
Badanie antymaterii z atomową precyzją

Łukasz Kłosowski^{(1)*}, Georgy Kornakov^{(2)**}, Mariusz Piwiński^{(1)***}, Tomasz Sowiński^{(3)****}

⁽¹⁾ Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

⁽²⁾ Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

⁽³⁾ Instytut Fizyki PAN

Abstrakt. Badanie antymaterii to jedno z najbardziej fascynujących zagadnień współczesnej fizyki. Trwający od kilku dziesięcioleci bezprecedensowy rozwój technik doświadczalnych z pogranicza fizyki atomowej i jądrowej pozwala obecnie nie tylko wytwarzać antymaterialne cząstki, ale również je w sposób kontrolowany gromadzić, przechowywać i używać jako niezwykle precyzyjne narzędzia badawcze. Jednym z fundamentalnych pytań, na które wciąż nie znamy satysfakcjonującej odpowiedzi, jest to, czy współczesna teoria oddziaływań grawitacyjnych prawidłowo opisuje również świat antymaterialny. Odpowiedzi na to pytanie szuka międzynarodowy zespół AEgIS w CERN w Genewie, w skład którego wchodzi grupa polskich badaczy z Torunia i Warszawy. Zasadniczym celem tego ambitnego programu badawczego jest sprawdzenie z atomową precyzją, jak wygląda swobodny spadek w polu grawitacyjnym Ziemi obiektów zawierających antymaterialne składniki.

Słowa kluczowe: antymateria, spadek swobodny, słaba zasada równoważności, CERN

Abstract. The study of antimatter is one of the most fascinating issues in modern physics. The recent unprecedented development of experimental techniques in atomic and nuclear physics now makes it possible not only to produce antimaterial particles, but also to collect, store and use them in a controlled manner as extremely precise research tools. One of the fundamental questions still remaining without a satisfying answer is whether the contemporary theory of gravity describes correctly also the antimaterial world. Answering this question is on the agenda of AEgIS – the international team at CERN in Geneva including a group of Polish researchers from Toruń and Warsaw. The fundamental goal of this ambitious research program is to verify with atomic precision a free fall in the Earth's gravitational field of objects containing antimaterial components.

Keywords: antimatter, free fall, weak equivalence principle, CERN

Współczesna fizyka atomowa narodziła się na przełomie XIX i XX wieku na skutek niesamowitego postępu technologicznego pozwalającego badać oddziaływanie materii z promieniowaniem z bardzo dużą dokładnością. W parze z kolejnymi sukcesami eksperymentalnymi szły przełomowe koncepcje teoretyczne, które naprzemiennie albo wyprzedzały doświadczalne osiągnięcia, albo próbowały tłumaczyć nowe, jeszcze niewytłumaczone rezultaty badań. Cały postęp w tamtym okresie był związany z rodzącymi się właśnie dwoma filarami nowoczesnej fizyki, które całkowicie zmieniły nasze rozumienie Przyrody, tj. teorii względności oraz mechaniki kwantowej.

Teoria względności (TW) daje spojrzenie na wszelkie zagadnienia fizyczne w najszerszej możliwej skali. Określa ramy w jakich należy opisywać różne zjawiska tak, aby opis był wewnętrznie spójny i zgodny z zasadą przyczynowości, tzn. że skutek nie może poprzedzać przyczyny. Jedną z jej konsekwencji jest zrozumienie, że pojęcia takie jak czas i przestrzeń nie są absolutne, a ich percepcja

zależy od ruchu obserwatora. Bardziej dogłębne przeanalizowanie tych ogólnych zasad doprowadziło Einsteina do wniosku, że w ramach TW (po pewnych uogólniających modyfikacjach) należy również opisywać wszelkie zjawiska grawitacyjne. Wynika to z faktu, że żadne lokalne pomiary nie pozwalają na odróżnienie jednorodnych sił grawitacji od pozornych sił bezwładności związanych z ruchem przyspieszonym. Obrazowo mówiąc, masa jako miara bezwładności, o której mówi II zasada dynamiki Newtona, jest tą samą masą, która występuje w prawie powszechnego ciężenia określającym oddziaływanie grawitacyjne. Tym samym Einstein zamknął raz na zawsze historyczną klamrą najróżniejsze rozważania i dywagacje, których źródłem była słynna zasada równoważności Galileusza stwierdzająca, że wszystkie ciała muszą spadać z tym samym przyspieszeniem niezależnie od tego, jaka jest ich masa, budowa czy struktura wewnętrzna. Pozostało jedynie ostateczne sprawdzenie doświadczalne, że tak jest w istocie. W następnych latach zostało to potwierdzone we wszystkich możliwych skalach, od atomowych po astronomiczne.

Druga teoria, która odmieniła sposób, w jaki rozumiemy działanie otaczającego nas świata, to mechanika kwantowa. Teoria ta w swoim założeniu została stworzona po to, aby opisywać subtelne zjawiska zachodzące

*ORCID: 0000-0002-5463-5381

**ORCID: 0000-0002-3652-6683

***ORCID: 0000-0001-5847-2578

****ORCID: 0000-0002-7970-4371

w skalach atomowych. Sformułowanie nowej teorii było konieczne, ponieważ próba wyjaśnienia obserwowanych faktów w ramach klasycznej mechaniki i elektrodynamiki prowadziła wprost do absurdalnych wniosków. Początkowo mechanikę kwantową budowano wykorzystując bardzo uproszczone modele, w ramach których mówiło się o pojedynczych fotonach czy pojedynczych atomach zbudowanych z pojedynczych protonów i elektronów. Jej kolejne sukcesy, w wyjaśnianiu zjawisk wcześniej niewyjaśnialnych, były inspiracją do podejmowania wyzwań, tj. rozwiązywania coraz to trudniejszych problemów zarówno na gruncie teoretycznym, jak i doświadczalnym. W końcu abstrakcyjne, matematyczne sformułowanie mechaniki kwantowej i zastosowanie jej do opisu układów wielociałowych pozwoliło dostrzec, że w Przyrodzie mogą zachodzić bardzo subtelne zjawiska, które albo z jakiegoś powodu nie są realizowane, albo są na tyle ulotne, że ich doświadczalne zaobserwowanie wymaga dużo bardziej dokładnej aparatury.

Oczywiście fizycy natychmiast postawili sobie za cel sprawdzenie, czy te całkowicie teoretyczne przewidywania mechaniki kwantowej są prawdziwe. To doprowadziło do spektakularnego rozwoju technik doświadczalnych, które dość szybko (choć w sposób zupełnie niezaplanowany) znalazły przełożenie na nasze codzienne życie. Wraz z pierwszym wymuszeniem akcji laserowej stało się jasne, że potencjalnie badania podstawowe mogą gruntownie przeformułować główne problemy technologiczne i tym samym zmienić nasze codzienne życie. Doświadczamy tego każdego dnia, przy każdej czynności wspomaganej wszelkimi urządzeniami elektronicznymi. Ich działanie to bezpośrednie, namacalne przejawy zjawisk zachodzących na mikroskali, których ujarzmienie było możliwe tylko dzięki temu, że sformulowano abstrakcyjny opis zjawisk kwantowych.

Obie wspomniane fundamentalne teorie fizyczne sprawiły, że w ostatnich stu latach rozwój ludzkości był wielokrotnie szybszy niż kiedykolwiek w historii. Od momentu ich sformułowania panowało przekonanie, że mechanika kwantowa — jako teoria bardziej szczegółowa, koncentrująca się na konkretnych zjawiskach, opisująca jedynie fragmenty rzeczywistości — musi być w jakimś stopniu uzgodniona z TW — teorią o bardzo fundamentalnych postulatach. To był jeden z głównych powodów, dla którego podejmowano próby sformułowania mechaniki kwantowej w takim języku, aby była całkowicie zgodna z teorią względności. Jedną z pierwszych udanych prób była teoria Diraca z 1928 roku — pierwszy kwantowo-mechaniczny, a zarazem relatywistyczny opis dynamiki pojedynczego elektronu w zewnętrznym polu elektromagnetycznym. Zaraz po jej matematycznym sformułowaniu Dirac zauważył, że samo żądanie, aby opis był zgodny z teorią względności prowadzi wprost do pewnych nietry-

wialnych przewidywań w opisie kwantowym, jak choćby istnienie spinu — niezbywalnej, klasycznie niewytłumaczalnej, wewnętrznej własności cząstki, która determinuje jej nieintuicyjne zachowanie w polu elektromagnetycznym. Zrozumienie, czym jest spin, pozwoliło ujarzmzić zjawisko spinowego rezonansu magnetycznego jąder atomowych i nieoczekiwanie znalazło zastosowanie w bezinwazyjnym obrazowaniu wewnętrznych struktur naszych ciał. Każdego roku, tylko w Polsce takie badanie wykonuje się kilkaset tysięcy razy. Bez dogłębnego zrozumienia czym jest spin, nie da się prawidłowo wytłumaczyć, skąd bierze się magnetyzm substancji.

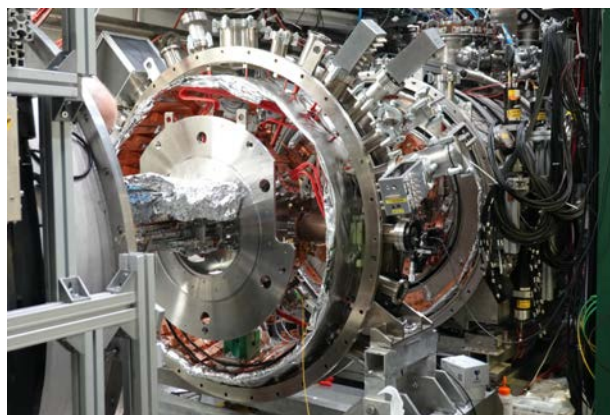
Inną, chyba najbardziej zaskakującą konsekwencją zapisania praw mechaniki kwantowej w sposób zgodny z teorią względności jest przewidywanie istnienia antymaterii. Jeśli tylko elektron podlega prawom relatywistycznej mechaniki kwantowej, to musi istnieć również antyelektron (zwany pozytonem), czyli cząstka o tej samej masie, ale przeciwnym ładunku elektrycznym. Elektron z pozytonem przyciągają się siłami elektrycznymi i gdy tylko się spotkają, to znikają (anihilują), a ich masa zamienia się na energię promieniowania elektromagnetycznego, zgodnie z najsłynniejszym einsteinowskim równaniem $E = mc^2$. To, wydawałoby się całkowicie kuriozalne przewidywanie relatywistycznej teorii Diraca, zostało pierwszy raz potwierdzone w roku 1932 w eksperymencie Carla Andersona, który zaobserwował pozytony w komorze mgłowej. Od tego czasu doświadczalnie odkryliśmy wiele różnych antycząstek, a istnienie antymaterii okazało się tak samo prawdziwe, jak istnienie „naszej” materii, z której jest zbudowane wszystko, co nas otacza. Zrozumienie jej różnych własności, elementarnych oddziaływań jakim podlega, jej wpływu na otaczający nas świat, a także na ewolucję całego Wszechświata jest od tamtego czasu jednym z najważniejszych kierunków badań współczesnej fizyki. Największą przeszkodą w prowadzeniu tych badań jest natomiast fakt, że wciąż z niezrozumiałych w pełni przyczyn, wszystko co nas otacza zbudowane jest przede wszystkim z materii. Antymaterialne cząstki (przynajmniej w naszej części Wszechświata) obserwujemy bardzo sporadycznie, głównie gdy powstają w wyniku zderzeń wiatru słonecznego z ziemską atmosferą, albo w wyniku spontanicznych rozpadów jąder atomowych.

Precyzyjne badanie różnych własności cząstek antymaterialnych wymaga zbudowania wydajnego źródła, które będzie je produkowało i dostarczało wręcz na żądanie. Z uwagi na to, że chcemy dokładnie zbadać nie tylko same antycząstki, ale również większe struktury, w które mogą się łączyć (np. atomy, cząsteczki), potrzebne jest źródło antycząstek cięższych niż pozyton. Najważniejszą z nich jest oczywiście antyproton — najlżejszy, stabilny, antymaterialny barion, podstawowy składnik jąder ato-

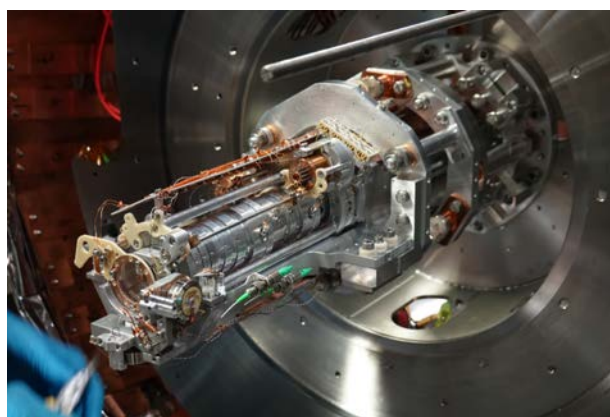
mowych. Wytworzenie antyprotonu wcale nie jest proste. W sytuacji, gdy mamy do dyspozycji tylko materię, może on powstać jedynie w wyniku zderzenia rozpędzonych do niebotycznych prędkości protonów z cięższymi jądrami atomowymi. W takim przypadku może dojść do zjawiska odwrotnego niż wspomniana wcześniej anihilacja — uwolniona w zderzeniu energia może zostać przekształcona na parę proton–antyproton. Jeśli wyprodukowany w takim procesie ujemnie naładowany antyproton zostanie przechwycony za pomocą zewnętrznego pola elektromagnetycznego i będzie odpowiednio kontrolowany, to jego kontakt z materialnym światem nie będzie możliwy. Tym samym otrzymamy stabilny antyproton, który może być wykorzystany do dalszych badań. Taka właśnie technika zastosowana jest w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN, ang. *European Organization for Nuclear Research*, franc. *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*) pod Genewą, gdzie w kompleksie AD (ang. *Antiproton Decelerator*) jest uruchomione jedno z najbardziej wydajnych źródeł antyprotonów, które następnie są spowalniane w deceleratorze ELENA (ang. *Extra Low Energy Antiproton*). W każdej minucie pracy urządzenie jest w stanie produkować kilkanaście milionów antyprotonów, które następnie są dystrybuowane do różnych eksperymentów dedykowanych precyzyjnym badaniom ich własności.

Jednym z projektów w kompleksie AD jest międzynarodowy eksperyment AEgIS (ang. *Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*), w którym biorą udział również polscy naukowcy z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, Politechniki Warszawskiej oraz Instytutu Fizyki PAN. Zasadniczym celem tego eksperymentu jest precyzyjne sprawdzenie wspomnianej już galileuszowskiej zasady równoważności dla antymaterialnej części Przyrody. W tym celu dostarczone antyprotony zostaną przechwycone i uwięzione w pułapce magnetycznej. Następnie w sposób kontrolowany zostaną połączone z pozytonami, tak aby powstały elektrycznie neutralne atomy antywodoru, czyli atomy najbliższego pierwiastka z antymaterialnej tablicy Mendelejewa. Jeśli zasada Galileusza jest prawdziwa (a przypomnijmy, że jest to również jeden z bezpośrednich wniosków ogólnej teorii względności Einsteina), to atomy antywodoru powinny spadać w polu grawitacyjnym Ziemi dokładnie tak samo, jak atomy „zwykłego” wodoru. Bardzo prawdopodobny jest oczywiście wynik pozytywny, gdyż jak do tej pory, w ramach powszechnie uznawanych teorii, nie ma żadnych przesłanek wskazujących na to, że antymateria zachowuje się w polu grawitacyjnym inaczej niż materia. Zatem jakiegokolwiek odstępstwo od tej równoważności będzie wymagało przeformułowania naszego sposobu postrzegania Przyrody. Rozwój fizyki to nieustanne próby doświadczalnego podważania lub niezależnego po-

twierdzenia wcześniej ugruntowanych i sprawdzonych twierdzeń. Sam fakt, że zasada równoważności Galileusza nie była dotąd zadowalająco dobrze sprawdzona dla antymaterii, jest dla fizyków wystarczającym bodźcem do podjęcia takiego wyzwania.



Ryc. 1. Centralna część aparatury AEgIS w trakcie montażu w komorze próżniowej. Na osi układu umieszczona została pułapka Penninga-Malmberga. Na zewnątrz widoczne są uzwojenia elektromagnesu 5T wraz z przewodami obsługującymi detektory monitorujące tworzenie atomów antywodoru i innych atomów antyprotonowych. Podczas eksperymentu całość będzie znajdowała się w ultrawysokiej próżni (ciśnienie sto bilionów razy mniejsze niż ciśnienie atmosferyczne) (fot. Georgy Kornakov, AEgIS Collaboration)



Ryc. 2. Elektrody pułapki Penninga-Malmberga, w której będzie przetrzymywana zimna mieszanina ujemnych jonów atomowych i antyprotonów. Właśnie w jej wnętrzu, w wyniku kontrolowanych zderzeń, będą tworzone atomy antywodoru, a w późniejszych etapach egzotyczne średniociężkie atomy antyprotonowe (fot. Georgy Kornakov, AEgIS Collaboration)

Niezależnie od końcowego wyniku, eksperyment AEgIS przeniesie nasze rozumienie podstawowych praw fizyki na kolejny poziom. Albo będziemy zmuszeni je całkowicie przeformułować, albo przekonamy się, że są one jeszcze bardziej fundamentalne, niż dotąd uważaliśmy. Do tego dochodzi jeszcze inna, równie ważna wartość dodana eksperymentu AEgIS. Prowadzony z atomową dokładnością, w pełni powtarzalny eksperyment będzie niezwykle precyzyjnym i unikatowym narzędziem pozwalającym wytwarzać, kontrolować i wykonywać pomiary antymaterii. To może otworzyć drogę do badania

nie tylko innych antymaterialnych atomów czy cząsteczek (np. cząsteczki antywodoru H_2), ale również bardziej egzotycznych obiektów będących stanami związanymi materii i antymaterii. Do tej grupy należą atomy antyprotonowe, tzn. atomy, w których jeden lub kilka krążących wokół jądra elektronów zastąpionych zostaje antyprotonami. Ich najprostszym przedstawicielem jest protonium, czyli wodoropodobny atom składający się z jednego protonu i jednego antyprotonu. Zadaniem polskich naukowców pracujących w eksperymencie AEgIS jest rozbudowa eksperymentu w taki sposób, aby możliwe było wytworzenie oraz badanie cięższych atomów antyprotonowych (zawierających kilkadziesiąt lub na-

wet ponad sto nukleonów w jądrze), w których zamiana orbitującego elektronu na prawie 2000 razy cięższy antyproton nie wpływa zasadniczo na dynamikę samego jądra, ale istotnie zmienia własności elektronowe takiego egzotycznego atomu. Pierwsze wyniki dotyczące badania zasady równoważności w eksperymencie AEgIS oczekiwane są w połowie 2023 roku.

Udział polskich naukowców w eksperymencie AEgIS jest wspierany w ramach projektu dofinansowanego przez Ministra Edukacji i Nauki na podstawie umowy nr 2022/WK/06.