

# CO KRYJE SIĘ WE WNETRZU CZARNEJ DZIURY?

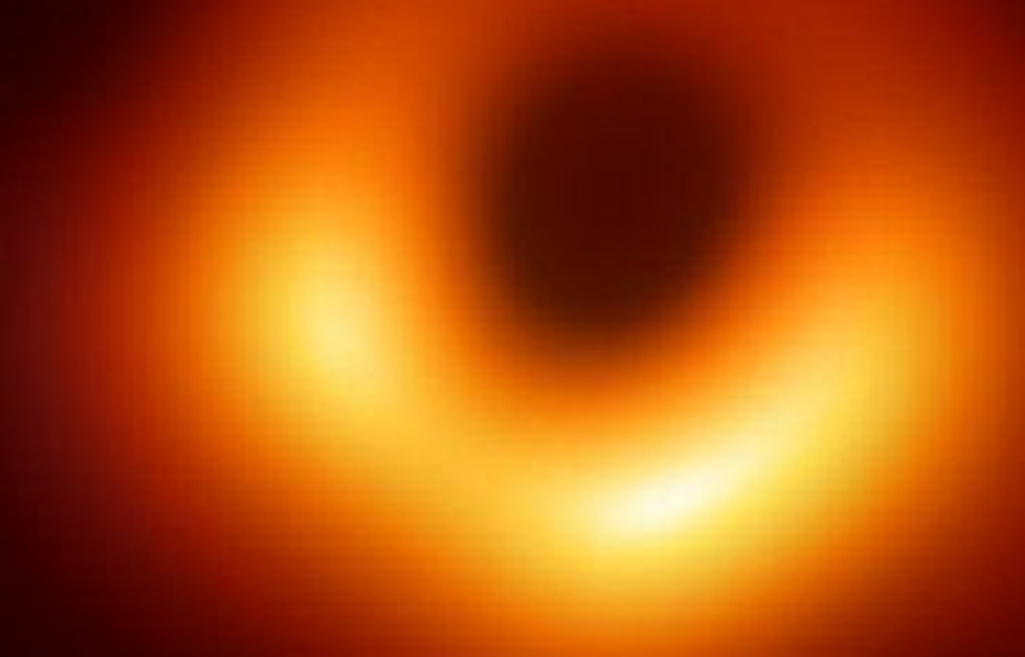
Andrzej Hryczuk



NARODOWE  
CENTRUM  
BADAŃ  
JĄDROWYCH  
ŚWIERK

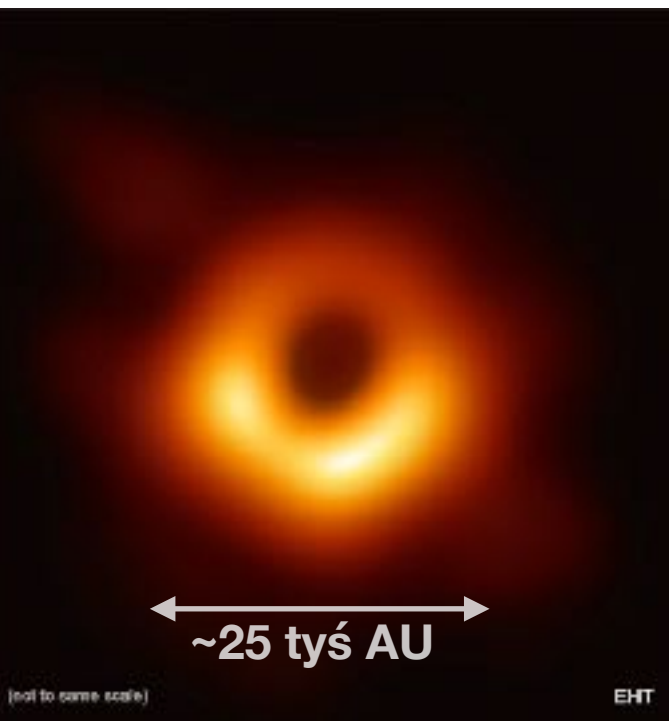
**Letnie Spotkania z Nauką, 13.07.2019**

PIERWSZE TAKIE ZDJĘCIE W HISTORII!



# GDZIE SIĘ ZNAJDUJE?

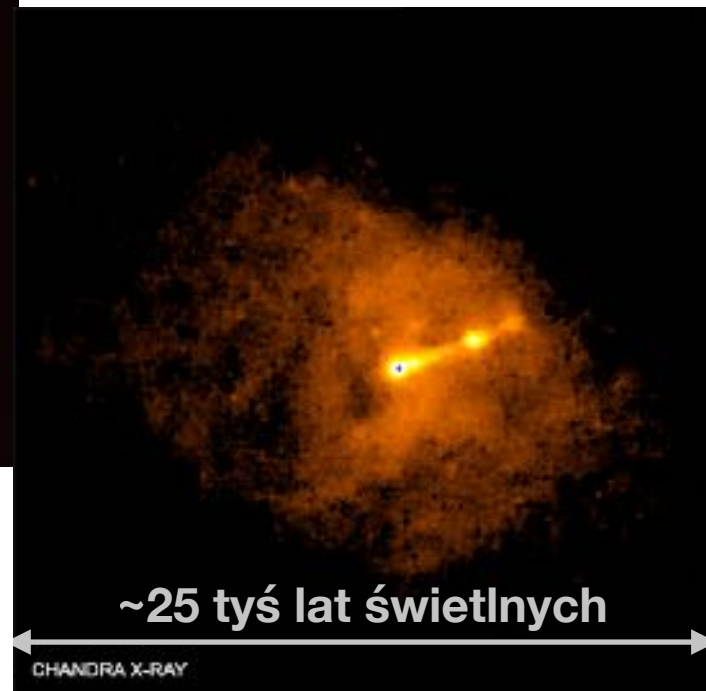
M87\*



~7 mld mass Słońca  
prędkość gazu ~1000  
km/s

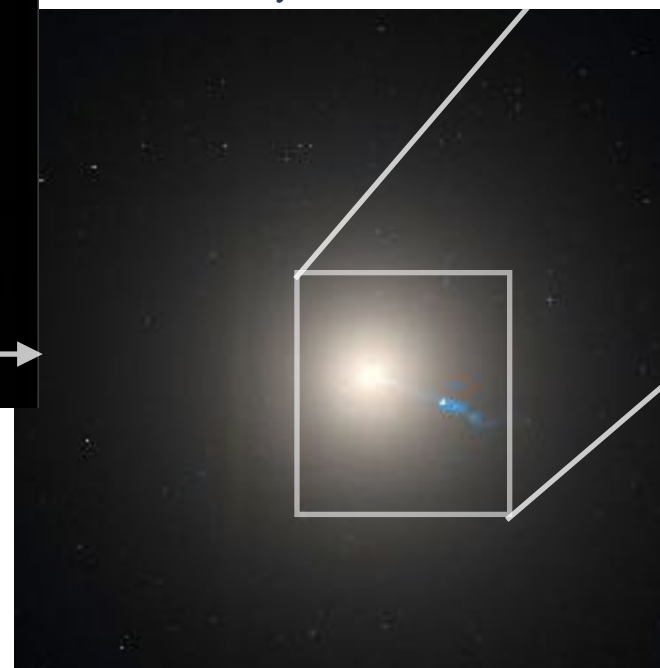
akrecja:  
ok. 90 mass Ziemi/rok

M87\* z oddali

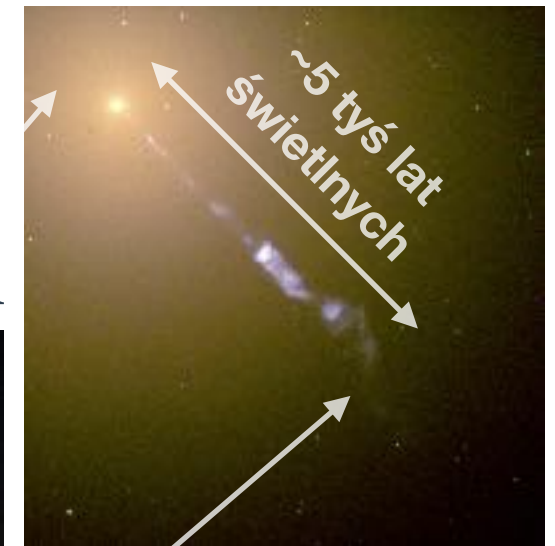


kolor - natężenie prom.  
Roentgenowskiego  
zdjęcie zrobione  
jednocześnie z EHT

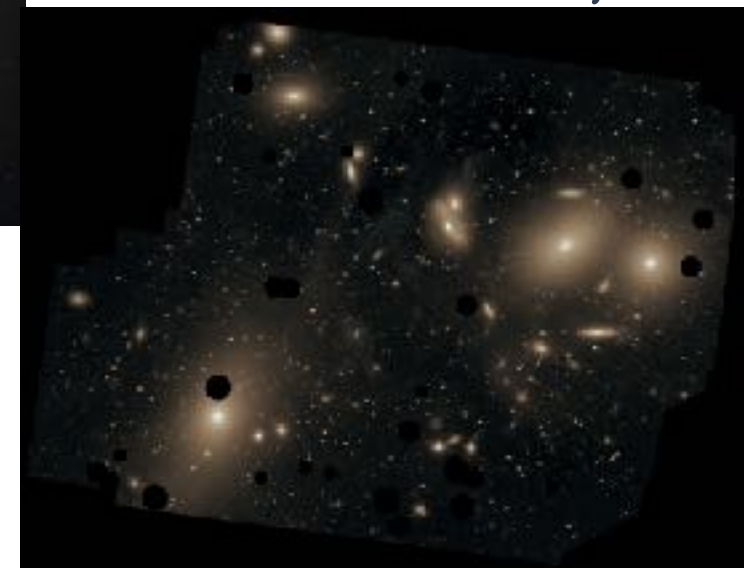
Galaktyka Panna A



~53 mln lat świetlnych  
od Ziemi



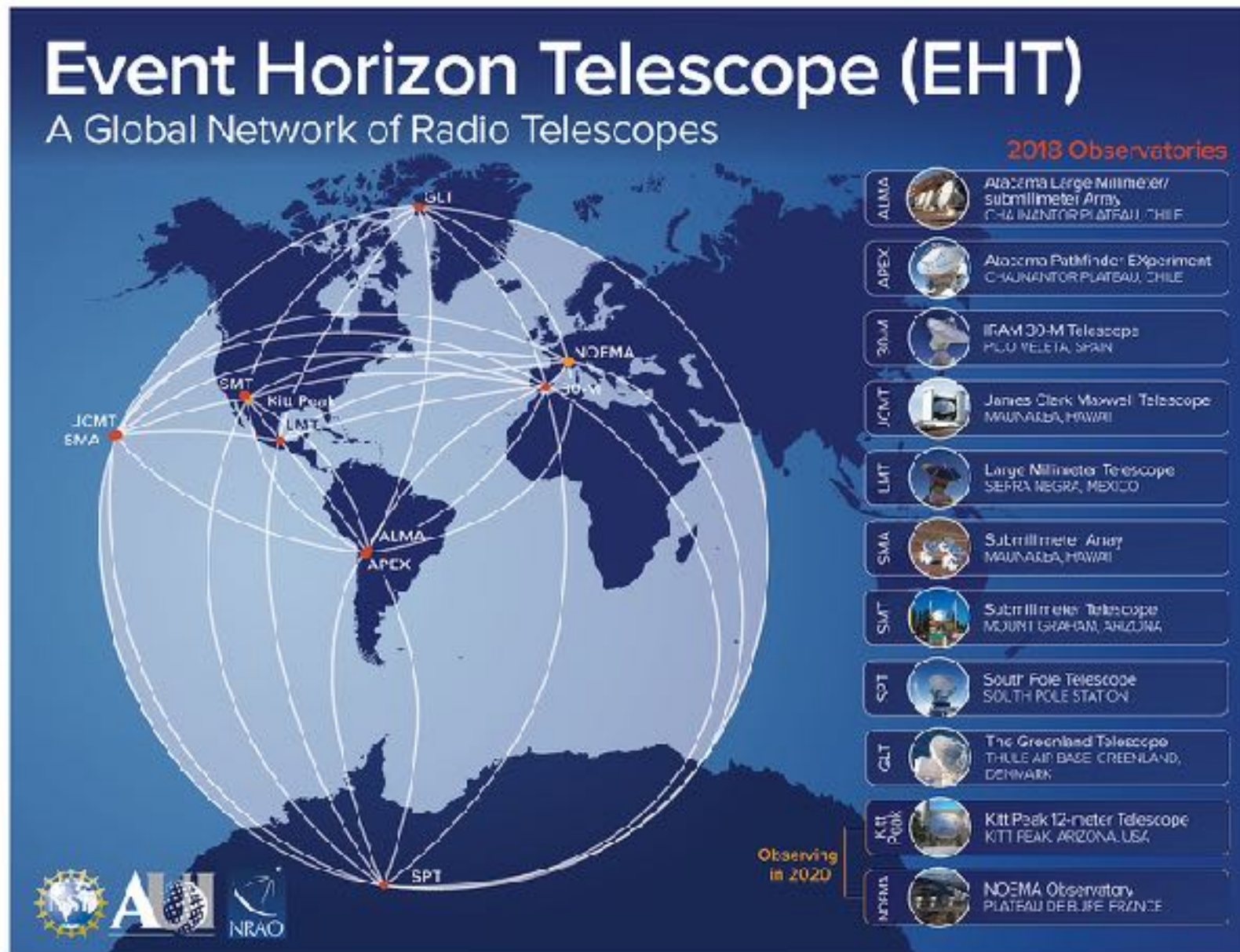
Gromada Panny



~2000 galaktyk,  
najbliższa nam Gromada

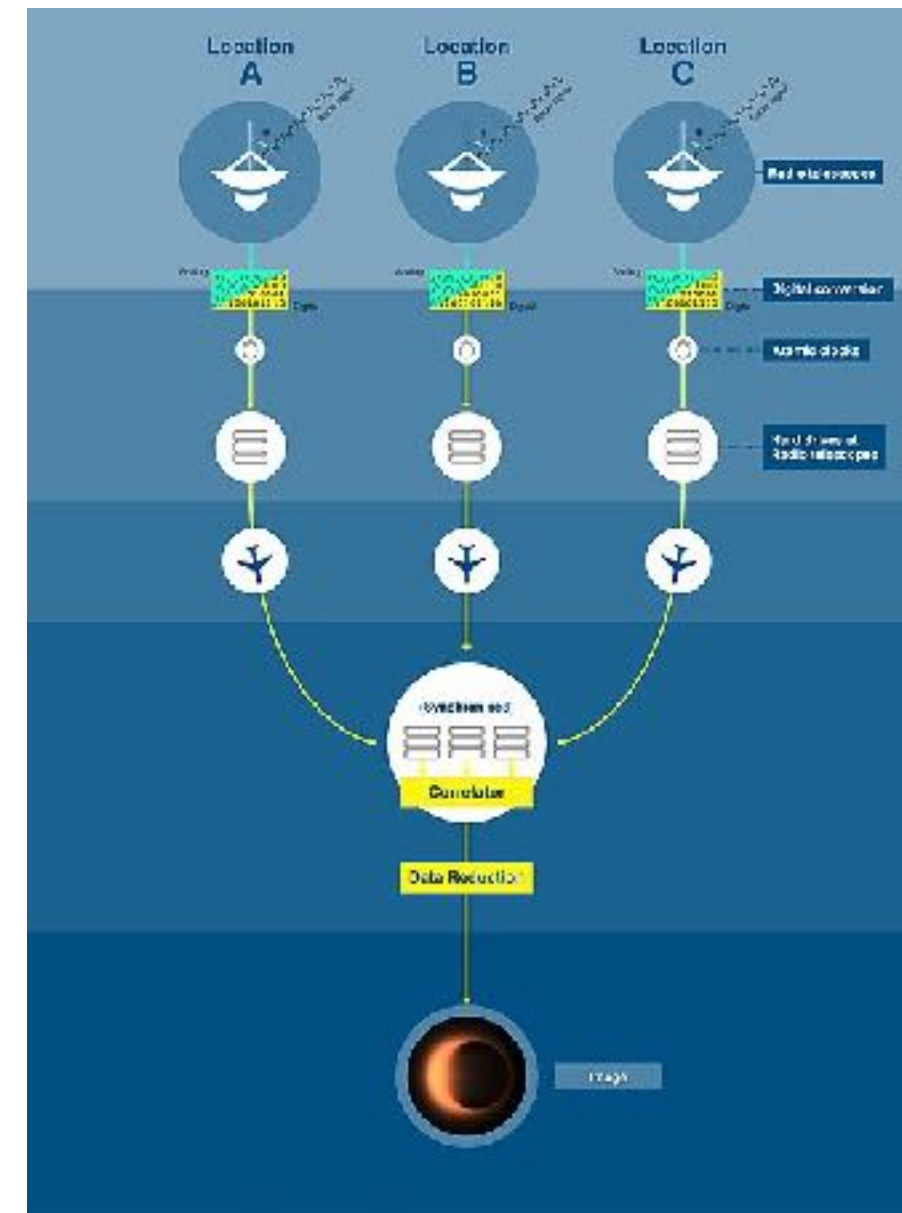


# TELESKOP HORYZONTU ZDARZEŃ (EHT)



Współpraca  
**11 radioteleskopów**  
rozsianych po  
znacznej części globu

Nazwa pochodzi od  
docelowej **rozdzielczości**  
**kątowej** - porównywalnej  
z „rozmiarem”  
supermasywnej czarnej  
dziury

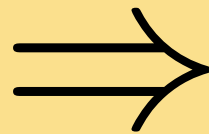


Dane ze wszystkich  
radioteleskopów razem z  
zapisami czasu z  
**zsynchronizowanych zegarów**  
**atomowych** zbierane są razem  
i przetwarzane na obraz

# DLACZEGO EHT?

(A NIE W SPEKTRUM OPTYCZNYM)

supermasywne czarne  
dziury są daleko od nas



**potrzebna bardzo dobra  
rozdzielczość kąтова**

potrzeba ok.  
**20-50 mikrosek.** kątowych!

oko ludzkie

HST (2.4-metrowe lustro)

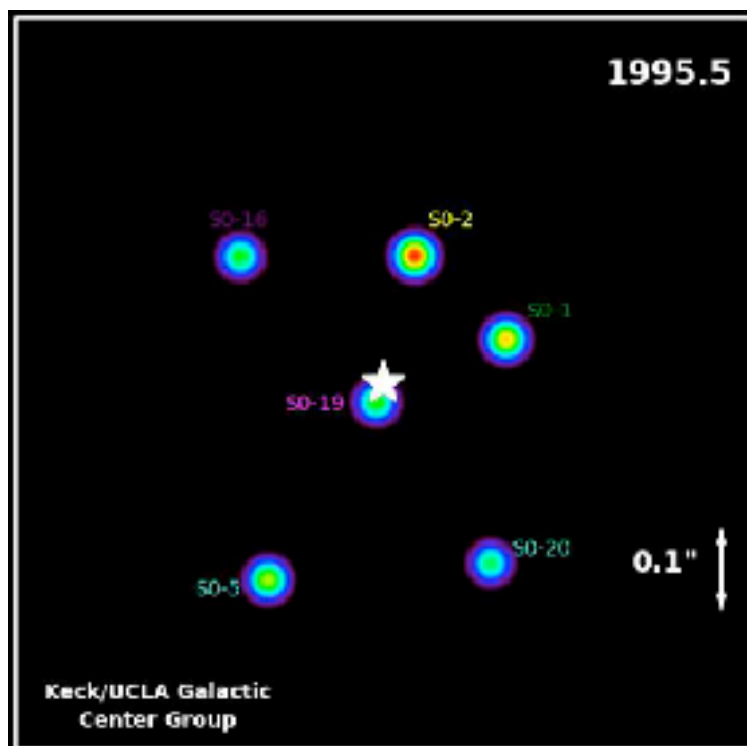
~60 sek. kątowych

~0.05 sek. kątovej

...i właśnie to radioteleskopy mają najlepszą aktualnie dostępną rozdzielczość kątową

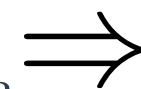
## DLACZEGO NIE SGR A\*?

Najbliższa czarna dziura: Sgr A\*



ok. 26 tyś. lat świetlnych

ma masę ok. 30 mln mas Słońca



rozmiar kątowy jak

**pomarańcza na Księżycu**

M87\* jest ok. 1500 razy cięższa i ok. 2000 razy dalej...

... lecz ma dużo lepsze ułożenie na nocnym niebie

...aktualnie EHT pracuje nad zdjęciem Sgr A\*

# METODA ANALIZY DANYCH W EHT

Teleskopów jest tylko kilkanaście - jak to w ogóle możliwe, że można z nich stworzyć pełen obraz?

**Analogia:** odgadywanie melodii z jedynie kilku nut,  
granej na pianinie z zepsutymi klawiszami

każda para teleskopów mierzy jedną „nutę” - jej ton  
jest związany z względną odległością radioteleskopów  
od czarnej dziury (im dalej od siebie tym wyższy ton)



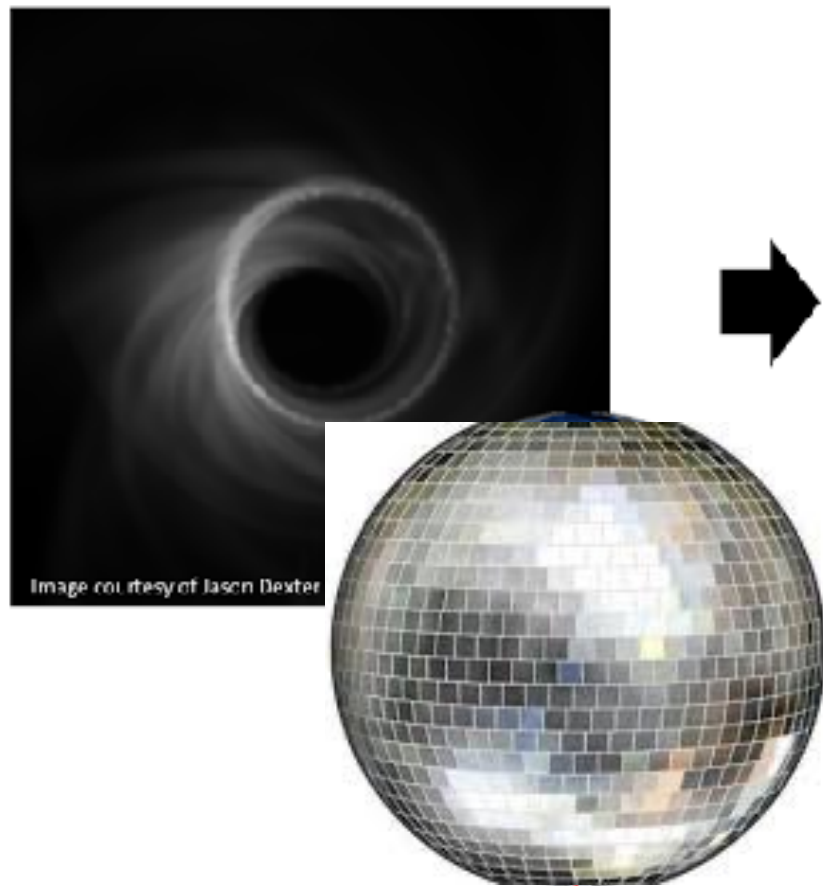
Katie Bouman

Algorytm uczenia maszynowego działający podobnie jak nasze mózgi w rozpoznaniu melodii...



# METODA ANALIZY DANYCH W EHT

Teleskopów jest tylko kilkanaście - jak to w ogóle możliwe, że można z nich stworzyć pełen obraz?



marzenie astrofizyków :)

JAK POWSTAŁY?

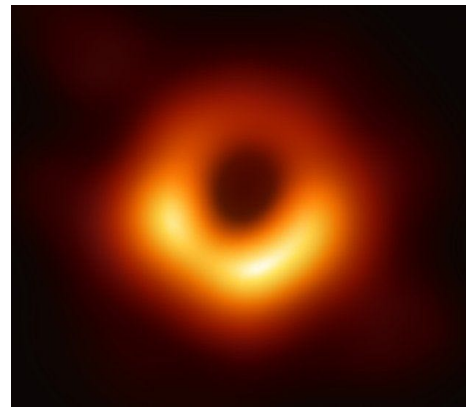
CO JEST  
W ŚRODKU?

ILE ICH TAM JEST?

JAK JE  
BADAĆ?

CZY SĄ WIECZNE?

CZEGO SIĘ MOŻEMY  
**O** NICH I **OD** NICH  
NAUCZYĆ?





# TROCHE HISTORII...

1783



J. Michell

1905



A. Einstein

K. Schwarzschild

1915



A. Eddington

1924



S. Chandrasekhar

1931



D. Finkelstein

1958



R. Penrose

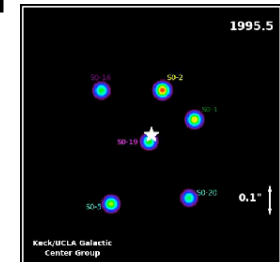
1963



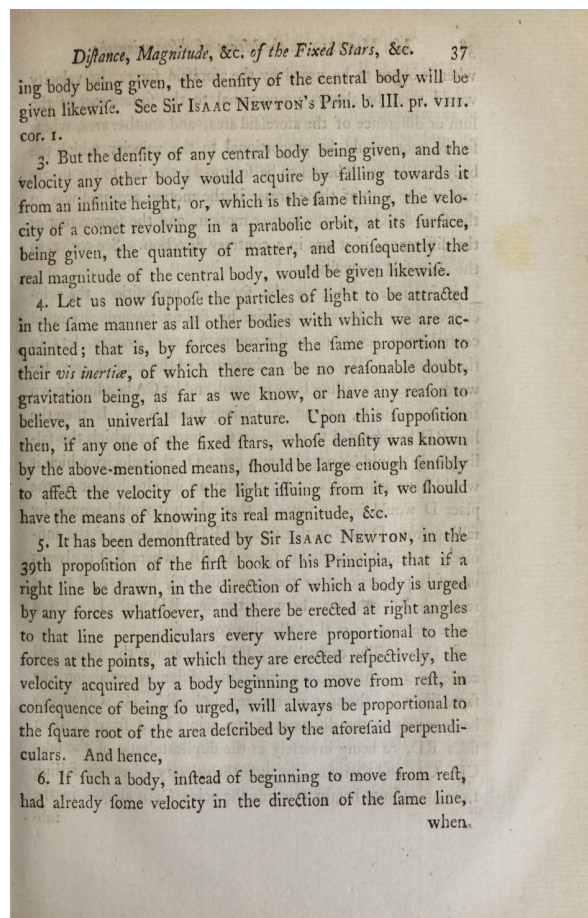
S. Hawking

1970s

1990s



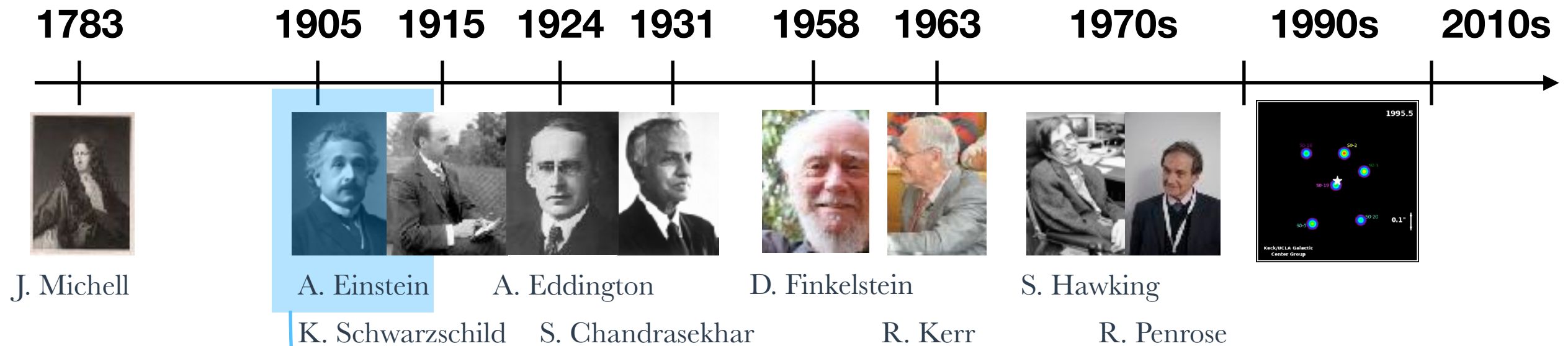
2010s



*„(...) jakakolwiek z gwiazd o gęstości większej niż wspomniano powyżej winna być wystarczająco duża by znacznie by wpłynąć na prędkość światła lecącego od niej i nie mielibyśmy możliwości poznania jej prawdziwej jasności”*

ten tok rozumowania porzucono gdy odkryto falową strukturę światła, aż do...

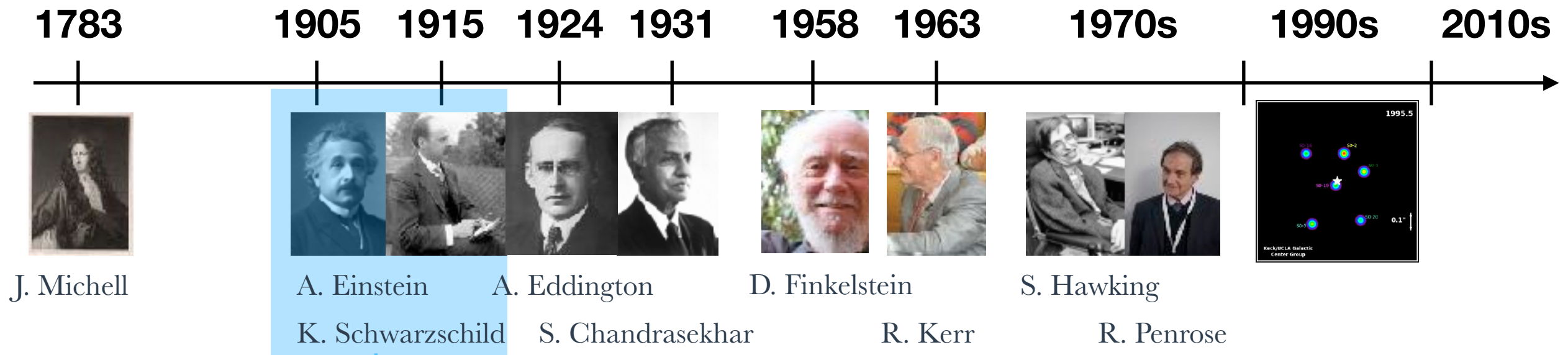
# TROCZĘ HISTORII...



prędkość światła (w próżni) jest stała i  
wynosi  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

Szczególna Teoria  
Względności

# TROCHE HISTORII...

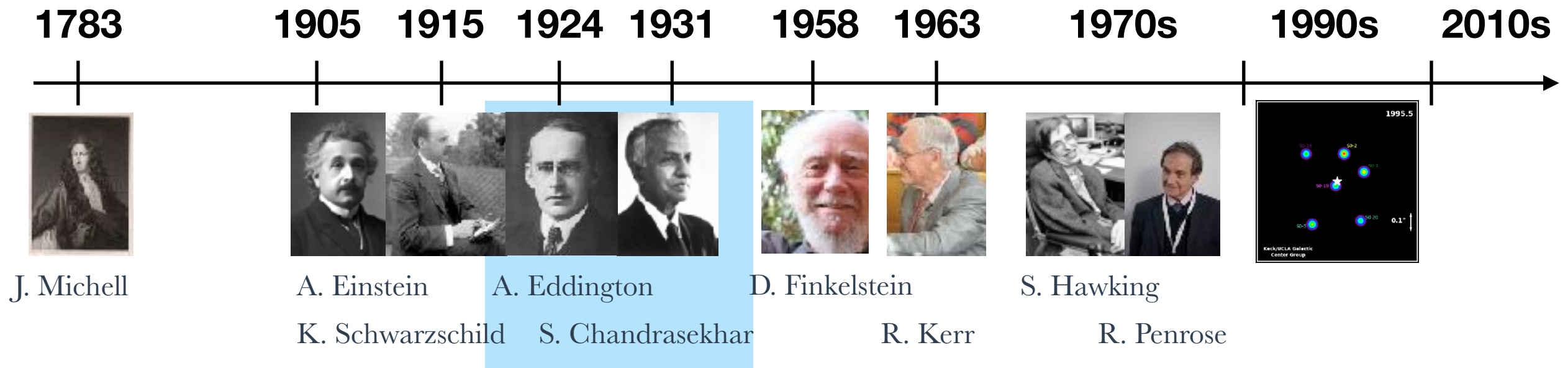


**Ogólna Teoria Względności**  
(a.k.a. teoria grawitacji)

kilka miesięcy po opublikowaniu pracy Einsteina, pierwsze rozwiązanie opisujące czarną dziurę!

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2m}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

# TROCHE HISTORII...



Eddington (i potem Finkelstein)  
pokazali, że **rozbieżność** w rozwiązaniu  
Schwarzschilda

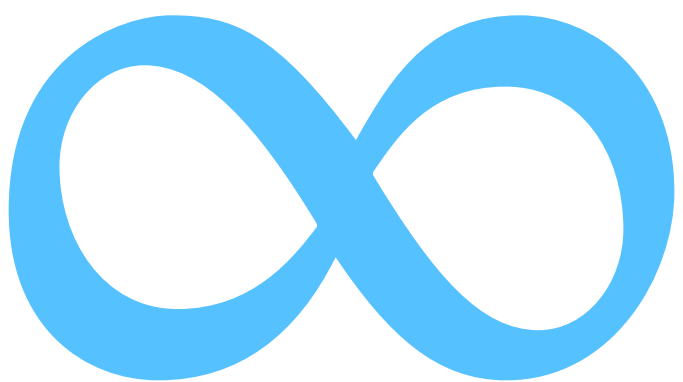
$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2m}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

**nie jest fizyczna** (można tak wybrać  
układ współrzędnych, że zupełnie znika)

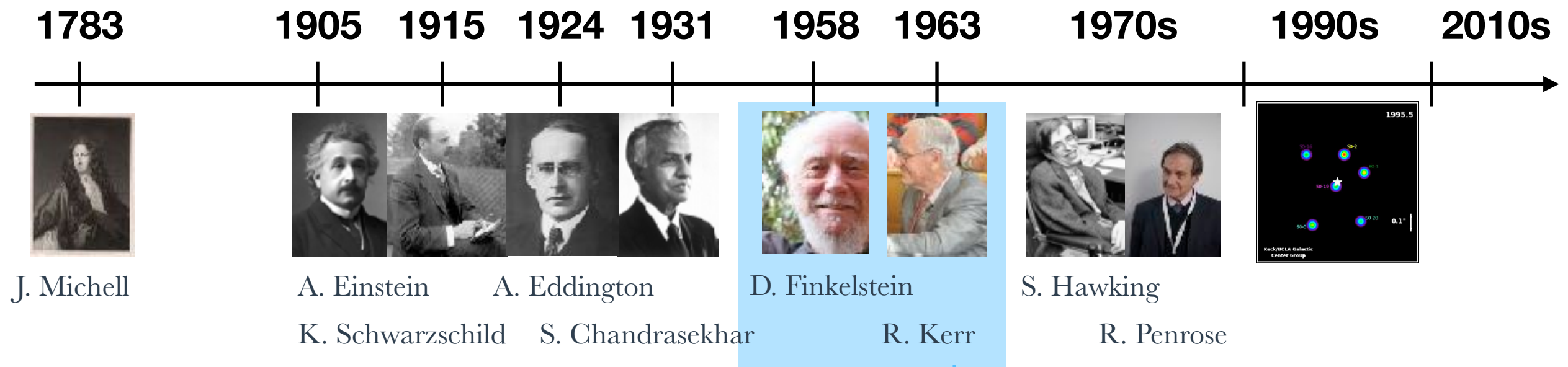
kilka lat później: gwiazda o masie ponad  
**1,4 masy Słońca** musi się zapaść!

nie było jasne czy do czarnej  
dziury, czy czegoś innego, ale z  
pewnością nie może być stabilna





# TROCZĘ HISTORII...



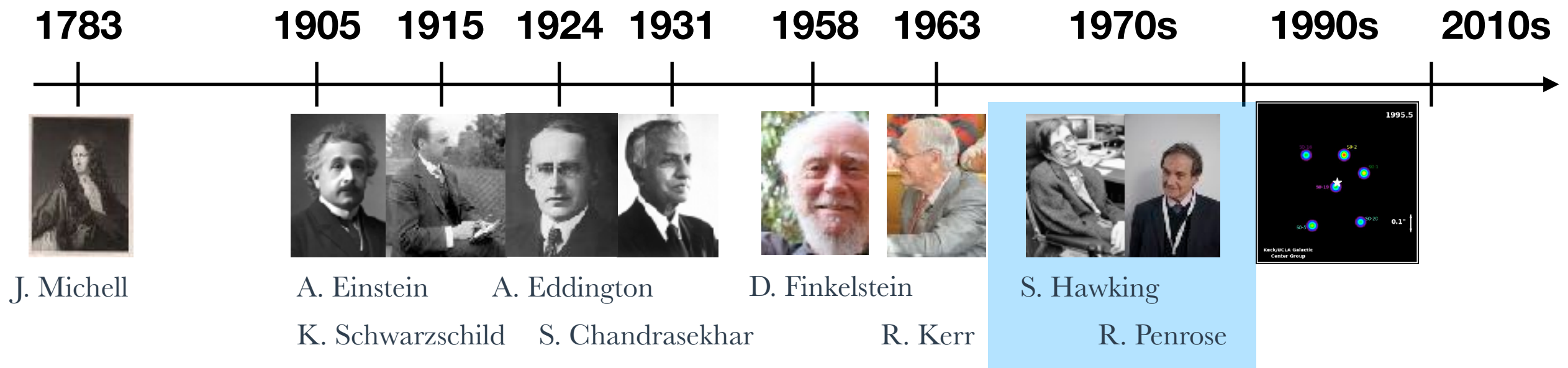
Finkelstein:

zrozumienie natury tzw.  
**„horyzontu zdarzeń”**

Kerr:

pierwsze rozwiązanie dla  
**obracającej się** czarnej  
dziury

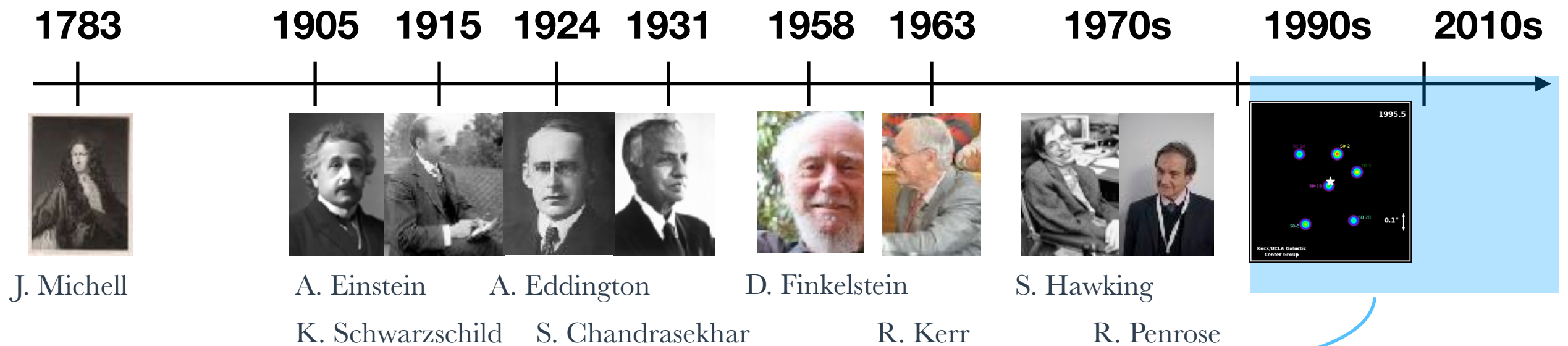
# TROCHE HISTORII...



**Złota Era** teorii względności  
i teorii czarnych dziur

odkryto sporo twierdzeń  
matematycznych, w szczególności  
dotyczących tzw. osobliwości oraz  
termodynamiki czarnych dziur

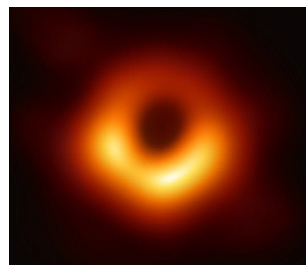
# TROCZĘ HISTORII...



rozpoczęcie ery  
faktycznych obserwacji

od 1995 pomiary ruchów planet w pobliżu  
samego środka naszej Galaktyki

2015 r - LIGO dokonuje pomiaru fal grawitacyjnych  
wysłanych przez zderzenie dwóch czarnych dziur





# O OTW SŁÓW KILKA

(Ogólna Teoria  
Względności)

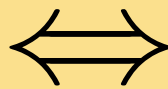
## Podstawowa Idea:

prędkość, przyspieszenie itp. mają znaczenie jedynie po określeniu układu odniesienia

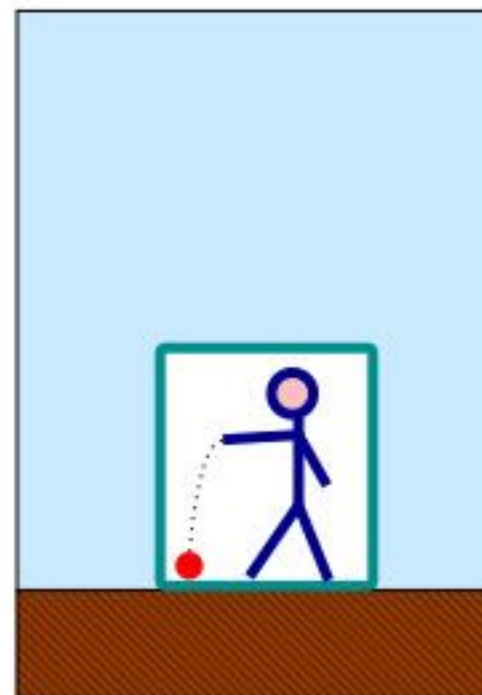
## Podstawowe Założenie:

prawa fizyki powinny być takie same, niezależnie od tego jaki układ odniesienia wybierzemy

Zasada  
Równoważności

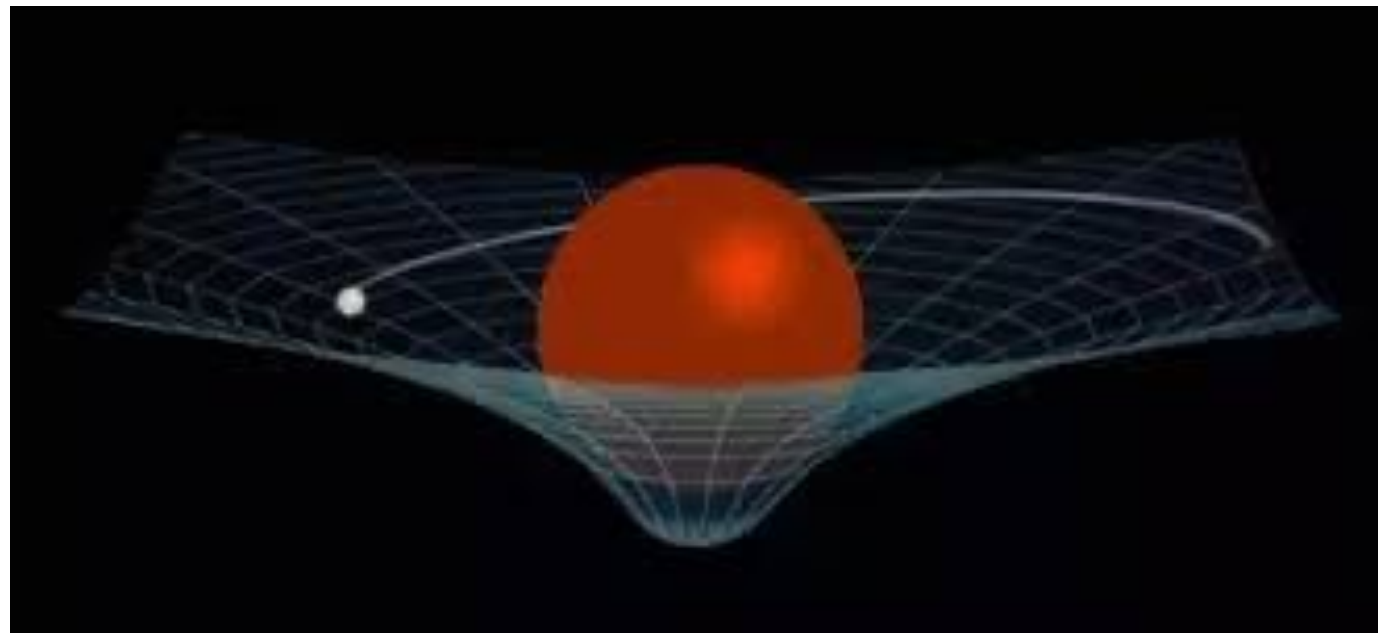


prawa ruchu dla ciał w spadku swobodnym są  
takie same jak w układzie nieprzyspieszającym



# o OTW SŁÓW KILKA

Po matematycznym sformułowaniu teorii spełniającej powyższą zasadę, ciągle pozostaje pytanie: jakie jest źródło siły grawitacyjnej?



w teorii Newtona:

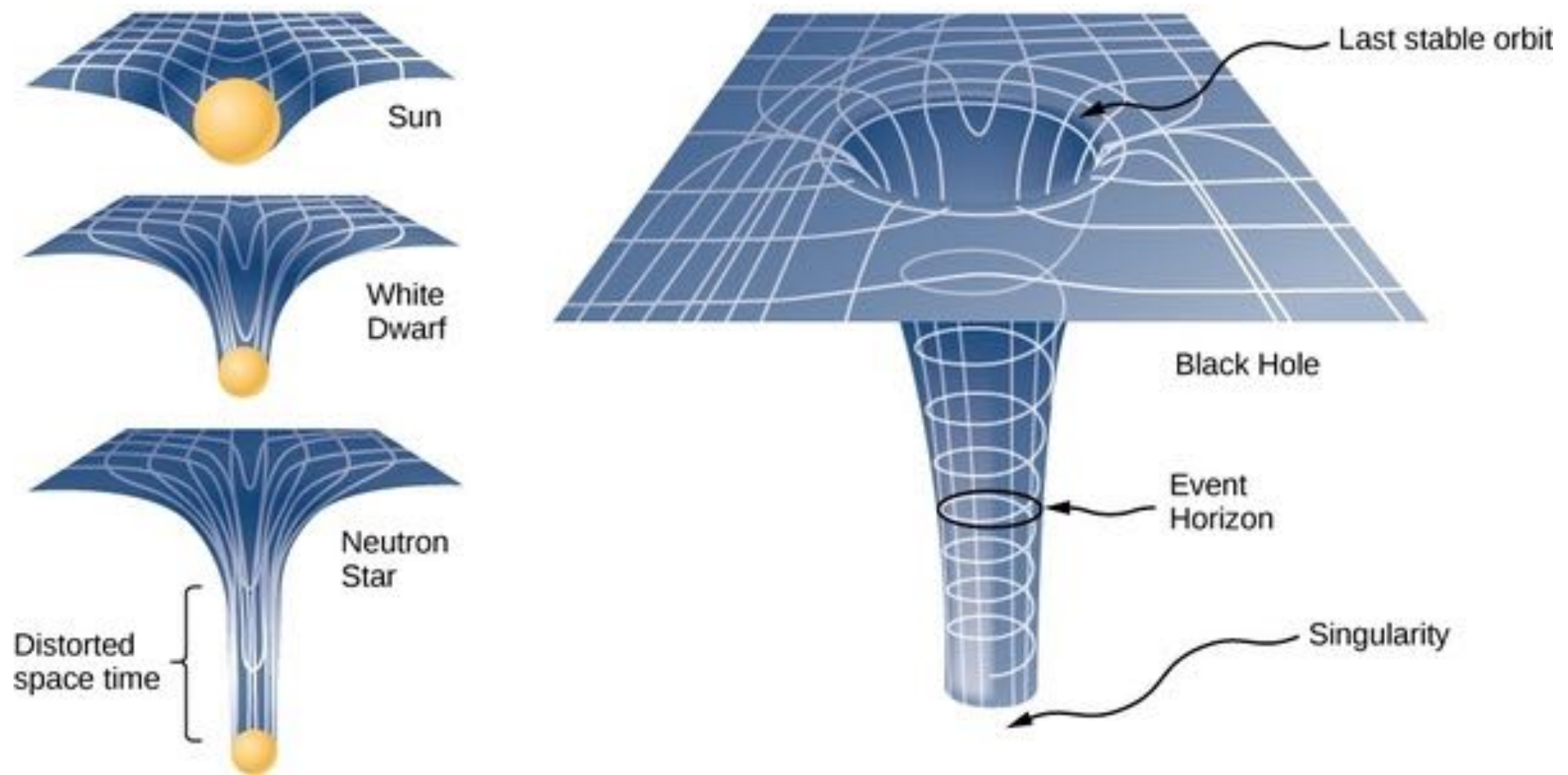
masa

$$\xrightarrow{(E = mc^2)}$$

w teorii Einsteina:

energia i pęd

# ALE CZYM DOKŁADNIE JEST CZARNA DZIURA?



czasoprzestrzeń się „przerywa” - tworzy się nowy, oderwany obszar - czarna dziura

w jej samym środku punkt (lub w ogólności okrąg) o nieskończonej gęstości - „osobliwość”

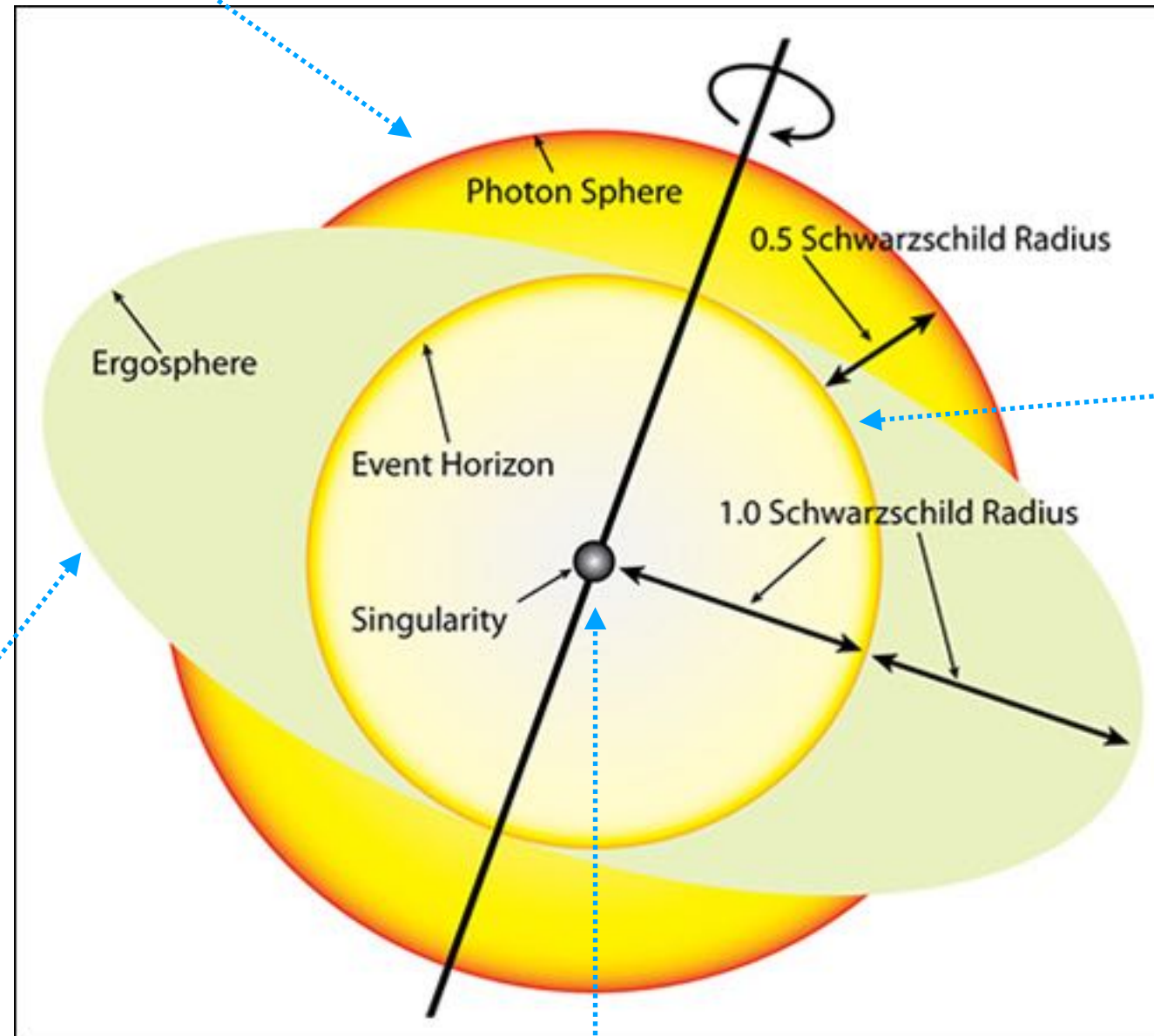
# STRUKTURA

W PRZYBLIŻENIU

## Orbita fotonowa -

obszar gdzie światło może krążyć dookoła, nie zbliżając ani nie oddalając się:

dla nieobracającej się czarnej dziury jest to sfera o promieniu 1,5 promienia Schwarzschilda



## Horyzont zdarzeń -

„granica” czarnej dziury

## Ergosfera -

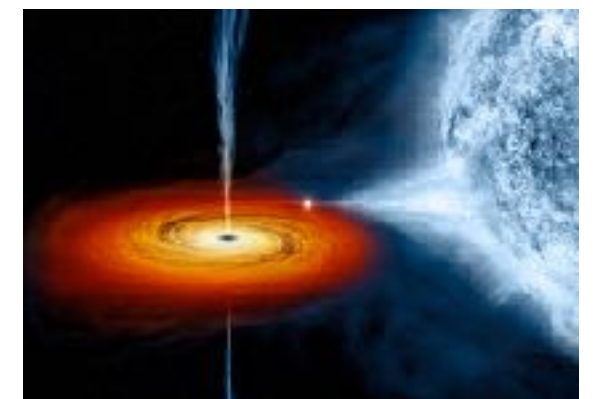
obszar gdzie „wartość grawitacji staje się nieskończona”, tym większy im szybszy obrót

## Osobliwość -

obszar gdzie „gęstość staje się nieskończona”, punkt lub okrąg

dookoła:

**dysk akrecyjny**

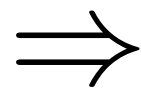




# WŁAŚNOŚCI

**Przypuszczenie: "czarne dziury nie mają włosów"**

tylko 3 cechy: **masa, spin i ładunek**  
(wszystkie widoczne z zewnątrz)



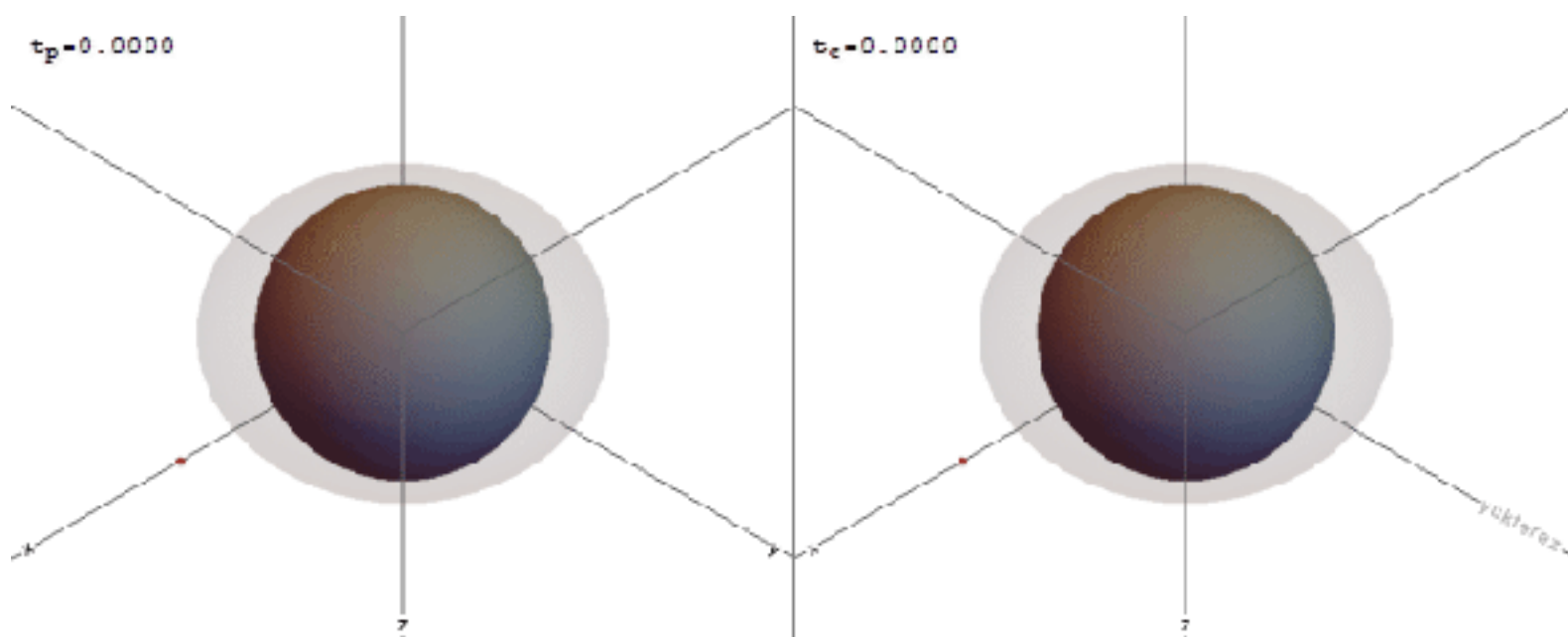
tzn. wszystkie czarne dziury o takich samych  
tych trzech wartościach, są identyczne!

Typ	Masa	Promień
Supermasywana	$10^5$ - $10^{10} M_s$	0.001-100 AU
Średniomasywna	$10^2$ - $10^4 M_s$	~Ziemi
„Gwiazdowa”	1-10 $M_s$	~10km
Mikro	$< M_s$	$< \text{km}$



proceedzi to do tzw.  
paradoksu utraty informacji!

**Dylatacja czasu:**



na statku wpadającym  
do dziury

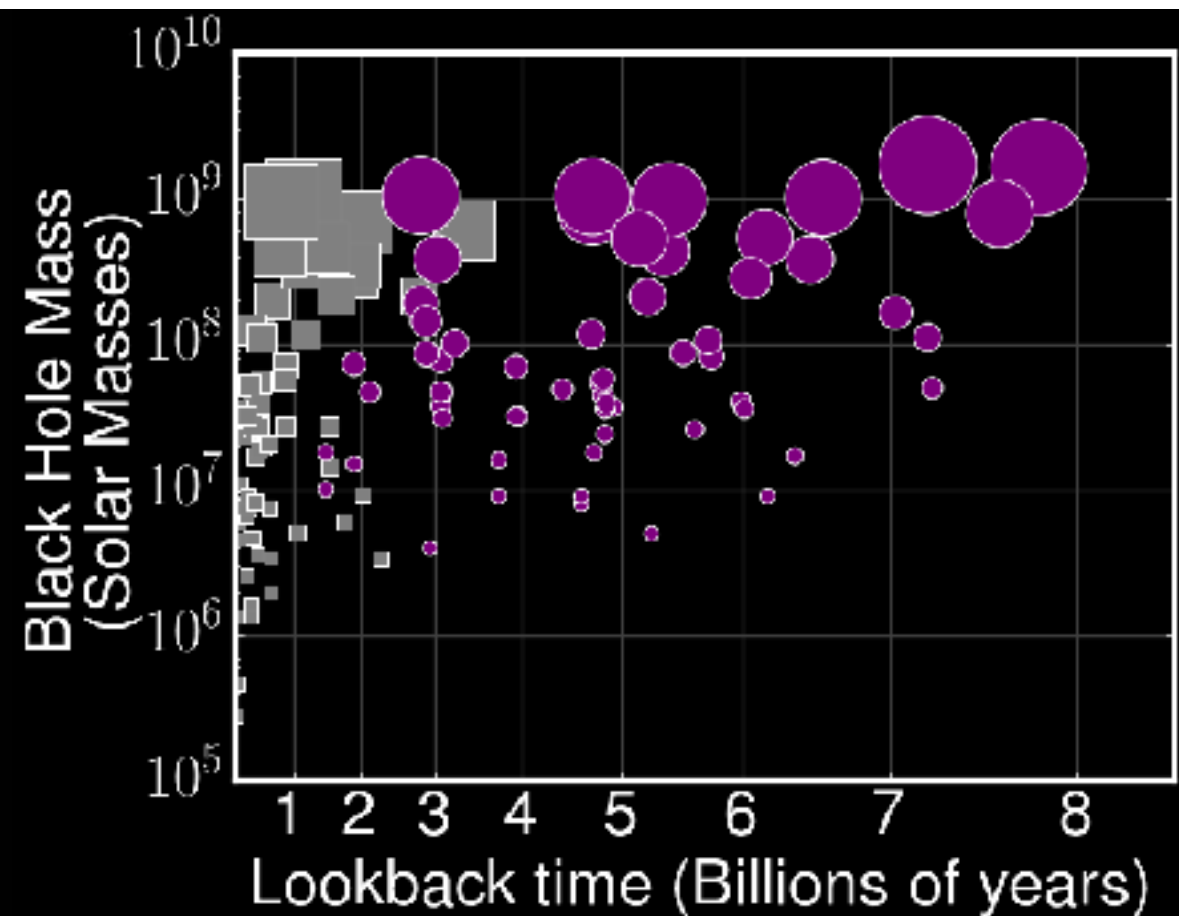
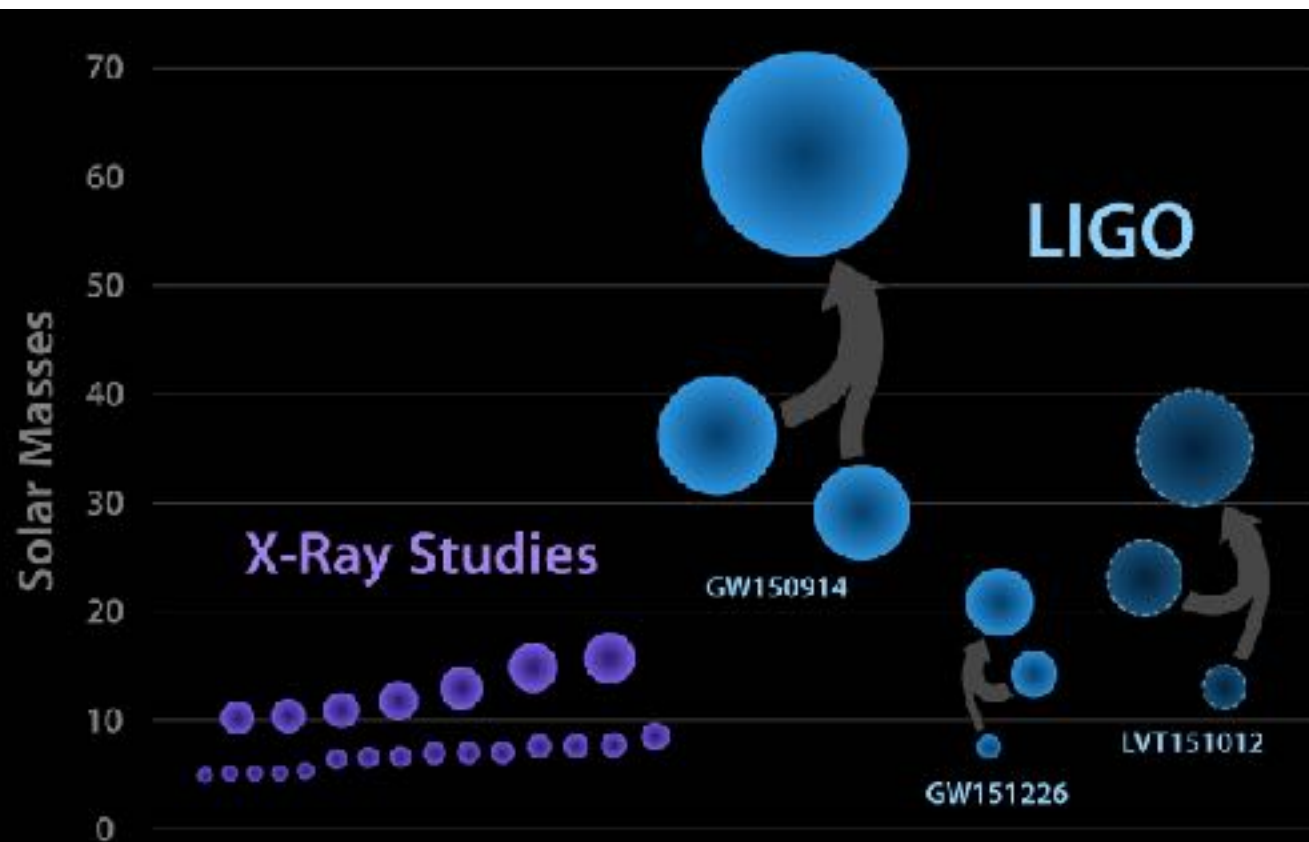
z zewnątrz

dla obserwatora z  
zewnątrz spadek do  
czarnej dziury trwałby  
**nieskończenie długo!**

dla osoby wpadającej,  
dosyć szybko  
nastąpiłaby  
„spagettifikacja”

# CZARNE DZIURY W ASTROFIZYCE

## (CZYLI FAKTYCZNIE NA NIEBIE)



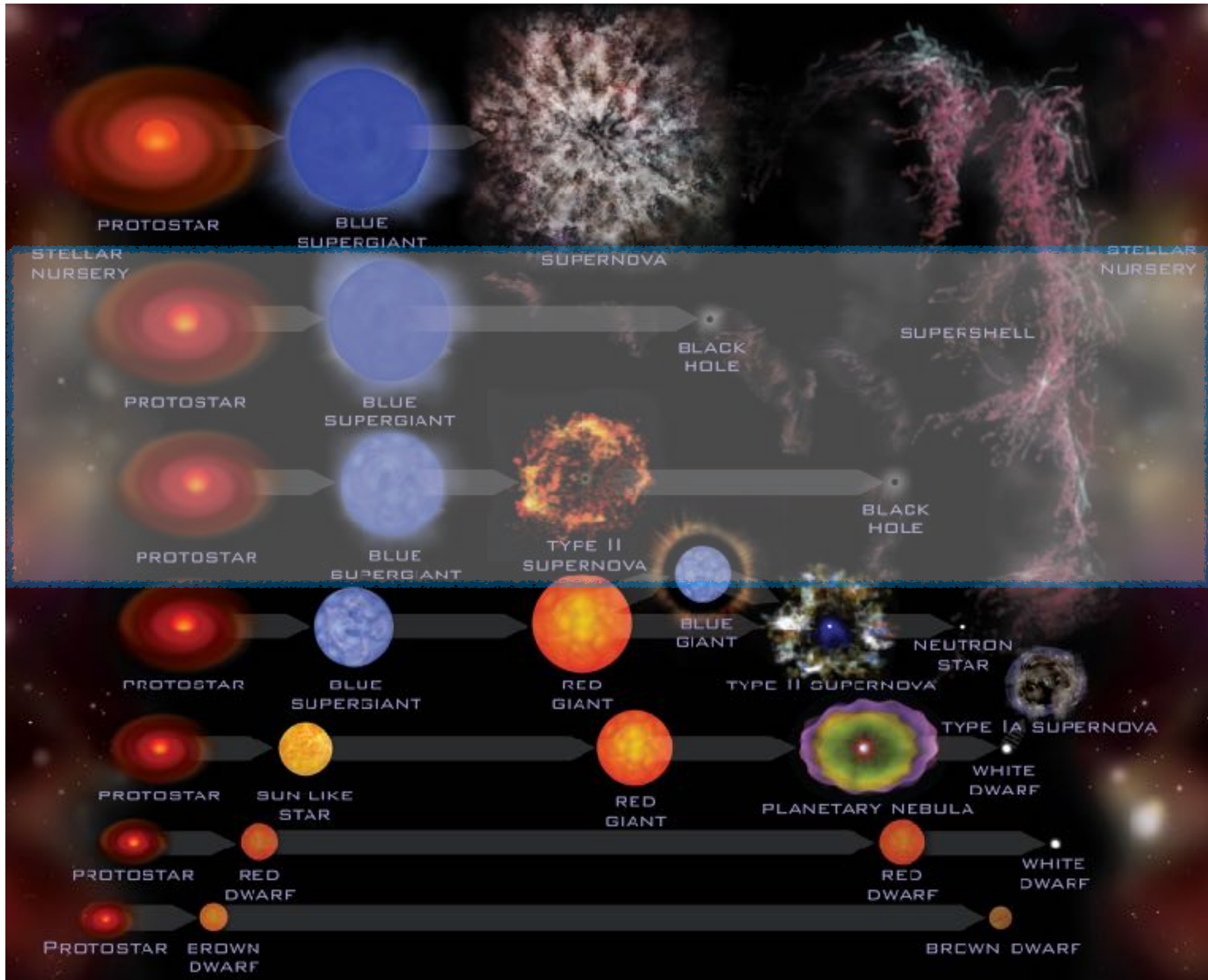
średniej  
wielkości -  
zaobserwowane  
przez teleskopy  
Roentgenowskie

duże -  
bezpośrednie  
pomiaru fal  
grawitacyjnych

supermasywne -  
pomiaru ruchów  
gwiazd

# ŻYCIE CZARNEJ DZIURY

## NARODZINY





# ŻYCIE CZARNEJ DZIURY

## KONIEC

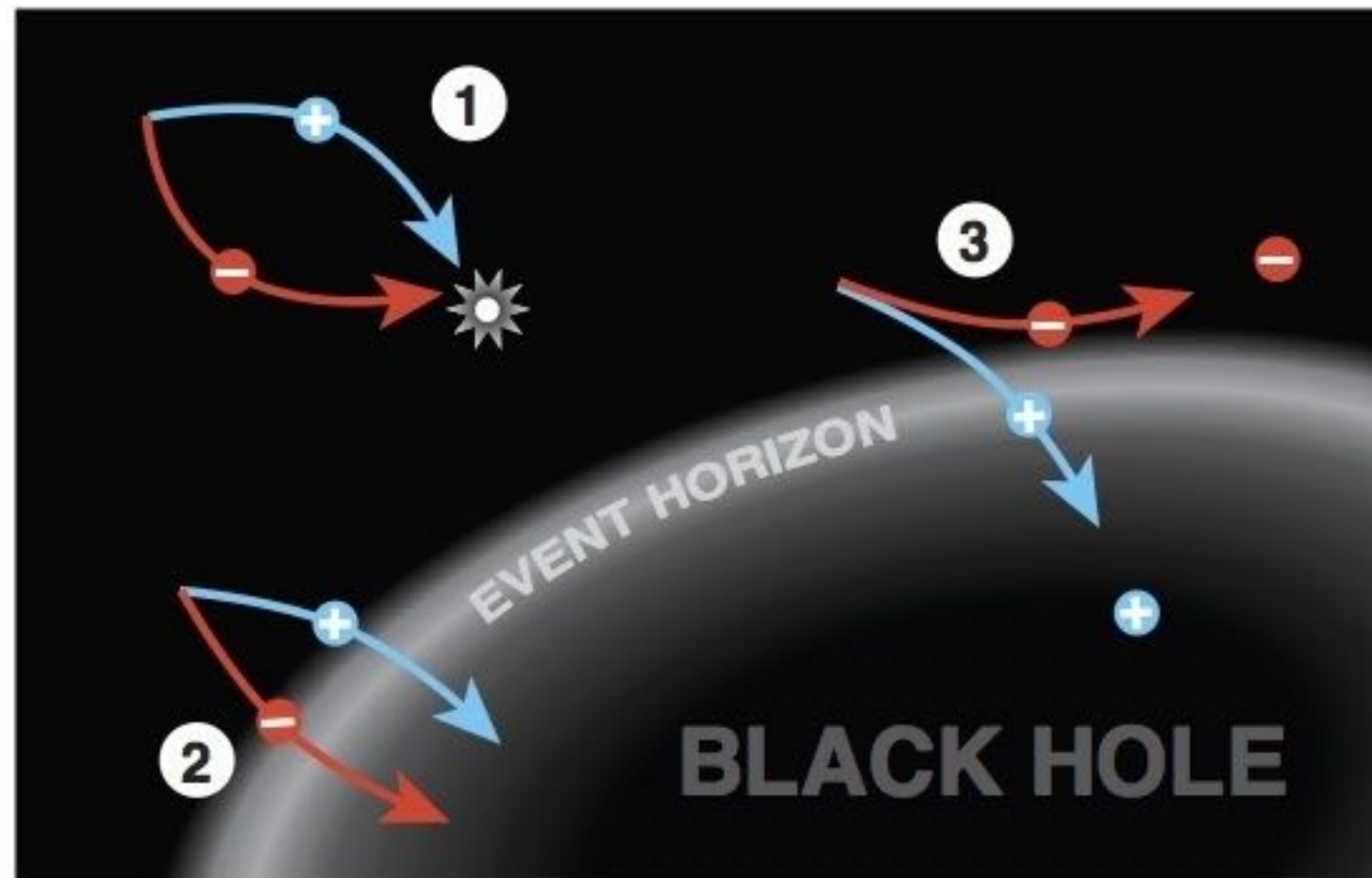
Czarna dziura przez większość życia aktywnego zawodowo wchłania materię z sąsiedztwa



po jakimś czasie jednak, **nic więcej już dookoła nie ma...**



czy siedzi tak już beczynn timer przez całą wieczność?



*tzw.  
promieniowanie  
Hawkinga*

okazuje się, że nie:  
**czarna dziura  
powoli paruje!**



# ZA CHWILĘ WRÓCIMY DO ZDJĘCIA...

ale wpierw parę słów o tym jak to o czym dotychczas  
mówiliśmy ma przełożenie na trochę „czystsza” sytuację

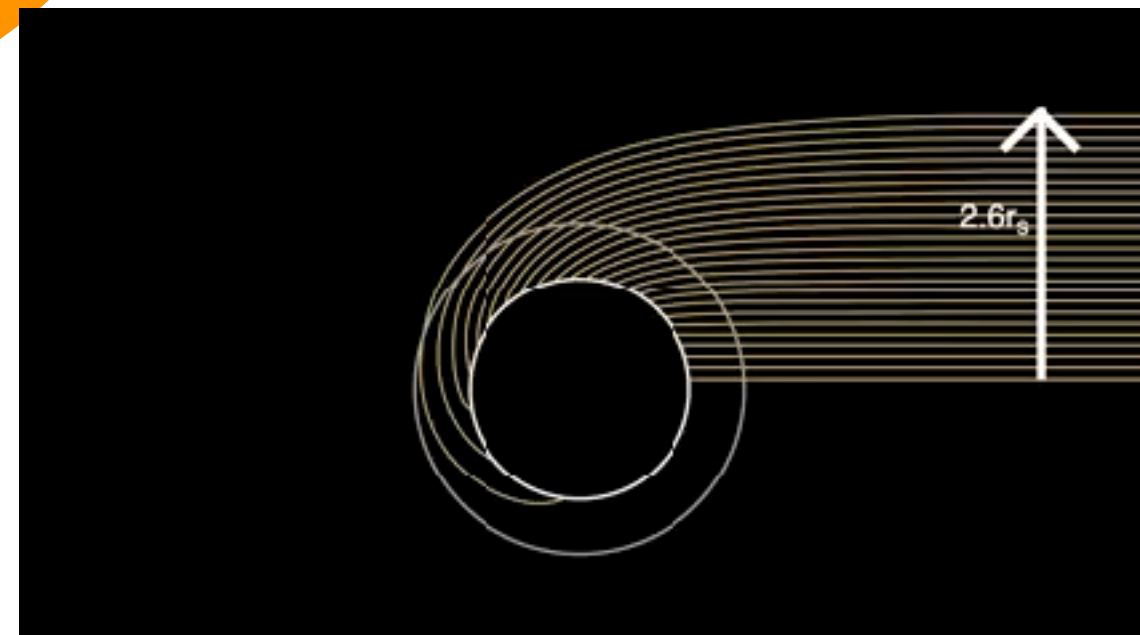
# SCHEMAT ZDJĘCIA CZARNEJ DZIURY

(NIEOBRACAJĄCEJ SIĘ)

dysk akrecyjny

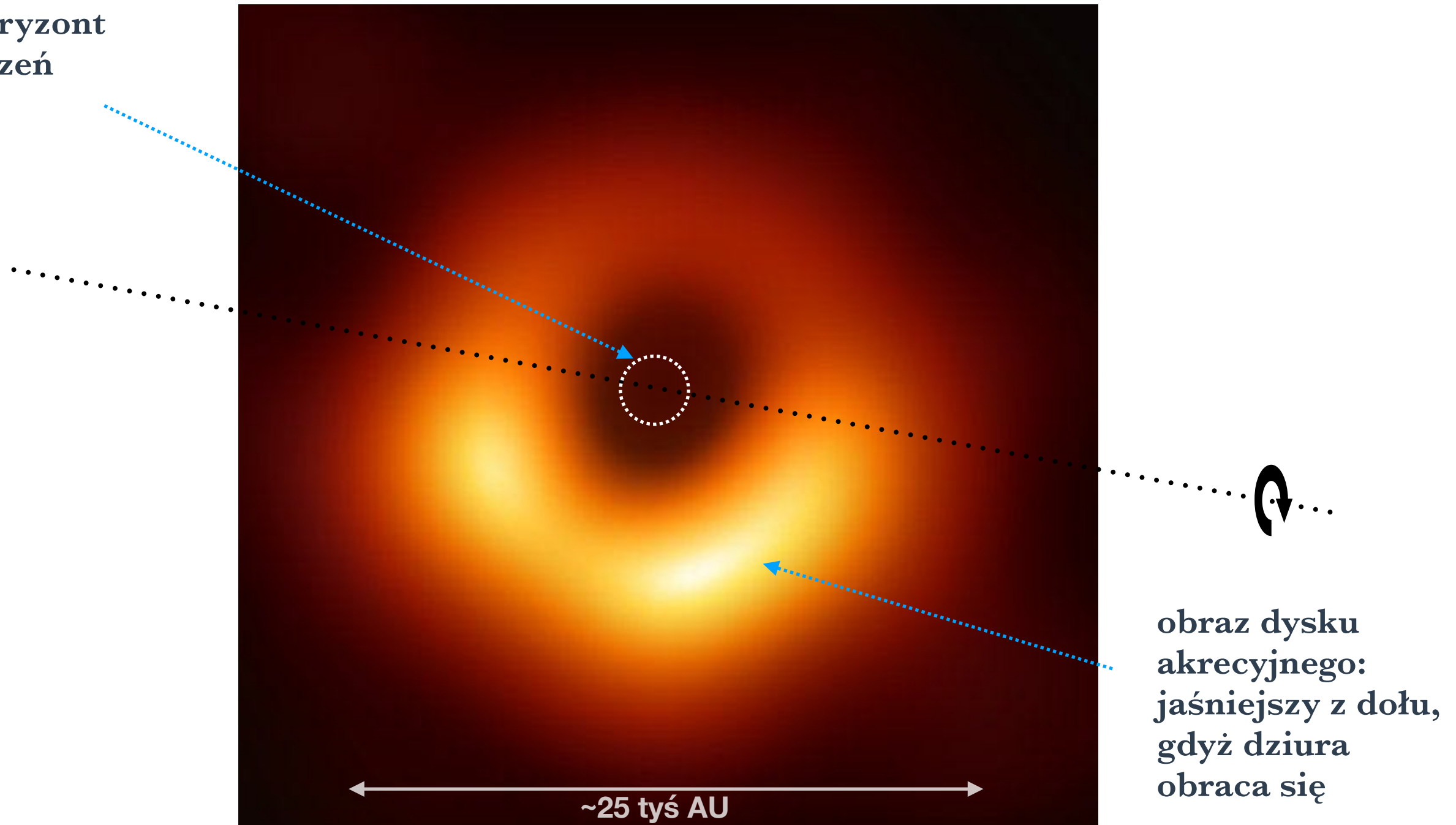
„cień” (lub  
„sylwetka”)  
czarnej dziury  
przedstawia  
zarówno jej  
przód jak i tył!

orbitala fotonowa (sfera) -  
gdyby się na niej znaleźć,  
widziałoby się tył swojej głowy



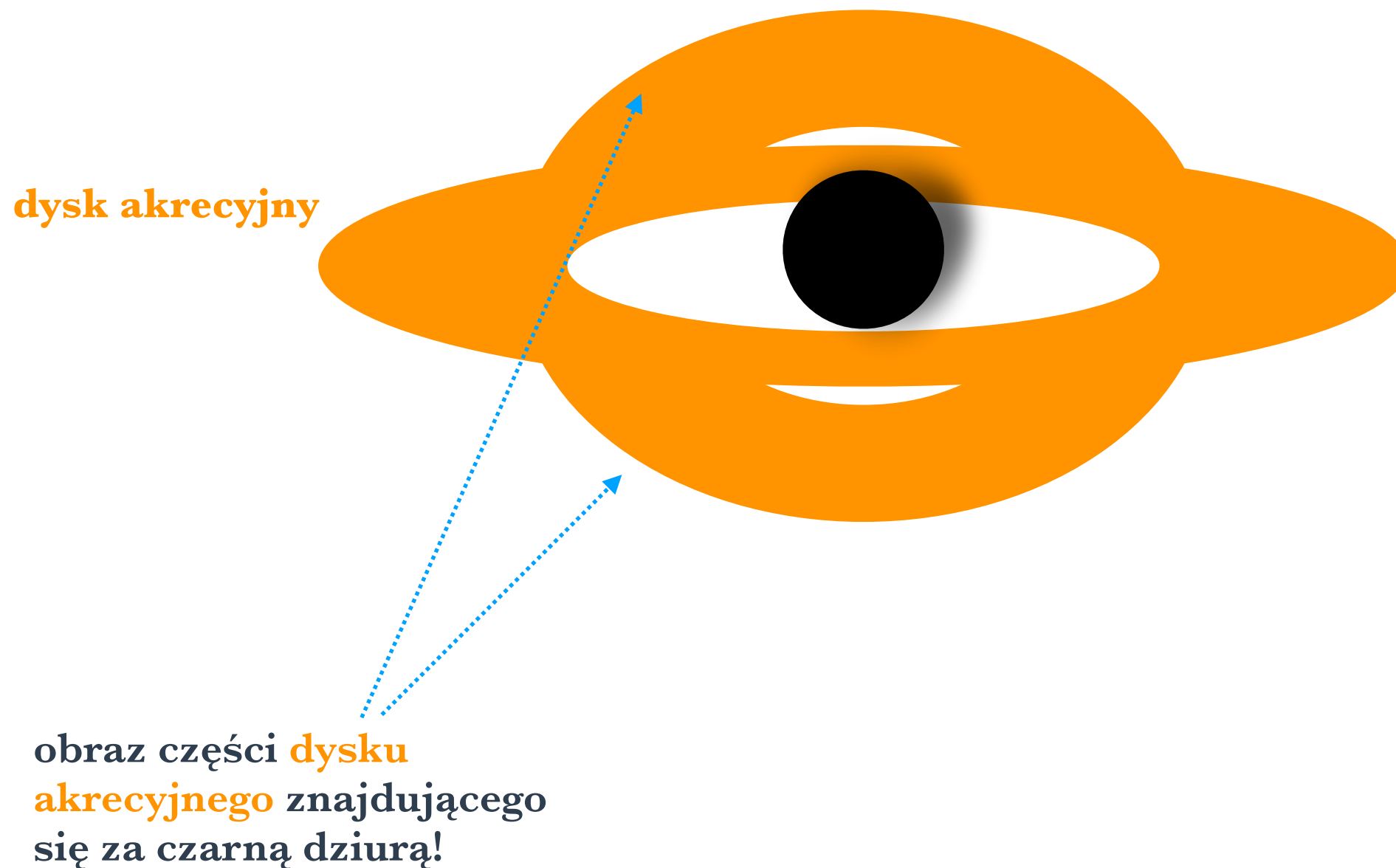
# WRACAJĄC DO ZDJĘCIA...

~ horyzont  
zdarzeń



w „cieniu” w środku zmieściłby  
się cały Układ Słoneczny

# CO GDYBYŚMY PATRZYLI „Z BOKU”?





# GARGANTUA

(FILM „INTERSTELLAR“)



# CZEGO SIĘ Z NIEGO NAUCZYLIŚMY?



Mogliśmy **po raz pierwszy** „zobaczyć” coś tak **niezwykłego**

Kolejny **pozytywnie zdany test** Ogólnej Teorii Względności

Nowa **metoda pomiaru masy** czarnych dziur

**Nadzieja na przyszłość:** ta technologia pozwoli badać obserwacyjnie cechy czarnych dziur