

Muzyka czarnych dziur

Czarne dziury na huśtawce



Włodzimierz Kluźniak
zajmuje się badaniem
czarnych dziur

WŁODZIMIERZ KLUŹNIAK

Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika
Polskiej Akademii Nauk, Warszawa;
Uniwersytet Zielonogórski
wlodek@camk.edu.pl

Izaak Newton zważył Ziemię, wyobrażając sobie Księżyc jako spadające jabłko. Podobnie i my możemy ważyć pewne niewidzialne ciała niebieskie, pożerające towarzyszące im gwiazdy. Czym są te żarłoczne potwory o masie kilkakrotnie większej od masy Słońca i o rozmiarze kilkunastu kilometrów? To czarne dziury

Astronomowie są dziś przekonani, że każda galaktyka zawiera w swym centrum gigantycznych rozmiarów czarną dziurę. Niektóre dziury (jak na przykład ta kryjąca się we wnętrzu naszej własnej Galaktyki, zwana Sagittarius A*, gdyż znajduje się w gwiazdozbiórze Strzelca), zazdrośnie strzegą swych tajemnic. Inne przypominają uwielbiających głośne nocne rozrywki sąsiadów. Zachowują się jak gigantyczny odkurzacz, który, wsysając okoliczną materię, wywołuje istne tornado, łatwo dostrzegalne przez astronomów. W tym ogromnym wirze zasysane gazy rozgrzewane są „do białości” (a mówiąc ściślej, do setek

milionów stopni) i wysyłają promienie rentgena. Gazu jest tak dużo i jest on tak gorący, że tuż przed pochłonięciem przez supermasywną galaktyczną czarną dziurę świeci on jaśniej niż miliardy gwiazd. Wyobraźmy sobie latarnię morską, której blask dociera do nas z odległości stu milionów lat świetlnych! Podobnie jak wodospad, otoczony mgiełką kropelek wody, czarne dziury wyrzucają część opadającej na nie materii, często w postaci dwóch wąskich strug gazu, tryskających z pobliża czarnej dziury z prędkością bliską prędkości światła.

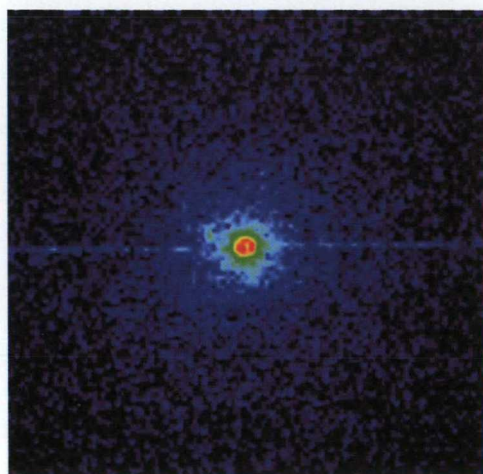
Potwór – miniaturka

Kilka lat temu astronomowie, badający źródła radiowe i rentgenowskie, dokonali zaskakującego odkrycia: znaleźli w naszej Galaktyce miniaturowe modele supermasywnych czarnych dziur obserwowanych w odległych galaktykach.

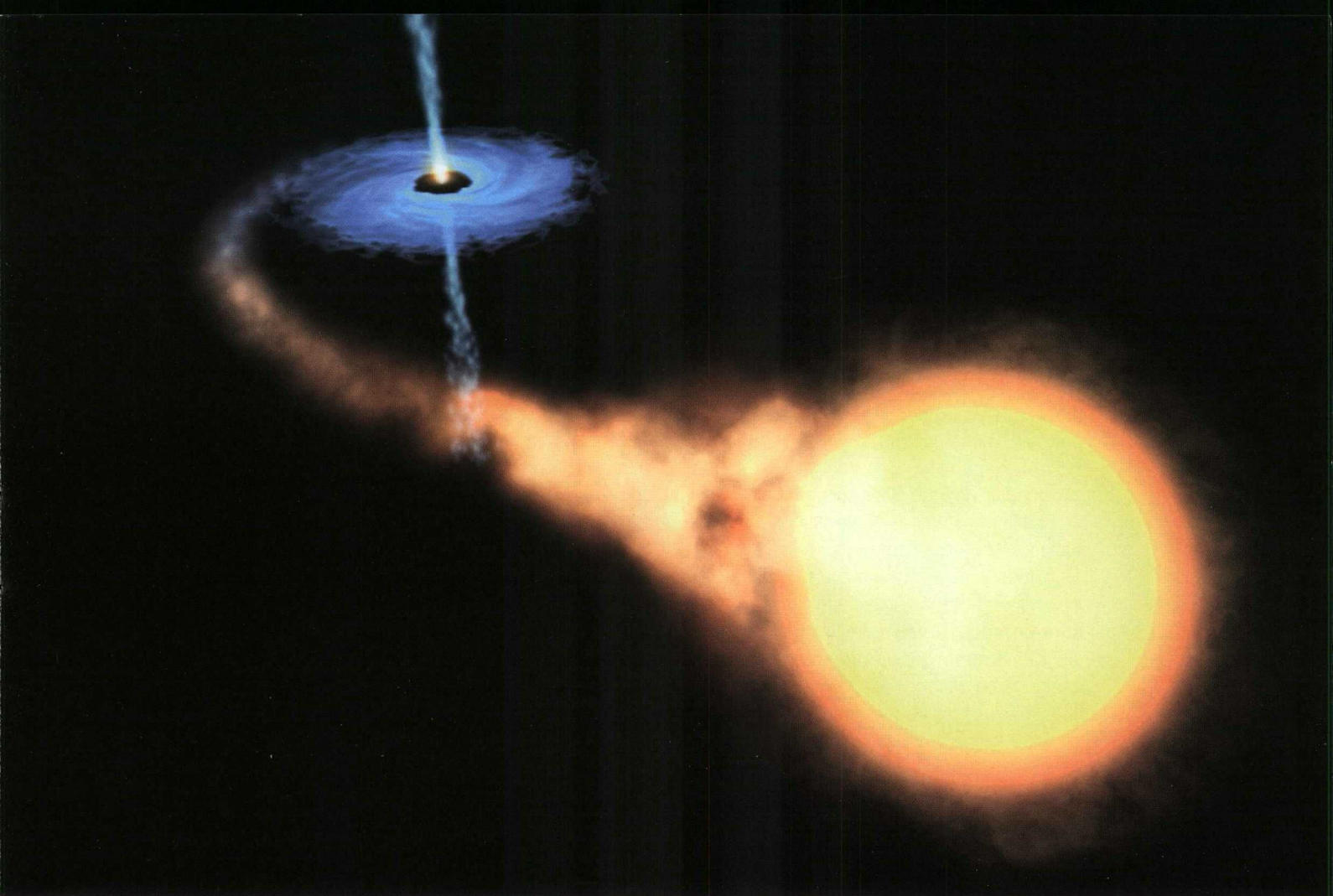
W świecie czarnych dziur najważniejszym czynnikiem jest masa. Wszelkie procesy, zachodzące w czarnej dziurze o masie miliarda Słońc, zachodzą też w czarnej dziurze, ważącej zaledwie parę mas słonecznych, ale przebiegają one znacznie szybciej ze względu na jej mniejsze rozmiary. W pobliżu czarnej dziury wszystko porusza się niemal z prędkością światła. Ponieważ czas przebycia danej odległości ze stałą prędkością jest proporcjonalny do tej odległości, czas zajścia jakiegoś procesu w pobliżu czarnej dziury jest proporcjonalny do jej rozmiarów liniowych. Rozmiar ten jest z kolei proporcjonalny do masy – czarna dziura dziesięć razy cięższa od Słońca – ma średnicę około 30 km, podczas gdy średnica czarnej dziury o masie 10 mln Słońc sięga około 30 mln km. A zatem proces, trwający latami wokół supermasywnej czarnej dziury (powiedzmy, o masie miliarda Słońc) w odległej galaktyce, przebiegnie w ciągu zaledwie ułamka sekundy w którejś ze znanych czarnych dziur w naszej Galaktyce, mających masę około dziesięciu mas Słońca. Odległe od nas o miliony lat świetlnych aktywne czarne dziury nazywane są kwazarami. Ich miniaturowe modele w naszej Galaktyce nazwane zostały przez ich

Cygnus X-3

– mikrokwazar zawierający
jedną z najsłynniejszych
czarnych dziur Drogi
Mlecznej, odległy od nas
o 30 tys. lat świetlnych



NASA/SRON/NPE



European Space Agency, NASA and Felix Mirabel

**Mikrokwazary
są czarnymi dziurami
o masie zbliżonej do
masy gwiazdy, wysysające
materię ze swych zwykłych
gwiazdnych towarzyszek**

odkrywcę, Felixa Mirabelą, mikrokwazarami – są to układy, w których czarna dziura wysysa materię z obiegającej ją zwykłej gwiazdy.

Astronomowie słynni byli od wieków ze swojej cierpliwości. Aby zrozumieć prawa ruchu ciał niebieskich, potrzeba było stuleci, a może nawet tysiącleci obserwacji astronomicznych. Jednakże w dzisiejszym świecie, w którym wszyscy się wciąż śpieszą, znacznie łatwiej jest monitorować mikrokwazar przez kilka godzin, a następnie szczegółowo analizować dane z każdego cennego ułamka sekundy, niż przez dziesiątki lat obserwować dzień po dniu odległy kwazar. Sytuacja ta do pewnego stopnia wymuszona jest faktem, że większość obserwacji musimy prowadzić przy pomocy aparatury umieszczonej na satelitach (promienie rentgenowskie nie przenikają przez atmosferę ziemską, a więc nie docierają do obserwatoriów naziemnych). Satelity pracują zazwyczaj z pełną wydajnością nie dłużej niż kilka lat. Większość wysyłanych w przeszłości w kosmos instrumentów już dawno spłonęła w ziemskiej atmosferze, gdy ich macierzyste satelity opuściły swoje pierwotne orbity. Dlatego właśnie mikrokwazary wydają się idealnym obiektem do badania procesów, zachodzących w pobliżu czarnej dziury.

Jak się okazuje, przez większość czasu mikrokwazary odpoczywają. Ich czarne dziury niemal nie dają o sobie znać. W ciągu tych długich spokojnych okresów dostrzegalne jest światło zwykłej gwiazdy, które daje się obserwować przy pomocy zwykłego teleskopu, czyli tak, jak to czynią astronomowie od setek lat. Dzięki obserwacjom stwierdzono, że każda z tych zwykłych gwiazd krąży wokół niewidocznego towarzysza, którego masa, w zależności od układu, mieści się między 6 a 20 masami Słońca.

Od czasu do czasu jednak mikrokwazary przejawiają znaczną aktywność – następuje tak zwany rozbłysk (*outburst*). Świecą coraz mocniej, znacznie jaśniej niż zwyczajne gwiazdy, i emitują promieniowanie w wielu zakresach długości fali: radiowe, widzialne, a także jeszcze bardziej niebieskie niż dostrzegają to nasze oczy, czyli nadfioletowe, a nawet rentgenowskie. Taka emisja sygnalizuje, że obszar emitujący promieniowanie staje się bardzo gorący. Gdybyśmy chcieli rozgrzać pogrzebacz w bardzo gorącym kominku, stałby się on najpierw czerwony, potem świeciłby żółto, niebiesko, później emitował nadfiolet, a wreszcie promienie rentgenowskie (tyle, że wcześniej oczywiście by się stopił). Mierzac ilość promieniowania, emitowanego

Muzyka czarnych dziur

przez nasz pogrzebacz, i badając jego kolor, uczeni mogą wyznaczyć jego rozmiar. Kolor światła (w naszym wypadku - rentgenowskiego) pozwala określić temperaturę, a gdy znamy już temperaturę, natężenie promieniowania jest proporcjonalne do powierzchni naszego „pogrzebacza”. W rzeczy samej nie potrzebujemy nawet „pogrzebacza” - wystarczy zbadać „ogień”. Zastosowanie tej metody do badania rozbłysków mikrokwazarów przyniosło niezwykle wyniki.

„Ogień”, czyli w naszym przypadku po prostu chmura rozgrzanego gazu, otacza niewidocznego uprzednio towarzysza o masie kilkakrotnie (sześć do dziesięciu) razy większej od masy Słońca, a mimo to całkowita powierzchnia tego niezwykle gorącego gazu jest nie większa niż sporego jeziora - powiedzmy, któregoś z Wielkich Jezior Ameryki Północnej. Jak można zmieścić obiekt, ważący tyle co kilka gwiazd, pod powierzchnią nawet nie oceanu, a zaledwie jeziora? Można - jeśli przyjmiemy, że obiektem tym jest czarna dziura.

Migoczące mikrokwazary

Mikrokwazar w stanie rozbłysku nie świeci jednostajnie. Jego blask przypomina raczej światło pochodni na silnym wietrze. Gdy astronomowie amerykańscy, Ron Remillard, Jeff McClintock, Ted Strohmayer (i inni), zabrali się za analizę tych zmian jasności promieniowania rentgenowskiego - wynik okazał się dużą niespodzianką. Promieniowanie rentgenowskie zmieniało się bardzo szybko, a niektóre wahania następowały niemal regularnie. Źródło promieniowania jaśniało i ciemniało kilkaset razy w ciągu sekundy. Gdyby nie były to fale rentgenowskie, ale akustyczne, usłyszeliśmyby dźwięk przypominający syrenę przeciwmgielną.

Im większa masa czarnej dziury - tym niższy „dźwięk”. Na przykład dla pewnego źródła o masie sześciu mas Słońca zmiany następowały regularnie z częstotliwością 300 na sekundę. Liczba ta może mniej nas zaskoczy, gdy uświadomimy sobie, że tak ciężka czarna dziura ma zaledwie około 20 km

Przygotowania
do wystrojenia na
orbitę należącego do
NASA Obserwatorium
Rentgenowskiego Chandra
w 1999 r.



NASA



średnicy i że w jej pobliżu wszystko porusza się z prędkością bliską prędkości światła. Obłok gorącego gazu, okrążający czarną dziurę, obiega ją 300 razy w ciągu sekundy, krążąc po orbicie kołowej o promieniu 80 km. Gdzież tam kierowcom Formuły 1 do takich prędkości!

Jeszcze większą niespodzianką okazało się to, że każda z takich czarnych dziur wydaje nie jeden, ale dwa „dźwięki”. Przeglądając dane, autor niniejszego artykułu i Marek Abramowicz z Uniwersytetu w Göteborgu zdali sobie sprawę, że te dwa tony współbrzmiały w dźwięku zwanym w muzyce kwintą – częstości tonów mają się do siebie jak 2:3 (w tym wypadku jeden 300 razy na sekundę, a drugi 450). Cóż może być źródłem tej muzyki? Historycy nauki podają, że podobne odkrycie legło u podstaw fizyki. Pitagorejczycy zaobserwowali, że dźwięki lutni zależą od długości jej strun – im dłuższa struna, tym niższy dźwięk. Aby otrzymać brzmienie kwinty, należy trącić struny, których długości mają się do siebie jak 2:3. Ale czym mogą być struny wokół czarnych dziur? I dlaczego te właśnie struny dźwięczą? Pewności nie ma nikt, ale mamy tu swoją hipotezę.

Huśtawka Einsteina

Wiemy, że otaczający czarną dziurę gorący gaz przyjmuje postać płaskiego dysku, przypominającego pierścienie Saturna. Gaz, wypływający ze zwykłej gwiazdy – towarzysza czarnej dziury, spadając na czarną dziurę obiega ją wokół i formuje dysk. W tym dysku materia spiralnie zbliża się do centrum, ale w trakcie tego meandruje, podobnie jak czynią to rzeki. Przepływając przez te zakola, materia czasem się zbliża, a czasem oddala od czarnej dziury. Naszym zdaniem „grzmot wijącej się rzeki” to właśnie pierwszy, niższy ton „syreny przeciwmgielnej” (300 drgań na sekundę). Jednocześnie przepływająca materia może odchyłać się od płaszczyzny dysku. To tak, jakby jeden z pierścieni Saturna uniósł się nieco ponad pozostałe, a następnie opadł, oscylując przez pewien czas w górę i w dół. Te

oscylacje w górę i w dół odpowiadają za drugi ton dźwięku.

A oto wyjaśnienie pochodzenia tajemniczej kwinty. Wyobraźmy sobie lutnię o wielu strunach o długości zbliżonej do tej, którą właśnie trącamy. Jeżeli jedna z tych strun ma długość równą dokładnie $\frac{2}{3}$ długości trąconej struny, wyda ona również swój własny dźwięk. Zjawisko to, zwane rezonansem, znane jest każdemu dziecku, które bujało się na huśtawce. Na to, by rozbijać huśtawkę jak wahać, do w górę i w dół, musimy wyciągać nogi do przodu i do tyłu w rytmie wahań. Możemy to robić tak często, jak buja się huśtawka, albo też dwukrotnie częściej, i huśtawka odpowiednio zareaguje. A w upalny letni dzień, rozleniwieni, możemy poruszać nogami wolniej niż huśtawka, na przykład dwa razy na każde trzy wachnięcia huśtawki – i tak właśnie jest w czarnych dziurach. Natomiast gaz opływający zwykłą gwiazdę czy też tworzący pierścienie Saturna nie byłby tak leniwy – każdemu ruchowi „w przód i w tył” odpowiadałby tylko jeden ruch „w górę i w dół”, i stąd słyszelibyśmy tylko jeden ton dźwięku.

Miłośnicy skrzypiec odróżniają Stradivariususa od Amati po ich brzmieniu. Astronomowie mogą odróżnić czarną dziurę od zwykłej gwiazdy po brzmieniu promieniowania X. Dwa tony współbrzmiające w kwincie zdradzają czarną dziurę. ■

Promienie rentgenowskie nie przechodzą przez ziemską atmosferę i dlatego trzeba je badać przy pomocy teleskopów kosmicznych, takich jak Chandra

Chcesz wiedzieć więcej?

- Bursa M., Abramowicz M.A., Karas V., Kluźniak W. (2004). The Upper Kilohertz Quasi-periodic Oscillation: A Gravitationally Lensed Vertical Oscillation, *The Astrophysical Journal*, 617, L45-L48.
- Kluźniak, W., Abramowicz, M.A., Kato, S., Lee, W.H., Stergioulas, N. (2004). Nonlinear Resonance in the Accretion Disk of a Millisecond Pulsar. *The Astrophysical Journal*, 603, L89-L92.
- Török G., Abramowicz M.A., Kluźniak W., Stuchlík Z. (2005). The orbital resonance model for twin peak kHz quasi periodic oscillations in microquasars. *Astronomy and Astrophysics*, 436, 1-8.
- van der Klis, M. (2000). Millisecond Oscillations in X-ray Binaries. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38, 717-760.