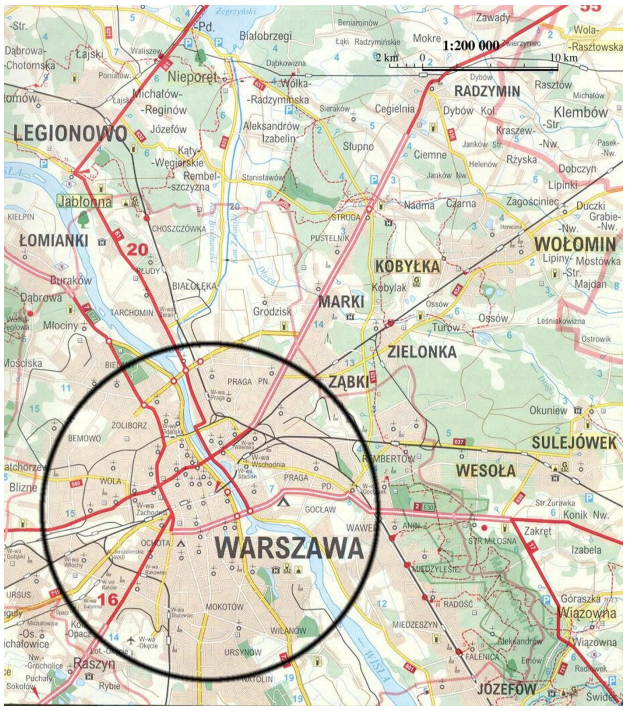
Gwiazdy neutronowe i czarne dziury

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Audiobook
- Film samouczek
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://cdn.eso.org/images/original/eso1907a.tif [dostęp 12.06.2022], domena publiczna.

Czy to nie ciekawe?

Gwiazdy neutronowe to jedne z najdziwniejszych obiektów we Wszechświecie. Materia o masie około 2 mas Słońca została ściśnięta do kuli o promieniu kilkunastu kilometrów. Na ilustracji pokazano mapę Warszawy z zaznaczonym typowym rozmiarem gwiazdy neutronowej (Rys. a.). Gęstość gwiazdy neutronowej to miliard ton na cm^3. Gwiazda neutronowa składa się głównie z neutronów. Można ją porównać z gigantycznym jądrem atomowym zawierającym 99,5% neutronów i 0,5% protonów. Bardzo szybko wiruje, nawet do 700 razy na sekundę i wytwarza niezwykle silne pole magnetyczne – miliony razy silniejsze niż najsilniejsze pola magnetyczne, jakie potrafimy wytwarzać na Ziemi. Materii we wnętrzach gwiazd neutronowych nie można badać bezpośrednio. Informacji o ich strukturze dostarczają teoretyczne badania materii jądrowej.



Rys. a. Średnica gwiazdy neutronowej jest porównywalna z rozmiarami miasta.

Źródło: tylko do użytku edukacyjnego na zpe.gov.pl. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Gdyby masę gwiazdy neutronowej nieco zwiększyć, stałaby się czarną dziurą – obiektem o tak silnej grawitacji, że nic, nawet światło, nie może się z niego wydostać. O tym, jak wygląda wnętrze czarnej dziury, wiemy jeszcze mniej niż w przypadku gwiazd neutronowych. Aby opisać wnętrze czarnej dziury, trzeba by połączyć teorię grawitacji z mechaniką kwantową, a takiej teorii jeszcze nie ma.

Twoje cele

- Zrozumiesz, jak powstaje gwiazda neutronowa.
- Poznasz właściwości gwiazd neutronowych.
- Dowiesz się, czym jest czarna dziura.
- Przeanalizujesz, jak zmienia się promieniowanie emitowane z gwiazdy, zapadającej się w czarną dziurę.
- Przekonasz się, jakie jest źródło ogromnej energii kwazarów.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Gwiazdy neutronowe

Gwiazdy neutronowe są końcowym stadium ewolucji gwiazd od 10 do 20 razy masywniejszych od Słońca. Źródłem energii gwiazd są zachodzące w centrum reakcje termojądrowe, czyli łączenie się lżejszych jąder atomowych w cięższe. Wydzielająca się przy tym energia powoduje powstanie ciśnienia równoważącego zgniatające siły grawitacji. Największym jądrem atomowym, jakie może w tym procesie powstać jest jądro żelaza, bowiem synteza większych jąder wymagałaby dostarczania energii. Gdy środek gwiazdy wypełnia całkowicie żelazo, reakcje termojądrowe ustają i nic już nie powstrzymuje sił grawitacji. Rdzeń gwiazdy gwałtownie zapada się, a pozostała materia gwiazdy ulega rozproszeniu w wybuchu supernowej.

Temperatura zapadającego się rdzenia gwiazdy gwałtownie wzrasta. Wskutek tego jądra żelaza rozpadają się na neutrony i protony. Elektrony łączą się z protonami, w wyniku czego powstają neutrony i neutrina – bardzo przenikliwe, lekkie cząstki elementarne. Reakcję tę możemy zapisać:

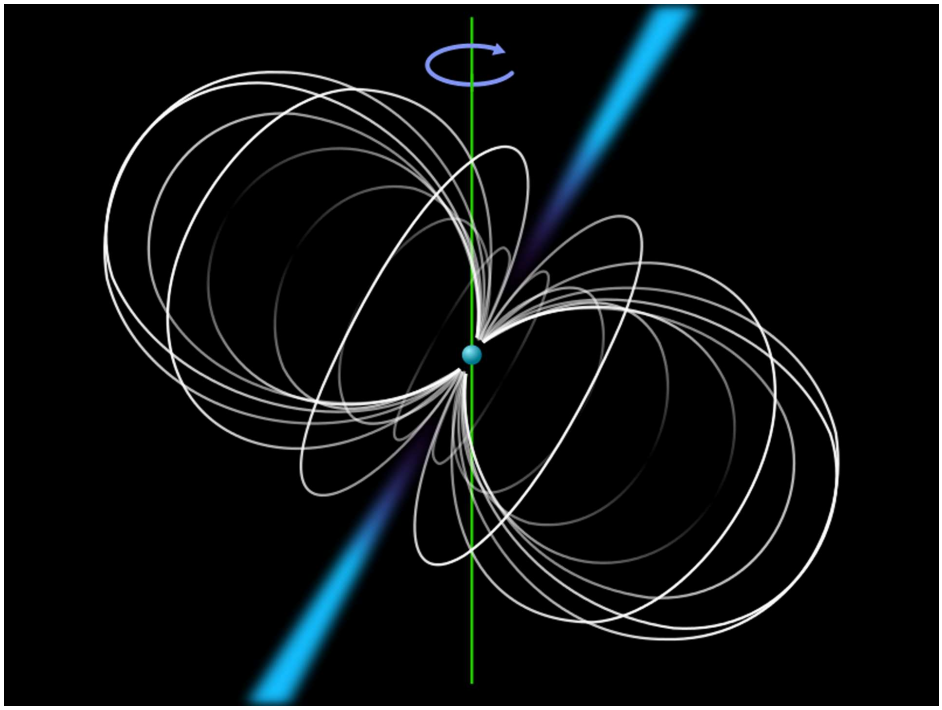
$$\mathrm{p}^{+} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow \mathrm{n} + \nu$$

gdzie p^+ to dodatnio naładowany proton, e^- – ujemny elektron, n – neutron, ν – neutrino (neutron i neutrino są obojętne elektrycznie). Neutrony pozostają w nowo powstałej gwieździe neutronowej, a przenikliwe neutrina opuszczają gwiazdę.

Jak sugerują współczesne modele budowy gwiazd neutronowych, cienką skorupę zewnętrzną gwiazdy neutronowej tworzy sieć krystaliczna jąder żelaza. Powierzchnia jest twarda i gładka – najwyższe góry nie przekraczają mikrometra. Bezpośrednio pod skorupą zewnętrzną występują duże jądra atomowe o znacznej nadwyżce neutronów zanurzone w gazie neutronowym. Na głębokości około 1 km struktury jądrowe zanikają. Głębiej materia gwiazdy neutronowej tworzy jednorodną ciecz złożoną głównie z neutronów, z niewielką domieszką protonów i elektronów.

Powstawaniu gwiazdy neutronowej towarzyszy bardzo szybki wzrost tempa jej rotacji, zgodnie z zasadą zachowania momentu pędu. Analogiczne zjawisko obserwujemy, gdy łyżwiarz wykonujący piruet, przyciąga ręce do tułowia, zwiększając swą prędkość kątową. Gwałtowne zapadanie się jądra gwiazdy powoduje też duży wzrost natężenia jej pola magnetycznego.

Swobodne elektrony krążą wokół linii pola magnetycznego, wychodzących z biegunów magnetycznych gwiazdy. Towarzyszy temu emisja dwóch wiązek fal elektromagnetycznych w zakresie od fal rentgenowskich do radiowych. Bieguny magnetyczne zwykle nie leżą na osi rotacji. Wiązka promieniowania wiruje wokół osi obrotu gwiazdy, tworząc tak zwany efekt latarni morskiej (Rys. 1.). Jeśli Ziemia znajdzie się na drodze wiązki promieniowania, możemy odbierać impulsowe sygnały, które docierają do Ziemi z dokładnością zegara atomowego. Właśnie w ten sposób odkryto pierwsze gwiazdy neutronowe, które z powodu mikroskopijnych (w skali kosmicznej) rozmiarów są niemożliwe do bezpośredniej obserwacji przez największe nawet teleskopy. Obiekty wysyłające błyski promieniowania elektromagnetycznego o okresie od milisekund do sekund nazwano **pulsarami**. Dziś wiemy, że są to gwiazdy neutronowe, których promieniowanie dociera do Ziemi. Znacznie więcej gwiazd neutronowych nie możemy zaobserwować, bo Ziemia nie leży na drodze wiązek ich promieniowania.



Rys. 1. Promieniowanie elektromagnetyczne emitowane jest przez gwiazdę neutronową z biegunów magnetycznych i skupione w wąskich wiązkach, które omiatają przestrzeń wskutek wirowania gwiazdy.
Źródło: dostępny w internecie: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/Pulsar_schematic.svg [dostęp 12.06.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

W momencie narodzin gwiazda neutronowa jest bardzo gorąca, ma temperaturę rzędu 10^{12} K. W ciągu kilku sekund temperatura spada poniżej 10^{11} K, czyli ponad dziesięciokrotnie. Chłodzenie to odbywa się w wyniku emisji neutrin powstających w procesie łączenia się protonów i elektronów. Rozkład temperatur w gwieździe neutronowej jest zaskakujący – najniższa temperatura jest w centrum, bo tam najwydajniej powstają neutrina, które bez przeszkód opuszczają gwiazdę neutronową, unosząc energię.

Czarne dziury

Gwiazdy neutronowe to końcowe stadium ewolucji gwiazd o masie nie przekraczającej 20 mas Słońca. A jak kończy się żywot gwiazdy o większej masie? W tym przypadku po

zakończeniu reakcji termojądrowej żelazny rdzeń gwiazdy jest zbyt duży i siła grawitacji zbyt wielka, by zapadanie się gwiazdy mogło cokolwiek zatrzymać. Gwiazda zapada się do czarnej dziury, czyli obiektu wywierającego tak wielką grawitację, że żadne ciało, a nawet światło nie może go opuścić. Czarna dziura powstaje w samym centrum gwiazdy, a znaczna zewnętrzna część masy gwiazdy zostaje odrzucona w wybuchu supernowej.

Istnienie czarnych dziur wynika z Ogólnej Teorii Względności Alberta Einsteina, która interpretuje grawitację jako zakrzywienie czasoprzestrzeni wokół każdego ciała obdarzonego masą. Niedługo po opublikowaniu równań Ogólnej Teorii Względności Karl Schwarzschild, młody niemiecki fizyk, znalazł ich rozwiązania dla przypadku sferycznie symetrycznej, czyli doskonale okrągłej gwiazdy. Gdy ta ma dużą masę i odpowiednio mały promień, otaczająca czasoprzestrzeń dziwnie się zachowuje. Wokół gwiazdy powstaje horyzont, który można przekroczyć tylko z zewnątrz. Nazywamy go **horyzontem zdarzeń**. Schwarzschild podał wartość promienia horyzontu zdarzeń, zwanego promieniem Schwarzschilda, który wyznacza rozmiary czarnej dziury:

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

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

Wygodnym sposobem na oszacowanie promienia Schwarzschilda jest przybliżona reguła:

Promień Schwarzschilda w kilometrach jest 3 razy większy niż masa obiektu w jednostkach masy Słońca.

Promień Schwarzschilda dla Słońca wynosi więc około 3 km, co oznacza, że Słońce ściśnięte do kuli o promieniu 3 km stałoby się czarną dziurą.

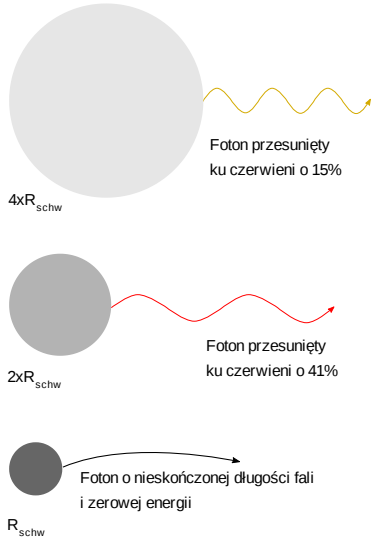
Nie wiadomo, co dzieje się z ciałem, które wpada do czarnej dziury. Prawdopodobnie ulega ono rozerwaniu na cząstki elementarne przez gigantyczne siły grawitacji. Zgodnie z Ogólną Teorią Względności zapadanie się czarnej dziury powoduje, że cała jej zawartość skupia się w końcu w centralnym punkcie, osiągając nieskończoną gęstość. Taki punkt nazywamy osobliwością. Stanowi ona problem dla fizyków, bo wszystkie równania załamują się w takim punkcie – po prostu nie umiemy go opisać.

Tuż nad horyzontem zdarzeń czasoprzestrzeń jest silnie zakrzywiona. Oznacza to spowolnienie upływu czasu. Grawitacyjne spowolnienie upływu czasu dotyczy każdego obiektu, jednak siły grawitacji, które możemy bezpośrednio obserwować są zbyt małe, aby ten efekt był łatwo mierzalny. Konsekwencją spowolnienia czasu jest grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni światła emitowanego z powierzchni gwiazdy. Skoro zwiększa się okres fali elektromagnetycznej, zmniejsza się jej częstotliwość, a więc zwiększa się długość fali.

Na przykład, na powierzchni Słońca spowolnienie czasu, a więc i $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ wynosi $2 \cdot 10^{-6}$ (λ to długość fali promieniowania emitowanego z dala od Słońca, $\Delta\lambda$ – zmiana długości fali

spowodowana grawitacją Słońca). Fakt ten został potwierdzony doświadczalnie przez Jima Braulta w latach 60. XX wieku. Efekt w przypadku Słońca jest bardzo mały i wykrycie go wymagało precyzyjnych pomiarów. Inaczej jest z czarnymi dziurami. W przypadku czarnej dziury o masie równej 10 masom Słońca na wysokości 1 cm nad jej horyzontem czas płynie 6 milionów razy wolniej niż z dala od niej.

Zrozumienie, dlaczego z czarnej dziury nie może wydostać się światło, ułatwi Rys. 2., który przedstawia 3 gwiazdy o jednakowej masie, ale różnych promieniach. Światło emitowane z masywnej gwiazdy ulega przesunięciu ku czerwieni tym większemu, im promień gwiazdy jest bliższy promieniowi Schwarzschilda. Jeśli promień gwiazdy jest 4 razy większy niż promień Schwarzschilda, to promieniowanie jest przesunięte ku czerwieni o 15%. Dla promienia 2 razy większego przesunięcie to wynosi już 41%. Natomiast gdy promień gwiazdy równy jest promieniowi Schwarzschilda, czyli gwiazda jest czarną dziurą, długość fali promieniowania emitowanego z jej powierzchni dąży do nieskończoności, a energia promieniowania dąży do zera. Oznacza to, że żadne promieniowanie nie jest emitowane.



Rys. 2. W miarę zapadania się masywnej gwiazdy w czarną dziurę zwiększa się długość fali jej promieniowania, aż w momencie przekroczenia promienia Schwarzschilda promieniowanie ustaje

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

Jak wyglądałaby zapadająca się gwiazda dla nieruchomego, zewnętrznego obserwatora?

Początkowo promień gwiazdy jest znacznie większy od promienia Schwarzschilda. Gwiazda zapada się coraz szybciej. W miarę zbliżania się do rozmiaru krytycznego, czas ulega wydłużeniu, dla obserwatora gwiazda zapada się coraz wolniej, a promieniowanie jest coraz bardziej przesunięte ku czerwieni. Gwiazda świeci coraz słabiej. W końcu zastyga dokładnie dla rozmiaru krytycznego. Przestaje być widoczna. Zostaje tylko grawitacja.

Tak opisał powstawanie czarnej dziury John Wheeler, jeden z twórców teorii czarnych dziur, laureat Nagrody Nobla, który wprowadził nazwę „czarna dziura”:

„Z powodu coraz szybszego zapadania się [powierzchnia gwiazdy] coraz szybciej oddala się od obserwatora. Emitowane przez nią światło ulega przesunięciu ku czerwieni. Z każdą milisekundą staje się bardziej nikłe i po czasie krótszym niż sekunda jest zbyt ciemne, by mogło być widoczne (…) [Gwiazda] jak kot z „Alicji w Krainie Czarów", przygasa i znika z pola widzenia. Kot pozostawia po sobie tylko uśmiech, gwiazda jedynie przyciąganie grawitacyjne. Przyciąganie grawitacyjne tak, światło nie. Podobnie jak światło nie wydostaje się z niej żadna cząstka. Co więcej, światło i cząstki nadbiegające z zewnątrz (…) i pochłaniane przez czarną dziurę zwiększają jej masę oraz wzmagają jej przyciąganie grawitacyjne."

Choć czarnych dziur nie można zobaczyć, mamy niezbite dowody na ich istnienie. Odkryto dwa rodzaje czarnych dziur:

- Gwiazdowe – o masach zbliżonych do mas zwykłych gwiazd, od kilku do kilkunastu razy większych od masy Słońca i rozmiarach od kilku do kilkudziesięciu kilometrów.
- Supermasywne – o masach miliony lub miliardy razy większych od masy Słońca i rozmiarach od kilku minut świetlnych do kilku dni świetlnych.

Gwiazdowe czarne dziury są końcowymi produktami ewolucji masywnych gwiazd, natomiast mechanizm powstawania supermasywnych czarnych dziur nie jest jasny.

Jak zobaczyć czarne dziury, skoro są czarne, nie świecą? Możemy zaobserwować skutki ich oddziaływania grawitacyjnego. Więcej informacji o obserwacji czarnych dziur znajdziesz w e-materiale „Skąd wnioskować o obecności czarnych dziur?"

Kwazary

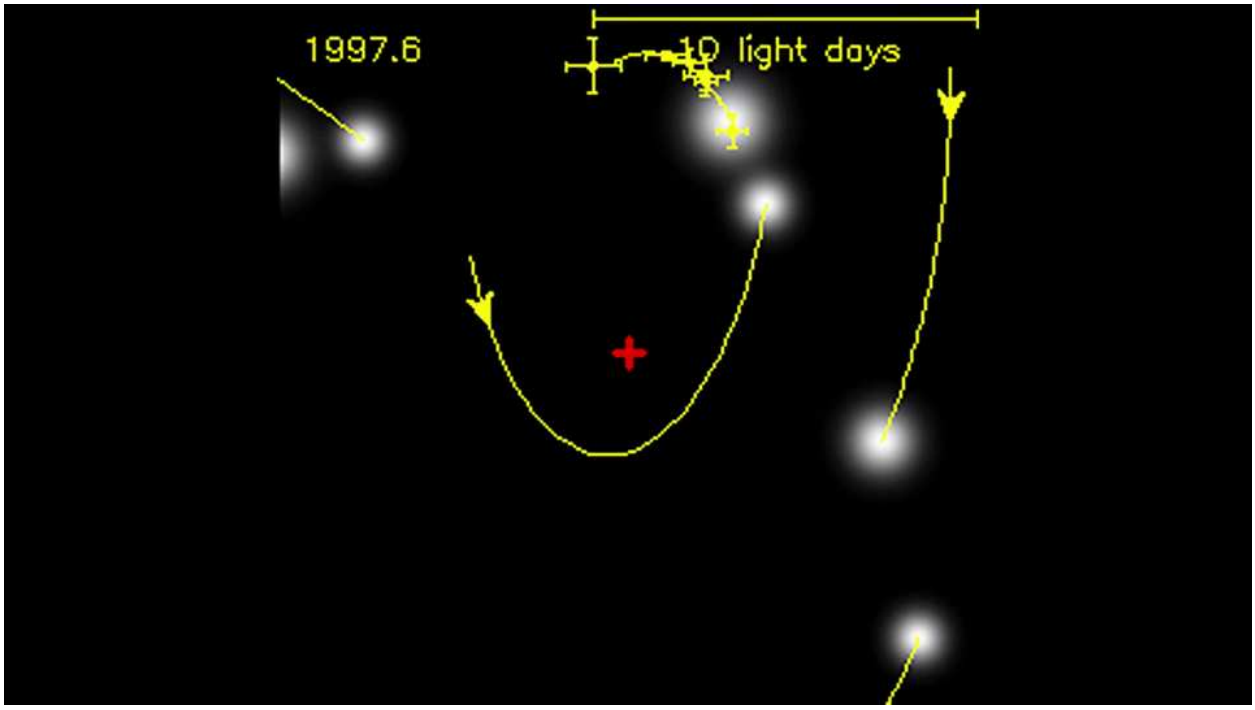
W roku 1960 odkryto źródła promieniowania radiowego o bardzo małych rozmiarach, które na zdjęciach wykonanych teleskopem optycznym wyglądały jak gwiazdy. Zdziwienie badaczy budziły widma promieniowania radiowego tych obiektów – niepodobne do widma promieniowania gwiazd, ani jakiegokolwiek znanego gorącego gazu. Dopiero po 3 latach, w 1963 roku, Maarten Schmidt z Caltechu (USA) rozpoznał w tajemniczych widmach dobrze znane linie Balmera, czyli promieniowanie emitowane przez gazowy wodór, ale tak silnie przesunięte ku czerwieni, że znalazły się w zakresie podczerwieni (najdłuższa fala to 656,3 nm, a najkrótsza to 364,6 nm). Analiza widm obiektów nazwanych kwazarami (z ang. Quasi-Stellar Object – obiekt gwiazdopodobny) prowadzi do wniosku, że oddalają się z prędkościami od kilkunastu do kilkudziesięciu procent prędkości światła. Zgodnie z prawem Hubble'a oznacza to, że kwazary są obiektami niezmiernie odległymi. Ich światło obserwowane dzisiaj zostało wysłane od 2 do 13 miliardów lat temu. Badanie kwazarów dostarcza więc informacji o wczesnych etapach życia Wszechświata. Fakt, że możemy obserwować tak odległe obiekty, świadczy o tym, że emitują one ogromne energie – 100 razy większe niż najjaśniejsze galaktyki. W dodatku ta gigantyczna energia emitowana jest z niewielkiego obszaru o średnicy milion razy mniejszej niż średnica galaktyki. Dziś wiemy, że kwazary to masywne czarne dziury o masach rzędu kilkuset milionów mas Słońca,

znajdujące się w centrach galaktyk, które powstały we wczesnej fazie historii Wszechświata. Źródłem gigantycznej energii emitowanej przez kwazar jest dysk akrecyjny uformowany przez materię przyciąganą siłami grawitacji. Materia spada na czarną dziurę po spiralnych torach, tworząc ogromny wir, w którym silnie nagrzewa się do bardzo wysokiej temperatury, czemu towarzyszy emisja promieniowania o ogromnej energii. Podobnie jak w elektrowniach wodnych źródłem energii elektrycznej jest energia grawitacyjna spadającej wody, w kwazarze źródłem jego energii promienistej jest energia grawitacyjna spadającej na czarną dziurę materii.

Dyski akrecyjne wokół masywnych czarnych dziur są najwydajniejszymi źródłami energii występującymi we Wszechświecie.

Większość znanych kwazarów jest bardzo odległa – powstawały one najczęściej w epoce między jedną dziesiątą a jedną trzecią obecnego wieku Wszechświata. Spływanie materii z dysku akrecyjnego na czarną dziurę powoduje zwiększanie jej masy. Jednocześnie dostępna materia wokół czarnej dziury ulega wyczerpaniu i dysk akrecyjny zanika. Czarna dziura przestaje świecić. Takie nieaktywne, masywne czarne dziury znajdują się w większości pobliskich galaktyk.

Przykładem może być gigantyczna czarna dziura znajdująca się w centrum naszej Galaktyki – Drogi Mlecznej. Dzięki obserwacji ruchu gwiazd w jej pobliżu udało się udowodnić jej istnienie i wyznaczyć masę. Na Rys. 3. pokazana jest animacja powstała przez złożenie zdjęć gwiazd wykonanych w ciągu kilkunastu lat. Gwiazdy poruszają się po keplerowskich elipsach, w ognisku których znajduje się niewidoczna czarna dziura, oznaczona krzyżykiem. Analiza orbit gwiazd pozwoliła wyznaczyć masę tej czarnej dziury na ponad 4 miliony mas Słońca.



Film dostępny pod adresem /preview/resource/R1FMl306S9pYH

Rys. 3. Gwiazdy w centralnej części Drogi Mlecznej poruszają się po orbitach eliptycznych wokół gigantycznej czarnej dziury.
Źródło: Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, tylko do użytku edukacyjnego.

Rys. 3. Animacja na ruchomym obrazie, bez udziału lektora, prezentuje, w jaki sposób, Gwiazdy w centralnej części Drogi Mlecznej poruszają się po orbitach eliptycznych wokół gigantycznej czarnej dziury. Na ciemnym tle przedstawiono 5 jasnych obiektów oraz czerwony krzyżyk. Po rozpoczęciu animacji, każdy z obiektów pokonuje drogę w kształcie mniej bądź bardziej spłaszczonej elipsy. Obiekty poruszają się w różnych kierunkach, jedne w dół, drugie w bok, ale każdy zatacza elipsę wokół czerwonego krzyżyka. W ciągu 6 sekund pokazano ruch gwiazd na przestrzeni kilkunastu lat. Na animacji widoczny jest przedział czasu od 1992 do 2006 roku oraz skala obiektów 10 dni świetlnych.

W 2020 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki otrzymali właśnie naukowcy – Niemiec Reinhard Genzel i Amerykanka Andrea Ghez, którzy potwierdzili obserwacyjnie istnienie czarnej dziury w centrum Drogi Mlecznej.

Słowniczek

Prędkość ucieczki

(ang. *escape velocity*) – prędkość początkowa, jaką trzeba nadać dowolnemu obiektowi, by dzięki energii kinetycznej pokonał on grawitację ciała niebieskiego i oddalił się od niego.

Przesunięcie ku czerwieni

(ang. *redshift*) – zjawisko polegające na tym, że linie widmowe promieniowania elektromagnetycznego docierające z niektórych ciał niebieskich są przesunięte w stronę większych długości fali.

Prawo Hubble'a

(ang. *Hubble's law*) – podstawowe prawo kosmologii, zgodnie z którym prędkości ucieczki odległych galaktyk są wprost proporcjonalne do odległości od nich: $v = H_0 r$ (v – prędkość ucieczki galaktyki, r – odległość od galaktyki, H_0 – stała Hubble'a).

Audiobook

Historia odkrycia gwiazd neutronowych i czarnych dziur

Posłuchaj audiobooka o historii odkrycia gwiazd neutronowych i czarnych dziur.

Audiobook można wysłuchać pod adresem: https://zpe.gov.pl/b/P9Ciff9AT

Historia odkrycia gwiazd neutronowych i czarnych dziur

Przewidzenie istnienia gwiazd neutronowych przez wiele lat przypisywano Lwowi Landau, który w 1932 roku napisał w swoim artykule o gwiazdach, że „jądra atomowe będące w bliskim kontakcie, tworzą jedno gigantyczne jądro". Data tej publikacji zbiegła się z datą opublikowania wyników badań Jamesa Chadwicka odnośnie odkrycia przez niego neutronu. Doprowadziło to do błędnego powiązania ze sobą obu prac, przez co obecnie uznaje się, że fakt przewidzenia przez Landaua gwiazd neutronowych jest nieprawdziwy.

Teoretyczne istnienie gwiazd neutronowych zostało po raz pierwszy przedstawione w grudniu 1933 na konferencji Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego przez Waltera Baade'a i Fritza Zwicky'ego. Zwicky wysunął takie przypuszczenie blisko dwa lata po odkryciu neutronu, wkrótce po eksperymentalnym stwierdzeniu istnienia neutronów we wtórnym promieniowaniu kosmicznym. Dopiero odkrycie w 1967 roku pulsara przez Antony'ego Hewisha i Jocelyn Bell z Uniwersytetu Cambridge potwierdziło istnienie gwiazd neutronowych.

Brytyjski astrofizyk wraz z zespołem badał dochodzące z kosmosu promieniowanie radiowe. Młoda doktorantka profesora Hewisha, Jocelyn Bell, zarejestrowała szybkozmienne źródło, pulsujące z niezwykle precyzyjnym, sekundowym okresem powtarzalności. Niedługo potem zostały odkryte inne źródła pulsującego promieniowania, które otrzymały nazwę

pulsarów. Początkowo pochodzenie tych sygnałów było bardzo tajemnicze. Podejrzewano nawet związek pulsarów z pozaziemskimi cywilizacjami. Dopiero, gdy odkryto drugie pulsujące źródło w innej części nieba, obalono hipotezę o cywilizacji pozaziemskiej.

Mały okres zmian promieniowania świadczy o tym, że promieniowanie pochodzi z wirującej, bardzo małej gwiazdy ze źródłem promieniowania znajdującym się na jej powierzchni. Przy tak szybkich obrotach zwykła gwiazda musiałaby się rozpaść pod wpływem sił odśrodkowych. Tak szybką rotację mogła wytrzymać tylko hipotetyczna supergęsta gwiazda neutronowa o promieniu kilkunastu kilometrów. Antony Hewish w 1974 roku otrzymał nagrodę Nobla za odkrycie pulsarów. Decyzji o tej nagrodzie towarzyszyła krytyka środowiska naukowego za pominięcie wkładu Jocelyn Bell, która pierwsza zarejestrowała pulsary, początkowo nazywane nawet "Bell's star".

Hipoteza czarnej dziury - obiektu o tak wielkiej sile grawitacji, że nawet światło nie mogłoby go opuścić, powstała znacznie wcześniej, bo już w końcu XVIII wieku. Zwolennicy tej idei, wielki matematyk i fizyk Pierre Simon Laplace oraz angielski astronom John Michell rozważali, niezależnie od siebie, jak światło może zachowywać się w pobliżu masywnej gwiazdy. Światło zgodnie z ideą Newtona było uważane wówczas za poruszające się cząstki obdarzone niewielką masą - dziś nazywamy je fotonami i wiemy, że mają masę zerową. Rozumowanie Michella i Laplace'a było następujące: podrzucony kamień, wznosząc się, traci początkowo nadaną mu prędkość, zatrzymuje się i spada. Im większą ma prędkość początkową, tym wyżej się wzniesie. Po przekroczeniu pewnej prędkości, zwanej prędkością ucieczki, rzucony kamień wylatuje w przestrzeń kosmiczną. Prędkość ucieczki jest tym większa, im większa jest masa ciała niebieskiego, z którego kamień ma uciec. Według Michella i Laplace'a światło zachowuje się podobnie. Jeśli gwiazda jest odpowiednio masywna i prędkość ucieczki z niej jest większa niż prędkość światła, światło nie zdoła uciec z gwiazdy, więc ta nie będzie świecić.

Chociaż czarne dziury rzeczywiście istnieją i mamy na to niezbite dowody, to idea Michella i Laplace'a była błędna. W owym czasie nie wiedziano jeszcze, że prędkość światła w próżni jest zawsze stała i światło nie może zwalniać, a potem się zatrzymać w najwyższym punkcie, niczym podrzucony kamień. Istnienie czarnych dziur wynika z Ogólnej Teorii Względności, która wyjaśnia, że grawitacja

polega na zakrzywieniu czasoprzestrzeni wokół każdego ciała obdarzonego masą. Zanim odkryto we Wszechświecie czarne dziury, już wiele ich właściwości było znanych z badań fizyków teoretyków, zajmujących się szukaniem różnych rozwiązywań równań Ogólnej Teorii Względności. Na horyzoncie zdarzeń czarnej dziury ogromna grawitacja powoduje stratę energii uciekającego fotonu. Energia zmniejsza się do zera i foton po prostu znika. Dlatego promieniowanie nie może opuścić czarnej dziury.

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

Polecenie 1

Uzupełnij zdanie:

Foton nie może opuścić czarnej dziury, bo silne pole grawitacyjne zmniejsza jego

☐ prędkość ☐ energię ☐ do zera.

Polecenie 2

Wybierz wszystkie prawdziwe stwierdzenia:

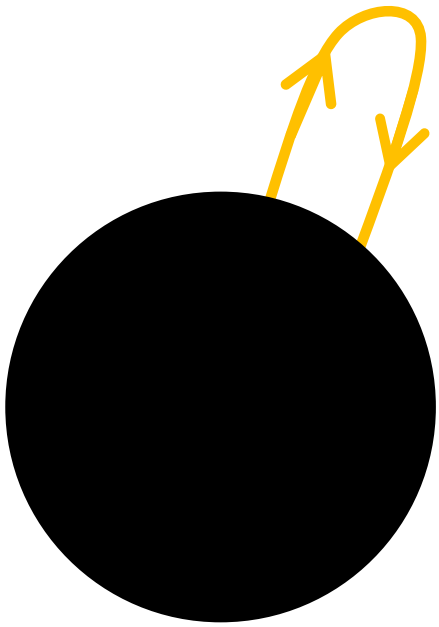
- ☐ Pulsar jest gwiazdą neutronową.
- ☐ Pulsary to jedyne gwiazdy neutronowe, które emitują promieniowanie.
- ☐ Każda gwiazda neutronowa jest pulsarem.
- ☐ Promieniowanie emitowane przez wiele gwiazd neutronowych nie trafia w Ziemię i dlatego nie możemy go obserwować.
- ☐ Pulsary to takie gwiazdy neutronowe, których promieniowanie trafia w Ziemię.

Polecenie 3

Wyjaśnij, korzystając z zasady zachowania energii, dlaczego okres zmian promieniowania pulsarów systematycznie, choć bardzo wolno, wydłuża się.

Polecenie 4

Rysunek przedstawia schematycznie ideę osiemnastowiecznego astronoma Johna Michella. Foton światła wyemitowany z bardzo masywnej gwiazdy, zachowuje się jak kamień podrzucony do góry, który spada z powrotem. Z takiej gwiazdy światło nie może się wydostać, więc jest ciemna. Wyjaśnij, dlaczego dziś ta idea uważana jest za błędną.



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

Film samouczek

Gwiazdy neutronowe i czarne dziury

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/DvarmLo7S

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

Polecenie 1

Uzupełnij zdanie.

Promień Schwarzschilda wyznacza horyzont zdarzeń czarnej dziury, który można przekroczyć tylko w kierunku do wewnątrz ☐ na zewnątrz ☐ czarnej dziury.

Polecenie 2

Wiek Wszechświata to około 14 miliardów lat. Wyjaśnij, dlaczego odległość najdalszego obiektu, od którego światło dociera do nas w czasie życia Wszechświata wynosi 46 miliardów lat świetlnych, a nie 14 miliardów lat świetlnych.

Polecenie 3

Oblicz promień Schwarzschilda dla obiektu o gęstości zbliżonej do gęstości ciał otaczających nas na co dzień, czyli ρ = 1 g/cm^3 (gęstość wody). Porównaj otrzymaną wartość z promieniem orbity Marsa, która wynosi około 2,3·10^8 km i orbity Jowisza – 7,8·10^8 km. Odpowiedz, czy taki obiekt istnieje we Wszechświecie.

Polecenie 4

Oblicz promień Schwarzschilda masywnej czarnej dziury znajdującej się w centrum Drogi Mlecznej. Przyjmij, że masa czarnej dziury wynosi 4,3 milionów mas Słońca, a masa Słońca to 2·10^{30} kg. Prędkość światła: c = 3·10^8 m/s.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Gwiazdy neutronowe i czarne dziury**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** XI. Fizyka jądrowa. Uczeń: 12) opisuje elementy ewolucji gwiazd; omawia supernowe i czarne dziury. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 18) opisuje elementy ewolucji gwiazd; omawia supernowe i czarne dziury.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. omawia, jak powstaje gwiazda neutronowa; 2. opisuje właściwości gwiazd neutronowych; 3. tłumaczy, czym jest czarna dziura; 4. analizuje, jak zmienia się promieniowanie emitowane z gwiazdy, zapadającej się w czarną dziurę; 5. wyjaśnia, jakie jest źródło ogromnej energii kwazarów.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obserwacyjna (dostrzeganie i definiowanie problemów)
Metody nauczania:	wykład informacyjny, pokaz multimedialny, analiza pomysłów
Formy zajęć:	praca w parach, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
Materiały pomocnicze:	e-materiał: „Skąd wnioskować o obecności czarnych dziur?”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Treść lekcji należy dostosować do poziomu uczniów. Na przykład, dla poziomu podstawowego można zrezygnować z niektórych trudniejszych treści, według uznania nauczyciela. Przed lekcją uczniowie zapoznają się z treścią rozdziałów „Czy to nie ciekawe?” i „Przeczytaj”. Lekcja rozpoczyna się od sprawdzenia, czego uczniowie dowiedzieli się i zrozumieli o gwiazdach neutronowych i czarnych dziurach. Nauczyciel zachęca, aby uczniowie zgłaszali, czego nie zrozumieli i wyjaśnia te problemy.	
Faza realizacyjna:	

Uczniowie wymieniają właściwości gwiazd neutronowych i zapisują je na tablicy. Uczniowie dyskutują, jak zmienia się prędkość kątowa podczas zapadania się gwiazdy i powstawania gwiazdy neutronowej. Nauczyciel wyświetla Rys.1 ilustrujący promieniowanie pulsara i wyjaśnia, jak powstaje efekt latarni morskiej. Podkreśla, że obserwujemy tylko takie gwiazdy neutronowe, których promieniowanie trafia w Ziemię. Następnie uczniowie wymieniają informacje o czarnych dziurach i zapisują je na tablicy. Nauczyciel tłumaczy, czym jest promień Schwarzschilda. Uczniowie w parach obliczają promień Schwarzschilda dla Słońca. Nauczyciel wyjaśnia zjawisko grawitacyjnego spowolnienia czasu i związanego z tym przesunięcia ku czerwieni promieniowania emitowanego z masywnej gwiazdy. Wyświetla Rys. 2 i tłumaczy, dlaczego foton nie może opuścić czarnej dziury. Nauczyciel wyjaśnia, co jest źródłem ogromnej energii emitowanej przez kwazary (materia opadająca na supermasywną czarną dziurę) i tłumaczy, że po wyczerpaniu materii, czarna dziura przestaje świecić. Wyświetla animację na Rys. 3 - gwiazdy w centralnej części Drogi Mlecznej poruszające się po orbitach eliptycznych i pyta uczniów, co powoduje zakrzywienie orbit gwiazd. Uczniowie dochodzą do wniosku, że z kształtu orbit wnioskujemy o istnieniu supermasywnej czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki.	
Faza podsumowująca:	
Uczniowie oglądają samouczek i w parach rozwiązują zadania aktywizujące. Dyskutują na forum klasy problemy z tym związane i dochodzą do wspólnych odpowiedzi.	
Praca domowa:	
Uczniowie słuchają audiobooka i rozwiązują zadania aktywizujące z nim związane.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Oba multimedia można wykorzystać na lekcji. Mogą też być wykorzystane przez uczniów po lekcji do powtórzenia i utrwalenia materiału.