

CO ŚWIECI W CZARNEJ DZIURZE?

Słyszał o nich pewnie każdy.
To tajemnicze, działające na wyobraźnię obiekty,
które potrafią uwięzić wszystko. Nawet światło.

prof. Agnieszka Janiuk

Centrum Fizyki Teoretycznej
Polska Akademia Nauk, Warszawa

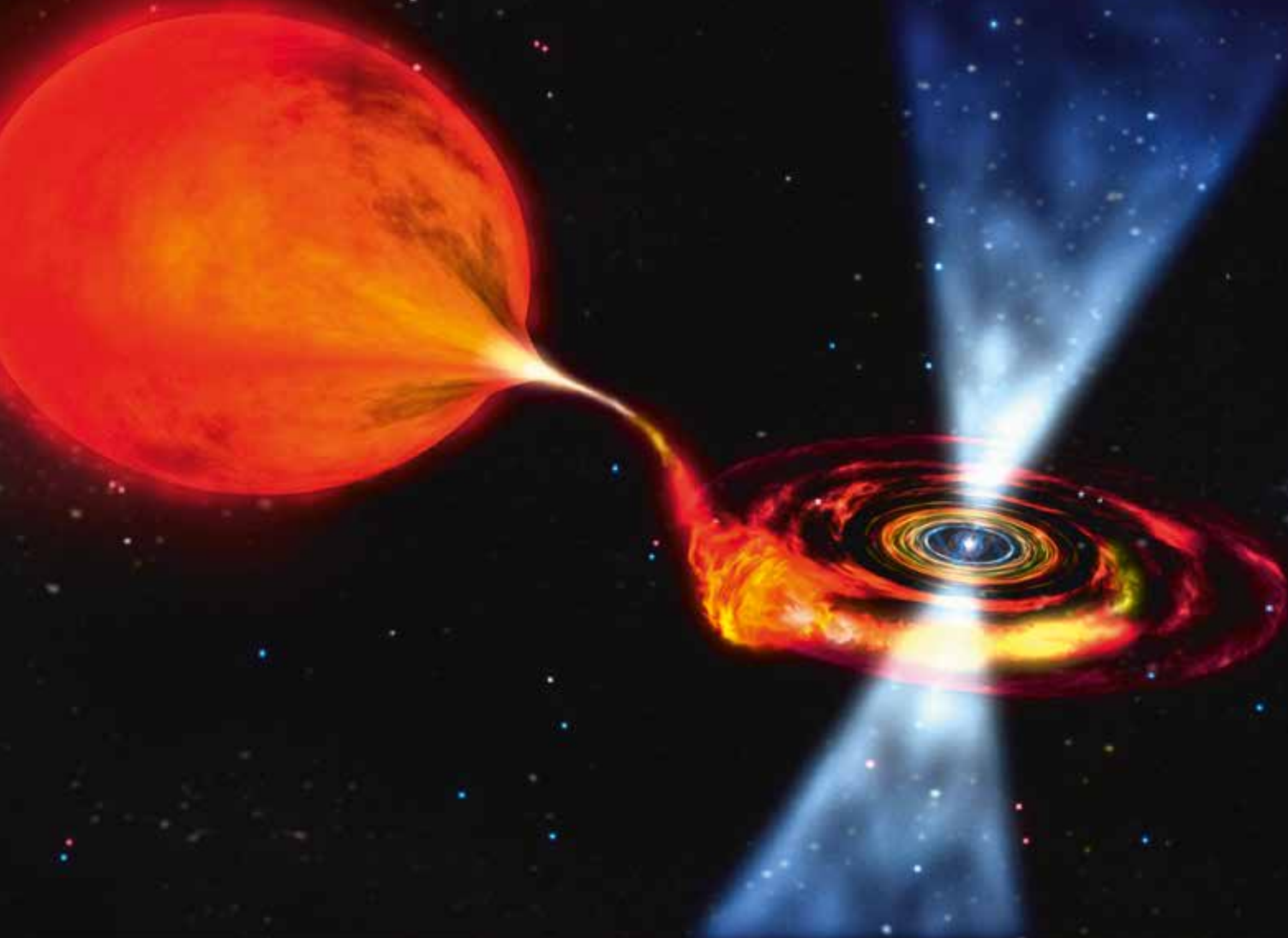
Czarne dziury są końcowymi etapami ewolucji masywnych gwiazd, w których po wyczerpaniu się „paliwa” jądrowego ciśnienie termiczne materii nie jest w stanie zrównoważyć własnej grawitacji gwiazdy. Obiekt taki zapada się pod wpływem swojego ciężaru. Tylko jeśli gwiazda była początkowo niezbyt duża, jej końcowym etapem życia może zostać biały karzeł lub gwiazda neutronowa. W tym wypadku ostateczny kolaps gwiazdy powstrzymuje ciśnienie bądź to zdegenerowanego, ściśniętego do olbrzymich gęstości, gazu elektronowego (w wypadku białych karłów), bądź też zdegenerowanych neutronów.

Tego typu zwarte obiekty mogą, stygnąc, istnieć dowolnie długo. Inaczej sprawa jednak wygląda, gdy początkowy obiekt był masywny.

Obecne badania nad ewolucją gwiazd wskazują, że już gwiazda o masie nieco ponad osiem razy większej od Słońca musi pod koniec swego życia eksplodować jako supernowa i utworzyć gwiazdę neutronową lub czarną dziurę.

Ta ostatnia powstaje wówczas, gdy jądro gwiazdy byłoby zbyt masywne, aby pozwolić na istnienie stabilnej konfiguracji z materii neutronowej; szczegóły zależą od równania stanu materii i nie są jeszcze dokładnie poznane, ale wiadomo, że nie jest to więcej niż dwie-trzy masy Słońca.

Z drugiej strony istnieje też maksymalna masa gwiazdy, powyżej której eksplozja supernowej nie prowadzi do utworzenia żadnej pozostałości. W przypadku gwiazd o masach powyżej 100 mas Słońca energie fotonów emitowanych podczas wybuchu supernowej są tak ogromne, że przekraczają ograniczenia na produkcję par elektron-pozytron. Tego typu niestabilna supernowa nie pozostawia po sobie niczego.



W obiekcie zwanym czarną dziurą olbrzymia grawitacja powierzchniowa powoduje, że nawet światło, ze względu na swą skończoną prędkość, nie jest w stanie się uwolnić. Z tego powodu izolowanych czarnych dziur w kosmosie nie jesteśmy w stanie zaobserwować (wyjątkiem mogą być tzw. miniaturowe czarne dziury, o masach rzędu 10^{15} g i rozmiarach rzędu femtometra, parujące w tzw. procesie Hawkinga – ale nie o nich jest ten artykuł).

Większość gwiazd we Wszechświecie nie znajduje się jednak w izolacji, lecz wchodzi w skład układów podwójnych lub nawet wielokrotnych. Okazuje się, że układy takie mogą przetrwać śmierć i kolaps jednego ze swych składników. Pozostały towarzysz orbituje wówczas wokół środka masy wspólnego ze zwartym obiektem.

W kosmosie często obserwuje się tak zwane czarnodziurowe rentgenowskie układy podwójne, w których „zwykła” gwiazda, karzeł lub olbrzym, jest stowarzyszona z czarną dziurą. Dlaczego rentgenowskie? Otóż grawitacja czarnej dziury powoduje, że powierzchniowe warstwy gwiazdy towarzyszącej za-

czynają przepływać w jej kierunku. Wskutek rotacji w płaszczyźnie orbitalnej układu tworzy się płaska struktura w formie dysku. Wciąganie (akrecja) materii do czarnej dziury jest poprzedzone nagrzewaniem się materii dyskowej do olbrzymich temperatur. Dzieje się tak wskutek działania procesów lepkich, gdy sąsiadujące ze sobą pierścienie dysku trą o siebie nawzajem, rotując różniczkowo. Temperatura dysku jest tak wysoka, że świeci on w promieniach X – emitowane z jego powierzchni promieniowanie termiczne ma zakres rentgenowski.

Podglądanie

Obserwacje promieniowania dysków akrecyjnych znajdujących się wokół gwiazdowych czarnych dziur stały się możliwe dopiero dzięki technikom satelitar- nym, ponieważ atmosfera ziemska nie przepuszcza promieniowania o tym zakresie długości fali. Pierwszym satelitą badawczym poświęconym wyłącznie astronomii rentgenowskiej był wystrzelony w 1970 r. instrument Uhuru, który oprócz wspomnianych ukła-



Dr hab. Agnieszka Janiuk

profesor nadzwyczajny Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, kieruje zespołem astrofizyków badających procesy akrecji i wypływu materii z okolic czarnych dziur.

agnes@cft.edu.pl

Wyniki symulacji, pokazujące rozkład temperatury w hiperakrecyjnym dysku wokół czarnej dziury u podstawy dżetu tworzącego rozbłysk gamma.

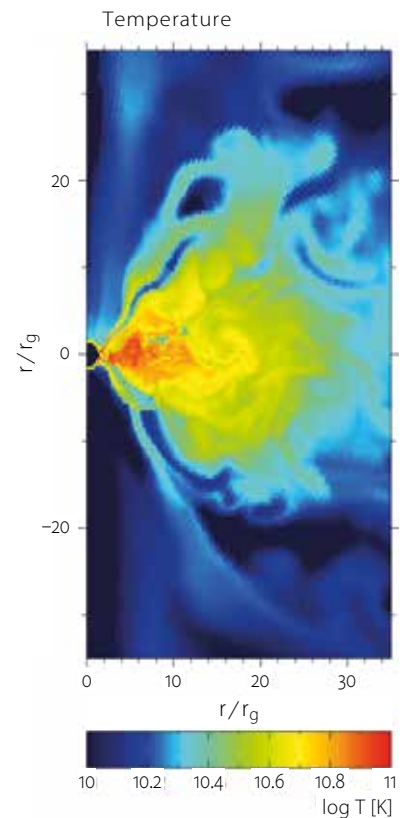
A. Janiuk
(2017, *ApJ*, 837, 39).

dów podwójnych skatalogował również wiele pozostałości po supernowych. Obserwował on także galaktyki z klasy Seyferta, w których źródłem aktywności jest akrecja na supermasywne czarne dziury w ich centrach, oraz gromady galaktyk, w których gorący rozproszony gaz emituje wysokoenergetyczne promieniowanie.

Od tamtej pory kolejne misje kosmiczne przynoszą nowe informacje na temat akreujących czarnych dziur, charakterystycznych cech rozkładu widmowego ich promieniowania, a także zmienności tych obiektów. Wiele z tych źródeł ma bowiem charakter przejściowy, to znaczy rozbłyskują na rentgenowskim niebie na pewien czas, po czym ich blask zanika. Ponadto jasne źródła cechować się mogą krótkookresową zmiennością w postaci regularnych oscylacji blasku wokół jasności średniej. Ma to najprawdopodobniej związek z różnego typu niestabilnościami w procesie akrecji, o naturze lepkościowej oraz termicznej.

Układy takie mogą wreszcie zmieniać swój tak zwany stan widmowy: w przypadku akreujących czarnych dziur (a także gwiazd neutronowych) termicznej emisji z dysku akrecyjnego towarzyszy często nietermiczny komponent widma. Ten ostatni pochodzi prawdopodobnie z ośrodka innego niż dysk, mogącego mieć formę obłoków lub „korony” nad dyskiem, wzajemne usytuowanie oraz sprzężenie dynamiczne i promieniste między tymi ośrodkami jest zaś przedmiotem złożonych analiz.

Prawdopodobny scenariusz teoretyczny jest taki, że fotony o rozkładzie widmowym promieniowania ciała doskonale czarnego, emitowane z powierzchni dysku, ulegają rozpraszaniu w odwrotnym procesie Comptona na elektronach, znajdujących się w gorącej plazmie wspomnianych obłoków.



Badania dysków akrecyjnych oparte są z jednej strony na analizie dostępnych obserwacji, przede wszystkim w zakresie rentgenowskim (dyski znajdujące się w centrach aktywnych galaktyk i otaczające supermasywne czarne dziury są chłodniejsze i emitują promieniowanie ultrafioletowe), a z drugiej strony na modelowaniu teoretycznym. Ta ostatnia dziedzina dawno już wyszła poza proste, przybliżone formuły opisujące budowę ośrodka przy założeniu jego stacjonarnego, symetrycznego charakteru oraz równowagi hydrostatycznej. W ten sposób można opisać budowę dysku analitycznie.

Tymczasem zaawansowane modelowanie zawiera obecnie elementy, których nie da się uwzględnić inaczej niż poprzez masywne symulacje komputerowe. Równania hydrodynamiki mają charakter nieliniowy i muszą być rozwiązywane numerycznie, tym bardziej jeśli, po pierwsze, dopuścimy możliwość obecności pola magnetycznego w dysku, a po drugie, gdy chcemy poprawnie opisać efekty związane z ogólną teorią względności i silnym potencjałem grawitacyjnym. Relatywistyczna magnetohydrodynamika jest wówczas najlepszym narzędziem do badania struktury i ewolucji dysków akrecyjnych. W szczególności symulacje komputerowe są obecnie praktycznie jedynym narzędziem do badania ekstremalnych dysków akrecyjnych, które otaczają czarne dziury w miejscach, z których przychodzą do nas błyski gamma. Błyski gamma, odkryte w latach 60. XX w. jako przejściowe,

Przedstawiciele grupy astrofizycznej w CFT z wizytą w ICM UW.

Na zdjęciu od lewej: dr Szymon Charzyński, prof. Agnieszka Janiuk, dr. Petra Sukova; w tle superkomputer Okeanos.



DYSKI AKRECYJNE

krótkotrwałe pojaśnienia w zakresie bardzo wysokich energii, pojawiają się w losowych miejscach na sferze niebieskiej średnio co kilka dni. Rejestrowane przez detektory gamma strumienie fotonów w połączeniu z olbrzymią odległością do ich źródeł (oszacowanie tych odległości było możliwe dzięki identyfikacji galaktyk macierzystych, w których pojawiają się błyski) wskazują, że są to jedne z najjaśniejszych obiektów we Wszechświecie. Ich blask przekracza jasności supernowych o kilka rzędów wielkości.

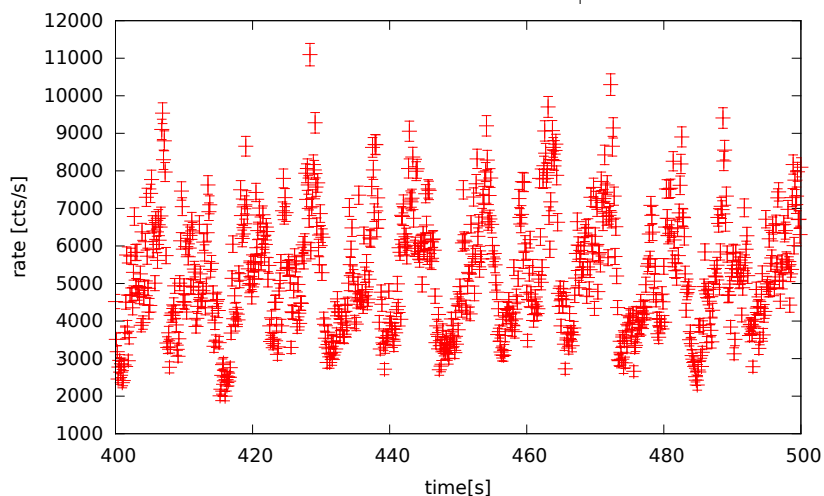
Ponieważ akrecja materii na czarną dziurę jest najwydajniejszym energetycznie procesem, jaki znamy, postuluje się, że u podłoża błysków gamma muszą leżeć nowo powstające czarne dziury, które w bardzo krótkim czasie (rzędu ułamka do kilkuset sekund) pochłaniają olbrzymią ilość materii. Część grawitacyjnej energii potencjalnej czarnej dziury, a także energia jej rotacji, jest przetwarzana w procesie akrecji. Tym, co emituje następnie promieniowanie gamma obserwowane przez nas w postaci błysku, jest wąska struga plazmy, tzw. dżet, wyrzucany prostopadle do płaszczyzny równikowej dysku akrecyjnego, wzdłuż osi rotacji czarnej dziury. Ów dżet staje się przezroczysty i emituje fotony dopiero w odległości rzędu 10^{13} cm od swojej podstawy. Tym bardziej nieprzezroczysty jest sam dysk, ponieważ materia, z której jest zbudowany, jest ogromnie gęsta i gorąca i dlatego fotony ulegają w niej niestannej absorpcji i rozpraszaniu.

Cząstkami, które mogą się z takiego dysku uwolnić i wynieść część energii, stanowiąc tym samym mechanizm jego chłodzenia, są neutrina. Neutrino te powstają wskutek zachodzenia reakcji jądrowych w gorącej plazmie dysku, w której wymieszane są ze sobą swobodne neutrony, protony, pary elektronowo-pozytonowe, a także jądra cięższych pierwiastków, takich jak hel. Wiele z nich jednak anihiluje następnie ze swymi antycząstkami (w reakcjach powstają zarówno neutrina, jak i antyneutrino), deponując energię uzyskaną z procesu anihilacji w strudze dżetu i pomagając w ten sposób w jej przyspieszaniu.

Ze względu na ogromnie odległości nie spodziewamy się jednak, aby strumień neutrin dochodzący do Ziemi w związku z błyskiem gamma był znaczący, a pomiary za pomocą obecnie dostępnych detektorów neutrinowych dostarczają jak na razie jedynie górnych ograniczeń.

Klastrowanie

Z powyżej wymienionych powodów bezpośrednie obserwacje dysków hiperakrecyjnych, odpowiedzialnych za produkcję błysków gamma, nie są możliwe. O ich właściwościach możemy wnioskować pośrednio, badając emisję z dżetów, mierząc ich energetykę czy zmienność czasową. Własności te powinny zależeć od parametrów fizycznych systemu dysk-czarna dziura, takich jak masa i prędkość obrotu dziury czy



też ilość masy akreowanej w dysku na jednostkę czasu. Nie bez znaczenia jest też pole magnetyczne, którego konfiguracja geometryczna oraz wkład do ciśnienia całkowitego w dysku domyka nasz model. Model ten jest skonstruowany na bazie równań magnetohydrodynamiki, które stanowią trzon naszych symulacji. Tego typu czasochłonne obliczenia prowadzimy na klastrach komputerowych.

Obecnie zespół astrofizyczny, który pracuje pod moim kierunkiem w Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, ma stały dostęp do mini-klastra (20 rdzeni obliczeniowych) posiadanego przez nasz instytut. Prowadzimy na nim prace testowe. Właściwe obliczenia wykonujemy, korzystając z zasobów Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Uniwersytetu Warszawskiego (ICM UW), dzięki uzyskanemu grantowi obliczeniowemu. Wykorzystujemy przede wszystkim superkomputer Cray, zbudowany z ponad 1000 rdzeni, znajdujący się w nowym budynku ICM na warszawskim Tarchominie.

Przykładowy model namagnesowanego hiperdysku akreującego przez 0,1 sekundy na czarną dziurę w centrum błysku gamma, w dwuwymiarowej symulacji o typowej rozdzielczości 256x256 oczek, liczy się na tym komputerze (wykorzystując kilkanaście spośród jego rdzeni – „nodów”) przez kilka tygodni. Z kolei symulacje akrecji na czarną dziurę w „zwykłych” układach rentgenowskich, gdzie na razie zarówno zaniedbujemy pole magnetyczne, jak i nie mamy skomplikowanej mikrofizyki wynikającej z reakcji jądrowych, możemy przez podobny okres liczyć w trzech wymiarach.

Umożliwia nam to uzyskanie wiedzy o możliwych efektach zaburzających symetrię osiową, które mogą często mieć miejsce w układach podwójnych gwiazd, a także w centrach galaktyk. I pomaga zrozumieć, co naprawdę dzieje się w otoczeniu czarnych dziur.

AGNIESZKA JANIUK

Krzywa zmian blasku jednego z rentgenowskich układów podwójnych, pokazująca jego krótkookresową zmienność. Obserwacja z satelity Rossi X-ray Timing Explorer.

Dane rentgenowskie dostępne są w archiwum RXTE: heasarc.gsfc.nasa.gov. Ekstrakcję danych dla tego obiektu wykonał Mikołaj Grzędzielski.

Chcesz wiedzieć więcej?

Janiuk A. (2017). Microphysics in the Gamma-Ray Burst Central Engine7, *Astrophysical Journal*, vol. 837, p. 39.

Sukova P., Janiuk A. (2016). Non-linear behaviour of XTE J1550–564 during its 1998–1999 outburst, revealed by recurrence analysis, *Astronomy and Astrophysics*, 591, A77.

Sukova P., Charzynski S., Janiuk A. (2017). Transonic structure of slowly rotating accretion flows with shocks around black holes [w:] *New Frontiers in Black Hole Astrophysics, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 324*, pp. 23–26.