

Paczyński, Bohdan

Z życia nauki i życia Towarzystwa : Rozbłyśki gamma : fakty i fantazje

Rocznik Towarzystwa Naukowego Warszawskiego 55, 7-22

1992

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych oraz w kolekcji mazowieckich czasopism regionalnych mazowsze.hist.pl.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

A. Z ŻYCIA NAUKI I ŻYCIA TOWARZYSTWA

PRAEMIUM TRIENNALE

Towarzystwo Naukowe Warszawskie przyznaje co trzy lata - począwszy od 1991 r. - nagrody naukowe „za oryginalne osiągnięcia w dziedzinie nauki i jej wykorzystania, a także za osiągnięcia o znaczącej doniosłości dla rozwoju kultury narodowej”. Uchwałą Zarządu Towarzystwa w dniu 2 października 1991 r. *Praemium* przyznano trzem osobom, a w tym profesorowi Bohdanowi Paczyńskiemu z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika w Warszawie i Uniwersytetu w Princeton (USA).

We wrześniu 1993 r. Profesor Paczyński uczestniczył w Zjeździe Polskiego Towarzystwa Astronomicznego w Warszawie. Z tej okazji 24 września był gościem Towarzystwa i odebrał z rąk Prezesa Bolesława Górnickiego dyplom laureata nagrody i medal TNW. Udostępniony przez prof. B. Paczyńskiego angielski tekst referatu pt. „Rozbłyśki gamma: fakty i fantazje” publikujemy w polskim przekładzie.

Redakcja

Bohdan Paczyński

Princeton University Observatory, Princeton, NJ 08544-1001

ROZBŁYSKI GAMMA: FAKTY I FANTAZJE

Streszczenie

Obserwacje wskazują na to, że znajdujemy się w centrum lub w pobliżu centrum sferycznie symetrycznego rozkładu rozbłyśków promieniowania γ , zwanych bersterami. Aż do pewnej odległości liczba bersterów w jednostce objętości jest jednorodna, dalej zaś maleje w tym samym stopniu we wszystkich kierunkach. Wiemy, że jesteśmy w środku tylko jednego

układu: całego obserwowalnego Wszechświata. Stąd odległość do rozbłysków γ sugerowana przez obserwowany rozkład wynosi kilka Gigaparseków ($\sim 10^{28} \text{ cm}$), co czyni je najsilniejszymi źródłami promieniowania elektromagnetycznego we Wszechświecie: $\sim 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$. Nie można jednak obecnie wykluczyć możliwości, że berstery znajdują się w obłoku kometarnym Oorta lub w rozciągniętym halo galaktycznym.

Widma rozbłysków γ są bardzo szerokie - mogą rozciągać się od 1 ke V do co najmniej 200 Me V - i są najwyraźniej nietermiczne. Czas trwania rozbłysków jest bardzo różny, wynosi od 5 ms do 1000 s . Wykazują one przy tym wiele różnorodnych form zmienności; niektóre zmieniają się w submilisekundowej skali czasowej. Z takiej szybkości zmian wynika, że źródła rozbłysków są bardzo zwarte, najprawdopodobniej związane z gwiazdami neutronowymi lub czarnymi dziurami.

Poszukiwanie rozbłysków na falach radiowych i w zakresie energii sięgających 10^6 V , wydaje się być możliwe i powinno dostarczyć nowego spojrzenia na istotę tych zagadkowych zjawisk.

* * *

Wszystkie dotychczasowe artykuły przeglądowe dotyczące rozbłysków γ koncentrowały się głównie na ich zmienności czasowej, widmach oraz na różnorodnych modelach teoretycznych tych zagadkowych zjawisk. Ten artykuł jest zasadniczym odejściem od powyższej konwencji. Moim zdaniem, dopóki nie ustali się w sposób jednoznaczny odległości do tych źródeł, dopóty nie będzie można zrozumieć ich skomplikowanej natury. Do jesieni 1991 roku przytłaczająca większość obserwatorów i teoretyków sądziła, że odległość ta wynosi $\sim 200 \text{ pc} \approx 10^{21} \text{ cm}$. Od tego czasu napisano dziesiątki prac dotyczących mniej lub bardziej wiarygodnych modeli, w których odległość do bersterów zmieniała się od $\sim 10^{17} \text{ cm}$ do $\sim 10^{28} \text{ cm}$. Nie jest to już teraz aż tak pewne.

Obecnie najbardziej bezpośrednia informacja o odległości do bersterów oparta jest na obserwowanym rozkładzie pozycji rozbłysków na niebie i na rozkładzie ich maksymalnych natężeń. Są to najważniejsze fakty. Istnieje

również wiele innych obserwacji nie związanych bezpośrednio z nieznaną skalą odległości, lecz dostarczających nam ważnych informacji o naturze źródeł. I na koniec, mamy ogromną różnorodność modeli teoretycznych. Wszystkie, nie wyłączając moich własnych, traktowane są tutaj jako fantazje. Ich opracowywanie jest zabawne, lecz większość z nich, jeśli nie wszystkie, ma niewiele wspólnego z rzeczywistością.

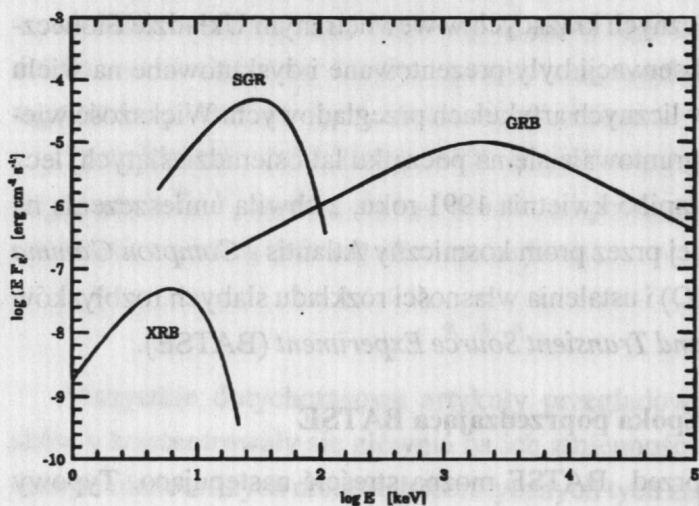
Rozbłyski promieniowania γ zostały odkryte przez amerykańskie satelity *Vela*, zaprojektowane i wystrzelone w celu kontrolowania, czy Związek Radziecki stosuje się do układu o zakazie prób z bronią jądrową. Przez kilka lat rozbłyski były dostrzegane przez niewielkie detektory znajdujące się na kilku sondach kosmicznych krążących w wewnętrznym Układzie Słonecznym. Wyniki tych obserwacji były prezentowane i dyskutowane na wielu konferencjach oraz w licznych artykułach przeglądowych. Większość wiedzy o rozbłyskach ugruntowała się na początku lat osiemdziesiątych, lecz główny przełom nastąpił 5 kwietnia 1991 roku, z chwilą umieszczenia na orbicie okołoziemskiej przez prom kosmiczny *Atlantis - Compton Gamma Ray Observatory* (GRO) i ustalenia własności rozkładu słabych rozbłysków gamma przez *Burst and Transient Source Experiment* (BATSE).

Epoka poprzedzająca BATSE

Naszą wiedzę sprzed BATSE można streścić następująco. Typowy czas trwania rozbłysków promieniowania γ wynosi kilka sekund: najkrótszy z nich trwa, tylko ~ 5 milisekund, najdłuższy dotychczas obserwowany ~ 1000 sekund. Rozkład czasu trwania rozbłysków jest dość jednorodny. Niektóre rozbłyski zmieniają się w czasie bardzo wolno, podczas gdy inne - w skali czasowej wynoszącej poniżej milisekundy. Rozbłyski są najsilniejszymi z obserwowanych źródeł promieniowania gamma na niebie. Raz na kilka lat zdarza się rozbłysk emitujący bardzo duży strumień energii $F \sim 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Można to porównać ze strumieniem energii w świetle widzialnym $\sim 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ docierającym do nas z najjaśniejszej gwiazdy ziemskiego nieba, Syriusza.

Nadeszło wiele doniesień, że widma niektórych rozbłysków γ mają linie absorpcyjne w zakresie $\sim 20-70 \text{ ke V}$ (na przykład eksperymenty KONUS

i GINGA) lub linie emisyjne na ~ 400 keV (na przykład KONUS i inne), podczas gdy *Solar Maximum Mission* (SMM) i BATSE mimo poszukiwań nie zdołały zarejestrować żadnych linii. Problem ich istnienia jest daleki od rozstrzygnięcia. Widma ciągłe rozbłysków promieniowania γ są bardzo szerokie, twarde i nietermiczne. Schematyczne przedstawienie widma umiarkowanie silnego rozbłysku promieniowania γ (GRB) zawiera rysunek 1. Pokazane są również widma rozbłysku rentgenowskiego (XRB) i źródła powtarzalnych błysków gamma (SGR), które stanowią dwa odmienne typy rozbłysków o wysokiej energii.



Rys. 1. Ukazane są schematycznie widma rozbłysku rentgenowskiego (XRB), źródła powtarzalnych błysków gamma (SGR) i rozbłysku γ (GRB). Należy zauważyć, że widma XRB i SGR są zgodne z widmem ciała doskonale czarnego, natomiast widmo GRB jest bardzo szerokie, co wskazuje na jego nietermiczne pochodzenie.

Według kilku doniesień, z kierunku niektórych źródeł rozbłysków promieniowania γ dostrzeżono również błyski optyczne, lecz były również doniesienia negujące te obserwacje. Sprawa jest kontrowersyjna.

Najdłuższy eksperyment poszukiwania rozbłysków gamma trwał 13 lat i odbywał się na pokładzie *Pioneer Venus Orbiter* (PVO). Zebrał on najlepszą statystykę rzadkich i silnych rozbłysków. Rozkład maksymalnych natężeń w zakresie widmowym 100-2000 keV przekraczających poziom F, najsilniejszych ~ 200 przypadków, wyrażał się wzorem:

$$N(\geq F) \approx 30 \text{rok}^{-1} \times [F / (2 \times 10^{-5} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1})]^{-1.48}$$

Wykładnik -1.48 ± 0.07 jest zgodny z wartością -1.5 , spodziewaną w sytuacji, gdy źródła są równomiernie rozmieszczone w przestrzeni. Obserwowany zakres F odpowiada czynnikowi ~ 36 w maksymalnych jasnościach widomych, a przez to czynnikowi co najmniej ~ 6 w odległości.

Pozycję rozbłysku na niebie można ustalić najdokładniej, porównując czasy przyjścia rozbłysku do detektorów rozmieszczonych na różnych sondach kosmicznych oddalonych od siebie o kilka jednostek astronomicznych ($1 \text{ j.a.} \approx 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}$ to odległość Ziemi od Słońca). Światło przebiega 1 jednostkę astronomiczną w ciągu około 8 minut. Dlatego też, jeśli dokładność pomiaru czasu wynosi jedną sekundę, położenia mogą być zmierzone z dokładnością kilku minut łuku. Technikę tę stosowano dla kilkadziesiątu stosunkowo silnych rozbłysków i ustalono przy jej pomocy, że są one rozłożone na niebie równomiernie. W szczególności, nie stwierdzono widocznej koncentracji ku płaszczyźnie Galaktyki lub jej centrum.

Można przyjrzeć się wszystkim typom obiektów astronomicznych i zadać pytanie: na jakich odległościach poszczególne typy wydają się być rozłożone jednorodnie w przestrzeni, a zarazem izotropowo na niebie? Znane są dwie możliwości. Tę własność mają gwiazdy wokół nas, dopóki nie przekraczamy skali wysokości dysku galaktycznego, wynoszącej $\sim 300 \text{ pc} \approx 10^{21} \text{ cm}$. Na odległościach większych widzimy koncentrowanie się gwiazd (a także gazu i pyłu międzygwiazdowego) ku płaszczyźnie Galaktyki. Niektóre gwiazdy, zwłaszcza bardzo stare, znajdują się w prawie sferycznym halo galaktycznym, którego środek położony jest w przybliżeniu w odległości $8 \text{ kpc} \approx 2.5 \times 10^{22} \text{ cm}$ od nas. Wszystkie znane obiekty halo galaktycznego są silnie skoncentrowane ku centrum Galaktyki. Na zewnątrz Drogi Mlecznej znajdują się galaktyki, gromady galaktyk, supergromady, co oznacza, że rozkład nie jest jednorodny. Jednakże sądzi się powszechnie, że na odległościach większych niż $\sim 100 \text{ Mpc} \approx 3 \times 10^{26} \text{ cm}$ wszystkie znane typy obiektów - galaktyki i ich gromady, kwazary, radiogalaktyki oraz inne aktywne jądra galaktyk - są rozłożone jednorodnie i izotropowo; istnieją pewne obserwacyjne świadectwa potwierdzające ten pogląd. Dlatego te obie niezmiernie różne skale odległości lokalna i kosmologiczna, są zgodne z obserwowanym rozkładem rozbłysków γ . Jednak-

że uczeni badający rozbłyski opowiedzieli się w stosunku 100 : 1 za dyskiem galaktycznym jako miejscem pochodzenia rozbłysków, ponieważ sądzono powszechnie, że ich widma i zmienność czasowa wskazywały na odległość $\sim 200pc$.

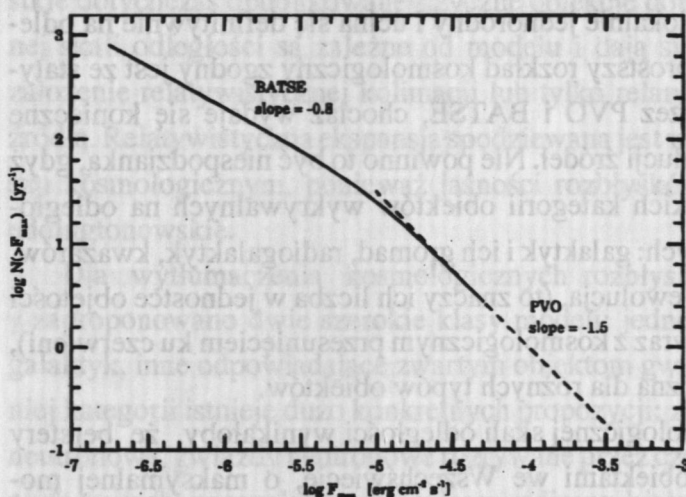
Eksperymenty balonowe z detektorami o dużej powierzchni i bardzo wysokiej czułości wykazywały, że występuje mniej słabych rozbłysków niż się spodziewano ekstrapolując zależność $N(\geq F) \sim F^{-1.5}$ w zakresie bardzo niskich strumieni $F < 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Wynikało stąd, że liczba bardzo słabych i przypuszczalnie bardzo odległych źródeł w jednostce objętości jest niższa od do wartości lokalnej. Spodziewano się tego zarówno dla lokalnej, jak i pozagalaktycznej skali odległości. Obydwie hipotezy różnią się jednak oczekiwanym rozkładem kątowym słabych rozbłysków. W przypadku skali lokalnej słabe rozbłyski powinny koncentrować się ku płaszczyźnie Galaktyki, natomiast w przypadku skali pozagalaktycznej powinny być rozłożone izotropowo. Niestety eksperymenty balonowe nie były w stanie zauważyć wystarczająco słabych rozbłysków, aby dostarczyć użytecznej informacji o ich rozkładzie kątowym.

Epoka BATSE

Przełomu dokonał eksperyment BATSE przeprowadzony na pokładzie *Compton Gamma Ray Observatory*. BATSE ma osiem detektorów NaI(Tl) o średnicy 50 cm każdy i może rejestrować rozbłyski o wiele słabsze, niż jest to w stanie uczynić jakikolwiek inny instrument kosmiczny. Może również określać kierunki do źródeł rozbłysków z dokładnością $\sim 5^\circ$ przez porównywanie tempa zliczeń z różnych detektorów. Prawie wszyscy oczekiwali, że BATSE stwierdzi koncentrację słabych rozbłysków ku płaszczyźnie Galaktyki. Nieliczni, wśród nich i ja, spodziewali się, że cokolwiek BATSE odkryje, wynikająca stąd skala odległości stanie się oczywista dla każdego. Okazało się, że obie nadzieje były płonne.

BATSE odkrył, że słabe rozbłyski są rozłożone na niebie izotropowo i że jest ich mniej, niż spodziewano się na podstawie ekstrapolacji liczby rozbłysków silnych. Rozkład natężeń rozbłysków został pokazany schema-

tycznie na rysunku 2. Nie jest jeszcze dostępna względna kalibracja eksperymentów PVO i BATSE, tak więc w pionie obydwie zestawy danych zostały dopasowane zgodnie z tempem rozbłysków obserwowanych przez te eksperymenty, w poziomie zaś tak, by gładko się ze sobą łączyły. Niezależnie od względnych kalibracji obu eksperymentów, to znaczy od tego, w jaki sposób przesunięte są względem siebie linie z PVO i BATSE - nie można dopasować do rozkładu silnych i słabych rozbłysków jednej wspólnej krzywej potęgowej. Uderzająca jest izotropowość rozkładu rozbłysków i nie został stwierdzony żaden statystycznie znaczący moment dipolowy czy kwadrupolowy.



Rys. 2. Wykres przedstawia liczbę rozbłysków na rok, które emitują maksymalny strumień w zakresie 100- 2000 keV przekraczający F_{max} , w funkcji F_{max} dla dwóch instrumentów: PVO (linia przerywana) i BATSE (linia ciągła). Dla silnych rozbłysków logarytmiczne nachylenie zależności wynosi -1.5, co wskazuje na jednorodny ich rozkład w przestrzeni. Dla słabych rozbłysków nachylenie wynosi -0.8, wskazując na spadek powyżej pewnej odległości, liczby źródeł w jednostce objętości.

Wszystkie rozbłyski, zarówno silne jak i słabe, rozmieszczone są na niebie izotropowo i przypadkowo. Około 200 rozbłysków z PVO ma rozkład maksymalnych strumieni, wskazujący na to, że liczba bliskich źródeł w jednostce objętości nie zmienia się z odległością. Stosunkowo słabe rozbłyski rejestrowane przez BATSE wskazują na to, że osiągnęliśmy „brzeg” rozkładu źródeł. Informacja ta sama w sobie nie pozwala określić skali odległości do „brzegu”, choć wyraźnie widać, że „brzeg” znajduje się

w przybliżeniu w tej samej odległości we wszystkich kierunkach. Innymi słowy, znajdujemy się w centrum lub bardzo blisko centrum sferycznie symetrycznego rozkładu bersterów γ .

Dla większości rozbłysków γ obserwowany rozkład nie pasuje do populacji dysku. Same dane z BATSE nie odpowiadają populacji dysku na poziomie ~ 5 . Dla całej próbki uzyskanej dzięki BATSE wkład dysku nie może być większy niż 20%, a dla najsilniejszych rozbłysków musi być nawet mniejszy.

Kosmologiczna skala odległości

Wszystkie obiekty dostatecznie jasne, by mogły być wykrywalne w odległości kilku Gpc ($\sim 10^{28} cm$), mają izotropowy rozkład kątowy; ich rozkład radialny jest lokalnie jednorodny i ucina się definitywnie na odległości Hubble'a. Najprostszy rozkład kosmologiczny zgodny jest ze statystyką dostarczoną przez PVO i BATSE, chociaż wydaje się konieczne przyjęcie pewnej ewolucji źródeł. Nie powinno to być niespodzianką, gdyż w przypadku wszystkich kategorii obiektów wykrywalnych na odległościach kosmologicznych: galaktyk i ich gromad, radiogalaktyk, kwazarów, zauważalna jest silna ewolucja, (to znaczy ich liczba w jednostce objętości i jasność zmienia się wraz z kosmologicznym przesunięciem ku czerwieni), która poza tym jest różna dla różnych typów obiektów.

Z przyjęcia kosmologicznej skali odległości wynikałoby, że berstery γ są najjaśniejszymi obiektami we Wszechświecie, o maksymalnej mocy $\sim 2 \times 10^{51} h_{100} (\Omega_b/4\pi) erg s^{-1}$ gdzie h_{100} jest stałą Hubble'a w jednostkach $100 km s Mpc^{-1}$ a Ω_b jest kątem bryłowym, w którym ogniskuje się emisja bersterów, przy założeniu braku ewolucji. Częstość pojawiania się rozbłysków powinna wynosić $\sim 2 \times 10^{-6} (4\pi/\Omega_b) rok^{-1}$ dla galaktyki podobnej do naszej, lub $\sim 30(4\pi/\Omega_b) h^3_{100} Gpc^{-3} rok^{-1}$ w naszym sąsiedztwie, tzn. dla przesunięć ku czerwieni poniżej $z \approx 0.2$. Według scenariusza kosmologicznego do rozbłysków rejestrowanych przez PVO powinno dochodzić w odległościach odpowiadających przesunięciu ku czerwieni $z \leq 0.2$. Wszystkie znane obiekty mające $z = 0.1 - 0.2$, tzn. znajdujące się

w odległościach $\sim 500h_{100} \text{ Mpc}$, rozłożone są przypadkowo, jako że największe istniejące we Wszechświecie struktury mają rozmiary $\leq 100h_{100} \text{ Mpc}$. I rzeczywiście, w danych sprzed BATSE nie ma żadnej korelacji pomiędzy pozycjami różnych rozbłysków promieniowania γ .

Powszechne obiekcje w stosunku do każdego scenariusza kosmologicznego budzi kolosalna energia rozbłysków. Jednakże problem nie jest tak poważny, jak się powszechnie uważa. Wymagana energia jest tego samego rzędu, co energia kinetyczna wyrzutów supernowych, a dużo mniejsza niż energia rozbłysków neutronów związanych z supernowymi typu II. Jeśli moc promieniowania γ skolimowana jest w małym kącie bryłowym, tzn. jeśli $\Omega_b \ll 1$, wówczas wymagania energetyczne są jeszcze skromniejsze, lecz częstotliwość zachodzenia zdarzeń musi być odpowiednio większa. Wszystkie dotychczas opublikowane fizyczne obiekcje dotyczące kosmologicznej skali odległości są zależne od modelu i dają się łatwo obejść przez założenie relatywistycznej kolimacji lub tylko relatywistycznej ekspansji źródła. Relatywistyczna ekspansja spodziewana jest w dowolnym scenariuszu kosmologicznym, ponieważ jasności rozbłysków są wysoce ponadeddingtonowskie.

Dla wytłumaczenia kosmologicznych rozbłysków promieniowania γ zaproponowano dwie szerokie klasy modeli: jedne związane z jądrami galaktyk, inne odpowiadające zwartym obiektom gwiazdnym. W tej ostatniej kategorii istnieje dużo konkretnych propozycji: zlewające się gwiazdy neutronowe, gwiazdy neutronowe rozrywane przez czarne dziury o gwiazdnych masach, pozagalaktyczne pulsary radiowe, białe karły zapadające się w gwiazdy neutronowe oraz nieudane supernowe typu Ib.

Modele odnoszące się do aktywnych lub zmarłych jąder galaktyk mogą napotykać problemy związane z brakiem galaktyk jaśniejszych niż $\sim 21^m$, mogących odpowiadać położeniu rozbłysku γ na niebie, określone dla kilku najsilniejszych z nich z dokładnością $\sim (1')^2$. Jednakże wszystkie zwarte obiekty gwiazdowe związane są w ten czy inny sposób z supernowymi typu II lub Ib, które najprawdopodobniej wybuchają tam, skąd dochodzi do nas większość pozagalaktycznego niebieskiego wiatru, mianowicie w słabych błękitnych galaktykach o jasności 22-24^m. Galakty-

ki karłowate są tak liczne, że dla dowolnego rozbłysku w dowolnym kwadracie błędu położenia mielibyśmy do dyspozycji wiele z nich.

Wszystkie scenariusze kosmologiczne związane są ze znanymi obiektami o dużej gęstości i ze zdarzeniami o bardzo wysokich energiach. Jednakże nie zostało dotychczas dowiedzione, by którekolwiek z tych zdarzeń faktycznie było źródłem rozbłysków γ i podobnych do tych, jakie widzimy.

Alternatywne skale odległości

Możliwość pochodzenia rozbłysków γ z dysku galaktycznego została obecnie odrzucona jako niezgodna z wynikami BATSE. Dlaczego więc odległość $\sim 200pc$ akceptowano przez ponad dziesięciolecie? Sądzę, że powodem było niepoprawne traktowanie szybkiej zmienności i cech widmowych jako wskaźników odległości. Jednakże zrezygnowanie z dysku galaktycznego nie czyni z kosmologicznej skali odległości jedynej możliwości. Rozpatrywane są jeszcze dwie inne: rozległe halo galaktyczne i kometaryny obłok Oorta.

Rozkład bersterów promieniowania γ w rozległym halo galaktycznym proponowany był wielokrotnie, nawet przed rozpoczęciem eksperymentu BATSE. Jednakże wyniki BATSE narzuciły bardzo ostre warunki rozbłyskom γ w halo, ponieważ w danych brak znaczącej statystycznie anizotropii dipolowej. Znajdujemy się w odległości $\sim 8 kpc \approx 2.5 \times 10^{22} cm$, od jądra Galaktyki. Wszystkie znane obiekty halo są silnie skoncentrowane ku centrum Galaktyki i anizotropia dipolowa w ich rozkładzie jest olbrzymia. Aby uzyskać niemierzalnie mały dipol, musimy przyjąć, że halo rozbłysków ma bardzo duży promień jądra, $R_c \geq 25 kpc$, tak że nasze przesunięcie względem jądra jest niezauważalne. Ponieważ wszystkie znane (obserwowane) obiekty halo są silnie skoncentrowane w kierunku centrum Galaktyki, należy wymyślić nowy rodzaj halo, by uniknąć konfliktu z obserwowanym rozkładem rozbłysków. Brak jakiegokolwiek koncentracji rozbłysków w kierunku pobliskiej galaktyki M31 dostarcza dodatkowych ograniczeń. Modele mogą być scharakteryzowane dwoma parametrami: promieniem jądra hipotetycznego halo R_c i odległością próbkowania

eksperymentu R_s . Okazuje się wówczas, że na płaszczyźnie R_c - R_s występuje jedynie mała wysepka, której nie można wykluczyć na podstawie danych otrzymanych z BATSE.

Istnieją dwie szerokie klasy modeli halo. Według pierwszej występuje tam populacja gwiazd neutronowych o bardzo dużych prędkościach, ≥ 1000 km/s, powstałych w dysku, przypuszczalnie podczas eksplozji supernowych. Jednak liczba w jednostce objętości takich obiektów o dużej prędkości powinna spadać z odległością jak d^{-2} , podczas gdy z danych dostarczonych przez PVO wynika, że do pewnej odległości (jaka by ona była) liczba bersterów w jednostce objętości jest w przybliżeniu stała. Możliwym rozwiązaniem tego dylematu jest przyjęcie, że aktywność rozbłykowa nasila się stopniowo, gdy obiekty o dużych prędkościach się starzeją. Kompensuje to spadek liczby źródeł w jednostce objętości z odległością i utrzymuje mniej więcej stałą gęstość przestrzenną zdarzeń rozbłykowych aż do pewnej odległości $R_c \gg 8$ kpc. Taka kompensacja mogłaby być osiągnięta również wtedy, gdyby rozbłyski skupiały się wzdłuż kierunku prędkości źródła. Lecz nawet w tym przypadku występują niewielkie momenty dipolowe i kwadrupolowe i BATSE powinien zdołać je zmierzyć. Obecnie propozycji tych nie można wykluczyć, chociaż wydają się cokolwiek wydumane.

Druga klasa modeli związana jest z ciemnym halo galaktycznym, którego istnienie potrzebne jest dla wyjaśnienia dynamiki naszej Galaktyki. Z ostatnich modeli powstawania halo wynika jednakże, że jego jądro ma bardzo mały promień (mniejszy niż 1 kpc) i spłaszcza się w wewnętrznych częściach ku dyskowi galaktycznemu. Natomiast części zewnętrzne charakteryzują się trójosiowym (tzn. niesferycznym rozkładem masy. Krzywa rotacji Galaktyki dopuszcza długość promienia jądra halo ~ 8 kpc, lecz mniejszą niż ~ 25 kpc. Niemniej zaproponowano, że rozbłyski promienionowania γ mogą być spowodowane wpadaniem planetoid do ergosfer szybko obracających się czarnych dziur o masach 10-30 mas Słońca, zderzeniami w obłokach tworzonych przez komety, planetoidy i gwiazdy neutronowe lub zlewaniem się podwójnych białych karłów w gwiazdy neutronowe. Te egzotyczne obiekty są domniemanymi składnikami ciemnego i rozległego

halo galaktycznego, lecz nie ma żadnych dowodów na to, że którykolwiek z nich istnieje w znaczącej ilości w odległości $\sim 20\text{-}200$ kpc lub gdziekolwiek indziej.

Sadzę, że nie ma dowodów na istnienie rozbłysków γ w halo, choć obecnie nie można takiej możliwości wykluczyć. Żadne modele, które wyjaśniałyby rozbłyski powstające w odległości ~ 200 pc, nie mogą działać na odległościach $20 - 200$ kpc, ponieważ wymagana moc źródeł musiałaby być $\sim 10^5$ razy większa. W dysku modele byłyby podeddingtonowskie, a zatem hydrostatyczne. W halo modele muszą być w wysokim stopniu nadeddingtonowskie, tak że ciśnienie promieniowania będzie wywoływało wiatr relatywistyczny, a równowaga hydrostatyczna jest niemożliwa.

Kometarny obłok Oorta ustala inną skalę odległości, wynoszącą $10^4 - 10^5$ jednostek astronomicznych, tzn. $10^{17} - 10^{18}$ cm. Nie podano żadnej szczegółowej propozycji, w jaki sposób jądra komet złożone z kawałków brudnego lodu miałyby rozbłyskiwać w promieniach γ . Jednakże główny problem z obłokiem kometarnym leży w jego rozkładzie. W wewnętrznym Układzie Słonecznym ma on moment kwadrupolowy z powodu planet leżących w jednej płaszczyźnie, podczas gdy na większych odległościach spodziewamy się, że liczba źródeł w jednostce objętości spada jak funkcja potęgowa. Brak jest obszaru wewnętrznego z liczbą źródeł w jednostce objętości w przybliżeniu stałą, czego wymagają dane dostarczone przez PVO.

Natura źródeł

Z szybkich submilisekundowych zmian wynika, że berstery muszą być bardzo zwarte, o rozmiarach mniejszych niż ~ 100 km, co wskazuje na gwiazdy neutronowe lub czarne dziury o gwiazdnych masach jako prawdopodobne źródła rozbłysków. Jednakże nie daje to niezależnych od modelu ograniczeń na skalę odległości. Rozwijana przez ostatnie dziesięciolecie teoria rozbłysków γ opierała się na przeświadczeniu, że modele widm nietermicznych i wnioski ze zmienności czasowej są na tyle silne, aby ustalić skalę odległości na ~ 200 pc. Najbardziej popularne modele przyjmowały, że bersterami γ są gwiazdy neutronowe z silnym polem magnety-

cznym. Wśród sugerowanych źródeł energii rozbłysków były trzęsienia gwiazdy, wybuchy atomowe, upadki komet, lecz żadne z nich nie zostały powszechnie zaakceptowane.

Interesujące jest przeciwstawienie tym trudnościom wspaniałych sukcesów w zrozumieniu rozbłysków rentgenowskich. Znamy około 40 źródeł takich rozbłysków. Są one silnie skoncentrowane ku płaszczyźnie Galaktyki i ku jej środkowi, a około 10 znajduje się w galaktycznych gromadach kulistych. Wskazuje to na ich odległość ~ 8 kpc. Maksymalna moc najsilniejszych rozbłysków rentgenowskich jest prawie dokładnie równa jasności Eddingtona, to jest $L \approx L_{Edd} \sim 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$. Rozbłyski rentgenowskie mają w przybliżeniu widmo ciała doskonale czarnego z maksimum dla $kT \approx 2 \text{ keV}$, a zatem promienie ich źródeł wynoszą ~ 10 km. Po roku lub dwóch zrozumiano, że rozbłyski rentgenowskie powstają jako jądrowe błyski helowe na gwiazdach neutronowych zbierających materię od swych gwiazdnych towarzyszek.

Dlaczego naturę rozbłysków rentgenowskich udało się stosunkowo łatwo zrozumieć, podczas gdy rozbłyski γ wciąż pozostają zagadką? Sądzę, że z dwóch powodów: obserwowany rozkład rozbłysków promieniowania X ujawniał natychmiast odległość do nich, a widma termiczne dały się łatwo zinterpretować.

Widma rozbłysków promieniowania γ są, jak to pokazano na rysunku 1, znacznie szersze niż widmo ciała doskonale czarnego, wobec tego źródła muszą być cienkie optycznie dla procesów kreacji par: $\gamma + \gamma \rightarrow e^- e^+$. W przeszłości, w celu wywnioskowania granicy odległości $\sim 200 \text{ pc}$, to ograniczenie uzupełniano założeniem równowagi hydrostatycznej. Ponieważ odległość ta jest teraz wykluczona przez rozkład przestrzenny otrzymany przez BATSE, założenie równowagi hydrostatycznej musi zostać odrzucone. Rzeczywiście, berster znajdujący się w halo galaktycznym lub w odległości kosmologicznej musi być wysoce nadeddingtonowski, mając jasność odpowiednio $\sim 10^{41}$ i $\sim 10^{51} \text{ egr s}^{-1}$. Z tak dużej jasności wynika rozszerzanie się relatywistyczne źródła, które znajduje się albo w odległości ~ 30 kpc w halo galaktycznym, albo w odległości kosmologicznej ~ 3 Gpc. By wyjaśnić, dlaczego widmo przy energiach fotonów tak wysokich jak

100 MeV nie jest obcięte przez kreację par, wymagana jest relatywistyczna ekspansja ze współczynnikiem Lorentza co najmniej 10^2 . Jeśli ustalone zostanie ponad wszelką wątpliwość występowanie linii widmowych, wtedy na modele rozszerzających się relatywistycznie źródeł zostaną nałożone interesujące ograniczenia.

Czy możliwe jest, że rozbłyski γ są mieszanką różnych typów obiektów, rozmieszczonych w bardzo różnych odległościach? Różnorodność obserwowanych czasów trwania i form ich zmienności czasowej jest tak olbrzymia, że na pierwszy rzut oka bardzo prawdopodobny wydaje się scenariusz wielu populacji. Jednakże wszystkie próby klasyfikacji rozbłysków i różniczenia podtypów spęły na niczym. Z jednym wyjątkiem: istnieje kategoria źródeł powtarzalnych błysków gamma (Soft Gamma Repeaters, SGR), która wydaje się być wyraźnie różna od całej reszty.

Znane są jedynie trzy źródła powtarzalnych błysków gamma. Dwa z nich leżą w pobliżu płaszczyzny Galaktyki, jedno zaś zostało umiejscowione jako pokrywające się z pozostałością po supernowej w Wielkim Obłoku Magellana, pobliskiej niewielkiej galaktyce. Położenia te sugerują, że źródła powtarzalnych błysków gamma mogą należeć do młodej populacji I, z czego wynika odległość ~ 8 kpc dla położonych w płaszczyźnie Galaktyki i ~ 55 kpc dla Wielkiego Obłoku Magellana. Obserwowane widma zgodne są bądź z emisją swobodno-swobodną na ~ 30 keV, bądź z ciałem doskonale czarnym na ~ 10 keV. Dla proponowanych odległości moc wypromieniowywana wynosi 10^3 - $10^4 L_{Edd}$, jeśli masa źródła wynosi ~ 1.4 mas Słońca. Przy założeniu emisji ciała doskonale czarnego, powierzchnia emitująca miałaby wielkość oczekiwaną dla gwiazd neutronowych.

Źródło powtarzalnych błysków gamma, które wydaje się leżeć w Wielkim Obłoku Magellana, miało jeden nadzwyczaj silny i krótkotrwały rozbłysk γ o twardym widmie. Odkryte zostało 5 marca 1979 roku, gdy wyemitowało strumień kilka $\times 10^3$ erg s cm^{-2} , więcej niż najsilniejszy „klasyczny” rozbłysk γ . Wywnioskowana stąd jasność wynosiła $L_\gamma \sim 10^{45}$ erg s $^{-1}$, co było o kilka rzędów wielkości więcej niż „klasyczne” rozbłyski γ , jeżeli ich źródła znajdują się w galaktycznym halo, a o kilka

rzędów mniej, jeśli na odległościach kosmologicznych. Wobec tego nie ma oczywistego związku pomiędzy zdarzeniem z 5 marca a „klasycznymi” rozbłyskami γ .

A co z resztą, ponad 400 rozbłyskami zarejestrowanymi przez BATSE i setkami obserwowanymi za pomocą innych instrumentów? Ilekroć jakaś cecha klasycznego twardego rozbłysku wykreślana jest względem jakiej innej cechy, otrzymujemy rozrzucony wykres bez widocznych podgrup. Trudno jest pogodzić się z istnieniem wielu populacji. Wygląda na to, że jedna populacja ma kolosalny rozrzut cech. Według mnie, najważniejszy postęp zostanie poczyniony dopiero wtedy, gdy możliwy stanie się podział rozbłysków γ na dobrze określone kategorie, lub gdy znajdzie się pewne wyraźne korelacje równoważne diagramowi H-R dla gwiazd, czy diagramowi Hubble’a dla galaktyk.

I co dalej?

Zagadnienie odległości jest jak do tej pory najważniejsze. Mam nadzieję, że zostanie ono niebawem rozwiązane dzięki nowym obserwacjom, lub jakiemuś nowemu pomysłowi. Istnieją pewne możliwości w tym względzie. Jeśli mamy do czynienia z kosmologiczną skalą odległości, wówczas słabe rozbłyski powinny być przesunięte ku czerwieni, co powinno wydłużyć czas ich trwania, a załamania ich widma czynić bardziej miękkimi. Obecnie istnieje jedynie marginalne świadectwo występowania takiego efektu. Niektóre słabe rozbłyski powinny być soczewkowane grawitacyjnie. Najsilniejsze rozbłyski o dobrze określonych pozycjach mogą być związane z galaktykami. Jeśli rozbłyski pochodzą z naszego halo galaktycznego, wówczas halo wokół M31, najbliższej olbrzymiej galaktyki, powinno być rejestrowalne przez dostatecznie czułe instrumenty. Jeśli rozbłyski pochodzą z obłoku Oorta, wówczas ich widma nie powinny zależeć od współrzędnych galaktycznych. Jeśli źródła rozbłysków znajdują się w halo galaktycznym albo są obiektami pozagalaktycznymi, wówczas widma rozbłysków obserwowanych w płaszczyźnie Galaktyki powinny być obcięte poniżej ~ 2 keV, na skutek absorpcji międzygwiazdowej.

Zasadniczą sprawą będzie otrzymanie dokładnych pozycji dla co najmniej kilku rozbłysków. Znalezienie jakiegoś odpowiednika pomoże również ustalić prawidłową skalę odległości. Obecnie działa kilka sond kosmicznych z detektorami rozbłysków γ . Jedną z nich, Ulysses, znajduje się w odległości $\sim 5 \text{ j.a.} \approx 7 \times 10^{13} \text{ cm}$ od Ziemi. Daje to możliwość otrzymania bardzo dokładnych pozycji, aż do ułamków minut, dla silnych, a przez to stosunkowo bliskich rozbłysków γ .

Widma rozbłysków gamma są tak szerokie i nietermiczne, że interesujące jest zarejestrowanie ich w innych częściach widma. Innymi obiektami o porównywalnych widmach γ są pulsary radiowe i niektóre aktywne jądra galaktyk, które są również dosyć silnymi źródłami fal radiowych. Rozbłyski γ są bardzo energetycznymi, lecz bardzo rzadkimi zjawiskami. Nawet BATSE wykrywa jedynie jeden rozbłysk dziennie. Z tego wynika, że jakiegokolwiek poszukiwania odpowiedników w innych częściach widma powinny być nastawione raczej na bardzo szeroki kąt widzenia, niż na bardzo dużą czułość. Częstotliwości radiowe i promieniowanie γ o energiach $\sim \text{TeV}$ są dwoma końcami widma, dla których obserwacje o szerokim kącie są stosunkowo łatwe. Rejestracja jakiegokolwiek rozbłysku w tych zakresach widmowych byłaby sama w sobie bardzo ekscytującym odkryciem i mogłaby pomóc nam zrozumieć naturę rozbłysków γ . Dotychczasowe próby poszukiwania rozbłysków w zakresie $> 1 \text{ GeV}$ i na 843 MHz nie zostały uwieńczone sukcesem.

Tłumaczył z ang. **Zbigniew Loska**