

Promieniowanie gamma z kosmosu

Dr hab. Tadeusz JARZĘBOWSKI

Ziemska atmosfera dość poważnie odcina nas od promieniowania dochodzącego z kosmosu, przepuszczając je praktycznie tylko w dwóch zakresach: dziedzinie widzialnej i krótszych fal radiowych. Promieniowanie gamma, o którym chcemy dziś mówić, absorbowane jest na wysokości kilkunastu kilometrów. Kwanty gamma przekazują tam część swojej energii wolnym elektronom – jest to tzw. odwrotny efekt Comptona. Promieniowanie elektromagnetyczne zaliczamy do zakresu gamma, jeżeli jego fala jest krótsza od 10^{-9} cm, tj. częstość przekracza 10^{19} Hz, a energia kwantu 10^5 eV. Te należące do najbardziej energetycznych kwanty promieniowania powstają w trakcie procesów, w których zaangażowane są już cząstki o dużych energiach. Bardzo skutecznym mechanizmem są tu np. zderzenia wysokoenergetycznych protonów z jądrami atomowymi gazu międzygwiazdowego. Powstają wówczas mezony, które rozpadają się na elektrony, neutrino i – właśnie – kwanty gamma.

Tam, gdzie występują silne pola magnetyczne, może wchodzić w grę mechanizm synchrotronowy lub cyklotronowy. Wirujący wokół linii pola elektron emituje promieniowanie. Gdy jest to elektron relatywistyczny (o energii dużo większej od mc^2), występuje emisja ciągła w szerszym zakresie długości fal, a w przypadku nierelatywistycznym częstość emitowanego promieniowania, nazywana cyklotronową, zależy tylko od natężenia pola H i wyraża się wzorem

$$\nu = \frac{eH}{mc}$$

Podstawiając tu wartości liczbowe stwierdzamy, że np. promieniowanie o częstości 10^{19} Hz jest emitowane w polu magnetycznym H rzędu 10^{13} Gs. Pola tego rzędu powinny występować na gwiazdach neutronowych.

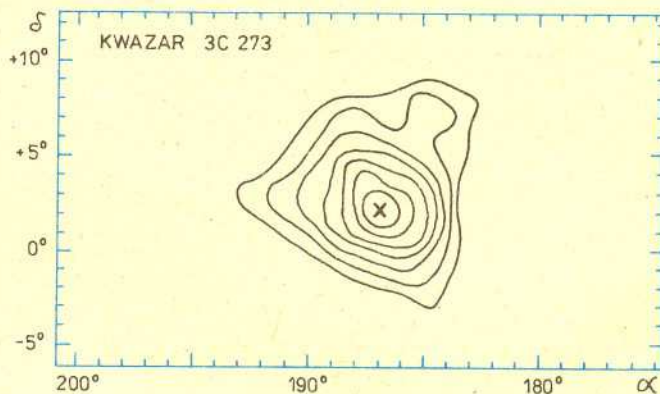
W dziedzinie gamma – podobnie jak i w innych zakresach widma elektromagnetycznego – należy też oczekiwać linii widmowych, tj. promieniowania o ściśle określonych długościach fal. Taką najbardziej oczywistą jest tu linia powstająca w procesie anihilacji pary pozyton-elektron. W wyniku kolizji tych cząstek powstają na ogół dwa kwanty o energii $E = mc^2 = 0,511$ MeV każdy.

Całego szeregu linii należy oczekiwać w licznych procesach jądrowych, mamy tam bowiem bardzo często do czynienia z jądrami w stanach wzbudzonych. Przechodząc następnie na niższe poziomy energetyczne jądro takie wypromieniowuje różnicę energii w postaci kwantów gamma. Wzbudzenie jądra może też być skutkiem kolizji z inną cząstką. Emitowane przy tym linie zawierają się w przedziale od 1 do 10 MeV.

Aparatura

Urządzenie do obserwacji nadchodzącego z kosmosu promieniowania gamma w niczym nie przypomina znanych nam teleskopów. Kierunek, z którego promieniowanie gamma dociera, określa się za pomocą tzw. komory iskrowej, tj. detektora śladowego cząstek naładowanych. Mianowicie kwant gamma może wytworzyć parę pozyton-elektron i właśnie ich ślad zdradza kierunek

pierwotnego promieniowania. Dokładność, z jaką za pomocą takiego „teleskopu” można określić położenie źródła na niebie, jest niewielka: są to stopnie, w najlepszym wypadku około jednego stopnia. Pozycję określa się więc tu z błędem rzędu dwóch średnic tarczy Księżyca! Na rysunku 1 przedstawione są izofoty źródła promieniowania gamma, które identyfikowane jest z kwazarem 3C 273 (krzyżyk podaje jego pozycję optyczną i radiową).



Rys. 1. Izofoty promieniowania gamma kwazara 3C 273. Krzyżyk ukazuje jego pozycję radiową i widzialną.

Dobrze jest uświadomić sobie, że obserwacje polegają tu na rejestrowaniu pojedynczych zdarzeń. Mówimy tu więc o zliczaniu kwantów. Oto przykład. Strumień promieniowania gamma wspomnianego kwazara 3C 273 wynosi 10^{-6} fotonów/cm² · s. Powierzchnia czynna komory iskrowej liczy około 100 cm². A zatem rejestrowany jest tu jeden kwant na każde 10^4 sekund, czyli co parę godzin.

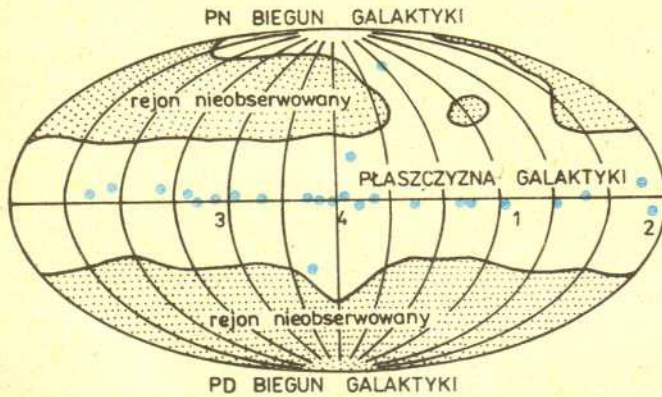
Opisana tu pokrótce aparatura od około dwudziestu lat instalowana jest na pokładach balonów, a od 1972 roku – sztucznych satelitów. Wtedy został wystrzelony satelita SAS-2. Najwięcej informacji dostarczył następny satelita gamma, COS-B, który działał w latach 1975–1982.

Przejdźmy teraz do omówienia wyników obserwacji. Najpierw najbliższa nas gwiazda.

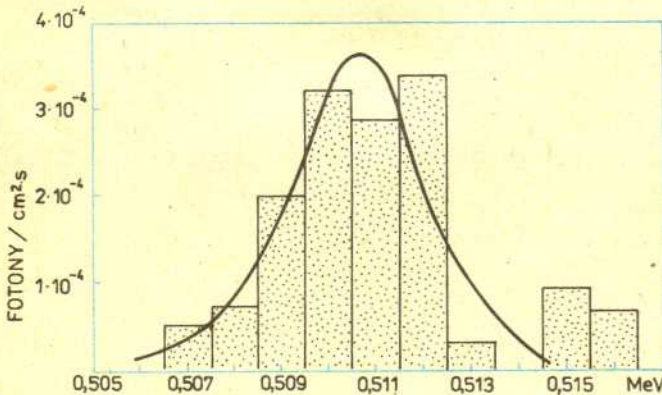
Słońce

W centralnych częściach naszej gwiazdy, tam gdzie zachodzą reakcje jądrowe, produkowane jest, oczywiście, permanentnie promieniowanie gamma; ale ono na zewnątrz nie wychodzi. Tak wysokoenergetycznych kwantów nie emituje też względnie chłodna fotosfera Słońca. Można jednak przypuszczać, że w gorącej koronie, w okresach silnej aktywności, taka emisja wystąpi. Aparatura satelitów typu OSO (*Orbiting Solar Observatory*) potwierdziła to. W koronie słonecznej ujawniła się w szczególności pochodząca z anihilacji pozytonów i elektronów linia 0,511 MeV. Dość intensywnie prezentuje się tam też linia 2,23 MeV, powstająca podczas reakcji przechwycenia neutronu przez jądro wodoru (proton + neutron → deuter + γ). Obserwuje się też kilka innych linii, w szczególności linie 4,4 MeV emitowaną przy przechodzeniu do poziomu podstawowego jądra węgla ¹²C.

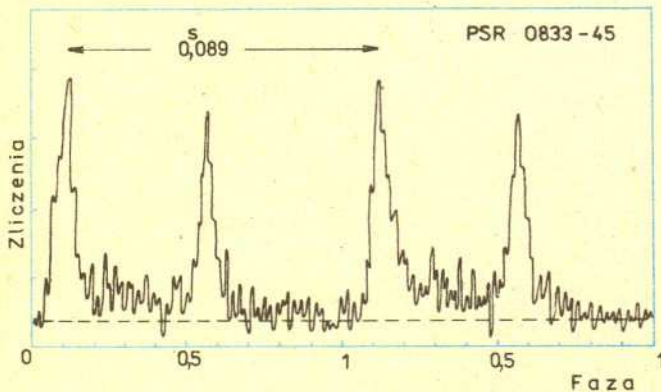
We wszystkich prawie zakresach widma elektromagnetycznego daje się zaobserwować promieniowanie ciągłe tła nieba. Najbardziej interesujący jest tu niewątpliwie rejon fal milimetrowych i centymetrowych, gdzie występuje tak ważne z punktu widzenia kosmologii promieniowanie reliktywne. Na przeciwnym krańcu widma, w dziedzinie rentgenowskiej i gamma, też się obserwuje świecenie tła nieba. Natężenie tego, przypuszczalnie również izotropowego, promieniowania zmniejsza się wraz z malejącą długością fali; niemniej udało się już zarejestrować kwanty gamma aż do rejonu długości fal 10^{-13} cm (10^9 eV).



Rys. 2. Niebo w promieniach gamma. Punkty przedstawiają zaobserwowane dotychczas źródła punktowe.



Rys. 3. Świecenie centrum Galaktyki w rejonie linii 0,511 MeV. Zacięzione prostokąty podają obserwowane natężenia w danym zakresie energii.



Rys. 4. Obserwowane pulsacje w dziedzinie gamma pulsara radiowego PSR 0833 - 45.

Na rysunku 2 przedstawiona jest mapka sfery niebieskiej w tzw. współrzędnych galaktycznych, to jest takich, których podstawę stanowi płaszczyzna Galaktyki. Zacięniowany rejon to jeszcze *terra incognita* - obszar nie badany w dziedzinie gamma. Na części zbadanej widzimy 25 „gwiazd gamma”. Są to wszystkie z poznanych, jak dotąd, źródeł punktowych. Jak widzimy, rozmieszczone są one głównie w pobliżu płaszczyzny tego naszego skupiska gwiazdowego. Obiekt oddalony najbardziej od płaszczyzny Galaktyki, usytuowany już blisko jej północnego bieguna, to znany dobrze kwazar 3C 273 - jego obraz w promieniach gamma przedstawiał rysunek 1.

Gdybyśmy zatem mieli wzrok czuły na promieniowanie gamma (i znajdowali się ponad absorbującą warstwą atmosfery ziemskiej), patrząc na niebo dostrzegliśmy owe „gwiazdy”. Ale zauważylibyśmy też, że niezależnie od tych źródeł punktowych promieniowanie gamma dochodzi również z okalającego całe niebo pasa równika galaktycznego; a zatem i w dziedzinie gamma występuje coś w rodzaju Drogi Mlecznej. Jak można było przypuszczać, najintensywniej świeci rejon centrum tej naszej wyspy gwiazdowej (który przypada w gwiazdozbiore Strzelca). Z tego też rejonu obserwuje się linię emisyjną 0,511 MeV (rys. 3). W centralnych częściach Galaktyki zachodzą zatem nieustannie procesy anihilacji pozytonów i elektronów. Z obliczeń wynika, że dla powstania linii o takim natężeniu, jakie się obserwuje, w ciągu każdej sekundy musi ulec anihilacji 10^{43} pozytonów. Skąd taka ilość pozytonów? - Odpowiedzi na razie nie ma.

Pulsary gamma

Spośród zaznaczonych na mapce nieba źródeł punktowych sześć zidentyfikowano ze znanymi obiektami. Cztery z nich to pulsary. Wymienimy je tutaj wraz z okresami pulsacji P (liczba porządkowa odpowiada liczbie zaznaczonej na rysunku 2):

- 1) PSR 0833 - 45 (Vela), P = 0,089 s
- 2) PSR 0531 + 21 (Krab), P = 0,033 s
- 3) PSR 1953 + 29, P = 0,006 s
- 4) PSR 1802 - 23, P = 0,112 s

Pierwszy z wymienionych, widoczny w gwiazdozbiore Żagla (Vela), to gwiazda pierwszej wielkości na firmamencie nieba gamma, to najjaśniejsze z tych 25 źródeł punktowych. Jego pulsacje w dziedzinie gamma, rejestrowane przez satelitę COS-B, przedstawione są na rysunku 4. Pulsar ten emituje też fale radiowe i widzialne; okresy pulsacji w tych zakresach są identyczne z okresem w dziedzinie gamma. Fakt ten stanowi najoczywistszy dowód, że promieniowanie ze wszystkich tych trzech zakresów pochodzi od tego samego ciała niebieskiego.

O mgławicy Krab i o znajdującym się tam pulsarze słyszeliśmy już niewątpliwie. To pozostałość po wybuchu owej znakomitej supernowej naszej Galaktyki z roku 1054. W zimowy wieczór można tę mgławicę dostrzec przez lornetkę powyżej gwiazdozbioru Oriona. Z podaną okresowością 33 ms pulsar ten emituje również impulsy w dziedzinie radiowej, widzialnej i rentgenowskiej.

Pulsary to gwiazdy neutronowe. Średnice tych gwiazd są rzędu 20 kilometrów, a skoro masa zbliżona jest do masy Słońca, to gęstość wynosi - bagatela - około 10^{15} g/cm³.

Występujące na nich pola magnetyczne powinny być rzędu $10^{12} \div 10^{13}$ Gs. Obserwowany okres pulsacji to po prostu okres obrotu gwiazdy wokół osi. Zwróćmy uwagę, że wymieniona tutaj czwórka ma bardzo krótkie okresy – rzędu milisekund. Gwiazdy neutronowe emitujące promieniowanie gamma należą do najszybciej wirujących!

I jeszcze jeden kwiatek z poletka pulsarów gamma. Otóż mało kto zapewne domyśliłby się, że pulsacje gamma dają się zarejestrować również ... z powierzchni Ziemi. Rzecz w tym, że wpadający do atmosfery ziemskiej kwant gamma może wywołać lawinę cząstek. Z fizyki wiadomo, że jeżeli prędkość cząstki naładowanej przekracza prędkość fazową dla danego ośrodka, cząstka ta emituje tzw. promieniowanie Czerenkowa. Jest to promieniowanie z zakresu widzialnego, może więc dotrzeć do powierzchni Ziemi. A zatem np. promieniowanie gamma pulsara z mgławicy Krab jest źródłem błysków promieniowania Czerenkowa, zachodzących w okresie 33 milisekund. Zostało to zaobserwowane przez naziemne teleskopy.

Supernowa Anno Domini 1987

Na zakończenie jeszcze coś z wieści najnowszych. W sąsiedniej galaktyce, w Wielkim Obłoku Magellana, wybuchła niedawno supernowa. Przy eksplozji na taką skalę, przy wyzwaniu tak kolosalnych ilości energii, można spodziewać się niejednej rewelacji. Największą z nich były neutrino; zarejestrowano je i był to wielki sukces astrofizyki. Promieniowania gamma, oczywiście, też należało oczekiwać. Uniosły się więc w górę balony z aparaturą. Biegającym od supernowej kwantom gamma skryć się nie udało. Co więcej, z teorii wynika, że przy tego typu wybuchach należy oczekiwać linii kobaltu – 0,847 MeV oraz 1,238 MeV. Aparatura i te linie zarejestrowała.

Z braku miejsca na tym dziś zakończymy. Z tematyki kosmicznych źródeł promieniowania gamma pozostało jeszcze jedno bardzo ciekawe zjawisko: rozbłyski gamma. O nich więc w oddzielnej artykule.



Rozwiązanie zadania F 269.

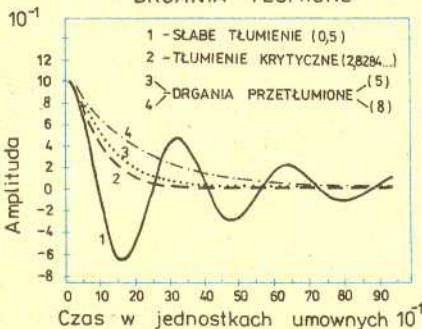
Wewnątrz przewodnika pole magnetyczne jest równe zeru. Z warunków brzegowych wynika, że na jego powierzchni znika składowa prostopadła wektora indukcji pola magnetycznego. W celu określenia pola magnetycznego wytwarzanego przez płaszczyznę posłużymy się metodą obrazów. Wyobraźmy sobie, że pod rozpatrywaną płaszczyznę umieścimy w takiej samej od niej odległości prostoliniowy przewodnik (obraz), w którym prąd płynie w przeciwnym kierunku. Siła działająca na jednostkę długości badanego przewodnika ze strony obrazu przewodnika wynosi $F = I \cdot B \cdot l$ ($l = 1$), gdzie B jest indukcją wytwarzaną przez obraz przewodnika. Siła ta jest skierowana do góry. Warunek, przy którym przewodnik będzie swobodnie wisiał nad płaszczyzną na wysokości h , ma postać

$$F = \rho g, \quad \text{czyli} \quad \frac{\mu_0 I^2}{2\pi \cdot 2h} = \rho g$$

Wynika stąd, że wysokość h wynosi

$$h = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi \rho g} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

DRGANIA TŁUMIONE



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

KORESPONDENCYJNY KLUB FIZYKÓW

1. Spróbuj w ciemności odrywać taśmę klejącą od twardego izolującego podłoża (kawałek pleksiglasu). Może uda Ci się zobaczyć na linii odrywania delikatne niebieskie lub białoniebieskie świecenie. W procesie odrywania się taśmy tworzą się na jej powierzchni obszary naładowane elektrycznie, między którymi przeskakują drobne iskierki. Zjawisko zależy od rodzaju kleju, materiału, z którego zrobiona jest taśma i rodzaju twardego podłoża. Jeśli udało Ci się zaobserwować świecenie, to możesz przystąpić do dalszych badań. W tym celu trzeba zaopatrzyć się w różne bardzo drobne proszki. Może to być sucha mąka, bardzo drobno zmielony tymianek, pietruszka, rozmaryn lub proszek z kopiarek. Drobny proszek można otrzymać korzystając z moździerza. Przystępujemy teraz do doświadczenia: Naklejamy taśmę na podłoże, odrywamy i podłoże posypujemy delikatnie proszkiem stracając jego nadmiar. Proszek skupi się wokół ładunków otwarzając ich rozkład. Zjawisko to wykorzystywane jest w kopiarkach elektrostatycznych, a znane jest od przeszło dwustu lat. Szerzej o tym zjawisku można przeczytać w amerykańskim czasopiśmie *Scientific American* wydawanym również w rosyjskiej wersji językowej *В Мире Науки* Nr 6, str. 80, rocznik 1988.

2. Opisanie poniżej doświadczenie zaproponował Jerzy Ginter. Jego opis ukaże się w podręczniku fizyki dla klasy III LO, który wyjdzie w połowie 1989 r. Celem doświadczenia jest zbadanie, jak zmienia się ruch wahadła, gdy pojawia się dodatkowa siła tłumiąca wahania, której wartość jest proporcjonalna do prędkości ruchu. Rozwiązanie teoretyczne wymaga znajomości prostych równań różniczkowych. Rysunek przedstawia rozwiązania w zależności od wielkości tłumienia. Jest to wykres zależności wychylenia wahadła (amplitudy) od czasu w jednostkach umownych dla różnych wartości parametru charakteryzującego tłumienie: 0,5 – słabe tłumienie, $\sqrt{8}$ – tłumienie krytyczne, 5 i 8 – drgania przetłumione. (Wartości liczbowe parametru tłumienia nie mają żadnego szczególnego znaczenia, odpowiadają jedynie sytuacji na wykresie.) Zbadaj, czy zauważysz przewidziane teoretycznie prawidłowości. W tym celu przygotuj wahadło z nitki zakończoną kulką z plasteliny, do której przyczep kilka nitki z włóczki. Zaczep gdzieś drugi koniec nitki tak, aby wahadło mogło wahać się swobodnie i podstaw pod nie miednicę z wodą. Im bardziej nitki będą „zamiatały” po wodzie, tym większe będzie tłumienie. Przyślij dokładny opis, jak wykonywałeś doświadczenie i czy zauważyłeś prawidłowości przewidziane teoretycznie. Jeśli zauważysz odstępstwa, to postaraj się je wytłumaczyć. Czy na podstawie przeprowadzonych obserwacji możesz odpowiedzieć na pytanie: w jakich warunkach powinien pracować idealny amortyzator samochodu?

Listy prosimy przysyłać pod adresem:

Korespondencyjny Klub Fizyków, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 00-681 Warszawa, ul. Hoża 69.