

COMPTEL – teleskop promieniowania gamma

Jerzy MADEJ

Teleskop COMPTEL jest urządzeniem pozwalającym na otrzymywanie obrazu nieba świecącego w zakresie promieniowania γ . Urządzenie to rejestruje pojedyncze fotony o energiach między 0,8 MeV a 30 MeV i pozwala lokalizować ich kierunki z dokładnością rzędu 1–3 stopni (w zależności od jasności źródła). Jednocześnie wyznaczana jest energia poszczególnych fotonów z dokładnością około 10%.

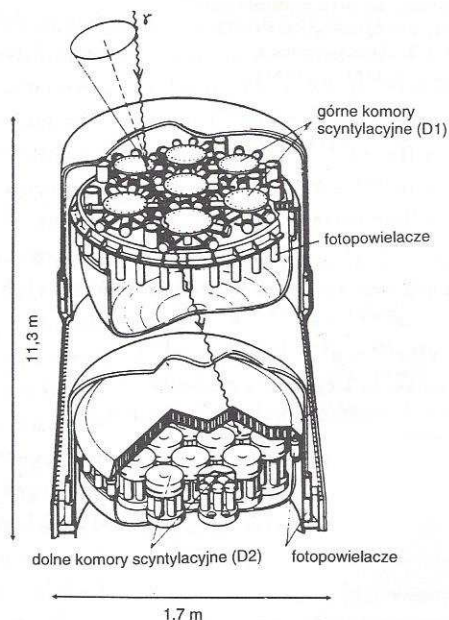
Problem obserwacji kosmicznego promieniowania γ jest bardzo trudny przede wszystkim z tego powodu, że promieniowanie to jest niezwykle przenikliwe, tzn. w słabym tylko stopniu oddziałuje z materią. COMPTEL rozwiązuje go w całkowicie nowatorski sposób, wykorzystując w tym celu urządzenia znane z laboratoriów fizyki jądrowej i fizyki cząstek elementarnych.

Teleskop ten jest jednym z czterech instrumentów pracujących na pokładzie satelity *Gamma-Ray Observatory*. Satelita GRO został wyniesiony na orbitę okołoziemską (5 kwietnia 1991 r.) na wysokość 450 km, za pomocą wahadłowca *Atlantis*. Zadaniem tego satelity jest wszechstronna eksploracja nieba widzianego w promieniach γ . Aczkolwiek tego typu obserwacje wykonywane są od kilkunastu już lat, czułość instrumentów stanowiących wyposażenie GRO jest przynajmniej o rząd wielkości większa od tych, które wykorzystywano poprzednio. Czas efektywnej pracy GRO szacowany jest na przynajmniej 3 lata, a społeczność astronomów, zarówno obserwatorów, jak i teoretyków, oczekuje uzyskania obserwacji o przełomowym znaczeniu m.in. dla poznania fizyki gwiazd neutronowych naszej Galaktyki, jak też obiektów położonych na krańcach obserwowanego Wszechświata (źródła wybuchów promieniowania γ).

Nazwa teleskopu została wybrana dla uczczenia sławnego fizyka amerykańskiego, Arthura H. Comptona (1892–1962), który badał mechanizmy oddziaływania promieniowania γ z materią. Zasada działania COMPTELa wykorzystuje zjawisko rozpraszania fotonów γ na swobodnych elektronach, które jest nazywane rozpraszaniem Comptona.

Schematyczny wygląd i przekrój tego urządzenia przedstawiony jest na rysunku 1. Łatwo zauważymy, że teleskop ten w niczym nie przypomina jakichkolwiek znanych nam teleskopów optycznych, radiowych, a nawet teleskopów rentgenowskich, w których obraz jakiegoś fragmentu nieba jest formowany na powierzchni ogniskowej w wyniku wielokrotnego odbicia lub załamania światła w układach zwierciadeł i soczewek. Znaczna przenikliwość fotonów γ uniemożliwia ich ogniskowanie i badanie w podobnych urządzeniach.

Zjawiska odbicia promieni widzialnych czy ultrafioletowych od wygładzonych i wypolerowanych powierzchni związane są z tym, że długość fali promieniowania znacznie przewyższa odległości między atomami w siatce krystalicznej materiału pokrywającego zwierciadło.



Rys. 1

Natomiast długość fali fotonów γ rzędu 0,01 angstroma ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$ dla energii około 1 MeV) jest znacznie mniejsza od odległości międzyatomowych w ciałach stałych (rzędu kilku angstromów). Skutkiem tego fotony γ przechodząc przez jakąkolwiek substancję stałą „widzą” pojedyncze elektrony lub jądra atomowe i mogą oddziaływać z nimi wyłącznie pojedynczo, a efekty kolektywne odpowiedzialne za odbicia fal o większej długości nie zachodzą.

COMPTEL składa się z 21 komór scyntylacyjnych ułożonych w dwie warstwy (rys. 1), które są w stanie wykrywać i analizować pojedyncze fotony γ . Zasada działania urządzenia jest następująca. Foton padając na jedną spośród siedmiu górnych komór (D1) wypełnionych ciekłą substancją scyntylacyjną o niskiej liczbie atomowej Z ulega rozproszeniu Comptona na elektronie z jakiejś cząsteczki cieczy. Podczas rozproszenia część energii (E_1) i pędu fotonu jest przekazana do elektronu, który zostaje uwolniony z tej cząsteczki ze znaczną energią kinetyczną. Jednocześnie początkowy kierunek fotonu ulega zmianie o kąt rozproszenia θ . Przelatując przez ciekłą substancję scyntylacyjną uwolniony elektron wywołuje błysk, rejestrowany przez zespół ośmiu fotopowielaczy otaczających każdą z komór.

Po rozproszeniu w komorze z górnej warstwy foton γ z pewnym prawdopodobieństwem może ulec całkowitej absorpcji w jednej spośród czternastu komór z dolnej warstwy (D2), wypełnionych stałą substancją roboczą o wyższej liczbie Z (jest to jodek sodu NaI). Traci on wtedy całą energię E_2 , która pozostała po rozproszeniu w górnej warstwie D1.

Cały pomiar dostarcza zatem dla każdego fotonu następujących danych: określona jest lokalizacja zjawisk rozproszenia i absorpcji w obydwóch komorach z dokładnością do 0,5 cm oraz energia stracona przez foton w tych procesach, E_1 oraz E_2 . Obydwie energie są bowiem proporcjonalne do amplitudy impulsu napięcia generowanego przez fotopowielacze wykrywające scyntylacje. Tak więc określona jest w przestrzeni droga przelotu fotonu między obydwoma oddziaływaniami (linia przerywana na rys. 1). Dodatkowo rejestruje się absolutny czas zajścia tego zdarzenia z dokładnością 125 μ s oraz czas przelotu fotonu pomiędzy górną i dolną warstwą detektorów (jest on mniejszy od 10^{-8} sekundy!).

Wzór Comptona wiąże początkową (E_p) i końcową (E_k) energię fotonu rozproszonego pod kątem θ na elektronie znajdującym się w spoczynku

$$E_k = \frac{E_p}{1 + \frac{E_p}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)},$$

gdzie $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$ oznacza masę spoczynkową elektronu (zawsze zachodzi nierówność $E_k < E_p$). Z omawianych powyżej warunków eksperymentu wynika, że początkowa energia fotonu jest równa $E_p = E_1 + E_2$, a zatem dane obserwacyjne pozwalają na wyznaczenie zarówno energii początkowej E_p , jak i kąta rozproszenia

$$\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}.$$

Tak więc ostatecznie wiemy, że foton przyszedł z kierunku znajdującego się na tworzącej stożka o osi symetrii skierowanej w znanym kierunku i o kącie rozwarcia równym θ . Innymi słowy, wyznaczone jest położenie środka i promień (w jednostkach kątowych) małego koła na sferze niebieskiej, gdzie znajduje się źródło, które wpromieniowało zaobserwowany foton.

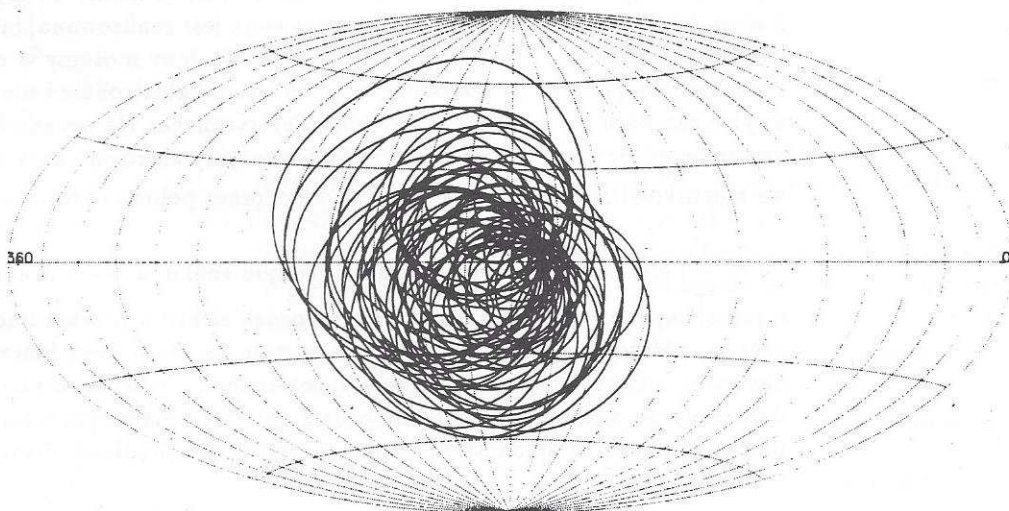
W przypadku gdy źródłem wielu zaobserwowanych fotonów γ jest źródło punktowe (np. gwiazda neutronowa), jego położenie jest po prostu punktem przecięcia wielu małych kół na sferze niebieskiej, wyznaczonych dla każdego fotonu z osobna (rys. 2).

W ten sposób można też wyznaczyć położenie kilku źródeł punktowych obserwowanych jednocześnie, oczywiście po odnotowaniu dostatecznie wielkiej liczby fotonów.

Podczas obserwacji nieba przez COMPTEL wiele spośród zarejestrowanych fotonów γ nie musi zachowywać się zgodnie ze scenariuszem zdarzeń opisanym powyżej. Na przykład, część fotonów po rozproszeniu Comptona w górnej komorze scyntylacyjnej nie trafi do komory w dolnej warstwie. Może też się zdarzyć, że foton trafiając tam nie straci całkowicie swojej energii i nie ulegnie zniszczeniu. Takie zdarzenia łatwo jest wykryć i wyeliminować w procesie redukcji obserwacji. Wybierane są tylko takie zarejestrowane zdarzenia, które zachodzą najpierw w warstwie D1, a następnie w D2 (koniecznie po upływie czasu odpowiadającego przelotowi fotonu z szybkością c na tym dystansie). Jeżeli następnie badany foton nie zostanie całkowicie zaabsorbowany w dolnej warstwie D2, to wtedy $E_i \neq E_1 + E_2$ i cały algorytm wyznaczania kąta θ straci sens. Skutkiem tego małe koło na sferze niebieskiej odpowiadające temu fotonowi γ nie będzie pasować do żadnego z identyfikowanych źródeł, co spowoduje odrzucenie tej obserwacji.

Sposób działania teleskopu COMPTEL powoduje, że urządzenie to umożliwi wyznaczenie pozycji obserwowanych obiektów, a jednocześnie pełni rolę spektrografu określając widmo promieniowania γ wielu obiektów znajdujących się w stosunkowo rozległym polu widzenia (około 1 steradiana).

W ciągu pierwszych kilkunastu miesięcy pracy na orbicie praktycznie jedynym zadaniem teleskopu COMPTEL było przejrzanie całej sfery niebieskiej w zakresie promieniowania 0,7 – 30 MeV. Teleskop zarejestrował fotony pochodzące m.in. od kilku źródeł promieniowania gamma, zarówno punktowych, jak i rozciągłych. Analiza obserwacji jest bardzo żmudnym oraz długotrwałym procesem i – jak dotąd – jest daleka od zakończenia.



Rys.2