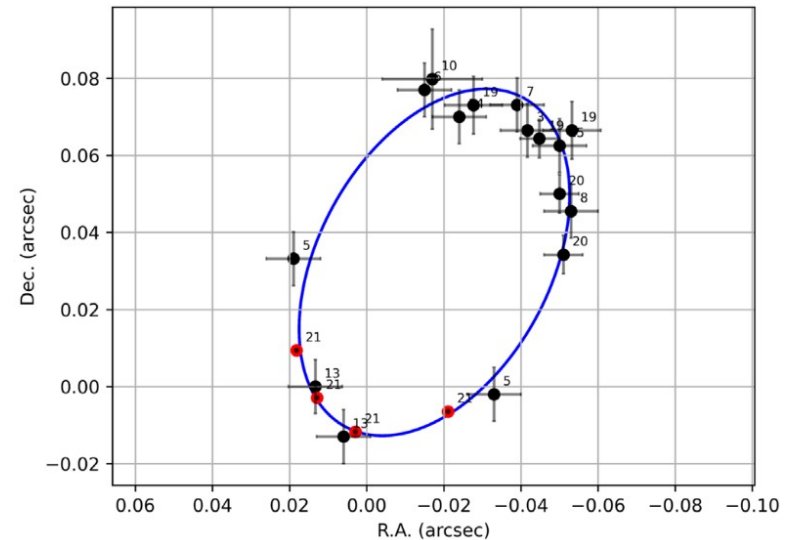
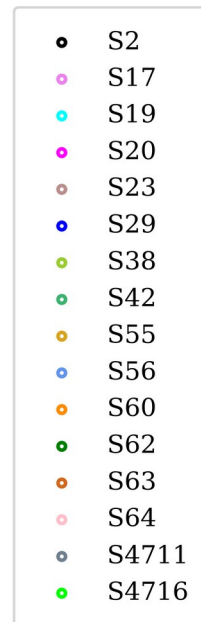
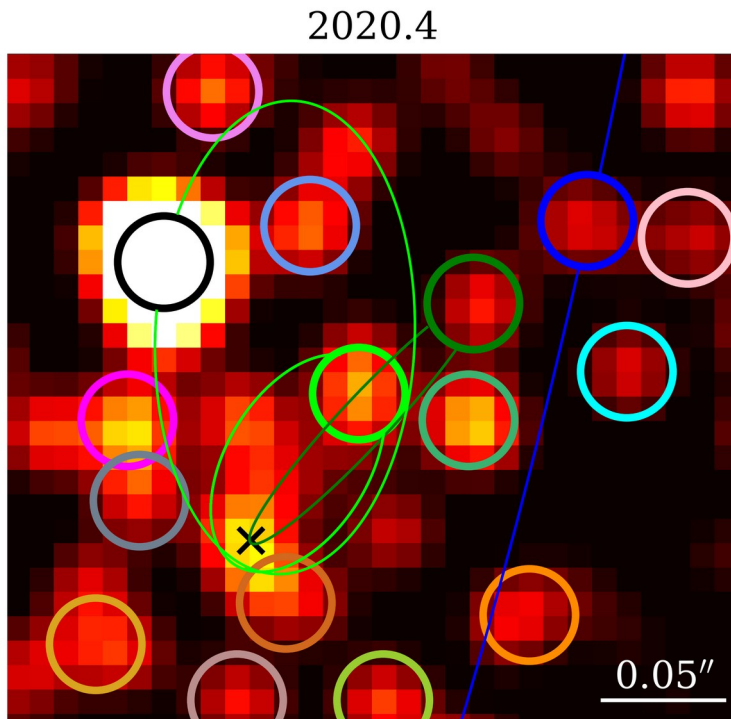
Video



# Čierna diera v centre veľmi pravdepodobná

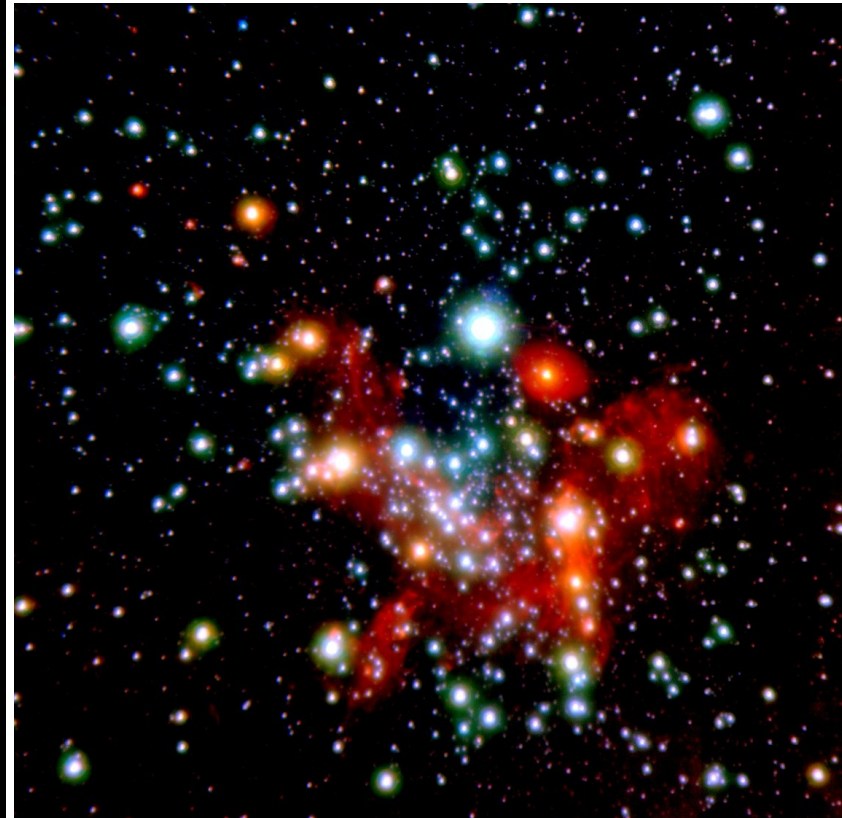
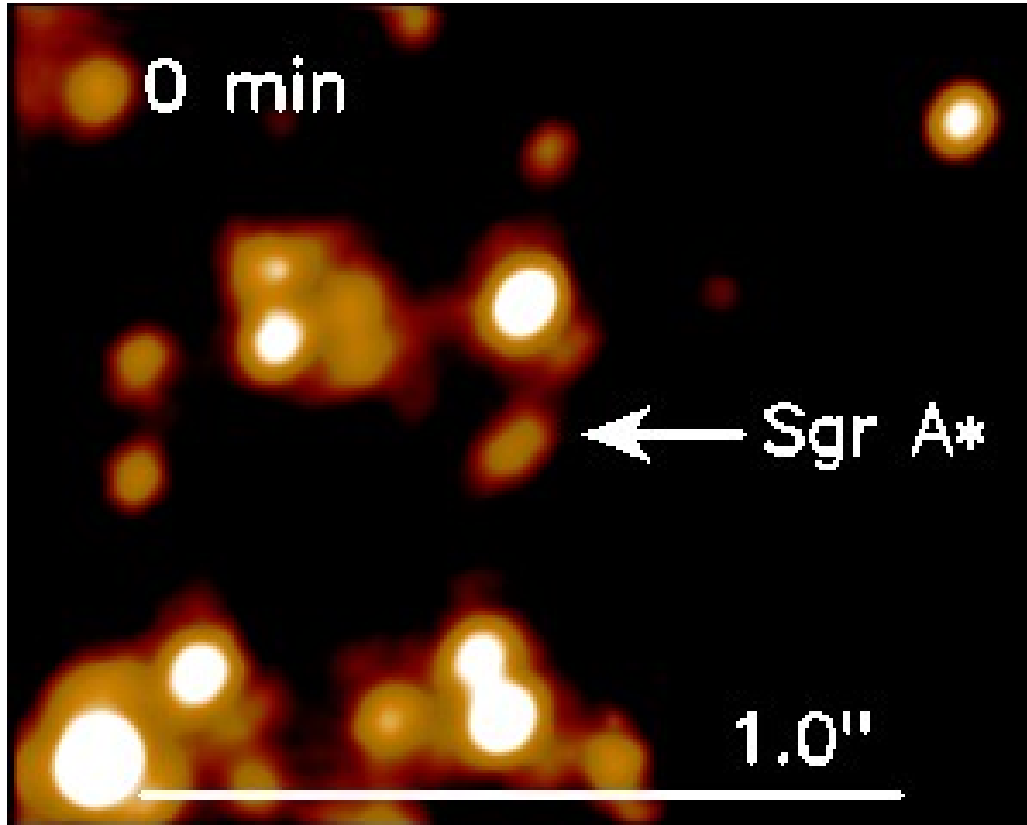
- Presná hmotnosť približne 4 miliónov hmotností Slnka určená z monitorovania hviezd
- Doterajší rekord v obežnej perióde – hviezda S4716 obieha okolo Sgr A\* raz za 4 roky
- Peissker, Eckart, Zajaček, Britzen

“Observation of S4716-a Star with a 4 yr Orbit around Sgr A\*”, 2022





# Galaktické centrum – Čierna diera

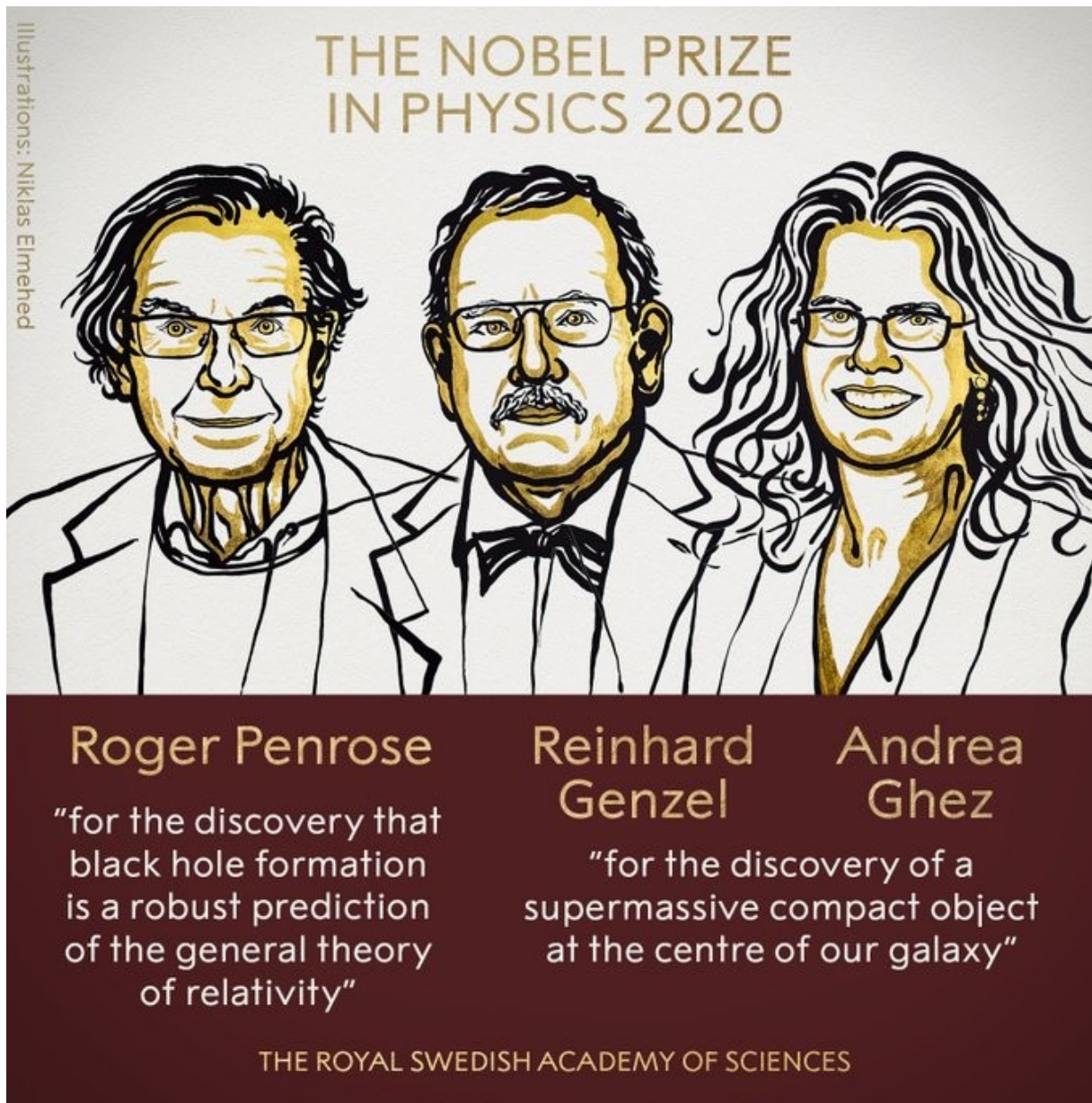


## Vzplanutia Sgr A\* v infračervenej oblasti

- 3-5 vzplanutí denne
- Jeden záblesk trvá približne hodinu
- Rotujúca horúca plazma v magnetickom poli

## Fotografia centra Galaxie v infračervenej oblasti

# Nobelova cena za fiziku 2020



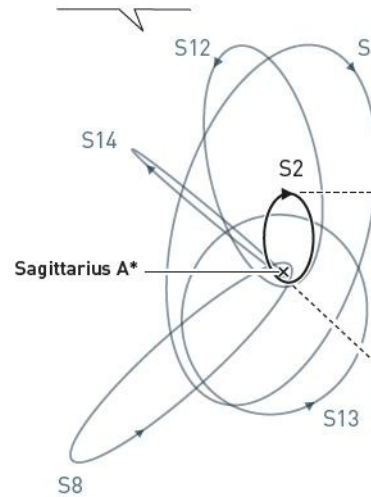
# Hviezdy obiehajú centrum Galaxie podobne ako planéty okolo Slnka



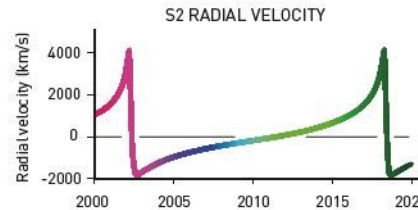
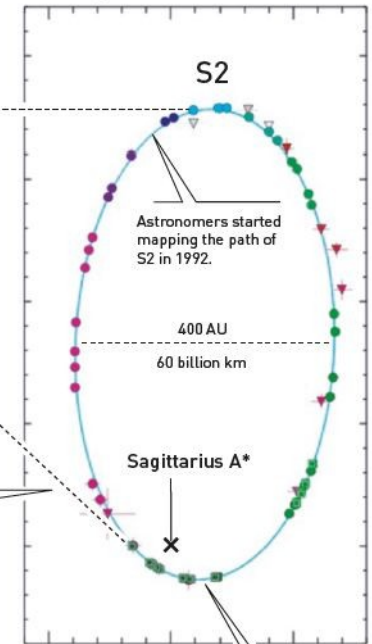
## Stars closest to the centre of the Milky Way

The stars' orbits are the most convincing evidence yet that a supermassive black hole is hiding in Sagittarius A\*. This black hole is estimated to weigh about 4 million solar masses, squeezed into a region no bigger than our solar system.

Some of the measured orbits of stars close to Sagittarius A\* at the centre of the Milky Way.



Astronomers were able to map an entire orbit of less than 16 years for one of the stars, S2 (or S-02). The closest it came to Sagittarius A\* was about 17 light hours (more than 10,000 million kilometres).



The S2 star's radial velocity increases as it approaches Sagittarius A\* and decreases as it moves away along its elliptical orbit. Radial velocity is the component of the star's velocity that is in our line of sight.

Closest to Sagittarius A\* (in 2002 and 2018), S2 reaches its maximum velocity of 7 000 km/s.

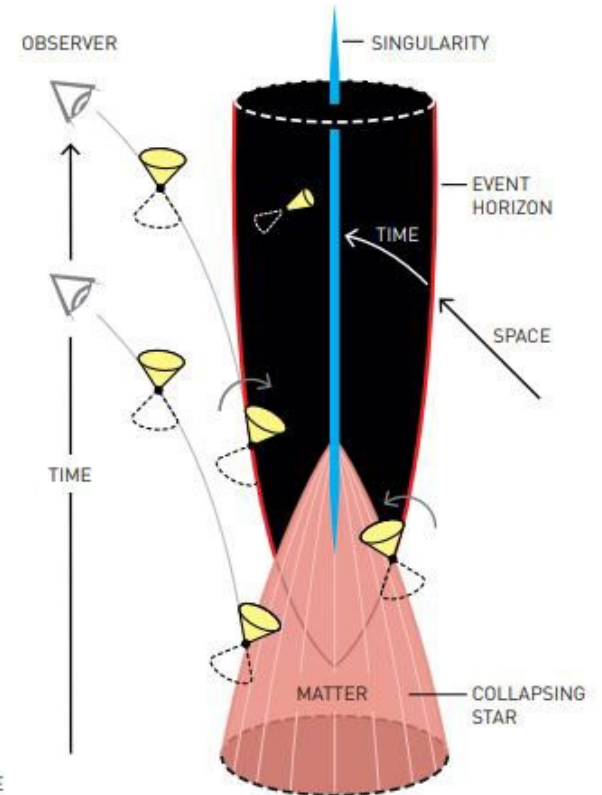
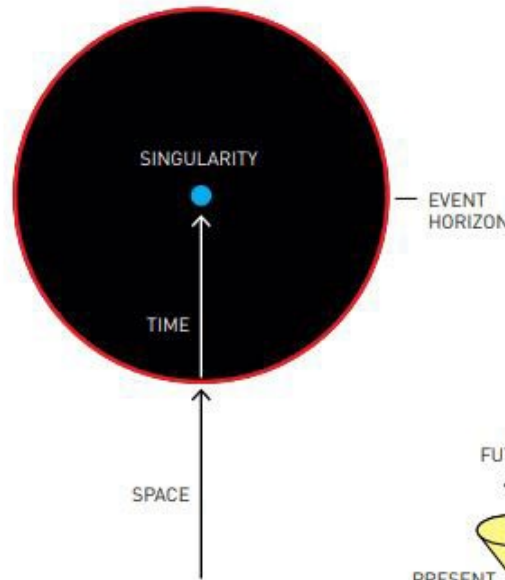
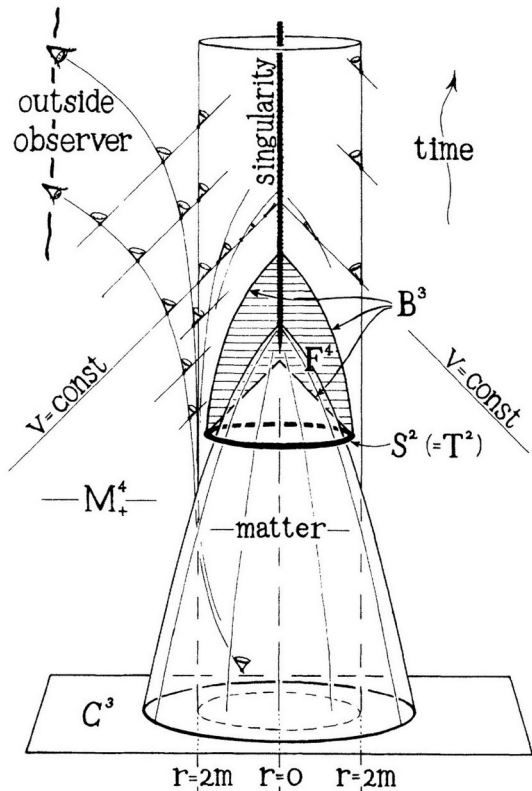


# Roger Penrose – vznik čiernych dier

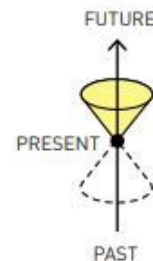


## Cross section of a black hole

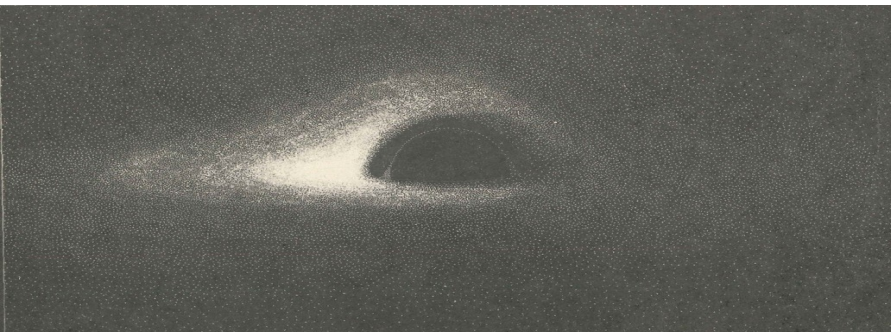
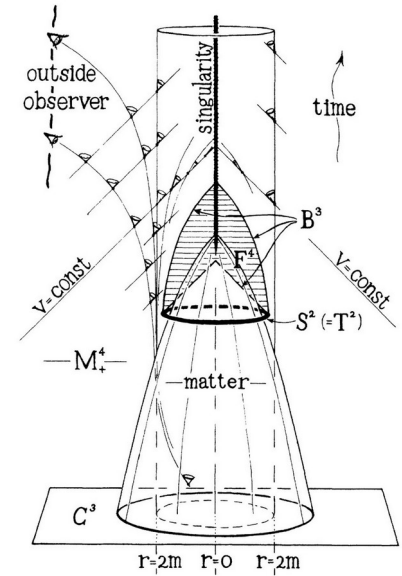
When a massive star collapses under its own gravity, it forms a black hole that is so heavy that it captures everything that passes its event horizon. Not even light can escape. At the event horizon, time replaces space and points only forward. The flow of time carries everything towards a singularity furthest inside the black hole, where density is infinite and time ends.



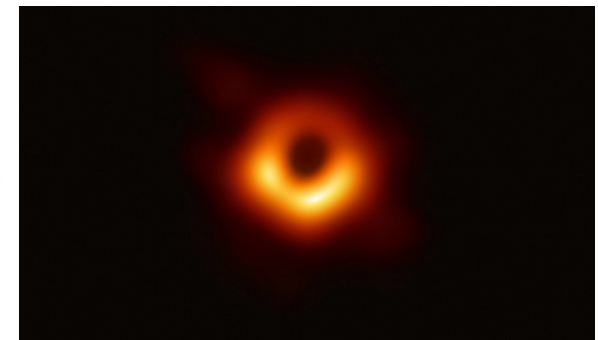
The light cone shows the paths of the light rays forward and backward in time. When matter collapses and forms a black hole, the light cones that cross the black hole's event horizon will turn inward, toward the singularity. An outside observer will never really see the light rays reach the event horizon, they just nudge it. No one can see further in.



# Roger Penrose – vznik čiernych dier



J.-P. Luminet  
simulácia/kresba  
z roku 1979



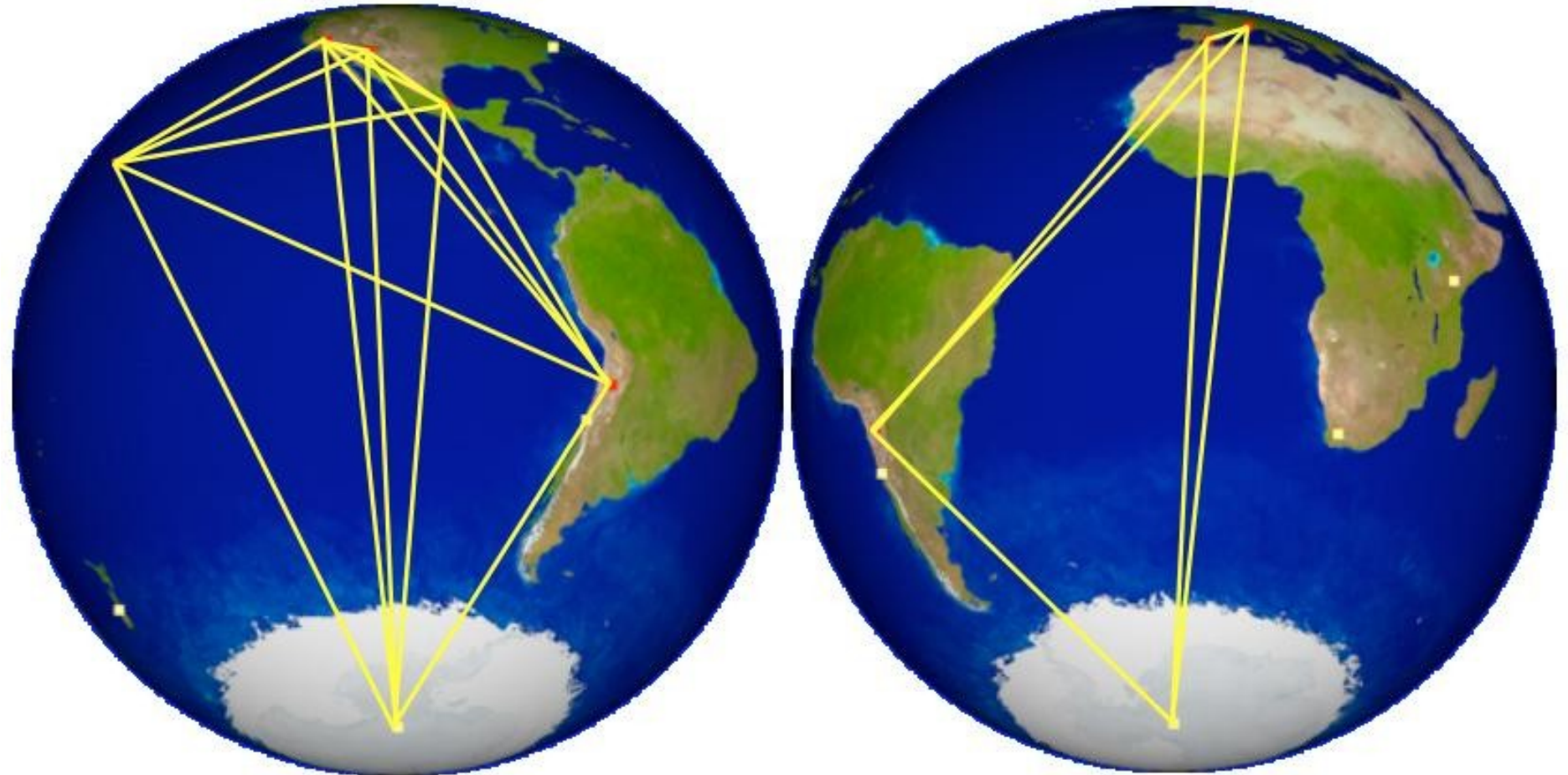
EHT snímka M87\* z 2017

## John Archibald Wheeler v 1967

““[The star] like the Cheshire cat fades from view. One leaves behind only its grin, the other, only its gravitational attraction...light and particles go down the black hole...””

# Čierna diera v centrách galaxií – finálny dôkaz?

- Sústava rádioteleskopov rozmiestnená po celej Zemi pozoruje na vlnovej dĺžke 1,3mm – rozlíšenie na škále 10 mikrouhlových sekúnd



# Čierna diera v centrách galaxií – finálny dôkaz?

Rozdiel v hmotnosti až tri rády: M87\* (6.5 miliárd  $M_{\text{sun}}$ ) a Sgr A\* (4 milióny  $M_{\text{sun}}$ )

