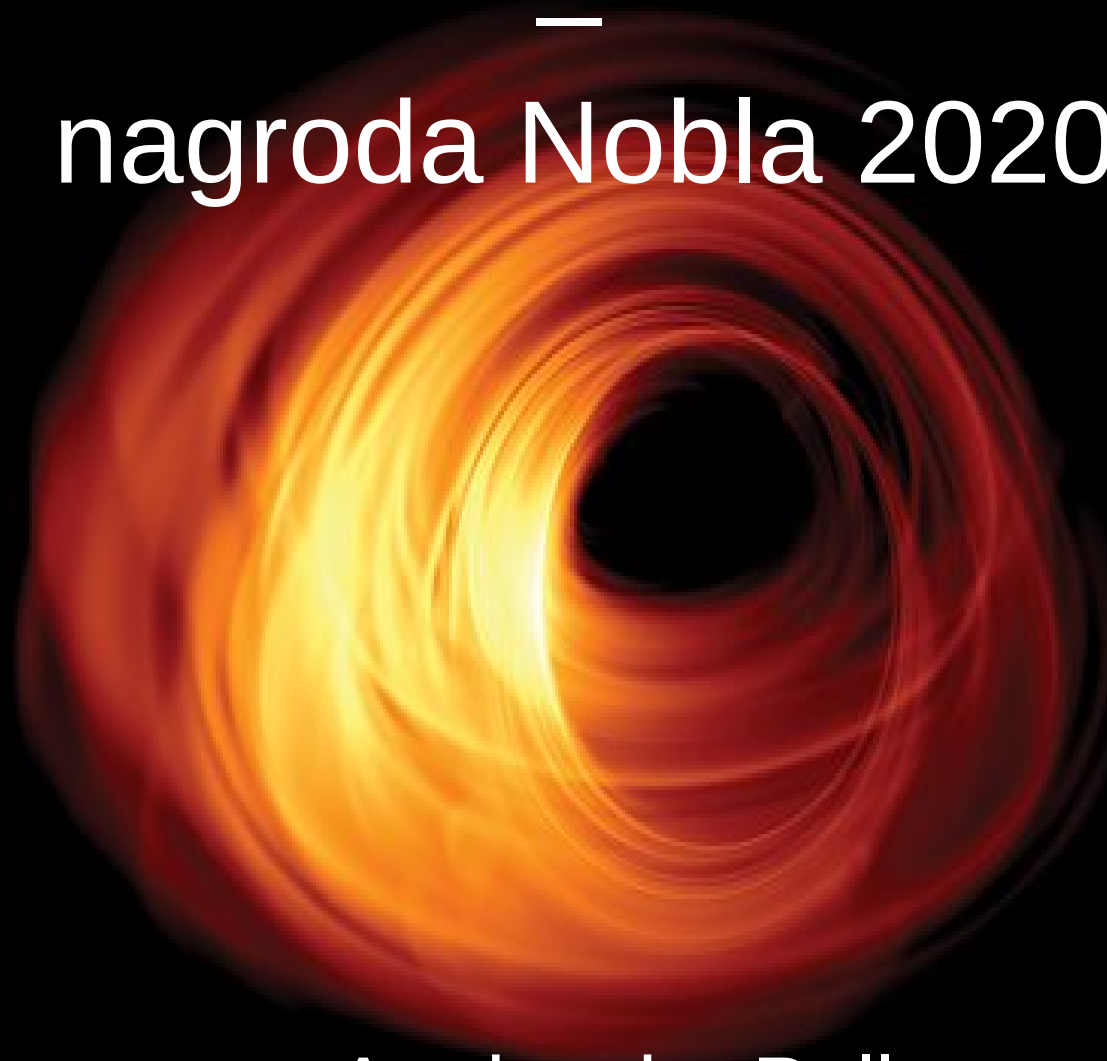


Czarne dziury — nagroda Nobla 2020



Agnieszka Pollo
UJ & NCBJ

Nagroda Nobla z fizyki 2020



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Fergus Kennedy

Roger Penrose

Prize share: 1/2



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Bernhard Ludewig

Reinhard Genzel

Prize share: 1/4



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Annette Buhl

Andrea Ghez

Prize share: 1/4

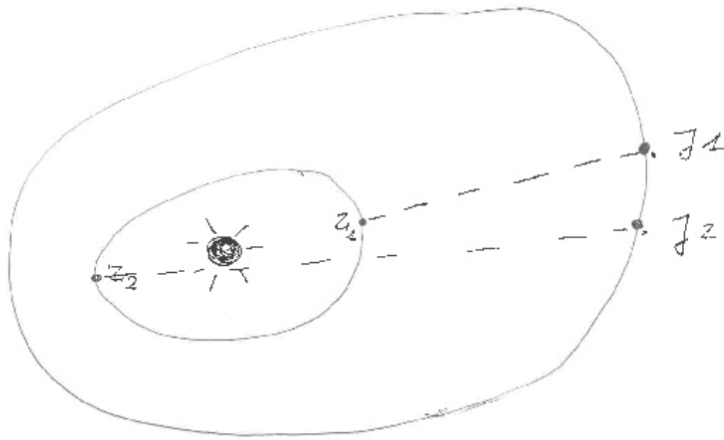
Nagroda Nobla z fizyki 2020

- 1/2: Roger Penrose "za odkrycie, że tworzenie się czarnych dziur wynika wprost z ogólnej teorii względności"
- 1/4+1/4: Reinhard Genzel i Andrea Ghez "za odkrycie supermasywnego obiektu zwartego w centrum naszej galaktyki"

Nagroda Nobla z fizyki 2020

- 1/2: Roger Penrose "za odkrycie, że tworzenie się czarnych dziur wynika wprost z ogólnej teorii względności" -> za pokazanie, że czarne dziury mogą i powinny istnieć
- 1/4+1/4: Reinhard Genzel i Andrea Ghez "za odkrycie supermasywnego obiektu zwartego w centrum naszej galaktyki" -> za udowodnienie, że obiekt, znajdujący się w centrum Drogi Mlecznej, spełnia wszelkie warunki, żeby być czarną dziurą (i niczym innym)

Światło ma skończoną prędkość



1676: Ole Roemer jako pierwszy zmierzył prędkość światła na podstawie obserwacji zaćmień Io przez Jowisza

Nawet w teorii grawitacji Newtona okazuje się to skomplikowane

- John Michell 1783 Philosophical Transactions of the Royal Society
gwiazda o gęstości takiej, jak Słońce, ale o 500x większym promieniu...
- Pierre-Simon Laplace 1796, 1799 Exposition du Système du Monde
gwiazda o gęstości Ziemi, ale o 250x większym promieniu...
- „ciemne gwiazdy”, z których światło nie może uciec

Ogólna teoria względności

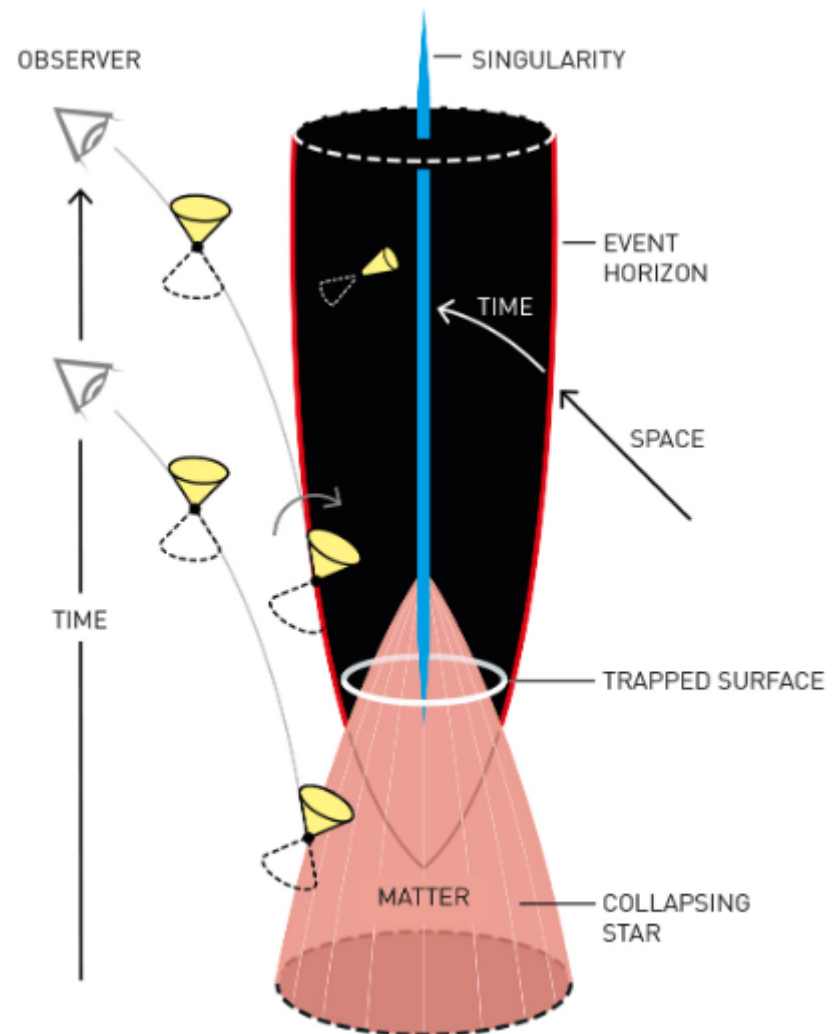
- masa – przestrzeń – czas
- Schwarzschild: jak opisać czasoprzestrzeń wokół sferycznie symetrycznej, nierotującej masy?
 - -> dwie „osobliwości”:
 - $r=0$ (zerowy promień)
 - $r=2GM/c^2$
 - dyskusja: czy ta osobliwość ma jakieś fizyczne znaczenie? Czy to tylko „artefakt”?
 - 1939 Robert Oppenheimer & Hartland Snyder: r jako „horyzont zdarzeń”
 - promień, przy którym gwiazda „zamyka się przed zewnętrznym obserwatorem”, dla którego istnieje już tylko jako źródło pola grawitacyjnego
 - Dyskusja: sytuacja niefizyczna, nie ma obiektów idealnie sferycznie symetrycznych!

Czy czarna dziura może istnieć, czy jest tylko sztucznym tworem matematycznym?

- 1964: Jewgienij Lifszyc i Izaak Chałatnikow - „zamknięta gwiazda” Oppenheimera i Snydera nie może zaistnieć w realnym świecie
- **1965: Roger Penrose : sferyczna symetria nie jest niezbędna, żeby zaistniała osobliwość!**

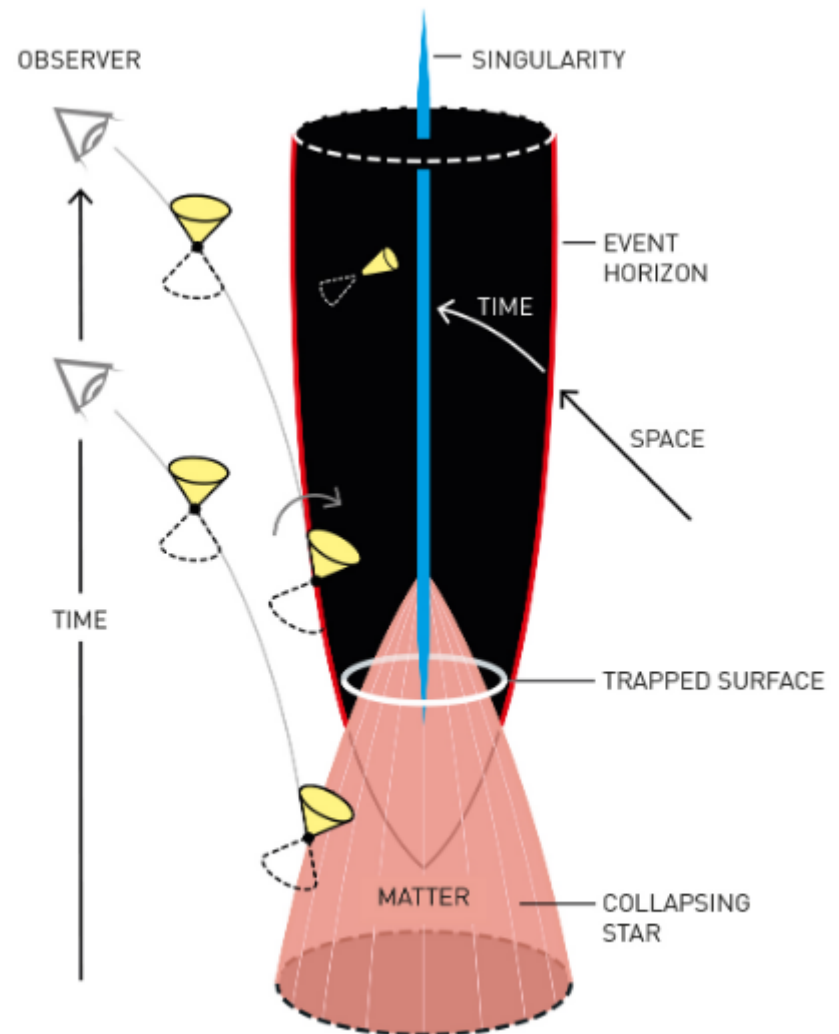
Czy czarna dziura może istnieć, czy jest tylko sztucznym tworem matematycznym?

- **1965: Roger Penrose :**
sferyczna symetria
nie jest niezbędna,
żeby zaistniała
osobliwość!



Czy czarna dziura może istnieć, czy jest tylko sztucznym tworem matematycznym?

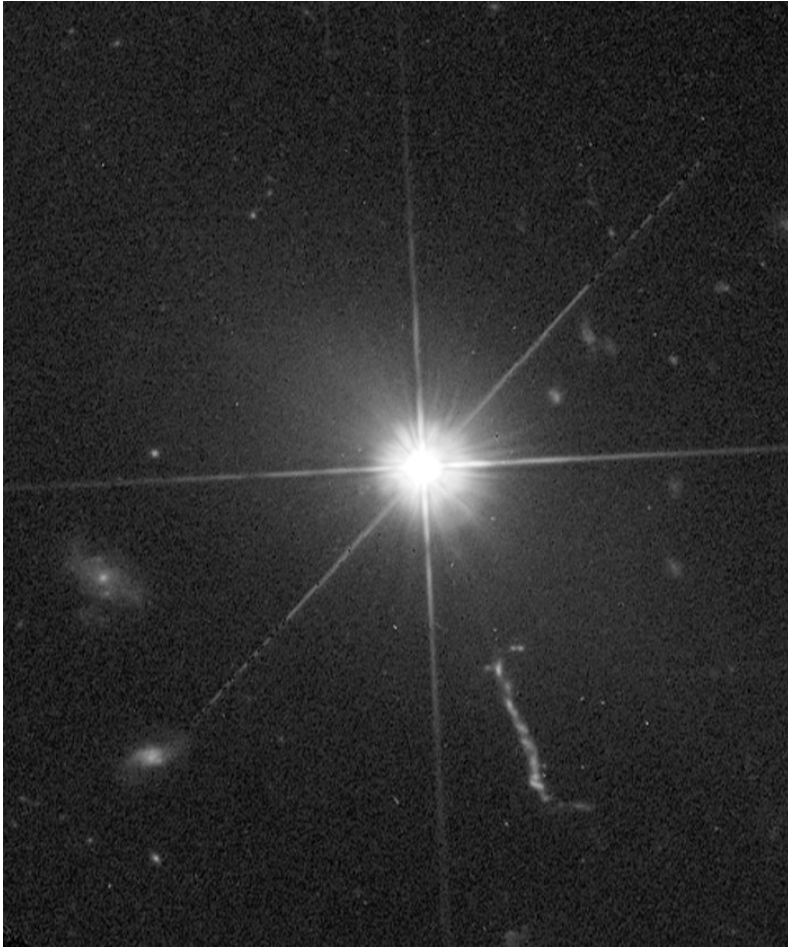
- **1965: Roger Penrose :**
sferyczna symetria
nie jest niezbędna,
żeby zaistniała
osobliwość!
- -> „Czarne dziury”
(Robert Dicke 1960)
mogą i powinny
istnieć w
rzeczywistości.



**Ale czy czarne dziury naprawdę
istnieją
i jeśli tak, to gdzie ich szukać?**

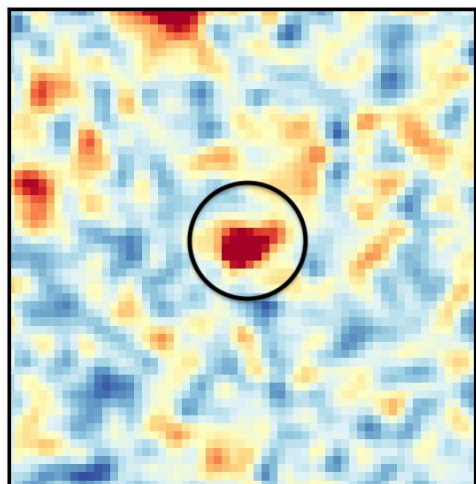
Supermasywne czarne dziury

Gwiazda czy nie gwiazda?



- Lata 1960': niby-gwiazda, ale jakaś dziwna...
- 1963 odkrycie pierwszego kwazara
(QSO 3C 273
– 2.4 mld lat świetlnych od nas)
- ...a wkrótce potem wielu innych

Kwazar: gwiazda czy nie gwiazda?

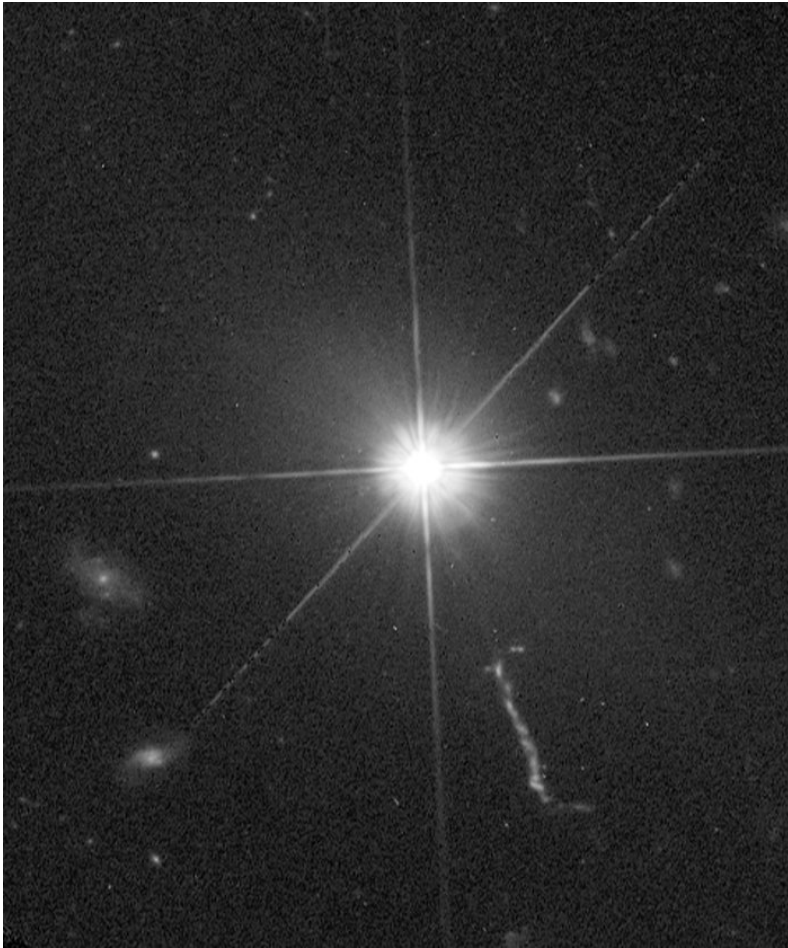


**J0313–1806 – najdalszy
znany kwazar (styczeń
2021)**

**– istniał już niecałe 700
mln lat po początku
Wszechświata**

- Bardzo daleko (miliardy lat świetlnych!) - muszą być niesamowicie jasne.
- W dalekim/dawnym Wszechświecie jest ich więcej niż blisko nas

Kwazar: gwiazda czy nie gwiazda?



- Szybka zmienność – muszą być bardzo małe
- Bardzo daleko (miliardy lat świetlnych!) - muszą być niesamowicie jasne
- Bardzo małe i bardzo jasne – co może tak świecić?
- Supermasywne gwiazdy? Miliony razy masywniejsze od Słońca? Taka gwiazda nie może istnieć...

- Bardzo małe i bardzo jasne – co to może być?

...

...

...

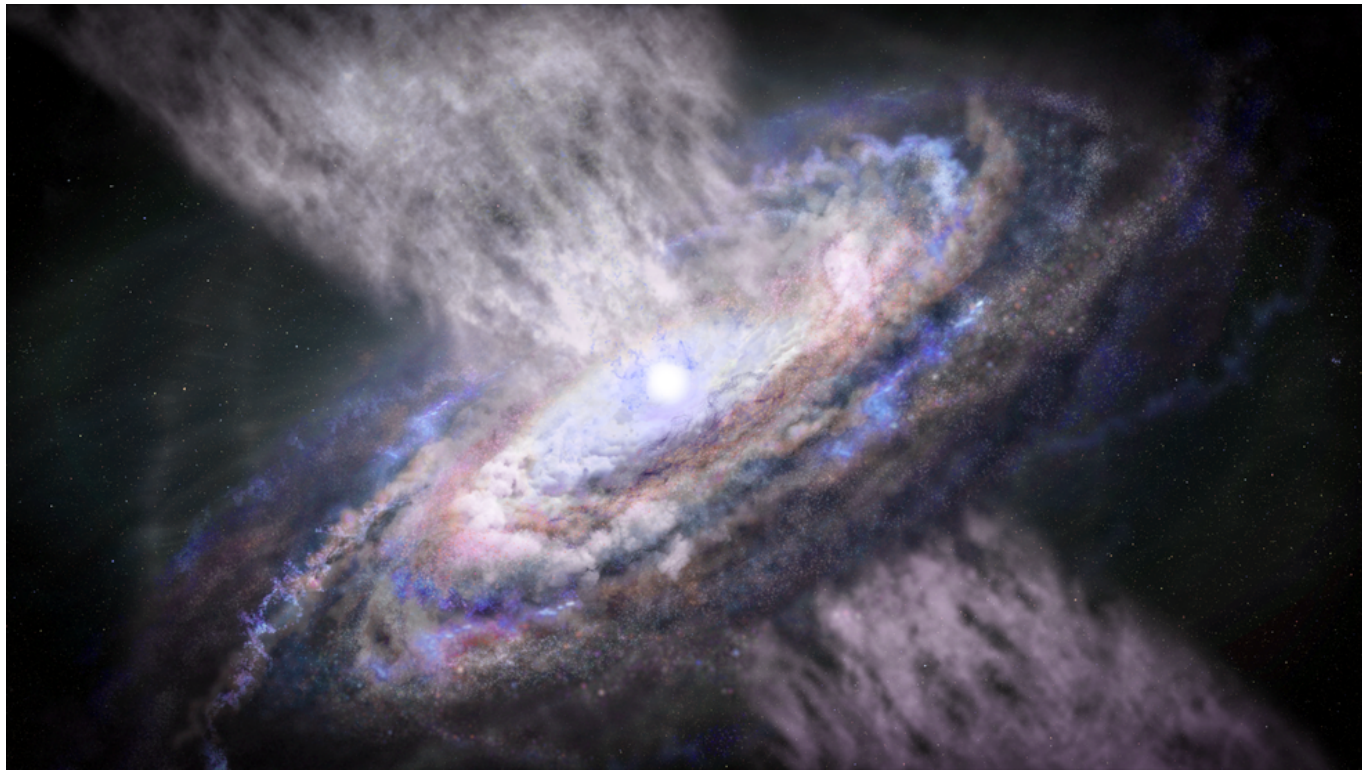
...

...

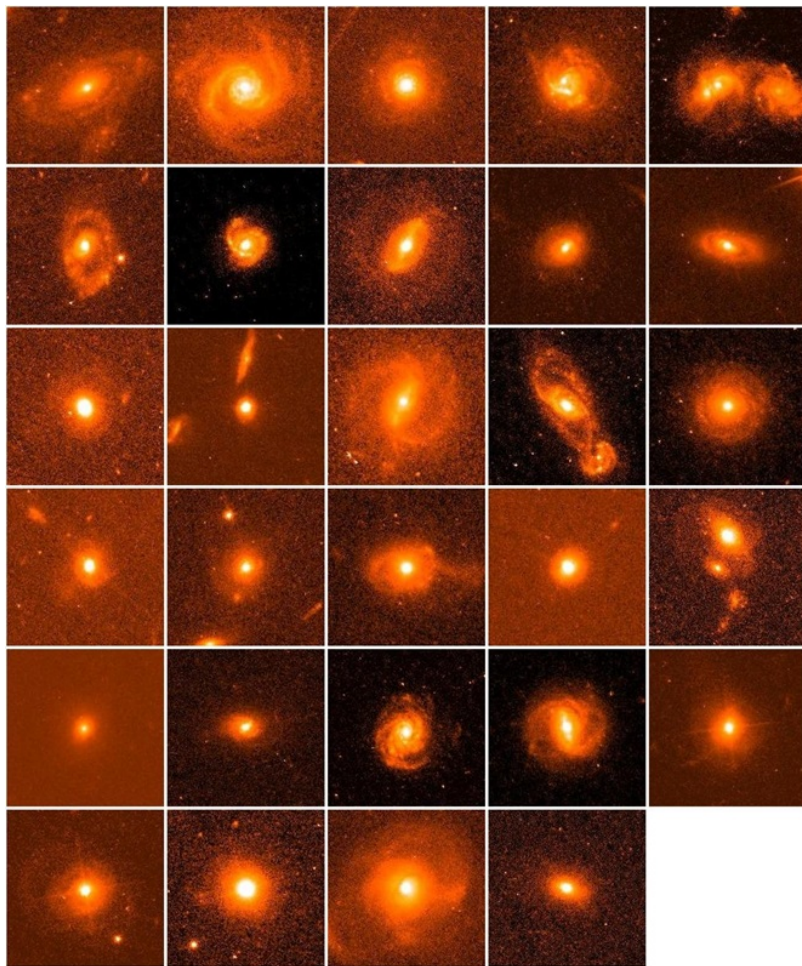
...

- Czarna dziura!

Credit: STScI

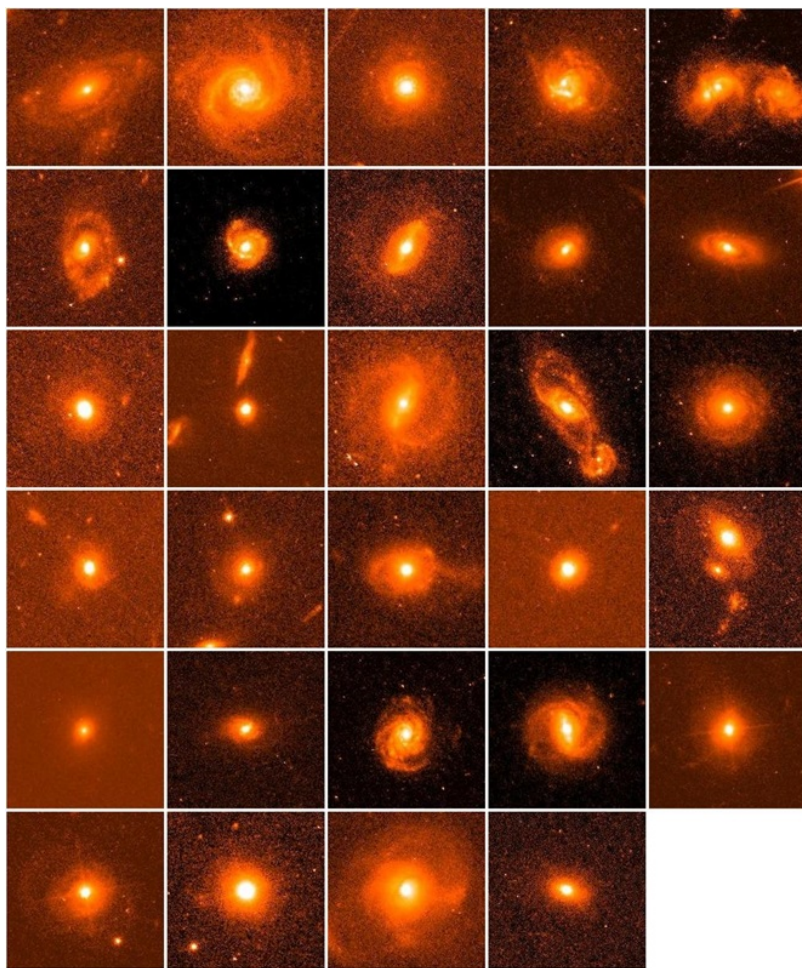


Co jest wokół kwazara?



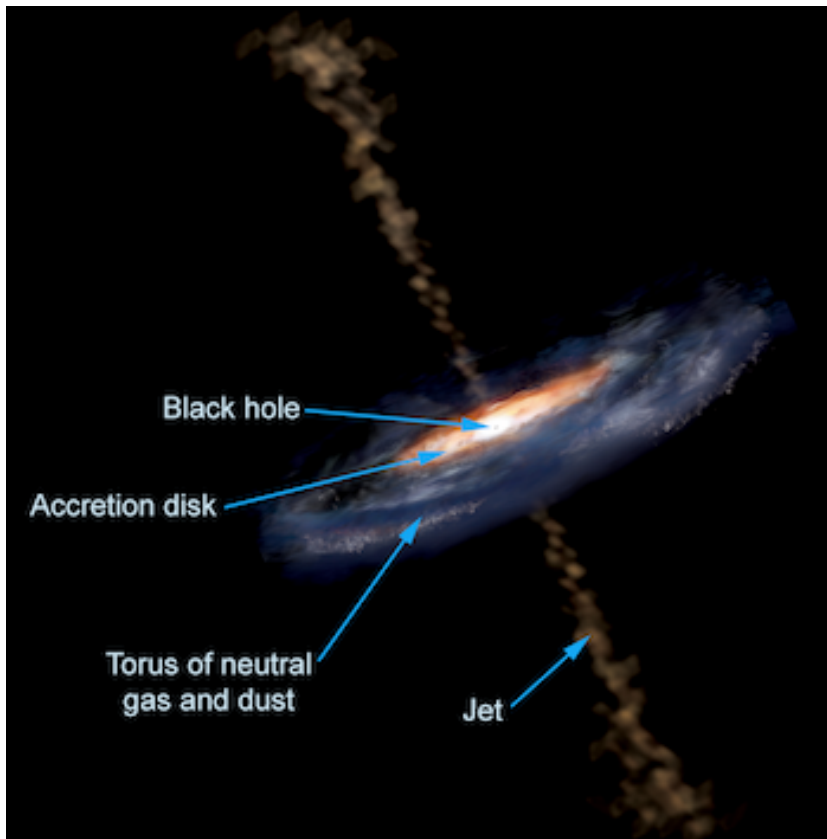
- Dość wcześnie zauważono, że kwazary często otaczają „chmurki”
- Podejrzewano, że kwazary znajdują się w odległych galaktykach
- ...ale dopiero w latach 1980' udało się potwierdzić, że te słabo widoczne „otoczki” to tak naprawdę galaktyki

Co jest wokół kwazara?



- 1969: Donald Lynden-Bell: większość galaktyk może mieć w centrum supermasywną czarną dziurę (tylko niekoniecznie zawsze aktywną)

Kwazar – nie tyle jest, ile się zdarza...



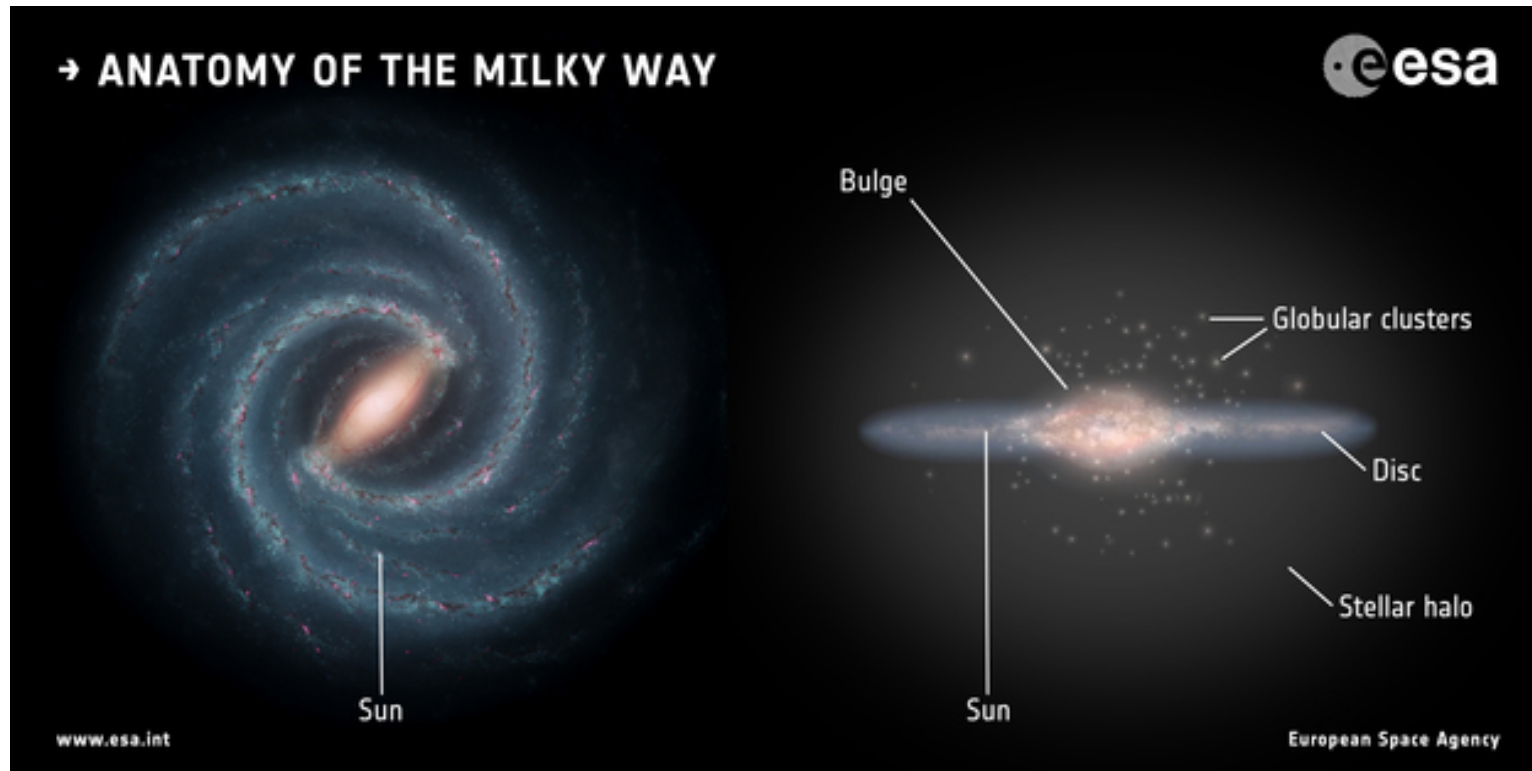
- Dziś wiemy, że kwazar w galaktyce może się włączać i wyłączać (czasem wielokrotnie)
- Zjawisko trwa krótko - od ok. 1 mln do 100 mln lat
- Włączenie następuje, kiedy w okolicy czarnej dziury dostaje się nowa spora porcja materii
- ...a potem czarna dziura zasypia...

Kwazar w Drodze Mlecznej?

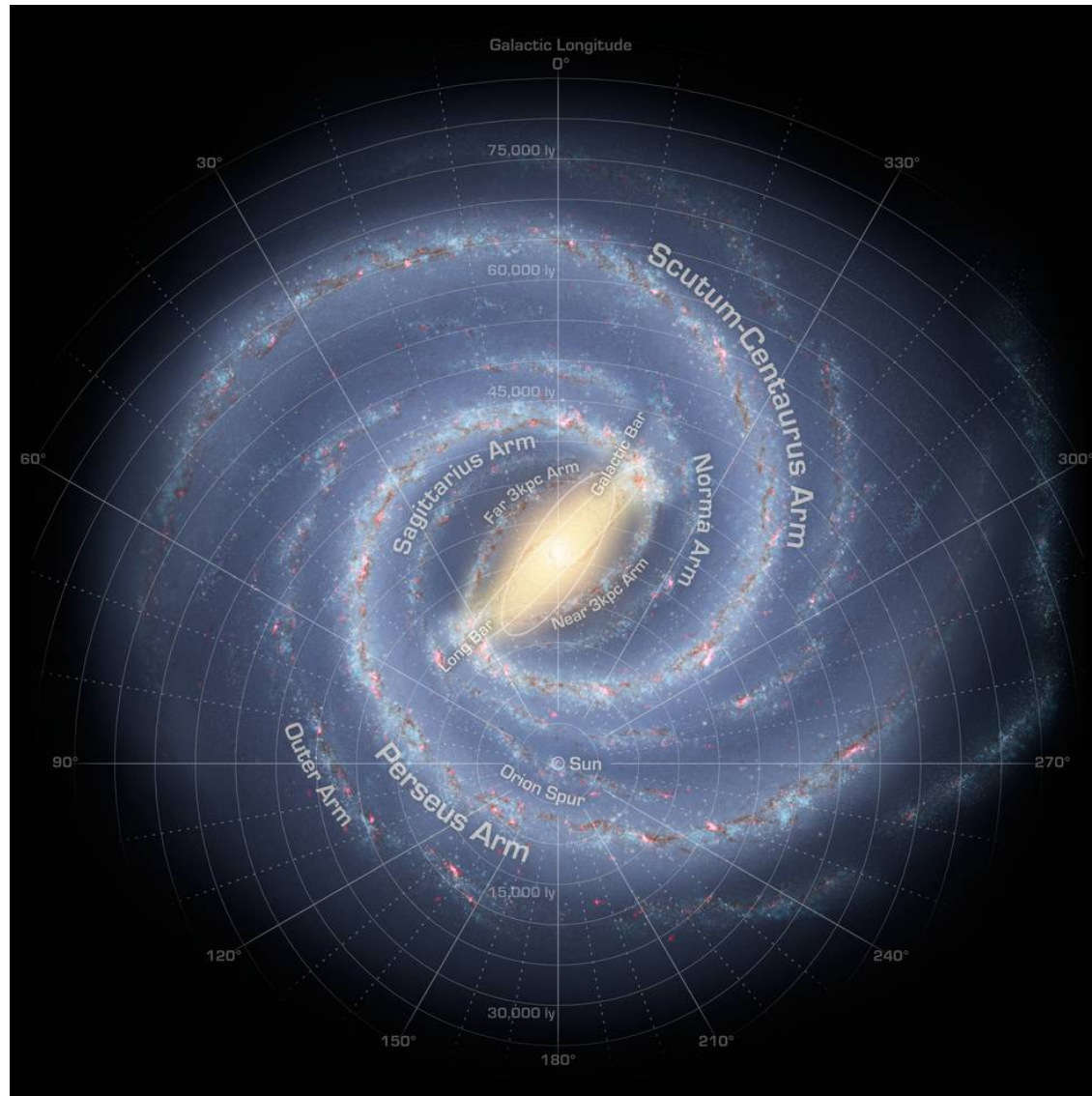
- 1971 Donald Lynden Bell and Martin Rees: supermasywna czarna dziura powinna „spać” także w centrum Drogi Mlecznej (i innych podobnych galaktyk)
- 1980: Andrzej Sołtan - „argument Sołtana” - liczbę odległych kwazarów da się powiązać z liczbą dzisiejszych galaktyk, zakładając, że w każdej „śpi” niegdyś aktywny kwazar



Droga Mleczna – ze środka wcale nie widać lepiej!



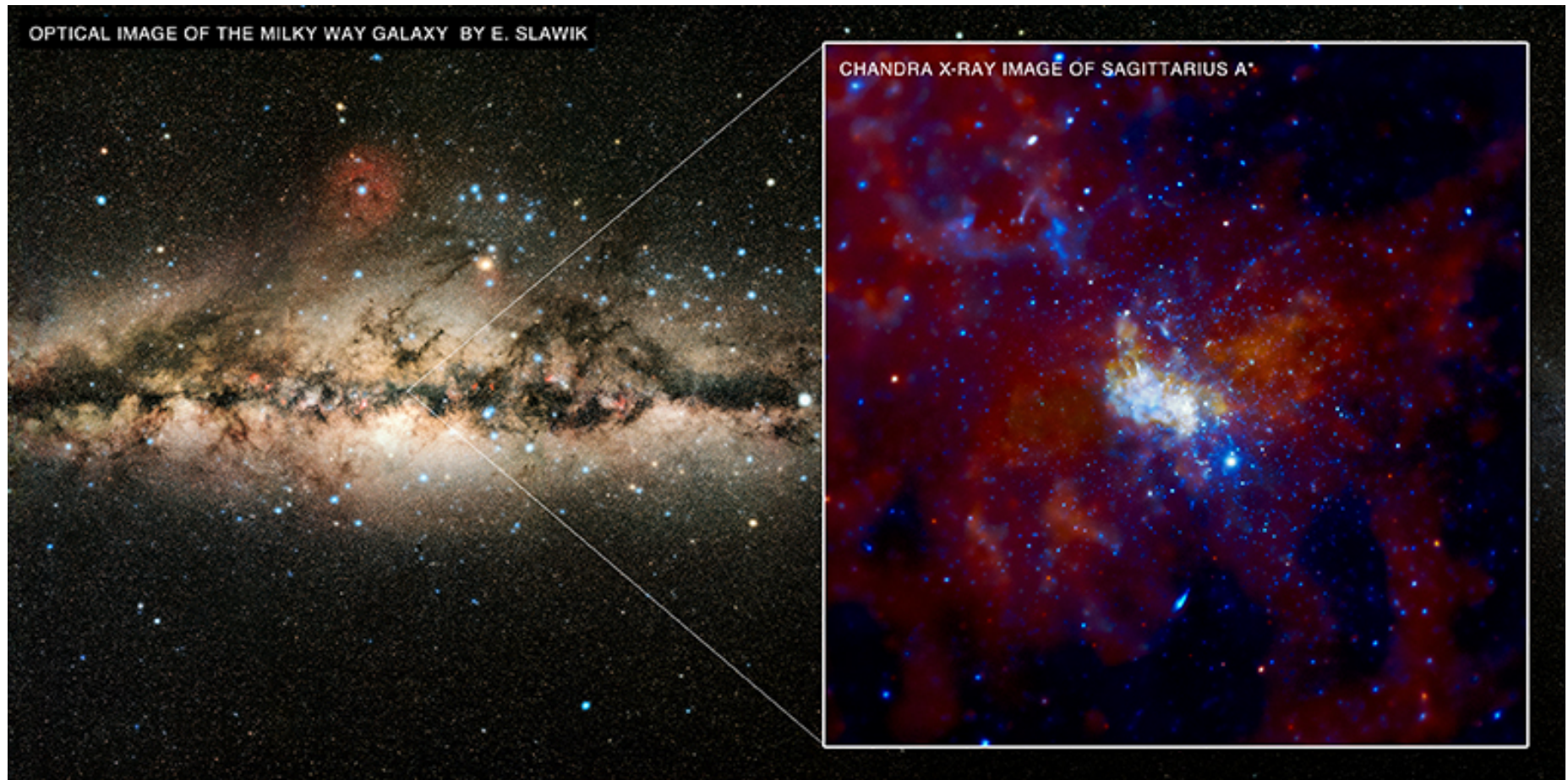
Droga Mleczna – ze środka wcale nie widać lepiej!



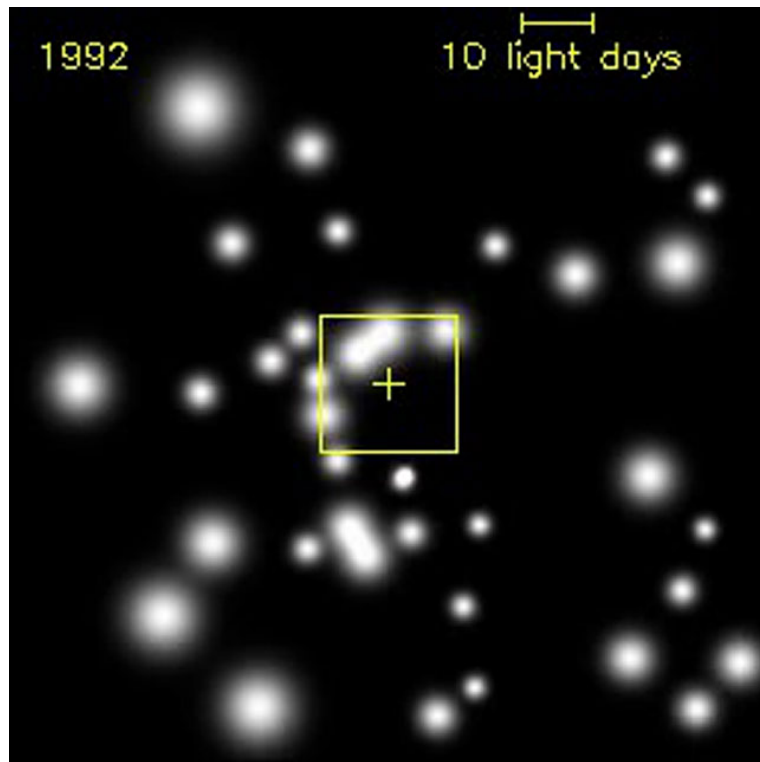
Centrum Drogi Mlecznej

- Sagittarius A (Sgr A)
- 1950': silne źródło radiowe
- 1960: chyba w samym środku Drogi Mlecznej...
- 1968: widoczne też w podczerwieni
- 1974: to radioźródło jest nie większe niż dzień świetlny (Bruce Balick and Robert Brown)
- -> 1980' centrum tego obszaru zyskało nazwę Sgr A* (Robert Brown)
 - „exciting” radio source (ekscytujące, ale też będące źródłem promieniowania pochodzącym od wzbudzonych atomów)
- ...
- Lata 1990': promieniowanie X

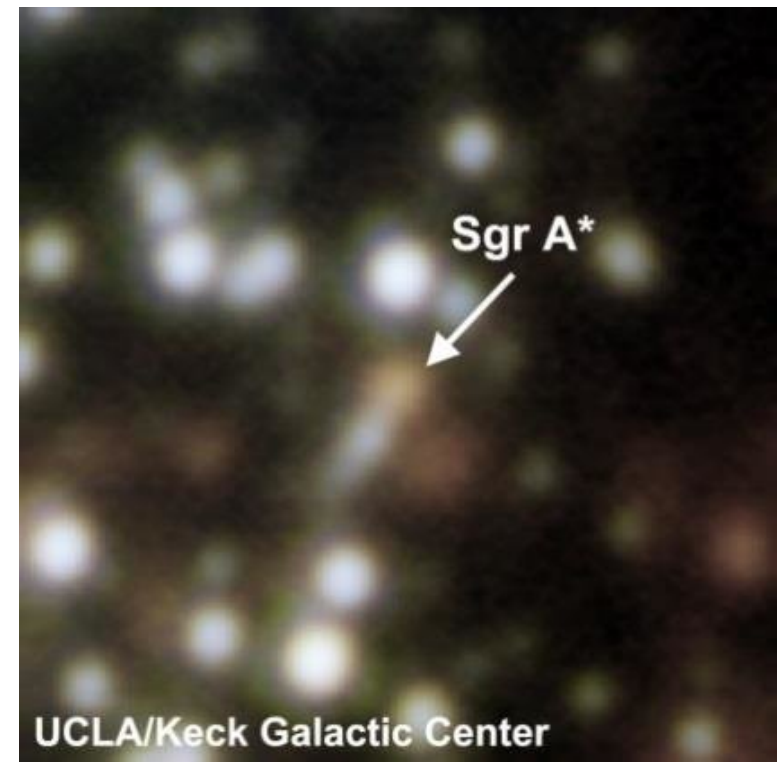
Centrum Drogi Mlecznej



1992, 1995: pierwsze zdjęcia „wysokiej rozdzielczości” gwiazd wokół Sgr A*

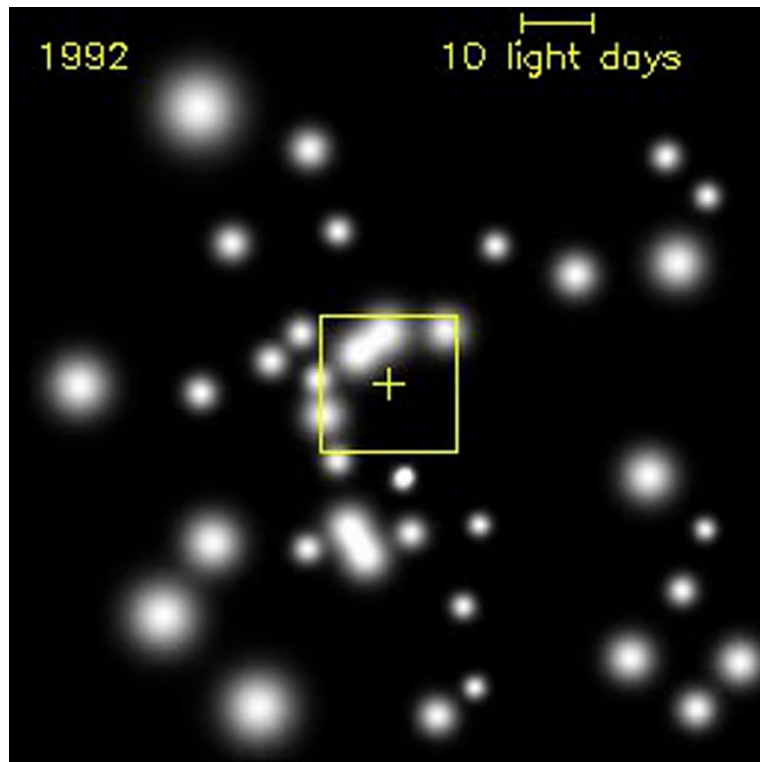


NTT (ESO) – grupa R.
Genzela



KECK (US) – Grupa
Andrei Ghez

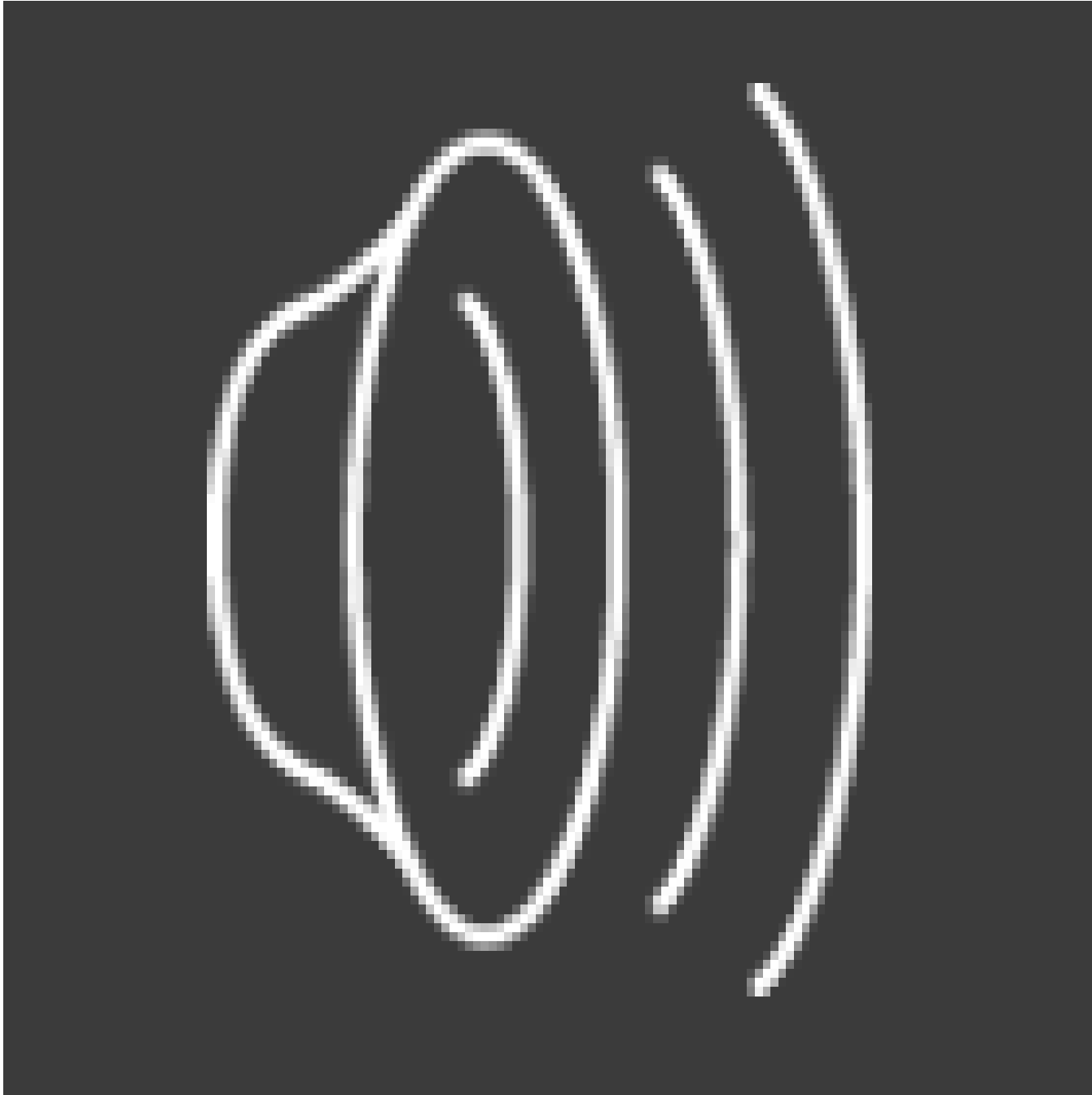
1992, 1995: pierwsze zdjęcia „wysokiej rozdzielczości” gwiazd wokół Sgr A*



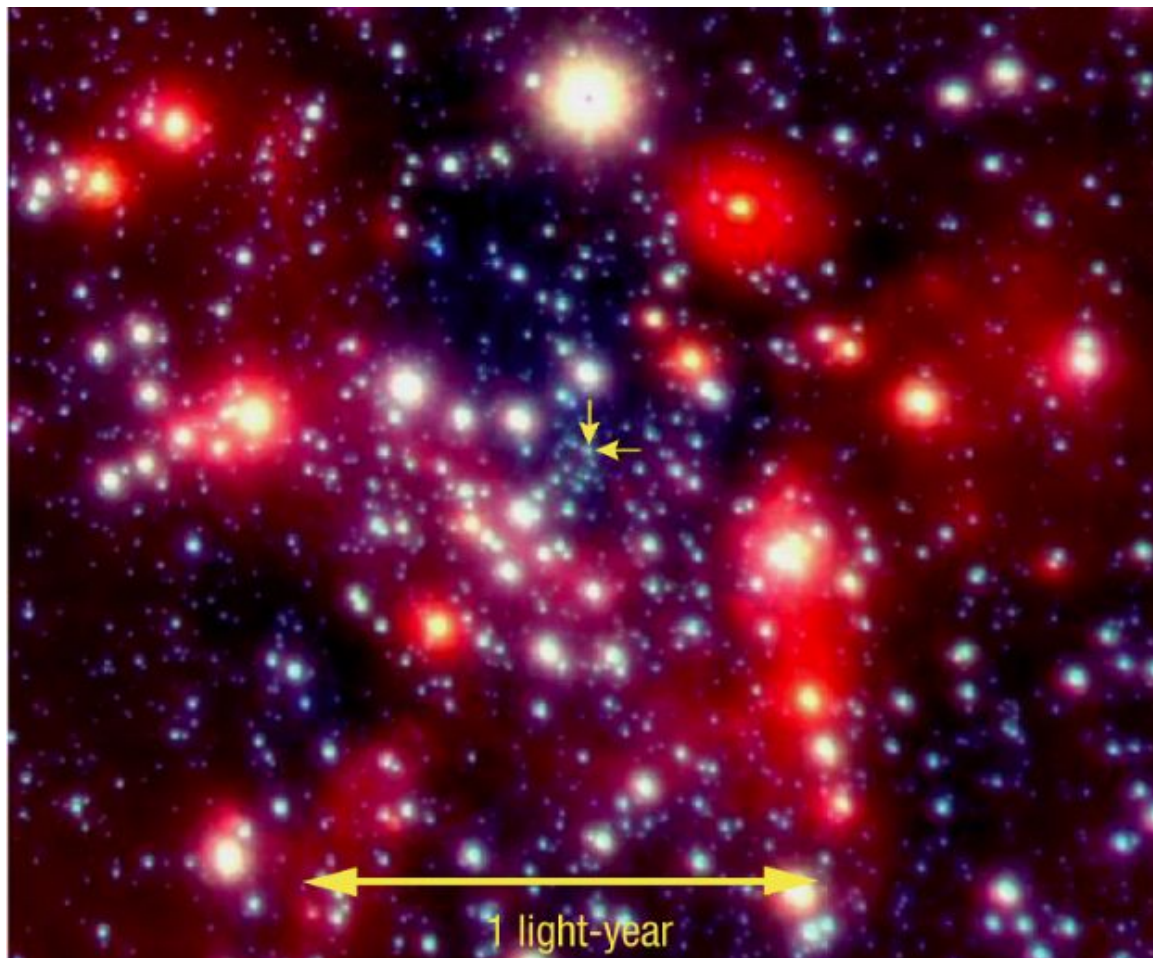
NTT (ESO) – grupa R.
Genzela

- 1992: pierwsze zdjęcie centrum Drogi Mlecznej w dobrej rozdzielczości
- 1995-1997 Eckhart & Genzel; 1998; Ghez: masywny gęsty obiekt wymusza szybkie poruszanie się gwiazd w centrum Drogi Mlecznej
- 1998: Michał Jaroszyński i Bohdan Paczyński: monitoring tych gwiazd w celu pomiaru masy czarnej dziury?
- Od 2000: obie grupy regularnie publikują wyniki takiego monitoringu...

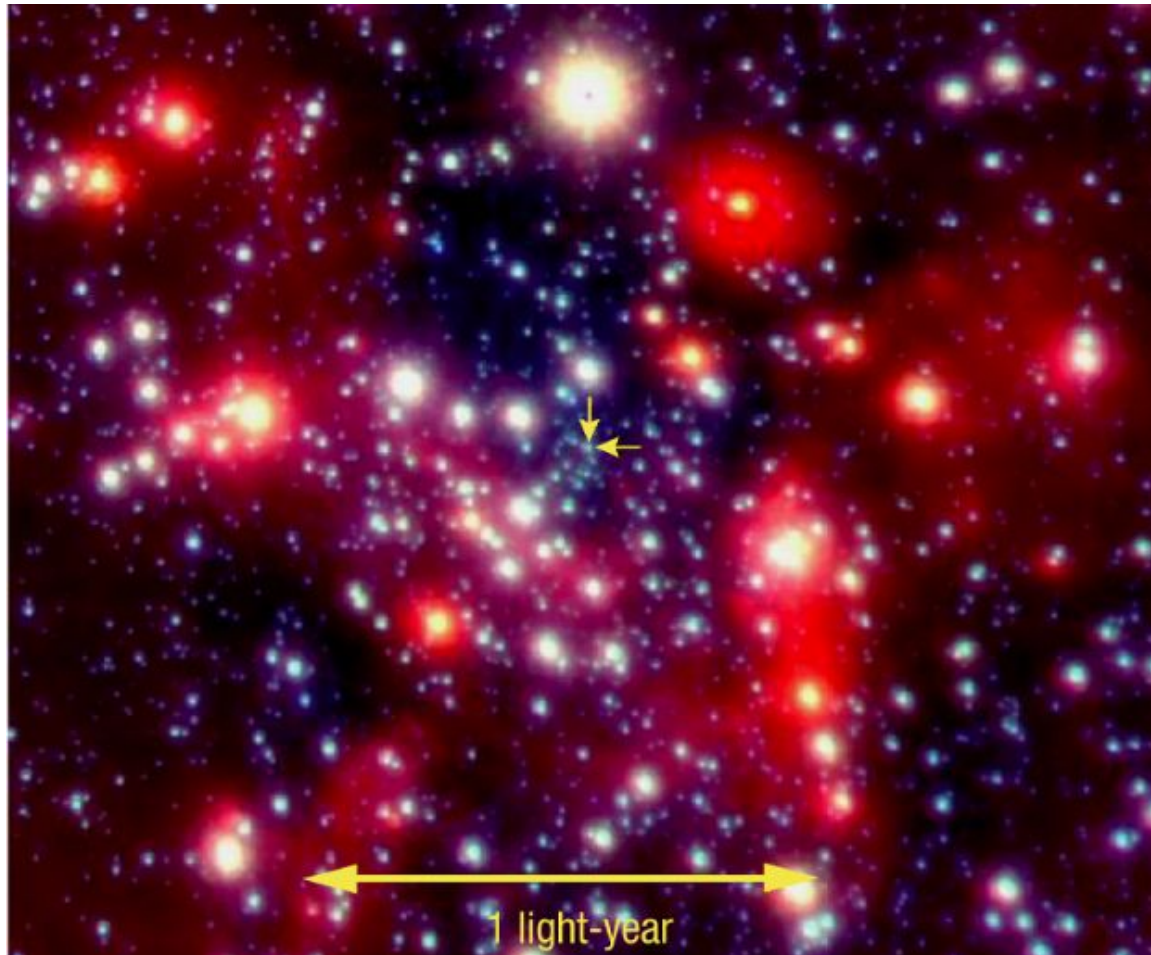
https://youtu.be/n0s_DcsBDck



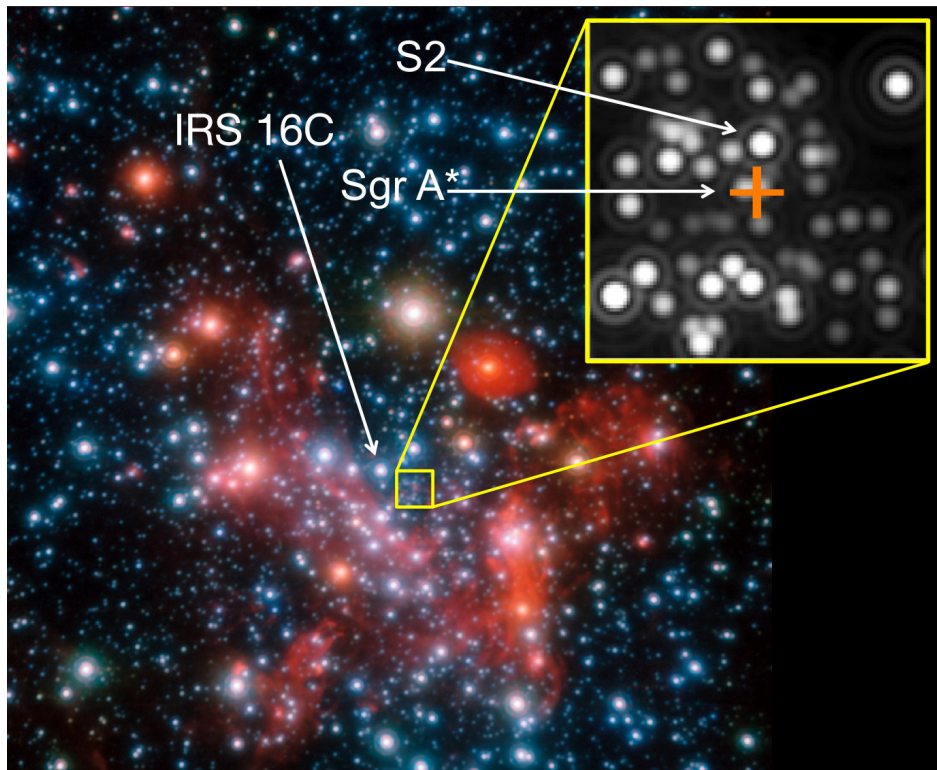
Gwiazda S2/S02



Wbrew pozorom, obecność czarnej dziury nie oznacza żadnej katastrofy dla okolicznych gwiazd – podobnie jak bliskość Słońca nie oznacza katastrofy dla planet czy komet (o ile i nie znajdą się na kursie kolizyjnym)



Gwiazda S2/S02

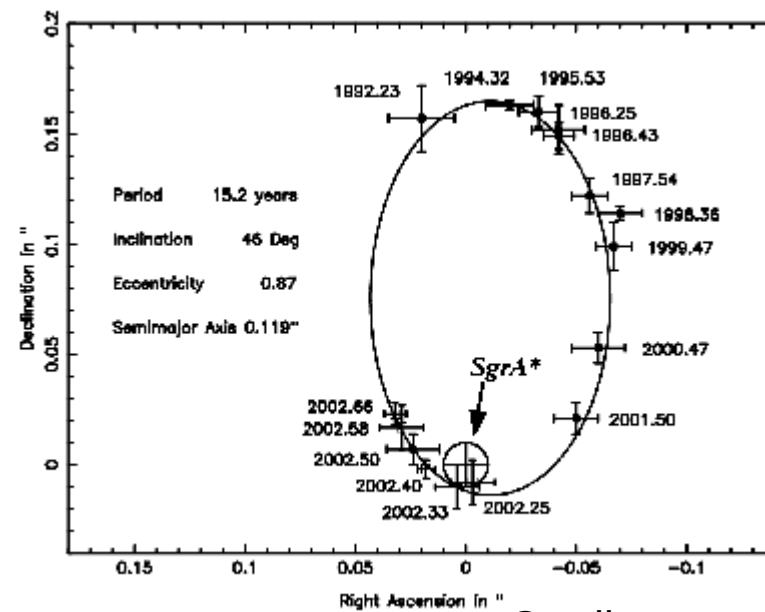


Credit: ESO/MPE/S. Gillessen et al.

- „normalna” gwiazda ok. 14 razy masywniejsza od Słońca
- Okrąża Sgr A* z okresem 16,0518 lat
- Najbliżej podchodzi do Sgr A* na odległość 17 lat świetlnych (~3 razy dalej niż Plutona albo ~4 razy dalej niż Neptun zbliża się do Słońca)

26 lat monitoringu gwiazdy S2/S02

- 2000 Ghez
- 2002 Eckhart
- 2002 Genzel
- 2008 Ghez (dane z teleskopu Keck -> masa obiektu centralnego ~ 4.1 mln mas Słońca)
- 2009 Gillesen (grupa R. Genzela)
- Cała dekada 2010-2020 – coraz dokładniejsze pomiary wykonywane przez obie grup



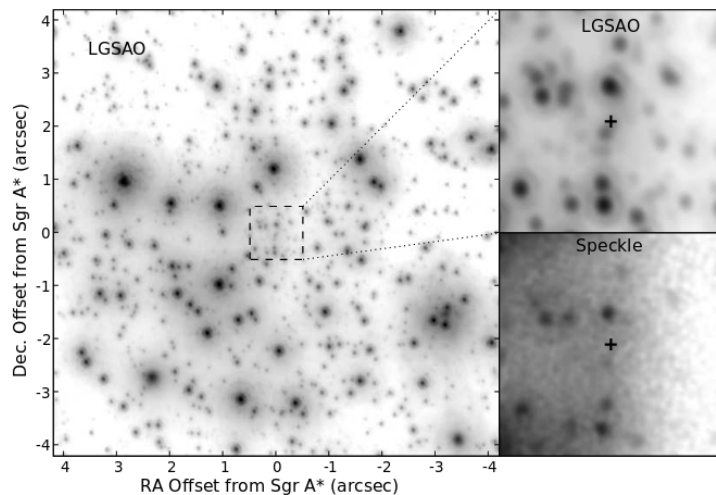
Credit:

Stern 2004

Wyzwania techniczne: centrum Drogi Mlecznej jest zatłoczone i... zakurzone



Wyzwania techniczne: centrum Drogi Mlecznej jest zatłoczone i... zakurzone A my patrzymy przez grubą warstwę atmosfery



Credit: Ghez et al. 2008

- Sposób na kurz: obserwacje w podczerwieni
- Sposób na tłok: instrumenty bardzo wysokiej rozdzielczości (optyka adaptatywna)
- Alternatywnie: obserwacje kosmiczne w podczerwieni (ale to w przyszłości)

Obserwatoria na południowej półkuli

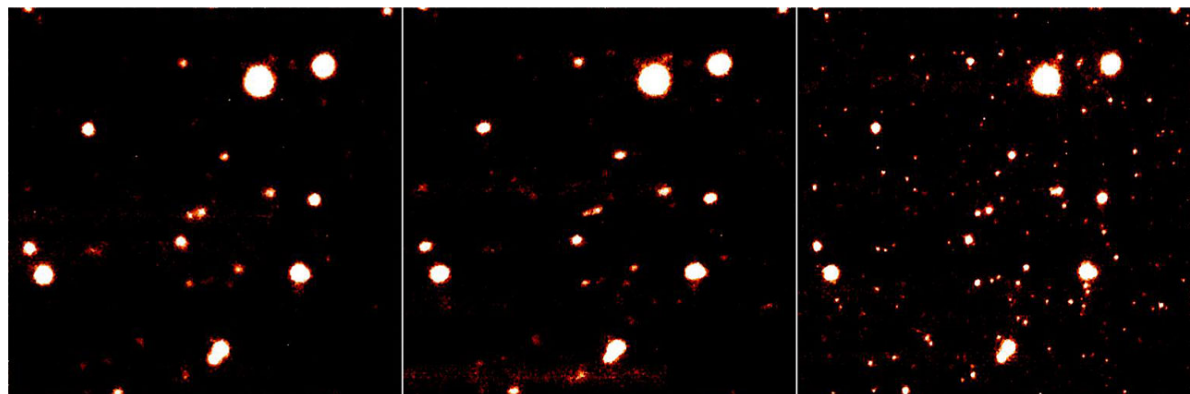
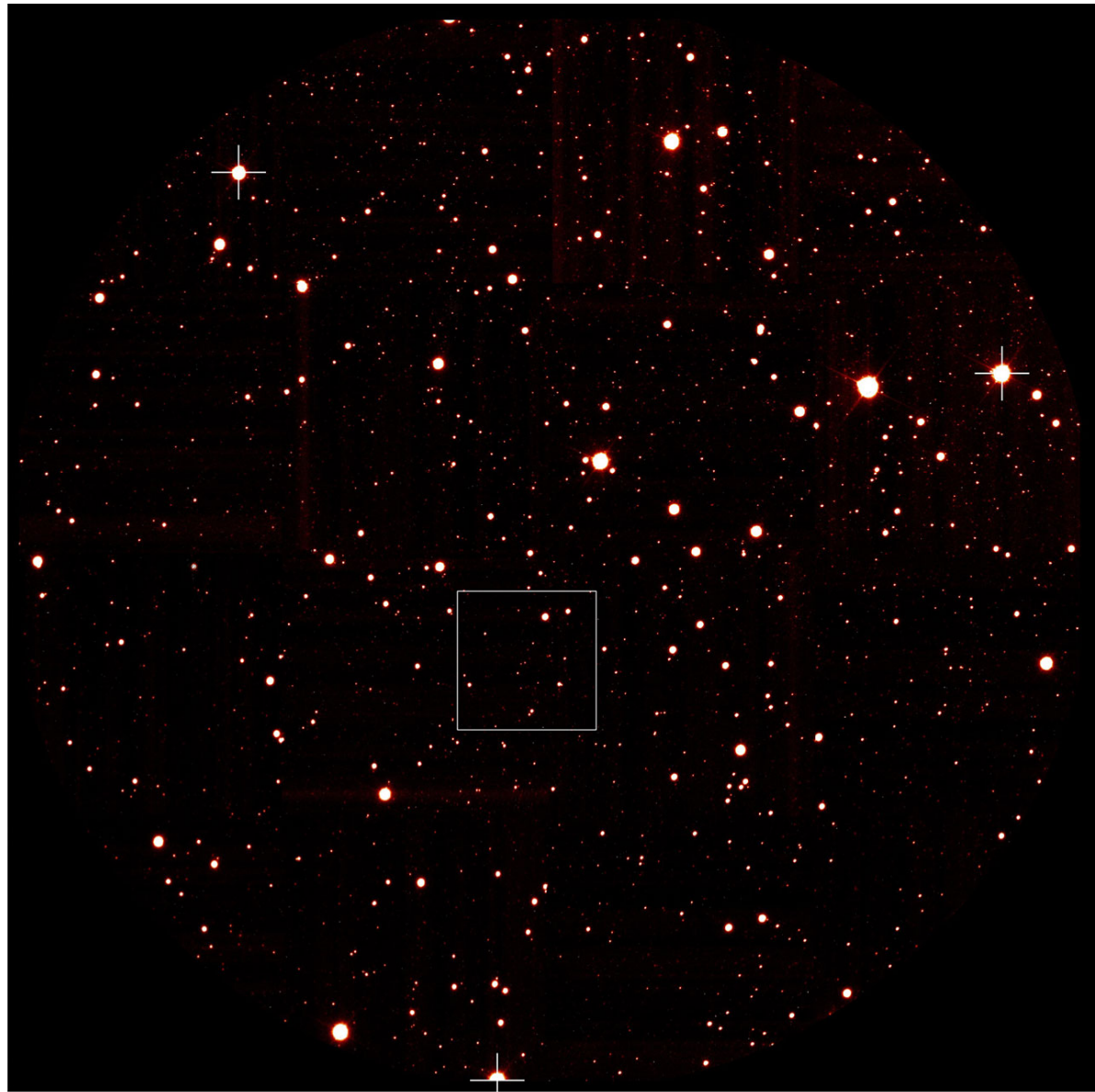
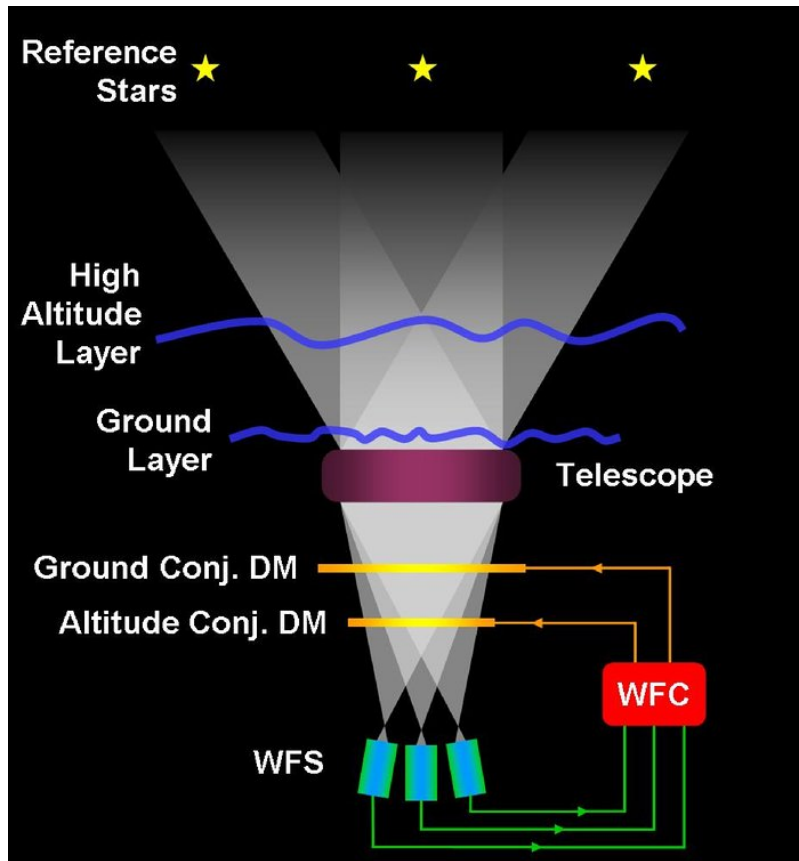


ESO - CHILE

Hawaje – Telescop Kecka



Optyka adaptatywna



Credit: ESO

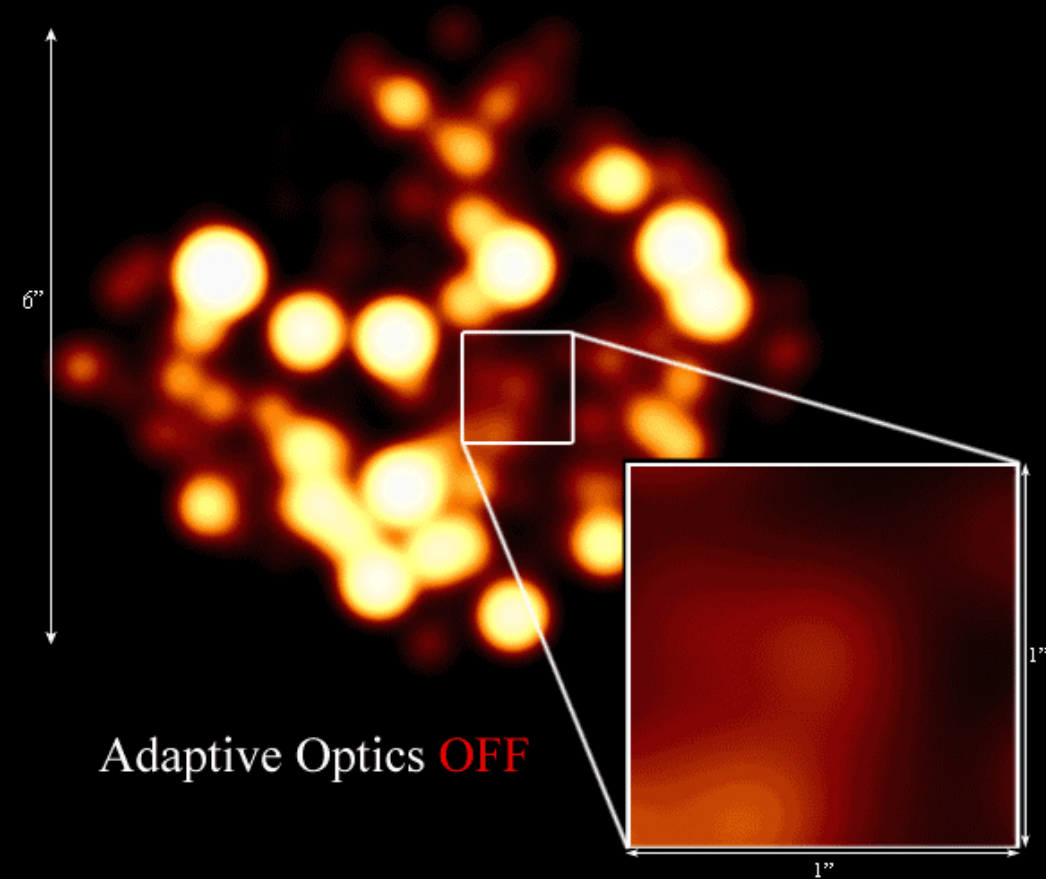
Od 2016: ESO = instrument GRAVITY

- Cztery kanały,
2-2,4 μm
- Wysokorozdzielczy
instrument do
obrazowania w
wysokiej
rozdzielczości
- Zainstalowany na
VLT w ESO w 2015
(i może korzystać
ze wszystkich
teleskopów na raz)

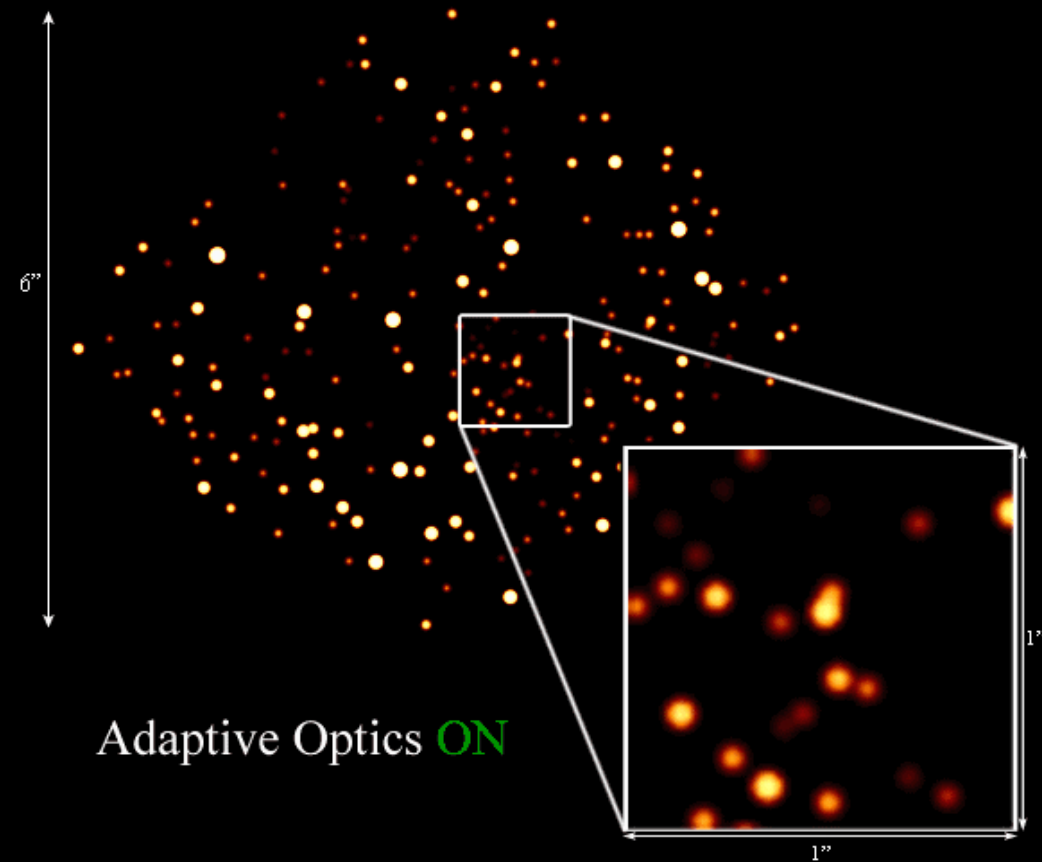


Keck: optyka adaptacyjna

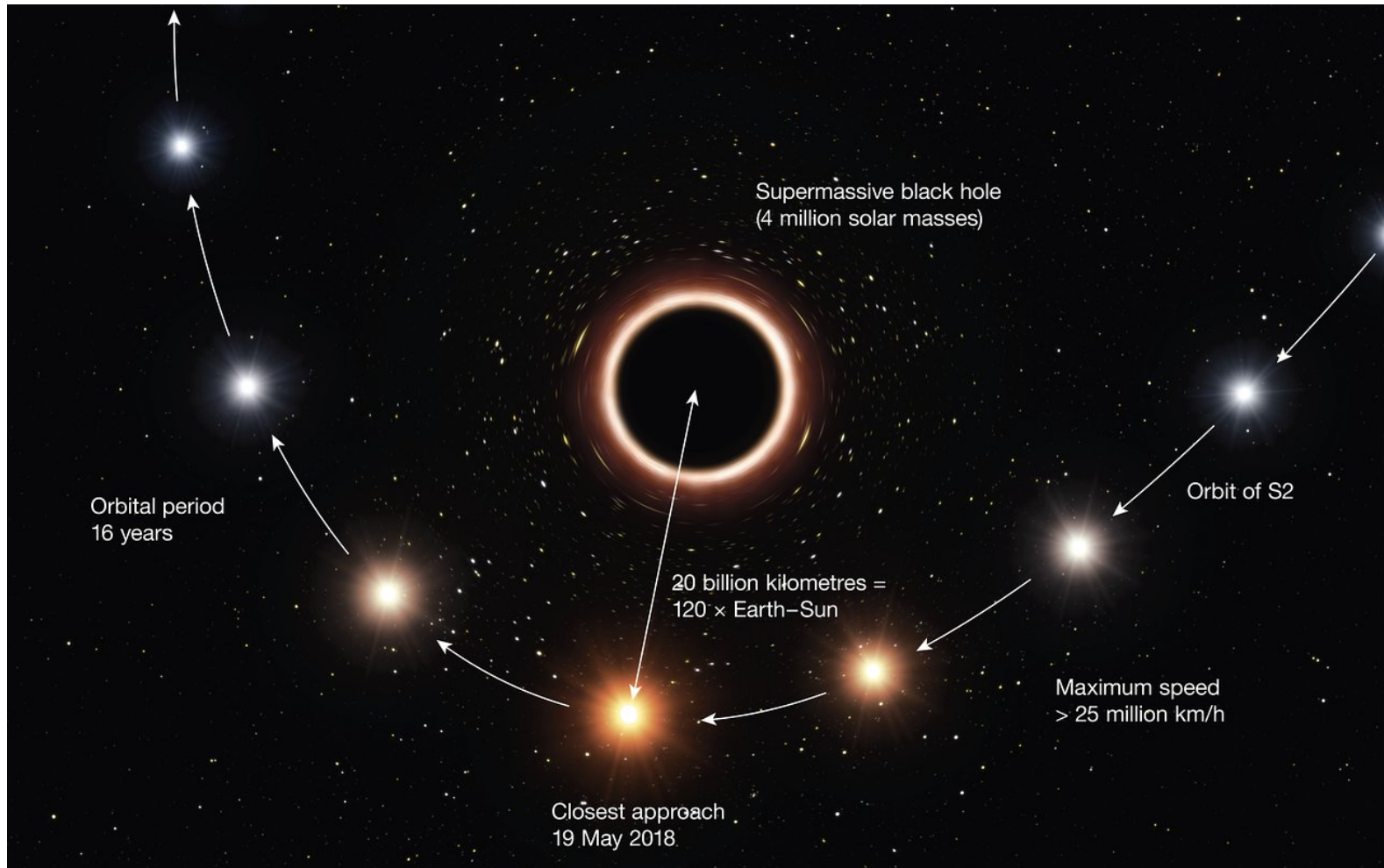
The Galactic Center at 2.2 microns



The Galactic Center at 2.2 microns

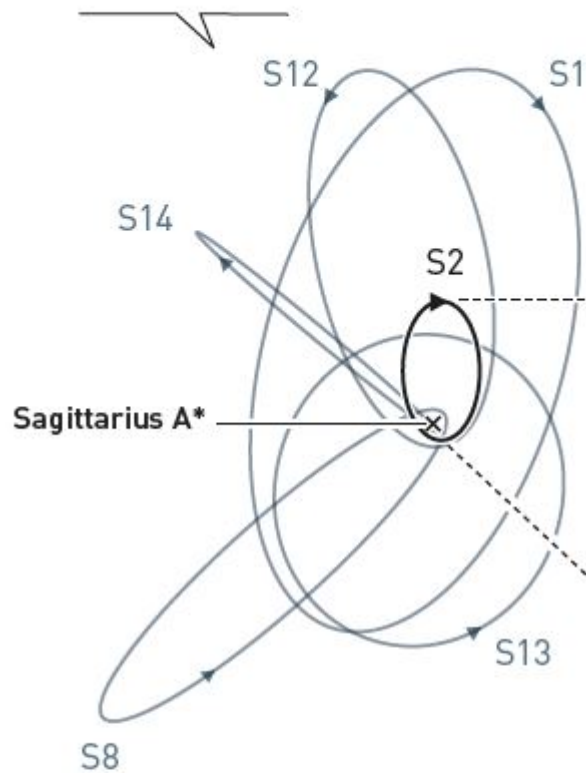


2018: GRAVITY (Genzel) i KECK/UCLA Galactic Center Group (Ghez) obserwują przejście gwiazdy S2 blisko (120 j.a. = 1400 promieni Schwarzschild) supermasywnej czarnej dziury

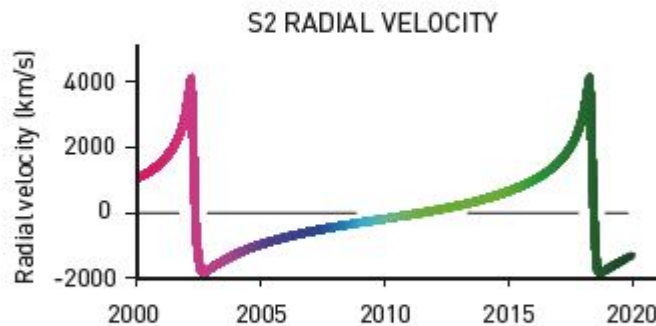
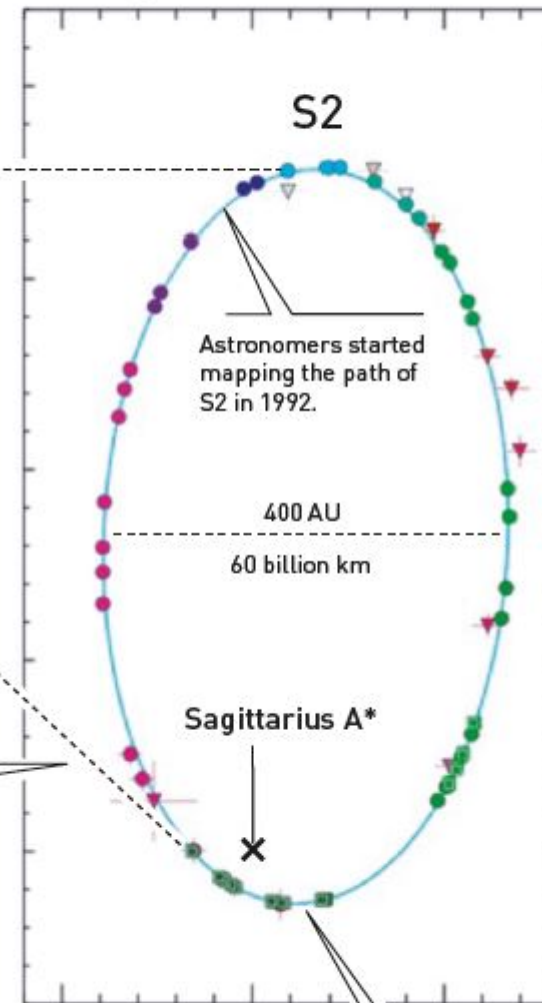


Credit: ESO/M. Kornmesser

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



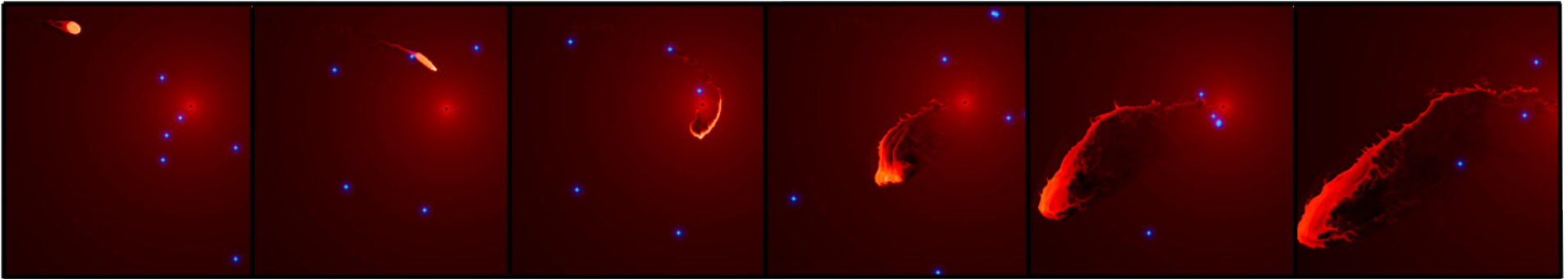
Astronomers were able to map an entire orbit of less than 16 years for one of the stars, S2 (or S-02). The closest it came to Sagittarius A* was about 17 light hours (more than 10,000 million kilometres).



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.

Obłok G2



Credit: MPE, Gillesen et al. 2011

- W 2011 odkryto obłok materii, który okrąży centrum Galaktyki, zbliżając się do niego na 25 mln km
- Prędkość sięga 10 milionów km/h
- Atmosfera rozerwanej gwiazdy w trakcie „spagetyfikacji” przez pochłonięciem przez czarną dziurę?

Podsumowanie

- W centrum naszej Galaktyki znajduje się skoncentrowana w małym obszarze masa ~ 4 milionom mas Słońca
- Gwiazda S2/S02 krąży wokół tego centrum, zbliżając się na odległość 125 jednostek astronomicznych (~ 190 mln km).
- To oznacza, że obiekt centralny ma gęstość co najmniej of 5×10^{15} (biliard) mas Słońca na parsek sześcienny.
- Centrum tej masy pokrywa się z dokładnością ± 2 milisekundy łuku z położeniem radioźródła Sgr A*, które samo ma rozmiar < 1 j.a. (1.5 mld km)
- ...i nie wydaje się poruszać
- -> takie źródło spełnia wszelkie warunki, żeby być supermasywną czarną dziurą
- -> nie znamy lepszego wyjaśnienia natury takiego źródła, niż czarna dziura

Podsumowanie

- 1/2 nagrody: Roger Penrose – teoretyczne wykazanie, że czarne dziury mogą istnieć i że są realną konsekwencją ogólnej teorii względności
- 1/2 nagrody Andrea Ghez i Reinhard Genzel: technika i cierpliwość -> pokazanie, że obiekt w centrum Drogi Mlecznej jest czarną dziurą

„Cień czarnej dziury”

- Event Horizon Telescope



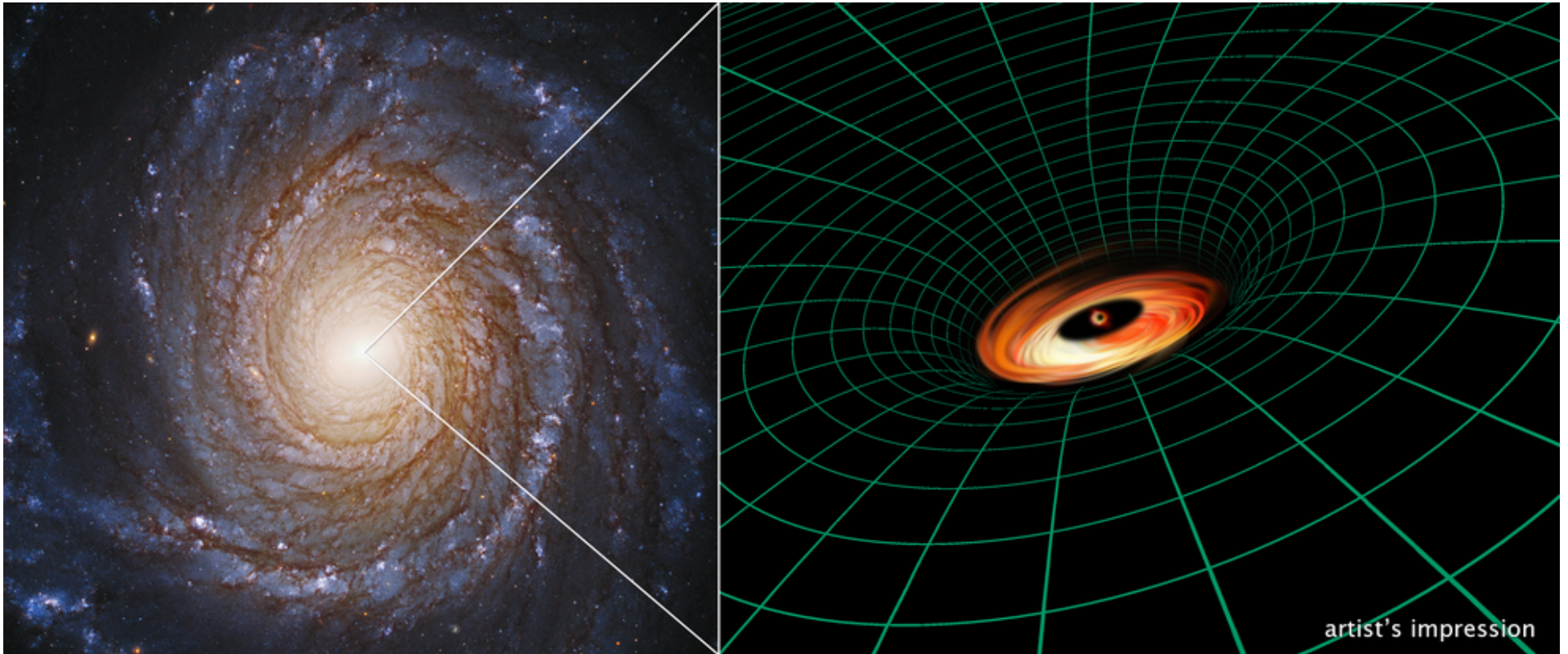
„Cień czarnej dziury” - Event Horizon Telescope

- Czarna dziura w galaktyce M87
- 6,5 mln mas Słońca
- 55 mln lat świetlnych od nas



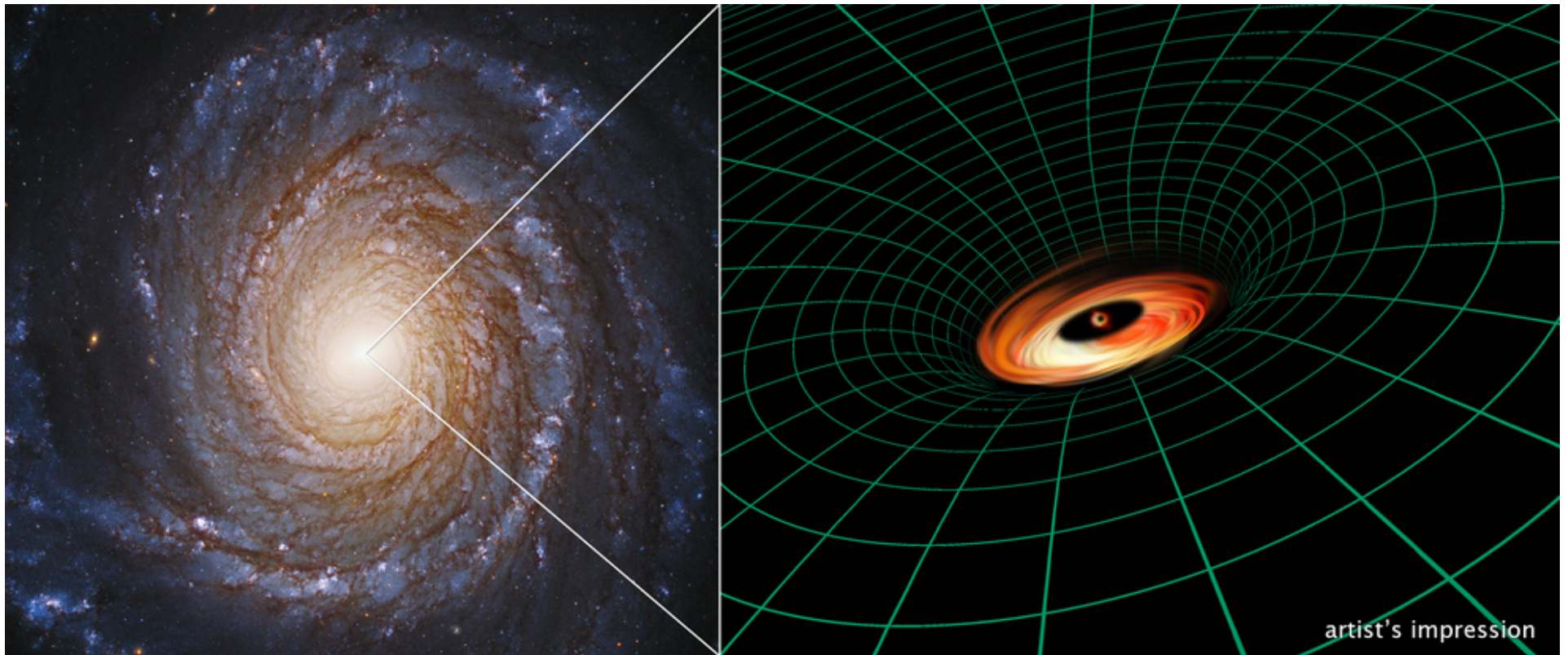
Źródło: ESO

Dzisiaj: wiemy, że niemal każda duża galaktyka ma w centrum supermasywną czarną dziurę

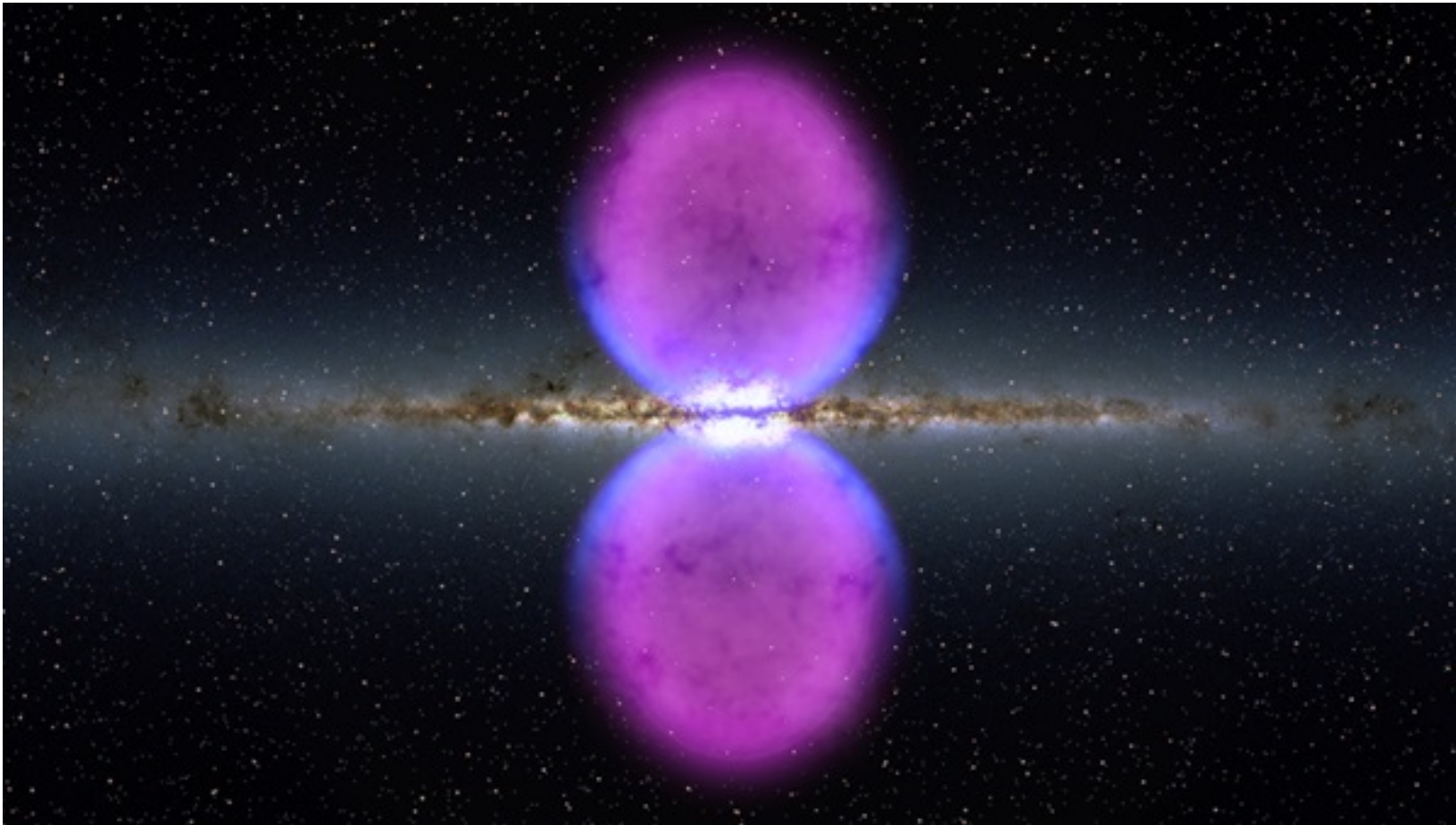


Credits: Hubble Image: NASA, ESA, S. Bianchi (Università degli Studi Roma Tre University), A. Laor (Technion-Israel Institute of Technology), and M. Chiaberge (ESA, STScI, and JHU); illustration: NASA, ESA, and A. Feild and L. Hustak (STScI)

Nie wszystkie są aktywne: szczyt aktywności kwazarów miał miejsce ok. 10 mld lat temu



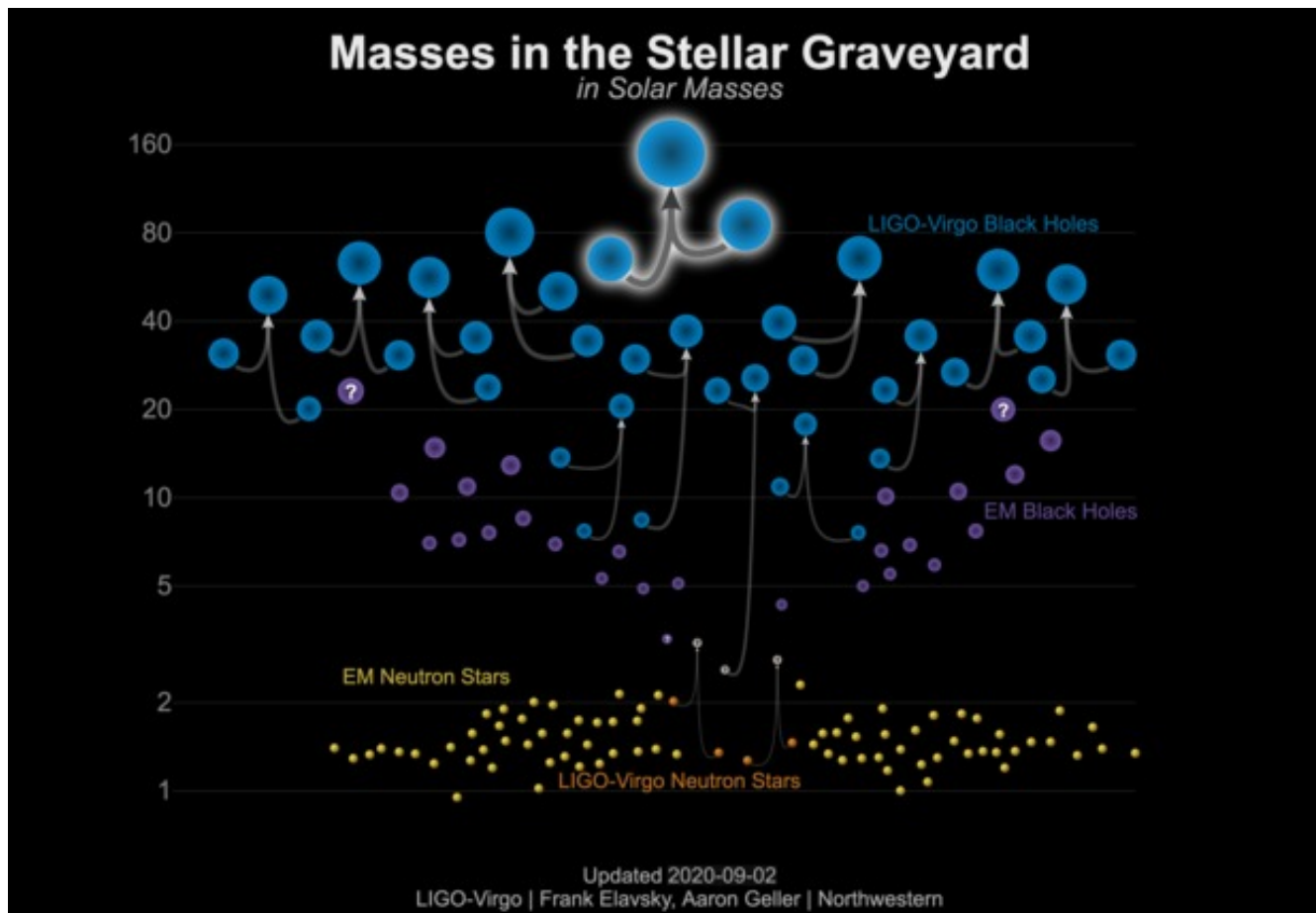
Ale i Drodze Mlecznej całkiem
niedawno zdarzały się epizody
aktywności: bąble Fermiego – 6 do
9 mln lat temu



Typy czarnych dziur

- Supermasywne czarne dziury w centrach galaktyk: 100 000 do 1 000 000 000 mas Słońca
- Gwiazdowe czarne dziury: powstające jako ostatnie etapy ewolucji gwiazd
- Pośrednie czarne dziury

LIGO/VIRGO: fale grawitacyjne zdradzają obecność wszelkich typów czarnych dziur



Nagrody Nobla z fizyki „pozaziemskiej”

- 2020 – czarne dziury
- 2019 – kosmologia fizyczna i egzoplanety
- 2017 – fale grawitacyjne
- 2015 – oscylacje neutrin
- 2011 – przyspieszone rozszerzanie się Wszechświata
-
- 2006 – mikrofalowe promieniowane tła
- 2002 – astrofizyka X
- 1992 – pulsar do testowania teorii względności
-