

# WIOSNA W CERN: NOWY ETAP EKSPERYMENTÓW, NOWE WYNIKI

## *Spring at CERN: a new stage of experiments, new results*

Małgorzata Nowina Konopka

**Streszczenie:** CERN – Europejskie Centrum Badań Jądrowych – największe na świecie laboratorium fizyki cząstek obsługuje sieć siedmiu akceleratorów. Największy z nich LHC (Wielki Zderzacz Hadronów) rozpoczął skuteczne działanie w listopadzie 2009 r. Po intensywnym zbieraniu danych, związanym z odkryciem bozonu Higgsa, LHC przechodził pierwszy dwuletni (2013-2015) okres przestoju, w celu osiągnięcia pełnej świetlności przy energii 14 TeV między innymi przez wzmocnienie urządzeń elektrycznych łączących magnesy. Ponownie został wyłączony na ponad trzy lata od grudnia 2018 r. do kwietnia 2022, aby wprowadzić w obiekcie kolejne ulepszenia i aktualizacje. W czasie przerw opracowywano dane zebrane z eksperymentów ATLAS, CMS, LHCb i ALICE oraz prowadzono zderzenia na innych niż LHC akceleratorach i urządzeniach jak np. AMS czy ASACUSA. W artykule przedstawiono najnowsze wyniki tych obliczeń i eksperymentów opublikowane w czasopiśmie Nature.

**Abstract:** CERN - The European Nuclear Research Center – the world's largest particle physics laboratory is operated by a network of seven accelerators. The largest of these, the LHC (Large Hadron Collider), started operating effectively in November 2009. After extensive data collection related to the discovery of the Higgs boson, the LHC went through the first two-year (2013-2015) downtime to achieve full luminosity at 14 TeV inter alia by strengthening the electrical devices that connect the magnets. It has been shut down again for over three years from December 2018 through April 2022 to bring further improvements and updates to the facility. During the breaks, data collected from the ATLAS, CMS, LHCb and ALICE experiments was processed, and collisions were carried out on accelerators and devices other than LHC, such as for example AMS or ASACUSA. This paper presents the latest results from these calculations and experiments published in the journal Nature.

**Słowa kluczowe:** kwarki, gluony, partony, dżety, antymateria, hybryda materii z antymaterią

**Keywords:** quarks, gluons, partons, jets, antimatter, a hybrid of matter and antimatter

### **Ponowne uruchomienie Wielkiego Zderzacza Hadronów**

Największy i najpotężniejszy na świecie akcelerator cząstek został ponownie uruchomiony po ponad trzyletniej przerwie na konserwację, konsolidację i prace modernizacyjne. Dnia **22 kwietnia**, o godzinie 12:16 CEST, dwie wiązki protonów krążyły w przeciwnych kierunkach wokół 27-kilometrowego pierścienia Wielkiego Zderzacza Hadronów z energią wtrysku 450 miliardów elektronowoltów (450 GeV).

„Wiązki krążące z energią wtrysku zawierały stosunkowo niewielką liczbę protonów. Zderzenia o dużej intensywności i dużej energii będą realizowane za kilka miesięcy” – mówi Rhodri Jones, kierownik Departamentu Wiązek w CERN – „Ale pierwsze wiązki oznaczają udane ponowne uruchomienie akceleratora po całej ciężkiej pracy długiego przestoju”.

„Maszyny i urządzenia przeszły poważne modernizacje podczas drugiego długiego przestoju kompleksu akceleratorów CERN” – mówi dyrektor CERN ds. Akceleratorów i Technologii, Mike Lamont – „Sam wielki zderzacz LHC przeszedł szeroko zakrojony program konsolidacji i będzie teraz działał z jeszcze wyższą energią, a dzięki znacznym ulepszeniom w kompleksie wtryski-

waczy dostarczy znacznie więcej danych do zmodernizowanych eksperymentów LHC”.

Wiązki pilotażowe krążyły już w LHC przez krótki okres w październiku 2021 r. Jednak te, które krążyły dzisiaj, oznaczają nie tylko koniec drugiego długiego wyłączenia LHC, ale także początek przygotowań do czterech lat zbierania danych fizycznych, co planujemy, że rozpocznie się tego lata.

Do tego czasu eksperci LHC będą pracować przez całą dobę, aby stopniowo ponownie uruchamiać maszynę i bezpiecznie zwiększać energię i intensywność wiązek przed dostarczeniem zderzeń do eksperymentów przy rekordowej energii 13,6 biliona elektronowoltów (13,6 TeV).

W trzecim przebiegu LHC, zwanym Run 3, eksperymenty maszyny zbierają dane z kolizji nie tylko przy rekordowej energii, ale także w niezrównanej liczbie. Eksperymenty ATLAS i CMS mogą spodziewać się podczas tego przebiegu większej liczby zderzeń niż w dwóch poprzednich wersjach łącznie, natomiast eksperyment LHCb, który przeszedł całkowitą modernizację podczas wyłączenia, może mieć nadzieję, że liczba zderzeń wzrośnie trzykrotnie. Tymczasem ALICE, detektor wyspecjalizowany do badania zderzeń ciężkich jonów, dzięki niedawnemu zakończeniu ważnej modernizacji,

może spodziewać się aż pięćdziesięciokrotnego wzrostu całkowitej liczby zarejestrowanych zderzeń jonów.

Bezprecedensowa liczba zderzeń umożliwi międzynarodowemu zespołowi fizyków w CERN i na całym świecie bardzo szczegółowe zbadanie bozonu Higgsa oraz poddanie Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych i jego różnych rozszerzeń, najbardziej rygorystycznym testom, jakie dotychczas nie zostały przeprowadzone.

Inne zagadnienia, które są planowane w przebiegu Run 3, dotyczą uruchomienia dwóch nowych eksperymentów, FASER i SND@LHC, zaprojektowanych w celu poszukiwania fizyki poza Modelem Standardowym. W tych eksperymentach będą badane specjalne zderzenia proton-hel, aby zmierzyć, jak często w tych zderzeniach powstają antyprotony, czyli odpowiedniki protonów w antimaterii oraz zderzenia z udziałem jonów tlenu, które rozszerzą wiedzę fizyków na temat fizyki promieniowania kosmicznego i plazmy kwarkowo-gluonowej, stanu materii, który istniał wkrótce po Wielkim Wybuchu.

### Eksperyment ALICE dokonuje pierwszej bezpośredniej obserwacji fundamentalnego efektu w fizyce cząstek elementarnych

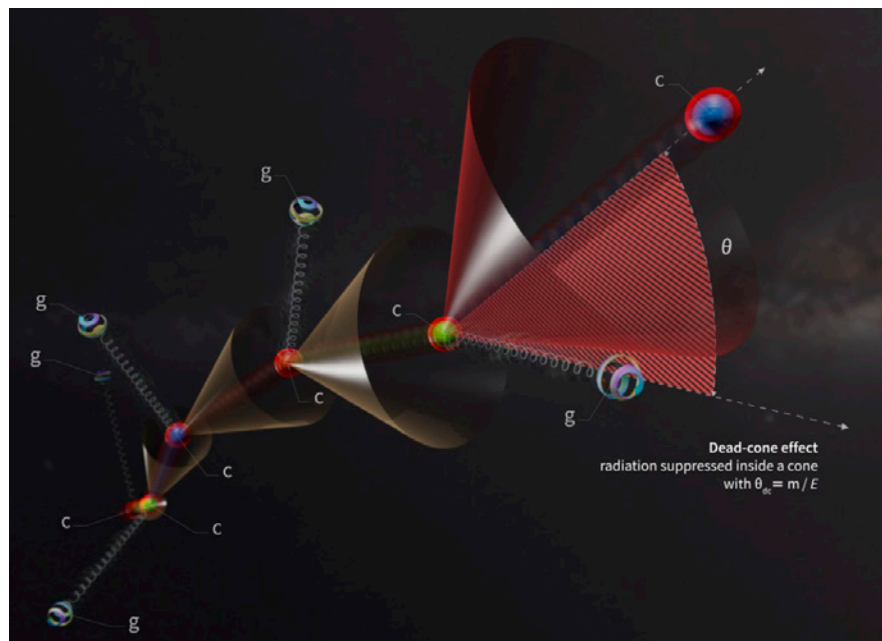
Współpraca ALICE na Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) dokonała pierwszej bezpośredniej obserwacji efektu martwego stożka – fundamentalnej cechy teorii silnego oddziaływania, które wiąże kwarki i gluony razem w protony, neutrony i ostatecznie wszystkie jądra atomowe. Oprócz potwierdzenia tego efektu, obserwacje, opisane w artykule opublikowanym ostatnio w *Nature*, podają bezpośrednią eksperymentalną wartość przyczynku do masy pojedynczego kwarka powabnego, zanim zostanie on zamknięty wewnątrz hadronów.

„Obserwowanie martwego stożka było bardzo trudne” – mówi rzecznik eksperymentu ALICE Luciano Musa – „Ale dzięki wykorzystaniu danych z trzech lat ze zderzeń proton-proton w LHC oraz użyciu zaawansowanych technik analizy danych, w końcu udało nam się to odkryć”.

Kwarki i gluony, zwane łącznie partonami, powstają w zderzeniach cząstek, takich jak te, które mają miejsce

w LHC. Po powstaniu partony przechodzą kaskadę zderzeń zwaną deszczem partonów, w którym tracą energię, emitując promieniowanie w postaci gluonów, które również emitują gluony. Charakterystyka promieniowania takiego pęku zależy od masy partonu emitującego gluon i zachodzi w obszarze wokół kierunku lotu partonu, w którym emisja gluonu jest tłumiona – martwy stożek 1. Przewidywany trzydzieści lat temu na podstawie pierwszych zasad teorii oddziaływań silnych, martwy stożek zaobserwowano pośrednio w zderzacach cząstek. Jednak trudno było zaobserwować go bezpośrednio z wzorca promieniowania kaskady partonowej. Głównym tego powodem jest fakt, że martwy stożek może być wypełniony cząstkami, w które przekształca się emitujący parton oraz że trudno jest określić zmieniający się kierunek partonu w trakcie procesu kaskady.

Uczestnicy projektu ALICE przewyżczyli te wyzwania, stosując najnowocześniejsze techniki analityczne do dużej próbki zderzeń proton-proton w LHC. Techniki te mogą cofnąć w czasie shower (prysznic) partonów od produktów końcowych – sygnałów pozostawionych w detektorze ALICE przez rozpylony strumień cząstek zwany dżetem. Szukając dżetów, które zawierały kwark powabny, naukowcy byli w stanie zidentyfikować dżet stworzony przez ten rodzaj kwarku i prześledzić całą historię emisji gluonów przez kwark. Porównanie prążków emisji gluonów kwarka powabnego z prążkami gluonów i praktycznie bezmasowych kwarków ujawniło martwy stożek jedynie w widmie kwarka powabnego. Wynik



**Fot. 1.** Kwark powabny (c) w pęku partonowym traci energię, emitując promieniowanie w postaci gluonów (g). Pęk ukazuje „martwy stożek” tłumionego promieniowania wokół kwarka dla kątów (theta) mniejszych niż stosunek masy kwarka (m) do energii (E). Energia maleje w każdym etapie pęku. Zmieniający się kolor kwarka ilustruje jego zmieniający się „kolor ładunku” (informacja z 18 maja 2022)

**Photo 1.** The charm quark (c) in the parton bundle loses energy, emitting radiation in the form of gluons (g). The tuft shows the „dead cone” of attenuated radiation around the quark for angles (theta) smaller than the ratio of the quark’s mass (m) to energy (E). The energy decreases with each stage of the bundle. The changing color of a quark illustrates its changing „charge color”

również bezpośrednio określa masę kwarka powabnego, ponieważ teoria przewiduje, że cząstki bezmasowe nie mają odpowiadających im martwych stożków.

„Masy kwarków są podstawowymi wielkościami w fizyce cząstek elementarnych, ale nie można ich uzyskać i zmierzyć bezpośrednio w eksperymentach, ponieważ z wyjątkiem kwarka górnego, kwarki są zamknięte w cząstkach kompozytowych” – wyjaśnia koordynatorka fizyki ALICE, Andrea Dainese – „Nasza skuteczna technika bezpośredniej obserwacji martwego stożka pęku partonów może stanowić metodę pomiaru mas kwarków”.

### LHCb ujawnia tajemnicę powstawania antimaterii w kosmicznych zderzeniach

Na konferencjach Quark Matter i Rencontres de Moriond, współpracownicy LHCb przedstawili analizę zderzeń cząstek w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC), która może pomóc w ustaleniu, czy jakkolwiek antimateria widziana w eksperymentach w kosmosie pochodzi z ciemnej materii, łączącej ze sobą galaktyki, takie jak np. Droga Mleczna.

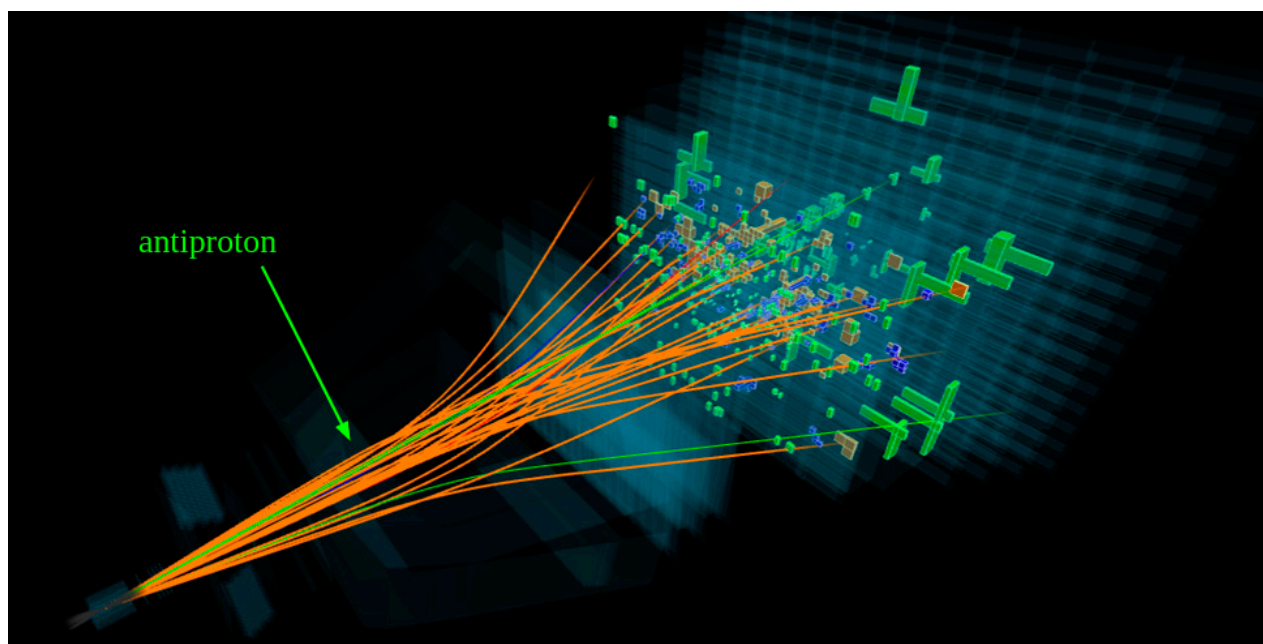
Eksperymenty kosmiczne prowadzono na spektrometrze AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) w CERN, gdzie spektrometr został zmontowany, a od 2011 r. w kosmosie, gdzie zainstalowano go na pokładzie Kosmicznego Wahadłowca Endeavour z NASA stanowiącego Międzynarodową Stację Kosmiczną. W tych eksperymentach zaobserwowano frakcję antyprotonów (czyli odpowiedników protonów w antimaterii) w wysokoenergetycznych cząstkach zwanych promienia-

mi kosmicznymi. Antyprotony mogą powstawać, gdy cząstki ciemnej materii zderzają się ze sobą, ale mogą również powstawać w innych przypadkach, na przykład gdy protony zderzają się z jądrami atomowymi w ośrodku międzygwiazdowym, który składa się głównie z wodoru i helu.

Aby dowiedzieć się, czy którykolwiek z zarejestrowanych antyprotonów pochodzi z ciemnej materii, fizycy muszą zatem oszacować, jak często antyprotony powstają w zderzeniach protonów z wodorem, a jak często w zderzeniach protonów z helem. Wcześniej dokonano zaledwie kilku pomiarów zderzeń protonów z wodorem, a w 2017 r. LHCb zgłosił pierwszy w historii sygnał zderzeń protonów z helem, ale pomiar ten obejmował jedynie szybką produkcję antyprotonów – to znaczy antyprotonów wytwarzanych w miejscu zderzenia.

W swoim nowym badaniu zespół LHCb szukał również antyprotonów wytwarzanych w pewnej odległości od punktu zderzenia, poprzez transformację lub „rozpad” cząstek zwanych antyhiperonami w antyprotony. Aby dokonać tego nowego pomiaru i poprzedniego, badacze LHCb, którzy zwykle wykorzystują do swoich badań dane z kolizji proton-proton, wykorzystali zamiast tego dane z kolizji proton-hel, uzyskane przez wstrzyknięcie gazowego helu do punktu, w którym dwie wiązki protonów z LHC normalnie się zderzają.

Analizując próbkę około 34 milionów zderzeń proton-hel i mierząc stosunek szybkości produkcji antyprotonów z rozpadów antyhiperonów do szybkości wytwarzania antyprotonów, naukowcy z LHCb odkryli, że w skali energii zderzenia antyprotony wytwarzane



**Fot. 2.** Przypadek zderzenia proton-proton zarejestrowany przez detektor LHCb, pokazujący tor, po którym porusza się antyproton powstały podczas zderzenia. (Zdjęcie: LHCb/CERN) (informacja z 7 kwietnia 2022)

**Photo 2.** A proton-proton collision case recorded by an LHCb detector showing the path followed by the antiproton created by the collision. (Photo: LHCb / CERN)



Fot. 3. Masaki Hori, ASACUSA co-spokesperson

Photo 3. Masaki Hori, ASACUSA co-spokesperson (informacja z 16 marca 2022)

przez rozpady antyhiperonów przyczyniają się znacznie bardziej do całkowitego tempa produkcji antyprotonów niż ilość przewidywana przez większość modeli produkcji antyprotonów w zderzeniach proton-jądro.

„Ten wynik uzupełnia nasze poprzednie pomiary szybkiej produkcji antyprotonów i poprawi prognozy modeli” – mówi rzecznik LHCb, Chris Parkes – „To ulepszenie może z kolei pomóc eksperymentom kosmicznym znaleźć dowody na istnienie ciemnej materii”.

„Nasza technika wstrzykiwania gazu do punktu zderzenia LHCb została pierwotnie stworzona do pomiaru wielkości wiązek protonów” – mówi koordynator fizyki LHCb, Niels Tuning – „Naprawdę miło znów zobaczyć, że wzbogaca to również naszą wiedzę o tym, jak często antimateria powinna powstawać w kosmicznych zderzeniach protonów z jądrami atomowymi”.

### **ASACUSA dostrzega zaskakujące zachowanie hybrydowej materii – atomów antimaterii w nadciełym helu**

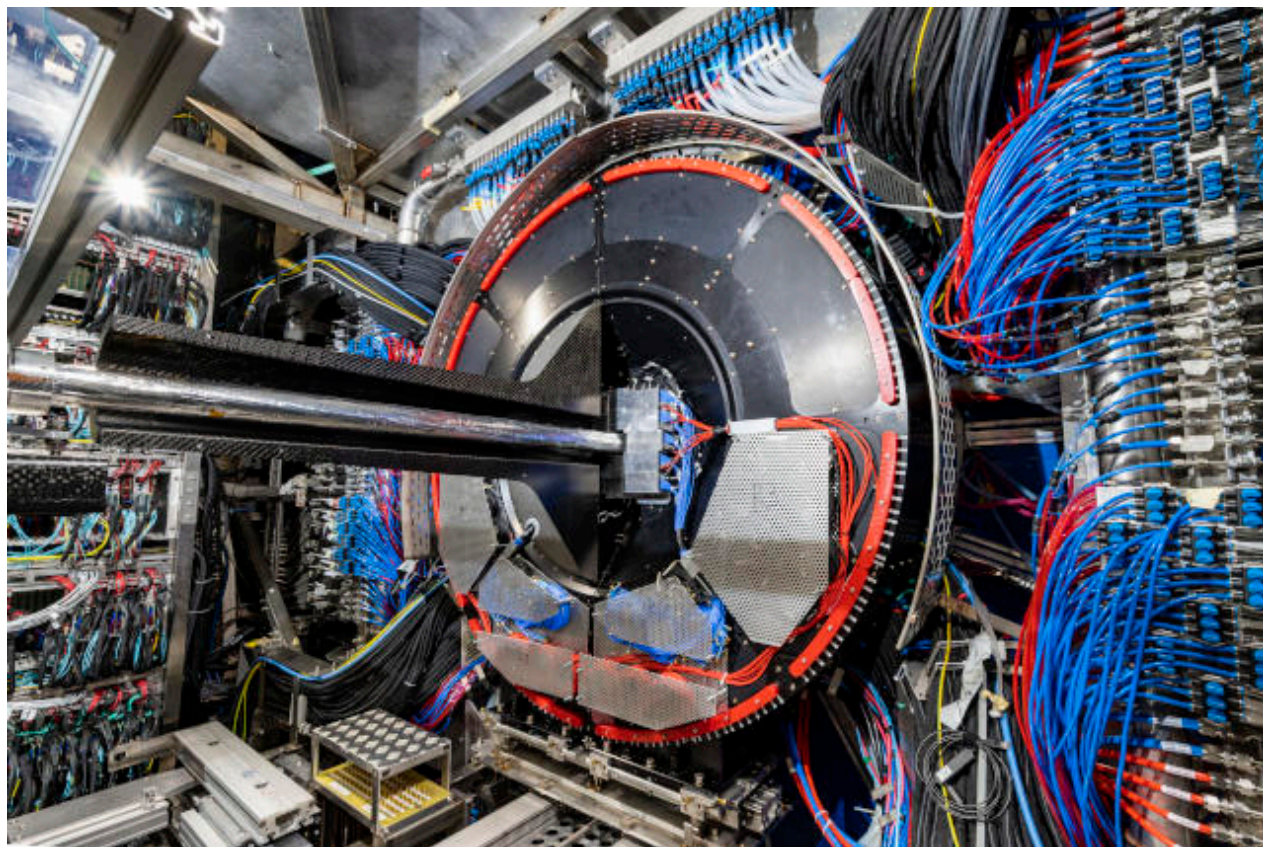
Zespół współpracy ASACUSA w CERN badał hybrydę materii z antimaterią helu. Zaobserwowano nieoczekiwaną reakcję mieszaniny na światło laserowe. Wynik, opisany w artykule opublikowanym w czasopi-

śmie Nature, otwiera szerokie perspektywy dla kilku kierunków badań.

„Nasze badanie sugeruje, że hybrydowe atomy helu materia-antymateria mogą być wykorzystywane poza fizyką cząstek elementarnych, w szczególności w fizyce materii skondensowanej, a być może nawet w eksperymentach astrofizycznych” – mówi rzecznik współpracy ASACUSA Masaki Hori – „Prawdopodobnie zrobiliśmy pierwszy krok w wykorzystaniu antyprotonów do badania materii skondensowanej”.

Współpraca ASACUSA tworzy i bada helową hybrydę atomów materia-antymateria w celu określenia masy antyprotonu i porównania jej z masą protonu. Na orbicie atomów hybrydowych wokół jądra helu zamiast dwóch elektronów krąży antyproton i elektron. Takie hybrydy są wytwarzane przez zmieszanie antyprotonów, produkowanych w fabryce antimaterii CERN, z gazowym helu o niskiej gęstości atomowej, utrzymanym w niskiej temperaturze.

Zarówno niskie gęstości gazu jak i niskie temperatury odgrywają kluczową rolę w badaniach antimaterii, polegających na pomiarze reakcji atomów hybrydowych na światło laserowe w celu określenia ich widma światła. Przy wysokich gęstościach gazu i wysokich temperaturach linie widmowe powstające wskutek



**Fot. 4.** Detektor Alice: instalacja FIT (wyzwalacza/trigera szybkiej interakcji)  
**Phot. 4.** Detector Alice: FIT (Fast Interaction Trigger) installation

przejść antyprotonu lub elektronu między poziomami energii, są zbyt szerokie lub rozmyte, co utrudnia a nawet uniemożliwia określenie masy antyprotonu w stosunku do masy elektronu.

Dlatego badacze ASACUSA byli zaskoczeni, gdy okazało się, że użycie ciekłego helu, który ma znacznie większą gęstość niż hel gazowy, spowodowało zmniejszenie szerokości linii spektralnych antyprotonów. Co więcej, gdy obniżyli temperaturę ciekłego helu do wartości poniżej temperatury, w której ciecz staje się nadciekłą, czyli płynie bez oporów, stwierdzili gwałtowne dalsze zwężenie linii widmowych.

„To zachowanie było nieoczekiwane” – mówi Anna Sótér, która była główną doktorantką pracującą nad eksperymentem, a obecnie jest adiunktem w ETHZ – „Odpowiedź optyczna hybrydowego atomu helu w nadciekłym helu jest wyraźnie różna od odpowiedzi tego samego hybrydowego atomu w gazowym helu o dużej gęstości, a także wielu normalnych atomów w substancjach ciekłych lub nadciekłych”.

Naukowcy uważają, że obserwowane zaskakujące zachowanie jest związane z promieniem orbitalu elektronowego, czyli odległością pomiędzy jądrem atomu a elektronami. W przeciwieństwie do wielu normalnych atomów, promień orbity elektronowej atomu hybrydowego zmienia się bardzo nieznacznie, gdy światło lase-

ra pada na atom, a zatem nie wpływa na linie widmowe, nawet gdy atom jest zanurzony w nadciekłym helu. Jednak potrzebne są dalsze badania, aby potwierdzić tę hipotezę.

Wynik ma kilka konsekwencji. Po pierwsze, sugeruje możliwość stworzenia innych hybrydowych atomów helu, na przykład z pionami zamiast jednego elektronu na orbicie, zanurzonych w nadciekłym helu a następnie badania ich reakcji na światło laserowe w celu zmierzenia masy cząstek. Po drugie, znaczne zwężenie linii w nadciekłym helu sugeruje, że hybrydowe atomy helu można wykorzystać do badania tej formy materii i potencjalnie innych faz materii skondensowanej. Wreszcie, wąskie linie widmowe mogłyby w zasadzie zostać wykorzystane do poszukiwania kosmicznych antyprotonów lub antydeuteronów (jądra zbudowanego z antyprotonu i antyneutronu) o szczególnie małej prędkości, które uderzają w ciekły lub nadciekły hel, używany do chłodzenia eksperymentów w kosmosie lub w balony latające na dużych wysokościach. Zanim metoda stanie się komplementarna do istniejących technik poszukiwania tych form antimaterii jeszcze trzeba pokonać wiele wyzwań technicznych.

*dr Małgorzata Nowina Konopka,  
Kraków*