



Skąd wnioskować o obecności czarnych dziur?

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film edukacyjny](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Skąd wnioskować o obecności czarnych dziur?

Czy to nie ciekawe?

Czarna dziura (ang. *black hole*) to obszar czasoprzestrzeni, w którym grawitacja jest tak silna, że żadne cząstki ani promieniowanie elektromagnetyczne nie mogą się z niej wydostać. Zgodnie z ogólną teorią względności, bardzo zwarta masa może powodować takie deformacje czasoprzestrzeni. Granica regionu wokół ciała, z którego nic nie może się już wydostać, ponieważ prędkość ucieczki jest większa od prędkości światła w próżni, nazywa się **horyzontem zdarzeń** (ang. *event horizon*). Jest to wielkość wyznaczona matematycznie. Jakiegokolwiek ciało przekraczające tę granicę zostanie rozerwane, a pozostałe po nim cząsteczki zostaną na zawsze jako składowa masy czarnej dziury. Czarna dziura jest też porównywana z ciałem doskonale czarnym, ponieważ nie odbija światła. Tak więc, czarna dziura to obiekt, który nie emituje światła, nie odbija go, a jedyne oddziaływanie z innymi ciałami - to oddziaływanie grawitacyjne.

Skąd więc wnioskować o obecności czarnych dziur? Czy istnieją dowody istnienia tak osobliwych ciał w kosmosie? W jaki sposób astronomowie odkrywają czarne dziury? O tym dowiesz się w tym e-materiale.

Twoje cele

- poznasz metody pośrednie obserwacji czarnych dziur,

- określisz rodzaje czarnych dziur,
- przeanalizujesz problemy związane z obserwacją czarnych dziur różnych rozmiarów.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Czarne dziury to obiekty o pewnej masie skupionej w bardzo niewielkiej przestrzeni, które ze względu na ich własną grawitację, przyciągają wszystko wokół, łącznie ze światłem, i już nigdy nie wypuszczają zgromadzonej materii. Dzieje się tak, gdy masę skupimy w promieniu mniejszym od promienia Schwarzschilda. Jest to promień charakterystyczny, stowarzyszony z każdą masą:

$$R_{schw} = \frac{2GM}{c^2}$$

gdzie G – stała grawitacji, M – masa, c – prędkość światła w próżni.

Promień Schwarzschilda określa sferę wokół danej masy M , po przekroczeniu której grawitacja masy M jest tak silna, że żadne inne ciało ani promieniowanie nie opuści tej sfery. Na przykład nasze Słońce o masie $M = 1,989 \cdot 10^{30}$ kg, ma promień Schwarzschilda $R_{schw} = 2950$ m. Oznacza to, że Słońce ściśnięte do kuli o promieniu mniejszym od R_{schw} stałoby się czarną dziurą. Promień Schwarzschilda dla Jowisza – największej planety Układu Słonecznego, wynosi zaledwie 2,82 metry, a dla Ziemi niecałe 9 milimetrów. Każdy obiekt, którego promień jest mniejszy niż promień Schwarzschilda definiowany jest jako czarna dziura, której **horyzont zdarzeń** ma promień równy promieniowi Schwarzschilda. Więcej o czarnych dziurach przeczytasz w e-materiale „Gwiazdy neutronowe i czarne dziury”.

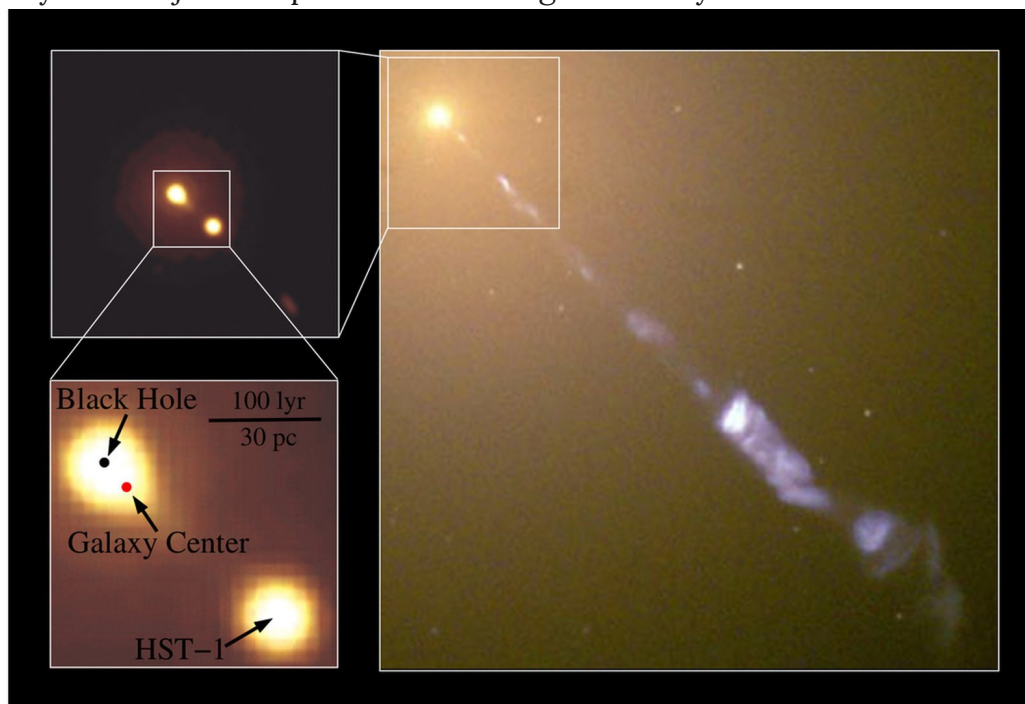
Czarne dziury dzieli się na:

- te o wielkości zbliżonej do mas gwiazd oraz
- na znacznie masywniejsze od gwiazd, rzędu milionów mas Słońca.

Głównym problemem obserwowania takich obiektów jest to, że nie świecą, a jedynie pochłaniają otaczającą materię i światło. To, co astronomowie obserwują w kosmosie to właśnie promieniowanie elektromagnetyczne, którego czarne dziury nie emitują i nie odbijają. Z tego powodu nie można ich obserwować bezpośrednio. Z kolei różnice w powstawaniu czarnych dziur sprawiają, że poszukuje się ich w różnych regionach kosmosu i stosuje się różne metody ich badania.

Supermasywnych czarnych dziur szuka się w centrach galaktyk. Najnowsze modele galaktyk zakładają, że w każdej galaktyce istnieje taka czarna dziura, jednak nie zawsze potrafimy ją zaobserwować. Najłatwiej jest odkryć i analizować czarne dziury w galaktykach aktywnych. Aktywność ta zazwyczaj związana jest z emisją dużej ilości energii w centrum galaktyki, wynikającą z obecności tam czarnej dziury. Emisja energii jest wynikiem **akrecji** (opadania w wyniku działania grawitacji) ogromnych ilości materii na czarną dziurę.

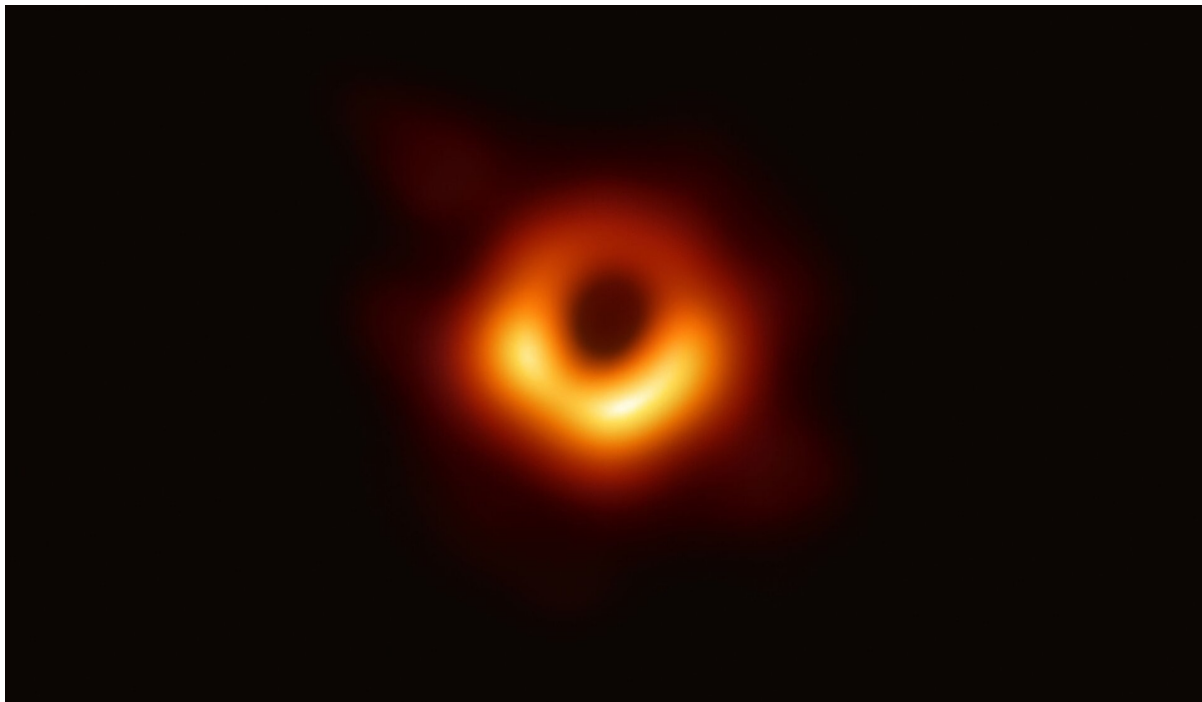
Widocznym dla astronomów efektem tej akrecji jest emitowana ogromna ilość energii w przestrzeń kosmiczną. Energia ta jest wielokrotnie większa, niż energia emitowana przez gwiazdy. Niektóre odległe radiogalaktyki wyrzucają z centrum świecące, wysokoenergetyczne strugi materii rozciągające się na setki tysięcy lat świetlnych. Strugi te nazywane są jetami (czyt. dżetami). Jest to skupiony strumień materii wyrzucany z relatywistycznymi prędkościami z biegunów jądra galaktyki. Jety zawsze wyrzucane są wzdłuż osi prostopadłej do płaszczyzny dysku wytworzonego z akreującej materii wokół czarnej dziury. Takie zjawisko przedstawia fotografia na Rys. 1.



Rys. 1. Zdjęcie galaktyki M87 zrobione przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a w 1998 roku. Dwa zbliżenia centralnej części galaktyki wykonano w 2006 roku. Na zbliżeniu centrum galaktyki zaznaczono położenie środka galaktyki, wyznaczone na podstawie promieniowania światła oraz tuż obok położenie czarnej dziury. Na pełnym zdjęciu widać ogromną strugę materii (ang. *jet*) wyrzucaną z centrum tej galaktyki.

Źródło: NASA.

Obecnie intensywne prace nad metodami poszukiwania czarnych dziur doprowadziły do powstania naziemnego obserwatorium dedykowanego temu problemowi. The Event Horizon Telescope (EHT) to 8 radioteleskopów rozmieszczonych na Ziemi. Przy pomocy tego wieloelementowego obserwatorium zaobserwowano cień czarnej dziury w środku galaktyki M87 w 2019 roku (Rys. 2.). Był to pierwszy bezpośredni wizualny dowód istnienia czarnej dziury w bardzo odległej galaktyce aktywnej.

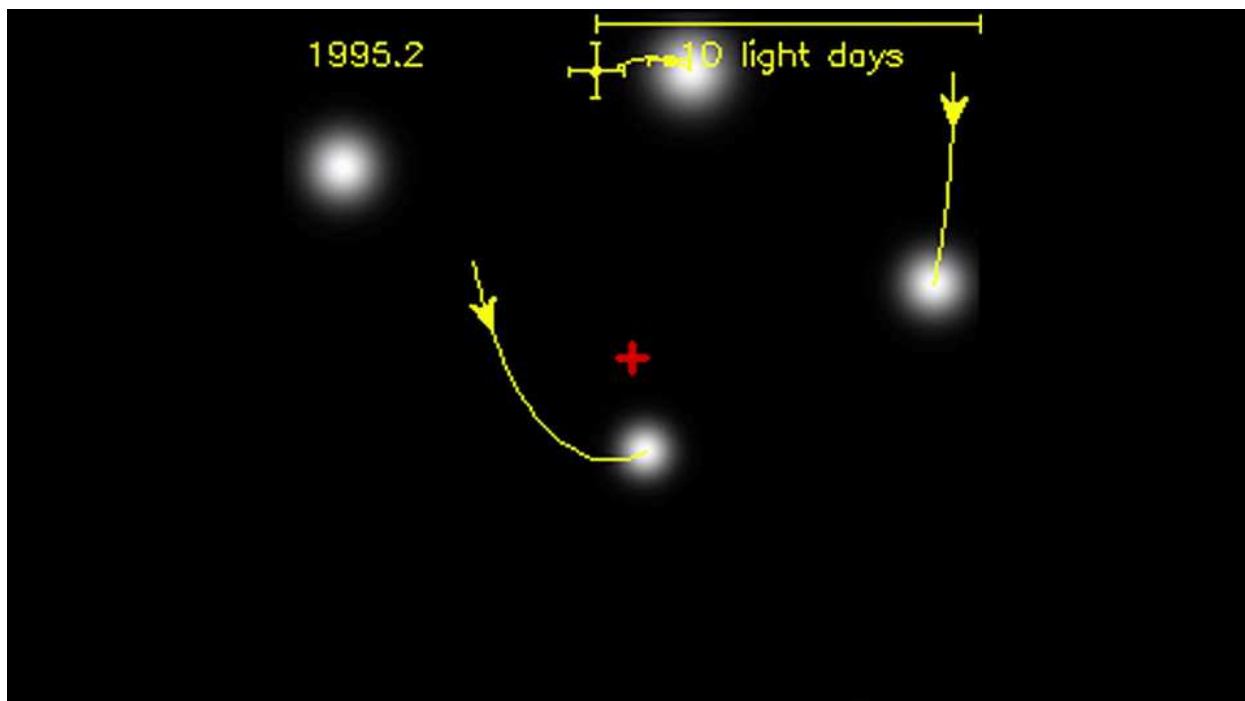


Rys. 2. Zdjęcie czarnej dziury, a w zasadzie jej cienia, znajdującej się w centrum galaktyki M87, wygenerowane z obserwacji teleskopem EHT. Granica czarnej dziury – horyzont zdarzeń – jest około 2,5 razy mniejsza niż rzucany przez nią cień. W tym przypadku cieniem nazywa się obszar wokół czarnej dziury, większy od obszaru horyzontu zdarzeń, w obrębie którego nie widać promieniowania od świecącej materii. Mierzy prawie 40 miliardów kilometrów średnicy. Szacuje się, że masa tej czarnej dziury jest 7 miliardów razy większa od masy naszego Słońca .

Źródło: ESO/EHT Collaboration, dostępny w internecie: <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/> [dostęp 20.03.2022].

W naszej Galaktyce – Drodze Mlecznej – też znajduje się supermasywna czarna dziura, mimo że Droga Mleczna jest galaktyką spokojną. Potrafimy z Ziemi obserwować ruch gwiazd w jej centrum (Rys. 3.). Dzięki dokładnej analizie ruchów gwiazd znajdujących się w centrum Galaktyki można wnioskować o obecności czarnej dziury, którą nazwano Sagittarius A* (od nazwy gwiazdozbioru, w którym jest zlokalizowana – łac. Sagittarius – Strzelec). Gwiazdy w centrum bardzo szybko poruszają się wokół ciemnego centralnego punktu. Dzięki wyliczeniom bazującym na III prawie Keplera wiadomo, ile wynosi masa niewidocznego obiektu centralnego, wokół którego krążą gwiazdy. Z wyliczeń tych wynika, że jedyne ciało, które ma tak ogromną masę w tak niewielkiej objętości to supermasywna czarna dziura. Szacuje się, że SgrA* ma masę ponad 4 milionów mas Słońca. Jej promień może mieć około 0,06 au (ang. *astronomical unit* oznacza jednostkę astronomiczną) czyli dziewięć milionów kilometrów.

Gwiazdy poruszające się wokół centrum Galaktyki często mają silnie spłaszczone orbity. W pobliżu tego centrum osiągają więc ogromne prędkości rzędu tysięcy kilometrów na sekundę. Ponadto zaobserwowano bezpośrednio jak chmura gazu w swoim ruchu wokół środka Galaktyki, zbliża się do horyzontu zdarzeń SgrA* na tyle blisko, że znacząco zmieniała swój kształt pod wpływem silnego pola grawitacyjnego. Tego typu obserwacje świadczą o obecności czarnej dziury.



Film dostępny pod adresem [/preview/resource/RISBeBO7KDAif](#)

Rys. 3. Animacja z prawdziwych obserwacji ruchu gwiazd wokół czarnej dziury.

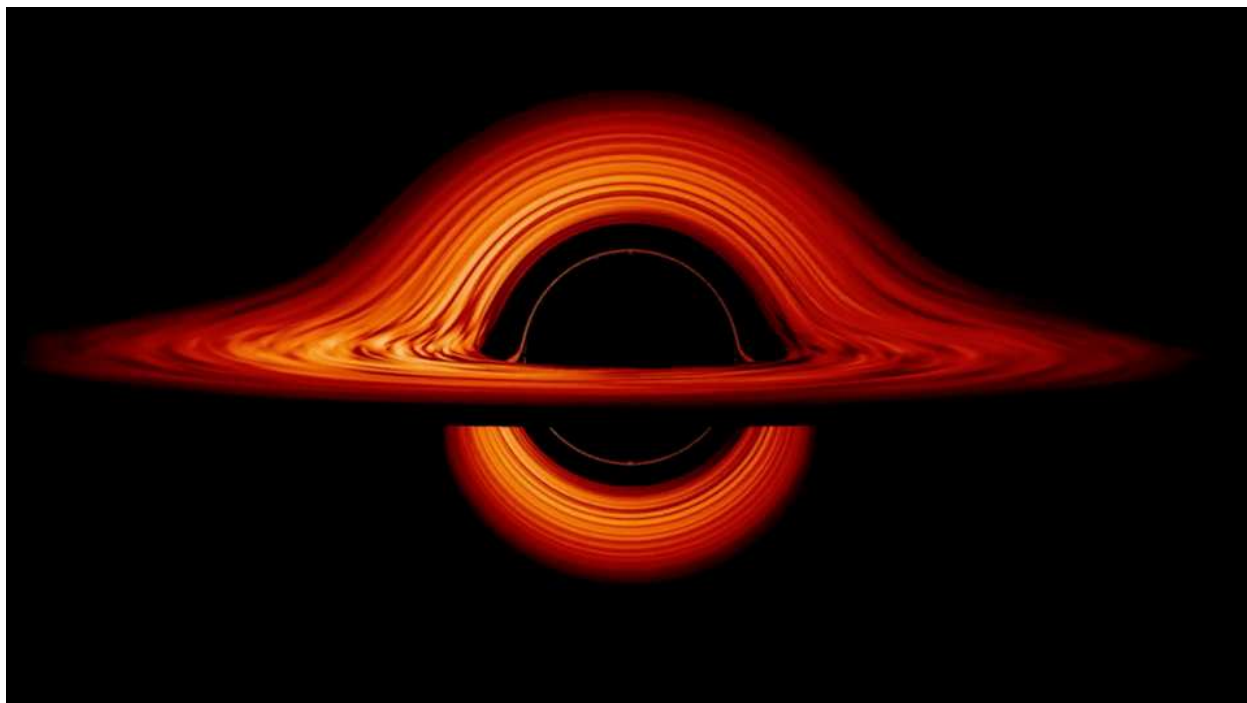
Źródło: ESA, domena publiczna.

Animacja przedstawia ruch gwiazd w pobliżu czarnej dziury, zaobserwowany w realnych badaniach. Na animacji widocznych jest wiele jasnych obiektów przedstawiających gwiazdy znajdujące się w pobliżu centrum galaktyki. Tło animacji jest czarne. W górnej części animacji, po lewej stronie znajduje się żółty, cyfrowy licznik odmierzający czas od początku 1992 roku do końca 2003 roku. Również u góry, po prawej stronie znajduje się narysowany żółtym kolorem krótki odcinek, obrazujący dziesięć dni świetlnych, czyli odległość jaką światło pokonuje w próżni w ciągu dziesięciu dni. Odcinek ten stanowi odniesienie do skali przemieszczeń gwiazd w czasie. Jasne punkty w miarę upływu czasu poruszają się po torach eliptycznych. Kiedy licznik zbliża się do końca 2003 roku następuje zatrzymanie obrazu, a licznik wraca do początku roku 1992. W centrum ekranu pojawia się żółty kwadrat, pusty w środku, który otacza kilka gwiazd w centralnej części obrazu. Następuje zbliżenie na środek obrazu. Ograniczony żółtym kwadratem. Licznik zaczyna odmierzać czas od początku. Gwiazdy ponownie zaczynają się poruszać po eliptycznych orbitach. Jedna z nich poruszająca się po elipsie, której długa oś skierowana jest pionowo zostaje wyróżniona. W miarę jej ruchu rysowany jest za nią żółtą linią ślad, który po dojściu licznika do prawie połowy 2006 roku zostaje zamknięty. Czasie od początku 1992 roku do połowy 2006 roku gwiazda ta dokonała pełnego obrotu po swojej orbicie wokół czarnej dziury stanowiącej centrum galaktyki. Na żółtym eliptycznym torze zakreślonym przez gwiazdę widoczne są żółte krzyżyki oznaczające punkty pomiarowe. Punkty te to położenia gwiazdy w funkcji czasu określane na podstawie realnych zdjęć. Na ekranie widoczny jest dodatkowo fragment analogicznego toru innej gwiazdy poruszającej się po prawej stronie gwiazdy wyróżnionej.

Podsumowując:

Supermasywnych czarnych dziur poszukuje się w centrach galaktyk, analizując dokładnie ruch świecącej materii w tych regionach, oraz dokładnie badając aktywność centrów tych galaktyk. Na podstawie takich obserwacji wnioskuje się o obecności czarnej dziury i wyznacza się jej masę (Rys. 4.).

Na symulacji czarny obszar w środku to cień czarnej dziury; jest on znacznie większy od rzeczywistych rozmiarów obiektu. Żółtoczerwone pasma wokół cienia obrazują dysk akrecyjny. Przebieg pasm jest zniekształcony, ponieważ promieniowanie materii z dysku zostało „zsoczewkowkowane” przez czarną dziurę – jej pole grawitacyjne silnie zakrzywia bieg promieni. Górne i dolne pasmo dysku to tak naprawdę obraz dysku zza czarnej dziury – dolne pasmo to tylna część dysku, jaką widzielibyśmy od dołu, a górne pasmo to dysk jakim widzielibyśmy go od góry.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R10100mLOhkxk>

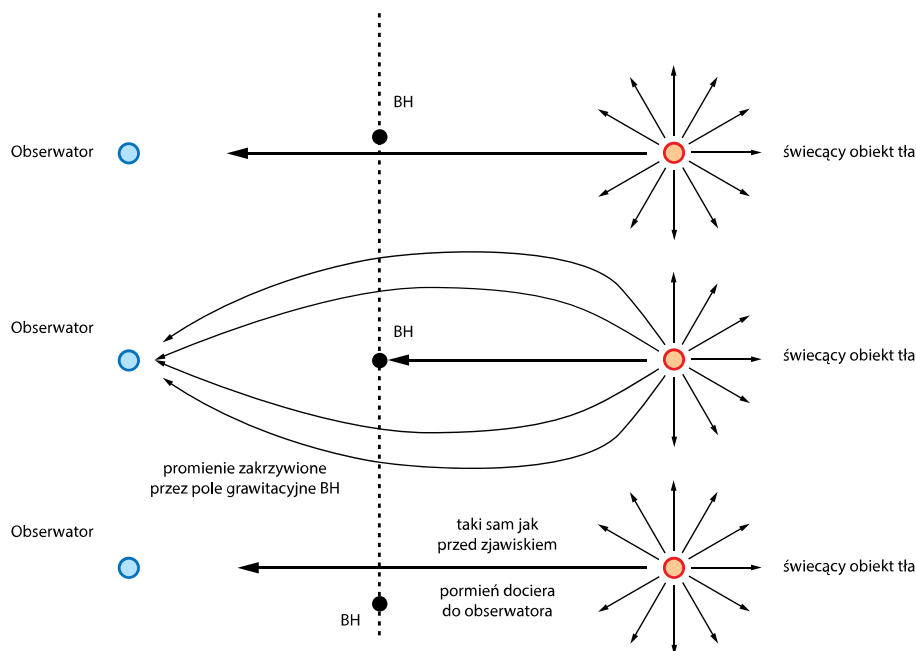
Rys. 4. Symulacja przygotowana przez NASA pokazująca, w jaki sposób może wyglądać czarna dziura z otaczającym ją dyskiem akrecyjnym.

Źródło: NASA, https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/bh_accretiondisk_sim_stationary_websize.gif, domena publiczna.

Rys. 4. Na ilustracji pokazana jest animacja wyobrażająca jak może wyglądać czarna dziura z dyskiem akrecyjnym. W środku jest czarna okrągła przestrzeń, którą otaczają dwa pierścienie wirującej świecącej materii. Pierścień jeden leży w płaszczyźnie ilustracji, drugi w płaszczyźnie prostopadłej. Świecąca materia składa się z wąskich strug w kolorach od jasnożółtej do brązowej. Ilustracja jest na czarnym tle – bo w kosmosie jest czarno.

Problem jest znacznie większy, gdy chcemy znaleźć czarną dziurę o masie porównywalnej z masą gwiazdy. Przestrzeń międzygwiazdowa jest olbrzymią pustką. Odległości między gwiazdami są bardzo duże. Jeżeli w przestrzeni znajduje się czarna dziura, która nie emituje promieniowania, to prawdopodobieństwo, że znajdzie się obok niej gwiazda, której tor zostanie zakrzywiony wskutek działania grawitacji czarnej dziury, jest znikome. Są dwie główne metody poszukiwania i badania czarnych dziur o stosunkowo małej masie, porównywalnej z masą gwiazd.

Jedną z tych metod jest mikrosoczewkowanie grawitacyjne (Rys. 5.). Zdarza się, że czarna dziura praktycznie przecina linię łączącą Ziemię z odległym świecącym obiektem - gwiazdą lub galaktyką. Powoduje to krótkotrwałe silne zakrzywienie światła biegnącego ku Ziemi, a światło trafiające w obręb horyzontu zdarzeń pochłaniane jest całkowicie. Obiekt w charakterystyczny sposób gwałtownie zmienia swoją jasność. Czasami zdarza się również, że obraz galaktyki znajdującej się za czarną dziurą zostaje na krótki czas zniekształcony - rozmywa się w łuk świetlny (Rys. 6.).



Rys. 5. Schemat przedstawiający zjawisko soczewkowania grawitacyjnego. Z lewej strony obserwator, pośrodku przemieszczająca się czarna dziura (BH), z prawej strony świecący obiekt tła, (odległa jasna gwiazda, galaktyka). Aby doszło do soczewkowania grawitacyjnego, czarna dziura - soczewka - musi przejść przez linię pomiędzy obiektem tła a obserwatorem

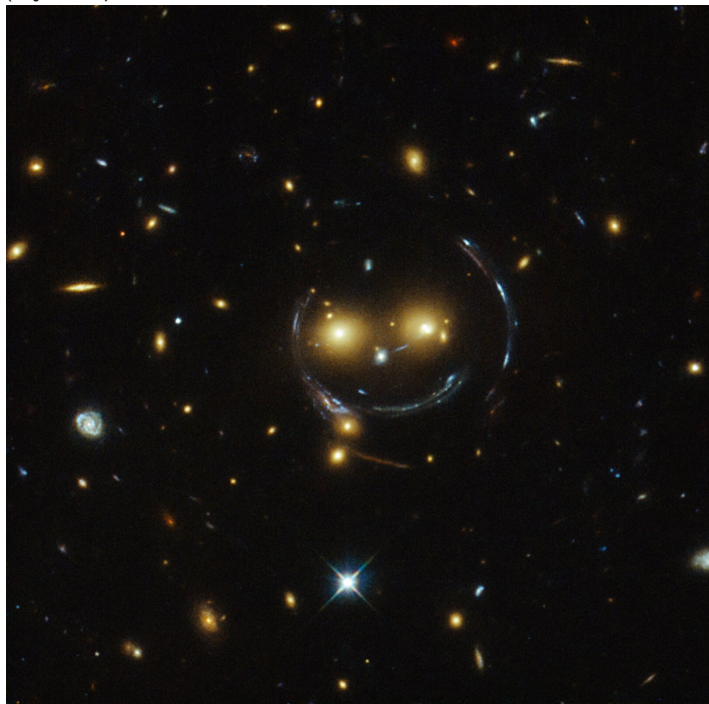
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Bardzo dokładnie analizując zmianę pojaśnienia obiektu w tle oraz sposób, w jaki obraz obiektu zostaje zniekształcony, możemy oszacować rozmiar czarnej dziury. Takie obliczenia wymagają jednak bardzo precyzyjnych, dokładnych pomiarów jasności obiektu tła i matematycznej analizy tej zmienności. Metoda ta pozwala wykryć różnego rodzaju ciała, które nie świecą, lecz ma kilka wad:

- jest to zjawisko krótkotrwałe i niepowtarzalne,

- ciemny obiekt taki jak czarna dziura musi znajdować się na linii pomiędzy obserwatorem, czyli Ziemią, a świecącym w tle ciałem,
- trzeba mieć obserwacje porównawcze tego fragmentu nieba, aby zauważyć charakterystyczną zmianę jasności.

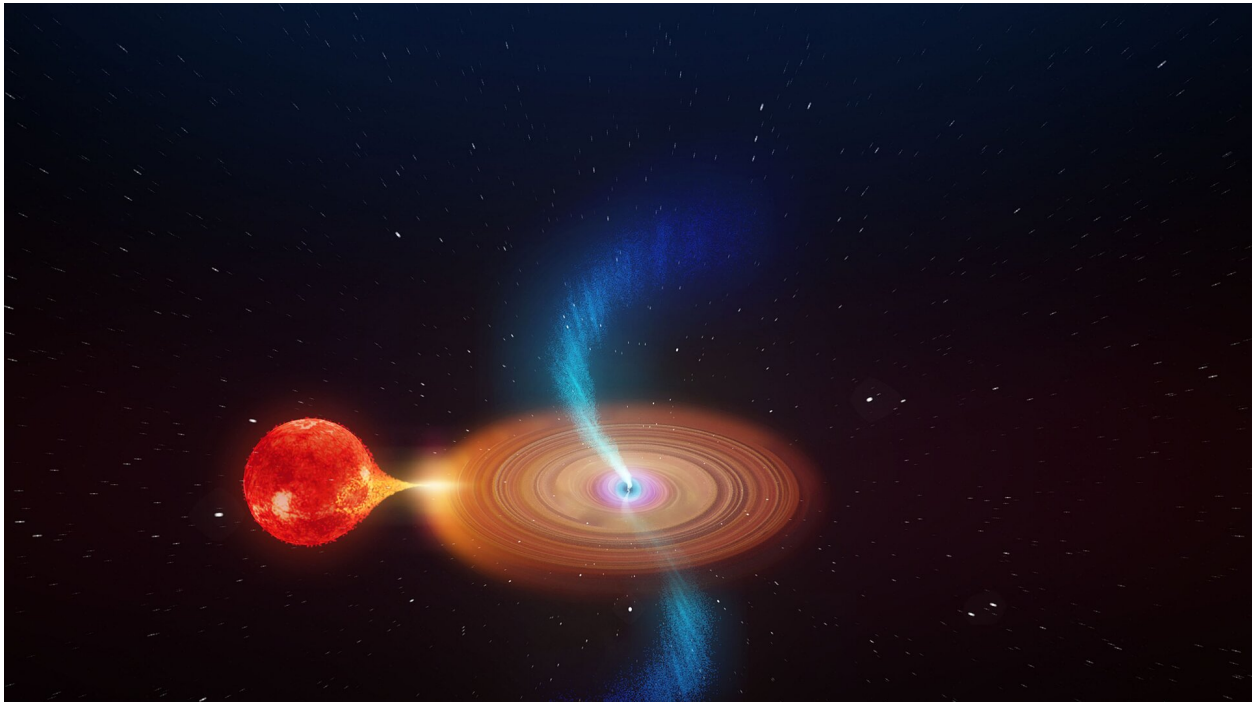
Oczywiście soczewkowanie grawitacyjne może odbywać się też na masywnych obiektach, takich jak galaktyki. Takie zjawisko często fotografowane jest przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a. Pole grawitacyjne masywnej czarnej dziury znajdującej się w centrum jakiejś galaktyki, zakrzywia promieniowanie biegnące w stronę obserwatora od dalszych galaktyk. W efekcie na zdjęciu dalekiego nieba widzimy zniekształcony obraz galaktyk, na przykład rozciągniętych w łuk (Rys. 6.).



Rys. 6. Zdjęcie gromady galaktyki SDSS J1038+4849 wykonane Kosmicznym Teleskopem Hubble'a (HST). Dwie bardzo jasne, masywne galaktyki (żółte „oczy” w środku zdjęcia) otoczone są zniekształconym obrazem galaktyk. Zniekształcenie jest wynikiem silnego soczewkowania grawitacyjnego galaktyk.
 Źródło: NASA/Sarah Loff, dostępny w internecie: <https://www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens> [dostęp 20.03.2022].

Wiele gwiazd na niebie jest związanych ze sobą grawitacyjnie. Obracają się one wokół wspólnego środka masy. Znacząca część gwiazd jest w tzw. układach podwójnych. Gwiazdy znajdujące się w takim układzie ewoluują trochę inaczej niż w przypadku gwiazd pojedynczych. Często zdarza się, że masywny składnik bardzo ciasnego układu podwójnego, który miał początkową masę ponad 20 mas Słońca, szybko przejdzie przez etapy ewolucji i zapadnie się do niewielkiej objętości kończąc w ten sposób życie gwiazdy jako czarna dziura. Drugi składnik tego układu cały czas poddawany jest działaniu pola grawitacyjnego swojego kompana. Część masy z drugiego składnika będzie transportowana na tak powstałą czarną dziurę. Jeżeli transfer przebiegać będzie spokojnie, to wokół czarnej dziury wytworzy się dysk akrecyjny, który będzie świecić. Świecenie materii wynika z intensywnego nagrzewania się tej materii związanego ze zwiększaniem jej prędkości wokół czarnej dziury oraz utratą energii potencjalnej. Jeżeli transfer masy jest dynamiczny,

przebiega bardzo szybko, to pomiędzy dużą gwiazdą a czarną dziurą wytworzy się rozbłysk. Obserwacja czarnych dziur w układach podwójnych jest trochę podobna do analizy supermasywnych czarnych dziur w galaktykach aktywnych. W obu przypadkach materia spadająca na czarną dziurę świeci w postaci dysku lub wystrzeliwana jest w postaci wysokoenergetycznych jetów i właśnie to zjawisko możemy zaobserwować (Rys. 7).



Rys. 7. Wizja artystyczna pokazująca transfer masy z dużej gwiazdy na czarną dziurę. Opadająca masa tworzy świecący dysk oraz wyrzuca z biegunów czarnej dziury świecące strugi materii (tak zwane jety).

Źródło: ESA/ICRAR, dostępny w internecie:

https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Scientists_get_to_the_bottom_of_a_spitting_black_hole [dostęp 20.03.2022].

Obecnie często odkrywane są czarne dziury w układach podwójnych, dzięki rozgrzewającemu się dyskowi akrecyjnemu. Ogólnie szacuje się, że jest ponad 100 milionów niewielkich czarnych dziur w Drodze Mlecznej. Świadczy to o tym, że jest to dość powszechny obiekt we Wszechświecie. Skoro odkrywa się dużo czarnych dziur w układach podwójnych, to prawdopodobnie podobna ilość czarnych dziur porusza się pojedynczo niezauważona w Galaktyce.

Mimo tego, że nie potrafimy bezpośrednio i dokładnie analizować czarnych dziur tak, jak materii świecącej w kosmosie, to astronomowie są pewni istnienia takich obiektów. Pytanie, na które astronomowie próbują znaleźć odpowiedź związane jest z rozmiarami czarnych dziur. Znane są czarne dziury o wielkościach gwiazd oraz supermasywne czarne dziury w centrach galaktyk. Jednak do tej pory nie odkryto czarnej dziury o masie pośredniej, czyli na przykład mającej kilkadziesiąt tysięcy mas Słońca.

Słowniczek

Czarna dziura

(ang. *black hole*) – obiekt, obszar czasoprzestrzeni, o pewnej masie ściśniętej w bardzo małej przestrzeni, posiadający jedynie pole grawitacyjne.

Horyzont zdarzeń

(ang. *event horizon*) – matematycznie zdefiniowana powierzchnia określana jako granica czarnej dziury. Po przekroczeniu horyzontu zdarzeń nie da się opuścić czarnej dziury.

Akrecja

(ang. *accretion*) – opadanie materii na powierzchnię ciała niebieskiego w wyniku działania grawitacji tego ciała. Zjawisku może towarzyszyć wydzielanie energii w postaci promieniowania w wyniku utraty energii potencjalnej materii.

Film edukacyjny

Skąd wnioskować o obecności czarnych dziur?

Film edukacyjny to wywiad z dr hab. Łukaszem Wyrzykowskim. Jednym z wiodących polskich astronomów zajmujących się poszukiwaniem czarnych dziur wielkości gwiazdowych.

[Film dostępny na portalu epodreczniki.pl](#)

Wysłuchaj wywiadu.

Polecenie 1

Czy już wiesz, dlaczego czarne dziury są czarne?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Czy można obserwować bezpośrednio czarną dziurę?

Odpowiedź: tak / nie

Ćwiczenie 2



Wybierz z poniższych sposoby obserwacji czarnych dziur.

Obserwacja wysokoenergetycznych jetów

Zdjęcia rentgenowskie

Soczewkowanie grawitacyjne

Obserwacja akrecji materii

Bezpośrednie obrazowanie

Ruch ciał wokół środka masy

Ćwiczenie 3



Wybierz odpowiednie uzupełnienie zdań w tekście.

Słońce ściśnięte do kuli o promieniu mniejszym / większym od promienia Schwarzschilda stałoby się czarną dziurą. Promień Schwarzschilda dla Jowisza wynosi zaledwie 2,82 metry, a dla Ziemi niecałe 9 milimetrów. Każdy obiekt, którego promień jest większy / mniejszy niż promień Schwarzschilda definiowany jest jako czarna dziura / gwiazda-olbrzym , której horyzont zdarzeń ma promień równy promieniowi Schwarzschilda / dwa razy większy niż promień Schwarzschilda .

Ćwiczenie 4



Oszacuj rozmiar, do jakiego musiałby skurczyć się człowiek, aby stać się czarną dziurą. Przyjmij, że przeciętna masa człowieka to 70 kg.

Promień czarnej dziury o masie przeciętnego człowieka jest rzędu 10 m.

Ćwiczenie 5



Przeczytaj poniższy tekst. Na jego podstawie oblicz, jaką prędkość miał zauważony przez naukowców gaz w pobliżu czarnej dziury – Sgr A*. Wynik podaj w zaokrągleniu do pełnych km/s.

„W artykule opublikowanym 31 października 2018 r. ogłoszono odkrycie rozstrzygających dowodów na to, że Sgr A jest czarną dziurą. Wykorzystując interferometr GRAVITY i cztery teleskopy Very Large Telescope (VLT) do stworzenia wirtualnego teleskopu o średnicy 130 metrów, astronomowie wykryli kępy gazu poruszające się z prędkością około 30% prędkości światła. Emisja z wysokoenergetycznych elektronów bardzo blisko czarnej dziury była widoczna jako trzy wyraźne jasne rozbłyski. Dokładnie pasują one do teoretycznych prognoz dotyczących gorących punktów krążących blisko czarnej dziury o masie czterech milionów mas Słońca. Uważa się, że rozbłyski powstają w wyniku interakcji magnetycznych w bardzo gorącym gazie krążącym bardzo blisko Sagittarius A*.”*

Odpowiedź: km/s

Ćwiczenie 6



Szacuje się, że w naszej Galaktyce jest ... czarnych dziur, mimo że odkryto ich zaledwie kilkadziesiąt. Wybierz prawidłową odpowiedź.

10^3

10^4

10^6

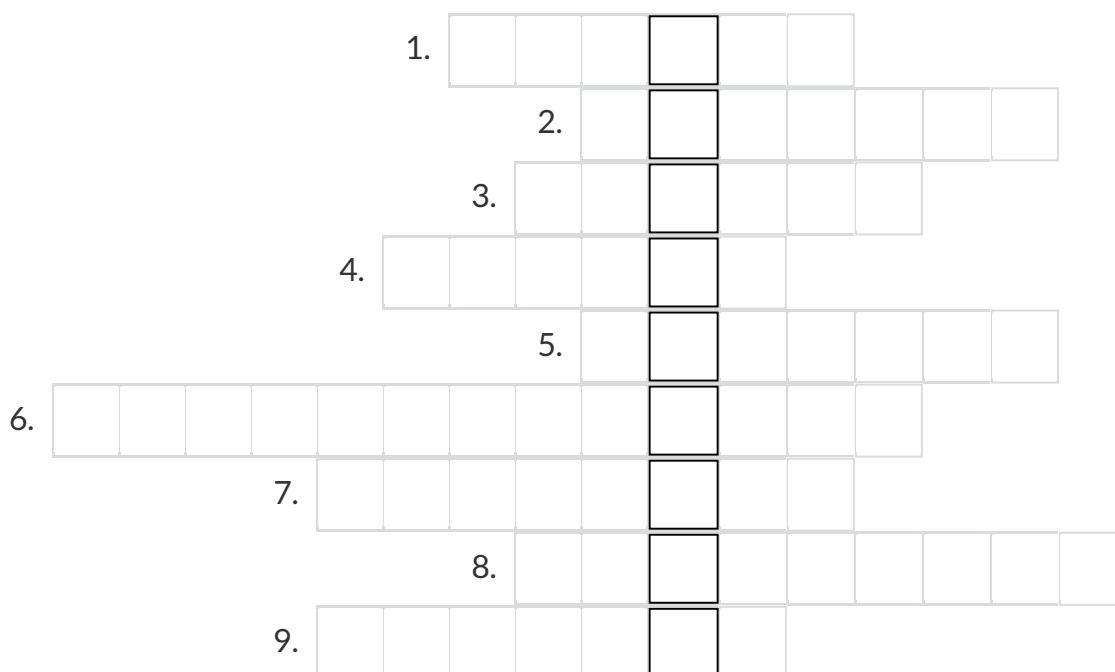
10^8

10^{12}

Ćwiczenie 7



Rozwiąż krzyżówkę.



1. Nazwisko amerykańskiego astronoma XX wieku, którego nazwiskiem nazwano wielki Kosmiczny teleskop – HST. Teleskop ten wykonuje zdjęcia odległego kosmosu, na których widać soczewkowanie grawitacyjne galaktyk.
2. Nasza galaktyka to Droga ...
3. Obiekt, który nie świeci i nie odbija promieniowania to dziura.
4. Często przy pomocy masy tej gwiazdy określa się masę różnych obiektów w kosmosie.
5. Opadanie materii na powierzchnię ciała niebieskiego w wyniku działania grawitacji tego ciała.
6. Nazwisko naukowca, którego nazwiskiem określa się promień wyrażony wzorem:
$$R_{schw} = \frac{2GM}{c^2}$$
7. Jak nazywa się obszar wokół czarnej dziury, który można zdefiniować promieniem Schwarzschilda?
8. Mogą być aktywne lub spokojne. Najnowsze hipotezy zakładają, że w każdej z nich jest supermasywna czarna dziura.
9. Granicę wokół czarnej dziury, po przekroczeniu której żadne ciało ani promieniowanie nie będzie w stanie opuścić pola grawitacyjnego czarnej dziury po angielsku nazywa się event horizon. Jak po polsku tłumaczy się w tej nazwie słowo „event”?

Ćwiczenie 8



Czy czarne dziury mogą mieć dowolne masy? Czy istnieją czarne dziury wielkości pośrednich?

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Monika Sitek
Przedmiot:	fizyka
Temat zajęć:	Skąd można wnioskować o obecności czarnych dziur?
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa:

Cele kształcenia – wymagania ogólne

I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.

II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.

IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych.

Zakres podstawowy

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;

16) przedstawia własnymi słowami główne tezy tekstu popularnonaukowego z dziedziny fizyki lub astronomii;

17) przedstawia wybrane informacje z historii odkryć kluczowych dla rozwoju fizyki.

XI. Fizyka jądrowa. Uczeń:

12) opisuje elementy ewolucji gwiazd; omawia supernowe i czarne dziury.

Zakres rozszerzony

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;

17) przedstawia wybrane informacje z historii odkryć kluczowych dla rozwoju fizyki;

18) przedstawia własnymi słowami główne tezy tekstu popularnonaukowego z dziedziny fizyki lub astronomii.

XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa.

Uczeń:

18) opisuje elementy ewolucji gwiazd; omawia supernowe i czarne dziury.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r. <ul style="list-style-type: none"> • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. wyjaśnia czym jest czarna dziura i podaje rodzaje czarnych dziur; 2. opisuje metody pośrednie badania czarnych dziur różnych wielkości; 3. analizuje problemy związane z obserwacjami czarnych dziur.
Strategie nauczania:	flipped-classroom
Metody nauczania:	burza mózgów, analiza pomysłów
Formy zajęć:	praca indywidualna, praca w parach
Środki dydaktyczne:	urządzenia multimedialne dla par uczniów, tablica
Materiały pomocnicze:	e-materiał „Co to jest czarna dziura”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca: <p>Materiał o obserwacjach czarnych dziur należy wprowadzić, dopiero gdy uczniowie zapoznali się z definicją czarnej dziury, rozumieją czym ona jest. Ewentualnie można połączyć obie lekcje w całość.</p> <p>Uczniowie samodzielnie w domu zapoznają się z całym e-materiałem.</p> <p>Na lekcji nauczyciel w ramach powtórzenia pyta uczniów o podstawowe właściwości czarnych dziur. Uczniowie wspólnie wypisują na tablicy cechy czarnych dziur.</p> <p>Następnie nauczyciel wraz z uczniami określa jakie mamy rodzaje czarnych dziur i czym one się od siebie różnią. Czy sposób obserwacji czarnej dziury zależy od jej wielkości? - uczniowie rozpoczynają burzę mózgów.</p>	
Faza realizacyjna:	

Uczniowie wspólnie dyskutują nad problemami związanymi z obserwacjami czarnych dziur. Jak można obserwować czarne dziury w centrach galaktyk? Jak można obserwować czarne dziury wielkości gwiazd? Jakie są istotne różnice w takich obserwacjach a jakie są cechy wspólne?

Wszystkie zaproponowane metody, rozwiązania, które padają w czasie dyskusji zostają zapisane na tablicy.

Faza podsumowująca:

Uczniowie w parach wykonują zadania sprawdzające z tego e-materiału. Dla poziomu podstawowego pierwsze 5 zadań (co najmniej), dla zakresu rozszerzonego wszystkie zadania. Uczniowie w czasie pracy mogą się konsultować pomiędzy parami i w tematach spornych dyskutować na łamach całej klasy, tak aby wspólnie dość do rozwiązania zagadnienia.

Praca domowa:

Uczniowie z poziomu podstawowego: piszą krótki referat, opowiadanie o tym w jaki sposób badaliby wybraną przez siebie czarną dziurę. Muszą zachować wszystkie naukowe fakty, bazować na dyskusji z lekcji i zdobytej wiedzy.

Uczniowie poziomu rozszerzonego: Szukają w dostępnych materiałach (książki, internet, publikacje naukowe) informacji o jakiejś wybranej czarnej dziurze. Opisują pokrótce metody badania tego wybranego obiektu. Wyjaśniają dlaczego tak, a nie inaczej obserwuje się ten obiekt oraz dlaczego inne metody w tym przypadku zawiodły.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium

Film edukacyjny, uczniowie, mogą oglądać w fazie wprowadzającej lekcji lub po lekcji w domu.