

Dyski akrecyjne a ewolucja dżetów

Agnieszka JANIUK

Dżety – spolszczona wersja tego słowa wydaje się już być zadomowiona w naszym języku (a w każdym razie w codziennym żargonie astronomów) – są wąskimi strugami plazmy, jakie z okolic biegunowych wyrzucają gwiazdy albo jądra galaktyk. Najczęściej dżety badane są w związku z tzw. obiektami zwartymi (w których stosunek masy do rozmiaru jest bardzo duży), czyli gwiazdami neutronowymi bądź czarnymi dziurami – choć nie tylko. W tym tekście będzie mowa – w skali od mikro do makro – o dżetach w mikrokwarzarach, błyskach gamma oraz aktywnych galaktykach.

Te pierwsze to jak gdyby kwazary w miniaturze. Są to układy podwójne, w których następuje przepływ materii z gwiazdy towarzyszącej (jest to na ogół gwiazda ciągu głównego lub olbrzym) na składnik zwarty – czarną dziurę lub gwiazdę neutronową. Spływająca materia rotuje, tworząc dysk akrecyjny wokół zasysającej ją gwiazdy, dżet zaś wyrzucany jest wzdłuż osi symetrii dysku.

Kolejny typ źródeł z dżetami, również w skali raczej mikro, to błyski gamma. Obserwowane wysokoenergetyczne promieniowanie gamma pojawia się na niebie w postaci jednorazowych, bardzo silnych pojaśnień, trwających od ułamka sekundy do kilkuset sekund – i wszystko wskazuje na to, że źródłem fotonów gamma jest krótkotrwały, wyrzucany z relatywistyczną prędkością dżet. Same błyski zostały po raz pierwszy zaobserwowane już ponad 40 lat temu, jednak ich pochodzenie i budowa są przedmiotem badań i intensywnej obserwacji dopiero od niedawna. W skali makro natomiast dżety znane są od dawna – są to ogromne, nieraz o rozmiarach rzędu kilku kiloparseków, strugi plazmy wyrzucane z jąder kwazarów, odkrytych na początku lat sześćdziesiątych XX wieku.

Zdjęcia dżetów wykonane teleskopem stanowią bezpośredni, obserwacyjny dowód na ich istnienie w skali makro. Wielkoskalowe dżety widoczne są na mapach radiowych, optycznych bądź rentgenowskich. Często przedstawiają one – położone po obu stronach jądra – okazałych rozmiarów obłoki, w których kierunku wystrzelują dwie wąskie strugi gazu. W miejscu, gdzie zderzają się one z gęstymi obłokami, powstają jasne plamy, wzbudzone do świecenia na koszt energii kinetycznej hamującego dżetu – na przykład widoczna na górze strony galaktyka 3C 219. Przykładem może być też galaktyka aktywna M87 oraz kwazar 3C 273, gdzie widać wąskie jasne strugi wyrzucane z centrum galaktyki – w tym akurat przypadku pojedyncze, ponieważ kąt widzenia ziemskiego obserwatora jest taki, że przeciwną struga jest praktycznie niewidoczna.

Czasami dżet może mieć niejednorodną strukturę, gdy sąsiadują na przemian obszary jaśniejsze i ciemniejsze (w obrazie rentgenowskim, optycznym bądź radiowym), podobne do zgęszczeń i rozrzedzeń.

Tego typu obserwacje wskazują na niejednostajną aktywność źródeł centralnych. Z kolei na mapach kwazarów można wyodrębnić kolejne obszary radioowo aktywne, pobudzone do świecenia przez uderzający w nie dżet – często są to grupy kilku sąsiadujących struktur o różnym natężeniu emisji, przedstawiające jakby historię życia i aktywności galaktyki.

O obecności dżetu świadczyć mogą, oprócz fotografii w rozmaitych długościach fal, również inne obserwacje.

Na przykład, analizując promieniowanie kwazarów, można stwierdzić, że składnik widma o kształcie nietermicznym (potęgowym) jest produkowany w wyniku emisji synchrotronowej przez elektrony poruszające się wzdłuż linii pola magnetycznego. Takie elektrony znajdują się w plazmie dżetu. Z kolei w przypadku błysków gamma przesłanką wskazującą na to, że promieniowanie pochodzi z wąskiego stożka dżetu, są, między innymi, rozważania dotyczące energii w tym zjawisku. Gdyby obserwowany strumień promieniowania był produkowany izotropowo, to wymagana jasność absolutna źródła (na ogół znamy odległość, która wyznaczana jest na podstawie przesunięcia ku czerwieni w widmie poświaty optycznej błysku) byłaby zbyt wielka – wybuch musiałby mieć energię rzędu nawet 10^{54} ergów! Jeśli jednak promieniowanie to jest skolimowane w stożku o niewielkim kącie rozwarcia, to wówczas rzeczywista energia całkowita wybuchu może być nawet o kilka rzędów wielkości mniejsza. Przy relatywistycznym ruchu plazmy w dżecie jego kąt rozwarcia (mierzony w radianach) jest odwrotnością czynnika Lorentza określającego prędkość ekspansji dżetu. Ten czynnik w błyskach gamma może typowo mieć wartość 100, co oznacza, że dżet porusza się z prędkością stanowiącą 99,99995% prędkości światła.

Dżety są nieodłącznie związane z występowaniem dysków akrecyjnych, aczkolwiek to, w jaki dokładnie sposób powstają, jest wciąż pewną zagadką dla astronomów. Jest to więc raczej nadal fakt obserwacyjny niż prawo fizyki, że obecności dżetów bez towarzystwa dysku się nie stwierdza – choć na odwrót jest to możliwe. Jak już wspomniałam wyżej, rozmaite obserwacje mówią nam o tym, że dżety nie muszą być jednorodne i świecić cały czas tak samo. Złożona struktura radiowogłośnych kwazarów, oprócz tego, że może być śladem dawnych i obecnych epizodów aktywności jądra, często bywa również „poobrączana”, tak jakby dżet w trakcie swojej ewolucji zmieniał kierunek. Z kolei w niektórych stanach mikrokwazara GRS 1915+105 dżet jest produkowany jednostajnie, a w innych w postaci epizodycznych wyrzutów, o czym świadczą obserwacje radiowe. Ponadto, większość błysków gamma (około 80%) wykazuje podstrukturę – ich krzywe blasku nie są pojedynczymi pulsami, lecz składają się z szeregu pików, których czas trwania jest nawet tysiącrotnie krótszy od długości całego błysku.

Te wszystkie przykłady świadczą o silnej zmienności dżetów, w bardzo różnych skalach. Ponieważ w każdym przypadku z produkcją dżetu związany jest dysk akrecyjny, więc naturalne wydaje się podejrzenie, że struktura i ewolucja tego dysku w jakiś sposób musi odpowiadać za obserwowaną zmienność dżetów.

W przypadku mikrokwazarów bardzo dobrze sprawdza się model niestabilności dysku akrecyjnego wywołanej ciśnieniem promieniowania. W gorącej materii dysku, podobnie jak we wnętrzu gwiazdy, ciśnienie całkowite składa się z sumy ciśnienia gazu i ciśnienia promieniowania. To ostatnie jest proporcjonalne do temperatury w potęgę czwartej, podczas gdy ciśnienie gazu zmienia się liniowo z jego temperaturą i gęstością. W pewnym zakresie temperatur i gęstości powierzchniowych, które odpowiadają określonemu zakresowi odległości od centrum (a dokładniej, od wewnętrznego brzegu dysku), ciśnienie promieniowania jest większe od ciśnienia gazu. Ma to decydujące znaczenie dla bilansu energetycznego. W bilansie tym ciepło, wytwarzane dzięki grawitacyjnej energii potencjalnej wskutek działania sił lepkich (lepkość jest proporcjonalna do ciśnienia całkowitego), musi zostać zrównoważone przez chłodzenie promieniste. Gwałtowna, lokalna zmiana bilansu grzania i chłodzenia sprawia, że obszar (pierścień) dysku staje się niestabilny.

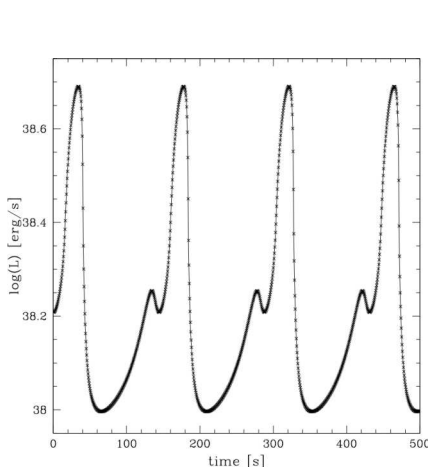
Usiłuje on dostosować się do warunków, lecz wówczas wzrost temperatury pociąga za sobą konieczność obniżenia gęstości i dany pierścień dysku akreuje szybciej, opróżniając się. Z kolei wzrost tempa akrecji oznacza dalszy wzrost temperatury – nie ma zatem samoregulacji. Stabilizacja warunków może nastąpić jedynie wtedy, gdy dołączy się dodatkowe chłodzenie. Taką możliwość zapewnia adwekcja, czyli pobranie nadmiaru energii gazu bezpośrednio przez połykającą go czarną dziurę, bez wyświecania jej. Dysk stabilizuje się zatem w fazie gorącej dzięki adwekcji, natomiast w fazie chłodnej dzięki dominacji ciśnienia gazu. W warunkach pośrednich, gdy dominuje ciśnienie promieniowania, dysk jest niestabilny.

Opisany powyżej w skrócie mechanizm powoduje, że dyski akrecyjne w pewnych warunkach (zdefiniowanych przede wszystkim przez średnie tempo akrecji) oscylują między stanem gorącym i chłodnym. Oscylacje takie skutkują cyklicznymi rozbłyskami i pociemnieniami. Inaczej mówiąc, kwazary, podobnie jak mikrokwazary, będą przechodziły fazy „aktywne” i „spokojne”. Przepuszczalnie, jeśli jądro kwazara będzie w stanie aktywnym, może produkować dżet. Jeśli okresowo „wygaśnie”, produkcja dżetu zostanie zahamowana. Skale czasowe będą różne dla kwazarów i mikrokwazarów, ponieważ są związane z masą centralnej czarnej dziury.

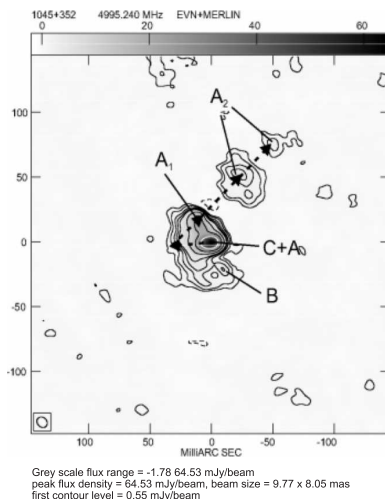
A co z błyskami gamma? U podstawy dżetu emitującego promieniowanie gamma musi również znajdować się dysk akrecyjny – tak wskazuje nasza aktualna wiedza, wedle której akrecja materii na czarną dziurę jest najbardziej wydajnym energetycznie ze znanych procesów fizycznych. Samego dysku jednak nie widzimy. Jest on tak gęsty i gruby, że fotony uwięzione wewnątrz niego nie mają szans na wydostanie się i razem z materią są połykane przez czarną dziurę. Sam proces trwa bowiem bardzo krótko, średnio kilkadziesiąt sekund, materii zaś do „skonsumowania” jest ogromna ilość – na przykład spora część otoczki masywnej gwiazdy, hipernowej.

Tak wielkie tempo akrecji, rzędu masy Słońca na sekundę, jest właśnie odpowiedzialne za ogromną temperaturę dysku. Aby go chłodzić, emitowane są neutrino, powstające w wyniku reakcji jądrowych w niezwykle gęstej i gorącej materii. Te neutrino, anihilując z antyneutrinoami ponad powierzchnią dysku, mogą stanowić częściowe zasilanie energetyczne wyrzucanego dżetu (jednak większość energii do dżetu jest przekazywana najprawdopodobniej za pośrednictwem pola magnetycznego na koszt rotacji samej czarnej dziury). Jak się okazuje, dysk w pewnym obszarze jest aż tak gęsty i gorący, że robi się nieprzezroczysty nawet dla neutrino. Co ciekawe, może wystąpić tam niestabilność o charakterze termicznym. Pojawiający się wówczas dodatkowy wkład do ciśnienia pochodzący od neutrino ma podobny charakter do ciśnienia promieniowania w „zwykłych” dyskach mikrokwazarów. Jego nagłemu wzrostowi towarzyszy przejście fazowe, zmieniające skład chemiczny plazmy poprzez fotodezintegrację jąder helu – ma to wyrównywać zmiany ciśnienia. Ten efekt stanowi o wystąpieniu niestabilności i fluktuacji jasności neutrinoowej dysku, co może w konsekwencji prowadzić do zmienności produkowanego dżetu, obserwowanej przez detektory jako kolejne piki w krzywej blasku docierającego do nas błysku.

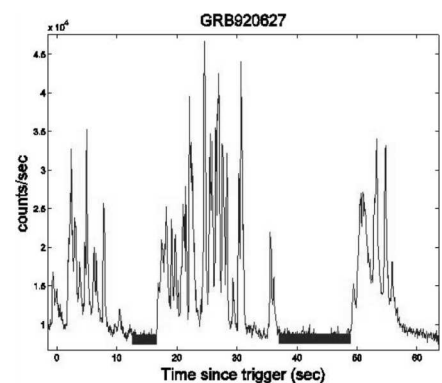
Jak się zatem okazuje, całkiem podobne mechanizmy odgrywają, być może, kluczową rolę w ewolucji i obserwowanej zmienności obiektów tak różnych, jak radiogalaktyki, mikrokwazary i błyski gamma. Czy jest w tym coś zagadkowego? Chyba nie, o ile pamiętamy, że w sercach wszystkich tych kosmicznych „bestii” czai się jedno i to samo: połykające materię czarne dziury. One same w sobie są, oczywiście, nie lada zagadką.



Cykl aktywności dysku akrecyjnego w modelu niestabilności wywołanej ciśnieniem promieniowania (parametry dla mikrokwazara – skala czasowa zmienności rzędu sekund).



Mapka radiowa kwazara 1045+352. Widoczna jest wielokrotna struktura.



Przykładowy profil czasowy błysku gamma, pokazujący wielokrotne piki jasności.