

Czy zastanawiałeś się kiedyś, jakie eksplozje w obserwowalnym Wszechświecie są najjaśniejsze i co je powoduje? Odpowiedź na drugą część pytania związana jest z pewnymi interesującymi zjawiskami zachodzącymi w cyklu życia niektórych gwiazd. Zanim jednak przejdziemy do szczegółów tych zdarzeń, wyjaśnimy najpierw, jakie eksplozje astrofizycy uznają za najjaśniejsze. Otóż najjaśniejszym zdarzeniem po Wielkim Wybuchu, czy też całą rodziną zdarzeń, są rozbłyski promieniowania gamma (*gamma-ray bursts*, GRBs). Określenie „najjaśniejszy” w astrofizyce to często synonim najbardziej energetycznego, czyli wyzwalającego najwięcej energii. Tak więc GRBs są najbardziej energetycznymi zdarzeniami obserwowanymi po narodzinach Wszechświata. Podczas wybuchu uwalniają one energię o wartości do około 10^{53} erg/s.

1 erg = 10^{-7} J. Dla porównania, nasze Słońce emituje energię rzędu 10^{33} erg/s. Zatem GRB emituje do 100 trylionów razy więcej energii niż Słońce, i to w czasie rzędu kilku–kilkudziesięciu minut.

Emitują one w bardzo krótkim czasie prawie taką samą energię jak supernowa, spowodowana kolapsem i eksplozją masywnej gwiazdy, która zwykle trwa tygodnie. Czym więc są rozbłyski promieniowania gamma? Są to intensywne błyski promieniowania z odległości kosmologicznych (spozza naszej Galaktyki) obserwowane w paśmie promieniowania gamma widma elektromagnetycznego.

Za odkryciem rozbłysków promieniowania gamma stoi niezwykle ciekawa historia. W kulminacyjnym momencie zimnej wojny, w latach 60. XX wieku, Stany Zjednoczone wystrzeliły satelity w celu wykrycia wysokoenergetycznych fotonów pochodzących z testów broni jądrowej. Oczywiście misja ta była tajna. Satelity miały na celu zweryfikowanie przestrzegania przez inne kraje podpisanego w roku 1963 Układu o zakazie prób broni nuklearnej w atmosferze, w przestrzeni kosmicznej i pod wodą (*Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space and Under Water*). Satelity Vela, nazwane tak od hiszpańskiego czasownika „velar” – obserwować, wyposażone były w detektory promieniowania rentgenowskiego, gamma oraz neutronowe. Detektory promieniowania rentgenowskiego miały za zadanie bezpośrednie wykrycie błysku pochodzącego z wybuchu jądrowego. Dwa pozostałe detektory miały zapewnić dalsze potwierdzenie sygnatury zdarzenia jądrowego. Jednak w 1967 roku wysłane przez Amerykanów satelity znalazły coś zupełnie nieoczekiwanego. Vela 3 i 4 zaobserwowały krótkie błyski promieniowania gamma, które wydawały się pochodzić nie z Ziemi, ale z przestrzeni kosmicznej. Przez sześć lat detekcje te były utajnione i dopiero w latach 1972–1973 naukowcy z Los Alamos mieli możliwość przeanalizowania sygnałów zarejestrowanych przez satelity Vela. Badacze doszli do wniosku, że zaobserwowane rozbłyski promieniowania gamma są rzeczywiście „pochodzenia kosmicznego”. Publikacja dotycząca 16 błysków obserwowanych przez satelity Vela

5a,b i Vela 6a,b pomiędzy lipcem 1969 a lipcem 1972 ukazała się w czasopiśmie „Astrophysical Journal” w 1973 roku. Wtedy też nadano tym zjawiskom nazwę *gamma-ray bursts*.

Klebesadel, Strong i Olson, *Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin*, ApJ, vol. 182, 1973.

Po dokonaniu odkrycia astrofizycy przez pewien czas zastanawiali się nad pochodzeniem takich wybuchów promieniowania gamma. Cóż może zasilić tak wysokoenergetyczny wybuch? Debatowano nad możliwym pochodzeniem tych zjawisk z wnętrza naszego własnego Układu Słonecznego, z Drogi Mlecznej lub spoza niej.

Jedną z wartych odnotowania wielkich debat (*Great Debates in Astronomy*) dotyczących GRB odbyła się 22 kwietnia 1995 roku. Celem tej debaty było zrozumienie pochodzenia błysków gamma – ustalenie, czy pochodzą z naszej Galaktyki, czy też z odległego Wszechświata. Debatę pomiędzy Donaldem Lambem, zwolennikiem pochodzenia galaktycznego, i Bohdanem Paczyńskim, zwolennikiem pochodzenia pozagalaktycznego, prowadził Martin Rees.

Dopiero w roku 1997 obserwacyjnie potwierdzono, że rozbłyski promieniowania gamma są rzeczywiście pochodzenia pozagalaktycznego. Odkrycie to było zdumiewające ze względu na fakt, że aby wytłumaczyć obserwowaną przez detektory promieniowania gamma jasność, źródła te musiałyby być niezwykle energetyczne. Skale energetyczne wytwarzane podczas rozbłysku gamma przekraczały wyobraźnię naukowców.

Zanim jednak zagłębimy się w mechanizmy stojące za tak niezwykłym wydarzeniem, zatrzymajmy się na chwilę, aby opisać dwie ogólne klasy rozbłysków promieniowania gamma. Dzielimy je na krótkie i długie, ze względu na czas, w jakim są obserwowane w detektorach. Te pierwsze trwają od kilku milisekund do 2 sekund, a te drugie zazwyczaj do kilku minut.

Rozbłysk pierwszego typu, czyli krótki, jest skutkiem złania się dwóch gwiazd neutronowych lub gwiazdy neutronowej i czarnej dziury. Gwiazdy neutronowe i czarne dziury są bardzo egzotycznymi obiektami astrofizycznymi, wymagającymi dłuższego omówienia dla zrozumienia ich natury. Obiekty te stanowią ostatnie stadium życia dużych gwiazd o masie powyżej pewnego progu. Gwiazda neutronowa powstaje w wyniku zapadnięcia się jądra gwiazdy zwanej nadolbrzymem. Jest najgęstszym znanym obiektem gwiazdowym we Wszechświecie (nie licząc czarnych dziur). Czarna dziura również powstaje w wyniku zapadnięcia się jądra gwiazdy. Czasoprzestrzeń w jej pobliżu jest tak silnie zakrzywiona, że nawet światło nie jest w stanie uciec z obszaru wewnątrz tzw. horyzontu zdarzeń, czyli powierzchni otaczającej czarną dziurę. Niedawna nieoczekiwana obserwacja potwierdziła spekulacje, że krótkie rozbłyski gamma są rzeczywiście zasilane przez połączenie się dwóch gwiazd neutronowych. Chodzi o słynną detekcję promieniowania grawitacyjnego GW170817, która miała miejsce 17 sierpnia 2017 roku. Źródłem promieniowania było właśnie połączenie dwóch gwiazd neutronowych, w wyniku którego powstała

czarna dziura. Sygnałowi promieniowania grawitacyjnego towarzyszył krótki błysk promieniowania gamma, który szczęśliwie udało się zarejestrować.

O detekcji GW170817 pisał Michał Bejger w Δ_{18}^{11} .

Za przyczynę powstawania rozbłysków gamma drugiego typu, czyli długich, uważane jest zapadanie się jądra bardzo masywnej gwiazdy (o masie powyżej 20 mas Słońca). W wyniku zapadnięcia się jądra powstaje gwiazda neutronowa lub czarna dziura, a gwałtowne odrzucenie zewnętrznych warstw gwiazdy nazywane jest wybuchem supernowej.

Rozbłyski gamma są obserwowane jako relatywistyczne dżety skierowane wzdłuż kierunku obserwacji z Ziemi. Relatywistyczne dżety są wiązkami promieniowania i zjonizowanych cząstek pędzących z prędkością bliską prędkości światła. Wiemy już, że rozbłyski gamma towarzyszą zapadaniu się masywnych gwiazd albo zlewaniu się dwóch gwiazd neutronowych. Ale jaki jest mechanizm generowania tak wielkich energii, nieobserwowanych nigdzie indziej we Wszechświecie? Żeby lepiej to zrozumieć, skupimy się na tym, co dzieje się w samym centrum, kiedy zachodzi jeden z tych dwóch procesów.

Na przykład w przypadku długich rozbłysków gamma, kiedy szybko rotująca gwiazda zapada się do czarnej dziury, materia w pobliżu jądra opada w kierunku centrum i wirując, tworzy gęsty dysk akrecyjny. Akrecja jest zjawiskiem towarzyszącym opadaniu materii na masywny centralny obiekt. Zasada zachowania momentu pędu powoduje, że materia, która początkowo krążyła wokół jądra, nie może spaść na nie bezpośrednio, tylko wiruje z coraz większą prędkością w miarę zbliżania się do osi obrotu. Materia w ekstremalnych warunkach i wysokich temperaturach, jakie towarzyszą tym zjawiskom, jest zwykle zjonizowana. Wirujące zjonizowane cząstki są z kolei źródłem potężnych pól magnetycznych. W konsekwencji siły elektromagnetyczne zaczynają odgrywać istotną rolę obok silnych pól grawitacyjnych i innych zjawisk mechanicznych. Proces akrecji sprowadza materię do czarnej dziury poprzez wytracanie momentu pędu w wyniku różnych mechanizmów, takich jak zjawisko lepkości i różnych rodzajów niestabilności plazmy. Materia unosi ze sobą również strumień pola magnetycznego, co prowadzi do powstawania silnego strumienia pola magnetycznego w pobliżu horyzontu czarnej dziury. Strumień ten przyczynia się do rozpędzania i skupiania wiązki naładowanych relatywistycznych cząstek tworzących dżet. Promieniowanie gamma jest wytwarzane w tych dżetach w wyniku różnych procesów, takich jak promieniowanie synchrotronowe i odwrotne rozpraszanie Comptona. Dokładny opis tych procesów jest ciągle przedmiotem aktywnych badań i wymaga lepszego zrozumienia.

W obszarze odpowiedzialnym za powstawanie krótkiego rozbłysku gamma zachodzą podobne zjawiska. Kiedy dwie gwiazdy neutronowe zlewają się, tworząc czarną dziurę, część materii, oderwana przez siły pływowe, pozostaje poza czarną dziurą i tworzy dysk akrecyjny. W tym wypadku pole magnetyczne również odgrywa

kluczową rolę. Mechanizm może tutaj być podobny do tego opisanego w przypadku długich rozbłysków gamma, ponieważ proces akrecji odgrywa tu rolę pierwszoplanową. Wzajemne oddziaływanie centralnego rejonu akrecji i tworzących się relatywistycznych dżetów również w tym przypadku jest aktualnie przedmiotem aktywnych badań. Wielu astrofizyków pracuje intensywnie nad analitycznymi i numerycznymi modelami mającymi na celu lepsze opisanie i zrozumienie mechanizmów stojących za rozbłyskami gamma.

Innym ciekawym zjawiskiem wartym wspomnienia w kontekście rozbłysków gamma jest *kilonowa*. Jest często uważana za protoplastę krótkich rozbłysków gamma, w których łączą się dwie gwiazdy neutronowe lub gwiazda neutronowa i czarna dziura. Uważa się, że takie procesy są zdominowane przez tzw. *proces r* (skrót oznacza zjawisko wychwytu szybkich neutronów, *rapid neutron captures process*). Panuje przekonanie, że nukleosynteza w postaci procesu *r* jest odpowiedzialna za tworzenie około połowy jąder atomowych cięższych od żelaza. Zjawisko to polega na szeregu następujących po sobie przechwytywów szybkich neutronów przez coraz cięższe jądra atomowe. Typowo proces zaczyna się od jądra żelaza. Żelazo i wszystkie lżejsze pierwiastki mogą powstawać w jądrach zwykłych gwiazd w wyniku reakcji syntezy termojądrowej. W tych reakcjach nie mogą powstać jednak cięższe pierwiastki. Dlatego zjawiska takie jak *kilonowa* są kluczowe dla powstawania cięższych pierwiastków, jak kobalt, miedź i cynk, które są niezbędne dla istnienia życia, a także do tworzenia drogocennych metali, np. złota.

Jako ludzie od niepamiętnych czasów zawsze szukamy coraz głębszego zrozumienia Wszechświata. Nasze poszukiwanie wiedzy i ciężka praca wielu pokoleń pomogły lepiej zrozumieć tak egzotyczne procesy, jak rozbłyski gamma, cykle życia gwiazd czy, w większej skali, historię całego Wszechświata. Dzięki temu wiemy, że Ty i ja istniejemy, ponieważ jakieś gwiazdy uformowały się i eksplodowały miliardy lat temu, i jesteśmy dosłownie zbudowani z gwiazdowego pyłu. To zrozumienie napełnia nas jednocześnie pokorą i dumą!

