

TYKANIE CIEMNEJ MATERII

Z czego zbudowany jest Wszechświat? Czy ciemna materia jest tylko wygodną hipotezą? Choć jej istnienie pierwszy raz postulowano niemal sto lat temu, do dziś fizykom nie udało się zgłębić jej natury. Teraz próbę podejmują naukowcy z UMK, wykorzystując zegary atomowe.

Beata Zjawin

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Galaktyki, czyli ogromne układy gwiazd, gazu i pyłu, to obiekty, które ciekawią astronomów już od lat. Badają oni naszą własną – Drogę Mleczną, leżącą stosunkowo blisko nas Galaktykę Andromedy, jak i znacznie dalsze ich kuzynki. Obserwacje te już niemal sto lat temu umożliwiały szacowanie mas poszczególnych galaktyk. Pojawił się jednak problem – pomiary nie zgadzały się z przewidywaniami teoretycznymi. Co więcej, w 1933 r. szwajcarski astronom Fritz Zwicky zauważył, że galaktyki w gromadach poruszają się ze znacznie większymi prędkościami, niż należałoby się spodziewać na podstawie wyznaczonego obserwacyjnie ich potencjału grawitacyjnego. Przy tak wysokich prędkościach obserwowane galaktyki według podstawowych praw fizyki powinny rozproszyć się w przestrzeni, jednak jakaś tajemnicza siła trzymała je razem. Astronom wysunął przypuszczenie, że jest to siła grawitacji, ale nie pochodząca od widocznej, znanej nam materii. Jej źródłem mogła być na przykład ciemna materia, zbudowana z nieznanych nam ciemnych cząstek, które ani nie emitują, ani nie absorbują fotonów. Teoria ciemnej materii zaproponowana przez Fritza Zwickiego do dziś funkcjonuje jako bardzo prawdopodobna hipoteza. Jednak zbadanie natury tego tajemniczego tworu jest niezwykle trudne i nie udało się jeszcze żadnemu fizykowi.

Fakt, że ciemnej materii nie można zobaczyć, bynajmniej naukowców nie przestraszył. Ciągłe pojawiają się nowe pomysły, jak ją badać. Hipotetycznej materii szuka się w laboratoriach, na przykład za pomocą Wielkiego Zderzacza Hadronów w CERN, gdzie podejmowane są próby wytworzenia cząstek ciemnej materii w różnych procesach. Próbowano ją też uchwycić w „typowy” astronomiczny sposób, czyli poprzez obserwacje nieba. Projekt OGLE, zainicjowany w 1992 r. przez prof. Bohdana Paczyńskiego, znaleźć miał tak zwane MACHO, czyli zwarte „kulki” ciemnej materii – słabo widocznej, ale o naturze podobnej do materii znajdującej się w znanych nam gwiazdach czy planetach. Gdyby obiekty typu MACHO istniały, to polski teleskop w Las Campanas Observatory w Chile zarejestrowałby ich obecność poprzez obserwacje zjawiska fizycznego, jakim jest mikrosoczewkowanie grawitacyjne. Kierunek światła pędzącego ku Ziemi zmieniłby się, gdyby natrafiło one na ciało soczewkujące, jakim jest MACHO. Niestety, warszawscy naukowcy nie zaobserwowali żadnych znaków świadczących o istnieniu ciemnej materii, ale dzięki ich obserwacjom wiemy, że prawdopodobnie nie wy-

stępuje ona w formie podobnej do znanej nam materii. Podejrzewamy, że ciemna materia może występować w formie defektów topologicznych, czyli niejednorodności przestrzeni, które powstać mogły, kiedy bardzo gorący i zwarty Wszechświat zaczął rozszerzać się i szybko stygnąć.

Pojedyncze tyk, tyk, tyk

Budowa detektorów ciemnej materii jest zazwyczaj bardzo kosztowna, a projekt oraz jego wykonanie trwają latami. Przypuszczamy jednak, że bardzo czułe optyczne zegary atomowe byłyby w stanie zarejestrować obecność tajemniczej materii, gdyż ich „tykanie” dyktowane jest poprzez model standardowy fizyki cząstek elementarnych. Oznacza to, że jeżeli ciemna materia napotka na swojej drodze taki zegar, to przez chwilę będzie on działał inaczej niż zwykle. Dzięki temu będziemy w stanie powiedzieć, z jaką siłą ciemna materia oddziałuje ze zwykłą materią, gdyż to może efektywnie zmienić parametry modelu standardowego, co zobaczymy w eksperymencie.

Propozycja poszukiwań defektów topologicznych za pomocą optycznych zegarów atomowych nie jest nowinką w świecie fizyki. Jednak wcześniej zakładała ona porównywanie pomiarów z dwóch różnych zegarów połączonych ze sobą odpowiednim połączeniem światłowodowym. Eksperyment taki byłby trudny do wykonania i kosztowny. Dr Piotr Wcisło z Instytutu Fizyki UMK zaproponował, że można też przeprowadzić taki eksperyment za pomocą pojedynczego zegara. Zamiast porównywania wyników z dwóch przyrządów pomiarowych można porównać zachowanie w czasie spotkania z ciemną materią dwóch części

Jeżeli ciemna materia napotka na swojej drodze optyczny zegar atomowy, to przez chwilę będzie on działał inaczej niż zwykle.

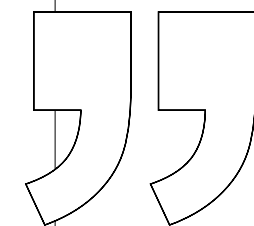
zegara: ultrazimnych atomów oraz wnęki optycznej. Elementy te zareagują inaczej na defekt topologiczny i właśnie ta różnica w ich reakcjach powie nam dużo o właściwościach ciemnej materii. Dzięki temu błyskotliwemu pomysłowi fizycy z instytutu – dr Piotr Wcisło, dr inż. Piotr Morzyński, dr Marcin Bober, dr Agata Cygan, dr hab. Daniel Lisak, prof. UMK, dr hab. Roman Ciuryło, prof. UMK oraz dr hab. Mi-



Beata Zjawin

jest studentką trzeciego roku astronomii na wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Interesuje się kosmologią. W czasie wakacji odbyła staż w Krajowym Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej – ogólnopolskiej międzyuczelnianej jednostce badawczej mieszczącej się w Instytucie Fizyki UMK.

279076@fizyka.umk.pl



chał Zawada, prof. UMK – mogli podjąć próbę zbadania natury tajemniczej materii bez potrzeby budowania dodatkowej kosztownej aparatury, za pomocą znajdującego się na UMK optycznego zegara atomowego.

Grzebień, czyli linijka

Czas można mierzyć na rozmaite sposoby. Jedną są mniej, inne bardziej dokładne. Kiedy toruński optyczny zegar atomowy został uruchomiony, jego dokładność była tak duża, że dopuszczał on błąd jednej sekundy na kilkadziesiąt miliardów lat. Znajdujące się w Krajowym Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej w Toruniu urządzenie powstało dzięki współpracy trzech placówek: Uniwer-

dy Wszechświat, pierwotnie gorący i zwarty, zaczął się rozszerzać i stygnąć. Śladów defektów topologicznych poszukiwano już w promieniowaniu reliktyowym, lecz bezskutecznie.

Optyczny zegar atomowy charakteryzują dwie cechy: dokładność i stabilność. Tę pierwszą zapewniają atomy trzymane w specjalnych warunkach minimalizujących zaburzenia związane z otoczeniem. Na przykład, kiedy zegar dozna zaburzenia stałego w czasie, nie będzie już dokładny, jednak nadal pozostanie stabilny.

Właśnie takiego zegara potrzebujemy do szukania ciemnej materii, bo to ta cecha opisuje zbieżność częstotliwości ultrastabilnego lasera i częstotliwości przejść w atomach. Wiemy, że oczekiwany defekt wpłynąłby w inny sposób na dwa główne elementy zegara: atomy i laser. Porównując częstotliwości odpowiadające przejściom energetycznym w atomach do częstotliwości lasera, przy założeniu, że w danym czasie przez zegar przeniknie ciemna materia, odczytać możemy, w jaki sposób oddziałuje ona ze zwykłą materią. Zazwyczaj proponowane przez naukowców sposoby pomiarów zakładały porównywanie zaburzeń pojawiających się w dwóch różnych zegarach. Naukowcy z UMK „podzielili” zegar na dwa bloki o różnej czułości i badają zakłócenia stabilności w nich.

W Krajowym Laboratorium FAMO znajdują się dwa niemal identyczne zegary i obydwa zostały wykorzystane. Użyto w nich atomu pierwiastka strontu 88. Na podstawie znanych badań kosmologicznych toruńscy fizycy założyli, że oczekiwana ściana ciemnej materii ma szerokość bliską promieniowi Ziemi (6378 km) oraz porusza się względem nas z prędkością 300 km/s, czyli z prędkością porównywalną z prędkością Słońca w jego drodze wokół centrum Galaktyki. Na odczyty z obu zegarów nałożony został filtr, dzięki czemu zostały one wyczułone na poszukiwaną ścianę o konkretnych parametrach, a później obydwa sygnały skorelowano. Doświadczenie trwało 45 700 s. Przeprowadzono je w około jednosekundowych cyklach, gdzie

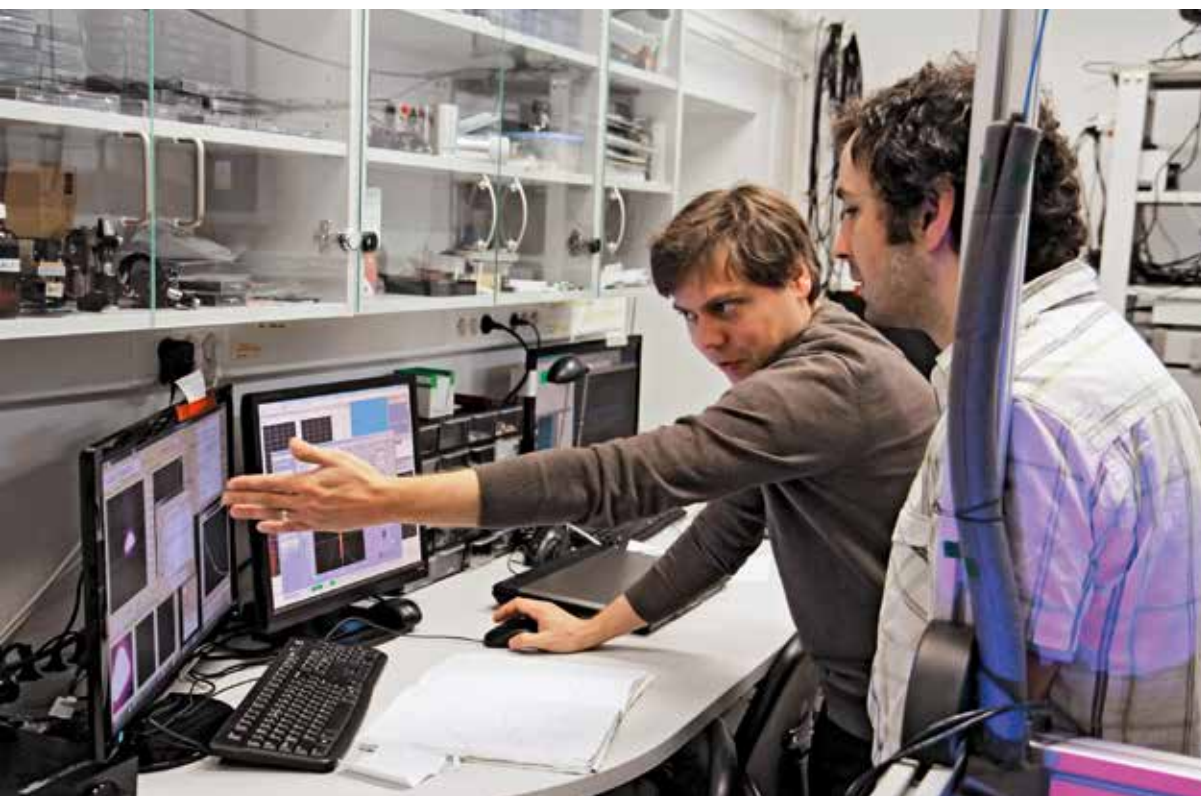
Do pomiarów wykonanych na UMK wykorzystano dwa zegary znajdujące się stosunkowo blisko siebie – były oddalone tylko o około 10 m.

sytytu Jagiellońskiego, Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: Polski Optyczny Zegar Atomowy POZA. Działa on jak każdy inny zegar, czyli mierzy czas poprzez zliczanie liczby oscylacji pewnego oscylatora, ale dzięki swojej budowie robi to bardzo precyzyjnie. Oscylatorem jest w tym przypadku ultrastabilny laser, którego częstotliwość dopasowana jest do tak zwanego przejścia zegarowego w atomach strontu 88. Funkcję licznika pełni grzebień optyczny wraz z odpowiednią aparaturą elektroniczną. Liczba oscylacji lasera jest bowiem tak duża, że zanim będą ją w stanie zliczyć urządzenia elektroniczne, trzeba ją najpierw przetworzyć za pomocą „linijki”, jaką jest grzebień optyczny. Miarę tę tworzą krótkie, równoodległe impulsy wytwarzane przez femtosekundowy laser w grzebieniu optycznym. Optyczny zegar atomowy znajdujący się w Krajowym Laboratorium FAMO posiada przyłączy do sieci OPTIME, dzięki czemu naukowcy mogą odnosić się do skali czasowej UTC (AOS), którą w celach naukowych udostępnia Polska Akademia Nauk.

Nasz przyrząd pomiarowy wyczułony jest na przemierzający Wszechświat defekt topologiczny. To zjawisko o wieku zbliżonym do wieku Wszechświata – niejednorodność przestrzenna, która powstała, kie-



OPTYCZNY ZEGAR ATOMOWY



Pracownicy Krajowego Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej KL FAMO w jednym z pomieszczeń, w którym znajduje się optyczny zegar atomowy.

przez 2 s trwały obserwacje (2 cykle), po czym w razie zaburzeń dokonywana była korekta lasera, którego częstotliwość dopasowana być musi do wąskich parametrów spektralnych strontu 88. Jeżeli przez te 2 s zaburzenia nie wystąpią, czyli laser zachowa swoją częstotliwość, to znaczy, że jest stabilny.

Czekanie na obecność

W tym doświadczeniu toruńscy naukowcy pierwsi na świecie zbadali eksperymentalnie, jak kontakt optycznego zegara atomowego z defektem topologicznym wpłynąłby na zmianę częstotliwości przejść w atomach strontu 88 oraz na zmianę częstotliwości ultra-stabilnego lasera. Poszukiwane przez fizyków zmiany w stałej strukturze subtelnej α , która charakteryzuje siłę oddziaływań elektromagnetycznych, wyznaczyło ograniczenie tego, jak mocno ciemna materia oddziałuje ze zwykłą materią.

W warunkach idealnych doświadczenie to mogłoby zostać przeprowadzone za pomocą tylko jednego zegara. Na Ziemi niezwykle ciężko byłoby jednak stworzyć takie warunki, więc dr Piotr Wcisło zaproponował inny sposób zwiększenia dokładności tego doświadczenia. Chociaż do pomiarów wykonanych na UMK wykorzystano dwa zegary, to znajdowały się one stosunkowo blisko siebie – były oddalone tylko o około 10 m. W tym przypadku zaburzenia zewnętrzne wpływały równocześnie na działanie obydwu zegarów. Naturalnym ograniczeniem przeprowadzonego

eksperymentu jest też założenie, że defekt topologiczny o przewidzianych przez nas parametrach przeniknie przez Ziemię podczas trwania doświadczenia (45 700 s). Rozwiązaniem tych problemów jest prowadzenie obserwacji przez wiele lat za pomocą kilku znacznie oddalonych od siebie zegarów. Taki program obserwacyjny nie wymagałby kosztownych połączeń światłowodowych ani budowania nowej aparatury, gdyż zegary podobne do toruńskiego znajdują się na przykład w Japonii czy Stanach Zjednoczonych.

Metoda opracowana przez toruńskich fizyków oraz przeprowadzone przez nich doświadczenie są pierwszym krokiem do stworzenia sieci zegarów nasłuchujących sygnatury ciemnej materii. Rozwiązanie to jest niezwykle obiecujące i naukowcy z Instytutu Fizyki UMK nawiązali już współpracę z innymi ośrodkami posiadającymi optyczne zegary atomowe. Bardziej skomplikowana forma przyszłych pomiarów niesie też ze sobą nowe problemy, takie jak konieczność uwzględnienia odległości między zegarami, ich ruchu związanego z ruchem Ziemi, ale też poruszania się w naszej Galaktyce, razem z całym Układem Słonecznym. Astronomowie pokonają te trudności, a wtedy, analizując pracę poszczególnych zegarów, czekać będziemy na jedno wspólne, zsynchronizowane „tyknięcie” oznaczające obecność ciemnej materii, które zmieni nasze postrzeganie świata.

BEATA ZJAWIN

ZDJĘCIA: ANDRZEJ ROMAŃSKI

Chcesz wiedzieć więcej?

Wcisło P., Morzyński P., Bober M., Cygan A., Lisak D., Ciuryło R. & Zawada M. (2016). Experimental constraint on dark matter detection with optical atomic clocks. *Nature Astronomy* 1.

Vilenkin A. (1985). Cosmic strings and domain walls, *Physics Reports*.

Derevianko A. (2016). Atomic clocks and dark-matter signatures. *Journal of Physics: Conference Series*.