

Dr Marcin KUBIAK



Odkrycie antycząstek w istotny sposób uprościło nasz obraz świata w skali mikroskopowej, dowodząc zarazem, że przyroda podziela niejako nasze upodobanie do symetrii. Jeżeli jednak postulat symetrii między materią i antymaterią, tak dokładnie spełniony w dziedzinie cząstek elementarnych, ma mieć moc ogólnego prawa przyrody, to musi on być również spełniony we Wszechświecie jako całości. W życiu codziennym nie spotykamy — na szczęście — wokół siebie żadnych skupisk antymaterii, a wytworzenie nawet znikomych jej ilości wymaga dość skomplikowanych zabiegów eksperymentalnych.

W skali właściwej człowiekowi świat może być tylko albo materialny, albo antymaterialny. Wniosek ten jest słuszny nie tylko w odniesieniu do Ziemi, ale również w odniesieniu do naszego najbliższego otoczenia kosmicznego. Na Księżyc, Wenus i Marsa upadły już przedmioty zbudowane z materii ziemskiej i, jak wiemy, nie zakończyły się to eksplozją, jaka powinna towarzyszyć bezpośredniemu zetknięciu się materii z antymaterią. Wiemy również, że Słońce wysyła bezustannie strumienie cząstek w postaci wiatru słonecznego, które dobiegają, bez widocznych efektów anihilacji, nie tylko do Ziemi, ale również do planet leżących na dalekich peryferiach układu słonecznego, oddziałując po drodze z kometami, meteorami i pyłem międzyplanetarnym. Stwierdzenie, że cały układ słoneczny jest zbudowany z materii, nie jest jednak zbyt interesujące z astronomicznego punktu widzenia. Co najwyżej, potwierdza ono nasze oczekiwania, że naturalny obszar aktywności człowieka nie ogranicza się tylko do Ziemi, lecz obejmuje również układ planetarny.

Mówiąc najogólniej, warunek symetrii Wszechświata względem zamiany materii i antymaterii może być spełniony w jeden z następujących sposobów:

- (1) średnio co druga gwiazda w galaktyce jest zbudowana z antymaterii,
- (2) średnio co druga galaktyka jest zbudowana z antymaterii,
- (3) cała obserwowana przez nas część Wszechświata, którą dla wygody nazwijmy Metagalaktyką,

jest zbudowana z materii, natomiast w odległych od nas obszarach Wszechświata istnieje inna Metagalaktyka, której nie jesteśmy w stanie obserwować, zbudowana całkowicie z antymaterii. Powyższy sposób rozumowania jest mniej lub bardziej świadomym odwołaniem się do proponowanego niegdyś modelu hierarchicznej budowy Wszechświata, zgodnie z którym materia tworzy skupiska w coraz to większej skali, oddzielone od siebie coraz to większymi odległościami, tak iż w granicy średnia gęstość materii dąży do zera. Wprawdzie przyczyny, dla których zaproponowano swego czasu model hierarchiczny, stały się już nieaktualne, jednak pozostaje on wciąż użyteczny jako ilustracja znanego faktu obserwacyjnego, że poszczególne gwiazdy skupiają się w galaktyki, poszczególne galaktyki tworzą gromady galaktyk, a te, być może, wchodzą w skład supergromad. Dalsze przedłużenie tego łańcucha, tzn. łączenie supergromad w metagalaktykę, wiele metagalaktyk w teragalaktykę itd., dopóki wystarczy nam pomysłów na tworzenie nowych słów, jest już tylko dowolną ekstrapolacją i w istocie rzeczy usuwa tylko nie rozwiązane problemy z naszego pola widzenia, spychając je w obszary Wszechświata, których z natury rzeczy nie jesteśmy i nie będziemy w stanie obserwować. Dlatego też przyjęcie trzeciej z wymienionych wyżej możliwości byłoby raczej wybiegiem niż odpowiedzią na nurtujące nas tu pytanie, gdzie we Wszechświecie znajduje się antymateria stanowiąca odpowiednik naszej materii.

W tej sytuacji dokładniejszego rozważenia wymagają przede wszystkim dwie pierwsze możliwości. Żądanie, by średnio co druga gwiazda w każdej galaktyce była zbudowana z antymaterii, wydaje się żądaniem zbyt daleko posuniętym: gdyby przyroda chciała uczynić mu zadość, wówczas galaktyki najprawdopodobniej nigdy by nie powstały. Wprawdzie historia powstania i ewolucji galaktyk nie została jeszcze dokładnie odtworzona, to jednak jest niemal pewne, że obiekty te powstały w wyniku grawitacyjnego kurczenia się przypadkowych zagęszczeń w pierwotnym obłoku materii rozrzedzonej. Trudno jest wyobrazić sobie, jak proces taki mógłby skutecznie przebiegać w przypadku, gdyby wzrostowi gęstości towarzyszyło jednocześnie wzmocnienie procesów anihilacji między cząstkami materii i antymaterii. Wypada tu jednak silnie podkreślić, że gdyby ktoś mimo wszystko utrzymywał, że najbliższa nas gwiazda, Proxima Centauri, jest zbudowana z antymaterii, to nie mielibyśmy żadnych podstaw, by takie twierdzenie odrzucić.

Dlaczego tak jest, łatwo zrozumiemy, jeżeli uprzytomnimy sobie, w jaki sposób astronomowie tworzą obraz naszego otoczenia kosmicznego. Otóż praktycznie wszystkie informacje, które mamy o obiektach astronomicznych, pochodzą z analizy wysyłanego przez nie promieniowania elektromagnetycznego, czyli fotonów, które należą zarówno do świata materii, jak i do świata antymaterii. Z drugiej strony, pełna symetria obu tych światów sprawia, że wszystkie procesy fizyczne, które prowadzą do wysłania promieniowania elektromagnetycznego, przebiegają dokładnie tak samo w materii, jak i w antymaterii. Innymi słowy, nasza znajomość ciał niebieskich jest całkowicie niezależna od tego, czy składają się one ze zwykłych atomów, czy z antyatomów.



Rozwiązanie zadania F 81

Przekształćmy podane równanie do innej postaci

$$E = A(1 + \cos \Omega t) \sin \omega t = A \sin \omega t + A \cos \Omega t \sin \omega t = A \sin \omega t + \frac{A}{2} \sin(\omega + \Omega)t + \frac{A}{2} \sin(\omega - \Omega)t.$$

Rozważana fala jest więc superpozycją trzech fal monochromatycznych o częstotliwościach:

$$\omega_1 = \omega - \Omega = 2,6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1},$$

$$\omega_2 = \omega = 3,0 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1},$$

$$\omega_3 = \omega + \Omega = 3,4 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}.$$

W opisie kwantowym odpowiada jej strumień fotonów o energiach

$$\epsilon_1 = h\nu_1 = \hbar \frac{\omega_1}{2\pi} = \hbar(\omega - \Omega),$$

$$\epsilon_2 = \hbar\omega,$$

$$\epsilon_3 = \hbar(\omega + \Omega).$$

Traktując absorpcję energii przez elektron jako proces jednofotonowy, można korzystać z prawa Einsteina dla zjawiska fotoelektrycznego

$$\epsilon = E_{\max} + W,$$

gdzie E_{\max} — maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów. Minimalna częstota zdolna wywołać fotoefekt

$$\omega_{\min} = \frac{W}{\hbar},$$

czyli

$$\omega_{\min} = \frac{2,15 \text{ eV}}{6,58 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 3,27 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}.$$

Ponieważ jedynie dla ω_3 spełniona jest nierówność:

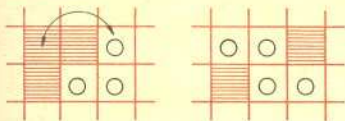
$$\omega > \omega_{\min},$$

więc tylko fotony o energiach $\epsilon_3 = \hbar(\omega + \Omega)$ zdolne są do wywołania fotoefektu, a maksymalna energia elektronów wynosi

$$E_{\max} = \hbar(\omega + \Omega) - W = 6,58 \cdot 10^{-16} \cdot 3,4 \cdot 10^{15} \text{ eV} - 2,15 \text{ eV} \approx 0,1 \text{ eV}.$$



Rozwiązanie zadania M 240
 Zauważmy, że zamieniając role „pionków” i „pustych pól” uzyskamy zamiast „dostawiania pionków” — „zbijanie pustych pól”. Rozgrywając więc „samotnika” od końca, rozwiązujemy dokładnie tę samą łamigłówkę.

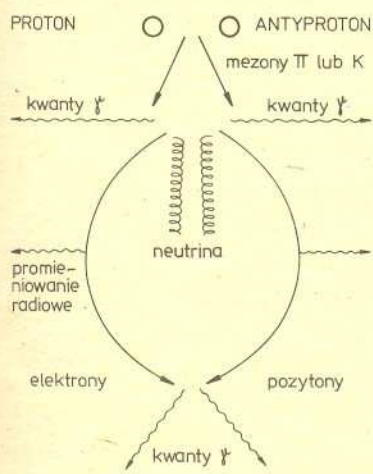


dostawianie pionka jest z biciem wolnego pola

Dla ścisłości wypada tu dodać, że atomy materii i antymaterii, różniące się tym, że znaki ładunków ich odpowiednich cząstek składowych są wzajemnie wymienione, inaczej reagują na obecność sił elektrycznych i magnetycznych, co w pewnych warunkach jest podstawą do odróżnienia materii i antymaterii. Na przykład w polu magnetycznym elektrony i pozytony poruszają się po torach kołowych, ale w kierunkach przeciwnych. W związku z tym, tzw. efekt Zeemana, czyli rozszczepienie linii widmowych atomu znajdującego się w polu magnetycznym na składowe o charakterystycznej polaryzacji, będzie inny dla atomu, a inny dla antyatomu przy takim samym kierunku pola. Jeżeli jednak zmienimy kierunek pola magnetycznego na przeciwny, wówczas kierunki ruchów elektronów i pozytonów ulegną zmianie na przeciwne i efekt Zeemana, w takiej postaci w jakiej obserwowaliśmy go poprzednio dla atomów, będziemy obserwować obecnie dla antyatomów. Ponieważ nie mamy żadnej innej metody wyznaczania kierunku pola magnetycznego na odległość niż właśnie efekt Zeemana, więc obserwowane rozszczepienie zeemanowskie linii widmowych możemy interpretować zawsze dwojako: albo jako wynik oddziaływania atomów z polem o danym kierunku, albo jako wynik oddziaływania antyatomów z polem o kierunku przeciwnym. Oczywiście, nie zbliża to nas ani o krok do rozwiązania problemu odróżnienia materii od antymaterii w astronomii.

Uważny Czytelnik słusznie może w tym miejscu zwrócić uwagę, że fakt, iż nie potrafimy odróżnić fotonu wysłanego przez materię od fotonu wysłanego przez antymaterię, nie wyklucza jeszcze możliwości zaobserwowania skutków anihilacji zachodzącej na skalę kosmiczną. Niestety, również i tu spotyka nas rozczarowanie. W warunkach, jakie obecnie panują w naszej Galaktyce oraz prawdopodobnie w innych galaktykach, proces anihilacji materii i antymaterii przebiegałby tak spokojnie, że jego skutki byłyby w obecnym stanie techniki obserwacyjnej nie do zauważenia. Przestrzenna gęstość gwiazd w galaktykach, być może z wyjątkiem niewielkich obszarów ich jąder, jest tak mała, że zderzenie się dwu gwiazd jest zdarzeniem praktycznie niemożliwym, choć w przypadku, gdyby zderzające się gwiazdy były zbudowane z różnych rodzajów materii, wzajemna anihilacja ich materii dostarczyłaby nam wspaniałego widowiska kosmicznego, a zarazem dowodu istnienia antygwiazd. Jednak to, czego możemy realnie oczekiwać, nie przypomina w niczym wspaniałego fajerwerku kosmicznego. W najlepszym razie zderzenie ograniczy się do stosunkowo cienkiej warstwy, w której ulegną wymieszaniu i anihilacji cząstki rozrzedzonych obłoków materii i antymaterii otaczających gwiazdę i antygwiazdę. Rozumowanie, które do takiego wniosku prowadzi, jest stosunkowo proste i warto je tutaj przytoczyć.

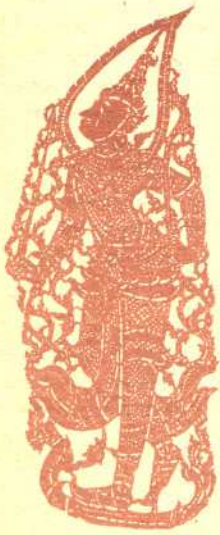
W zgodzie z wieloma danymi obserwacyjnymi możemy przyjąć, że typowa gwiazda jest otoczona obłokiem fizycznie z nią związanej materii rozrzedzonej. Obłok taki może być pozostałością po pierwotnym obłoku, z którego powstała gwiazda, albo może być utworzony przez materię opuszczającą gwiazdę np. w postaci wiatru gwiazdowego. Wyobraźmy sobie teraz, że dwie gwiazdy, zbudowane z różnych rodzajów materii, zbliżają się do siebie na tak małą odległość, że otaczające je obłoki materii i antymaterii znajdują się w bezpośrednim kontakcie. W obszarze zetknięcia się obu rodzajów gazów natychmiast zaczyną przebiegać procesy anihilacji. Anihilacja każdej pary elektron-pozyton spowoduje wysłanie dwóch kwantów gamma o łącznej energii około 1 MeV, które na ogół opuszczają bez przeszkód miejsce swego powstania. Anihilacja protonów z antyprotonami, która ze względu na ich znacznie większą masę spoczynkową (odpowiadającą około 1800 MeV) jest ważniejsza pod względem energetycznym, ma przebieg bardziej złożony. Początkowo na miejscu pierwotnej pary pojawią się mezony π lub K , które po upływie kilku mikrosekund rozpadną się z kolei na kilka neutrin, kwantów gamma i jedną lub dwie pary elektron-pozyton. Neutrino i kwanty gamma opuszczają miejsce reakcji unosząc ze sobą łącznie około 1500 MeV energii. Natomiast elektrony i pozytony, pomimo swej ogromnej energii kinetycznej (około 300 MeV łącznie) nie będą mogły oddalić się zbytnio od miejsca swego powstania. Przechodzi temu powszechnie występujące pole magnetyczne. W typowym dla Galaktyki polu magnetycznym o natężeniu rzędu 10^{-5} gaussa, elektrony i pozytony o podanej wyżej energii będą poruszać się po spiralach mieszczących się w obszarze o średnicy niewiele większej od odległości Ziemia-Słońce. Do chwili anihilacji, uwięzione przez pole magnetyczne elektrony i pozytony będą tracić energię w wyniku promieniowania radiowego oraz w wyniku zderzeń z innymi cząstkami. Zderzenia te bardzo szybko doprowadzą do gwałtownego wzrostu temperatury w warstwie granicznej, a tym samym do jej rozprężenia i zmniejszenia gęstości.



Zmniejszenie się gęstości zahamuje z kolei dalsze procesy anihilacji. Ostatecznie ustali się pewien stan równowagi, w którym tempo anihilacji będzie dokładnie takie, jakie jest konieczne do wytworzenia odpowiednio gorącej warstwy granicznej oddzielającej materię od antymaterii. Warstwa taka będzie źródłem promieniowania gamma oraz promieniowania radiowego.

Co prawda ilości energii, jakich możemy oczekiwać od typowych warstw granicznych, są tak małe, że dziś nie byłibyśmy w stanie wykryć ich istnienia nawet z niewielkiej odległości, to jednak problem nasz wyszedł w ten sposób ze sfery czystych spekulacji i przynajmniej w zasadzie może znaleźć rozwiązanie obserwacyjne. Należy jednak dodać, że odpowiednie obserwacje, nawet jeżeli byłyby kiedyś możliwe, nie będą miały jednoznacznej interpretacji: już obecnie znamy i obserwujemy wiele procesów przebiegających w zwykłej materii, które są źródłami zarówno promieniowania gamma jak i promieniowania radiowego.

Rozwiązanie zadania M 239
 Białe wygrywiają: 1. Sc4 Sh5 (jeśli 1...Se8 lub 1...Sf5, to 2. Sd6!, natomiast po 1...Se6 następuje 2. Se5 Sc7, 3. Sc6 Se8, 4. Se7 i czarny koń nie ma ucieczki), 2. Se5 Sg3, 3. Sf3 Sh5, 4. Sg5! i w następnym ruchu koniec. Widoczne jest, że o wygranej decyduje zajęcie opozycji — dwa skoczki tuż obok siebie.



Pozostaje nam jeszcze do rozważenia możliwość (2), tzn. że średnio co druga galaktyka jest zbudowana z antymaterii. W świetle tego, co mówiliśmy o trudnościach związanych z obserwacyjnym wykryciem antymaterii w naszej Galaktyce, łatwo jest zrozumieć, że trudności te wzrastają niesłychanie, gdy mamy do czynienia z obiektami tak odległymi i izolowanymi, jak inne galaktyki. Jedyną, choć bardzo nikłą nadzieję można w tym przypadku wiązać z obserwacjami promieniowania kosmicznego. W strumieniu szybkich cząstek, które dobiegają z przestrzeni kosmicznej do górnych warstw atmosfery ziemskiej, powinny znajdować się również takie, które przybyły z odległych galaktyk niosąc informacje o przebiegających tam burzliwych procesach, w których zaangażowane były ogromne ilości energii. Oczywiście możemy oczekiwać, że galaktyka zbudowana z antymaterii będzie wysyłała promieniowanie kosmiczne złożone głównie z antycząstek. Wykrycie w pozagalaktycznym promieniowaniu kosmicznym istotnej składowej antymaterialnej byłoby wyraźną wskazówką, że gdzieś we Wszechświecie istnieją antygalaktyki, w których wybuchają anty-supernowe, lub których anty-jądra wykazują podobną aktywność jak jądra zwykłych galaktyk. W obserwowanym promieniowaniu kosmicznym nie stwierdzono jeszcze w sposób bezsporny występowania antycząstek, choć ich wykrycie byłoby równie proste jak zwykłych cząstek. Wynik ten wydaje się przemawiać przeciwko możliwości istnienia wokół naszej Galaktyki licznych galaktyk zbudowanych z antymaterii, nie wyklucza jednak ich istnienia w większych odległościach.

Przedstawione wyżej trudności związane z obserwacyjnym wykryciem istnienia antymaterii we Wszechświecie doprowadziły do dość osobliwej sytuacji. Z jednej strony, w obecnym stanie naszej wiedzy o Wszechświecie jest zupełnie obojętne dla astronomów, czy materia występuje w nim w takich samych ilościach jak antymateria, czy też jest on zbudowany wyłącznie z materii. Z drugiej strony, u podstaw wszelkich badań astronomicznych leży przekonanie, że poznawane przez nas prawa przyrody mają znaczenie uniwersalne, tzn. odnoszą się do każdej części Wszechświata i są spełnione we wszystkich przebiegających w nim procesach, niezależnie od ich skali. Dlatego też wiedząc, że istnieją dwa najzupełniej pełnoprawne rodzaje materii, trudno byłoby nam pogodzić się z przypuszczeniem, że przyroda do zbudowania naszego Wszechświata zdecydowała się użyć tylko jednego rodzaju, drugiemu zaś przeznaczyła rolę efemerycznej zjawy towarzyszącej niektórym procesom przebiegającym w skali podatomowej.

By nie wchodzić dalej w rozważania natury bardziej filozoficznej niż fizycznej, przyjmijmy w tym miejscu założenie, że pierwotnie materia i antymateria występowały we Wszechświecie w jednakowych ilościach i że były ze sobą dokładnie wymieszane.

Wbrew pozorom, założenie to wcale nie wymaga rewizji naszych dotychczasowych wyobrażeń o początkowych stanach istnienia Wszechświata. Obserwowana obecnie „ucieczka galaktyk”, wskazująca na rozszerzanie się Wszechświata, oraz istnienie tzw. promieniowania resztkowego przemawiają za tym, że nasz obecnie bardzo rozrzedzony i zimny Wszechświat był niegdyś bardzo gęsty i bardzo gorący. W warunkach temperatury rzędu wielu miliardów stopni i bardzo dużej gęstości zarówno materii jak i promieniowania, antymateria mogła współistnieć z materią, ponieważ wszystkie akty anihilacji były kompensowane przez akty kreacji par w wyniku zderzeń fotonów o odpowiednio dużej energii. Ażeby jednak z takiej mieszaniny mógł wyłonić się trwały Wszechświat, nie ulegający ciągłej anihilacji w miarę obniżania się jego temperatury, musiał mieć miejsce jakiś proces, który doprowadził do wielkoskalowego rozdzielenia materii od antymaterii.

O tym, jaki to był proces, nie mamy obecnie żadnego pojęcia. Nie znaczy to jednak, że nie mógłby on zostać odtworzony na podstawie znanych nam praw przyrody. Do optymizmu w tym względzie upoważnia nas następujący mechanizm rozdzielania materii od antymaterii zaproponowany przez znanego fizyka szwedzkiego Hannesa Alfvena.

Wyobraźmy sobie całkowicie zjonizowaną mieszaninę materii i antymaterii znajdującą się w silnym polu grawitacyjnym. Podobnie, jak to ma miejsce np. w atmosferze ziemskiej, obecność pola grawitacyjnego doprowadzi do segregacji składników zależnie od ich masy: ciężkie protony i antyprotony zostaną zagęszczone silniej niż lekkie elektrony i pozytony. Wyobraźmy sobie również, że do tak rozwarstwionej mieszaniny przykładamy pole elektryczne, które spowoduje przepływ prądu „z dołu do góry”, tzn. w kierunku przeciwnym do kierunku pola grawitacyjnego. Taki kierunek przepływu prądu oznacza, że cząstki obdarzone ładunkiem dodatnim — protony i pozytony — poruszają się w górę, natomiast cząstki o ładunku ujemnym — elektrony i antyprotony — w dół. Łatwo zauważyć, że w pewnym obszarze nastąpi „spotkanie” płynących w dół elektronów z płynącymi w górę protonami; pojawi się więc obszar, w którym występować będzie przede wszystkim materia. Oczywiście odwrócenie kierunku przepływu prądu spowodowałoby powstanie obszaru wypełnionego przede wszystkim antymaterią.

Opisany tu proces nie byłby w stanie wyjaśnić rozdzielenia materii i antymaterii na skalę kosmiczną, jest na to zbyt mało wydajny. Wskazuje on jednak drogę, którą powinny pójść dalsze rozważania. Co więcej, dowodzi on jednocześnie, że można w nich wykorzystać tak dobrze znane zjawiska, jak np. pole grawitacyjne czy przepływ prądu elektrycznego. Tak więc, przedstawione w tym artykule kłopoty, jakie sprawia astronomom problem istnienia antymaterii we Wszechświecie, nie są jeszcze wystarczającym powodem, by mieli oni zrezygnować z wszelkich prób wbudowania jej w astronomiczny obraz otaczającego nas świata, podobnie jak uczynili to już fizycy zajmujący się światem cząstek elementarnych.

