

## Wstęp

Mgr Jacek SZABELSKI



Do niedawna naukowe obserwacje nieba były prowadzone przez astronomów tylko przy pomocy teleskopów optycznych. Obecnie wiadomo, że z przestrzeni kosmicznej dociera do nas promieniowanie elektromagnetyczne w szerokim zakresie widma — od fal radiowych po kwanty gamma o energiach kilkuset elektronowoltów, a także promieniowanie kosmiczne, czyli cząstki materialne. Tak poszerzone „okno na świat” pozwala z jednej strony poznać szczegółowo budowę i ewolucję wcześniej obserwowanych obiektów, takich jak gwiazdy czy galaktyki, a z drugiej strony umożliwia odkrywanie jakościowo nowych obiektów i zjawisk astrofizycznych (np. pulsary, kwazary, radiogalaktyki).

Promieniowanie kosmiczne, mimo że odkryte około 70 lat temu, jest ciągle mało znanym zjawiskiem astrofizycznym. Elektrony, protony, cząstki  $\alpha$  (jądra  ${}^4\text{He}$ ), jądra cięższych pierwiastków oraz trudno wykrywalne neutrino bombardujące Ziemię mają niekiedy energie aż do  $10^{20}$  eV. Nie wiemy, w jakich procesach mogą być produkowane cząstki o tak wielkich energiach. W największych akceleratorach na Ziemi przyspiesza się protony do energii 100 milionów razy mniejszej.

Niedawno pojawiła się nowa zagadka. W pierwotnym, tzn. pochodzącym spoza Układu Słonecznego, promieniowaniu kosmicznym stwierdzono obecność antyprotonów w ilościach znacznie przewyższających przewidywania ogólnie przyjętych modeli źródeł antymaterii we Wszechświecie.

Nie potrafimy wskazać na niebie źródeł promieniowania kosmicznego, gdyż w polach magnetycznych w przestrzeni międzygwiazdowej cząstki naładowane poruszają się po torach krzywoliniowych. Mimo to przyjmuje się zwykle, że wszystkie źródła promieniowania kosmicznego zbudowane są z materii. Wiadomo bowiem, że antymateria nie może mieszać się z materią, gdyż prowadzi to poprzez anihilację do stanu, w którym pozostaje tylko materia albo tylko antymateria. W wyniku anihilacji protonu i antyprotonu powstają średnio 3 fotony o energiach 200 MeV, około 3—4 elektrony i pozytony oraz neutrino. Gdyby dwa duże obiekty astronomiczne: materialny i antymaterialny, anihilowały, to dla masy rzędu masy Słońca odpowiadałoby to anihilacji ok.  $10^{57}$  par cząstka-antycząstka. Głównie z powodu niezobserwowania promieniowania gamma i promieniowania radiowego (emitowanego przez elektrony i pozytony) wskazującego na anihilację uważa się, że nie ma antymaterialnych obiektów we Wszechświecie.

Obecność antyprotonów w promieniowaniu kosmicznym tłumaczy się na ogół przez produkcję par proton — antyproton w zderzeniach wysokoenergetycznych cząstek promieniowania z materią międzygwiazdową. Okazuje się jednak, że nie można wyjaśnić w ten sposób pochodzenia wszystkich obserwowanych na Ziemi antyprotonów.

## Promieniowanie kosmiczne w Galaktyce

Obserwowane galaktyczne promieniowanie kosmiczne o energiach cząstek od kilkunastu MeV do kilkudziesięciu GeV składa się głównie z protonów z 10% domieszką cząstek  $\alpha$  i znacznie mniejszą ilością cięższych jąder i elektronów. Antyprotonów w promieniowaniu kosmicznym jest mniej więcej tyle, ile jąder żelaza.

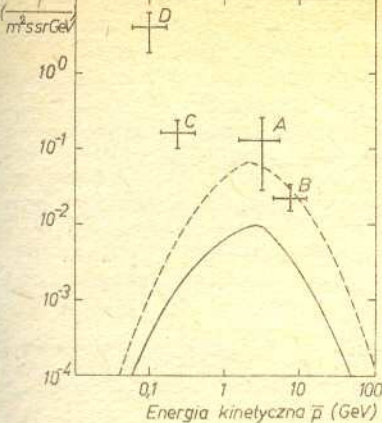
Bardzo ciekawe informacje o rozchodzeniu się promieniowania kosmicznego otrzymano mierząc jego skład izotopowy. Okazało się, że stosunek ilości izotopu  ${}^3\text{He}$  do ilości zwykłego  ${}^4\text{He}$  jest w promieniowaniu kosmicznym znacznie większy niż w Układzie Słonecznym. Podobnie jest w przypadku stosunku ilości jąder Li, Be, B do ilości jąder C, N, O.

Wiadomo, że przestrzeń międzygwiazdowa nie jest pusta; jej średnia gęstość w Galaktyce jest równa około 0,1—1 atomu wodoru na  $\text{cm}^3$ . Gdyby cząstki  ${}^4\text{He}$  i jądra C, N, O były produkowane w źródłach, to część z nich w drodze od źródeł do Ziemi zderzałaby się z cząstkami materii międzygwiazdowej i cięższe jądra ulegałyby rozszczepieniu na lżejsze (m.in. na  ${}^3\text{He}$  i Li, Be, B). Liczba tych lżejszych jąder zależy oczywiście od długości drogi między źródłem a Ziemią, to jest efektywnej grubości tarczy napromieniowanej cięższymi jądrami. Żeby w ten sposób powstała obserwowana ilość  ${}^3\text{He}$ , Li, Be i B, efektywna grubość tarczy powinna wynosić 4—5  $\text{g/cm}^2$ . Przy założeniu, że materia międzygwiazdowa ma średnią gęstość 1 atom wodoru/ $\text{cm}^3$ , odległość źródła promieniowania kosmicznego od Ziemi powinna być równa około  $10^6$  pc. Należy zwrócić uwagę, że średnia droga swobodna w tak rzadkim wodorze jest istotnie dłuższa (dla  ${}^4\text{He}$  około  $20\text{g/cm}^2$ , a dla C, N, O około  $6,7\text{g/cm}^2$ ), co oznacza, że znaczna część promieniowania dochodzi do Ziemi bez zderzeń z materią międzygwiazdową.



Efektywna grubość tarczy to średnia masa materii na jednostkę objętości (gęstość) zsumowana wzdłuż całej drogi, wyraża się więc w  $\text{g/cm}^2$ .





Strumień antyprotonów w okolicy Ziemi. Linia przerywana — dane obserwacyjne. Linia ciągła — przewidywania teoretyczne.

Urządzenia poszukujące antymaterii w pierwotnym promieniowaniu kosmicznym wynoszone są na balonach wysoko ponad ziemię, aby po pierwsze: kosmiczne antymateriajne cząstki nie anihilowały w zderzeniach ze stosunkowo gęstą atmosferą oraz po drugie, aby nie rejestrować wtórnych antyprotonów powstałych w atmosferze w zderzeniach z wysokoenergetycznym promieniowaniem kosmicznym.

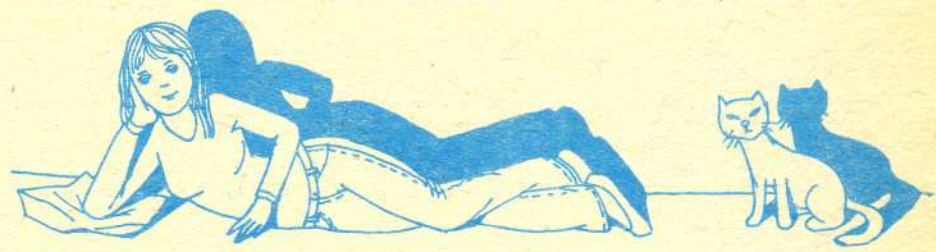
Grupa radziecka z Leningradu (na rysunku punkt A) zidentyfikowała w 1979 roku 2 antyprotony pochodzenia galaktycznego, a grupa amerykańska z Nowego Meksyku z USA (punkt B) 28 antyprotonów (też w 1979 r.). W 1981 roku grupa fizyków amerykańskich z uniwersytetu w Berkeley i Kalifornijskiego Instytutu Technicznego zarejestrowała 11 przypadków anihilacji antyprotonów spoza Układu Słonecznego (punkt C). Latem 1983 roku grupa fizyków hinduskich doniosła o znalezieniu 3 przypadków anihilacji antyprotonów (punkt D) i 1 jądra antytrytu. W analizie wyników wszystkich doświadczeń uwzględniono tło związane z pomyłką rejestracją innych cząstek jako antyprotonów i produkcją antyprotonów wewnątrz Układu Słonecznego, w górnych warstwach atmosfery i wewnątrz aparatury.



Załóżmy, że protony o energiach 20—200 GeV pochodzą z tych samych źródeł co cięższe jądra. Odległość — grubość tarczy, jaką przechodzą w drodze w okolicy Ziemi, niech będzie  $\lambda = 5 \text{ g/cm}^2$ . W zderzeniach protonów z materią międzygwiazdową mogą być produkowane antyprotony (i antyneutrony, które następnie rozpadają się na antyprotony), podobnie jak to ma miejsce w akceleratorach. Prawdopodobieństwo wyprodukowania antyprotonu w zderzeniu protonu z protonem można dobrze określić dla kilku energii analizując wyniki doświadczeń z akceleratorów w Fermilab, CERN-ie i Sierpuchowie. Strumień protonów w przestrzeni kosmicznej jest również znany na podstawie pomiarów w okolicy Ziemi. Sumując antyprotony wyprodukowane w tarczy o grubości  $\lambda$  przez protony o różnych energiach otrzymujemy oczekiwany strumień wtórnych antyprotonów w okolicy Ziemi. Strumień ten jest zaznaczony na rysunku linią przerywaną. Jak widać, krzywa leży znacznie (skala logarytmiczna) poniżej danych doświadczalnych (linia ciągła).

Mimo, że przedstawione wyżej własności rozchodzenia się promieniowania kosmicznego uważa się za realistyczne, spróbujmy tak oddalić źródło, aby otrzymać możliwie dobrą zgodność z doświadczeniem. Pojawia się tutaj jednak istotna trudność. Zwiększanie grubości tarczy powyżej  $40 \text{ g/cm}^2$  nie zwiększa już strumienia antyprotonów. Dzieje się tak dlatego, że wyprodukowane antyprotony anihilują z materią międzygwiazdową. Maksymalny strumień antyprotonów zaznaczony jest na rysunku linią przerywaną.

Z wyżej przytoczonych argumentów wynika, że w obecnej chwili nie znamy pochodzenia znacznej części antyprotonów w promieniowaniu kosmicznym. Być może pochodzą one z wtórnej produkcji w przestrzeni międzygwiazdowej, a sposób rozchodzenia się promieniowania kosmicznego jest całkiem inny niż go sobie dziś wyobrażamy. Możliwe, że źródłem antyprotonów są nieznanne dziś procesy, np. kreacja antyprotonów w silnych polach grawitacyjnych w pobliżu hipotetycznych małych czarnych dziur. A może po prostu antyprotony te świadczą o istnieniu antymaterii w odległych rejonach Wszechświata „oddzielonych” od naszego materialnego otoczenia wielkim pustym obszarem.



**Rozwiązanie zadania M 368.** Oznaczmy liczby uzyskane przez przestawienia cyfr  $n$  przez  $n_0 = n, n_1, n_2, \dots, n_5$ . Mamy, jak łatwo sprawdzić,

$$n_0 + n_1 + \dots + n_5 = 222(a + b + c),$$

a więc warunek zadania można zapisać

$$222(a + b + c) = 6(100a + 10b + c),$$

czyli  $37(a + b + c) = 100a + 10b + c$ , skąd

$$63a = 27b + 36c,$$

a więc  $7a = 3b + 4c$ , lub inaczej

$$7(a - b) = 4(c - b)$$

i ponieważ  $|a - b| \leq 9$ ,  $|c - b| \leq 9$ , więc ostatnia równość może być spełniona tylko wtedy, gdy

(\*)  $a - b = 0 = c - b$ , czyli  $a = b = c = 1, 2, \dots, 9$ ,

(\*\*)  $a - b = 4, c - b = 7$ , skąd  $c = 9, 8$  lub  $7$ ,

(\*\*\*)  $a - b = -4, c - b = -7$ , skąd  $b = 9, 8$  lub  $7$ .

Mamy więc trzy serie rozwiązań:

- (\*) 111, 222, 333, ..., 999,
- (\*\*) 407, 518, 629,
- (\*\*\*) 370, 481, 592.



**Rozwiązanie zadania M 370.** Oznaczmy różnicę naszego ciągu przez  $d$ . Gdyby  $2 \nmid d$ , to jedna z liczb  $a_0 + d, a_0 + 2d$  byłaby parzysta i większa niż 2, wbrew warunkom zadania. Analogicznie rozpatrując  $a_0 + d, a_0 + 2d, \dots, a_0 + pd$  dla  $p = 3, 5, 7$ ,

przekonamy się, że  $210 = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7$  dzieli  $d$ . Również jeżeli tylko  $a_0 \neq 11$ , to 11 musi dzielić  $d$ . Mamy wtedy (dla  $a_0 \neq 11$ )  $d = 11 \cdot 210 \cdot k = 2310 \cdot k$  ( $k \geq 1$ ) i  $a_{10} = a_0 + 10 \cdot 2310 \cdot k > 20\,000$ , wbrew warunkom zadania.

Pozostaje więc tylko możliwość, że  $a_0 = 11, d = 210 \cdot k$ , przy czym  $1 \leq k < 10$  (bo  $d \leq \frac{20\,000 - 11}{10} < 2000$ ). Mamy  $210 = 13 \cdot 16 + 2$ , skąd  $a_n = 11 + (13 \cdot 16 + 2) \cdot kn = 13 \cdot (16kn - 1) + 2 \cdot (kn - 1)$ . Jeżeli teraz  $k \neq 6$ , to oznaczając  $n_1 = 1, n_2 = 7, n_3 = 9, n_4 = 10, n_5 = 8, n_7 = 2, n_9 = 5, n_0 = 3, n_{10} = -4$  mamy  $13 \mid (kn_k - 1)$  i  $13 \mid a_{n_k}$ . Dla  $k = 6$  mamy  $d = 1260$  i  $a_4 = 11 + 3 \cdot 1260 = 3791 = 17 \cdot 223$ . Okazuje się więc, że jedna z liczb  $a_0, a_1, \dots, a_{10}$  musi być złożona.