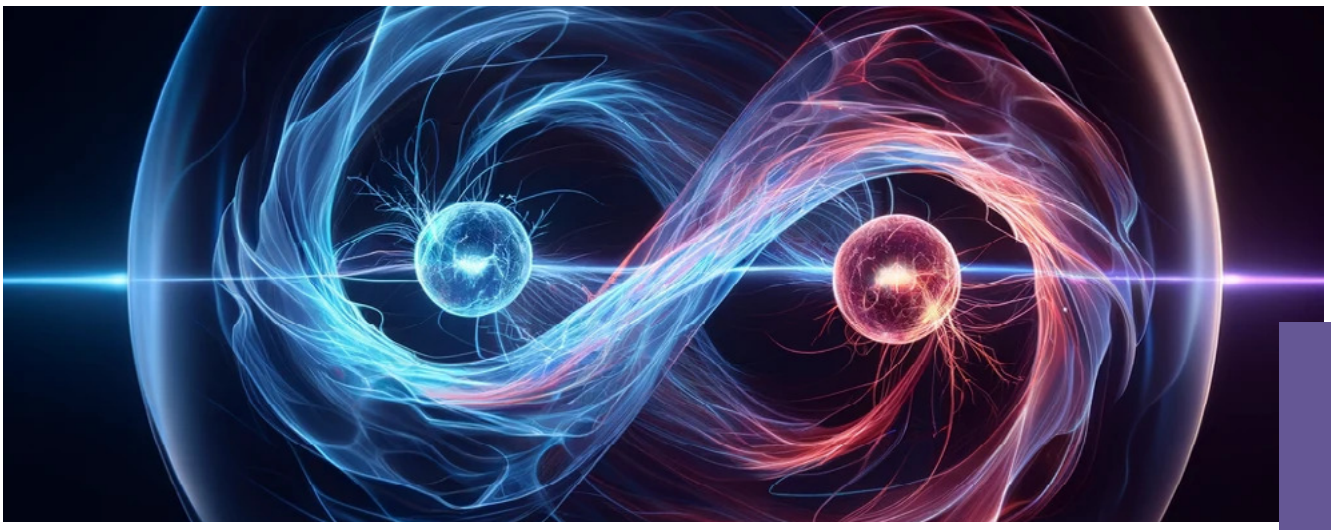


ADAM KISIEL, GEORGY KORNAKOV (POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ FIZYKI)

ZWIĄZANA ANTYMATERIA

BADANIA ODDZIAŁYWAŃ ANTYMATERII WE WSPÓŁCZESNYCH EKSPERYMENTACH FIZYCZNYCH

Antymateria jest niemal doskonałym lustrzanym odbiciem materii, z której zbudowany jest otaczający nas świat. A jednak w obserwowanym Wszechświecie próżno jej szukać. Ta pozorna sprzeczność, sięgająca pierwszych chwil po Wielkim Wybuchu, pozostaje jedną z najgłębszych zagadek fizyki fundamentalnej.

W artykule przedstawiono, w jaki sposób fizycy próbują ją rozwikłać, badając antymaterię na dwóch krańcach dostępnej skali: w rozgrzanej do granic możliwości materii powstającej w zderzeniach ciężkich jonów, odtwarzających warunki wczesnego Wszechświata, oraz w zimnej antymaterii uwięzionej w pułapkach jonowych w temperaturach bliskich zeru bezwzględnemu. Wyjaśniono, na czym polegają szczegółowe porównania układów materii i antymaterii oraz dlaczego tak wiele uwagi poświęca się procesowi anihilacji cząstek subatomowych — zjawisku, którego przebieg zależy od zapachów tworzących je kwarków i antykwarków.

Postępy ostatnich lat zilustrowano na przykładzie wyników eksperymentu ALICE, prowadzonego przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN, z których wynika, że proces ten zachodzi niezależnie od dopasowania zapachów kwarków, a także eksperymentu AEgIS przy spowalniaczu antyprotonów (AD) w tym samym ośrodku, w którym syntezuje się atomy egzotyczne zawierające antyprotony na potrzeby precyzyjnych badań fizyki jądrowej i fizyki cząstek.

Na koniec zarysowano perspektywy dalszego rozwoju, stawiając pytanie, czy połączenie badań gorącej materii ze zderzeń i zimnej antymaterii z pułapek pozwoli wreszcie odpowiedzieć, dlaczego Wszechświat wybrał materię — czy też zagadka jej zniknięcia pozostanie z nami na kolejne dekady.

ZAGADKA RÓWNAŃ DIRACA

Historia poznawania antymaterii pełna jest niespodzianek, przypadkowych odkryć i długiego procesu dochodzenia do ostatecznego zrozumienia, czym ona jest, gdzie ją można spotkać i jak powinna się zachowywać. Dziś wiemy, że już w zjawisku promieniotwórczości, odkrytym przez Henriego Becquerela i badanym przez Marię Skłodowską-Curie oraz Piotra Curie, zachodzą procesy, w których pojawia się antymateria. Jednak powszechnie za odkrycie antymaterii uważa się szereg wydarzeń, które nastąpiły pod koniec lat dwudziestych i na początku lat trzydziestych XX wieku.

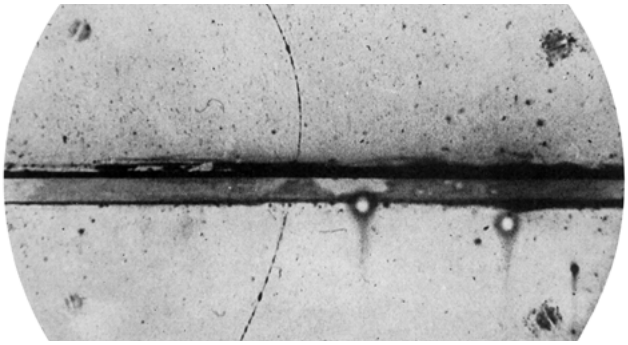
W 1928 r. Paul Adrien Maurice Dirac podjął próbę połączenia nowo powstałej mechaniki kwantowej ze szczególną teorią względności Einsteina. Sformułował relatywistyczne równanie elektronu, nazywane dziś równaniem Diraca. Spełniało ono wszystkie przyjęte przez niego założenia: miało postać zgodną z transformacjami Lorentza, odtwarzało relatywistyczną zależność między energią, pędem i masą oraz zawierało jedynie pierwszą pochodną funkcji falowej względem czasu. Dzięki temu do wyznaczenia ewolucji stanu wystarczała znajomość funkcji falowej w danej chwili, bez konieczności podawania jej pochodnej czasowej. Ponadto odpowiadająca tej funkcji gęstość prawdopodobieństwa, wyrażona przez kwadrat jej modułu, była zawsze nieujemna.

Był to gigantyczny sukces – udane połączenie dwóch najważniejszych teorii fizycznych. Bardzo szybko okazało się, że obliczenia przeprowadzone zgodnie z tym równaniem prowadzą do rozwiązań doskonale zgodnych z danymi. Jednak równanie prowadziło jednocześnie w sposób nieunikniony do rozwiązań, które zupełnie nie pasowały do jakichkolwiek znanych wtedy obiektów fizycznych. Te hipotetyczne obiekty wyglądały jak cząstki albo o ujemnej energii, albo poruszające się wstecz w czasie. Tak więc pierwszym pytaniem, jakie pojawiło się w procesie odkrywania antymaterii, było: czy i dlaczego właściwie ona w ogóle istnieje? Mimo

pokusy, aby te rozwiązania zignorować, Dirac potraktował je poważnie i próbował zinterpretować. Stworzył koncepcję tzw. morza Diraca, z której wynikało między innymi, że kwant energii o odpowiednio dużej wielkości może doprowadzić do powstania pary cząstek: elektronu i odpowiadającej mu cząstki o tej samej masie, ale o przeciwnym ładunku elektrycznym.

POZYTONY, NEUTRINA, MIONY I PIONY

W tym samym czasie niezwykle intensywnie rozwijane były eksperymentalne badania promieniowania kosmicznego. Często obserwowano w nich cząstki naładowane, które w polu magnetycznym pozostawiały zakrzywione ślady pozwalające określić stosunek ich masy do ładunku. Stąd wiedziano, że wiele z nich to elektrony. W roku 1932 Carl Anderson wprowadził do pomiarów drobną, ale brzemienną w skutkach modyfikację: na drodze cząstek postawił cienką płytkę metalową (rys. 1). Dzięki temu odkrył, że część cząstek, które uważano za elektrony, porusza się w przeciwną stronę, a więc ma ładunek dodatni! Zrozumiał, że właśnie odkrył postulowany przez Diraca proces oraz powstający w nim odpowiednik elektronu o przeciwnym ładunku. Cząstka została nazwana *pozytonem* (ang. *positron*, z literą r) i jest to jedyna cząstka antymaterii, która ma własną nazwę (nazwy wszystkich pozostałych powstają przez dodanie przedrostka anty- do nazwy odpowiadającej im cząstki materii). Za odkrycie to Anderson otrzymał Nagrodę Nobla z dziedziny fizyki w roku 1936.



Rys. 1. Pierwsza fotografia toru pozytonu, wykonana przez Carla D. Andersona 2 sierpnia 1932 r. Pozyton o energii 63 MeV ($H_\rho = 2{,}1 \times 10^5$ Gs·cm) przechodzi przez płytkę ołowianą o grubości 6 mm i wyłania się z niej z energią 23 MeV ($H_\rho = 7{,}5 \times 10^4$ Gs·cm). Długość tego drugiego odcinka toru jest co najmniej dziesięciokrotnie większa niż możliwa długość toru protonu o takim samym promieniu krzywizny.

Proces zrozumienia antymaterii ruszył, ale kolejne cząstki należące do tej kategorii odkrywaliśmy najczęściej przypadkiem – przy okazji badania innych procesów i często nie wiedząc, że do antymaterii należą. Już w 1933 r. Pauli w akcie desperacji zaproponował, że w rozpadzie beta (czyli w procesie promieniotwórczości, który badała Maria Skłodowska-Curie) oprócz elektronu powstaje także nieznana, nieposiadająca ładunku elektrycznego cząstka o znikomej lub zerowej masie, którą nazwano *neutrinem*. Później zrozumieliśmy, że tak naprawdę jest to *antyneutrino*, kolejny przedstawiciel antymaterii. Jego istnienie miało głębokie uzasadnienie teoretyczne, jednak eksperymentalnie jego istnienie zostało potwierdzone dopiero w latach 50. XX wieku ze względu na niezwykle wymagający proces jego detekcji.

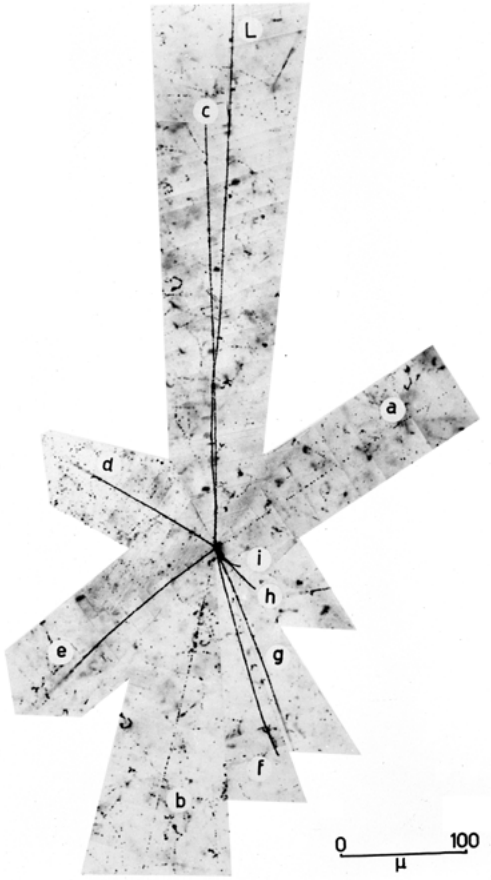
W tym samym czasie nadal intensywnie badane było promieniowanie kosmiczne. Okazało się, że w procesach przez nie wywoływanych pojawiały się tajemnicze *mezony* (czyli „cząstki pośrednie") o masie większej od elektronu, ale mniejszej od protonu. Przez co najmniej dekadę panowało zamieszanie co do ich natury. Wydawało się, że mogą to być postulowane przez Yukawę cząstki odpowiedzialne za wiązanie nukleonów w jądrze atomowym. Następnie odkryto, że cząstki te nie oddziałują silnie, a więc nie mogą być cząstkami Yukawy, aby zaraz potem zorientować się, że rodzajów mezonów jest więcej niż myśleliśmy, i że drugim rodzajem są jednak cząstki postulowane przez Yukawę. Dzisiaj rozumiemy, że pierwszy rodzaj cząstek to *leptony* μ (*miony*, których już nie nazywamy mezonami) i wśród nich mamy zarówno cząstki, jak i antycząstki, a drugi rodzaj cząstek to *hadrony* (cząstki oddziałujące silnie) – mezony π (*piony*). To, że także one zawierają składnik antymaterii, zrozumieliśmy dopiero kilka dekad później, gdy dowiedzieliśmy, że składają się z pary *kwark–antykwark* (nazwa „mezon" została zarezerwowana właśnie dla wszystkich takich cząstek). Nie dziwmy się jednak, że ówcześni naukowcy potrzebowali tak dużo czasu, aby poprawnie zidentyfikować wszystkie te cząstki – pamiętajmy, że miony i piony mogą mieć ten sam ładunek elektryczny, bardzo podobną masę (około 200 razy większą od masy elektronu), a dodatkowo piony są cząstkami niestabilnymi, które po krótkim czasie rozpadają się na… miony.

OD ANTYPROTONÓW DO ANTYATOMÓW

Drugą cząstką antymaterii, której istnienia spodziewaliśmy się i której poszukiwaliśmy z premedytacją i w specjalnie w tym celu zaprojektowanym doświadczeniu, był *antyproton*. Skoro para elektron-pozyton powstaje z czystej energii, to podobnie mogło być też dla najlżejszej pary nukleon-antynukleon, czyli pary proton-antyproton. Jednak aby do tego doszło, potrzeba około 2000 razy więcej energii i promieniowanie kosmiczne już nam nie mogło pomóc. Należało sztucznie wytworzyć wiązkę protonów o energii co najmniej 6 miliardów elektronowoltów, dziś zapisywanych jako GeV (gigaelektronowoltów), ale w latach 40. XX wieku używano oznaczenia BeV (ang. *billion electron volts*).

Ernest Lawrence zaproponował zbudowanie nowego rodzaju urządzenia – *synchrotronu*, który byłby w stanie przyspieszyć protony do tak dużej energii. W laboratorium na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley (w stanie Kalifornia w USA) powstał *Bevatron*. Wokół tego urządzenia utworzono później niezależne Lawrence Berkeley National Laboratory, a wokół podobnych urządzeń rodziło się na świecie wiele innych analogicznych laboratoriów, w tym np. Brookhaven National Laboratory w stanie Nowy Jork (USA) oraz Europejski Ośrodek Badań Jądrowych (CERN) przy granicy Szwajcarii i Francji. W zderzeniach przyspieszonych w Bevatronie protonów z tarczą powstawało wiele cząstek, ale tym razem wiedzieliśmy już dokładnie, czego szukamy.

Zespół magnesów selekcjonował cząstki ujemne, wśród których występowały ujemne piony i antyprotony. Jednak przy podobnym pędzie antyprotony miały znacznie mniejszą prędkość. Ich produkcję potwierdzono na kilka sposobów. Po pierwsze mierzono czas przelotu cząstek pomiędzy dwoma detektorami scyntylacyjnymi i wyraźnie widziano dwa oddzielne piki: pierwszy odpowiadający prędkości pionów, a drugi – prędkości antyprotonów. Dalej ustawiono niezależny detektor promieniowania Czerenkowa, który był precyzyjnie zaprojektowany w taki sposób, żeby dawał sygnał tylko dla cząstek w wąskim przedziale prędkości odpowiadającej antyprotonom. Ostatecznie antyprotony trafiały do emulsji fotograficznej, gdzie były zatrzymywane.



Rys. 2. Pierwszy zarejestrowany obraz gwiazdy anihilacji antyprotonu „Faustina" (L), znalezionej w emulsji fotograficznej naświetlonej w eksperymencie zespołu Emilia Segrègo w 1955 r.

Zaobserwowano w niej wyraźny sygnał wyjątkowego oddziaływania, w którym z jednego punktu wylatywało po cztery wysokoenergetyczne tory cząstek o dwóch przeciwnych ładunkach, co poprawnie zinterpretowano jako *anihilację* pary antyproton-proton (z emulsji), w której powstają naładowane piony (rys. 2). Nie było wątpliwości, że kolejna cząstka antymaterii – antyproton – została odkryta, za co przyznano Nagrodę Nobla z fizyki w roku 1959.

Pełniejsze zrozumienie znaczenia antymaterii jako nieodłącznego odpowiednika „zwykłej" materii stało się możliwe dopiero wraz ze sformułowaniem modelu kwarkowego, eksperymentalnym potwierdzeniem istnienia *kwarków* i *antykwarków* oraz wyjaśnieniem budowy hadronów jako układów związanych tych cząstek. W szczególności mezony okazały się cząstkami, w których materia i antymateria współistnieją w ramach tego samego obiektu. Natomiast (anty-)bariony to cząstki składające się odpowiednio albo z trzech kwarków, albo z trzech antykwarków. Ten niewątpliwy ogromny sukces w zrozumieniu budowy materii przyniósł jednak zupełnie niespodziewanie równie wielką, do dzisiaj niewyjaśnioną zagadkę. Okazuje się, że początkowe pytanie o antymaterię: „dlaczego jest?" zamieniliśmy na pytanie dokładnie odwrotne: „dlaczego jej nie ma?". Mniej więcej w tym samym czasie, w którym formułowano koncepcję kwarków, ostatecznie potwierdziła się koncepcja, że Wszechświat powstał w Wielkim Wybuchu, w uproszczeniu: z czystej energii. Ale to znaczy, że antymaterii powinno powstać dokładnie tyle samo, co materii. W trakcie ewolucji Wszechświata, gdy tylko materia i antymateria spotykały się, powinny były anihilować i zniknąć. Tymczasem mamy wszelkie podstawy sądzić, że cały obserwowany przez nas Wszechświat zbudowany jest tylko z materii. Dla przykładu, detektor AMS-02 działający na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej zmierzył, że w promieniowaniu kosmicznym na jeden antyproton przypada 10 000 protonów. Jest to zgodne z ilością antymaterii, której się spodziewamy, jeżeli we Wszechświecie jest ona czasami produkowana w niektórych wysokoenergetycznych procesach, ale nie ma już antymaterii pierwotnej. Gdzie więc podziała się? To fundamentalne pytanie nadal nie ma odpowiedzi i stanowi jeden z kluczowych obszarów badań fizyki jądrowej i fizyki cząstek elementarnych.

Nasze aktualne zrozumienie antymaterii można podsumować w następujący sposób. Każda cząstka materii – a więc wszystkie leptony oraz wszystkie kwarki – ma odpowiadającą jej antycząstkę. Antycząstka ma właściwości identyczne z cząstką, takie jak masa i spin (a więc także ich energia, pęd czy moment pędu podlegają tym samym, wspólnym z materią, zasadom zachowania) oraz przeciwne „ładunki", do których należą ładunek elektryczny, ładunek leptonowy oraz „ładunki" oddziaływania silnego: *zapachy* oraz *kolory*. Każdy z tych ładunków ma odpowiadającą mu zasadę zachowania, więc w procesie *kreacji par*, tworząc jednocześnie cząstkę i odpowiadającą jej antycząstkę, nie łamiemy tych zasad zachowania. Kluczowym, odwrotnym do kreacji par zjawiskiem, o którym piszemy więcej w tym artykule, jest anihilacja. Gdy cząstka znajdzie się w pobliżu antycząstki podobnego typu, może dojść do procesu, w którym obie cząstki znikają, zamieniając się w energię, która może zostać dalej wypromieniowana w postaci kwantów gamma lub kombinacji cząstek materialnych. Ten drugi scenariusz jest w praktyce możliwy głównie w przypadku anihilacji barionów (patrz: odkrycie antyprotonu opisane wyżej).

Należy podkreślić, że jeżeli dana cząstka materii jest stabilna, odpowiadająca jej antycząstka również jest stabilna. Nie mamy żadnego powodu, aby sądzić, że pozytony czy antyprotony nie są cząstkami stabilnymi. Antyprotony mogą więc łączyć się z *antyneutronami*, tworząc *antyjądra*, a po przyłączeniu pozytonów – *antyatomy*. Jednym z podstawowych założeń, które pragniemy właśnie eksperymentalnie zweryfikować, jest to, że taki antyatom byłby z punktu widzenia widma emisyjnego lub zachowania w polu grawitacyjnym nieodróżnialny od odpowiadającego mu atomu. Podobnie stany podstawowe antybarionów złożone z cięższych antykwarków (np. anty-Λ, anty-Ξ czy anty-Ω) będą rozpadać się poprzez procesy słabe i z punktu widzenia skali czasowej oddziaływania silnego będą praktycznie stabilne.

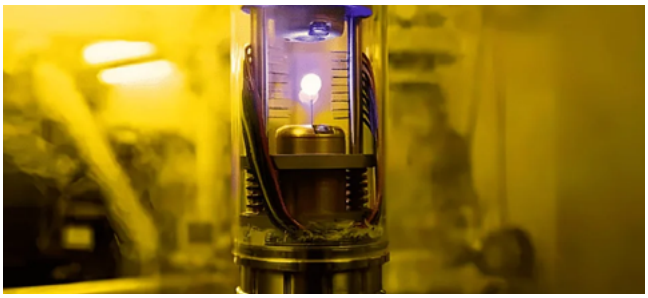
CZYM RÓŻNI SIĘ MATERIA OD ANTYMATERII?

Istotnym pytaniem pozostaje, czy antymateria rzeczywiście zachowuje się dokładnie tak samo jak materia. Gdybyśmy zauważyli jakieś różnice, to mogłyby one wyjaśnić nadmiar materii we Wszechświecie. Na razie udało nam się jedynie zaobserwować niezwykle subtelne różnice w prawdopodobieństwie rozpadów niektórych ciężkich mezonów na materię i antymaterię. Są to jednak zbyt małe efekty, by wyjaśnić budowę Wszechświata. Dlatego wciąż badamy antymaterię, szukając nowych efektów. Wydaje się, że różnic tych nie widać we właściwościach pojedynczych cząstek, ale wciąż otwarte jest pytanie, czy nie ma takich różnic w ich wzajemnych oddziaływaniach.

Podobnie sam proces anihilacji jest wciąż tajemniczy. O ile jest on relatywnie dobrze zbadany dla par odpowiadających sobie cząstek stabilnych (elektronu i pozytonu czy protonu i antyprotonu), o tyle dużo trudniej jest zbadać anihilację cięższych barionów. Okazuje się, że anihilacja

zachodzi pomiędzy barionem a antybarionem nawet wtedy, gdy nie są to dokładnie przeciwne sobie cząstki – np. antyproton może anihilować z barionem Λ, mimo że ich skład kwarkowy nie jest dokładnie przeciwny. Jak w takim przypadku przebiega proces? Co dzieje się z kwarkami, które nie mogą wtedy po prostu zniknąć, bo w drugim barionie nie ma odpowiadającego im antykwarku? Jak zmienia się prawdopodobieństwo takiego procesu z liczbą „niedopasowanych" par kwark-antykwark? Na te pytania staramy się odpowiedzieć w badaniach opisanych w tym artykule.

Problematyka antymaterii budzi niezwykłe zainteresowanie szerszej publiczności, nie zawsze związanej z fizyką cząstek czy z fizyką ogólnie. Już odkrycie antyprotonu i towarzyszący mu opis procesu anihilacji wzbudziły zainteresowanie, ale też obawy, wynikające z pojawiającej się w nim ogromnej energii. Wynikało to z, niekoniecznie uzasadnionego, odniesienia do wybuchów jądrowych. W XXI wieku ogromną popularność zdobył hollywoodzki film „Anioły i demony", którego fabuła opierała się na wykradzeniu antymaterii z laboratorium CERN-u i groźbie użycia jej jako niebezpiecznej broni (rys. 3). Co ciekawe, film ten był kręcony częściowo w prawdziwych lokacjach CERN-u, w tym w kawernie eksperymentu CMS, z użyciem prawdziwych znaków graficznych zarówno CERN-u, jak i samego eksperymentu. Choć fabuła tego filmu wydawała się zupełnie nierealistyczna (w czasie powstawania filmu nie potrafiliśmy jeszcze wytwarzać dużych ilości antymaterii, a tym bardziej przechowywać jej przez dłuższy okres czy transportować), to w roku 2026 eksperyment BASE w CERN-ie potrafił wytworzyć, zmagazynować, a następnie przetransportować na odległość kilkuset metrów antymaterię. Powoli więc prawdziwa nauka dogania wyobraźnię filmowców.



Rys. 3. Kadr z filmu Anioły i Demony (Angels & Demons, 2009, reż. Ron Howard) przedstawiający fikcyjny pojemnik do transportu i przechowywania antymaterii wytworzonej w ośrodku CERN.

Wyjaśnijmy też kwestię, która może wprowadzać pewne zamieszanie wśród niespecjalistów. Oprócz antymaterii słyszymy również o tzw. ciemnej materii, która również związana jest z niezwykle istotną i nierozwiązaną do dziś zagadką dotyczącą Wszechświata. Podkreślmy, że antymateria na pewno nie jest ciemną materią. Antymateria to dla nas dziś „nasza", dobrze znana, swojska, „zwyczajna" materia barionowa podlegająca wszystkim tym samym oddziaływaniom co materia. Tymczasem o własnościach ciemnej materii nie wiemy prawie nic, ale wiemy, że na pewno nie jest ona „nasza", na pewno nie podlega „naszym" oddziaływaniom poza grawitacją i być może nawet nie jest materią.

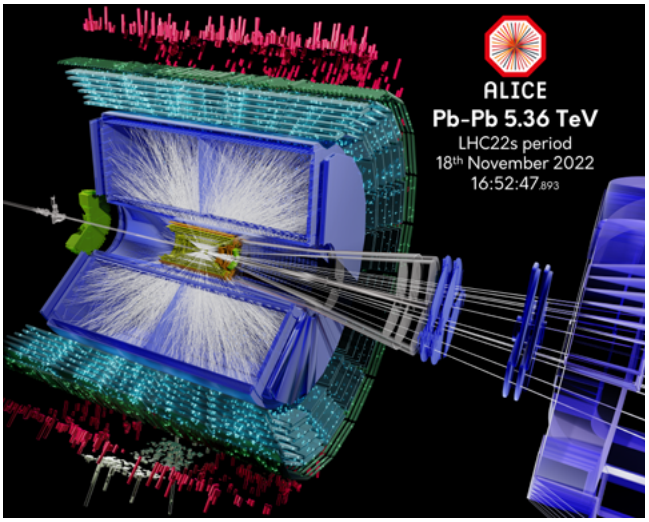
NOWOCZESNE BADANIA ANTYMATERII

Antymateria pozostaje niezwykle aktywnym obszarem badań dzisiejszej nauki. Jednocześnie w sposób naturalny badania te są rozszerzeniem metod, które zostały użyte do jej odkrycia. Aby wyprodukować pierwszą antymaterię barionową potrzebny był nowy rodzaj akceleratora cząstek – synchrotron. Okazuje się, że dziś korzystamy właściwie z tego samego narzędzia, tyle że w kolejnej już, ulepszonej wersji. Badania grupy fizyków z Zakładu Fizyki Jądrowej Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej prowadzone są już od kilkunastu lat z wykorzystaniem najnowszych, największych i najpotężniejszych synchrotronów: zderzacza Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) w Brookhaven National Laboratory w stanie Nowy Jork w USA oraz Wielkiego Zderzacza Hadronów (Large Hadron Collider) w laboratorium CERN pod Genewą w Szwajcarii. W kompleksie RHIC działa eksperyment STAR (Solenoidal Tracker at RHIC), który od roku 2000 bada zderzenia jądrowe, w tym zderzenia jąder złota przy energii do 200 GeV na nukleon. Przez dekadę była to największa energia uzyskiwana w zderzeniach ciężkich jąder. W roku 2009 miano to przejął LHC, gdzie zachodzą zderzenia jąder ołowiu przy energii do 5,36 TeV na nukleon.

Eksperyment ALICE przy LHC jest przeznaczony do badań takich właśnie zderzeń. Polscy fizycy z Politechniki Warszawskiej, Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz Uniwersytetu Śląskiego, są członkami tej współpracy. W przypadku grupy z PW jest tak już od ponad 20 lat. Przez podobny czas jest ona także członkiem współpracy STAR przy RHIC w Brookhaven National Laboratory (USA). Energie zderzeń osiągane w RHIC i LHC są o dwa do trzech rzędów wielkości większe niż masa spoczynkowa zderzanych jąder. Zderzane są przeciwbieżne wiązki, więc energia dostępna do produkcji cząstek w układzie laboratoryjnym to praktycznie pełna energia jąder. W takich zderzeniach materia produkowana jest właściwie z czystej energii. A to oznacza, że jeżeli produkowana jest tam materia, to jednocześnie musi powstać prawie tyle samo antymaterii. Większość wyprodukowanych cząstek to lżejsze mezony, ale znacząca jest też produkcja barionów. Stosunek liczby wyprodukowanych antybarionów do odpowiadającej im liczby barionów zmierzony przez eksperyment ALICE [1] ma wartość powyżej 0,96 dla protonów i barionów Λ, Ξ i Ω.

Zderzenia ciężkich jonów przy ultrarelatywistycznych energiach, takie jak przykładowe zderzenie z eksperymentu ALICE przedstawione na rys. 4, to prawdziwa fabryka antymaterii. W każdym z nich powstaje do kilkudziesięciu tysięcy cząstek, które następnie przelatują przez detektory. W ALICE najbliżej zderzenia położone są detektory półprzewodnikowe potrafiące mierzyć punkt przejścia każdej cząstki z dokładnością do kilku mikrometrów. Następnie cząstki przelatują przez Komorę Projekcji Czasowej (ang. Time Projection Chamber, TPC) – detektor gazowy, który dalej śledzi trajektorię lotu cząstek naładowanych. Z zakrzywienia toru cząstek w polu magnetycznym, w którym zanurzony jest detektor, możemy wyznaczyć ich pęd. Na koniec cząstki trafiają do detektora czasu przelotu (ang. time of flight, TOF), który mierzy ich prędkość. W połączeniu z informacją o stratach energii cząstek na jonizację w TPC pozwala to odróżnić od siebie piony, kaony (mezony K, w których skład wchodzą kwarki dziwne) oraz protony. Cząstki niestabilne, ale rozpadające się poprzez oddziaływania słabe, takie jak hiperony Λ, Ξ i Ω, w większości rozpadają się, zanim zdążą dolecieć do detektorów. Ale mierząc produkty ich rozpadu (głównie protony i piony), możemy zrekonstruować ich pęd oraz je zidentyfikować.

1 M. Broz i in. (ALICE Collaboration), Nuclear Physics A 904-905 (2013), 429c-432c, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.02.041



Rys. 4. Przykładowe zderzenie jąder ołowiu zarejestrowane w eksperymencie ALICE. W środku znajduje się detektor krzemowy (żółty), otoczony cylindrycznym TPC (ciemnoniebieski) oraz beczką TOF (jasnoniebieski). Białe linie to zrekonstruowane tory cząstek naładowanych.

Eksperyment STAR przy RHIC ma bardzo podobną konstrukcję. Ostatecznie obydwa te detektory pozwalają zmierzyć z bardzo dobrą dokładnością pęd, a więc także energię, oraz zidentyfikować rodzaj każdej cząstki naładowanej powstałej w każdym zderzeniu oraz cząstek niestabilnych rozpadających się na takie cząstki naładowane. Jak wspominaliśmy wcześniej, wśród tych cząstek około połowę stanowi antymateria. Cząstki te poruszają się z ogromnymi prędkościami stanowiącymi znaczący procent prędkości światła.

BADANIA ODDZIAŁYWANIA MATERIA-ANTYMATERIA

W gąszczu cząstek powstałych w zderzeniu ciężkich jonów zdarza się, że barion lub mezon materii porusza się w pobliżu innej cząstki należącej do antymaterii. Ich całkowita prędkość, z którą obie wylatują z punktu zderzenia, jest ogromna, ale ich prędkość względna nie musi być duża. W takim przypadku mogą one ze sobą oddziaływać, a to oddziaływanie zostawia ślad w postaci korelacji między nimi. Jednym z rodzajów takiego oddziaływania jest proces anihilacji barionów. Jest to zjawisko będące wynikiem oddziaływań silnych, a więc zachodzące w skali czasowej około 10^{-23} s. Jak podkreśliliśmy wcześniej, podstawowe stany hiperonów i antyhiperonów Λ, Ξ i Ω są cząstkami praktycznie stabilnymi w tej skali, więc możemy badać ich oddziaływania. Służy do tego technika femtoskopii, będąca specjalnością badaczy z Wydziału Fizyki PW.

Rozważamy parę cząstek (np. barion i antybarion), które powstały w tym samym zderzeniu. Ich oddziaływanie opisuje amplituda Bethego-Salpetera $\Psi(k^*, r^*)$, która zależy od względnego pędu k^* oraz względnego położenia r^* cząstek w parze. Jako hadrony cząstki te będą oddziaływać poprzez oddziaływania silne. Jeżeli obie są naładowane, to dodatkowo pojawi się też człon odpowiedzialny za oddziaływanie kulombowskie. Koncentrujemy się na parach o małych pędach względnych – wtedy oddziaływanie silne może być przedstawione w przybliżeniu opisywanym dwoma parametrami: długością rozpraszania f_0 (ang. *scattering length*) oraz zasięgiem efektywnym d_0 (ang. *effective range*). f_0 jest wartością zespoloną, której składowe mają czytelną interpretację: część rzeczywista $\Re f_0$ ma wartość dodatnią, gdy oddziaływanie jest przyciągające i ujemną, gdy jest odpychające. Natomiast niezerowa wartość części urojonej $\Im f_0$ wskazuje, że w oddziaływaniu następują procesy niesprężyste, na przykład anihilacja.

W eksperymencie mierzymy nie jedną, lecz miliony par barionów. Konstruujemy rozkład pędów względnych A(k^*) dla takich par. Następnie tworzymy podobny rozkład B(k^*), biorąc jedną cząstkę z jednego zderzenia, a drugą z innego. Rozkład A będzie zmodyfikowany przez korelacje pomiędzy cząstkami wyprodukowanymi w tym samym zderzeniu, zaś rozkład B nie może zawierać żadnych korelacji. Dzieląc rozkłady A przez B, uzyskujemy tzw. funkcję korelacji. Interpretujemy ją poprzez tzw. równanie Koonina-Pratta:

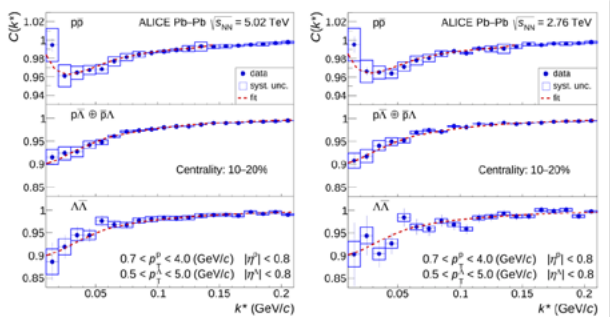
$$C(k^*) = \int \Psi(k^*,r^*)S(r^*)d^3r^*.$$

Występuje w nim amplituda Ψ oraz tzw. funkcja emisji S, która opisuje przestrzenny kształt źródła emitującego cząstki, czyli skomplikowanego systemu, który powstaje w zderzeniu ciężkich jonów. Funkcję S eksperymenty ALICE i STAR wyznaczają z dużą dokładnością za pomocą pomiarów funkcji korelacji pionów i kaonów [2], a dla naszych potrzeb możemy ją potraktować jako znaną. Gdyby pomiędzy danymi cząstkami nie było żadnego oddziaływania, to funkcja korelacji byłaby po prostu równa 1,0. My koncentrujemy się na przypadku par cząstek materii i antymaterii. Wtedy głównym czynnikiem wpływającym na kształt funkcji C jest oddziaływanie silne. Gdy $\Re f_0$ jest dodatnie, to funkcja dla małych pędów względnych jest większa od 1,0. Gdy $\Re f_0$ jest ujemne, funkcja C jest poniżej jedności. Natomiast anihilacja, dająca niezerowe wartości $\Im f_0$, powoduje, że funkcja korelacyjna jest poniżej 1,0 dla szerokiego zakresu k^*. Im silniejsza (bardziej prawdopodobna) jest anihilacja, tym głębsze jest minimum funkcji. Podobnie, większy rozmiar systemu powoduje, że funkcja korelacyjna zbliża się do jedności. Oddziaływanie kulombowskie będzie również modyfikować kształt funkcji, gdy obie cząstki są naładowane – dla cząstek o przeciwnych znakach ładunku (np. dla par barion-antybarion) będzie ono widoczne jako relatywnie wąski, ostry pik w pobliżu zera w pędzie względnym pary. Ostatecznie mierząc eksperymentalną funkcję korelacyjną dla danej pary cząstek uzyskujemy – poprzez analizę kształtu funkcji korelacyjnej – bezpośredni dostęp do parametrów oddziaływania silnego dla tej pary. Należy podkreślić, że jest to jedyna dostępna nam aktualnie metoda pomiaru tej wielkości dla wielu rodzajów par.

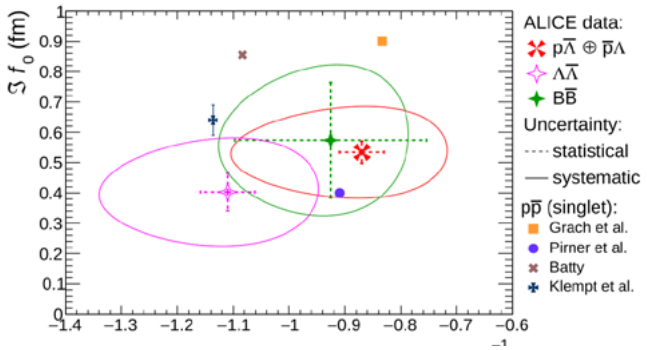
Oddziaływanie cząstek stabilnych (protonu i antyprotonu) można mierzyć w bardziej tradycyjny sposób, tj. badając oddziaływanie wiązki antyprotonów z tarczą złożoną z protonów. Przekrój czynny tego oddziaływania jest znany z dobrą dokładnością dla bardzo szerokiego zakresu pędów wiązki. Jednak metoda ta staje się skomplikowana dla małych pędów względnych, gdzie z kolei technika femtoskopii działa najlepiej. Tradycyjna metoda nie może być także stosowana dla hiperonów – nie potrafimy stworzyć ani wiązek, ani tarcz z nich złożonych. Tu femtoskopia jest naszą jedyną nadzieją.

Pierwszą próbę pomiaru oddziaływania dla pary barion-antybarion techniką femtoskopii podjął eksperyment STAR [3]. Korelacje antyproton-Λ wyraźnie pokazały sygnał anihilacji pomiędzy tymi cząstkami. Jednak interpretacja pomiarów napotkała trudności – nie udało się w sposób spójny opisać jednocześnie korelacji barion-barion i barion-antybarion. Okazało się, że w interpretacji danych należy wziąć pod uwagę dodatkowy efekt, tzw. *korelacje rezydualne* [4].

2 J. Adam i in. (ALICE Collaboration), Physical Review C 93 (2016) 2, 024905, DOI: 10.1103/PhysRevC.93.024905
J. Adam i in. (ALICE Collaboration), Physical Review C 92 (2015) 5, 054908, DOI: 10.1103/PhysRevC.92.054908
3 J. Adams i in. (STAR Collaboration), Physical Review C 74 (2006) 064906, DOI: 10.1103/PhysRevC.74.064906
4 A. Kisiel, H. Zbroszczyk, M. Szymański, Physical Review C 89 (2014) 054916; DOI: 10.1103/PhysRevC.89.054916



Rys. 5. Funkcje korelacyjne dla par proton-antyproton, proton-antylambda i lambda-antylambda dla wybranych klas zderzeń ciężkich jonów w eksperymencie ALICE [na podst. ALICE Collaboration; Phys. Lett.B 802 (2020) 135223].



Rys. 6. Zmierzone w eksperymencie ALICE parametry oddziaływania silnego – część rzeczywista i urojona długości rozpraszania f_0 – dla wybranych par barion-antybarion [na podst. ALICE Collaboration; Phys. Lett. B 802 (2020) 135223].

Wyobraźmy sobie parę: barion Λ oraz antybarion Λ wyemitowane w zderzeniu jonów z małym pędem względnym. Będą one oddziaływać ze sobą przez krótki czas (rzędu kilku fm/c) poprzez oddziaływanie silne, a następnie polecą w stronę detektora. Korelacja między nimi zostanie zbudowana właśnie przez tę krótką chwilę i pozostanie zapisana w modyfikacji ich pędów. Dużo później oba hiperony rozpadną się na pion i proton, które zostaną zmierzone w detektorze. W idealnym przypadku w eksperymencie uda się zauważyć, że te cząstki to produkty rozpadu naszych oryginalnych hiperonów. Jednak w praktyce zdarza się, że to się nie udaje. Może się więc zdarzyć, że w badaniach pary proton-Λ, że proton nie jest cząstką powstałą w zderzeniu, a pochodzi z rozpadu innej lambdy. W takim przypadku korelacja dla takiej pary ma swoje źródło w oryginalnym oddziaływaniu Λ-antyΛ, a nie w oddziaływaniu proton-antyΛ. To nazywamy właśnie korelacjami rezydualnymi. W praktyce oznacza to, że zmierzona w eksperymencie funkcja korelacyjna antyproton-Λ zawiera wkład rzeczywistych korelacji antyproton-Λ oraz wkłady korelacji rezydualnych od par antyΛ-Λ, antyproton-Ξ, antyΛ-Ξ i innych. Po uwzględnieniu tego efektu wyniki pomiarów eksperymentu STAR [5] stają się zrozumiałe i zgodne z przewidywaniami.

Mogłoby się wydawać, że korelacje rezydualne stanowią jedynie komplikację w pomiarze oddziaływania barion-antybarion. Można jednak podejść do tego zjawiska inaczej – oryginalne oddziaływanie pomiędzy cięższymi barionami to prawdziwy i niezwykle interesujący efekt fizyczny. Normalnie nie mielibyśmy do niego dostępu, bo pomiar korelacji dla takich par wymaga ogromnej próbki danych. Jednak oddziaływania te, poprzez korelacje rezydualne, wnoszą mierzalny wkład do korelacji par lżejszych barionów, a więc możemy je do pewnego stopnia szacować. Taka właśnie analiza korelacji rezydualnych [4] pokazała, że najlepszą zgodność z danymi dają obliczenia zakładające, że anihilacja dla pary barion-antybarion zachodzi z porównywalnym prawdopodobieństwem niezależnie od ich składu kwarkowego. To dosyć zaskakujący wniosek, jednak dane eksperymentu STAR były zbyt mało dokładne, aby można go było sformułować z dużą pewnością.

Analogiczne analizy były kontynuowane w eksperymencie ALICE, w którym dostępne były znacznie większe próbki danych. Na rys. 5 pokazane zostały korelacje dla par proton-antyproton, proton-antyΛ i Λ-antyΛ. Zostały one zmierzone dla dwóch energii zderzenia uzyskiwanych w LHC. Wszystkie funkcje mają charakterystyczny kształt szerokiej ujemnej korelacji, spodziewanej w przypadku anihilacji. Dla pary proton-antyproton widoczny jest też dodatni pik dla pędu względnego bliskiego zeru, pochodzący od oddziaływania kulombowskiego. Linią przerywaną pokazano dopasowanie obliczeń modelowych do danych, z których można wyznaczyć parametry oddziaływania silnego. Na rys. 6 pokazano uzyskane wartości parametrów.

Również w przypadku analizy w eksperymencie ALICE efekt korelacji rezydualnych został nie tylko uwzględniony w analizie, ale także użyty do oszacowania parametrów oddziaływania silnego dla cięższych par barion-antybarion (oznaczonych na rysunku jako BB), które nie mogły być bezpośrednio zmierzone. Co niezwykle ciekawe, w granicach niepewności doświadczalnych, parametr $\Im f_0$, opisujący anihilację barionów miał porównywalną wartość dla wszystkich par barion-antybarion. Wcześniejszy wynik eksperymentu STAR został więc potwierdzony przez dużo dokładniejsze i bardziej kompletne pomiary w ALICE. Stawia on nowe pytanie dotyczące przebiegu procesu anihilacji. Jeżeli jego prawdopodobieństwo nie zależy od tego, czy dana para barion-antybarion składa się z dokładnie dopasowanych par kwark-antykwark, to co właściwie anihiluje? I co dzieje się z kwarkami i antykwarkami, które nie mogą zniknąć w tym procesie, bo nie mają pary?

Na te pytania nie mamy w tej chwili satysfakcjonującej odpowiedzi. Dalej badamy więc korelacje barion-antybarion. Eksperyment ALICE co roku zbiera nowe dane, a po niedawnych ulepszeniach jego możliwości pomiarowe wzrosły wielokrotnie. Większe ilości danych pozwalają nam na podjęcie próby zmierzenia korelacji dla cząstek, które wcześniej były niedostępne ze względu na zbyt małą próbkę – takie jak hiperony Ξ i Ω czy układy złożone z wielu nukleonów, takie jak deuteron. Badania te są w toku i nowe wyniki pojawiają się sukcesywnie. Niedawnym przykładem jest pomiar korelacji pionów z deuteronami we wszystkich kombinacjach materii i antymaterii [6]. Zespół z Wydziału Fizyki PW nadal odgrywa wiodącą rolę w tych badaniach w ramach współpracy ALICE.

FABRYKA ZIMNEJ ANTYMATERII

Jak wspomniano wcześniej, wytworzenie jądrowej antymaterii wymaga ogromnej ilości energii. Fabryki antymaterii w sposób losowy produkują różne antybariony, które można mierzyć i analizować, jednak ze względu na energie, przy których powstają, szczegółowa analiza ich właściwości ani poddanie ich testom doświadczalnym nie są możliwe. Aby badać właściwości antymaterii jądrowej, a w szczególności

5 J. Adams i in. (STAR Collaboration), Physical Review C 74 (2006) 064906, DOI: 10.1103/PhysRevC.74.064906

6 J. Caylor i in., Physical Review C 112 (2025) 064003, DOI: 10.1103/nr3b-3dtl

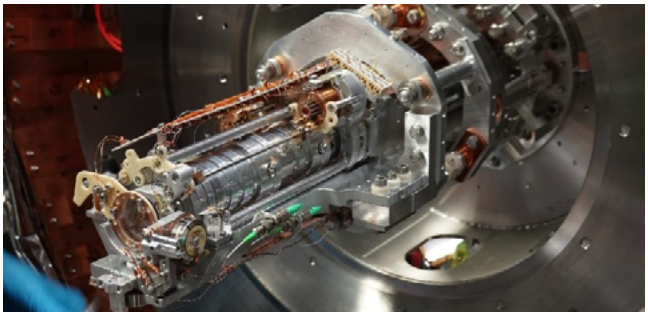
właściwości antyprotonów oraz atomów antywodoru (stanu związanego antyprotonu i pozytonu), zbudowano w CERN-ie wyjątkowy układ. Jest to ta sama instalacja, o której wspomniano wcześniej, w której udało się zgromadzić i przetransportować antyprotony w przenośnej pułapce, otwierając możliwość prowadzenia badań wymagających antyprotonów również poza murami samego laboratorium.

Rys. 7. Schemat infrastruktury badawczej Fabryki Antymaterii w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) w Genewie, ukazujący spowalniacze antyprotonów oraz rozmieszczenie poszczególnych eksperymentów.

Historia tej budowy obejmuje trzy etapy. Pierwszy miał miejsce w latach 1982–1996, gdy doświadczenia prowadzono w LEAR (ang. Low Energy Antiproton Ring – Pierścień Antyprotonów Niskich Energii). Drugim była instalacja AD (ang. Antiproton Decelerator – Spowalniacz Antyprotonów, 2000–2021). Trzeci zaś to układ ELENA (ang. Extra Low Energy Antiproton Ring – Pierścień Antyprotonów Bardzo Niskich Energii), który działa od 2021 roku (rys. 7). Warto zauważyć, że na każdym etapie dążono do uzyskania antymaterii jądrowej o coraz niższej energii, mając na celu jej gromadzenie i schładzanie, aby móc poddawać ją precyzyjnym testom z wykorzystaniem technik typowych raczej dla fizyki atomowej, takich jak spektroskopia i interferometria.

W tym przypadku antyprotony są wytwarzane poprzez zderzanie wiązki protonów z synchrotronu protonowego (ang. Proton Synchrotron, PS, działający od 1959) z metalową tarczą irydową. Na tej tarczy powstają w sposób statystyczny miliony cząstek, przede wszystkim mezonów, ale także pewna liczba antyprotonów. Te antyprotony, podobnie jak przy ich odkryciu, są selekcjonowane na podstawie masy i ładunku za pomocą szeregu magnesów, a następnie kierowane do kolejnego akceleratora — a właściwie decelerator — który zamiast przyspieszać antyprotony przy każdym okrążeniu, zmniejsza ich energię. W obecnym układzie antyprotony najpierw obniżają swoją energię do około 5 MeV w AD, a potem są przekazywane do ELENY, gdzie ich energia jest redukowana aż do 100 keV. Wartość ta nie jest przypadkowa — pozwala ona różnym eksperymentom prowadzonym w instalacji wychwytywać antyprotony w pułapkach elektromagnetycznych, gromadzić je, schładzać oraz poddawać próbom i doświadczeniom. Taką schłodzoną antymaterię nazywamy zimną antymaterią. Przykład pułapki Penninga-Malmberga przedstawiono na rys. 8.

Poszczególne eksperymenty koncentrują się na trzech głównych obszarach: badaniu antywodoru, badaniu właściwości antyprotonów oraz badaniu oddziaływań antyprotonów z jądrami lub atomami, w tym badaniu tworzenia się stanów związanych (atomów antyprotonowych).



Rys. 8. Pułapka Penninga-Malmberga eksperymentu AEgIS, służąca między innymi do gromadzenia antymaterii.

Pierwszy z tych kierunków, związany z antywodorem, skupia się na badaniu zachowania atomów antywodoru w ziemskim polu grawitacyjnym oraz na wykonywaniu pomiarów spektroskopowych poziomów energetycznych. Zmierzenie tego, jak atom spada, gdy nie działają na niego żadne siły poza ziemską grawitacją, jest procesem złożonym i wiąże się ze sprawdzeniem słabej zasady równoważności (ang. Weak Equivalence Principle), która głosi, że wszystkie ciała zachowują się podobnie pod wpływem grawitacji. Jest to praca doświadczalna, ponieważ ogólna teoria względności Einsteina wciąż pozostaje niepowiązana z Modelem Standardowym fizyki cząstek. Z tego powodu kwestia ta pozostawała otwarta aż do chwili wykonania pierwszego pomiaru oddziaływania atomów antywodoru przez eksperyment ALPHA. W 2023 roku stwierdził on, że antyatomy spadają w tym samym kierunku co zwykłe atomy, rozwiewając wątpliwości co do istnienia antygrawitacji. W innych eksperymentach prowadzi się spektroskopię laserową przejść między poziomami energetycznymi w atomach antywodoru. Do dziś, w granicach precyzji, na jaką pozwalają eksperymenty, nie stwierdzono żadnej różnicy między antywodorem a wodorem.

Należy tu wspomnieć, że tworzenie atomów antywodoru jest procesem złożonym, wymagającym manipulowania plazmami antyprotonów, pozytonów lub atomów pozytonium w celu przeprowadzenia syntezy. Warto zauważyć, że w skrajnym przypadku, gdyby istniał tylko jeden antyproton i jeden pozyton (lub jeden proton i jeden elektron) przyciągające się elektrostatycznie, ich stan związany nigdy by się nie utworzył, ponieważ nie byłoby trzeciej cząstki, która mogłaby unieść energię odpowiadającą takiemu stanowi. Dlatego aby przeprowadzić syntezę, potrzebna jest wystarczająca gęstość antyprotonów i pozytonów, aby zaistniało prawdopodobieństwo oddziaływania trójciałowego, w którym dwie cząstki pozostają związane, a trzecia może unieść nadmiar w postaci energii kinetycznej. Alternatywą dla tworzenia antywodoru poprzez łączenie jest wykorzystanie oddziaływania między pozytonium (stanem związanym pozytonu i elektronu, najlżejszym istniejącym atomem) a antyprotonami, które, mając taki sam ładunek jak elektron, zastępują go i tworzą atomy antywodoru [7]. Różnica między tymi metodami polega na konieczności tworzenia atomów pozytonium i manipulowania nimi jako niezbędnym etapie, co zwiększa złożoność procedury. W zamian daje to jednak możliwość precyzyjnego poznania momentu utworzenia atomów antywodoru, z dokładnością rzędu nanosekund, otwierając możliwość generowania krótkich w czasie impulsów ułatwiających oddzielenie sygnału od tła.

Drugi kierunek polega na wykonywaniu precyzyjnych pomiarów stosunku ładunku do masy protonów i antyprotonów lub na prowadzeniu pomiarów metodą spektroskopii

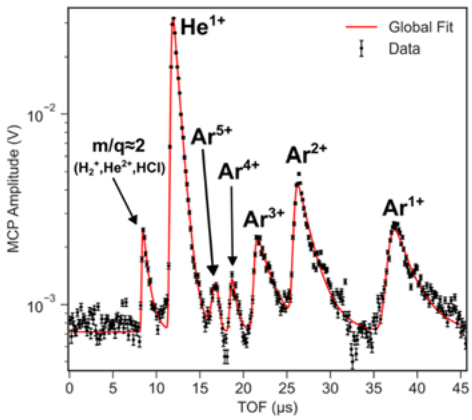
7 C. Amsler i in., Communications Physics 4 (2021) 19, DOI: 10.1038/s42005-020-00494-z

koherentnych przejść kwantowych (ang. *Coherent Quantum Transition Spectroscopy*) spinów oraz na manipulowaniu stanem kwantowym układów antymaterialnych. Wszystkie te pomiary mają na celu wykrycie jakiejkolwiek różnicy między właściwościami protonów a antyprotonów, która mogłaby wyjaśnić przyczynę braku antymaterii we Wszechświecie.

Trzeci kierunek dotyczy badania oddziaływania antyprotonów z jądrami i atomami. Antyproton może zostać wychwycony przez atom, zastępując jeden z jego elektronów. Taki egzotyczny atom, zwany atomem antyprotonowym, może powstać z wodoru (w tym przypadku nazywany jest również protonium, czyli stanem związanym antyprotonu i protonu), a także z cięższych atomów, takich jak hel, argon czy jakikolwiek inny, w tym z pierwiastków promieniotwórczych. Celem badań jest określenie zmiany atomowych poziomów energetycznych spowodowanej zastąpieniem elektronu cząstką o tym samym ładunku, lecz 2000 razy cięższą, która ponadto oddziałuje z jądrem silnie, a nie tylko elektromagnetycznie. Dąży się tu do precyzyjnego określenia efektów oddziaływania silnego poprzez badanie przesunięcia i poszerzenia linii widmowych.

Najczulszym układem do tych pomiarów jest protonium, ponieważ nie występują w nim zaburzenia pochodzące od innych nukleonów czy elektronów. Gdy antyproton zostanie już wychwycony przez atom, będzie on schodził na coraz niższe poziomy energetyczne, aż funkcja falowa nałoży się na jądro, doprowadzając do anihilacji na jego powierzchni. Proces ten otwiera możliwość badania zarówno anihilacji jednonukleonowej, jak i wielonukleonowej (tzw. procesów Pontecorva), a także wytwarzania jąder i izotopów, które mogą być trudne do uzyskania metodami alternatywnymi, takimi jak reaktory czy akceleratory [8].

Udział grup polskich jest szczególnie istotny w dwóch eksperymentach fabryki antymaterii: GBAR i AEgIS. W pierwszym z nich grupa z NCBJ przyczyniła się do budowy układu produkcji pozytonów o dużym natężeniu. W przypadku AEgIS udział koordynowany jest poprzez Konsorcjum AEgIS-PL, którego członkami są Uniwersytet Jagielloński, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytet Mikołaja Kopernika i Politechnika Warszawska. Grupy te wnoszą wkład na wszystkich poziomach eksperymentu: od budowy źródła jonów i spektroskopii (UMK), przez wsparcie w zakresie teorii oddziaływania antymaterii z materią (IF PAN), fizykę pozytonium oraz detekcję cząstek z wykorzystaniem scyntylatorów (UJ), nowy system sterowania oparty na oprogramowaniu Sinara/ARTIQ, aż po koordynację techniczną eksperymentu (PW). Warto zaznaczyć, że elektronika systemu sterowania tego eksperymentu została zaprojektowana i wyprodukowana w Polsce i jest tą samą, której używa się w wielu światowych laboratoriach pracujących z pułapkami jonowymi.



Rys. 9. Widmo czasu przelotu (TOF) uzyskane po zmieszaniu antyprotonów z Ar i He w eksperymencie AEgIS. Każdy pik został zidentyfikowany na podstawie stosunku m/Q wyznaczonego na podstawie zmierzonego czasu przelotu (TOF) dla piku He^{1+}. Sygnał od wysoko naładowanych jonów (HCl) jest spodziewany w okolicach 8 μs. Wyniki opublikowano w AEgIS Collaboration, Phys. Rev. Res. 8 (2026) 023202.

Jednym z najważniejszych wyników ostatnich badań jest potwierdzenie tworzenia atomów antyprotonowych w pułapkach elektromagnetycznych — zmierzono wysoko naładowane jony argonu w eksperymencie dotyczącym oddziaływania antyprotonów z gazem argonowym o bardzo niskiej gęstości, co przedstawiono na rys. 9.

***

Badania antymaterii, a w szczególności oddziaływań między materią a antymaterią, pozostają jednym z kluczowych, aktualnych i fascynujących problemów w fizyce. Jak to zwykle bywa, im więcej się o niej dowiadujemy, tym więcej nowych pytań antymateria przed nami stawia. Wyjątkowe narzędzia badawcze, jakimi są zderzacze ciężkich jonów, takie jak RHIC i LHC, oraz działające przy nich eksperymenty, takie jak STAR i ALICE, pozwalają nam zmierzyć się z tymi pytaniami i uzyskiwać nowe, ciekawe odpowiedzi. Polscy fizycy mają w tych badaniach swój znaczący udział i będą te działania kontynuować przez kolejne dekady.

Równolegle inne eksperymenty badają „zimną" antymaterię (lub wykorzystują ją), próbując odpowiedzieć na fundamentalne pytania, które postawiła przed nami fizyka współczesna. Przewiduje się, że będą one kontynuowane w nadchodzących dekadach, stopniowo zwiększając swoją precyzję i liczbę badanych układów. Być może w przyszłości oprócz antyprotonów uda się wytwarzać i gromadzić także antydeuterony, co otworzyłoby drogę do fuzji antyjąder i pozwoliło zbadać czy istnieją jakieś różnice w procesach jądrowych, w których biorą udział również antyneutrony.

AUTORZY

Prof. dr hab. inż. **Adam Kisiel** (ORCID: 0000-0001-8322-9510) jest profesorem Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują fizykę jądrową wysokich energii, zderzenia ciężkich jonów, femtoskopię korelacyjną, oddziaływania hadronów oraz badania własności materii i antymaterii w eksperymentach prowadzonych m.in. przy akceleratorach RHIC i LHC.

Dr hab. **Georgy Kornakov** (ORCID: 0000-0002-3652-6683) jest profesorem uczelni Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują fizykę zderzeń ciężkich jonów, oddziaływania hadronów, własności antymaterii, femtoskopię korelacyjną oraz analizę danych z eksperymentów wysokich energii prowadzonych m.in. w CERN-ie.

Badania były finansowane ze środków programu Uczelnia Badawcza – Inicjatywa Doskonałości Politechniki Warszawskiej, w ramach funduszy strategicznych Priorytetowego Obszaru Badawczego Fizyki Wysokich Energii i Technik Eksperymentalnych, przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie umów nr 2022/45/B/ST2/02029 oraz 2022/46/E/ST2/00255 oraz przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umów nr 2022/WK/06 i 2022/WK/01.

Zdjęcie na okładce: Wnętrze pułapki Penninga–Malmberga eksperymentu AEgIS, działającej w polu magnetycznym o indukcji 1 T (2024). Widok wzdłuż osi wiązki, zgodnie z kierunkiem ruchu antyprotonów i pozytonów. W centralnej części elektrody końcowej znajduje się nanokanałowy konwerter o wymiarach 5 mm × 5 mm, przekształcający pozytony w pozytonium i zamocowany w specjalnie zaprojektowanym uchwycie tarczy. W głębi, za zespołem tarczy, widoczne są siatki jonizacyjne wytwarzające regulowane pola elektryczne, wykorzystywane do selektywnej jonizacji polowej rydbergowskich atomów antywodoru przed ich detekcją.

8 G. Kornakov i in., Physical Review C 107 (2023) 034314, DOI: 10.1103/PhysRevC.107.034314