

# Ciemna materia, ciekawe czasy

Aleksandra DROZD\*

Więcej informacji znajdziesz w artykule Marka Demiańskiego *Ciemna materia*, *Delta* 12/2003.

**Coś, czego nie widać.** W 1933 roku Fritz Zwicky, badając prędkości galaktyk w gromadzie Warkocza Bereniki, uzyskał wyniki wskazujące na obecność w tej gromadzie znacznie większej ilości materii niż ta, którą było widać. Była to pierwsza ze wskazówek, że we Wszechświecie może być dużo czegoś, czego zobaczyć się nie da!

Dalszych dowodów na istnienie niewidocznej materii dostarczają dokładne analizy prędkości gwiazd w galaktykach. Centra galaktyk są dużo jaśniejsze niż ich obrzeża, co sugeruje skupienie masy galaktyki blisko jądra (znajduje się tam najwięcej gwiazd). Jednak dla takiego rozkładu materii prędkość obiegu gwiazd wokół centrum powinna być odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z odległości od centrum. Tymczasem obserwowane prędkości gwiazd w częściach centralnych oraz w częściach odległych od centrum galaktyki nie różnią się znacząco. Co z tego wynika? Po pierwsze, rozkład materii w galaktykach musi być dużo bardziej równomierny niż rozkład bezpośrednio obserwowanej materii świecącej. Po drugie, w większości obserwowanych galaktyk tej niewidocznej materii jest znacznie więcej niż widocznej! A zatem wokół centrum galaktyki istnieje sferycznie symetryczny rozkład materii niewysyłającej promieniowania elektromagnetycznego – galaktyczne halo ciemnej materii. Także nasza Galaktyka zawiera tę nieznaną materię – podczas gdy masa zwykłej materii w Drodze Mlecznej to około  $9 \cdot 10^{10}$  mas Słońca, masa ciemnej materii szacowana jest na około  $6 \cdot 10^{11}$  do  $3 \cdot 10^{12}$  mas Słońca. Większość niewidocznej masy znajduje się w odległości około 100 000 lat świetlnych od centrum (Słońce znajduje się w odległości około 25 000 lat świetlnych).

Czym miałyby być owa ciemna materia? Jednym z pierwszych wyjaśnień zagadki brakującej masy była propozycja, że stanowią ją skupiska zwykłej, znanej materii emitujące niewiele promieniowania, np. czarne dziury, gwiazdy neutronowe, brązowe karły lub nieorbitujące wokół gwiazd planety. Takie obiekty, nazwane przez fizyków MACHO (ang. *Massive Astrophysical Compact Halo Objects* – masywne zwarte astrofizyczne obiekty w halo), nie mogą jednak występować w zbyt dużej ilości, gdyż spójny opis historii Wszechświata w modelu Wielkiego Wybuchu nie dopuszcza, by cała znana materia (tzw. materia barionowej) było istotnie – o rząd wielkości – więcej niż materii świecącej. To zaś oznacza, że istnieją we Wszechświecie zupełnie nowe formy materii, o szczegółowych własnościach jeszcze nieznanymi nauce. Jak je wykryć?

Najpoważniej dziś rozważanymi kandydatami na cząstki ciemnej materii są tzw. WIMP-y (ang. *Weakly Interacting Massive Particles*, czyli słabo oddziałujące cząstki masywne) – na nich będziemy się koncentrować w dalszej części artykułu. Pod tym krótkim hasłem kryje się wiele rozmaitych teorii fizycznych: WIMP-ami mogą być, na przykład, supersymetryczni partnerzy znanych cząstek albo wzbudzenia znanych cząstek w dodatkowych wymiarach czasoprzestrzennych.

Fizycy, rozmawiając o ilości energii lub materii we Wszechświecie, posługują się jednostkami gęstości krytycznej – maksymalnej gęstości Wszechświata, przy której nie zaczęłyby się on nigdy zapadać, gdyby nie było stałej kosmologicznej. Korzystając z tego układu jednostek, możemy sparametryzować naszą wiedzę (niewiedzę?): gęstość znanej materii  $\Omega_M$  wynosi około 0,05, gęstość zaś materii nieznannej  $\Omega_{DM}$  to około 0,22. Tak dokładne wyznaczenie tych wartości powoduje niekiedy dodatkowy kłopot: oddziaływania supersymetrycznych partnerów znanych cząstek są dobrze znane – łatwo dostać ciemnej materii o rząd wielkości za dużo lub za mało, ale uzyskanie właściwego przewidywania wymaga pewnego dopasowania parametrów teorii.

Nawet najbardziej zawile spekulacje fizyków teoretyków muszą być jednak skonfrontowane z doświadczeniem, by móc uznać je za poprawny opis świata. Jak jednak zobaczyć ciemną materię? Poniżej przyjrzymy się niektórym spośród realizowanych przez naukowców możliwości.

**A jednak teleskopem!** Pewne własności ciemnej materii, a w szczególności to, ile jest jej we Wszechświecie, można całkiem dokładnie badać bez odwoływania się do jej mikroskopowej natury. Przewidywane przez ogólną teorię względności zakrzywienie toru promieniowania elektromagnetycznego przez masywne obiekty jest dziś tak dobrze znanym efektem, że korzystamy z niego na co dzień (bez uwzględnienia efektów relatywistycznych urządzenia GPS byłyby beużytecznie niedokładne). Jeśli skupiska ciemnej materii są odpowiednio masywne, to w ich sąsiedztwie mogą ugiąć się promienie świetlne biegnące od położonego dalej obiektu i obiekt ten będzie widoczny w dwóch różnych miejscach na niebie. Innym źródłem danych obserwacyjnych jest mikrofalowe promieniowanie tła – resztkowe promieniowanie pozostałe po Wielkim Wybuchu. Dzisiaj

\*doktorantka, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego





### Rozwiązanie zadania F 799.

Podczas ruchu cieplnego w polu magnetycznym elektrony poruszają się po łukach okręgów o promieniu  $r$ . Siła wywierana przez pole magnetyczne o indukcji  $B$  jest siłą dośrodkową:

$$evB = \frac{mv^2}{r},$$

stąd

$$r = \frac{p}{eB}.$$

Wykorzystując zasadę ekwipartycji energii, pęd elektronu można wyrazić przez temperaturę gazu  $p = \sqrt{3mkT}$ , co daje ostatecznie

$$r = \frac{\sqrt{3mkT}}{eB} \approx 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}.$$

Niektóre z zaproponowanych kandydatek na cząstki ciemnej materii oddziałują tak słabo, że prawdopodobieństwo ich oddziaływania w detektorze jest bardzo małe i bezpośrednia detekcja nie może się udać.

czytamy je trochę jak mapę Wszechświata sprzed 13 miliardów lat. Fotony emitowane z miejsc, gdzie ciemnej materii było trochę więcej, musiały oddać część swojej energii, wychodząc z trochę głębszej jamki potencjału grawitacyjnego – i dziś widzimy je jako ujemne fluktuacje temperatury promieniowania tła.

**Poczuć maleńkie kopnięcie!** Droga Mleczna, jak każda galaktyka, jest pełna ciemnej materii. Niewidoczne i prawie nieoddziałujące cząstki powinny się znajdować również w okolicach Słońca i Ziemi – tutaj gęstość ciemnej materii wynosi mniej więcej  $0,3 \text{ GeV}/(c^2 \text{ cm}^3)$ . Taka gęstość odpowiada jednej cząstce o masie równej masie bozonu  $Z$  ( $91 \text{ GeV}/c^2$ ) w filiżance kawy. Oznacza to, że na Ziemi materia składa się niemal wyłącznie ze „zwykłych” cząstek. Niemniej raz na jakiś czas może się zdarzyć, że cząstka ciemnej materii zderzy się ze zwykłą cząstką i spowoduje jej niewielki odrzut. Powierzchnia Ziemi, bezustannie bombardowana promieniowaniem kosmicznym, nie jest dobrym miejscem na poszukiwanie takich zdarzeń. Trzeba zbudować jakąś grubą osłonę. Najbardziej praktycznym sposobem jest umieszczenie detektora ciemnej materii głęboko pod ziemią.

Jak stwierdzić, czy cząsteczki detektora doświadczają maleńkich kopnięć w wyniku oddziaływania z ciemną materią? Cząstki ciemnej materii wpadające do detektora i zderzające się z cząsteczkami detektora przekazują im energię, która może być przekazana dalej jako ciepło lub promieniowanie elektromagnetyczne. To pierwsze jest rejestrowane w najstarszej z metod zastosowanych do detekcji ciemnej materii, wykorzystującej ochłodzone do bardzo niskich temperatur ( $0,1 \text{ K}$ ) kryształy germanu. To drugie powstaje w wyniku wzbudzenia cząsteczek wypełniającej detektor substancji, zwanej scyntylatorem, np. jodku sodu lub związków organicznych.

Trudnym elementem takiego doświadczenia jest rozpoznawanie, które zderzenia pochodzą od znanych nam już cząstek, a które mogą wskazywać na złapanie WIMP-ów. Na przykład, nawet bardzo niewielka radioaktywność materiałów, z których zbudowany jest detektor, lub otaczających go skał dostarcza do detektora cząstki, które mogą być pomyłone z cząstkami ciemnej materii. Trudności te przezwycięża się na dwa sposoby. Pierwszy polega po prostu na starannym ekranowaniu detektora i dokładnych analizach kinematyki reakcji, wykluczających zderzenia ze znanymi cząstkami. Drugi sposób wykorzystuje ruch orbitalny Ziemi wokół Słońca (z prędkością około  $30 \text{ km/s}$ ), które z kolei obiega centrum Galaktyki (z prędkością około  $200 \text{ km/s}$ ). Złożenie tych dwóch ruchów powoduje zmienność w czasie – z okresem jednego roku – prędkości Ziemi względem halo, a zatem także strumienia cząstek ciemnej materii docierających do Ziemi. Można zatem analizować dane pod kątem występowania takich okresowych zmian w liczbie rejestrowanych zderzeń.

Co można było zobaczyć?

- W 1997 roku zespół eksperymentu DAMA, poszukującego rocznej modulacji liczby zderzeń w kryształach jodku sodu w detektorze znajdującym się w Gran Sasso we Włoszech, poinformował o wykryciu takiego sygnału. Następne kilkanaście lat przyniosło stopniowe ulepszanie analiz oraz budowę nowego detektora, który także rejestrował odpowiednie roczne zmiany.
- 17 grudnia 2009 roku zespół eksperymentu CDMS, wykorzystującego kryształy germanu w detektorze w kopalni Soudan (USA), zorganizował równocześnie dwie prezentacje wyników: w Europie i w USA. Fakt ten nie uszedł uwagi fizyków, którzy, na żywo i w Internecie, śledzili referaty z zapartym tchem, oczekując przełomowych wyników. Głód nowości został zaspokojony częściowo – w doświadczeniu zaobserwowano dwa zdarzenia, które trudno wyjaśnić jako oddziaływanie ze znaną materią.
- 14 kwietnia 2011 roku zespół eksperymentu XENON100, używającego detektora wypełnionego ciekłym ksenonem, umieszczonego w laboratorium Gran Sasso, ogłosił brak jakichkolwiek pozytywnych rezultatów poszukiwań ciemnej materii. Także w wielu innych, na razie mniej dokładnych, eksperymentach nie wykryto niczego ciekawego.
- 2 maja 2011 roku zespół eksperymentu CoGeNT, wykorzystującego kryształy germanu w niewielkim detektorze w kopalni Soudan (USA), obwieścił zaobserwowanie rocznej modulacji w liczbie rejestrowanych zderzeń. Zbieranie danych zostało na razie przerwane w wyniku pożaru w kopalni, który mógł doprowadzić do wzrostu temperatury i uszkodzenia detektora.

Co z tego wynika? Najciekawsze, że tak naprawdę nie wiadomo. Każda z czterech wymienionych obserwacji nakłada (po uwzględnieniu pewnych upraszczających założeń) ograniczenia na masę i prawdopodobieństwo oddziaływania cząstek ciemnej materii, ale dla każdego z nich tak otrzymane wyniki są niezgodne. Wygląda więc na to, że, o ile nie zostaną zidentyfikowane błędy systematyczne w tych doświadczeniach, dla fizyków zajmujących się teorią cząstek elementarnych rozpoczynają się naprawdę ciekawe czasy.

**Złapać produkty reakcji!** Alternatywą wobec metod bezpośrednich mogą być pośrednie metody detekcji, opierające się na poszukiwaniu docierających do Ziemi

sygnałów z anihilacji ciemnej materii. Anihilacją nazywamy proces oddziaływania cząstek ze swoimi antycząstkami, w którym dochodzi do ich destrukcji. Ze względu na zasadę zachowania energii anihilacja jest nieodłącznie związana z kreacją jakiejś innej formy materii. Na przykład, para elektron i antyelektron (pozyton) może anihilować, wytwarzając przy tym parę fotonów.

Jeśli halo ciemnej materii składa się zarówno z WIMP-ów, jak i anti-WIMP-ów, lub jeśli cząstki ciemnej materii, tak jak fotony, są same swoimi antycząstkami, może zachodzić anihilacja par ciemnej materii w pary cząstka-antycząstka, takie jak proton-antyproton lub elektron-pozyton. Do badania strumieni antycząstek przeznaczone są specjalne, wynoszone w górne warstwy atmosfery lub na orbitę okołoziemską detektory, takie jak PAMELA lub AMS-02 – moduł Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Są one misternymi konstrukcjami odróżniającymi m.in. elektrony i pozytony od innych cząstek promieniowania kosmicznego oraz określającymi ich energię. Jeśli zostanie odkryty silny sygnał – np. duża ilość antimaterii o pewnej konkretnej wartości energii – może to wskazywać na jej pochodzenie właśnie z anihilacji ciemnej materii. Czy tylko stąd? Niestety, antimateria może być produkowana także przez pulsary i wybuchy supernowych. Aby mieć pewność, że obserwowany sygnał pochodzi od poszukiwanej ciemnej materii, trzeba poprzeć wyniki eksperymentem innego rodzaju, najlepiej bezpośrednią detekcją.

Co można było ostatnio zobaczyć?

- W 2004 roku zespół eksperymentu HEAT ogłosił detekcję nadmiaru wysokoenergetycznych pozytonów, nie był to jednak bardzo zjawiskowy wynik.
- W 2008 roku zespół eksperymentu PAMELA ogłosił zaobserwowanie anomalnie dużej liczby wysokoenergetycznych pozytonów, mogących pochodzić z anihilacji ciemnej materii. Pewnym zaskoczeniem był brak nadmiaru antyprotonów, również rejestrowanych przez ten detektor. Badacze z PAMELA-i prezentowali początkowo swoje wyniki na seminariach i konferencjach, ale nie udostępnili ich bezpośrednio innym naukowcom, co skłoniło np. prof. Alessandro Strumię z Uniwersytetu w Pizie do ostentacyjnego fotografowania tych seminariów (a rozsierdzonych prelegentów do określania go mianem „fizycznego paparazziego”).
- W 2008 roku zespół eksperymentu ATIC, którego detektor wyniesiony został w górne warstwy atmosfery za pomocą balonu, zarejestrował niewyjaśniony nadmiar wysokoenergetycznych elektronów i pozytonów (detektor nie pozwalała na wyznaczenie znaku ładunku obserwowanych cząstek).
- W roku następnym dane, ogłoszone przez zespół eksperymentu HESS, nie potwierdziły nadmiaru widzianego przez ATIC.
- Za to na początku maja 2011 roku, na spotkaniu zespołu kosmicznego teleskopu Fermiego, ogłoszono, że zebrane przez to urządzenie dane są zgodne z wynikami PAMELA-i.
- 16 maja 2011 roku na pokładzie wahadłowca Endeavour udał się na okołoziemską orbitę detektor AMS-02. Urządzenie to pozwoli badać antimaterię w promieniowaniu kosmicznym z bezprecedensową dokładnością i, być może, pozwoli ostatecznie potwierdzić anomalię widzianą przez PAMELA-e.

Co z tego wynika? Sytuacja jest dość skomplikowana. Obserwowane sygnały mogą być wyjaśnione aktywnością pobliskiego pulsara. Jeżeli jednak są one wynikiem oddziaływań ciemnej materii, nikt takiego modelu nie zamawiał – cząstki ciemnej materii muszą być zaskakująco ciężkie i muszą produkować w wyniku anihilacji przede wszystkim leptony, a nie kwarki.

**Zrobić samemu!** Wiele obserwacji wskazuje na istnienie ciemnej materii, jednak fizyka to nauka przewidywania przyszłości. Za dobrą teorię fizyczną uważamy taką, która nie tylko pozwala zrozumieć znane wyniki doświadczeń, ale i daje pewne przewidywania. Dlatego wykonanie eksperymentu potwierdzającego istnienie ciemnej materii, np. poprzez wytworzenie jej w laboratorium, jest bardzo ważne – pozwala weryfikować modele teoretyczne. Czy można wytworzyć ciemną materię w kontrolowanych warunkach w laboratorium? Skoro udało się ciemną materię wyprodukować na początku Wszechświata, jest szansa na taką produkcję w akceleratorach, takich jak Wielki Zderzacz Hadronów (LHC).

**Morał.** Można myśleć o zagadce ciemnej materii jako o wielkiej, kompromitującej luce w naszym rozumieniu Wszechświata. Nie należy jednak zapominać, że próby jej rozwiązania stanowią ogromną motywację do uzupełniania teorii oddziaływań fundamentalnych oraz rozwoju technik doświadczalnych. Niewykluczone, że zagadka ta będzie miała konsekwencje porównywalne z odkryciem promieniotwórczości ponad sto lat temu, które, jak to dzisiaj widzimy, zatrzęsło posadami fizyki klasycznej i doprowadziło do burzliwego rozwoju mechaniki kwantowej.



#### Rozwiązanie zadania F 800.

Temperatura pary jest proporcjonalna do średniego kwadratu prędkości atomów:

$$T = \rho \frac{v_{sr}^2}{3R}$$

Ruch cząstek w kierunku pionowym odbywa się w polu siły ciężkości. Zatem z jednej strony czas ruchu cząstki to  $t = \frac{l}{v_{sr}}$ , z drugiej jest to czas spadku swobodnego równy  $\sqrt{\frac{2l}{g}}$ . Stąd

$$v_{sr} = l \sqrt{\frac{g}{2h}}$$

co ostatecznie daje:

$$T = \frac{\rho l^2 g}{6Rh} \approx 600 \text{ K.}$$