

Życie na Ziemi zawdzięcza swoje istnienie obecności atmosfery. Stanowi ona nie tylko mieszaninę gazów niezbędną w procesach oddychania czy fotosyntezy, ale też świetnie chroni wszelkie organizmy przed wpływem niekorzystnych czynników pochodzących z przestrzeni kosmicznej. Jednym z takich czynników jest promieniowanie kosmiczne. W ciągu sekundy każdy metr kwadratowy zewnętrznych warstw atmosfery jest bombardowany przez ponad tysiąc cząstek tego promieniowania. Promieniowanie kosmiczne w 99,8% składa się z cząstek naładowanych, głównie protonów, ale występują w nim także cząstki alfa, a nawet niewielkie ilości elektronów czy jonów żelaza. Ich energie dochodzą do 10^{20} eV – to ponad sto milionów razy więcej, niż będzie w stanie wytworzyć budowany obecnie w CERN potężny akcelerator LHC. Najwyraźniej natura jest w stanie przyspieszać cząstki znacznie efektywniej, niż może tego dokonać człowiek. Niestety, pochodzenie promieniowania kosmicznego pozostaje nierozwiązaną zagadką. Cząstki mające ładunek elektryczny, przemieszczając się w przestrzeni międzygwiazdowej i międzygalaktycznej, ulegają znacznym odchyleniom ze względu na obecność pola magnetycznego. Uniemożliwia to zlokalizowanie obszarów, z których pochodzą cząstki, a tym samym poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za ich przyspieszanie. Wydaje się, że promieniowanie kosmiczne ma dwie składowe: jedną pochodzącą z naszej Galaktyki oraz drugą – pozagalaktyczną. Poszukiwanie źródeł promieniowania kosmicznego stanowi obecnie jeden z głównych kierunków badań astrofizyki wysokich energii.

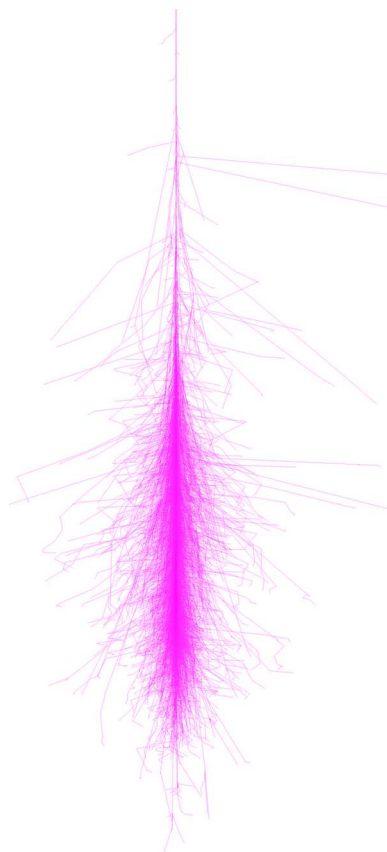
Przypuszcza się, że procesom przyspieszania cząstek powinna również towarzyszyć emisja promieniowania elektromagnetycznego o bardzo wysokiej energii. Promieniowanie elektromagnetyczne nie ulega odchyleniu w polu magnetycznym, może więc bezpośrednio wskazywać źródło promieniowania kosmicznego. Niestety, próby obserwacji tak wysokoenergetycznego promieniowania napotykają ogromne trudności. Ziemska atmosfera jest praktycznie nieprzezroczysta dla fotonów o energiach powyżej 1 eV. Ucnieni próbują obejść tę niedogodność, umieszczając detektory na pokładach satelitów. Ta metoda doskonale sprawdza się w przypadku obserwacji fotonów promieniowania rentgenowskiego, a nawet gamma do energii około 30 GeV. Zwykle stosuje się wtedy detektor wypełniony materiałem, w którym foton gamma wytwarza parę składającą się z elektronu i pozytonu. Pomiar energii tej pary oraz jej ruchu umożliwia określenie energii fotonu i kierunku, z którego przybył. Niestety, w zakresie bardzo wysokich energii, powyżej 100 GeV, dociera do Ziemi jedynie jeden foton na 1500 m^2 na godzinę. Zaobserwowanie takiego fotonu wymagałoby wyniesienia na orbitę ogromnych detektorów, co nie jest możliwe przy zastosowaniu współczesnych technologii.

Pęki atmosferyczne

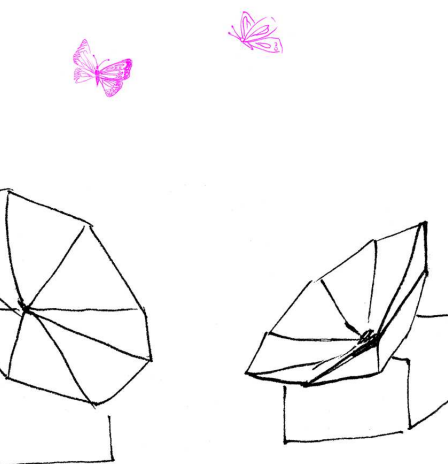
Okazuje się, że w przypadku promieniowania o bardzo małej długości fali możemy do badania jego własności wykorzystać mechanizm ochronny atmosfery. Otóż foton o bardzo wysokiej energii, docierając do górnych warstw atmosfery, oddziałuje ze znajdującymi się tam cząstkami, kreując parę elektron-pozyton. Składniki tej pary emitują promieniowanie hamowania, które również kreuje pary elektronowo-pozytonowe. Proces ten postępuje lawinowo i nosi nazwę kaskady elektromagnetycznej. Jeden foton o energii 1 TeV jest w stanie wytworzyć nawet sto tysięcy par e^+e^- . Maksimum ich produkcji przypada na wysokości około 10 km nad powierzchnią Ziemi i zanika zupełnie kilka kilometrów niżej. W wyniku działania kaskady niemal cała energia pierwotnego fotonu zostaje rozproszona w górnych warstwach atmosfery. Rozwijająca się kaskada nosi nazwę pęku atmosferycznego (rys. 1). Jego kształt i rozmiary zależą od energii pierwotnego fotonu.

Promieniowanie Czerenkowa

Elektrony i pozytony w pęku atmosferycznym mają bardzo wysokie energie. Ich prędkość jest większa niż prędkość światła w atmosferze.



Rys. 1. Symulacja pęku atmosferycznego powstałego w wyniku uderzenia w górne warstwy atmosfery fotonu o energii 100 GeV. Każda linia odpowiada torowi ruchu elektronu bądź pozytonu wykreowanego w kaskadzie elektromagnetycznej.



* Centrum Astronomiczne Mikołaja Kopernika, Warszawa



Rozwiązanie zadania F 694.

Natężenie prądu wewnątrz kondensatora wynosi

$$E = (\mathcal{E} - IR)/d,$$

gdzie natężenie prądu I jest równe ładunkowi, przeniesionemu przez elektrony padające na okładki, w jednostce czasu. Na okładki pada ta część wiązki elektronów, która jest ograniczona elektronami padającymi na przeciwne końce okładki.

Niech y będzie odległością w pionie takiego elektronu od okładki, a t czasem spadania. Zatem

$$y = \frac{at^2}{2} = \frac{eEt^2}{2mv_0^2}.$$

Liczba elektronów padających w jednostce czasu na okładkę kondensatora wynosi

$$I = eynv_0.$$

Zatem

$$I = eynv_0 = \frac{e^2xnv_0^2}{2mv_0d}(\mathcal{E} - IR)$$

i stąd

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + 2mv_0d/(e^2xnv_0^2)}.$$

Jeśli cała wiązka elektronów spadnie na okładkę, tzn. $y = d$, wtedy

$$I = envdv_0.$$

Poruszające się tak cząstki emitują promieniowanie Czerenkowa. Stanowi ono odpowiednik fali uderzeniowej przy przekraczaniu prędkościach naddźwiękowych. Promieniowanie Czerenkowa jest emitowane pod kątem ϕ do kierunku ruchu cząstki, określonym przez $\cos \phi = c/(vn)$, gdzie c to prędkość światła, v – prędkość cząstki, a n – współczynnik załamania światła w atmosferze. Ponieważ większość elektronów i pozytonów w pęku porusza się prawie równolegle, emitowane przez nie promieniowanie tworzy stożek o rozwartości około 1° i podstawie o promieniu około 120 m. Promieniowanie Czerenkowa z pęku atmosferycznego jest bardzo słabe. Na skutek pochłaniania do powierzchni Ziemi dociera jedynie około stu fotonów na metr kwadratowy. Całość błysku trwa zaledwie kilka nanosekund.

Jeśli w obrębie podstawy stożka promieniowania Czerenkowa umieścimy dostatecznie czuły teleskop, możemy zarejestrować te fotony (okładka). Efektywna powierzchnia zbierająca takiego urządzenia wynosi tyle, ile podstawa stożka, czyli prawie $50\,000\text{ m}^2$, co stanowi znaczącą różnicę w porównaniu z detektorami satelitarnymi, których powierzchnie efektywne rzadko przekraczają 1 m^2 . Na podstawie obserwacji promieniowania Czerenkowa możemy odtworzyć obraz pęku, a co za tym idzie – określić energię i kierunek przyjsia pierwotnego fotonu gamma.

Niestety, wpadające do atmosfery protony i inne cząstki promieniowania kosmicznego również powodują powstawanie pęków atmosferycznych. Ich liczba jest znacznie większa niż liczba pęków pochodzących od fotonów gamma, a więc stanowią one główne źródło zakłóceń podczas obserwacji. Pęki protonowe mają jednak o wiele bardziej skomplikowaną strukturę od pęków fotonowych. Składają się z wielu gałęzi, a emitowane przez nie promieniowanie Czerenkowa nie tworzy jednolitego stożka, lecz rozdziela się na wiele małych stożków o różnych kierunkach. Innym źródłem zakłóceń są miony, które praktycznie nie oddziałują w atmosferze, emitują jednak promieniowanie Czerenkowa, ale w bardzo wąskim obszarze.

Trudności związane z występowaniem zakłóceń spowodowanych pękami atmosferycznymi innymi niż fotonowe można częściowo przezwyciężyć, jeśli do obserwacji pęku zastosuje się więcej niż jeden teleskop. Technika taka nosi nazwę stereoskopii. Pozwala ona na lepszą rekonstrukcję kształtu pęku i oddzielenie pęków protonowych i mionowych od fotonowych. Jej zastosowanie polepsza również znacznie zdolność rozdzielczą całego urządzenia.

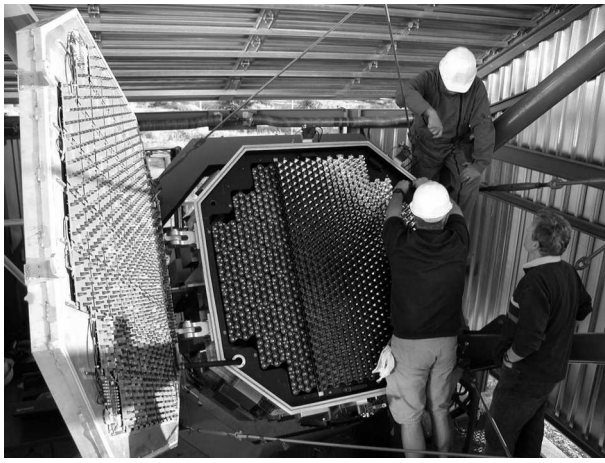
Obserwatorium HESS

Jednym z najlepszych obserwatoriów wykorzystujących opisaną powyżej technikę jest zespół czterech teleskopów o nazwie High Energy Stereoscopic System (HESS), tj. Wysokoenergetyczny System Stereoskopowy (rys. 2).

Nazwa obserwatorium ma również uhonorować osobę Viktora Hessa, który w roku 1912 po raz pierwszy wysunął hipotezę istnienia promieniowania kosmicznego, opierając się na obserwacjach rozładowywania się elektroskopu w czasie lotu balonem na dużej wysokości. Za swoje odkrycie otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1936. Obserwatorium HESS znajduje się w Namibii i jest kierowane przez międzynarodowy zespół uczonych, w skład którego wchodzi również naukowcy z Polski. Każdy z teleskopów systemu składa się ze sferycznego zwierciadła o powierzchni 107 m^2 , złożonego z 382 okrągłych lusterek. Do rejestracji promieniowania Czerenkowa służy detektor składający się z 960 fotopowielaczy (rys. 3) wyposażony w bardzo szybką elektronikę. Próbkowanie sygnału zachodzi w odstępach 1 ns. Dzięki dużej powierzchni zwierciadeł urządzenie ma prawie dwudziestokrotnie lepszą czułość niż urządzenia poprzedniej generacji.



Rys. 2. Dwa z czterech teleskopów systemu HESS. Widoczne są wielosegmentowe lustra oraz znajdujące się w ognisku zwierciadeł detektory. Gdy teleskop nie prowadzi obserwacji, detektory chowane są do małych schronów widocznych w dole zdjęcia. Stojące w pobliżu teleskopów maszty to instalacja odgromowa.



Rys. 3. Detektor jednego z teleskopów systemu HESS. Widoczne są tuby fotopowielaczy.

Użycie czterech teleskopów pozwala na zastosowanie stereoskopii, a zatem uzyskanie dobrej zdolności rozdzielczej, która w tym przypadku wynosi około $3'$. Nie jest to wielkość oszałamiająca, jeśli porównać ją np. ze zdolnością rozdzielczą kosmicznego teleskopu Hubble'a, która jest ponad 50 tys. razy lepsza, ale w zakresie wysokich energii jest to i tak osiągnięcie bardzo znaczące. Dla porównania kątowna zdolność rozdzielcza ludzkiego oka wynosi około $1'$ i pozwala zauważyć reflektory samochodu jako dwa oddzielne punkty z odległości ponad 5 km. Obserwatorium HESS działa w pełnej konfiguracji od 2004 roku i przy jego użyciu dokonano już wielu znaczących odkryć i obserwacji.

RX J1713.7-3946

Równoległe z pracami obserwatorów nie ustają wysiłki teoretyków próbujących wyjaśnić pochodzenie promieniowania kosmicznego. Jednymi z najbardziej obiecujących kandydatów na galaktyczne źródła tego promieniowania są wybuchy supernowych. Okazuje się, że zsumowana energia wszystkich wybuchów supernowych wystarczy do wyjaśnienia obserwowanego strumienia galaktycznej składowej promieniowania kosmicznego. Dodatkowo, materia wyrzucona podczas wybuchu z gwiazdy, zderzając się z ośrodkiem międzygwiazdowym, powoduje powstanie fali uderzeniowej, w której cząstki mogą być przyspieszane do bardzo wysokich energii. Nie dziwi więc fakt, że jednym z pierwszych obiektów, jakie poddano badaniom przy użyciu zespołu teleskopów HESS, były właśnie pozostałości po wybuchach masywnych gwiazd. Najciekawszym obiektem tej klasy okazał się RX J1713.7-3946 – młoda pozostałość po wybuchu supernowej obserwowanej w roku 393. Obiekt ten znajduje się w odległości około 1 kpc w gwiazdozbiórze Skorpiona, w sąsiedztwie dużego obłoku molekularnego, co stwarza bardzo dogodne warunki do przyspieszania cząstek. Obserwacje przeprowadzone przez obserwatorium HESS okazały się niebywałym sukcesem. Nie tylko bez trudu wykryto obiekt w zakresie energii powyżej 300 GeV, ale jego promieniowanie okazało się na tyle silne, że w połączeniu ze świetną czułością i zdolnością rozdzielczą teleskopów udało się stworzyć mapę obiektu w promieniach gamma. Jest to pierwszy taki obraz w tym zakresie energii (okładka). Pokazuje wyraźnie silnie niejednorodną strukturę pozostałości po wybuchu supernowej i miejsca oddziaływania wyrzuconej materii z obłokiem molekularnym. Promieniowanie gamma w tych miejscach jest najsilniejsze, co wydaje się potwierdzać hipotezę fali uderzeniowej jako obszaru przyspieszania cząstek. Niestety, teoretyczna interpretacja obserwacji nie daje jednoznacznego rozstrzygnięcia, czy źródłem promieniowania gamma są relatywistyczne protony, czy może jedynie elektrony oddziałujące z promieniowaniem w odwrotnym procesie Comptona. Dokładne badania widma wydają się skłaniać ku pierwszej hipotezie. Jeśli okaże się prawdziwa, po raz pierwszy uzyskamy bezpośredni obraz źródła promieniowania kosmicznego.



Rozwiązanie zadania F 693.

Elektrony zbliżają się do pręta symetrycznie względem punktu A , zatem natężenie prądu $I_A = 0$. Wraz z odległością od punktu A liniowo rośnie natężenie prądu i w odległości l wynosi

$$I_l = \frac{l}{2L},$$

gdzie $L = AB$.

Z prawa Ohma mamy, że

$$U_{AB} = I_{sr} R/2,$$

a

$$I_{sr} = (I_A + I_B)/2 = I/4.$$

Zatem $U_{AB} = IR/8$.

Obserwatorium HESS pracuje pełną parą. Oprócz pozostałości po wybuchach supernowych obserwuje również pulsary, pleriony, mikrokwazary, a także aktywne jądra galaktyk.

Pleriony to mgławice powstałe w wyniku oddziaływania wiatru pulsara z otaczającym go ośrodkiem międzygwiazdowym.

Mikrokwazary to układy podwójne gwiazd, w których jeden ze składników stanowi gwiazda neutronowa bądź czarna dziura, charakteryzujące się obecnością dżetów radiowych.

Oprócz znanych obiektów odkrywa również dotąd nieznanne źródła promieniowania gamma. Jeśli kiedyś uda się definitywnie rozwiązać zagadkę promieniowania kosmicznego, niewątpliwie obserwatorium HESS w znacznym stopniu się do tego przyczyni.