

FOTOGRAFIA CZARNO- -CZARNA



**Dr Monika
A. Mościbrodzka**

jest adiunktem w Department of Astrophysics, IMAPP RUN. Zajmuje się analizą danych z Event Horizon Telescope, a także modelowaniem obrazów czarnych dziur w ogólnej teorii względności.
m.moscibrodzka@astro.ru.nl

dr Monika A. Mościbrodzka

Radboud University Nijmegen, Holandia

Istnienie czarnych dziur rozważano teoretycznie już w XVIII w. W 1784 r. angielski naukowiec John Mitchell opublikował w Philosophical Transactions of the Royal Astronomical Society of London pracę o możliwości istnienia czarnych gwiazd – tak zwar-

tych, że prędkość ucieczki z ich powierzchni przekracza prędkość światła, a zatem światło z takiej gwiazdy nie może uciec, jest ona niewidoczna, a jej istnienie można wykryć tylko przez badanie jej oddziaływania grawitacyjnego na otoczenie.

Ogólna teoria względności potwierdziła zasadniczo prosty pomysł Mitchella, dodając jednak istotne modyfikacje. Czarna dziura to osobliwość czasoprzestrzeni, oddzielona od Wszechświata tzw. horyzontem zdarzeń. Czasoprzestrzeń wokół czarnych dziur jest opisana przez rozwiązania równań ogólnej teorii względności wyprowadzone przez Karla Schwarzs-

Czarne dziury – niewidzialne
twory, które oddziałują
na przestrzeń i materię
wokół nich, zaliczają
się do obiektów
astronomicznych najbardziej
pobudzających wyobraźnię.
Czy czemuś takiemu można
zrobić zdjęcie?

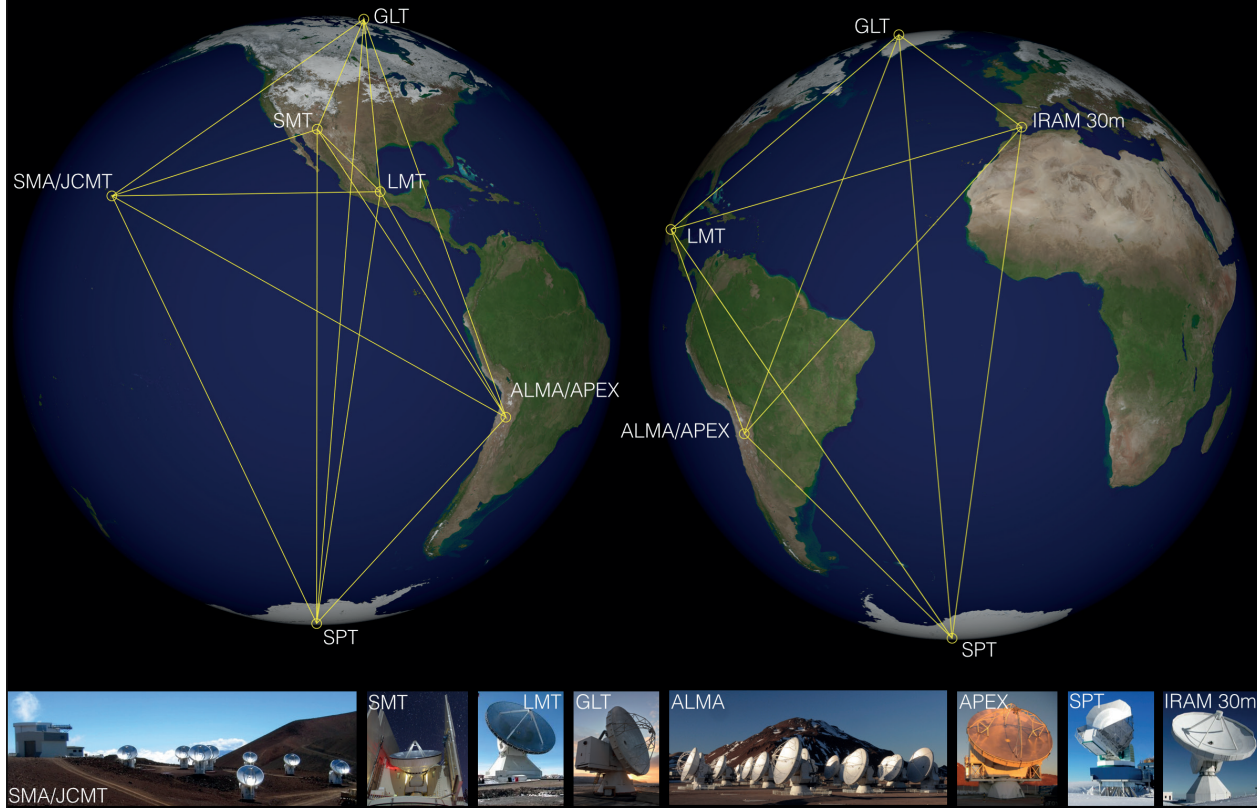
schilda oraz Roya Kerra w XX stuleciu. Warto także przypomnieć, że nazwa „czarna dziura” została zaproponowana dopiero w 1969 przez Johna Wheelera, tuż po odkryciu pierwszego pulsara.

Dzisiaj wiemy, że czarne dziury rozsiane są po całym Wszechświecie. Astronomowie tradycyjnie dzie-

lą je na dwa rodzaje w zależności od ich masy. Te o masach porównywalnych do masy naszego Słońca są obserwowalne, jeśli spada na nie materia z towarzyszącej gwiazdy. Znamy kilkanaście przykładów tego typu układów podwójnych. Całkiem niedawno istnienie relatywnie „lekkich” czarnych dziur zosta-



Event Horizon Telescope



Event Horizon Telescope. Składają się na niego: SMA/JCMT – dwa teleskopy na Hawajach, SMT – teleskop w Arizonie (USA), LMT – Wielki Milimetrowy Teleskop w Meksyku, GLT – teleskop na Grenlandii, ALMA – Atacama Large Millimeter Array w Chile, APEX – prototyp ALMA, także w Chile, SPT – teleskop na biegunie południowym, IRAM30 – 30-metrowy teleskop w Hiszpanii. Źródło: Dan Marrone.

ło dodatkowo potwierdzone przez obserwatorium LIGO, które po raz pierwszy zarejestrowało sygnał fal grawitacyjnych wyemitowanych przez zlewającą się dwie czarne dziury. Z kolei supermasywne czarne dziury, o masach rzędu milionów do bilionów mas Słońca, znajdujemy w centrach większości galaktyk.

Tajemnice Sgr A*

Najbliższa Ziemi, a także najczęściej obserwowana, supermasywna czarna dziura nosi nazwę Sagittarius A* (w skrócie Sgr A*) i znajduje się w samym centrum naszej Drogi Mlecznej. Astronomowie badają ten obiekt od lat 70. ubiegłego wieku. Sgr A* to przede wszystkim silnie świecące radioźródło, które promieniuje także w podczerwieni oraz w falach rentgenowskich i gamma. Obserwacje w podczerwieni są szczególnie interesujące, ponieważ pozwalają nam dojrzeć pojedyncze gwiazdy poruszające się w polu grawitacyjnym Sgr A*. Orbits tych gwiazd śledzone od dwóch dekad pozwoliły nam dokładnie ocenić masę Sgr A*.

W maju bieżącego roku jedna ze wspomnianych gwiazd o nazwie S2 po raz drugi przeszła przez perycentrum swojej orbity wokół Sgr A* w odległości

1400 tzw. promieni Schwarzschilda (które można z grubsza interpretować jako promień czarnej dziury). Nowy instrument GRAVITY, zainstalowany na teleskopie VLT w Chile, należącym do Europejskiego Obserwatorium Południowego (ESO), który pozwala na bardzo dokładne pomiary astrometryczne, pozwolił nam nie tylko potwierdzić wcześniejsze pomiary i uściślić masę Sgr A*, lecz także po raz pierwszy zmierzyć relatywistyczne poprawki orbity gwiazdy S2. Oznacza to, że sama teoria Newtona nie jest już w stanie opisać zachowania tej gwiazdy. Z najnowszych oszacowań GRAVITY wynika, że masa Sgr A* sięga 4,14 mln mas Słońca! Zaobserwowano też, że gwiazda S2, przechodząc przez swoje perycentrum w odległości około 6 mln km od czarnej dziury, nie została rozerwana przed siły pływowe. Oznacza to, że Sgr A* musi być tzw. obiektem zwartym.

Jeżeli Sgr A* jest czarną dziurą, a do tej pory wszystko na to wskazuje, to rozmiar jej horyzontu (zakładając, że nie rotuje) jest równy promieniowi Schwarzschilda. Wynosi on w tym wypadku $6 \cdot 10^{11}$ cm. Rotująca czarna dziura będzie nieco mniejsza. W porównaniu z typowymi skalami astronomicznymi jest to ekstre-

DR MONIKA A. MOŚCIBRODZKA

malnie mały obiekt. Zwróćmy uwagę, że promień orbity Merkurego wokół Słońca jest 10 razy większy!

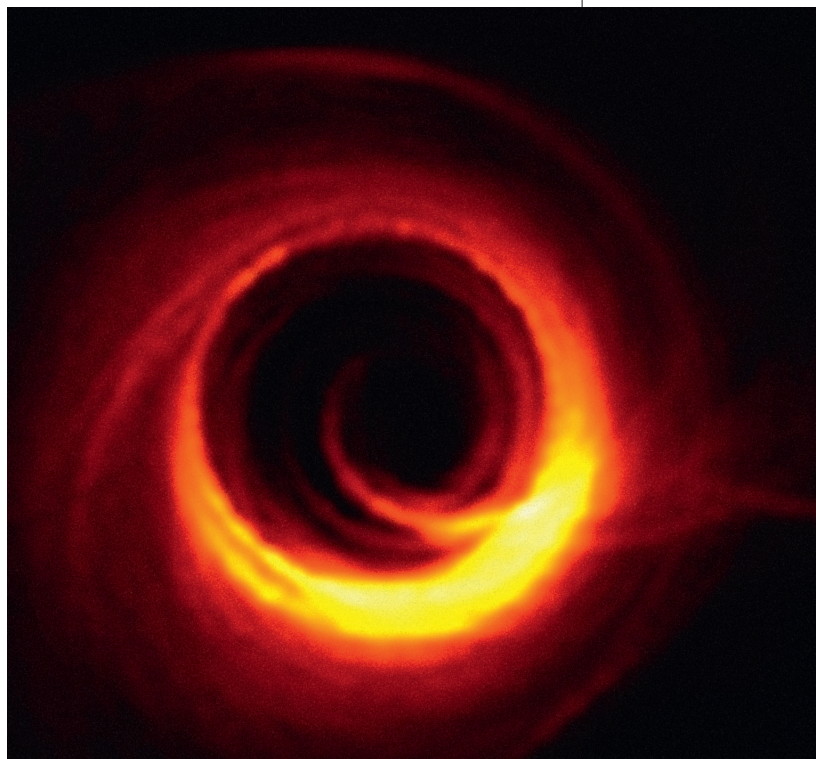
Sfotografować niewidzialne

Czy jest możliwe zrobienie fotografii czarnej dziury? Z odległości, jaka dzieli Ziemię od centrum Galaktyki – około 8 tysięcy parseków – horyzont zdarzeń Sgr A* ma rozmiar kątowy na niebie równy około 50 mikrosekund łuku (jest to rozmiar kątowy porównywalny z rozmiarem kątowym pomarańczy umieszczonej na Księżycu). Tylko teleskop wielkości całej Ziemi lub większy mógłby osiągnąć rozdzielczość umożliwiającą zrobienie fotografii tak małego obiektu z tak dużej odległości. Czy jest to w ogóle możliwe?

A jednak! Aby sfotografować horyzont czarnej dziury, międzynarodowe konsorcjum Event Horizon Telescope Consortium (<https://eventhorizontelescope.org>) skonstruowało teleskop o rozmiarze Ziemi. Event Horizon Telescope (w skrócie EHT) nie jest jednak standardowym teleskopem. EHT to teleskop wirtualny, złożony obecnie z ośmiu niezależnych teleskopów rozproszonych po całym ziemskim globie. Technika, która pozwala na zobrazowanie horyzontu czarnej dziury, nazywa się interferometrią wielkobazową. Jest to rodzaj interferometrii, w której dane zbierane są przez niezależne od siebie teleskopy znajdujące się w znacznej odległości od siebie, np. na różnych kontynentach. Zebrane dane są następnie transportowane do Europy oraz do Stanów Zjednoczonych (dane zebrane podczas tygodnia obserwacji zajmują około 4 petabajtów), gdzie są korelowane i syntezywane do postaci obrazu. Rozdzielczość interferometru jest odwrotnie proporcjonalna do odległości najbardziej skrajnych teleskopów i wprost proporcjonalna do długości fali obserwacji. Im większy teleskop oraz im krótsza fala, tym większa rozdzielczość. Obserwacje EHT prowadzone są na długości fali równej 1,3 milimetra, czyli najkrótszej fali, jaka jest obecnie dostępna dla interferometrii wielkobazowej.

Pierwsze obserwacje EHT miały miejsce w kwietniu 2017 r., drugie w kwietniu 2018 r.; kolejne obserwacje planowane są na kwiecień 2019 r. Obserwacje koncentrują się na dwóch obiektach. Pierwszy z nich to naturalnie Sgr A*. Drugim równie ciekawym obiektem jest centrum galaktyki M87, która znajduje się 17 milionów parseków od naszej Galaktyki. Czarna dziura w centrum M87 jest ponad 1000 razy masywniejsza, a co za tym idzie, 1000 większa od Sgr A*. Pomimo dużej odległości można ją także sfotografować. Te dwie czarne dziury mają największe rozmiary kątowe na niebie ze wszystkich znanych nam czarnych dziur – obie około 40–50 mikrosekund łuku. Pozostałe supermasywne czarne dziury, które znamy, są zbyt małe, aby EHT mógł je sfotografować.

Dane EHT z lat 2017 i 2018 są w tej chwili analizowane przez międzynarodowy zespół naukowy.



Częściowe wyniki tych analiz oraz pierwsze fotografie zostaną opublikowane już w pierwszym kwartale 2019 r. W skład międzynarodowego zespołu EHT Consortium wchodzi dwoje naukowców pochodzących z Polski, w tym autorka artykułu.

Czarne czy nie całkiem?

Czarne dziury z definicji są czarne, więc wydawałoby się, że nie można ich zobaczyć. Jednak nie egzystują one w próżni. Otacza je zjonizowana plazma, która, spadając na horyzont zdarzeń z prędkością bliską prędkości światła, rozgrzewa się do bardzo wysokich temperatur (rzędu 10 milionów kelwinów) i świeci w całym zakresie widma elektromagnetycznego od fal radiowych do promieni gamma. Obserwator z zewnątrz może zatem zobaczyć horyzont zdarzeń czarnej dziury, a raczej jego „cień”, na tle świecącej się materii. Przewidziałam, w jakich okolicznościach cień czarnej dziury może być widoczny, co jest kluczowe dla zrozumienia wyników obserwacji z EHT. Na moje teoretyczne modele składają się trzy elementy: teoria grawitacji opisana równaniami ogólnej teorii względności, relatywistyczna magnetohydrodynamika płynów, która przewiduje zachowanie plazmy w zakrzywionej czasoprzestrzeni, oraz teoria emisji i rozchodzenia się światła w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Analiza danych EHT pozwoli na sprawdzenie dokładności tych przewidywań.

MONIKA A. MOŚCIBRODZKA

Prognoza obserwacji supermasywnej czarnej dziury w galaktyce M87 przez Event Horizon Telescope – wygląd horyzontu zdarzeń czarnej dziury z punktu widzenia obserwatora na Ziemi. Horyzont zdarzeń otoczony jest pierścieniem świecącej materii, która może spływać razem z przestrzenią w kierunku centrum czarnej dziury. Model teoretyczny opracowany przez autorkę artykułu opiera się na scałkowaniu równań Ogólnej Teorii Względności oraz teorii rozchodzenia się światła w zakrzywionej przestrzeni.

Źródło: Monika Mościbrodzka; adaptacja rys. 8 z artykułu Mościbrodzka et al (2016), opublikowanego w „Astronomy & Astrophysics”.