

NIECH CI FIZYKA NIE UMYKA

Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego

Polskiej Akademii Nauk

(IFJ PAN)



Lipiec 2020

NIECH CI FIZYKA NIE UMYKA

**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
(IFJ PAN)**

NIECH CI FIZYKA NIE UMYKA

Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
(IFJ PAN)



Lipiec 2020

WYDAWCA

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN

COPYRIGHT

*Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN
Kraków 2020*

ZDJĘCIA

Archiwum IFJ PAN

ISBN 978-83-63542-19-1

Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

SPIS TREŚCI

WSTĘP

Niech Ci fizyka nie umyka.....	9
--------------------------------	---

O INSTYTUCIE FIZYKI JĄDROWEJ IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK W KRAKOWIE

Informacje o IFJ PAN.....	13
---------------------------	----

POSZUKIWANIE NOWYCH ZJAWISK W ŚWIECIE CZĄSTEK ELEMENTARNYCH

Elektrycznie naładowany Higgs versus fizycy: do przerwy 1:0.....	17
Kosmiczna inflacja: Higgs żegna się ze swoim „mniejszym bratem”.....	20
Kolejny przebój akceleratora LHC – mamy naprawdę dobry zwiastun!.....	23
Najdokładniejszy pomiar rzadkiego rozpadu mezonów potwierdza współczesną fizykę.....	26
Potencjalne zwiastuny „nowej fizyki” nie chcą zniknąć.....	29
Negatyw, lecz nie doskonały: Pierwszy ślad różnic między materią a „zwykłą” antymaterią.....	32
„Nowa fizyka” powabnie nam umyka.....	35
GAMBIT zawęży kryjówki „nowej fizyki”.....	37
Jak rodzą się hadrony przy ogromnych energiach dostępnych w LHC?.....	40
Asymetria w produkcji materii i antymaterii może zaburzać detekcję neutrin.....	43
Zderzenia fotonów: Jest realna szansa na świetlny bilard!.....	46
W LHC powabne bliźniaki wkrótce zdominują jedyneków.....	49
Poszukiwania ciemnej materii: Kurczą się kryjówki dla aksjonów.....	52

NA TROPIE ZAGADEK KOSMOSU

W centrum naszej Galaktyki odkryto źródło przyspieszające cząstki promieniowania kosmicznego do niespotykanej energii.....	57
Bliskie pulsary rozjaśniają antymaterialną zagadkę.....	60
HAWC: Mikrokwazar SS 433 odsłania naturę najjaśniejszych latarni Wszechświata.....	63
CREDO: I ty możesz pomóc odsłonić najgłębsze zagadki Wszechświata.....	66

ODŚLANIANIE TAJEMNIC JĄDRA ATOMOWEGO

Najbardziej egzotyczny płyn ma nieoczekiwanie małą lepkość.....	73
Gdy płyn płynie niemal tak szybko jak światło – i kwantowo wiruje.....	75
W zderzeniach jąder atomowych tworzą się „ogniste smugi”.....	78
Rosną szanse na wykrycie „grudek” w jądrach atomowych.....	81
Znaleziono najlżejsze superzdeformowane trójosiowe jądro atomowe.....	83
Podwójnie magiczne jądro ołowiu 208 – wiruje, a nie powinno!.....	86
Pierwsze lekkie jądro atomowe z drugą twarzą.....	89
Nuklearny surfing: Zaobserwowano, jak protony „łapią fale” na powierzchni jąder atomowych.....	92

MATERIAŁY I TECHNOLOGIE Z PRZYSZŁOŚCIĄ

Rewolucja w bateriach litowo-jonowych coraz bardziej realna.....	97
Nanoinżynieria fononowa: Nowo odkryte drgania nanowyp efektywniej rozproszą ciepło	100
Gdy ciepło przestaje być zagadką, spintronika staje się realniejsza.....	103
Antymateria pomaga w odkrywaniu tajemnic ciekłych kryształów	106

WSZĘDOBYLSKA FIZYKA

Chaos rządzi nawet prostą elektroniką	111
Od podłóg katedr po układy tranzystorowe: wspaniały potencjał generatywny trójkąta Sierpińskiego.....	115
Geneza kształtu: Nie ma magii w synchronizacji na odległość	119
Czas na hiperkrach, mówią multifraktalne analizy głównego indeksu giełdowego.....	122
Bitcoin lepszy od dolara?.....	125
Jakimi sieciami strumieni płyną naukowe idee?.....	128
W słynnych dziełach literackich widać multifraktale i kaskady świadomości	132
Kluczowa rola pomijanego składnika języka i literatury	136

BADAJĄC FUNDAMENTY RZECZYWISTOŚCI FIZYCZNEJ

Czasoprzestrzeń – twór dobrze znanych aktorów?.....	141
I kwantowe, i klasyczne – stany z pogranicza światów.....	144

DZIAŁALNOŚĆ POPULARYZATORSKA I OBECNOŚĆ IFJ PAN W MEDIACH

Działalność popularyzatorska	149
Media informacyjne i społecznościowe	156
Niech Ci fizyka nie umyka.....	157

WSTĘP



NIECH CI FIZYKA NIE UMYKA

Jesteśmy nieustannie bombardowani strumieniami informacji. Dotyczy to także nowych faktów z dziedziny nauki – ich liczba narasta lawinowo. Tę broszurę przygotowaliśmy specjalnie dla Ciebie po to, by w przystępnej i zwięzłej formie, niejako „w pigułce”, pokazać Ci szereg ciekawych wyników pracy naszych Koleżanek i Kolegów z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

Zobaczysz, że nauka, w tym przypadku fizyka, jest nie tylko atrakcyjna, ale łatwo staje się fascynującą przygodą. Co więcej, może ona w sposób jakościowy przemieniać nasze życie, o czym świadczy choćby rozpowszechnienie się internetu, który powstał z potrzeby komunikowania się w środowisku fizyków. Taka ciekawa i nowoczesna nauka nie zna granic geograficznych i międzyludzkich, a z ogromnym powodzeniem uprawiamy ją także w Polsce, w szczególności w Instytucie Fizyki Jądrowej imienia Henryka Niewodniczańskiego, największym instytucie naukowym Polskiej Akademii Nauk. W IFJ PAN szczerzymy się tym, że pracując niekiedy w dużych, międzynarodowych zespołach badawczych, równocześnie jesteśmy dobrze znani jako część lokalnej i ogólnopolskiej społeczności. Liczni goście naszych serwisów www bardzo często czytają doniesienia popularyzatorskie, które od roku 2015 systematycznie publikujemy, a które następnie trafiają do internetowego serwisu EurekaAlert! prowadzonego przez Amerykańskie Stowarzyszenie Rozwoju Nauki (AAAS).

W trosce, by nie umknęła Ci drogi Czytelniku, żadna nowinka dotycząca nowoczesnej fizyki, zapraszamy do lektury doniesień lat 2016–2018.

Komitet Redakcyjny

**O INSTYTUCIE
FIZYKI JĄDROWEJ**

**IM. HENRYKA
NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK
W KRAKOWIE**



INFORMACJE O IFJ PAN

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego (IFJ PAN) jest największym instytutem Polskiej Akademii Nauk, posiadającym od roku 2014 kategorię A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich. Jest to najwyższa kategoria naukowa, przyznana Instytutowi przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, aktualnie, już po raz drugi. Instytut, jako członek Krakowskiego Konsorcjum Naukowego im. Mariana Smoluchowskiego, „Materia – Energia – Przyszłość” uzyskał także status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017.

W 2017 roku Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”.

Instytut prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Korzystając z najnowszych osiągnięć technologii i informatyki w IFJ PAN, prowadzone są badania struktury materii i własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. W dziedzinie badań podstawowych, stanowiących główne zadanie Instytutu, teoretyczne i eksperymentalne prace badawcze prowadzone są w czterech głównych kierunkach:

- fizyki i astrofizyki cząstek elementarnych,
- fizyki jądrowej i oddziaływań silnych,
- fizyki materii skondensowanej (w tym nano-materiałów),
- zagadnień interdyscyplinarnych, w tym fizyki medycznej, radioterapii chorób nowotworowych ze szczególnym uwzględnieniem protonoterapii, fizyki i technologii fuzji termojądrowej, geofizyki, radiochemii, dozymetrii, biologii radiacyjnej i środowiskowej, fizyki i ochrony środowiska, jak też badania systemów złożonych takich jak mózg ludzki, rynki finansowe czy lingwistyka.

Przeważającą część badań prowadzonych w Instytucie realizowana jest we współpracy z czołowymi ośrodkami badawczymi w kraju i za granicą, tak uniwersyteckimi, jak i z jednostkami badawczymi. Nasi fizycy i inżynierowie aktywnie uczestniczą w pracach przy budowie, obsłudze i modernizacji eksperymentów i wielkich międzynarodowych infrastruktur badawczych, takich jak Large Hadron Collider (LHC, CERN, Genewa; eksperymenty ALICE, ATLAS i LHCb), Europejski Laser na Swobodnych Elektronach (E-XFEL, Hamburg), European Spallation Source ERIC (ESS ERIC, Lund, Szwecja), Système de Production d’Ions Radioactifs Accélérés en Ligne (SPIRAL2, GANIL, Caen, Francja), Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR, Darmstadt), Cherenkov Telescope Array (CTA), Pierre Auger Observatory (Argentyna), International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER, Cadarache, Francja) oraz Belle2 (KEK, Tsukuba, Japonia).

Instytut dysponuje urządzeniami badawczymi dostępnymi dla środowiska naukowego polskiego i zagranicznego. Posiadamy między innymi klastery aparaturowy pn. „Środowiskowa infrastruktura badawcza IFJ PAN dla badań interdyscyplinarnych”, mający status Specjalnego Urządzenia Badawczego.

Wiele z projektów i przedsięwzięć Instytutu jest również wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej, która ma za zadanie przedstawienie faktycznego potencjału polskiej nauki i wytypowanie najlepszych, najbardziej wartościowych przedsięwzięć naukowych opartych na najbardziej doskonałej aparaturze składającej się finalnie na szeroko rozumianą infrastrukturę badawczą.

Chlubą Instytutu jest wybudowany z wykorzystaniem środków europejskich, uruchomiony i wdrożony do użytku w latach 2013-2016, na bazie izochronicznego cyklotronu Proteus 235, nowoczesny ośrodek przeznaczony do celów medycznych i do badań naukowych – Centrum Cyklotronowe Bronowice (CCB). Od listopada 2016 r., w tym jedynym tego typu ośrodku w Polsce prowadzona jest terapia protonowa guzów nowotworowych, finansowana przez Narodowy Fundusz Zdrowia. Radioterapia protonowa uznawana jest za najbardziej precyzyjną formę radioterapii, maksymalnie oszczędzającą zdrowe tkanki. W Centrum Cyklotronowym Bronowice prowadzone są także międzynarodowe eksperymenty z fizyki jądrowej oraz badania z fizyki medycznej i radiobiologii.

Kadrę Instytutu stanowi ponad 550 osób, w tym: 33 profesorów tytularnych, 82 doktorów habilitowanych, 104 doktorów, a także z górą 120-osobowy zespół wysoko wykwalifikowanych inżynierów i techników.

Rada Naukowa Instytutu posiada uprawnienia do nadawania stopni naukowych doktora i doktora habilitowanego nauk fizycznych. Aktualnie na studiach doktoranckich kształcimy ponad 70 osób w ramach Międzynarodowego Studium Doktoranckiego IFJ PAN oraz Interdyscyplinarnych Środowiskowych Studiów Doktoranckich „FCB” oraz „InterDokMed” prowadzonych od 2017 w ramach programu POWER wspólnie przez konsorcja krakowskich uczelni (AGH oraz UJ) i instytutów PAN: Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera PAN (IKiFP PAN), Instytutu Farmakologii im. Jerzego Maja PAN (IF PAN) oraz IFJ PAN. W roku akademickim 2019/2020 rozpoczęła działalność Krakowska Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska obejmująca doktorantów z następujących jednostek naukowych: IFJ PAN, IKiFP PAN, IF PAN, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego PAN (IMIM PAN), Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH oraz Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH.

Wyniki naszych badań publikujemy rocznie w około 600 artykułach w recenzowanych, wysoko punktowanych czasopismach naukowych oraz w ponad 100 publikacjach innego rodzaju: monografiach, doniesieniach konferencyjnych oraz raportach. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych.

W Instytucie działają cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe świadczące usługi pomiarów dozymetrycznych dawek indywidualnych osób narażonych zawodowo na promieniowanie jonizujące dla około 10 tysięcy klientów z całej Polski, oceny radioaktywności w próbach środowiskowych i materiałowych oraz testowania aparatów RTG i wzorcowania urządzeń dozymetrycznych.



**POSZUKIWANIE
NOWYCH ZJAWISK
W ŚWIECIE CZĄSTEK
ELEMENTARNYCH**



ELEKTRYCZNIE NAŁADOWANY HIGGS VERSUS FIZYCY: DO PRZERWY 1:0

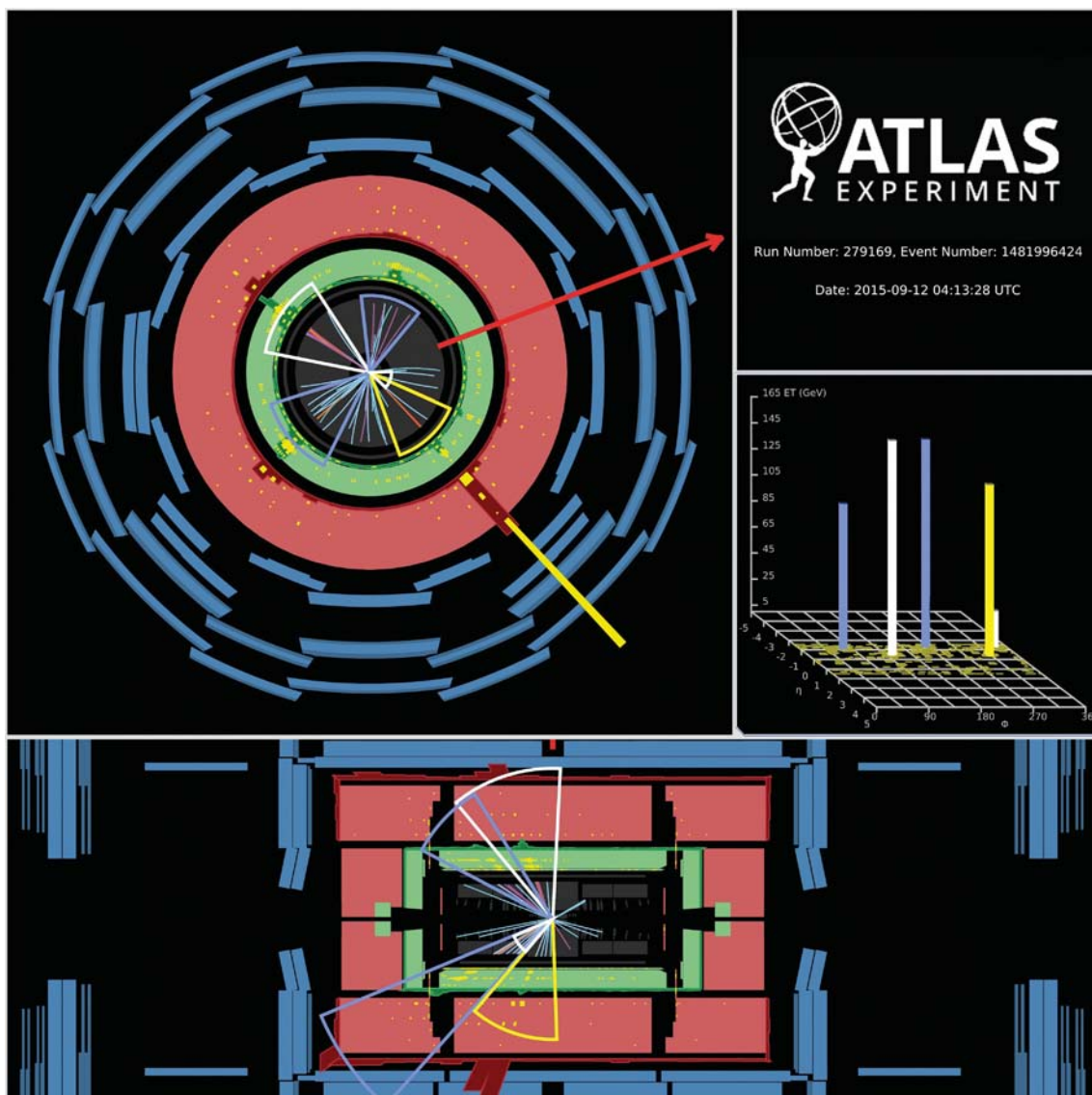
W 2012 roku w Wielkim Zderzaczu Hadronów odkryto bozon Higgosa, ostatnią brakującą cząstkę Modelu Standardowego. Od tego czasu trwają poszukiwania nowych, spokrewnionych z nim cząstek, przewidywanych przez różne teorie wychodzące poza znaną fizykę. W gronie faworytów do zaobserwowania wymienia się zwłaszcza bozony Higgosa z dodatnim lub ujemnym ładunkiem elektrycznym. Czy jednak cząstki te naprawdę istnieją?

W akceleratorze LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN pod Genewą właśnie zakończył się drugi cykl zderzeń i gromadzenia danych o powstających tu cząstkach i inicjowanych przez nie rozpadach. Nadchodzącą dwuletnią przerwę przeznaczono na prace konserwacyjne i modernizację urządzenia. Tymczasem fizycy intensywnie analizują dane z właśnie zakończonego cyklu. Badania koncentrują się przede wszystkim na poszukiwaniu cząstek elementarnych spoza obszaru znanej fizyki, takich jak naładowany elektrycznie bozon Higgosa. Najnowszą analizę w tym zakresie przeprowadził międzynarodowy zespół fizyków działający w ramach eksperymentu ATLAS. W skład grupy wchodził badacz z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz pięciu innych instytucji rozsiadanych po całym świecie.

„Model Standardowy to złożona konstrukcja teoretyczna, ze znakomitą dokładnością opisująca wszystkie dotychczas poznane cząstki elementarne. Wiemy jednak, że działa on dobrze tylko dla eksperymentalnie dostępnych energii. Przy odpowiednio wysokich energiach przewidywania Modelu się załamują i stąd wynika potrzeba opracowania nowego, szerszego opisu, tak zwanej nowej fizyki”, mówi dr hab. Paweł Brückman (IFJ PAN) i przypomina, że podobne cechy wykazuje na przykład mechanika klasyczna. Gdy energia ruchu ciał nie jest zbyt duża, radzi sobie ona świetnie z opisem rzeczywistości. Gdy jednak prędkość ciał staje się porównywalna z prędkością światła, fizyka newtonowska musi ustąpić miejsca teoriom relatywistycznym.

Odkryty w 2012 roku przez eksperymenty ATLAS i CMS neutralny bozon Higgosa potwierdził istnienie mechanizmu niezbędnego dla poprawności Modelu Standardowego. Fizycy mają jednak świadomość, że cząstka ta może być zaledwie częścią szerszego sektora Higgosa, obecnego w większości teorii wykraczających poza współczesną fizykę cząstek. W najpopularniejszych odmianach teorii supersymetrycznych (zakładających, że każdej znanej cząstce odpowiada bardziej masywny partner w postaci supercząstki) bozonów Higgosa jest pięć. Trzy z nich, w tym standardowy, są elektrycznie obojętne, podczas gdy pozostałe dwa są naładowane elektrycznie (ujemnie i dodatnio).

„Przeglądaliśmy bardzo szeroki zakres mas. Masa protonu, czyli jądra wodoru, to około jednego gigaelektronowolta. Z kolei masa kwarku t, najbardziej masywnej z do tej pory odkrytych cząstek elementarnych,



18

Jeśli naładowany elektrycznie bozon Higgsa istnieje, nie zostało mu już wiele miejsc, w których mógłby się skrywać. Grafika przedstawia jedno ze zderzeń objętych najnowszą analizą, z czterema dżetami (stożki białe i niebieskie) oraz zaznaczonym kierunkiem brakującego pędu (czerwona strzałka). (Źródło: ATLAS Collaboration, CERN, IFJ PAN).

to 173 gigaelektronowolty. My szukaliśmy śladów istnienia naładowanego higgsa w zakresie mas od 90 gigaelektronowoltów aż do 2000 gigaelektronowoltów”, wyjaśnia doktorantka Marzieh Bahmani (IFJ PAN).

Zespół, w którym uczestniczyli krakowscy badacze, skoncentrował się na tych przypadkach zderzeń kwarków i gluonów, w których naładowany bozon Higgsa byłby produkowany wspólnie z kwarkiem t , a następnie rozpadał się na taon (znacznie masywniejszy odpowiednik elektronu) i stowarzyszone z nim neutrino (taonowe). W takich przypadkach emitowanych jest kilka neutrin. Cząstki te tak słabo oddziałują z materią, że są niewidoczne dla detektorów. Dlatego w selekcji poszukiwanych rozpadów istotną rolę odgrywała ilość brakującej energii, którą unosiłyby neutrina.

Na potrzeby analizy polscy badacze, finansowani z grantu OPUS Narodowego Centrum Nauki, rozwijali i optymalizowali technikę dyskryminacji wielu zmiennych. Zgodnie z nazwą, technika ta na podstawie wielu starannie wybranych zmiennych i korelacji między nimi umożliwia rozróżnienie poszukiwanego sygnału od przytłaczającego tła.

„W ramach obecnej czułości możemy z pewnością sięgającą 95% powiedzieć, że w poszukiwanym zakresie mas nie widać naładowanych bozonów Higgsa. To bardzo silne ograniczenie. Zamierzamy je jeszcze poprawić w kolejnym podejściu, uwzględniającym wszystkie dane z właśnie zakończonego cyklu

pracy akceleratora LHC. Nadal może być bowiem tak, że naładowany higgs kryje się gdzieś w zakresie mas objętym analizą, a my jedynie nie jesteśmy dostatecznie czuli by dostrzec jego sygnał”, stwierdza dr hab. Anna Kaczmarska (IFJ PAN).

Wyniki analizy, zaprezentowane w czasopiśmie „Journal of High Energy Physics”, są szczególnie wartościowe pod kątem selekcji możliwych modeli teoretycznych, próbujących wychodzić poza znaną fizykę. Obecna analiza znacząco je zawęża, co z kolei pozwala precyzować przewidywania modeli i ułatwia ich dalszą weryfikację.

KONTAKT:

dr hab. Paweł Brückman
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628022
email: pawel.bruckman.de.renstrom@cern.ch

dr hab. Anna Kaczmarska
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628022
email: anna.kaczmarska@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

ATLAS Collab., M. Aaboud, (M. Bahmani, E. Banaś, P.A. Bruckman de Renstrom, K. Burka, J.J. Chwastowski, S. Czekierda, D. Derendarz, B.S. Dziedzic, J. Godlewski, A. Kaczmarska, K. Korcyl, A.B. Kowalewska, Pa. Malecki, A. Olszewski, J. Olszowska, M. Sławińska, A. Smykiewicz, E. Stanecka, R. Staszewski, M. Trzebiński, A. Trzupek, M.W. Wolter, B.K. Wosiek, K.W. Woźniak, B. Żabiński) et al., *Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ in the τ^\pm jets and τ^\pm leptons final states with 36 fb^{-1} of pp collision data recorded at $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$ with the ATLAS experiment*, J.High Energy Phys., **09** (2018) 139, doi: 10.1007/JHEP09(2018)139.



Kraków, 7 czerwca 2017

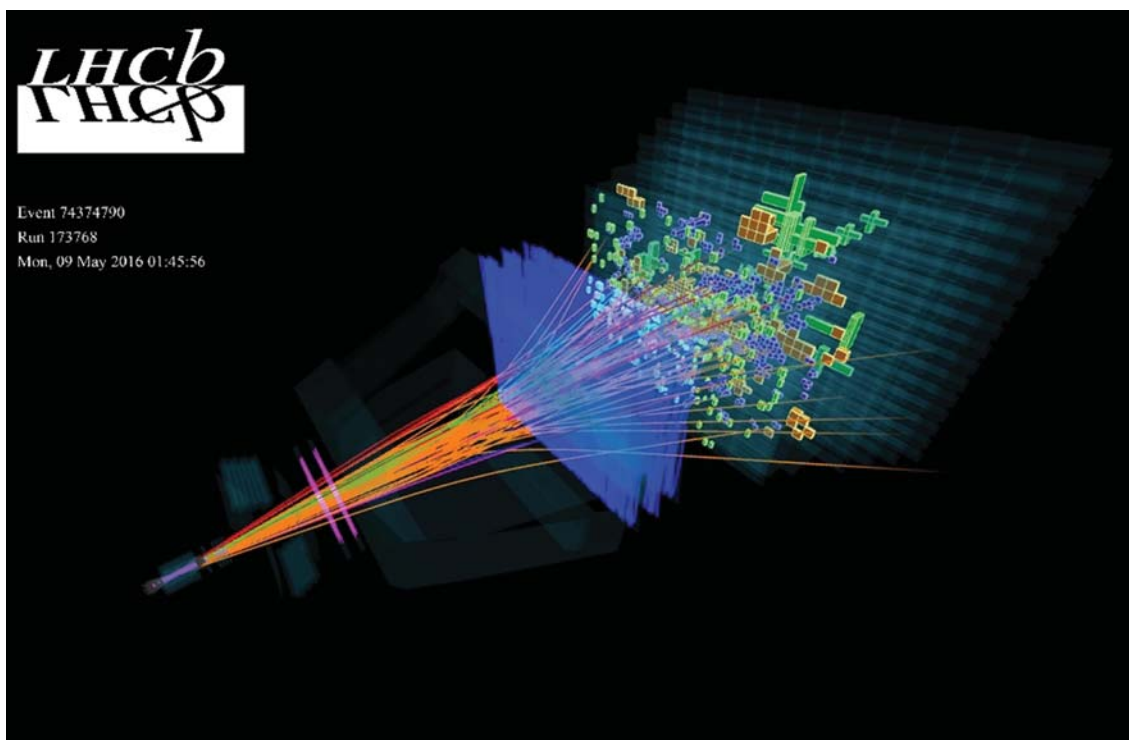
KOSMICZNA INFLACJA: HIGGS ŻEGNA SIĘ ZE SWOIM „MNIEJSZYM BRATEM”

W pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu Wszechświat mógł się rozszerzać nawet miliardy miliardów miliardów razy szybciej niż obecnie. Za tak gwałtowną ekspansję powinno odpowiadać dotychczas nieznanne pole sił, przenoszące oddziaływania za pomocą nowej cząstki: inflatonu. Z najnowszej analizy rozpadów mezonów pięknych, wykonanej w ramach eksperymentu LHCb przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie we współpracy z Uniwersytetem w Zurychu, wynika jednak, że najbardziej prawdopodobny lekki inflaton – cząstka o cechach słynnego bozonu Higgsa, lecz mniej masywna – niemal na pewno nie istnieje.

Tuż po Wielkim Wybuchu Wszechświat prawdopodobnie przeszedł przez fazę inflacji – niezwykle gwałtownej ekspansji. Jeśli inflacja faktycznie się wydarzyła, powinno za nią odpowiadać nowe pole sił. Jego nośnikami byłyby hipotetyczne cząstki, inflatony, które pod wieloma cechami powinny przypominać słynne bozony Higgsa. Fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie i Uniwersytetu w Zurychu (UZH) poszukiwali śladów lekkich inflatonów w rozpadach mezonów pięknych, zarejestrowanych przez detektory eksperymentu LHCb w CERN pod Genewą. Szczegółowa analiza danych, zrealizowana dzięki środkom Narodowego Centrum Nauki, stawia jednak istnienie lekkich inflatonów pod dużym znakiem zapytania.

Choć grawitacja jest oddziaływaniem bardzo słabym, to ona decyduje o wyglądzie Wszechświata w jego największych skalach. Nic więc dziwnego, że fundamentem współczesnych modeli kosmologicznych jest nasza najlepsza teoria grawitacji: ogólna teoria względności Alberta Einsteina. Już pierwsze modele kosmologiczne zbudowane w ramach teorii względności sugerowały, że Wszechświat jest tworem dynamicznym. Dziś wiemy, że kiedyś był niezwykle gęsty i gorący, a 13,8 miliarda lat temu nagle zaczął ekspandować. Teoria względności pozwala odtworzyć przebieg tego procesu poczynając od ułamków sekund po Wielkim Wybuchu.

„Jedną z najwcześniejszych widocznych do dziś pozostałości po tych wydarzeniach jest mikrofalowe promieniowanie tła, które uformowało się kilkaset tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. Obecnie odpowiada ono temperaturze około 2,7 kelwina i bardzo jednorodnie wypełnia cały Wszechświat. Właśnie ta jednorodność okazała się wielką zagadką”, mówi dr inż. Marcin Chrzęszcz (IFJ PAN) i wyjaśnia: „Gdy patrzymy w niebo, fragmenty głębokiego kosmosu widoczne w jednym kierunku mogą być tak odległe od widocznych w innym kierunku, że światło nie miało jeszcze czasu, żeby między nimi przelecieć. Zatem nic, co wydarzyło się w jednym z tych obszarów, nie powinno mieć wpływu na drugi. Lecz gdziekolwiek nie spojrzemy, temperatura odległych regionów kosmosu jest zawsze niemal identyczna! W jaki sposób mogła się tak ujednoczyć?”



Inflaton, hipotetyczna cząstka spoza Modelu Standardowego, był poszukiwany w rozpadach cząstek w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN. Ilustracja przedstawia typowy rozpad rejestrowany przez detektory eksperymentu LHCb. (Źródło: LHCb Collaboration, CERN).

Jednorodność mikrofalowego promieniowania tła tłumaczy się mechanizmem zaproponowanym przez Alana Gutha w 1981 roku. W jego modelu Wszechświat początkowo rozszerza się wolno i jego wszystkie dziś obserwowane fragmenty mają czas, by wejść w interakcje i wyrównać temperaturę. Według Gutha, w pewnym momencie musiało jednak dojść do bardzo krótkiej, lecz niezwykle gwałtownej ekspansji czasoprzestrzeni – nawet wiele miliardów miliardów miliardów razy szybszej od obecnej. Odpowiedzialne za tę inflację nowe pole sił tak rozdzieliło Wszechświat, że dziś jego różne części są rozdzielone przyczynowo.

„Nowe pole zawsze oznacza istnienie cząstki będącej nośnikiem oddziaływania. Kosmologia stała się więc interesująca dla fizyków badających zjawiska w mikroskalach. Przez długi czas dobrym kandydatem na inflaton wydawał się słynny bozon Higgosa. Ale gdy w 2012 roku higgs został wreszcie zaobserwowany w europejskim akceleratorze LHC, okazało się, że ma za dużą masę. Gdyby higgs z taką masą odpowiadał za inflację, dzisiejsze promieniowanie reliktove wyglądałoby inaczej niż obecnie zarejestrowane przez satelity COBE, WMAP i Planck”, stwierdza dr Chrzęszcz.

Teoretycy zaproponowali rozwiązanie tej zaskakującej sytuacji: inflatonem miałyby być zupełnie nowa cząstka, o właściwościach higgosa, lecz wyraźnie mniejszej masie. W mechanice kwantowej identyczność cech powoduje, że cząstki mogą oscylować: cyklicznie przekształcają się jedna w drugą. Model inflacji z tak skonstruowanym inflatonem miałyby tylko jeden parametr, opisujący częstość przemian obu cząstek.

„Masa nowego inflatonu mogłaby być wystarczająco mała, by cząstka pojawiała się w rozpadach mezonów pięknych B^+ . A mezony piękne to cząstki rejestrowane w dużych ilościach w ramach eksperymentu LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów. Postanowiliśmy więc poszukać rozpadów mezonów z udziałem inflatonu w danych zebranych w LHC w latach 2011-12”, mówi doktorant Andrea Mauri (UZH).

Gdyby lekki inflaton rzeczywiście istniał, mezon piękny B^+ mógłby się niekiedy rozpadać na kaon (mezon K^+) oraz cząstkę Higgosa, która w wyniku oscylacji przekształcałaby się w inflaton. Po przebyciu kilku metrów w detektorze inflaton rozpadałby się na dwie cząstki elementarne: mion i antymion. Detektory eksperymentu LHCb nie zarejestrowałyby obecności ani higgosa, ani inflatonu. Badacze z IFJ PAN spodziewali się jednak zobaczyć emisję kaonów oraz pojawianie się odpowiednio dalej par mion-antymion.

„W zależności od parametru opisującego częstość oscylacji inflaton-higgs, przebieg rozpadów mezonów B^+ powinien być nieco inny. W naszej analizie szukaliśmy rozpadów obejmujących aż 99% możliwych wartości tego parametru – i nic nie znaleźliśmy. Z dużą pewnością możemy więc powiedzieć, że lekki inflaton po prostu nie istnieje”, stwierdza dr Chrząszcz.

Teoretycznie inflaton o małej masie wciąż może się ukrywać w jednym procencie niezbadanych wariantów oscylacji – te przypadki zostaną ostatecznie wykluczone przez przyszłe analizy z użyciem nowszych, właśnie zbieranych danych z akceleratora LHC. Fizycy muszą się jednak powoli oswoić z myślą, że jeśli inflaton istnieje, jest cząstką bardziej masywną niż sądzono lub występuje w więcej niż jednej odmianie. Jeśli jednak z czasem i te warianty okażą się nie odpowiadać rzeczywistości, inflacja, tak dobrze tłumacząca obserwowaną jednorodność Wszechświata, stanie się – bardzo dosłownie – największą zagadką współczesnej kosmologii.

KONTAKT:

dr inż. Marcin Chrząszcz
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628437
email: marcin.chrzaszcz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (M. Baszczyk, M. Chrząszcz, Ag. Dziurda, M. Kucharczyk, T. Lesiak, M. Pikiel, B. Rachwał, M. Witek) et al., *Search for long-lived scalar particles in $B^+ \rightarrow K^+ \chi(\mu^+ \mu^-)$ decays*, Phys. Rev. D, **95** (2017) 071101, doi: 10.1103/PhysRevD.95.071101.



Kraków, 2 marca 2016

KOLEJNY PRZEBÓJ AKCELERATORA LHC – MAMY NAPRAWDĘ DOBRY ZWIASTUN!

W świetle najnowszej analizy danych o rzadkich rozpadach mezonów pięknych świat nowej fizyki wydaje się być coraz bliżej. Badania przeprowadzili fizycy pracujący przy akceleratorze LHC, wśród których znajdowali się naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

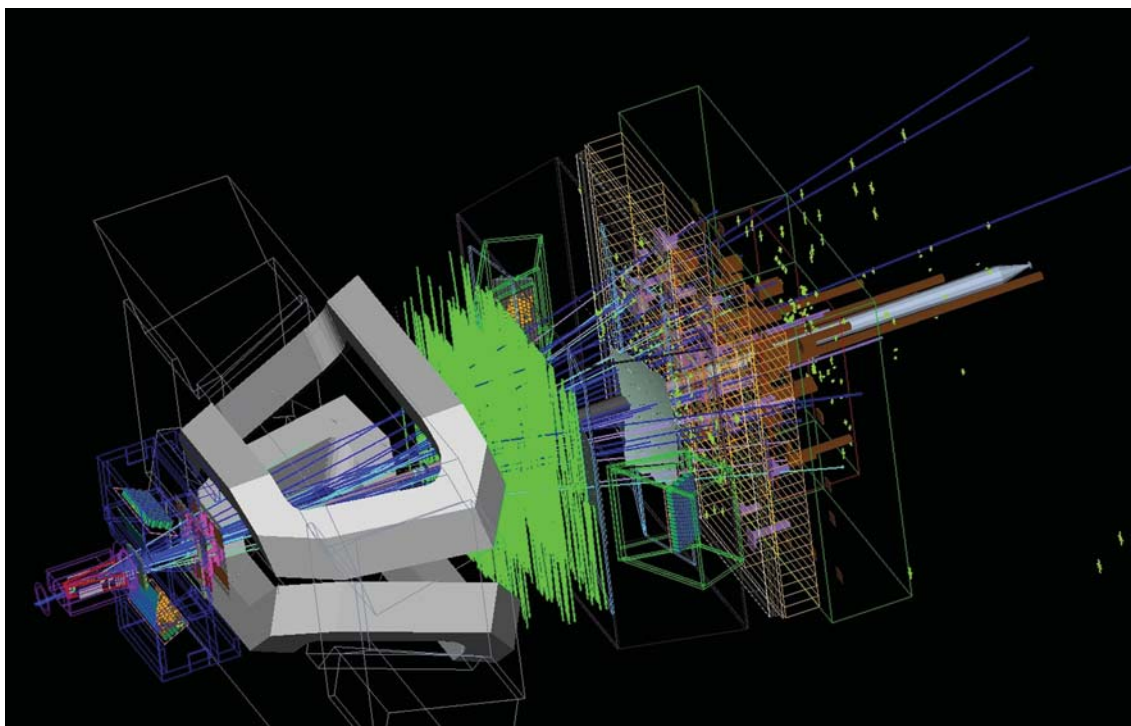
To jeszcze nie jest odkrycie. Coraz więcej wskazuje jednak, że fizycy pracujący przy akceleratorze LHC w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN pod Genewą natrafili na pierwszy ślad fizyki wykraczającej poza dotychczasową teorię budowy materii. Wniosek ten płynie z najnowszej analizy danych zebranych w 2011 i 2012 roku w eksperymencie LHCb. Istotny wkład w analizę wnieśli fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

„W żargonie kinowym moglibyśmy powiedzieć, że wcześniej docierały do nas jedynie pewne przecieki z planu filmowego, natomiast teraz LHC wypuścił pierwszy naprawdę porządny zwiastun swojego nadchodzącego przeboju”, mówi prof. dr hab. Mariusz Witek (IFJ PAN).

Do opisu budowy materii w skali cząstek elementarnych używa się obecnie Modelu Standardowego, zestawu narzędzi teoretycznych skonstruowanego w latach 70. ubiegłego wieku. Cząstki, które obecnie uważamy za elementarne, pełnią w nim różne funkcje. Bozony pośredniczące przenoszą oddziaływania: fotony są nośnikami sił elektromagnetycznych, osiem rodzajów gluonów – sił jądrowych silnych, a bozony W^+ , W^- i Z^0 – sił słabych. Materię tworzą cząstki nazywane fermionami. Fermiony dzielą się na kwarki i leptyony. W Modelu Standardowym istnieje sześć rodzajów kwarków (dolne, górne, dziwne, powabne, piękne i prawdziwe) i sześć rodzajów leptonów (elektrony, miony, taony oraz powiązane z nimi neutrino), a także 12 odpowiadających im antycząstek. Odkryty niedawno bozon Higgsa nadaje cząstkom masę (wszystkim oprócz gluonów i fotonów).

„Przewidywania formułowane w ramach Modelu Standardowego znakomicie zgadzają się z rzeczywistością. Mimo to jesteśmy pewni, że Model nie jest teorią ostateczną. Nie wyjaśnia, dlaczego cząstki mają takie a nie inne masy, ani dlaczego fermiony tworzą wyraźne rodziny. Skąd się wzięła dominacja materii nad antymaterią we współczesnym Wszechświecie? Czym jest ciemna materia? To kolejne pytania bez odpowiedzi. Co więcej, w Modelu w ogóle nie ma grawitacji!”, mówi prof. Witek.

Naukowcy pracujący przy LHC koncentrowali się dotychczas na poszukiwaniu bozonu Higgsa (eksperymenty ATLAS i CMS), poznawaniu różnic między materią a antymaterią (eksperyment LHCb) oraz badaniach plazmy kwarkowo-gluonowej (eksperyment ALICE). Obecnie coraz więcej uwagi poświęca się wykryciu cząstek elementarnych spoza Modelu Standardowego. W eksperymentach ATLAS i CMS cząstki te próbuje się rejestrować bezpośrednio. Jest jednak możliwe, że masy nowych cząstek są zbyt duże w stosunku do możliwości akceleratora LHC. Wtedy jedynym sposobem wykrycia nowej fizyki byłoby znalezienie nie samych nowych cząstek, a zjawisk, których przebieg można



Symulacja komputerowa rzadkiego rozpadu mezonu B_s na parę mionów J/ψ oraz γ w detektorze LHCb w ośrodku CERN pod Genewą. (Źródło: CERN).

24

byłoby tłumaczyć ich udziałem. Mogłyby to być zjawiska dotychczas nieznanne, ale nowa fizyka mogłaby także zmieniać prawdopodobieństwo zachodzenia zjawisk już znanych bądź wpływać na ich przebieg.

Jeszcze w 2011 roku, tuż po zebraniu pierwszych danych w eksperymencie LHCb, zauważono ciekawą anomalię związaną z mezonami pięknymi B, o której poinformowano na stronie WWW eksperymentu (<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>). Mezony te składają się z powszechnego w naturze kwarka dolnego (jednego ze składników protonów i neutronów) oraz antykwarka pięknego, wytwarzanego w akceleratorach. Jako cząstki zbudowane z par kwark-antykwar, mezony są układami nietrwałymi i szybko się rozpadają. Anomalię zaobserwowano w jednym z rozpadów mezonów B, prowadzącym do powstania m. in. dwóch mionów.

Opis stanu końcowego rozpadu mezonów B na dwa miony wymaga użycia aż ośmiu parametrów. Określają one rozkład kątowy produktów rozpadu, a więc m.in. to, które cząstki pochodne pod jakimi kątami i z jakim prawdopodobieństwem będą się poruszały. Tradycyjna metoda ustalenia wartości tych parametrów może prowadzić do zafałszowania wyniku dla małych próbek danych – a przecież z takimi mieli do czynienia fizycy analizujący rzadkie rozpady mezonów B. Dr inż. Marcin Chrzęszcz z IFJ PAN, jeden z głównych autorów obecnej analizy, zaproponował więc alternatywną metodę, w której każdy parametr był ustalany niezależnie od pozostałych.

„Moje podejście przypomina próbę ustalenia wieku starego rodzinnego zdjęcia. Zamiast oglądać zdjęcie w całości, lepiej przeanalizować każdą postać z osobna i na tej podstawie próbować określić rok jego wykonania”, wyjaśnia dr Chrzęszcz.

Najnowsza analiza, po stronie polskiej sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki oraz z Diamentowego Grantu przyznanego dr. Chrzęszczowi przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, jest ważna nie tylko ze względu na dokładność. Skoro bowiem efekt zaobserwowany w danych z 2011 roku przetrwał po uwzględnieniu danych z roku 2012, wzrasta prawdopodobieństwo, że fizycy trafili na ślad rzeczywistego zjawiska, a nie wcześniej nieprzewidzianego artefaktu samego pomiaru.

„Przy poszukiwaniach nowych zjawisk lub cząstek przyjmuje się, że efekt różniący się od przewidywań o ponad trzy odchylenia standardowe – 3 sigma – stanowi wskazówkę, ale o odkryciu można mówić dopiero wtedy, gdy dokładność wzrośnie powyżej 5 sigma. Mówiąc nieco inaczej, 5 sigma oznacza prawdopodobieństwo mniejsze niż jeden do trzech i pół miliona, że przypadkowa fluktuacja da wynik

taki jak obserwowany. Przy obecnie znalezionej liczbie takich rozpadów i dokładności naszej analizy odchylenie sięga ponad 3,7 sigma. Jeszcze nie możemy mówić o odkryciu, ale z pewnością mamy interesującą wskazówkę”, mówi dr Chrzęszcz.

Co może być powodem obserwowanego efektu? Wśród teoretyków najpopularniejsza jest hipoteza o istnieniu nowego bozonu pośredniczącego Z' (zet prim), zaangażowanego w rozpad mezonów B. Tłumaczy ona także inny, nieco słabszy efekt, widoczny w niektórych rozpadach mezonów B przy pomiarze tzw. uniwersalności leptonowej. Jednak wciąż nie jest wykluczone wyjaśnienie efektu w ramach Modelu Standardowego: być może obliczenia teoretyczne nie uwzględniają jakichś istotnych czynników mających wpływ na mechanizm rozpadu.

LHC rozpoczął ostatnio nowy cykl pracy i zderza protony z coraz większymi energiami. Pod koniec tego roku do rąk fizyków powinna trafić kolejna porcja danych dotyczących rozpadów mezonów B, a dwa-trzy lata później pojawią się ostateczne analizy. Czy nowa fizyka stanie się wtedy faktem?

„To jak w dobrym kinie: nikt nie wie, jaki będzie finał, ale wszyscy nie mogą się go doczekać”, podsumowuje prof. Witek.

KONTAKT:

prof. dr hab. Mariusz Witek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628047
email: mariusz.witek@ifj.edu.pl

dr inż. Marcin Chrzęszcz
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
oraz Universität Zürich, Zürich, Switzerland
email: marcin.chrzaszcz@ifj.edu.pl

PRACE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (M. Chrzęszcz, A. Dziurda, M. Fabiańska, Wo. Kucewicz, M. Kucharczyk, T. Lesiak, M. Pikies, B. Rachwał, M. Witek) et al., *Angular analysis of the $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ decay using 3 fb^{-1} of integrated luminosity*, J. High Energy Phys., **02** (2016) 104, doi: 10.1007/JHEP02(2016)104.



Kraków, 12 kwietnia 2017

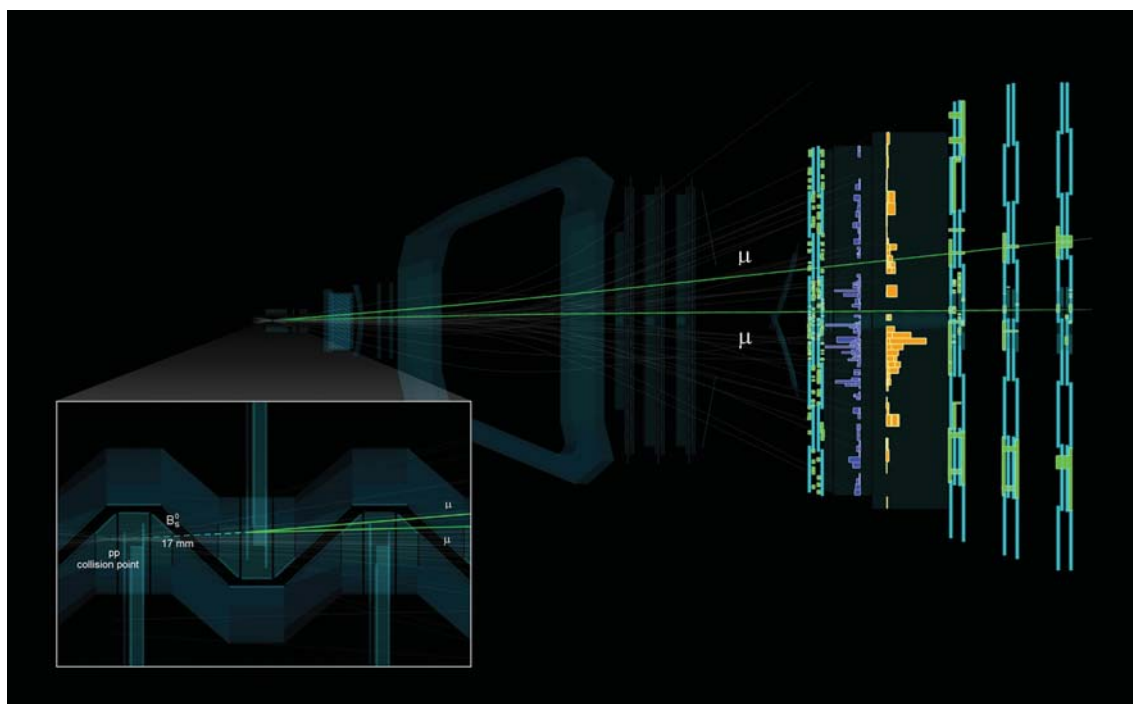
NAJDOKŁADNIEJSZY POMIAR RZADKIEGO ROZPADU MEZONÓW POTWIERDZA WSPÓŁCZESNĄ FIZYKĘ

Każda teoria fizyczna jest mniej lub bardziej, ale zawsze tylko uproszczonym odzworowaniem rzeczywistości i w konsekwencji ma określony zakres stosowności. Wielu naukowców pracujących przy eksperymencie LHCb w CERN miało nadzieję, że właśnie osiągnięta, wyjątkowa dokładność pomiarów rzadkiego rozpadu mezonu pięknego B_s^0 pozwoli wreszcie wyznaczyć granice Modelu Standardowego, obecnej teorii budowy materii, i ujawni pierwsze zjawiska nieznane współczesnej fizyce. Tymczasem spektakularny wynik najnowszej analizy jedynie rozszerzył zakres stosowności Modelu.

Mezony są nietrwałymi cząstkami powstającymi m.in. w wyniku zderzeń protonów w akceleratorze LHC w CERN pod Genewą. Wśród fizyków panuje przekonanie, że w pewnych bardzo rzadkich rozpadach tych cząstek potencjalnie mogą zachodzić procesy, które naprowadziłyby naukę na trop nowej fizyki, zachodzącej z udziałem dotychczas nieznanymi cząstek elementarnych. Nikogo nie powinno więc dziwić, że naukowcy uczestniczący w eksperymencie LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów od długiego czasu przyglądają się jednemu z takich rozpadów: rozpadowi mezonu pięknego B_s^0 na mion i antymion. Najnowsza analiza, przeprowadzona dla znacznie większej niż dotychczas liczby przypadków, osiągnęła wyjątkową jak na ten rodzaj obserwacji dokładność. Jej wyniki znakomicie się zgadzają z przewidywaniami Modelu Standardowego, dotychczasowej teorii budowy materii!

„Najnowszy pomiar to spektakularne zwycięstwo, tyle że nieco... pyrrusowe. Jest to bowiem jeden z nielicznych przypadków, gdy tak duża zgodność doświadczenia z teorią zamiast cieszyć, powoli zaczyna martwić. Wraz z poprawą dokładności pomiarów rozpadów mezonów B_s^0 spodziewaliśmy się zobaczyć nowe zjawiska, wychodzące poza Model Standardowy, o którym wiemy, że z całą pewnością nie jest teorią ostateczną. Jednak zamiast cieszyć się odkryciem zwiastuna naukowej rewolucji tylko wykazaliśmy, że Model jest bardziej dokładny niż nam się to pierwotnie wydawało!”, mówi prof. dr hab. Mariusz Witek z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

Model Standardowy składa się z narzędzi teoretycznych skonstruowanych w latach 70. ubiegłego wieku do opisu zjawisk zachodzących w świecie cząstek elementarnych. Materię tworzą w nim cząstki elementarne z grupy nazywanej fermionami, obejmującej kwarki (dolne, górne, dziwne, powabne, piękne i prawdziwe) oraz leptony (elektrony, miony, taony i powiązane z nimi neutrina). W Modelu istnieją także cząstki antymaterialne, stowarzyszone z odpowiednimi cząstkami materii. Za przenoszenie oddziaływań między fermionami odpowiadają bozony pośredniczące: fotony są nośnikami



Niezwykle rzadki rozpad mezonu pięknego B_s^0 na dwa miony, zarejestrowany w 2016 roku w detektorze LHCb w CERN pod Genewą. Na powiększeniu u dołu widać, że punkt rozpadu znajdował się 17 mm od miejsca zderzenia dwóch protonów. (Źródło: IFJ PAN, CERN, The LHCb Collaboration).

sił elektromagnetycznych, osiem rodzajów gluonów to nośniki sił jądrowych silnych, a bozony W^+ , W^- i Z^0 odpowiadają za siły słabe. Odkryty niedawno w LHC bozon Higgsa nadaje cząstkom masę (wszystkim oprócz gluonów i fotonów).

Mion to cząstka elementarna o ładunku elektrycznym elektronu i w pewnym uproszczeniu można powiedzieć, że jest jego odpowiednikiem, tyle że ok. 200 razy bardziej masywnym. Z kolei mezony B to nietrwałe cząstki zbudowane z dwóch kwarków: antykwarka pięknego oraz kwarka dolnego, górnego, dziwnego albo powabnego. Rozpad mezonu pięknego B_s^0 na mion i obdarzony dodatnim ładunkiem elektrycznym antymion zachodzi niezwykle rzadko. W objętym analizą okresie pracy detektora LHCb przeprowadzono setki bilionów zderzeń protonów, a podczas każdego z nich rejestrowano całe kaskady dalej rozpadających się cząstek pochodnych. Z tak ogromnej liczby zdarzeń w wieloetapowym procesie selekcji udało się wybrać zaledwie kilkanaście przypadków poszukiwanego rozpadu (jeden z nich można obejrzeć w trzech wymiarach pod adresem <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/BsMuMu2017/lbevent/>).

W najnowszej analizie zespół eksperymentu LHCb uwzględnił dane nie tylko z pierwszej, ale również z drugiej fazy pracy akceleratora LHC. Powiększona statystyka pozwoliła osiągnąć wyjątkową dokładność pomiaru rozpadu mezonu pięknego na mion i antymion, wynoszącą aż 7,8 odchyłeń standardowych (popularnie oznaczanych grecką literą sigma). W praktyce wartość ta oznacza, że prawdopodobieństwo zarejestrowania podobnego wyniku wskutek przypadkowej fluktuacji jest mniejsze niż jeden do ponad 323 bilionów.

„Spektakularny pomiar rozpadu mezonu pięknego na parę mion-antymion zgadza z przewidywaniami Modelu Standardowego z dokładnością sięgającą aż dziewięciu miejsc po przecinku!”, podkreśla prof. Witek.

Model Standardowy wyszedł zwycięsko z kolejnej konfrontacji z rzeczywistością. Mimo to fizycy są pewni, że nie jest teorią doskonałą. Przekonanie to wynika z wielu faktów. Model w ogóle nie uwzględnia istnienia grawitacji, nie tłumaczy dominacji materii nad antymaterią we współczesnym Wszechświecie, nie oferuje żadnego wyjaśnienia natury ciemnej materii, nie pozwala odpowiedzieć na pytanie, dlaczego fermiony tworzą trzy grupy, zwane rodzinami. Na dodatek żeby Model Standardowy działał, trzeba w nim umieścić ponad 20 empirycznie dobranych stałych, m.in. masy poszczególnych cząstek.

„Najnowsza analiza z LHCb znacznie zawęży wartości parametrów, które powinny przyjmować pewne obecnie proponowane rozszerzenia Modelu Standardowego, np. teorie supersymetryczne. Zakładają one, że każdy dotychczasowy rodzaj cząstek elementarnych ma swojego bardziej masywnego odpowiednika – superpartnera. Teraz, w wyniku omawianego pomiaru, teoretycy zajmujący się supersymetrią mają coraz mniej możliwości dopasowania swej teorii do rzeczywistości. Nowa fizyka zamiast się przybliżać, znów się oddala”, podsumowuje prof. Witek.

Fizycy nie zamierzają jednak rezygnować z badań rozpadu mezonu B_s^0 na parę mion i antymion. Wciąż pozostaje bowiem możliwość, że nowa fizyka rzeczywiście tu działa, tyle że jej efekty są mniejsze od oczekiwanych i nadal giną w błędach pomiarowych.

KONTAKT:

prof. dr hab. Mariusz Witek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628047
email: mariusz.witek@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (Ma. Baszczyk, M. Chrzęszcz, Ag. Dziurda, M. Kucharczyk, T. Lesiak, M. Pikies, B. Rachwał, M. Witek) et al., *Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction and effective lifetime and search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decays*, Phys. Rev. Lett., **118** (2017) 191801, doi: 10.1103/PhysRevLett.118.191801.



Kraków, 30 sierpnia 2018

POTENCJALNE ZWIASTUNY „NOWEJ FIZYKI” NIE CHCĄ ZNIKNAĆ

Od pewnego czasu w danych napływających z eksperymentu LHCb przy akceleratorze LHC widać kilka anomalii w rozpadach mezonów pięknych. Czy są one czymś więcej niż tylko statystycznymi fluktuacjami? Najnowsza analiza, przeprowadzona z udziałem Instytutu Fizyki Jądrowej PAN i uwzględniająca w rozpadach cząstek tzw. efekty długiżasięgowe, zwiększa prawdopodobieństwo, że za anomaliami kryje się coś więcej niż tylko kolejny psikus technik pomiarowych.

29

Gdy dawni żeglarze wypływali na nieznaną wodę, jedynym, czego mogli być naprawdę pewni, był bezmiar pustego oceanu. Zdarzało się po miesiącach podróży, że ten czy ów dostrzegł w oddali skrawek lądu, zwykle było to jednak tylko złudzenie. Tylko czasami zza horyzontu wyłaniał się szczyt, który im bliżej się znajdował, tym stawał się wyraźniejszy. Wydaje się, że fizycy poszukujący za pomocą akceleratora LHC śladów „nowej fizyki” znajdują się dziś w nieco podobnej sytuacji. Podczas gdy poszukiwacze bezpośrednich śladów nowej fizyki w zderzeniach cząstek eliminują wszystkie potencjalne nowe sygnały, odkrywając pustkę przewidywaną przez Model Standardowy, drudzy, przyglądający się innym zjawiskom, zaczynają widzieć w oceanie danych coraz wyraźniejsze „szczyty”, które nie sprawiają wrażenia, by zamierzały zniknąć.

Model Standardowy to zestaw narzędzi teoretycznych skonstruowany w latach 70. ubiegłego wieku do opisu zjawisk zachodzących w skali jąder atomowych i cząstek elementarnych. Sprawdza się znakomicie, lecz nie potrafi dostarczyć odpowiedzi na kilka szczególnie ważnych pytań. Dlaczego cząstki elementarne mają takie a nie inne masy, dlaczego tworzą rodziny? Dlaczego materia tak wyraźnie dominuje nad antymaterią? Z czego składa się ciemna materia? Wśród fizyków panuje więc dobrze uzasadnione przekonanie, że Model Standardowy opisuje tylko fragment rzeczywistości i wymaga rozszerzenia.

„Od dłuższego czasu w akceleratorze LHC trwa intensywne polowanie na wszystko, czego obecności nie da się wytłumaczyć dotychczasową fizyką. Na razie poszukiwania nowych cząstek lub zjawisk w sposób bezpośredni pozostają bezowocne. W danych dotyczących rozpadów mezonów pięknych natrafiono jednak na kilka anomalii. Z dnia na dzień stają się one ciekawsze, ponieważ im więcej danych przetwarzamy i im więcej efektów uwzględniamy przy ich opisie, tym lepiej je widać”, wyjaśnia dr hab. inż. Marcin Chrząszcz (IFJ PAN, Uniwersytet w Zurychu), finansowany przez Narodowe Centrum Nauki współautor najnowszej publikacji na łamach czasopisma „European Physical Journal C”. Pozostali trzej autorzy to Christoph Bobeth z Politechniki w Monachium (PM), Danny van Dyk z Uniwersytetu w Zurychu oraz Javier Virto z PM i Center for Theoretical Physics przy Massachusetts Institute of Technology w Cambridge, USA.



Czy wraz z napływem danych anomalie obserwowane w rozpadach mezonów pięknych znikną, tak jak kiedyś z map kartografów zniknęły egzotyczne lądy? Na razie dzięki najnowszej analizie z uwzględnieniem oddziaływań długozasięgowych zapowiedzi „nowej fizyki” są widoczne nie gorzej, lecz lepiej. (Źródło: IFJ PAN).

30

Badacze przyglądali się anomaliiom wykrytym w rozpadach mezonów pięknych. Mezony, cząstki zbudowane z pary kwark-antykwar, występują w wielu odmianach. Wspomniane mezony B (piękne) zawierają powszechny w naturze kwark dolny (jeden ze składników protonów i neutronów) oraz antykwark piękny. Mezony są układami nietrwałymi i szybko się rozpadają, na dodatek na wiele sposobów, które określa się jako kanały rozpadu. Jedną ze wspomnianych anomalii zaobserwowano w kanale rozpadu mezonu B na inny mezon (K^* , czyli „ka star”; mezon ten zamiast kwarku pięknego zawiera kwark dziwny) oraz parę mion-antymion (to cząstki elementarne o właściwościach zbliżonych do elektronu, tyle że niemal 200 razy bardziej masywne).

„We wcześniejszych obliczeniach zakładano, że gdy dojdzie do rozpadu mezonu, między jego produktami nie ma już żadnych oddziaływań. My w najnowszych obliczeniach uwzględniliśmy dodatkowy efekt: oddziaływania długozasięgowe zwane pętlą powabną. Polegają one na tym, że produkty rozpadu z pewnym prawdopodobieństwem oddziałują między sobą, na przykład wymieniając gluon, czyli cząstkę odpowiedzialną za oddziaływania silne, spajające kwarki w protonach i neutronach”, mówi dr van Dyk.

Efekt pomiarów w fizyce zwykle opisuje się za pomocą krotności odchylenia standardowego sigma. Efekt różniący się od przewidywań o ponad trzy odchylenia standardowe (3 sigma) jest traktowany jako wskazówka obserwacyjna, o odkryciu mówi się, gdy dokładność wzrasta ponad 5 sigma (co oznacza prawdopodobieństwo mniejsze niż jeden do trzech i pół miliona, że przypadkowa fluktuacja da wynik taki jak obserwowany). Wcześniejsza analiza rozpadów mezonów B na mezon K^* i parę mion-antymion, zrealizowana z udziałem badaczy z IFJ PAN, pozwoliła stwierdzić odstępstwo od Modelu Standardowego na poziomie 3,4 sigma (w innych kanałach rozpadu udało się zaobserwować anomalie o podobnej naturze). Tymczasem uwzględnienie efektów długozasięgowych podniosło dokładność przeprowadzonej analizy aż do wartości 6,1 sigma. Badacze mają nadzieję, że zaproponowane przez nich metody matematyczne, zastosowane dla pozostałych kanałów rozpadu, także znacząco zwiększą precyzję oszacowań.

„Wykryte anomalie wcale nie znikają w kolejnych analizach. Teraz, gdy udało się dopracować opis teoretyczny tych procesów, wszystko zależy już tylko od statystyki, od liczby przypadków poddanych obróbce. Prawdopodobnie w ciągu dwóch-trzech lat będziemy mieli ich wystarczająco wiele, by potwierdzić istnienie anomalii z wiarygodnością uprawniającą do mówienia o odkryciu”, mówi dr Chrzęszcz.

Pytanie, czym są zaobserwowane anomalie, pozostaje otwarte. Wielu fizyków przypuszcza, że za ich istnienie może być odpowiedzialna nieznana cząstka elementarna, spoza Modelu Standardowego.

Dobrym kandydatem byłby na przykład proponowany przez teoretyków bozon pośredniczący Z' (czyt. zet prim). Bezpośrednia weryfikacja tej hipotezy wymagałby jednak kolejnych eksperymentów, na dodatek na akceleratorze potężniejszym niż współczesna konfiguracja LHC.

KONTAKT:

dr hab. inż. Marcin Chrząszcz
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
oraz Universität Zürich, Zürich, Switzerland
email: marcin.chrzaszcz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

C. Bobeth, M. Chrząszcz, D. van Dyk, J. Virto, *Long-distance effects in $B \rightarrow K^* \ell \ell$ from Analyticity*, Eur. Phys. J. C, 78 (2018) 451, doi: 10.1140/epjc/s10052-018-5918-6.



Kraków, 22 lutego 2017

NEGATYW, LECZ NIE DOSKONAŁY: PIERWSZY ŚLAD RÓŻNIC MIĘDZY MATERIA A „ZWYKŁĄ” ANTYMATERIA

Świat wokół nas jest zbudowany głównie z barionów, cząstek składających się z trzech kwarków. Dlaczego nie ma w nim antybarionów, skoro tuż po Wielkim Wybuchu materia i antymateria powstawały w dokładnie takich samych ilościach? Wiele wskazuje, że po wielu dekadach poszukiwań fizycy są bliżej odpowiedzi na to pytanie. W eksperymencie LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów właśnie natrafiono na pierwszy ślad różnic między barionową materią a antymaterią.

W danych zebranych w trakcie pierwszej fazy pracy Wielkiego Zderzacza Hadronów zespół eksperymentu LHCb wykrył interesującą asymetrię. Najnowsza analiza rozpadów barionów pięknych Λ_b , cząstek sześciokrotnie bardziej masywnych od protonu, sugeruje, że rozpadają się one nieco inaczej niż ich antymaterialne odpowiedniki. Jeśli wynik ten zostanie potwierdzony, będzie można mówić o zaobserwowaniu pierwszej różnicy między antybarionami a barionami, a więc tą rodziną cząstek, która w dominującej części tworzy nasz codzienny świat.

Pewne różnice między materią a antymaterią zaobserwowano już wcześniej. W 1964 roku dostrzeżono, że kaony – czyli mezony K , cząstki zbudowane z kwarka dziwnego i antykwarka dolnego albo górnego – czasami rozpadają się nieco inaczej niż antykaony (za to odkrycie w 1980 roku przyznano nagrodę Nobla). Z kolei w ostatnich latach pojawiły się doniesienia o wykryciu nieco wyraźniejszych różnic w rozpadach mezonów i antymezonów B różnego typu (mezon B składa się z antykwarka pięknego oraz kwarka dolnego, górnego, dziwnego albo powabnego).

Mezony to pary kwark-antykwark o krótkich czasach życia, dziś pojawiające się we Wszechświecie w niewielkich ilościach, a na Ziemi wytwarzane głównie w wysokoenergetycznych zderzeniach w akceleratorach. Tymczasem materię, z której składają się makroskopowe obiekty naszego świata, tworzą leptony (to do nich należą elektrony) oraz w dominującej części bariony, czyli zlepki trzech kwarków (barionem jest proton, zawierający dwa kwarki górne i jeden dolny, oraz neutron, złożony z dwóch kwarków dolnych i jednego górnego). Najnowsza analiza danych z eksperymentu LHCb, opublikowana w czasopiśmie „Nature Physics”, a dotycząca rozpadów cząstek Λ_b zbudowanych z kwarków dolnego, górnego i pięknego, jest więc pierwszą wskazówką o możliwych różnicach między materią barionową a jej antymaterialnym odbiciem.

„Jeszcze nie możemy mówić o odkryciu. Niemniej mamy do czynienia z czymś, co wydaje się coraz bardziej obiecującą wskazówką obserwacyjną, wychwyconą w danych z pierwszego etapu pracy akceleratora LHC. Na ostateczne potwierdzenie – lub zanegowanie... – obecnego wyniku trzeba będzie



W rozpadach barionów pięknych Λ_b wykryto pierwsze różnice między powszechną, barionową materią a jej antymaterialnymi odpowiednikami. Na zdjęciu zespół eksperymentu LHCb przy detektorze. (Źródło: CERN, The LHCb Collaboration)..

jednak poczekać kilkanaście miesięcy, do momentu oficjalnego zakończenia analizy danych z fazy drugiej”, zaznacza dr hab. Marcin Kucharczyk, profesor Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie, który to instytut jest jednym z uczestników eksperymentu LHCb.

Współczesna fizyka cząstek elementarnych oraz modele kosmologiczne sugerują, że antymateria powstawała w dokładnie takich samych ilościach co materia. Z faktem tym wiążą się spektakularne konsekwencje: gdy cząstka napotyka swoją antycząstkę, z dużym prawdopodobieństwem dochodzi do anihilacji, czyli procesu, w którym obie cząstki całkowicie przekształcają się w energię. Mechanizm ten jest niezwykle wydajny. Ilość energii powstająca przy anihilowaniu kilograma antymaterii z dobrym przybliżeniem odpowiada ilości energii, jaka uwalnia się wskutek spalania rocznej produkcji benzyny silnikowej ze wszystkich polskich rafinerii.

Gdyby we współczesnym kosmosie istniały planety, gwiazdy czy galaktyki zbudowane z antymaterii, powinny emitować duże ilości promieniowania o bardzo charakterystycznych energiach. Powstawałoby ono wskutek nieuniknionych oddziaływań z materią przeciwnego typu, prowadzących do anihilacji. Tymczasem astronomowie obserwują promieniowanie anihilacyjne tylko gdzieś tam i w szczątkowych ilościach, świetnie tłumaczonych zjawiskami fizycznymi, które i dziś odpowiadają za powstawanie niewielkich ilości antymaterii. Tak rodzi się fundamentalnie ważne pytanie: skoro pierwotnie materia i antymateria wypełniały Wszechświat w dokładnie jednakowych ilościach, dlaczego całkowicie nie zniknęły? Dlaczego niewielka część materii zdołała przetrwać erę anihilacji?

W świecie ożywionym wielkie wymierania, prowadzące do wyginięcia gatunków, trwają dziesiątki i setki tysięcy lat. Tymczasem wszystko wskazuje na to, że anihilująca z materią antymateria zniknęła z naszego wszechświata ułamki sekund po Wielkim Wybuchu. Na każde kilka miliardów cząstek materii ten gigantyczny kataklizm przetrwała zaledwie jedna. Gdyby podobna co do skali zagłada dotknęła ludzki gatunek, w ciągu sekund ze wszystkich ludzi na Ziemi przy życiu pozostałby tylko jeden człowiek. Pytanie, dlaczego tylko on przetrwał, byłoby z pewnością jak najbardziej na miejscu.

„We współczesnej fizyce przyjmuje się, że za istnienie materii powinny odpowiadać jakieś drobne różnice między właściwościami cząstek i antycząstek. Żeby w równaniach przekształcić cząstkę w antycząstkę, trzeba zmienić znak jej odpowiedniej cechy kwantowej – w przypadku elektronów czy kwarków tworzących protony i neutrony jest to ładunek elektryczny – oraz zmienić znak współrzędnych przestrzennych,

czyli dokonać lustrzanego odbicia. Złożenie tych dwóch operacji jest nazywane symetrią CP, czyli symetrią ładunku i parzystości. Próby wykrycia różnic między antymaterią i materią sprowadzają się więc do tropienia zjawisk, w których symetria CP nie jest zachowywana”, wyjaśnia prof. Kucharczyk.

Szukając śladów łamania symetrii CP badacze z eksperymentu LHCb wybrali z ogromnej liczby zderzeń i produktów ich rozpadów ok. 6000 przypadków, w których cząstki Lambda b rozpadały się na proton oraz trzy mezony pi (piony), oraz ok. 1000 przypadków ze ścieżką rozpadu prowadzącą do protonu, pionu i dwóch kaonów. Szczegółowa analiza ujawniła, że kąty, pod którymi rozbiegają się produkty rozpadu, są dla barionów Lambda b niekiedy nieco inne niż dla ich antymaterialnych partnerów. Otrzymany wynik charakteryzuje się pewnością na poziomie 3,3 odchylenia standardowych (sigma), co odpowiada prawdopodobieństwu ok. 99%, że nie jest przypadkową fluktuacją. W fizyce cząstek elementarnych przyjmuje się jednak, że o odkryciu można mówić dopiero przy pewności powyżej 5 sigma, a więc wtedy, gdy prawdopodobieństwo przypadkowej fluktuacji jest mniejsze niż jeden do ponad trzech milionów.

KONTAKT:

dr hab. Marcin Kucharczyk, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628050
email: marcin.kucharczyk@ifj.edu.pl

PRACE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (M. Baszczyk, M. Chrzęszcz, Ag. Dziurda, M. Kucharczyk, T. Lesiak, M. Pikies, B. Rachwał, M. Witek) et al., *Measurement of matter-antimatter differences in beauty baryon decays*, Nature Phys., **13** (2017) 391-396, doi: 10.1038/nphys4021.



„NOWA FIZYKA” POWABNIE NAM UMYKA

W świecie cząstek elementarnych ślady potencjalnej „nowej fizyki” mogą się kryć w procesach związanych z rozpadami barionów. Za pomocą analizy danych z eksperymentu LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazali jednak, że jedne z najrzadszych rozpadów barionów zawierających kwark powabny dotychczas nie wykazują żadnych anomalii.

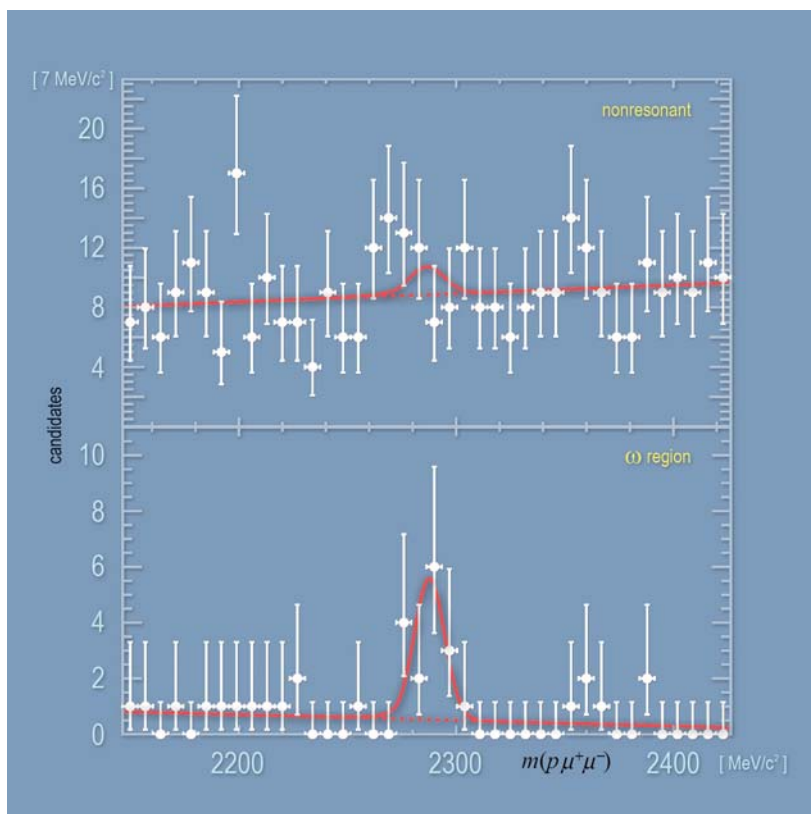
Bariony, czyli zlepki trzech kwarków, mogą się rozpadać na mniejsze cząstki. Procesy tego typu zwykle przebiegają w paru etapach (rezonansowo). Niekiedy zdarza się jednak, że barion rozpada się na kilka cząstek pochodnych nie w kaskadzie zdarzeń, lecz od razu, w jednym kroku (nierezonansowo). Rozwijany od pół wieku Model Standardowy, najdoskonalsze narzędzie współczesnej fizyki służące do opisu zjawisk zachodzących wśród cząstek elementarnych, przewiduje, że nierezonansowe rozpady barionów są ekstremalnie rzadkie: w zależności od typu barionu powinny się pojawiać raz na miliardy przypadków lub z jeszcze mniejszą częstotliwością.

„Gdyby częstotliwość jakichś rozpadów nierezonansowych była inna niż przewidywana przez Model Standardowy, mogłaby świadczyć o istnieniu nieznanych dotychczas procesów i cząstek, a zatem o „nowej fizyce”. To dlatego rozpady nierezonansowe od dłuższego czasu przykuwają naszą uwagę”, wyjaśnia prof. dr hab. Mariusz Witek z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

Prof. Witek kierował pięciuosobową grupą krakowskich fizyków, zajmującą się poszukiwaniami nierezonansowych rozpadów barionów powabnych Λ_c w danych zebranych w 2011 i 2012 roku w międzynarodowym eksperymencie LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów w Genewie.

Dlaczego tym razem uwagę krakowskich badaczy przykuły bariony Λ_c , czyli cząstki zbudowane z kwarków dolnego d , górnego u i powabnego c ? Najbardziej masywny kwark t rozpada się tak szybko, że w ogóle nie łączy się z innymi kwarkami, a więc nie tworzy barionów, których rozpady można byłoby rejestrować. Rozpady barionów z drugim pod względem masy kwarkiem pięknym b analizowano już wcześniej, między innymi dlatego, że świadczące o ich zachodzeniu sygnały były nieco łatwiejsze do wychycenia. Grupa krakowska wniosła tu swój wkład przyczyniając się do wykrycia ciekawego odchylenia od przewidywań teoretycznych (<https://press.ifj.edu.pl/news/2016/03/>). W tej sytuacji terra incognita wśród barionów zawierających kwarki ciężkie pozostawały bariony powabne.

„Model Standardowy przewiduje, że nierezonansowe rozpady barionów Λ_c , których efektem są trzy cząstki: proton i dwa miony, powinny się pojawiać mniej więcej raz na setki miliardów rozpadów. To znacznie radsze zjawisko niż rozpady barionów z kwarkiem pięknym b , którymi zajmowaliśmy się wcześniej”, podkreśla dr hab. Marcin Chrzęszcz (IFJ PAN) i uzupełnia: „Pomiary i analizy są teraz znacznie trudniejsze, trzeba przyjrzeć się wielokrotnie większej grupie zdarzeń zarejestrowanych w eksperymencie LHCb. Warto to jednak robić, bo w nagrodę można natrafić na trop znacznie bardziej subtelnych procesów. Gdyby udało się tu zaobserwować jakąkolwiek niezgodność z przewidywaniami, najprawdopodobniej byłaby ona zwiastunem „nowej fizyki””.



Bariony zawierające kwark powabny mogą się rozpaść od razu na proton i dwa miony. Za pomocą danych z eksperymentu LHCb naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazali, że w tych niezwykle rzadkich procesach nadal nie widać śladów „nowej fizyki”. Na górze sygnał nierezonansowego rozpadu na proton i dwa miony, poniżej sygnał dla rozpadu rezonansowego z udziałem mezonu omega. (Źródło: IFJ PAN, CERN, The LHCb Collaboration).

36

Przy tak rzadkich zjawiskach odróżnienie sygnałów świadczących o nierezonansowych rozpadach barionów Lambda c od szumu tła okazało się zadaniem żmudnym i czasochłonnym. Mimo to krakowskim fizykom udało się stukrotnie poprawić górną granicę na częstotliwość występowania rozpadów nierezonansowych. Oszacowano ją na mniejszą od jednego przypadku na setki milionów.

„Uwzględnienie kolejnych danych, w tym z drugiego cyklu pracy akceleratora LHC, powinno już wkrótce poprawić nasz wynik o czynnik 10. Bylibyśmy więc już bardzo blisko przewidywań Modelu Standardowego. Jeśli w rozpadach barionów Lambda c przejawia się jakaś „nowa fizyka”, będzie to ostatni dzwonek, by mogła się ujawnić. Na razie nie widać jej najmniejszego śladu”, podsumowuje prof. Witek.

W trakcie analiz krakowscy badacze zaobserwowali również rozpady rezonansowe, w których barion Lambda c rozpadał się na proton i mezon omega. Pewnym zaskoczeniem okazał się brak sygnałów świadczących o jeszcze innej ścieżce rozpadu rezonansowego, na proton i mezon rho. Wynik ten okazał się jednak zgodny z przewidywaniami teoretycznymi.

KONTAKT:

prof. dr hab. Mariusz Witek
 Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
 tel. +48 12 6628047
 email: mariusz.witek@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (J. Brodzicka, Ma. Chrząszcz, Ag. Dziurda, M. Jeżabek, M. Kucharczyk, T. Lesiak, B. Małecki, A. Ossowska, M. Pikies, M. Witek) et al., *Search for the rare decay $\Lambda_c^+ \rightarrow p\mu^+\mu^-$* , Phys. Rev. D, **97** (2018) 091101, doi: 10.1103/PhysRevD.97.091101.



GAMBIT ZAWĘŻA KRYJÓWKI „NOWEJ FIZYKI”

Cząstki elementarne „nowej fizyki” muszą być tak masywne, że ich wykrycie w LHC, największym współczesnym akceleratorze, nie będzie możliwe. Ten mało optymistyczny wniosek płynie z najobszerniejszego przeglądu danych obserwacyjnych z wielu eksperymentów naukowych i ich konfrontacji z kilkoma popularnymi odmianami teorii supersymetrii. Skomplikowane, niezwykle wymagające obliczeniowo analizy przeprowadził zespół międzynarodowego projektu GAMBIT – i zostawił cień nadziei.

Czy za pomocą współczesnych przyrządów można dostrzec cząstki elementarne „nowej fizyki”, zdolnej wytłumaczyć tak zagadkowe cechy naszej rzeczywistości jak natura ciemnej materii czy brak symetrii między materią a antymaterią? Aby odpowiedzieć na to pytanie, naukowcy z międzynarodowego projektu GAMBIT (Global and Modular Beyond-the-Standard-Model Inference Tool) opracowali zestaw narzędzi programowych pozwalających na kompleksową analizę danych zebranych w trakcie najbardziej wyrafinowanych współczesnych eksperymentów i pomiarów. Pierwsze, dość niepokojące dla fizyków wyniki, właśnie opublikowano w czasopiśmie „European Physical Journal C”. W pracach zespołu uczestniczy Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

Fizycy-teoretycy są dziś głęboko przekonani, że Model Standardowy, nasza obecna, doskonale zverifikowana teoria budowy materii, wymaga rozszerzenia. Silną przesłanką za istnieniem nieznanymi cząstek elementarnych są m.in. ruchy gwiazd w galaktykach. Badaniem statystycznych cech tych ruchów jako pierwszy zajął się polski astronom Marian Kowalski. W 1859 roku odkrył on, że ruchów bliskich nam gwiazd nie da się wytłumaczyć samym ruchem Słońca. Była to pierwsza przesłanka sugerująca obrót Drogi Mlecznej (Kowalski jest więc tym człowiekiem, który „ruszył z posad” całą galaktykę). W 1933 roku Szwajcar Fritz Zwicky zrobił kolejny krok. Z obserwacji gwiazd w gromadzie galaktyk Coma wywnioskował, że poruszają się one wokół centrów galaktycznych tak, jakby znajdowała się tam duża ilość niewidocznej materii.

Choć od odkrycia Zwicky’ego upłynął niemal wiek, do dziś nie udało się zbadać składu ciemnej materii – ani nawet jednoznacznie potwierdzić jej istnienia. W tym czasie teoretycy skonstruowali wiele rozszerzeń Modelu Standardowego, zawierających mniej lub bardziej egzotyczne cząstki-kandydatki na ciemną materię. Popularnością cieszy się np. rodzina teorii supersymetrycznych. Za istnienie ciemnej materii odpowiadają tu niektóre nowe, bardzo masywne i słabo oddziałujące ze zwykłą materią odpowiedniki znanych cząstek. Naturalnie, śladów „nowej fizyki” szukają też liczne grupy fizyków doświadczalnych. Każda z nich na podstawie przypuszczeń teoretycznych realizuje pewien projekt badawczy, po czym zajmuje się analizą i interpretacją napływających z niego danych. Niemal zawsze odbywa się to w kontekście jednego, zwykle dość wąskiego działu fizyki.

„Idea projektu GAMBIT polega na stworzeniu narzędzi do analizowania danych z jak największej liczby eksperymentów, z różnych obszarów fizyki, i bardzo szczegółowe porównywanie ich



Przez 80 milionów godzin pracy rdzeni obliczeniowych krakowski superkomputer Prometheus tropił ślady 'nowej fizyki', konfrontując w ramach projektu GAMBIT przewidywania kilku modeli supersymetrii z danymi zebranymi przez najbardziej wyrafinowane współczesne eksperymenty naukowe. (Źródło: KSAF, Maciej Bernas).

z przewidywaniami nowych teorii. Patrząc kompleksowo można znacznie szybciej zawęzić obszary poszukiwań 'nowej fizyki', a z czasem także eliminować te modele, których przewidywania nie znalazły potwierdzenia w pomiarach", wyjaśnia dr Marcin Chrząszcz (IFJ PAN).

Pomysł zbudowania zestawu modułowych narzędzi programowych do globalnej analizy danych obserwacyjnych z różnych eksperymentów fizycznych zrodził się w 2012 roku w Melbourne, podczas międzynarodowej konferencji dotyczącej fizyki wysokich energii. Obecnie w skład grupy GAMBIT wchodzi ponad 30 badaczy z instytucji naukowych Australii, Francji, Hiszpanii, Holandii, Kanady, Norwegii, Polski, Stanów Zjednoczonych, Szwajcarii, Szwecji i Wielkiej Brytanii. Dr Chrząszcz, finansowany z grantu SONATA Narodowego Centrum Nauki, dołączył do zespołu GAMBIT trzy lata temu, w celu opracowania narzędzi modelujących fizykę masywnych kwarków, ze szczególnym uwzględnieniem kwarków pięknych (zwyczajowo ten dział fizyki nosi znacznie bardziej chwytliwą nazwę: fizyka ciężkich zapachów).

Weryfikowanie propozycji nowej fizyki przebiega w projekcie GAMBIT następująco. Naukowcy wybierają model teoretyczny i wbudowują go w oprogramowanie. Następnie program skanuje wartości głównych parametrów modelu. Dla każdego zestawu parametrów są wyliczane przewidywania, które porównuje się z danymi z eksperymentów.

„W praktyce nic nie jest tu trywialne. Istnieją modele, gdzie mamy aż 128 swobodnych parametrów. Proszę sobie wyobrazić skanowanie wariantów w przestrzeni o 128 wymiarach! To coś, co zabije każdy komputer. Dlatego na początek ograniczyliśmy się do trzech wersji prostszych modeli supersymetrycznych, znanych pod skrótami CMSSM, NUHM1 i NUHM2. Mają one odpowiednio pięć, sześć i siedem swobodnych parametrów. Ale sprawy i tak się komplikują, bo na przykład część stałych parametrów znamy tylko z pewną dokładnością. Zatem trzeba je traktować podobnie jak parametry swobodne, tyle że zmieniające się w mniejszym zakresie”, mówi dr Chrząszcz.

O skali wyzwania najlepiej świadczy łączny czas wszystkich dotychczasowych obliczeń projektu GAMBIT. Przeprowadzono je na superkomputerze Prometheus, jednym z kilkudziesięciu najszybszych komputerów świata. Urządzenie, pracujące w Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, dysponuje procesorami o ponad 53 tysiącach rdzeni i całkowitej mocy obliczeniowej 2399 teraflopsów (milionów milionów operacji zmiennopozycyjnych na sekundę). Mimo zastosowania tak potężnego sprzętu, łączny czas pracy rdzeni w projekcie GAMBIT wyniósł aż 80 mln godzin (ponad 9100 lat).

„Tak długie obliczenia to m.in. konsekwencja różnorodności danych pomiarowych. Na przykład grupy z głównych eksperymentów przy akceleratorze LHC publikują dokładnie takie wyniki, jakie

zmierzyły detektory. Ale przecież każdy detektor w jakiś sposób zniekształca to, co widzi! Zanim porównamy dane z przewidywaniami weryfikowanego modelu, trzeba z nich usunąć zaburzenia wprowadzone przez detektor”, tłumaczy dr Chrząszcz i dodaje: „Po stronie astrofizyki musimy przeprowadzić podobny zabieg. Należy na przykład przeprowadzić symulacje, jak zjawiska „nowej fizyki” wpłynęłyby na zachowanie galaktycznego halo ciemnej materii”.

Dla poszukiwaczy „nowej fizyki” projekt GAMBIT nie przynosi najlepszych wiadomości. Analizy sugerują, że jeśli cząstki supersymetryczne przewidywane przez zbadane modele istnieją, ich masy muszą być rzędu wielu teraelektronowoltów (w fizyce jądrowej masy cząstek podaje się w jednostkach energii; jeden elektronowolt odpowiada energii niezbędnej do przesunięcia elektronu między punktami o różnicy potencjału równej jednemu voltowi). W praktyce fakt ten oznacza, że zobaczenie takich cząstek w akceleratorze LHC będzie albo bardzo trudne, albo wręcz niemożliwe. Ale jest i cień nadziei. Kilka supercząstek – znanych jako neutralino, chargino, stau i stop – ma co prawda spore masy, lecz nie przekraczają one teraelektronowolta. Przy pewnej dozie szczęścia ich wykrycie w LHC pozostaje potencjalnie możliwe. Niestety, w tym gronie tylko neutralino jest uważane za potencjalnego kandydata na ciemną materię.

W przeciwieństwie do wielu innych naukowych narzędzi analitycznych, kody wszystkich modułów pakietu GAMBIT są publicznie dostępne na stronie projektu (<http://gambit.hepforge.org>) i mogą być szybko zaadaptowane do analiz pod kątem nowych modeli teoretycznych. Naukowcy z projektu GAMBIT liczą, że otwartość kodu przyspieszy poszukiwania „nowej fizyki”.

KONTAKT:

dr inż. Marcin Chrząszcz
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628437
email: marcin.chrzaszcz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

GAMBIT Collab., P. Athron, (M. Chrząszcz) et al., *Global fits of GUT-scale SUSY models with GAMBIT*, Eur. Phys. J. C, 77 (2017) 824, doi: 10.1140/epjc/s10052-017-5167-0.



Kraków, 1 marca 2018

JAK RODZĄ SIĘ HADRONY PRZY OGROMNYCH ENERGIACH DOSTĘPNYCH W LHC?

Nasz świat składa się głównie z cząstek zbudowanych z trzech kwarków powiązanych gluonami. Proces zlepiania się kwarków, zwany hadronizacją, jest wciąż słabo poznany. Dzięki analizie unikalnych danych zebranych dla wysokoenergetycznych zderzeń protonów w akceleratorze LHC fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, działający w międzynarodowej współpracy przy eksperymencie LHCb, zdobyli na jego temat nowe informacje.

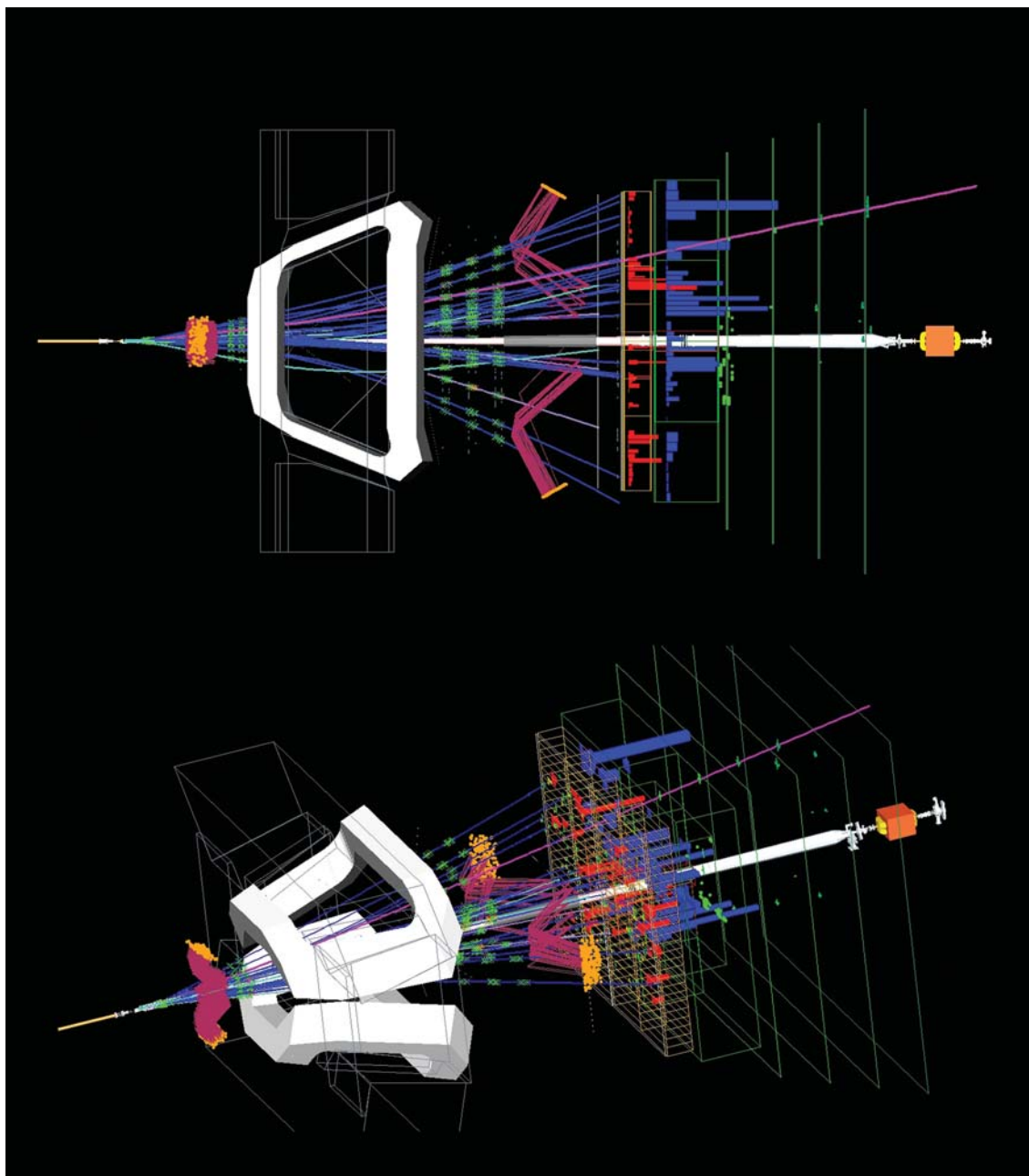
40

Gdy rozpędzone do największych energii protony zderzają się w akceleratorze LHC, ich cząstki składowe – kwarki i gluony – tworzą zagadkowy stan pośredni. Dużym zaskoczeniem była obserwacja, że w zderzeniach stosunkowo prostych cząstek, jakimi są protony, ów stan pośredni wykazuje właściwości cieczy, typowe dla zderzeń znacznie bardziej złożonych obiektów (ciężkich jonów). Właściwości tego typu wskazują na istnienie nowego stanu materii: plazmy kwarkowo-gluonowej, w której kwarki i gluony zachowują się niemal jak cząstki swobodne. Ta egzotyczna ciecz błyskawicznie się schładza. W efekcie kwarki i gluony ponownie wiążą się ze sobą w procesie zwanym hadronizacją. Jego efektem są narodziny hadronów, cząstek będących zlepkami dwóch lub trzech kwarków. Dzięki najnowszej analizie danych zebranych przy energii siedmiu teraelektronowoltów w eksperymencie LHCb, naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie zdobyli nowe informacje dotyczące przebiegu hadronizacji w zderzeniach protonów.

„Główną rolę w zderzeniach protonów odgrywa oddziaływanie silne, opisywane przez chromodynamikę kwantową. Zjawiska zachodzące podczas schładzania plazmy kwarkowo-gluonowej są jednak tak złożone pod względem obliczeniowym, że dotychczas nie udało się dobrze poznać i zrozumieć szczegółów hadronizacji. A przecież jest to proces o kluczowym znaczeniu! To dzięki niemu w pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu z kwarków i gluonów uformowała się dominująca większość cząstek tworzących nasze codzienne środowisko”, mówi dr hab. inż. Marcin Kucharczyk, prof. IFJ PAN.

W akceleratorze LHC hadronizacja zachodzi niezwykle szybko, na dodatek w ekstremalnie małym obszarze wokół punktu zderzenia protonów: jego rozmiary sięgają zaledwie femtometrów, czyli milionowych części jednej miliardowej metra. Nic dziwnego, że bezpośrednia obserwacja tego procesu nie jest obecnie możliwa. Żeby zdobyć jakiegokolwiek informacje o jego przebiegu, fizycy muszą sięgać po różne metody pośrednie. Kluczową rolę odgrywa w nich podstawowe narzędzie mechaniki kwantowej: funkcja falowa, której właściwości odwzorowują cechy cząstek danego typu (warto zauważyć, że mimo upływu niemal 100 lat od narodzin mechaniki kwantowej, funkcja falowa nadal nie doczekała się jednoznacznej interpretacji fizycznej!).

„Funkcje falowe identycznych cząstek będą się na siebie efektywnie nakładały, czyli interferowały. Jeśli w wyniku interferencji dojdzie do ich wzmocnienia, mówimy o korelacjach Bosego-Einsteina, jeśli



Cząstki wyprodukowane w trakcie jednego ze zderzeń dwóch protonów o energiach 7 TeV każdy, zarejestrowane przez detektory eksperymentu LHCb w 2011 roku; widok z dwóch różnych ujęć. (Źródło: CERN, LHCb).

do wytłumienia – o korelacjach Fermiego-Diraca. W naszych analizach interesowały nas wzmocnienia, a więc korelacje Bosego-Einsteina. Poszukiwaliśmy ich między mezonami pi wylatującymi z obszaru hadronizacji w kierunkach bliskich pierwotnemu kierunkowi zderzających się wiązek protonów”, wyjaśnia doktorant Bartosz Małecki (IFJ PAN).

Metoda użyta przez krakowskich fizyków została oryginalnie opracowana dla potrzeb radioastronomii i nosi nazwę interferometrii HBT (od nazwisk jej dwóch twórców: Roberta Hanbury’ego Browna i Richarda Twissa). Użyta w odniesieniu do cząstek, interferometria HBT pozwala m.in. określić rozmiary obszaru hadronizacji i jego ewolucję w czasie. Za jej pomocą można zdobyć informacje na przykład o tym, czy obszar ten jest różny dla różnych liczb wyemitowanych cząstek bądź dla ich różnych rodzajów.

Dane z detektora LHCb umożliwiły badanie procesu hadronizacji w obszarze tzw. małych kątów, czyli dla hadronów produkowanych w kierunkach bliskich kierunkowi pierwotnych wiązek protonów.

Analiza wykonana przez grupę z IFJ PAN dostarczyła wskazówek, że parametry opisujące źródło hadronizacji w niezbadanym jak dotąd obszarze małych kątów, a dostępnym w eksperymencie LHCb, różnią się od wyników podobnych analiz wykonanych dla większych kątów w innych eksperymentach.

„Analiza, która dostarczyła tych ciekawych wyników, będzie kontynuowana w eksperymencie LHCb dla różnych energii zderzeń i różnych rodzajów zderzających się obiektów. Dzięki temu będzie można zweryfikować niektóre z modeli opisujących hadronizację, a w konsekwencji lepiej zrozumieć przebieg samego procesu”, podsumowuje prof. dr hab. Mariusz Witek (IFJ PAN).

Prace zespołu z IFJ PAN zostały sfinansowane m.in. z grantu OPUS Narodowego Centrum Nauki.

KONTAKT:

dr hab. inż. Marcin Kucharczyk, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628050
email: marcin.kucharczyk@cern.ch

PUBLIKACJE NAUKOWE:

LHCb Collab., R. Aaij, (J. Brodzicka, M. Chrząszcz, M. Jeżabek, Ag. Dziurda, M. Kucharczyk, T. Lesiak, B. Małecki, A. Ossowska, M. Pikies, M. Witek) et al., *Bose-Einstein correlations of same-sign charged pions in the forward region in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV*, J. High Energy Phys., **12** (2017) 025, doi: 10.1007/JHEP12(2017)025.



Kraków, 23 maja 2018

ASYMETRIA W PRODUKCJI MATERII I ANTYMATERII MOŻE ZABURZAĆ DETEKcję NEUTRIN

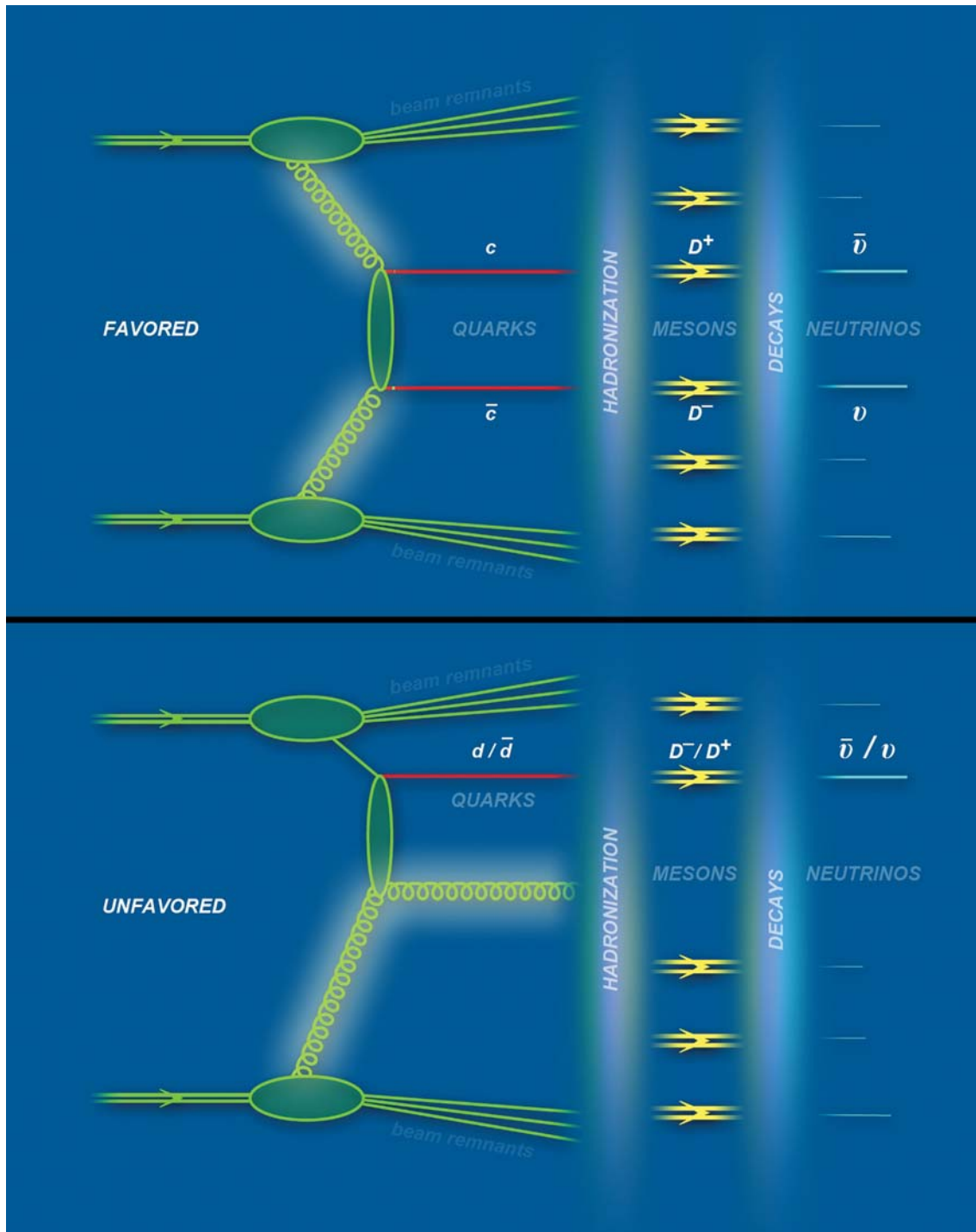
Z danych zebranych przez detektor LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów wynika, że cząstki znane jako mezony powabne oraz ich antymaterialne odpowiedniki nie są wytwarzane w idealnie równych proporcjach. Fizycy z Krakowa zaproponowali własne wyjaśnienie tego zjawiska i przedstawili związane z nim przewidywania, o konsekwencjach interesujących zwłaszcza dla astronomii wysokoenergetycznych neutrin.

W pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu Wszechświat był wypełniony równymi ilościami cząstek i antycząstek. Gdy stygł, materia i antymateria zaczęły łączyć się ze sobą i anihilować, zamieniając się w promieniowanie. Dlaczego część materii, z której zbudowany jest dzisiejszy Wszechświat, przetrwała pożogę? Aby rozszyfrować tę wielką zagadkę współczesnej nauki, fizycy starają się lepiej poznać wszelkie mechanizmy odpowiadające za nawet najmniejsze dysproporcje w produkcji cząstek i antycząstek. Grupa naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, związana z eksperymentem LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów w Genewie, przyjrzała się ostatnio jednemu z takich procesów: asymetrii pojawiającej się przy narodzinach mezonów i antymezonów powabnych. Co ciekawe, wnioski z analizy mogą mieć bardzo wymierne znaczenie praktyczne.

Zgodnie ze współczesną wiedzą, kwarki są najważniejszymi niepodzielnymi cegiełkami, z których składa się materia. Znamy je w sześciu rodzajach: są to kwarki górne (u), dolne (d), dziwne (s), powabne (c), piękne (b) i prawdziwe (t), przy czym każdy rodzaj ma także swój antymaterialny odpowiednik (często oznaczany kreską nad literą, czytana jako „bar”). Kwarki na ogół tworzą się w parach kwark-antykwar. Są cząstkami ekstremalnie towarzyskimi: niemal natychmiast po powstaniu wiążą się w hadrony, czyli zespoły dwóch, trzech, a niekiedy i więcej kwarków bądź antykwarków, spajanych za pomocą gluonów (czyli cząstek przenoszących silne oddziaływanie jądrowe). Proces łączenia się kwarków/antykwarów w kompleksy to tzw. hadronizacja.

Nietrwale hadrony zbudowane z pary kwark-antykwar nazwano mezonami. Jeśli w mezonie któryś z kwarków jest powabny, cząstkę określa się mianem mezonu powabnego i oznacza literą D (lub dla antykwarku powabnego: D z kreską). Para zbudowana z kwarku powabnego i antykwarku dolnego to mezon D^+ , a składająca się z antykwarku powabnego i kwarku dolnego to mezon D^- .

W pomiarach przeprowadzonych w ostatnim ćwierćwieczu, w tym niedawno w ramach eksperymentu LHCb, zauważono ciekawą asymetrię. Okazało się, że mezony D^+ i D^- nie zawsze są produkowane w dokładnie tych samych proporcjach. W przypadku procesów obserwowanych w LHCb, inicjowanych w zderzeniach przeciwbieżnych wiązek protonów o dużych energiach, asymetria ta była niewielka, poniżej jednego procenta.



44

Porównanie mechanizmów faworyzowanej i niefaworyzowanej fragmentacji kwarków. (Źródło: IFJ PAN).

„Kwarki powabne powstają głównie podczas zderzeń gluonów, a po narodzinach hadronizują w mezony D. My przyjrzelśmy się innemu mechanizmowi powstawania mezonów, znanemu jako nie-faworyzowana fragmentacja kwarków. Mezon tworzy się tu w wyniku oddziaływania jakiegoś kwarku lekkiego – czyli górnego, dolnego lub dziwnego – z odpowiadającym mu antykwarkiem. Za pomocą niuansów takiego mechanizmu wcześniej wyjaśniono asymetrię między kaonami i antykaonami, czyli mezonami K^+ i K^- . Dotychczas jednak nie sprawdzano, czy podobny mechanizm mógłby tłumaczyć asymetrię między stosunkowo masywnymi mezonami D^+ a D^- ”, mówi dr Rafał Maciuła (IFJ PAN), pierwszy autor publikacji w czasopiśmie „Physical Review D”.

Detektor LHCb mierzy głównie cząstki rozchodzące się z punktu zderzenia protonów pod dużymi kątami do pierwotnego kierunku ruchu tychże. Według krakowskich fizyków asymetria w produkcji mezonów D powinna być znacznie większa, jeśli uwzględni się cząstki produkowane „do przodu”, a więc wzdłuż kierunku wiązek protonów. Oznacza to, że obecnie obserwowana dysproporcja może być zaledwie czubkiem góry lodowej. Obliczenia sugerują, że w przypadku zderzeń „do przodu” niefaworyzowana fragmentacja ($d, u, s \rightarrow D$) może być porównywalna do typowej fragmentacji ($c \rightarrow D$). W efekcie asymetria między mezonami D^+ a D^- może sięgać nawet wielu procent, także przy energiach zderzeń niższych niż obecnie zachodzące w akceleratorze LHC.

Badania fizyków z IFJ PAN mogą nieść daleko idące konsekwencje dla obserwatoriów neutrinowych, takich jak detektor IceCube na Antarktydzie. Detektor ten, prowadzony przez 49 instytucji naukowych z 12 krajów, za pomocą tysięcy fotopowielaczy monitoruje kilometr sześcienny lodu znajdujący się niemal półtora kilometra pod powierzchnią. Fotopowielacze tropią subtelne błyski świetlne, inicjowane przez interakcję cząstek tworzących lód z neutrinami, cząstkami elementarnymi bardzo słabo oddziałującymi ze zwykłą materią.

IceCube rejestruje kilkaset neutrin dziennie. Wiadomo, że spora część z nich tworzy się w ziemskiej atmosferze w procesach zainicjowanych przez promieniowanie kosmiczne i zachodzących z udziałem protonów. Inne neutrino mogą pochodzić np. z jądra Ziemi lub ze Słońca. Przyjmuje się jednak, że neutrino o znacznych energiach dotarły do detektora bezpośrednio z odległych źródeł kosmicznych: supernowych lub zlewających się czarnych dziur bądź gwiazd neutronowych.

„Przy interpretowaniu danych z detektora IceCube uwzględnia się produkcję neutrin w ziemskiej atmosferze wywołaną zwykłym promieniowaniem kosmicznym, w tym zderzeniami z udziałem protonów. Rzecz w tym, że część tych procesów, skutkująca powstaniem neutrin o dużych energiach, odbywa się z udziałem mezonów D. Tymczasem my pokazujemy, że mechanizm produkcji tych mezonów w atmosferze może być znacznie bardziej wydajny niż się dotychczas wydawało. Jeśli więc nasze przypuszczenia się potwierdzą, część zarejestrowanych neutrin wysokoenergetycznych, teraz uznawanych za kosmiczne, w rzeczywistości powstała tuż nad naszymi głowami i zaburza rzeczywisty obraz wydarzeń w głębi kosmosu”, tłumaczy prof. dr hab. Antoni Szczurek (IFJ PAN).

Gdy widać zaledwie czubek góry lodowej, wnioskowanie na temat wyglądu jej reszty jest więcej niż ryzykowne. Model zaproponowany przez krakowskich fizyków ma dziś status hipotezy. Być może w pełni opisuje mechanizm zachodzący w rzeczywistości. Ale może być też tak, że za asymetrię w produkcji mezonów D odpowiadają inne procesy, może częściowo, a może nawet w całości.

„Na szczęście żadna konkurencyjna propozycja nie przewiduje tak wyraźnego wzrostu asymetrii w produkcji mezonów D przy mniejszych energiach zderzeń. Żeby sprawdzić nasze przypuszczenia, wystarczyłoby więc w akceleratorze LHC skierować pojedynczą wiązkę na nieruchomą tarczę, co znacząco zredukowałoby energię zderzeń. Nasz model spełnia zatem kryteria bardzo rzetelnej nauki: nie tylko wyjaśnia dotychczasowe obserwacje, ale przede wszystkim można go szybko zweryfikować. Na dodatek można to zrobić bardzo tanio!”, podsumowuje prof. Szczurek.

Badania nad asymetrią w produkcji mezonów powabnych sfinansowano ze środków statutowych IFJ PAN i grantu Narodowego Centrum Nauki.

KONTAKT:

prof. dr hab. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628212
email: antoni.szczurek@ifj.edu.pl

dr Rafał Maciuła
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628240
email: rafal.maciula@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

R. Maciuła, A. Szczurek, *D meson production asymmetry, unfavored fragmentation, and consequences for prompt atmospheric neutrino production*, Phys. Rev. D, **97** (2018) 074001, doi: 10.1103/PhysRevD.97.074001.



Kraków, 19 maja 2016

ZDERZENIA FOTONÓW: JEST REALNA SZANSA NA ŚWIETLNY BILARD!

Gdy podczas rozgrywki snookera jedna bila uderzy w drugą, obie sprężycie i odskoczą od siebie. W przypadku dwóch fotonów podobnego procesu – zderzenia elastycznego – jeszcze nigdy nie udało się zaobserwować. Fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazali jednak, że taki proces nie tylko powinien zachodzić, ale nawet będzie mógł być wkrótce zarejestrowany w zderzeniach ciężkich jonów w akceleratorze LHC.

46

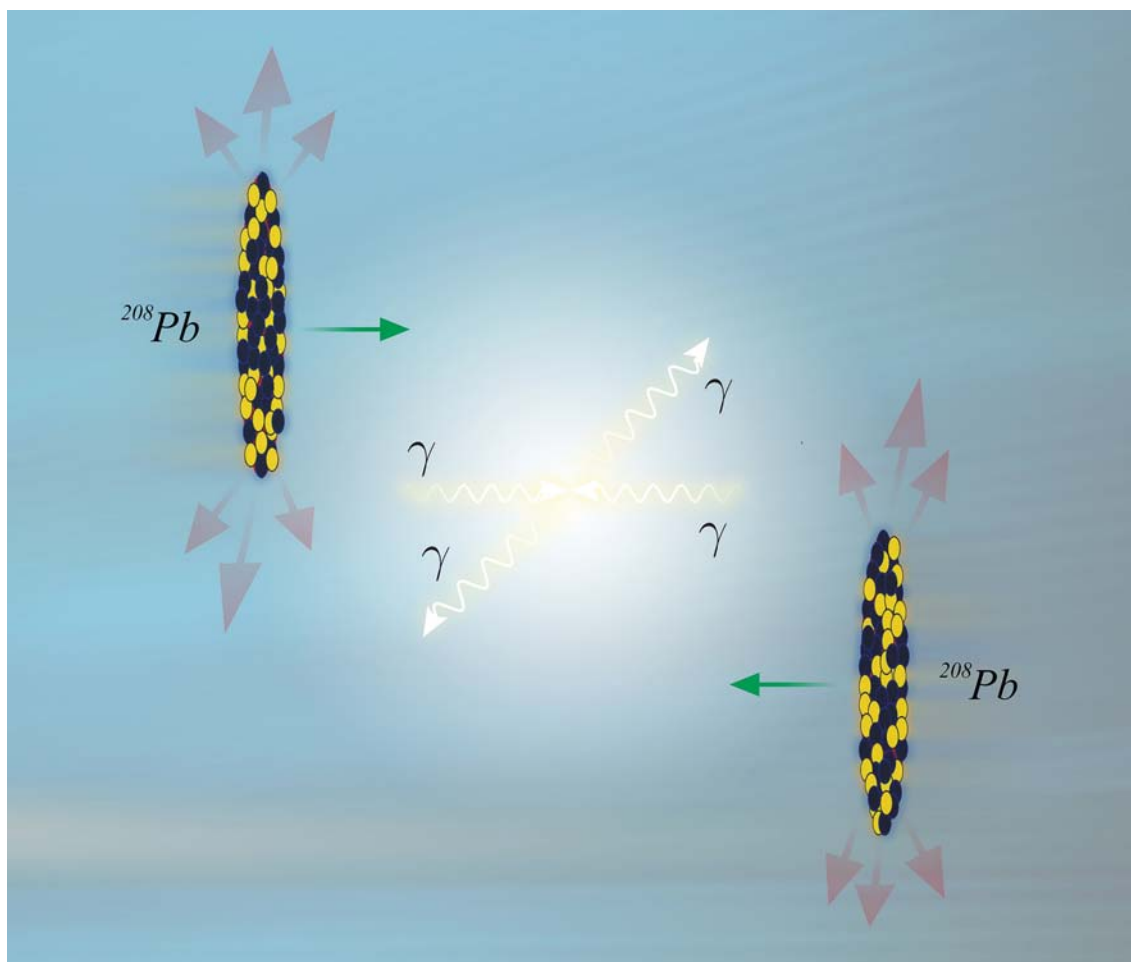
Czy fotony mogą się zderzać ze sobą podobnie jak kule bilardowe: sprężycie, po kolizji rozbiegając się w różne strony? Takiego przebiegu interakcji między cząstkami światła jeszcze nigdy nie udało się zobaczyć, nawet w LHC, najpotężniejszym akceleratorze świata. Być może stanie się to wkrótce – dzięki bardzo szczegółowej analizie przebiegu zjawiska, dokonanej przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie i opublikowanej w czasopiśmie „Physical Review C”.

Wstępne analizy elastycznego rozpraszania fotonów na fotonach zostały zaprezentowane kilka lat temu w jednym z opracowań fizyków Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN). Jednak krakowscy naukowcy, finansowani z grantu OPUS Narodowego Centrum Nauki, zbadali proces znacznie dokładniej. Nie tylko oszacowali, czy do zderzeń dojdzie, ale także uwzględnili więcej mechanizmów interakcji między fotonami i przewidzieli, w których kierunkach po zderzeniu polecą najwięcej fotonów i czy będą one mogły być zmierzone. Wyniki pozwalają przypuszczać, że przynajmniej część fotonów odchylnych wskutek elastycznych zderzeń powinna trafić do wnętrza detektorów zainstalowanych w LHC przy eksperymentach ATLAS, CMS i ALICE. Jeśli więc opisywane zjawisko rzeczywiście zachodzi, a wszystko na to wskazuje, to jego zaobserwowanie staje się możliwe już w najbliższych kilku latach.

„Elastyczne zderzenia fotonów z fotonami wydawały się dotychczas bardzo mało prawdopodobne. Wielu fizyków uznawało, że zarejestrowanie takich zderzeń w akceleratorze LHC jest wręcz niemożliwe. Tymczasem my udowadniamy, że zjawisko może być widoczne, choć nie w kolizjach protonów, które zachodzą dużo częściej”, mówi prof. dr hab. Antoni Szczurek (IFJ PAN).

Akcelerator LHC zderza wiązki protonów z protonami albo wiązki jąder łożowiu z jądrami łożowiu. Wcześniej w IFJ PAN pokazano, że gdyby w zderzeniach protonów dochodziło do elastycznych kolizji między fotonami, proces i tak byłby niewidoczny: przesłoniłyby go fotony wyemitowane w innym mechanizmie (inicjowanym przez gluony, cząstki przenoszące silne oddziaływanie jądrowe). Na szczęście krakowscy naukowcy mieli w zanadrzu kilka innych pomysłów.

Wedle zasad optyki klasycznej, światło ze światłem nie oddziałuje. Fotony mogą jednak wchodzić w interakcję między sobą dzięki procesom kwantowym. Gdy dwa fotony przelatują koło siebie, nic nie stoi na przeszkodzie, żeby na ekstremalnie krótką chwilę wytworzyły się między nimi wirtualne pętle



Podczas ultraperyferycznych zderzeń jąder ołowiu w akceleratorze LHC może dojść do sprężystych zderzeń fotonów. (Źródło: IFJ PAN).

z kwarków lub leptonów (do których należą elektrony, miony, taony, stowarzyszone z nimi neutrino oraz ich antycząstki). Cząstki takie miałyby charakter wirtualny, co oznacza, że nie można ich zaobserwować. Jednak mimo swej wirtualności byłyby one odpowiedzialne za oddziaływanie między fotonami, po którym ponownie przekształcałyby się w rzeczywiste fotony. Dla obserwatora z zewnątrz cały proces wyglądałby tak, jakby jeden foton odbijał się od drugiego fotonu.

Niestety, fotony generowane przez nawet najpotężniejsze współczesne źródła światła mają energie liczone zaledwie w milionach elektronowoltów. Wedle standardów współczesnej fizyki jądrowej i cząstek elementarnych to wartości po prostu małe. Przy takich energiach prawdopodobieństwo zderzenia fotonu z fotonem z udziałem procesu kwantowego jest znikome, a strumienie fotonów, niezbędne do jego wystąpienia, musiałyby być gigantyczne.

„W tej sytuacji postanowiliśmy sprawdzić, czy do elastycznych zderzeń fotonów z udziałem cząstek wirtualnych może dojść podczas kolizji ciężkich jonów. I to był strzał w dziesiątkę! Duże ładunki elektryczne jąder ołowiu mogą bowiem prowadzić do narodzin fotonów. Jeśli proces zajdzie w zderzeniach jąder, które właśnie się mijają, foton generowany przez jedno jądro ma szansę zderzyć się z fotonem wytworzonym przez drugie. Wyliczyliśmy, że prawdopodobieństwo takiego przebiegu wydarzeń co prawda jest niewielkie, lecz niezerowe. Wszystko więc wskazuje, że proces można byłoby zaobserwować!”, mówi dr Mariola Kłusek-Gawenda (IFJ PAN).

Co ciekawe, zderzenia badane teoretycznie przez krakowskich fizyków były bardzo specyficzne: analizowano nie tyle bezpośrednie kolizje jednego jądra ołowiu z drugim, ile procesy zachodzące bez bezpośredniego kontaktu jąder. Do interakcji dochodzi wtedy między polami elektromagnetycznymi obu jąder atomowych, które mogą przelatywać względem siebie nawet w dużych odległościach. Zderzenia tego typu są nazywane ultraperyferycznymi.

Potencjalnie fotony mogą oddziaływać między sobą także wskutek innego procesu: gdy przekształcą się kwantowo w wirtualne mezony, czyli cząstki zbudowane z par kwark-antykwar. Tak wyprodukowane mezony mogłyby oddziaływać ze sobą za pomocą silnych oddziaływań jądrowych – a więc tych sił fundamentalnych, które odpowiadają za związanie kwarków w protonach czy neutronach. Mechanizm ten fizycy z IFJ PAN zaprezentowali jako pierwsi. Wydaje się jednak, że zaobserwowanie świetlnych kolizji z jego udziałem na razie nie będzie możliwe: fotony po delikatnym odbiciu od siebie po prostu przelatują obok detektorów działających obecnie przy akceleratorze LHC.

W badaniach nad elastycznymi zderzeniami fotonów z fotonami nie chodzi wyłącznie o lepsze zrozumienie już znanej fizyki. Potencjalnie w procesy kwantowe przenoszące oddziaływania między fotonami mogą być zaangażowane także cząstki elementarne, których jeszcze nie znamy. Gdyby więc pomiary elastycznego rozpraszania fotonów na fotonach dostarczyły innych wyników niż przewidywane przez krakowskich fizyków, mógłby to być sygnał prowadzący naukę ku zjawiskom zachodzącym z udziałem zupełnie nowej fizyki.

KONTAKT:

prof. dr hab. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628212
email: antoni.szczurek@ifj.edu.pl

PRACE NAUKOWE:

M. Kłusek-Gawenda, P. Lebedowicz, A. Szczurek, Light-by-light scattering in ultraperipheral Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider, *Phys. Rev. C*, **93** (2016) 044907, doi: 10.1103/PhysRevC.93.044907.



W LHC POWABNE BLIŹNIAKI WKRÓTCE ZDOMINUJĄ JEDYNAKÓW

W obszarze energii penetrowanym przez akcelerator LHC zaczyna dominować nowy mechanizm kreacji cząstek, stwierdzili naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Konfrontacja przewidywań teoretycznych z danymi z pomiarów nie pozostawia wątpliwości: energie zderzeń są obecnie tak duże, że jedno z cząstek elementarnych, mezony zawierające kwarki powabne, zaczynają powstawać w parach równie często jak pojedynczo – a nawet częściej!

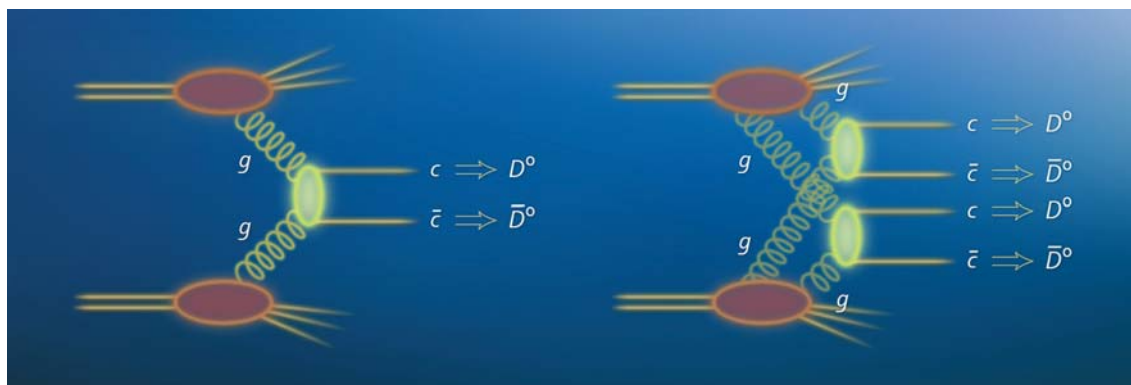
49

Zderzenie protonu z protonem jest niezwykle złożonym procesem fizycznym. W wyniku skomplikowanych oddziaływań powstaje wtedy wiele różnych cząstek. Dotychczas w badaniach prowadzonych we współczesnych akceleratorach cząstek (RHIC, Tevatron czy obecnie LHC) wśród produktów takich zderzeń rejestrowano m.in. mezony D^0 , które pojawiały się pojedynczo. Jednak od niedawna LHC rozpędza protony do granic swoich możliwości. W nowym zakresie energii zaobserwowano ciekawy efekt: tam, gdzie wcześniej powstawały pojedyncze mezony D^0 , teraz widać je dwójkami. Naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie wyjaśnili istotę tego zjawiska i wykazali, że wraz ze wzrostem energii musi ono odgrywać rolę dominującą w produkcji cząstek powabnych. Najnowsze badania, których wyniki opublikowano w czasopiśmie „Physics Letters B”, przeprowadzono we współpracy z rosyjskimi fizykami z Państwowego Uniwersytetu Lotniczego w Samarze.

„Już kilka lat temu jako pierwsi przewidzieliśmy, że w wyniku zderzeń protonów o dostatecznie dużych energiach powinniśmy widzieć więcej mezonów powabnych powstających w parach niż pojedynczo. Nasza najnowsza publikacja nie tylko szczegółowo opisuje, dlaczego tak się dzieje, ale także udowadnia, że efekt ten rzeczywiście jest już doskonale widoczny w akceleratorze LHC”, mówi prof. dr hab. Antoni Szczurek (IFJ PAN).

Zgodnie z obecnie używanym przez fizyków Modelem Standardowym, cząstki, które uważamy za elementarne, pełnią różne funkcje. Bozony przenoszą oddziaływania: fotony – elektromagnetyczne, gluony – jądrowe silne, a bozony W^+ , W^- i Z^0 – jądrowe słabe. Materię tworzą fermiony. Należą do nich leptony – czyli elektrony, miony, taony oraz powiązane z nimi neutrino – oraz kwarki: dolne, górne, dziwne, powabne, piękne i prawdziwe. Trzy pierwsze rodzaje kwarków są nazywane lekkimi, trzy ostatnie – ciężkimi. Dodatkowo każdy kwark i lepton ma swojego antymaterialnego partnera. Dopełnieniem całości jest bozon Higgosa, który nadaje cząstkom masę (wszystkim oprócz gluonów i fotonów).

W naszym codziennym świecie kwarki ciężkie występują w niewielkich ilościach i pojawiają się tylko na niezwykle krótki czas, głównie w atmosferze Ziemi. Cała widzialna, stabilna materia, w tym protony i neutrony, z których są zbudowane atomy, składa się z kwarków dolnych i górnych. Gdy jednak dochodzi do zderzeń cząstek o dostatecznych energiach, mogą się pojawiać kwarki ciężkie. W przypadku



Produkcja mezonów i antymezonów D^0 w wyniku oddziaływań gluonów g . Po lewej mechanizm powstawania pojedynczej pary, po prawej – narodziny dwóch par. (Źródło: IFJ PAN)

kwarków powabnych (czyli najmniej masywnych kwarków ciężkich) dominującym procesem ich kreacji jest fuzja dwóch gluonów. W LHC dochodzi do niej podczas zderzeń protonu z protonem. Wskutek fuzji powstaje para kwark-antykwarek. Ani kwark, ani antykwarek nie mogą istnieć samodzielnie, dlatego szybko wiążą się w pary z innymi kwarkami. Gdy w takiej parze jednym z kwarków jest kwark powabny, cząstkę nazywamy mezonem D, gdy antykwarek powabny – antymezonem D.

„Przy niższych energiach wynikiem zderzenia gluonów zwykle są dwie cząstki: mezon D^0 i jego antypartner, czyli antymezon D^0 . My pokazaliśmy, że energie wytwarzane w akceleratorze LHC są jednak już tak duże, że w trakcie jednego zderzenia gluony rozpraszają się nie raz, a dwa lub nawet więcej razy. Efektem pojedynczego zderzenia może być wtedy nie jeden mezon D^0 , lecz dwa lub nawet więcej – plus, naturalnie, odpowiednie antymezony”, wyjaśnia prof. Szczurek.

Fizycy często nazywają kwarki i gluony partonami. Wielokrotne rozpraszanie partonów było zjawiskiem przewidzianym już wcześniej. Nie zajmowano się nim jednak bliżej, ponieważ nigdy nie grało istotnej roli w badanych procesach. Teraz w IFJ PAN pokazano, że sytuacja się zmieniła. Energie w akceleratorach są już tak duże, że wielokrotne rozpraszanie partonów staje się wiodącym mechanizmem odpowiedzialnym za produkcję mezonów i antymezonów powabnych. Analizę teoretyczną wsparło pomiarami zebranymi przez grupę LHCb, prowadzącą jeden z czterech głównych eksperymentów realizowanych przy akceleratorze LHC.

„W danych z eksperymentu LHCb widać wiele przypadków, gdy zamiast jednego mezonu D^0 mamy dwa. Jest to dokładnie ten efekt, którego oczekiwaliśmy: produkcja bliźniaków zaczyna być równie prawdopodobna jak produkcja jedynaków. W przyszłych akceleratorach, takich jak wstępnie projektowany Future Circular Collider, czyli następcę LHC, zjawisko to zacznie odgrywać wręcz dominującą rolę w produkcji cząstek powabnych. Zapewne zobaczymy wtedy także zderzenia, których efektem będą nie dwa, a trzy i więcej mezonów”, mówi dr Rafał Maciuła (IFJ PAN).

Potencjalnie wielokrotne rozpraszanie partonów może prowadzić do powstawania mezonów zawierających inne ciężkie kwarki, np. kwarki piękne. Obliczenia krakowskich fizyków pokazują jednak, że przy obecnych energiach zderzeń w LHC procesy te są znacznie mniej prawdopodobne. Ma to związek z masami kwarków: im większa masa, tym mniejsze prawdopodobieństwo produkcji, a kwarki piękne są zdecydowanie bardziej masywne od kwarków powabnych.

„Na razie musimy zadowolić się stwierdzeniem, że przy produkcji bliźniaków powab okazuje się znacznie korzystniejszy od piękna”, komentuje z przymrużeniem oka prof. Szczurek.

Analizy i przewidywania fizyków z IFJ PAN mają istotne znaczenie nie tylko dla projektantów przyszłych wielkich akceleratorów cząstek, ale także dla współczesnych eksperymentów dotyczących rejestracji neutrin napływających z kosmosu, takich jak słynny detektor IceCube na Antarktydzie. Ograniczenia fizyczne i technologiczne powodują, że detektorów neutrin nie można budować w kosmosie. Tymczasem istnieje ryzyko, że część neutrin rejestrowanych przez urządzenia na lub pod powierzchnią Ziemi powstaje w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego o dużej energii z atmosferą naszej planety. Zderzając się z atomami i cząsteczkami atmosfery, promieniowanie kosmiczne może bowiem tworzyć kwarki powabne, które następnie przekształcają się w nietrwałe mezony D. Problem

w tym, że jednymi z produktów rozpadów mezonów D mogą być właśnie neutrina i antyneutrina. Badania nad wielokrotnym rozpraszaniem partonów mogą więc pomóc w ustaleniu, ile neutrin zaobserwowanych w detektorach rzeczywiście dotarło do nas z głębi kosmosu, a ile jest tylko szumem wynikającym z obecności atmosfery.

KONTAKT:

prof. dr hab. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628212
email: antoni.szczurek@ifj.edu.pl

dr Rafał Maciuła
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628240
email: rafal.maciula@ifj.edu.pl

PRACE NAUKOWE:

R. Maciuła, V.A. Saleev, A.V. Shipilova, A. Szczurek, *New mechanisms for double charmed meson production at the LHCb*, Phys. Lett. B, 758 (2016) 458-464, doi: 10.1016/j.physletb.2016.05.052.



Kraków, 14 lutego 2018

POSZUKIWANIA CIEMNEJ MATERII: KURCZĄ SIĘ KRYJÓWKI DLA AKSJONÓW

Gdyby istniały, aksjony – jedne z kandydatów na cząstki zagadkowej ciemnej materii – mogłyby oddziaływać z materią tworzącą nasz świat, jednak musiałyby to robić znacznie, znacznie słabiej niż się dotychczas wydawało. Nowe, rygorystyczne ograniczenia na właściwości aksjonów narzucił międzynarodowy zespół naukowców odpowiedzialnych za eksperyment nEDM.

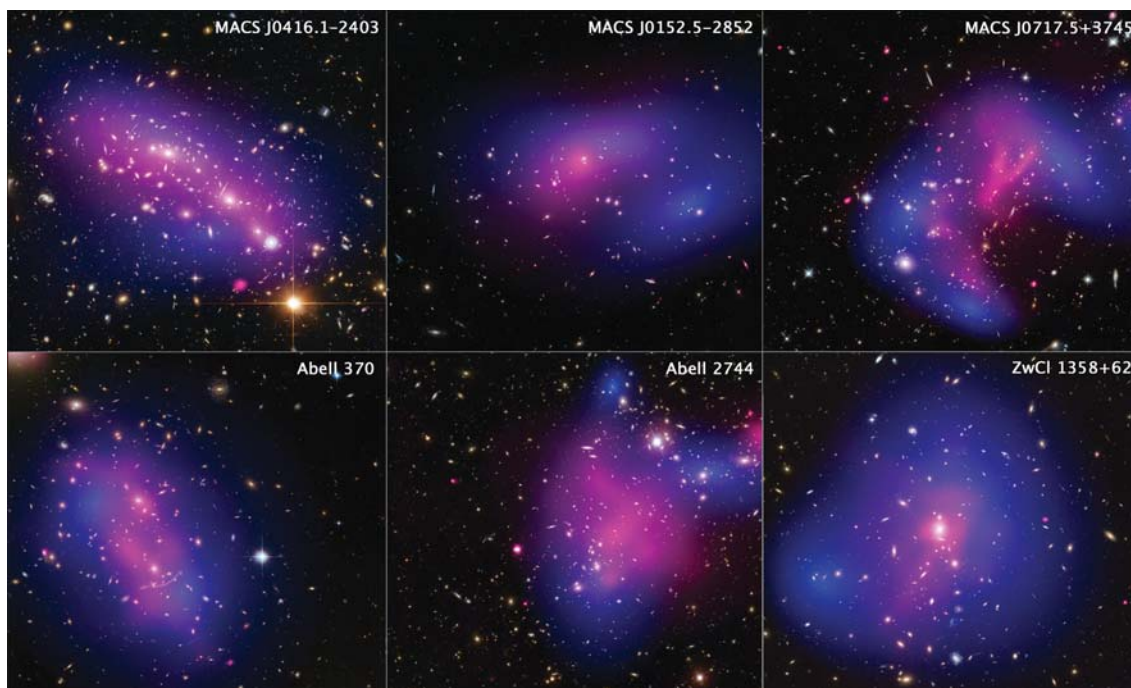
52

Do zaskakujących wniosków doprowadziła najnowsza analiza pomiarów właściwości elektrycznych ultrazimnych neutronów, opublikowana w czasopiśmie naukowym „Physical Review X”. Na podstawie danych zebranych w eksperymencie nEDM (Electric Dipole Moment of Neutron) międzynarodowa grupa fizyków – w tym krakowscy naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) i Uniwersytetu Jagiellońskiego – w nowatorski sposób wykazała, że aksjony, hipotetyczne cząstki mogące tworzyć zimną ciemną materię, gdyby istniały, musiałyby spełniać znacznie bardziej rygorystyczne niż dotychczas sądzono ograniczenia dotyczące ich masy i sposobów oddziaływania ze zwykłą materią. Zaprezentowane wyniki są pierwszymi danymi laboratoryjnymi narzucającymi limity na potencjalne oddziaływania aksjonów z nukleonami (czyli protonami bądź neutronami) i gluonami (cząstkami spajającymi kwarki w nukleonach).

„Pomiary elektrycznego momentu dipolowego neutronów są prowadzone przez naszą międzynarodową grupę od dobrych kilkunastu lat. Przez większość tego czasu nikt z nas nie przypuszczał, że w zgromadzonych danych mogłyby się kryć jakiegokolwiek ślady związane z potencjalnymi cząstkami ciemnej materii. Dopiero niedawno teoretycy zasugerowali taką możliwość – a my skwapliwie skorzystaliśmy z okazji do zweryfikowania hipotez o właściwościach aksjonów”, mówi uczestniczący w eksperymencie dr hab. Adam Kozela (IFJ PAN).

Na pierwsze ślady ciemnej materii natrafiono podczas analiz ruchów gwiazd w galaktykach i galaktyk w gromadach galaktyk. Pionierem statystycznych badań ruchów gwiazd był polski astronom Marian Kowalski. Już w 1859 roku zauważył on, że ruchów bliskich nam gwiazd nie da się wytłumaczyć samym ruchem Słońca. Była to pierwsza przesłanka obserwacyjna sugerującą obrót Drogi Mlecznej (Kowalski jest więc tym człowiekiem, który „ruszył z posad” galaktykę). W 1933 roku Szwajcar Fritz Zwicky poszedł krok dalej. Kilkoma metodami przeanalizował ruchy obiektów w gromadzie galaktyk Coma. Zauważył wtedy, że poruszają się one tak, jakby w ich otoczeniu znajdowała się znacznie większa ilość materii niż dostrzegana przez astronomów.

Mimo dekad poszukiwań, do dziś nie jest znana natura ciemnej materii, której we Wszechświecie (jak sugerują pomiary mikrofalowego promieniowania tła) powinno być niemal 5,5 razy więcej niż zwykłej materii. Teoretycy skonstruowali całe zoo modeli przewidujących istnienie mniej lub bardziej egzotycznych cząstek mogących odpowiadać za istnienie ciemnej materii. Wśród kandydatów są



Rozmieszczenie ciemnej materii (w kolorze niebieskim) w sześciu gromadach galaktyk, odtworzone na podstawie zdjęć z kosmicznego teleskopu Hubble'a. (Źródło: NASA, ESA, STScI, and CXC).

m.in. aksjony. Gdyby istniały, te ekstremalnie lekkie cząstki oddziaływałyby ze zwykłą materią niemal wyłącznie grawitacyjnie. Niemał, gdyż dotychczasowe modele przewidywały, że w pewnych sytuacjach foton mógłby się zamienić w aksjon, a ten po pewnym czasie przekształcałby się z powrotem w foton. To hipotetyczne zjawisko było i jest podstawą słynnych eksperymentów „świecenia przez ścianę”. W ich trakcie naukowcy kierują intensywną wiązkę światła laserowego na grubą przeszkodę licząc, że przynajmniej nieliczne fotony zmieniają się w aksjony, który przeniknęłyby przez ścianę bez większych problemów. Po przejściu przez ścianę niektóre aksjony mogłyby z powrotem stać się fotonami o cechach dokładnie takich jak fotony pierwotnie padające na ścianę.

Eksperymenty związane z pomiarem elektrycznego momentu dipolowego neutronów, prowadzone przez grupę naukowców z Australii, Belgii, Francji, Niemiec, Polski, Szwajcarii i Wielkiej Brytanii, nie mają nic wspólnego z fotonami. Aparatura pomiarowa początkowo znajdowała się w Institut Laue–Langevin (ILL) w Grenoble (Francja), obecnie funkcjonuje w Laboratory for Particle Physics w Paul Scherrer Institute (PSI) w Villigen (Szwajcaria). W prowadzonych od kilkunastu lat eksperymentach naukowcy mierzą zmiany częstotliwości magnetycznego rezonansu jądrowego (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) neutronów oraz atomów rtęci znajdujących się w komorze próżniowej, w obecności pól elektrycznego, magnetycznego i grawitacyjnego. Pomiary te pozwalają wyciągać wnioski o sposobach precesji neutronów i atomów rtęci, a w konsekwencji – o ich dipolowych momentach elektrycznych.

Ku zaskoczeniu wielu fizyków, w ostatnich latach pojawiły się prace teoretyczne przewidujące możliwość dodatkowego oddziaływania aksjonów: z gluonami i nukleonami. W zależności od masy aksjonów, oddziaływania te mogłyby skutkować mniejszymi lub większymi zaburzeniami o charakterze oscylacji dipolowych momentów elektrycznych nukleonów, a nawet całych atomów. Przewidywania teoretyków oznaczały, że eksperymenty prowadzone w ramach współpracy nEDM mogą zawierać wartościowe informacje dotyczące istnienia i właściwości potencjalnych cząstek ciemnej materii.

„W danych z eksperymentów w PSI nasi koledzy prowadzący analizę szukali zmian częstotliwości o okresach rzędu minut, a w wynikach z ILL – rzędu dni. Te ostatnie pojawiłyby się, gdyby istniał wiatr aksjonów, czyli gdyby aksjony w przestrzeni wokółziemskiej poruszały się w określonym kierunku. Skoro bowiem Ziemia wiruje, nasz sprzęt pomiarowy o różnych porach dnia zmieniałby swoją orientację względem wiatru aksjonów, a to powinno skutkować cyklicznymi, dobowymi zmianami w rejestrowanych przez nas oscylacjach”, tłumaczy dr Kozela.

Wyniki poszukiwań okazały się negatywne: nie natrafiono na żaden ślad istnienia aksjonów o masach między 10-24 a 10-17 elektronowolta (dla porównania: masa elektronu wynosi ponad pół miliona elektronowoltów). Dodatkowo naukowcom udało się 40-krotnie zaostrzyć ograniczenia narzucane przez teorię na oddziaływanie aksjonów z nukleonami. W przypadku potencjalnych oddziaływań z gluonami obostrzenia wzrosły jeszcze bardziej, ponadtysięckrotnie. Jeśli więc aksjony istnieją, w obecnych modelach teoretycznych mają coraz mniej miejsc, w których mogłyby się skrywać.

KONTAKT:

dr hab. Adam Kozela
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 662 8290, +48 12 662 6120
email: adam.kozela@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

C. Abel, (A. Kozela) et al., *Search for axionlike dark matter through nuclear spin precession in electric and magnetic fields*, Phys. Rev. X, 7 (2017) 041034, doi: 10.1103/PhysRevX.7.041034.



**NA TROPIE ZAGADEK
KOSMOSU**



W CENTRUM NASZEJ GALAKTYKI ODKRYTO ŹRÓDŁO PRZYSPIESZAJĄCE CZĄSTKI PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO DO NIESPOTYKANEJ ENERGII

Od ponad dziesięciu lat Obserwatorium H.E.S.S. w Namibii, prowadzone przez międzynarodową współpracę 42 instytucji z 12 krajów (w tym z Polski), prowadzi obserwacje centrum naszej Galaktyki w promieniach gamma bardzo wysokich energii. Promienie gamma są wytwarzane przez promieniowanie kosmiczne z najbardziej centralnych obszarów naszej Galaktyki. Szczegółowa analiza najnowszych obserwacji, opublikowana w dniu 16 marca 2016 roku w czasopiśmie *Nature*, ujawnia po raz pierwszy źródło tego kosmicznego promieniowania o energii nigdy dotychczas nie obserwowanej – masywną czarną dziurę, mogącą przyspieszać cząstki promieniowania kosmicznego do energii sto razy większej niż te osiągnięte w największym naziemnym akceleratorze cząstek LHC w CERN.

Ziemia jest stale bombardowana przez wysokoenergetyczne cząstki (protony, elektrony i jądra atomowe) pochodzenia kosmicznego, które tworzą tak zwane promieniowanie kosmiczne. Cząstki promieniowania kosmicznego posiadają ładunek elektryczny, a co za tym idzie są mocno odchylane przez międzygwiazdowe pole magnetyczne, które przenika naszą Galaktykę. Drogi cząstek promieniowania kosmicznego w kosmosie są przez te odchylenia przypadkowe, co uniemożliwia bezpośrednią identyfikację źródeł astrofizycznych odpowiedzialnych za ich powstawanie. Z tego powodu, pochodzenie promieni kosmicznych jest od stu lat jedną z najgłębszych tajemnic nauki. Na szczęście, promienie kosmiczne oddziałują ze światłem i gazem w miejscu powstawania, wytwarzając promieniowanie gamma. Fotony promieniowania gamma przemieszczają się po liniach prostych, nieodchylone przez pole magnetyczne, przez co można określić ich pochodzenie. Gdy promień gamma o bardzo wysokiej energii dociera do Ziemi, oddziałuje z cząsteczką w górnych warstwach atmosfery tworząc kaskadę cząstek wtórnych, które emitują krótki impuls tak zwanego „światła Czerenkowa”. Rejestrując te błyski światła przy użyciu teleskopów wyposażonych w duże zwierciadła, czułe detektory i szybką elektronikę, w ciągu ostatnich trzech dekad udało się zidentyfikować ponad 100 źródeł promieniowania gamma o bardzo wysokiej energii. Obserwatorium H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) w Namibii reprezentuje najnowszą generację tego typu instrumentów. Obserwatorium prowadzone jest przez naukowców z 42 instytucji w 12 krajach, w tym przez polski zespół badaczy z 5 uniwersytetów i instytutów PAN.



©Dr Mark A. Garlick/H.E.S.S. Collaboration

Artystyczna wizja procesu emisji promieniowania gamma z wielkiego obłoku molekularnego otaczającego centrum Galaktyki bombardowanego przez wysokoenergetyczne protony pochodzące z okolic centralnej czarnej dziury.

58

Z prowadzonych w ostatnich latach badań wiemy, że promienie kosmiczne o energiach sięgających 100 teraelektronowoltów (TeV)¹ są produkowane w naszej Galaktyce przez obiekty takie jak pozostałości po supernowych i mgławice pulsarowe. Teoretyczne argumenty i bezpośredni pomiar promieniowania kosmicznego docierającego do Ziemi wskazują jednak, że kosmiczne fabryki promieniowania w naszej Galaktyce powinny być w stanie przyspieszyć cząstki do energii co najmniej jednego petaelektronowolta (PeV)². Choć w ciągu ostatnich lat odkryto wiele kosmicznych akceleratorów o energiach rzędu kilku TeV, do tej pory poszukiwania galaktycznych źródeł promieniowania kosmicznego najwyższych energii pozostawały bezskuteczne.

Szczegółowe obserwacje centrum naszej Galaktyki, wykonane przez Obserwatorium H.E.S.S. w ciągu ostatnich dziesięciu lat, a dziś opublikowane w czasopiśmie Nature, wreszcie doprowadziły do przełomowego odkrycia. W ciągu pierwszych trzech lat obserwacji zespół H.E.S.S. odkrył bardzo mocne punktowe źródło promieniowania gamma w centrum Galaktyki, a także rozproszoną emisję promieniowania gamma z olbrzymich obłoków molekularnych, które otaczają to źródło w promieniu około 500 lat świetlnych. Te obłoki molekularne są bombardowane przez promieniowanie kosmiczne poruszające się z prędkością bliską prędkości światła przez co wytwarzają promieniowanie gamma w wyniku oddziaływania cząstek z materią obłoków. Zdziwiająca zgodność pomiędzy gęstością materii w obłokach a miejscem emisji promieniowania gamma wskazuje na obecność jednego lub więcej akceleratorów promieni kosmicznych w tym regionie. Jednak natura tych źródeł pozostawała tajemnicą.

¹ 1 TeV = 10^{12} eV, odpowiada energii tysiąc miliardów większej niż energia promieniowania widzialnego.

² 1 PeV = 1000 TeV = 10^{15} eV

Bardziej szczegółowe obserwacje uzyskane przez obserwatorium H.E.S.S. między 2004 a 2013 rokiem rzucają nowe światło na procesy tworzenia promieni kosmicznych w tym regionie. Według Aiona Viana (MPIK, Heidelberg), „bezprecedensowa ilość danych i postęp w metodach analitycznych pozwala nam mierzyć jednocześnie rozkład przestrzenny i energię promieni kosmicznych.” Z tych unikalnych pomiarów naukowcy H.E.S.S. są po raz pierwszy w stanie wskazać źródła tych cząstek: „Gdzieś w środkowym obszarze naszej Galaktyki o promieniu około 30 lat świetlnych znajduje się astrofizyczne źródło zdolne do przyspieszania protonów do energii około petaelektronowolta, nieprzerwanie od co najmniej 1000 lat”, mówi Emmanuel Moulin (CEA Saclay). W sposób analogiczny do „Tevatronu”, pierwszego akceleratora zbudowanego przez człowieka, który osiągnął energię 1 teraelektronowolta (TeV), ta nowa klasa kosmicznych akceleratorów została nazwana „Pevatronami”. „Dzięki H.E.S.S. jesteśmy w stanie prześledzić propagację protonów PeV w centralnej części Galaktyki”, dodaje Stefano Gabici (CNRS, Paryż).

W centrum naszej Galaktyki znajduje się wiele obiektów zdolnych do wytwarzania promieniowania kosmicznego o wysokiej energii, w tym, w szczególności, pozostałość supernowej, mgławica pulsarowa, czy zwarta gromada masywnych gwiazd. Jednak „supermasywna czarna dziura znajdująca się w centrum Galaktyki, zwana Sgr A*, jest najbardziej prawdopodobnym źródłem protonów PeV”, mówi Felix Aharonian (MPIK w Heidelbergu i DIAS w Dublinie), dodając, że „można rozważyć kilka możliwych obszarów przyspieszenia cząstek, zarówno w bezpośrednim sąsiedztwie czarnej dziury, lub dalej, gdzie część materiału spadającego na czarną dziurę jest wyrzucana do otoczenia, co może inicjować przyspieszenie cząstek”.

Dokonany przez Obserwatorium H.E.S.S. pomiar widma energii emisji promieniowania gamma może być użyty do ustalenia rozkładu energii protonów, które zostały przyspieszone przez centralną czarną dziurę – wskazując, że Sgr A* jest najprawdopodobniej miejscem przyspieszenia protonów do energii PeV. Obecnie ilość tych protonów nie jest wystarczająca aby wyjaśnić całkowity strumień promieniowania kosmicznego docierającego do Ziemi. „Jeżeli jednak nasza centralna czarna dziura była bardziej aktywna w przeszłości”, argumentują naukowcy, „to w istocie mogłaby być odpowiedzialna za większość dzisiejszych galaktycznych promieni kosmicznych obserwowanych na Ziemi”. Obecne wyniki oznaczają ogromny postęp w trwającej od wieku debacie o pochodzeniu tych tajemniczych cząstek. Możemy się spodziewać że dalsze dokładniejsze pomiary w Obserwatorium H.E.S.S. jak i w Obserwatorium „Cherenkov Telescope Array” (CTA), którego uruchomienie planowane jest po roku 2020, pozwolą na szczegółową weryfikację tych wyników.

Współautorami opisanego powyżej odkrycia obserwatorium H.E.S.S. są astrofizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN: dr Sabrina Casanova, dr hab. Jacek Niemiec oraz dr Alicja Wierzcholska, którzy są członkami współpracy H.E.S.S. Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie pełni rolę koordynatora projektu H.E.S.S. w Polsce, a obok IFJ PAN w skład polskiego konsorcjum wchodzi ponadto: Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Uniwersytet Warszawski i Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. W IFJ PAN prowadzone są też prace naukowe i aparaturowe przy budowie wspomnianego nowego światowego obserwatorium promieniowania gamma najwyższych energii – Cherenkov Telescope Array (CTA).

KONTAKT:

dr hab. Jacek Niemiec
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 (12) 6628292
email: jacek.niemiec@ifj.edu.pl

prof. Rafał Moderski (koordynator H.E.S.S. w Polsce)
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Warszawa
e-mail: moderski@camk.edu.pl
tel. +48 (22) 3296113

PUBLIKACJE NAUKOWE:

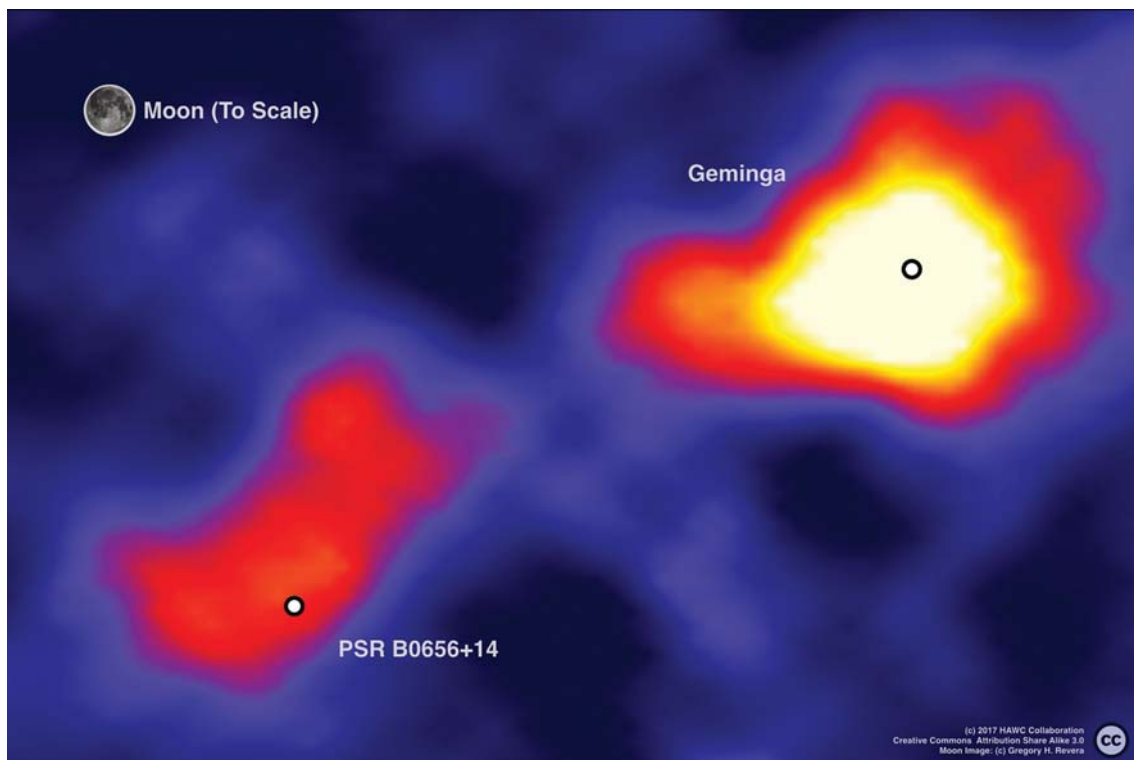
HESS Collab., A. Abramowski, (S. Casanova, J. Niemiec, A. Wierzcholska) et al., *Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre*, Nature, 531 (2016) 476, doi: 10.1038/nature17147.

Kraków, 16 listopada 2017

BLISKIE PULSARY ROZJAŚNIAJĄ ANTYMATERIALNĄ ZAGADKĘ

W docierającym do Ziemi promieniowaniu kosmicznym jest zbyt wiele pozytonów o dużych energiach. Takie pozytony – czyli cząstki będące antymaterialnymi odpowiednikami elektronów – mogłyby być wytwarzane przez bliskie nam pulsary. Najnowsze pomiary z obserwatorium HAWC w Meksyku praktycznie wykluczyły tę możliwość, wzmacniając konkurencyjną, znacznie bardziej egzotyczną hipotezę dotyczącą rodowodu nadmiarowych pozytonów.

60 Nasza planeta jest zanurzona w promieniowaniu kosmicznym. Wśród cząstek docierających do Ziemi z głębi kosmosu znajdują się pozytony, antymaterialne odpowiedniki elektronów. Astrofizyków od dłuższego czasu intryguje, dlaczego pozytonów o dużych energiach jest w promieniowaniu kosmicznym znacznie więcej niż przewidują obecne modele teoretyczne. Najnowszą próbą odpowiedzi



W promieniowaniu kosmicznym obserwujemy więcej pozytonów o dużych energiach niż mogą wyprodukować bliskie nam pulsary. Zdjęcie przedstawia pulsary Geminga i PSR B0656+14. (Źródło: John Pretz)



Obserwatorium High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory (HAWC) w Sierra Negra w Meksyku. (Źródło: Jordan A. Goodman).

są obserwacje wykonane przez kilkudziesięcioosobowy zespół naukowców ze Stanów Zjednoczonych, Meksyku, Niemiec i Polski, przeprowadzone za pomocą niedawno uruchomionego detektora High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory (HAWC). W analizie pomiarów cząstek promieniowania kosmicznego, której wyniki właśnie opublikowano w prestiżowym czasopiśmie naukowym „Science”, uczestniczyła grupa badawcza z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, finansowana z grantu OPUS Narodowego Centrum Nauki.

„Wiemy, że cząstki promieniowania kosmicznego o dużych energiach, wędrujące przez naszą galaktykę, szybko rozpraszają swoją energię wskutek oddziaływań z innym promieniowaniem i polami magnetycznymi. Tak zachowują się cząstki pierwotnego promieniowania kosmicznego. Pozytony są wtórne, pochodzą z oddziaływań, w których uczestniczy promieniowanie pierwotne. Oczekivalibysmy więc podobnej zależności: wyraźnego spadku liczby wysokoenergetycznych pozytonów”, wyjaśnia dr hab. Sabrina Casanova, prof. IFJ PAN, i dodaje: „Rzeczywistość jest inna. Obserwatoria satelitarne i naziemne rejestrują znacznie więcej pozytonów o dużych energiach niż powinny. Naszym celem było sprawdzenie, czy źródłem tych nadmiarowych pozytonów nie są bliskie nam obiekty astronomiczne, takie jak pulsary i otaczające je mgławice”.

Obserwatorium HAWC znajduje się na zboczu meksykańskiego wulkanu Sierra Negra, na wysokości ponad 4100 m n.p.m. Rozmieszczono tu 300 zbiorników z wodą, otoczonych detektorami wrażliwymi na ulotne błyski świetlne, znane jako promieniowania Czerenkowa. Promieniowanie to pojawia się w zbiorniku, gdy wpadnie do niego cząstka poruszająca się z prędkością większą od prędkości światła w wodzie. Każdej doby w HAWC rejestruje się w ten sposób obecność kosmicznych fotonów gamma o energiach od 100 gigaelektronowoltów (GeV) do 100 teraelektronowoltów (TeV). Są to energie nawet trylion razy większe od energii fotonów światła widzialnego i kilkunastokrotnie większe od energii protonów w akceleratorze LHC. (Warto dodać, że w całej historii pomiarów promieniowania kosmicznego rejestrowano cząstki o energiach sięgających nawet 300 000 000 TeV.)

„Detektory obserwatorium HAWC rejestrują promieniowanie gamma emitowane m.in. przez pewną populację elektronów wytwarzanych przez pulsary i rozpędzanych przez nie do ogromnych energii. Podstawowe pytanie brzmiało: czy tych elektronów jest wystarczająco dużo, żeby oddziaływania z ich udziałem mogły później wygenerować odpowiednią liczbę pozytonów?”, mówi dr Francisco Salesa Greus (IFJ PAN).

Zespół eksperymentu przeprowadził bardzo szczegółową analizę danych zebranych dla dwóch stosunkowo bliskich pulsarów, znanych jako Geminga i PSR B0656+14. Pierwszy z nich znajduje się od

nas w odległości około 800, a drugi ponad 900 lat świetlnych. Oba obiekty należą do najsilniejszych źródeł promieniowania kosmicznego w naszym regionie galaktyki.

Obejmująca 17 miesięcy obserwacji analiza wykazała, że promieniowanie z obu pulsarów i otaczających je mgławic rzeczywiście odpowiada za część pozytonów w promieniowaniu kosmicznym. Wbrew oczekiwaniom sporej grupy naukowców, wkład ten w zakresie wysokich energii, sięgających teraelektronowoltów, okazał się jednak kilkukrotnie za mały do wytłumaczenia rzeczywistej liczby pozytonów.

„Skoro udział bliskich pulsarów w generowaniu napływającego do nas strumienia pozytonów o dużych energiach jest tak skromny, coraz bardziej prawdopodobne stają się inne wytłumaczenia. Najciekawszym z nich jest hipoteza o pochodzeniu nadmiarowych pozytonów z rozpadu bądź anihilacji ciemnej materii”, komentuje prof. Casanova.

Gdyby hipoteza o rodowodzie pozytonów z anihilacji bądź rozpadu ciemnej materii okazała się z czasem prawdziwa, nadmiarowe pozytony w promieniowaniu kosmicznym byłyby pierwszymi rejestrowanymi przez ludzkość cząstkami pochodzącymi z interakcji ciemnej materii. O tym, czy jednak nimi naprawdę są, zadecydują dopiero przyszłe obserwacje.

KONTAKT:

dr hab. Sabrina Casanova, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628274
email: sabrina.casanova@ifj.edu.pl

dr Francisco Salesa Greus
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628268
email: francisco.salesa@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

HAWC Collab., A.U. Abeysekara, (S. Casanova, F. Salesa Greus) et al., *Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth*, *Science*, **358** (2017) 911-914, doi: 10.1126/science.aan4880.



Kraków, 3 października 2018

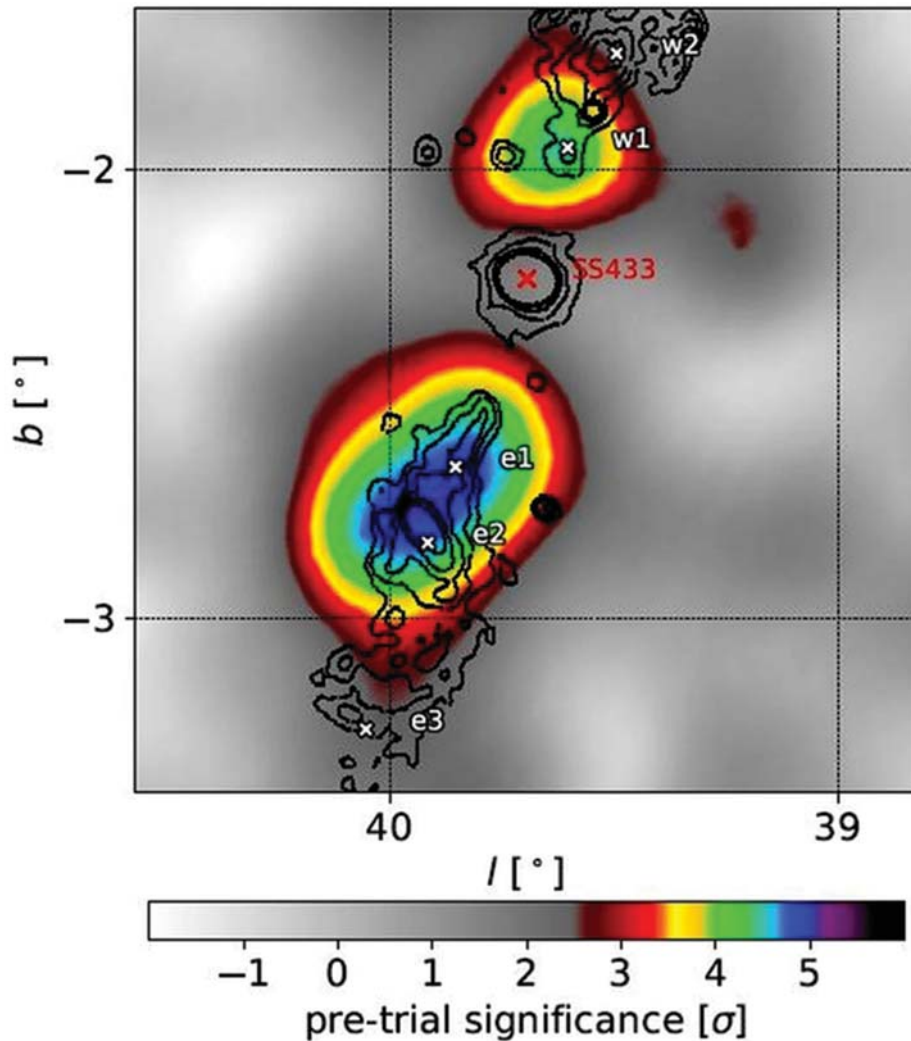
HAWC: MIKROKVAZAR SS 433 ODSŁANIA NATURE NAJJAŚNIEJSZYCH LATARŃ WSZECHŚWIATA

Lśnią nawet z odległości miliardów lat świetlnych. Intrygujące i enigmatyczne, kwazary są nieskore do ujawniania swych tajemnic. Na szczęście możemy je nieco lepiej poznać przyglądając się ich gwiezdny odpowiednikom: mikrokwazarom. Wieloletnie obserwacje mikrokwazara SS 433, zrealizowane w obserwatorium HAWC, pozwoliły po raz pierwszy zidentyfikować spektakularne szczegóły procesów odpowiedzialnych za produkcję wysokoenergetycznego promieniowania.

To prawdopodobnie jeden z najbardziej majestatycznych widoków, jakie kiedykolwiek mógłby zobaczyć człowiek. Tuż przy gigantycznie rozdętej, oślepiąco jasnej gwieździe czai się żarłoczna kulka „nicości”: czarna dziura, skrupulatnie ściągająca materię rozsiewaną przez swego lśniącego partnera. Spadające ku horyzontowi zdarzeń drobiny i cząstki formują płaski wir, którego część spływa ku osi rotacji czarnej dziury. Znad jej obu biegunów w przeciwnych kierunkach strzelają wąskie strugi materii. Skolimowane niewidocznymi szponami pól magnetycznych, niczym szpile gigantów wbijają się w otchłań kosmosu, urywając się na otaczający układ, ekspandującej powłocy materii – pozostałości po wybuchu supernowej. Witajcie w świecie mikrokwazara SS 433, w ostatnich miesiącach jednego z głównych obiektów zainteresowania obserwatorium High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory (HAWC).

Najnowsze obserwacje SS 433 mają pionierski charakter. Po raz pierwszy w historii badań mikrokwazarów zarejestrowano promieniowanie gamma o tak dużych energiach, a uważna analiza danych doprowadziła do zaskakujących wniosków dotyczących miejsc i mechanizmów odpowiedzialnych za jego produkcję. Wyniki badań zostały właśnie zaprezentowane na łamach prestiżowego czasopisma naukowego „Nature”. Spektakularne osiągnięcie jest dziełem zespołu projektu HAWC, w którego skład wchodzi naukowcy ze Stanów Zjednoczonych, Meksyku, Polski i Niemiec. Stronę polską reprezentuje Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

Do najbardziej niezwykłych, a jednocześnie najjaśniejszych obiektów Wszechświata należą kwazary, aktywne jądra galaktyk. Siłą napędową kwazara jest znajdująca się w jego centrum supermasywna czarna dziura, otoczona dyskiem akrecyjnym uformowanym przez spadającą materię. Kwazary są źródłami ekstremalnie intensywnego promieniowania elektromagnetycznego, obejmującego niemal całe spektrum, od fal radiowych po wysokoenergetyczne promieniowanie gamma. Jako rodzaj galaktycznych jąder, kwazary z definicji są obiektami od nas odległymi. Najbliższy kwazar, napędzany parą szaleńczo wirujących wokół siebie supermasywnych czarnych dziur Markarian 231, gości w jądrze galaktyki



Źródła wysokoenergetycznego promieniowania gamma wokół mikrokwazara SS 433 otoczonego mgławicą W50. (Źródło: HAWC Observatory).

oddalonej o 600 milionów lat świetlnych. Nie jest to dystans sprzyjający prowadzeniu wysokorozdzielczych obserwacji, ułatwiających zrozumienie natury zachodzących tu procesów.

Na szczęście w bogatym menu oferowanym nam przez Wszechświat znajdują się kwazary w miniaturze. To, co kwazar wycznia w skali galaktyki, mikrokwazar robi w skali układu gwiazdowego. Czarne dziury Markariana 231 są gigantyczne: mniejsza ma masę 4 milionów mas Słońca, większa aż 150 milionów. Najbliższy nam mikrokwazar, znajdujący się w tle gwiazdozbioru Orła SS 433, jest układem podwójnym o radykalnie mniejszych rozmiarach. Znajduje się tu bardzo gęsty obiekt, prawdopodobnie czarna dziura o masie kilku słońc, będąca pozostałością po wybuchu supernowej. Pożera ona materię z dysku akrecyjnego zasilanego wiatrem gwiazdowym napływającym z pobliskiego nadolbrzyma o typie widmowym A (podobną gwiazdą, doskonale widoczną na nocnym niebie, jest Deneb, najjaśniejszy obiekt gwiazdozbioru Łabędzia). Całą tę malowniczą parę, wirującą wokół siebie w imponującym tempie 13 dni i otoczoną mgławicą W50, dzieli od Ziemi dystans zaledwie 18 tys. lat świetlnych.

„Zarówno kwazary, jak i mikrokwazary, mogą generować dżety, czyli bardzo wąskie i bardzo długie strugi materii, emitowane w obu kierunkach wzdłuż osi rotacji obiektu. Dżety są tworzone przez cząstki rozpędzone do prędkości nierzadko bliskich prędkości światła. Pod względem prędkości dżety z SS 433 nie są jednak specjalnie imponujące: osiągają zaledwie 26% prędkości światła. Ważniejsze jest coś innego”, mówi dr hab. Sabrina Casanova, prof. IFJ PAN, po czym precyzuje: „Większość obserwowanych kwazarów ma dżety mniej lub bardziej, ale jednak skierowane w naszą stronę. Taka orientacja

utrudnia rozróżnienie szczegółów. Natomiast mikrokwazar SS 433 był na tyle uprzejmy, że skierował swoje dżety nie ku nam, a niemal prostopadle do kierunku, w którym patrzymy. Zatem nie dość, że mamy obiekt niemal 'pod ręką', to jeszcze jest on ustawiony optymalnie jeśli chodzi o obserwacje takich detali jak miejsca, gdzie powstaje promieniowanie”.

W naszej galaktyce SS 433 należy do elitarniej grupki zaledwie kilkunastu mikrokwazarów i jako jeden z nielicznych emituje promieniowanie gamma. Przez 1017 dni promieniowanie to było rejestrowane w obserwatorium HAWC, pracującym na wysokości ponad 4100 m n.p.m. na zboczu meksykańskiego wulkanu Sierra Negra. Zbudowany tu detektor składa się z 300 stalowych zbiorników z wodą, wyposażonych w fotopowielacze wrażliwe na ulotne błyski świetlne, znane jako promieniowania Czerenkowa. Pojawia się ono w zbiorniku, gdy wpadnie do niego cząstka poruszająca się z prędkością większą od prędkości światła w wodzie. Kluczowe znaczenie ma fakt, że część błysków pochodzi od cząstek wygenerowanych wskutek zderzeń wysokoenergetycznych kwantów gamma z ziemską atmosferą. Odpowiednia analiza błysków w zbiornikach pozwala zidentyfikować ich przyczynę. W ten sposób każdej doby HAWC pośrednio rejestruje fotony gamma o energiach od 100 gigaelektronowoltów (GeV) do 100 teraelektronowoltów (TeV). Są to energie nawet trylion razy większe od energii fotonów światła widzialnego i kilkunastokrotnie większe od energii protonów w akceleratorze LHC.

W trakcie obserwacji SS 433, prowadzonych na granicy możliwości rozdzielczych HAWC, naukowcom udało się zarejestrować fotony o energiach powyżej 25 TeV, tj. od 3 do 10 razy większych od raportowanych w całej historii badań mikrokwazarów. Ku zaskoczeniu badaczy, w zakresie wysokoenergetycznego promieniowania gamma najjaśniejszym obiektem w układzie wcale nie był sam SS 433, lecz znajdujące się po jego obu stronach miejsca, w których dżety urywają się zderzając z materią odrzuconą przez supernową.

„To nie koniec niespodzianek. Fotony gamma o energiach 25 TeV muszą być produkowane przez cząstki o jeszcze większych energiach. Mogłyby to być protony, ale wtedy musiałyby mieć ogromne energie, na poziomie 250 TeV. Ze zgromadzonych danych wynikało jednak, że ten mechanizm, nawet jeśli rzeczywiście działa, w przypadku SS 433 nie jest w stanie wygenerować odpowiedniej ilości promieniowania gamma”, tłumaczy dr Francisco Salesa Greus (IFJ PAN).

W trakcie dalszych prac dane z HAWC zestawiono z pomiarami SS 433 w pozostałych zakresach spektralnych z innych obserwatoriów. Ostatecznie udało się ustalić, że wysokoenergetyczne kwanty gamma – lub przynajmniej ich większość – muszą być emitowane przez elektrony w dziecie w trakcie ich zderzeń z wypełniającym cały kosmos niskoenergetycznym promieniowaniem mikrofalowym tła. Powyższy mechanizm, opisany tu po raz pierwszy, nie mógł być wykryty w obserwacjach kwazarów z dżetami skierowanymi ku Ziemi. Mikrokwazar SS 433 pomógł więc ujawnić nie tylko własne tajemnice, ale także tajemnice najjaśniejszych latarni Wszechświata.

KONTAKT:

dr hab. Sabrina Casanova, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628274
email: sabrina.casanova@ifj.edu.pl

dr Francisco Salesa Greus
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628268
email: francisco.salesa@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

A.U. Abeysekara, (S. Casanova, A. Nayerhoda, F. Salesa Greus) et al., *Very-high-energy particle acceleration powered by the jets of the microquasar SS 433*, Nature, **562** (2018) 82-85, doi: 10.1038/s41586-018-0565-5.



Kraków, 12 czerwca 2018

CREDO: I TY MOŻESZ POMÓC ODSŁONIĆ NAJGŁĘBSZE ZAGADKI WSZECHŚWIATA

Czy za niektóre choroby odpowiadają zjawiska astrofizyczne zachodzące miliony, a nawet miliardy lat świetlnych od Ziemi? Czy ciemna materia rzeczywiście istnieje? Jaka jest prawdziwa natura naszej czasoprzestrzeni – ciągła czy cyfrowa? Czy egzotyczne efekty kwantowej grawitacji można badać eksperymentalnie? Zainstaluj aplikację CREDO Detector, stań się częścią największego w historii detektora cząstek i pomóż odsłonić fundamentalne tajemnice Wszechświata!

66

Gdy z otchłani kosmosu nadlatuje cząstka promieniowania o energii rzędu największych z obserwowanych we Wszechświecie, inicjuje w ziemskiej atmosferze spektakularne zjawisko: gigantyczną kaskadę cząstek wtórnych, nazywaną wielkim pękiem atmosferycznym. Po dotarciu do ziemi, wywołana pojedynczą cząstką kaskada może pokryć powierzchnię nawet dużej aglomeracji. Skąd pochodzą pierwotne cząstki o tak ekstremalnych energiach, setki milionów razy większych od osiągniętych przez protony rozpędzane w akceleratorze LHC? Czy świadczą o rozpadach cząstek ciemnej materii? A może zwiastują zupełnie nową fizykę?

W poszukiwaniach naukowych odpowiedzi na tak frapujące pytania współczesnej fizyki może dziś pomóc każdy. Wystarczy na smartfonie wyposażonym w aparat fotograficzny zainstalować CREDO Detector, aplikację przygotowaną w ramach międzynarodowego projektu Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory (CREDO), zainicjowanego i koordynowanego przez zespół naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. Nadzór nad utrzymaniem i rozbudową tej aplikacji sprawuje Politechnika Krakowska, za gromadzenie i przetwarzanie danych napływających z całego świata, nie tylko ze smartfonów, odpowiada Akademickie Centrum Komputerowe CYFRONET Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. CREDO Detector nie jest wprawdzie jedyną aplikacją do detekcji cząstek promieniowania kosmicznego czy radioaktywności lokalnej, jest to jednak pierwszy program tego typu z otwartym, dostępnym dla każdego kodem. Co więcej, CREDO Detector jest częścią globalnego przedsięwzięcia naukowego poświęconego badaniu praw przyrody na fundamentalnym poziomie. Światowa premiera aplikacji odbyła się 17 maja podczas krakowskiego Festiwalu Nauki i Sztuki.

„Naukowy kapitał ludzkiego entuzjazmu jest gigantyczny. Chcemy go choć w części wykorzystać do penetrowania obszarów fizycznej rzeczywistości do tej pory niedostępnych badaniom naukowym. A możemy to zrobić, ponieważ dziś niemal każdy nosi w kieszeni urządzenie zdolne rejestrować pojedyncze cząstki promieniowania kosmicznego. Żeby włączyć się w nasze badania, wystarczy więc jedynie chcieć”, mówi kierujący projektem CREDO dr hab. Piotr Homola (IFJ PAN).

Współdziałając, tysiące i miliony smartfonów potencjalnie mogą utworzyć największy detektor cząstek promieniowania kosmicznego, obejmujący dosłownie całą planetę. Jak stać się jego częścią?



Dzięki aplikacji Credo Detector każdy smartfon z aparatem fotograficznym może stać się częścią największego detektora cząstek w historii. (Źródło: IFJ PAN).

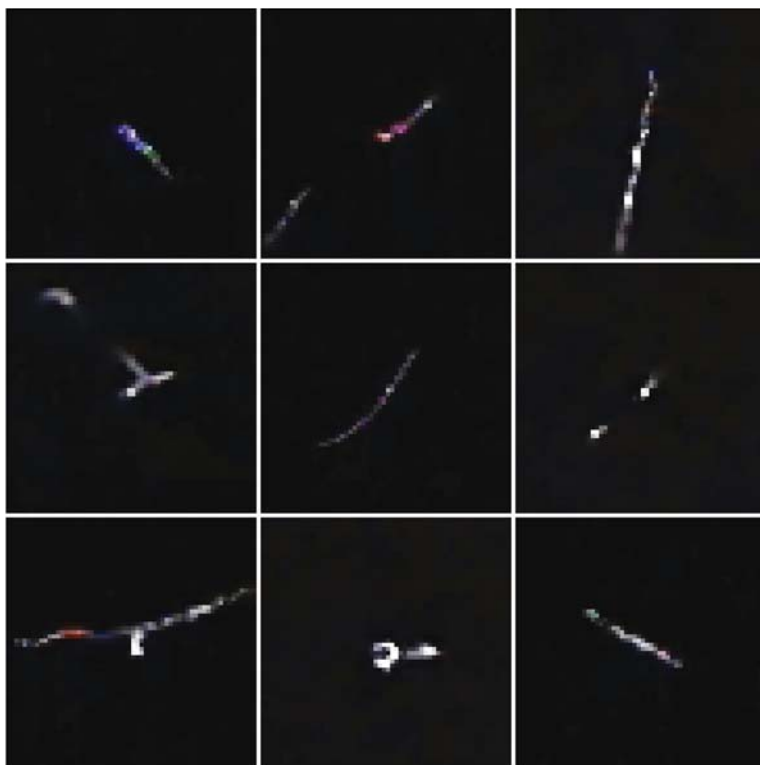
Nic prostszego: bezpłatną aplikację Credo Detector na smartfony z systemem Android można pobrać z oficjalnego sklepu Google Play, z konta IFJ PAN. Po zainstalowaniu należy zarejestrować się w systemie Credo. Warto to zrobić podając prawdziwe dane kontaktowe. W badaniach naukowych przyjmuje się bowiem, że każdy, kto przyczynia się do zbierania danych, ma prawo do współautorstwa publikacji naukowych powstałych w oparciu o te dane. Nie inaczej jest w Credo: użytkownik, który choć na chwilę uruchomi detekcję cząstek w Credo Detector, ma prawo do członkostwa w międzynarodowej kolaboracji Credo oraz do podpisywania jej publikacji swoim nazwiskiem.

Ogromny potencjał naukowy projektu Credo kryje się w możliwości zaobserwowania korelacji czasowych i/lub przestrzennych między zdarzeniami rejestrowanymi przez różne, nawet odległe od siebie detektory, w tym smartfony. Gdyby udało się wychwycić takie korelacje, prawdopodobnie zdobylibyśmy nowe informacje nie tylko o zdarzeniach zachodzących z udziałem ekstremalnie energetycznych cząstek zwykłej materii, ale być może również o właściwościach cząstek ciemnej materii, naturze kwantowej grawitacji, a potencjalnie nawet o najgłębszej strukturze czasoprzestrzeni. Kto wie, może to dzięki Credo uda się wreszcie ustalić, czy nasza czasoprzestrzeń jest cyfrowa?

„Jeśli Credo zdobędzie choćby umiarkowaną popularność, dane ze smartfonów rozproszonych na wszystkich kontynentach mają szansę zrewolucjonizować nie tylko fizykę teoretyczną, ale także dziedzinę znacznie bliższą naszej codzienności”, zauważa dr Homola.

Przykłady? Cząstki nadlatujące z kosmosu są bardzo czułe na zmiany pola geomagnetycznego, a te, jak się wydaje, mogą towarzyszyć m.in. pływom ciekłego żelaza we wnętrzu Ziemi, potencjalnie generującym zjawiska sejsmiczne. Gdyby Credo potwierdziło zależność między zmianami w częstotliwości rejestracji cząstek wtórnego promieniowania kosmicznego a trzęsieniami ziemi, być może moglibyśmy przewidywać te ostatnie, na dodatek z wyprzedzeniem dającym szansę na ratowanie ludzkiego życia. Z kolei w obrębie medycyny rozważa się m.in. hipotezę o możliwych korelacjach rozkładów geograficznych zachorowań na niektóre choroby o nieznannej etiologii, takie jak stwardnienie rozsiane, z rozkładem intensywności promieniowania kosmicznego przy powierzchni Ziemi. Silnie rozproszona infrastruktura Credo byłaby pierwszym rzeczywiście dobrym narzędziem badawczym pozwalającym potwierdzić lub obalić tę hipotezę.

„Stworzyliśmy Credo z myślą o naukowej potrzebie zorganizowania globalnej infrastruktury, za której pomocą będzie można realizować nie jeden, lecz wiele wyspecjalizowanych eksperymentów. Pierwszy z nich, Quantum Gravity Previewer – czyli Podglądacz Kwantowej Grawitacji – został



Ślady cząstek promieniowania wykryte przez aplikację CREDO Detector. (Źródło: IFJ PAN/CREDO/ użytkownik smph-kitkat).

68

uruchomiony 17 maja. Spodziewamy się, że już jesienią tego roku zbierzemy ilość danych wystarczającą do przedstawienia pierwszych poważnych raportów naukowych. Na tym właśnie polega prawdziwe piękno naszego projektu: badamy tak egzotyczne obszary naszej rzeczywistości, że możemy się spodziewać nawet... niespodziewanego”, mówi dr Homola.

CREDO Detector korzysta z detektora obrazu w aparacie fotograficznym smartfona. Jeśli aparat ma zasłonięty obiektyw, zarejestrowane zdjęcia powinny się składać z samych czarnych pikseli. Gdy ten warunek jest spełniony, CREDO Detector przystępuje do pracy. Jeśli przez detektor w smartfonie przejdzie cząstka wtórnego promieniowania kosmicznego, ewentualnie cząstka promieniowania lokalnego, pobudzi jego niektóre piksele. Na jednorodnie czarnym tle powinno się wtedy pojawić od kilku do kilkudziesięciu jaśniejszych pikseli, zlepionych w grupkę o mniej lub bardziej fantazyjnych kształtach, czasem bardziej kolistych, czasem rozciągniętych w linie. W ciągu doby można się spodziewać od jednej do nawet kilkuset detekcji.

Aplikacja CREDO Detector rejestruje obrazy wyłącznie wtedy, gdy obiektyw kamery jest przesłonięty, zatem z natury gwarantuje zachowanie prywatności użytkowników. Co więcej, to właściciel smartfona decyduje, kiedy aplikacja może monitorować kamerę. Dodatkowym uwiarygodnieniem jest autorytet twórców CREDO: IFJ PAN to największy instytut badawczy Polskiej Akademii Nauk, z najwyższą polską kategorią naukową (A+). Pracujący tu fizycy od dziesiątków lat są silnie zaangażowani w najbardziej wyrafinowane eksperymenty fizyki cząstek, m.in. realizowane przez Europejską Organizację Badań Jądrowych CERN na akceleratorze LHC. Co więcej, obecnie CREDO to międzynarodowa współpraca licząca ponad stu naukowców z kilkunastu krajów. W analizie zebranych danych może uczestniczyć każdy, od ucznia do profesora.

Dla wielu osób istotna będzie informacja, że wpływ CREDO na żywotność baterii smartfona można ograniczyć do minimum. W ustawieniach wystarczy włączyć opcję uruchamiania detektora tylko wtedy, gdy smartfon jest podłączony do ładowarki, co najczęściej ma miejsce w nocy. Istnieje też możliwość zabezpieczenia się przed nadmiernym eksploataowaniem połączenia internetowego. Służy temu opcja wymuszająca transfer danych do serwera eksperymentu wyłącznie wtedy, gdy smartfon jest podłączony do internetu przez sieć bezprzewodową.

Oprogramowanie projektu CREDO, w tym aplikacja CREDO Detector, będzie udostępnione dla każdego na licencji MIT, co oznacza, że może być rozwijane i używane w innych projektach naukowych, szkolnych, a nawet komercyjnych.

Projekt CREDO jest współfinansowany przez rządy Czech, Węgier, Polski i Słowacji poprzez program Visegrad Grants w ramach International Visegrad Fund (IVF).

KONTAKT:

dr hab. Piotr Homola, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628341
email: piotr.homola@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

P. Homola for the CREDO Collab., *Search for Extensive Photon Cascades with the Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory*, Proc. of the PHOTON-2017 Conference, Ed. D. d'Enterra, A. de Roeck, M. Mangano, 22-26 May 2017, CERN Proceedings, vol.1/2018, Geneva, Switzerland, 1 (2018) 289-296; astro-ph.IM/1804.05614, ISBN: 978-92-9083-512-7, doi: 10.23727/CERN-Proceedings-2018-001.289.



**ODSŁANIANIE
TAJEMNIC JĄDRA
ATOMOWEGO**



NAJBARDZIEJ EGZOTYCZNY PŁYN MA NIEOCZEKIWANIE MAŁĄ LEPKOŚĆ

Zderzenia jąder ołowiu w akceleratorze LHC zachodzą przy tak wielkich energiach, że kwarki, w normalnych warunkach trwale uwięzione w protonach, uwalniają się i wraz z dotychczas je spajającymi gluonami formują strugę wyjątkowo egzotycznego płynu: plazmy kwarkowo-gluonowej. Nowy, bardziej szczegółowy model teoretyczny tej plazmy, zaprezentowany przez grupę fizyków z Polski i USA, przewiduje, że w stosunku do dotychczasowych oszacowań ma ona znacznie mniejszą lepkość.

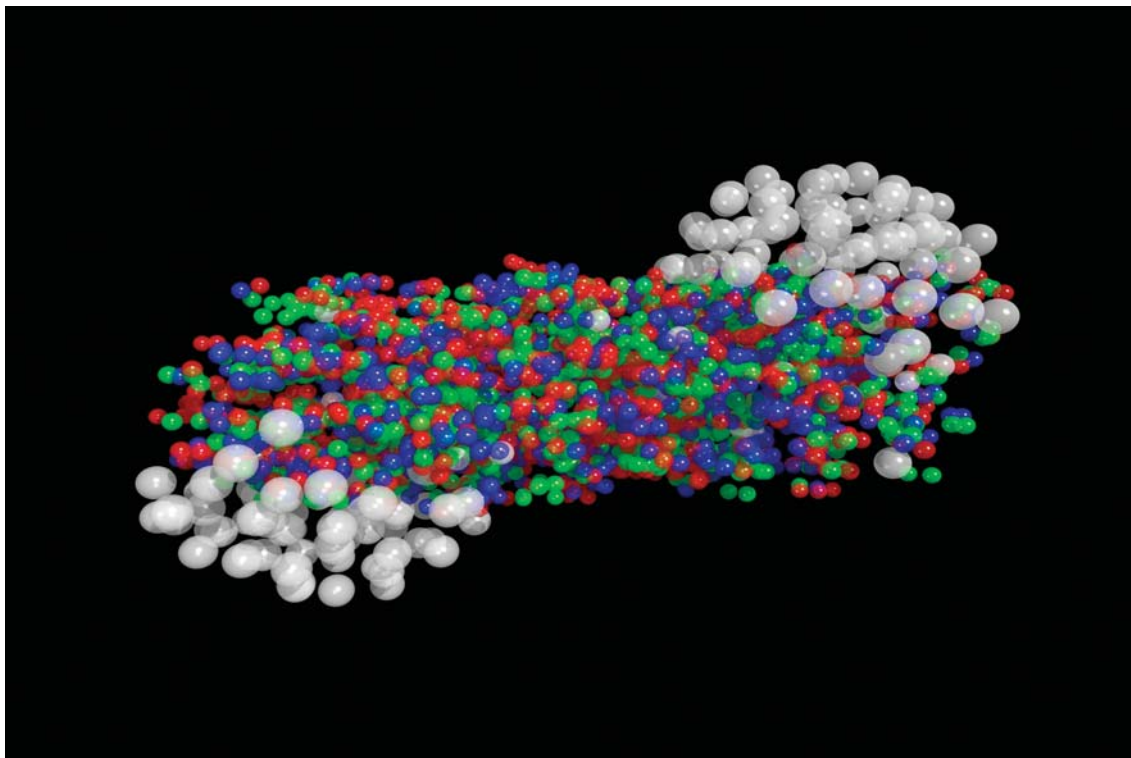
73

Znany nam z codziennych doznań świat składa się z obiektów zbudowanych głównie z protonów i neutronów, cząstek zawierających trójki kwarków spajane oddziaływaniami silnymi przenoszonymi przez nośniki nazywane gluonami. W przeciwieństwie do grawitacji, działającej tym słabiej im masy są od siebie bardziej odległe, oddziaływania silne rosną z odległością. To dlatego kwarki zachowują się jakby były związane sprężynami: im bardziej próbujemy je rozsunąć, tym silniej dążą, by być blisko siebie. Energie cząstek rozpędzanych we wnętrzu akceleratora LHC są jednak tak duże, że w trakcie zderzeń dochodzi do uwolnienia kwarków z protonów. Na krótką chwilę powstaje wtedy plazma kwarkowo-gluonowa, bez cienia wątpliwości najbardziej egzotyczny płyn badany w ziemskich laboratoriach. Dotychczas wydawało się, że jest on dość lepki. Inny wniosek wynika z rozważań i analiz naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie i Kent State University w Kent (Ohio, USA).

„W fizyce przepływy opisuje się za pomocą równań hydrodynamicznych. Gdy używamy ich najprostszych wersji w odniesieniu do plazmy kwarkowo-gluonowej, przewidywania w miarę dobrze zgadzają się z pomiarami zebranymi w trakcie zderzeń w LHC. Na pierwszy rzut oka zupa z kwarków i gluonów rzeczywiście zdaje się zachowywać wedle prostych oczekiwań. Gdy jednak zaczynamy przyglądać się szczegółom, szybko staje się oczywiste, że mamy do czynienia z bardzo złożonym zjawiskiem”, mówi dr hab. Radosław Ryblewski (IFJ PAN).

Matematyczny opis płynu staje się najprostszy przy założeniu, że płyn jest doskonały, czyli m.in. pozbawiony lepkości. Ponieważ w przyrodzie płyny doskonałe nie istnieją, w celu zwiększenia dokładności przewidywań do równań hydrodynamicznych wprowadza się różne poprawki. Tak powstałe warianty hydrodynamiki płynów lepkich opierają się jednak na kolejnych założeniach, na przykład na tym, że ciśnienia w płynie zmieniają się tak samo we wszystkich kierunkach.

„Problem w tym, że plazma kwarkowo-gluonowa w LHC powstaje w bardzo specyficzny sposób, w wyniku zderzeń jąder ołowiu nadlatujących wzdłuż jednego kierunku z prędkościami bliskimi prędkości światła. W rezultacie płyn formujący się z kwarków i gluonów początkowo też porusza się wzdłuż kierunku wiązki, a dopiero później zaczyna się schładzać i rozrzedzać”, tłumaczy dr Ryblewski. „Przy tworzeniu modelu skala wyzwań wzrasta dodatkowo gdy staramy się uwzględnić fakt, że na początku procesu mamy inny płyn niż na końcu – przecież skutek schładzania kwarki stopniowo zaczynają się ponownie zlepiać! Dlatego wraz z prof. Wojciechem Florkowskim zaczęliśmy w naszym instytucie



Plazma kwarkowo-gluonowa w LHC powstaje, gdy nadlatujące z przeciwnych kierunków jądra ołowiu (tu w kolorze białym) zderzają się ze sobą. Uwolnione kwarki (w kolorach czerwonym, zielonym i niebieskim) oraz gluony formują strugę wzdłuż pierwotnego kierunku lotu jąder. Jej zachowanie najdokładniej opisuje hydrodynamika anizotropowa, stworzona przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. (Źródło: CERN/Henning Weber).

74

rozwickać bardziej szczegółowy model zjawiska: hydrodynamikę anizotropową, zbudowaną na założeniu, że opisywany układ nie zachowuje się tak samo we wszystkich kierunkach”.

Najnowszy model teoretyczny, skonstruowany w ramach hydrodynamiki anizotropowej, został właśnie zaprezentowany w znanym czasopiśmie naukowym „Physical Review Letters”. Jeden z jego najciekawszych wniosków dotyczy lepkości plazmy kwarkowo-gluonowej (chodzi o lepkość objętościową, której nie należy mylić z lepkością ścinającą, występującą między warstwami przepływającego płynu). Lepkość ta okazała się sześciokrotnie mniejsza od przewidywań numerycznych innych modeli bazujących na hydrodynamice płynu lepkiego.

Równania zaprezentowane przez fizyków z Krakowa mają istotną zaletę: w przeciwieństwie do dotychczasowych, dla pewnych przypadków mogą być rozwiązywane z praktycznie dowolną dokładnością. Zestawiając swoje przewidywania z danymi z innych modeli oraz wielokrotnie konfrontując je z rzeczywistymi pomiarami w eksperymencie ALICE w LHC, polsko-amerykańskiemu zespołowi udało się wykazać, że hydrodynamika anizotropowa to obecnie najdokładniejszy opis zjawisk zachodzących w plazmie kwarkowo-gluonowej.

KONTAKT:

dr hab. Radosław Ryblewski
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628272
email: radoslaw.ryblewski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

M. Alqahtani, M. Nopoush, R. Ryblewski, M. Strickland, $(3+1)D$ quasiparticle anisotropic hydrodynamics for ultrarelativistic heavy-ion collisions, Phys. Rev. Lett., **119** (2017) 042301, doi: 10.1103/PhysRevLett.119.042301.



GDY PŁYN PŁYNIE NIEMAL TAK SZYBKO JAK ŚWIATŁO – I KWANTOWO WIRUJE

Plazma kwarkowo-gluonowa tworzy się w wyniku wysokoenergetycznych zderzeń ciężkich jonów. Ten najdoskonalszy ze znanych płynów przez kilkanaście jektosekund (to 24 zera po przecinku!) po zderzeniu podlega gwałtownej hydrodynamicznej ekspansji z prędkościami bliskimi prędkości światła. Międzynarodowy zespół naukowców, powiązany z IFJ PAN i ośrodkiem GSI, przedstawił nowy model opisujący tak ekstremalne przepływy. Co ciekawe, po raz pierwszy uwzględniono tu efekty wynikające z faktu, że tworzące plazmę cząstki niosą spin, a więc kwantowo wirują.

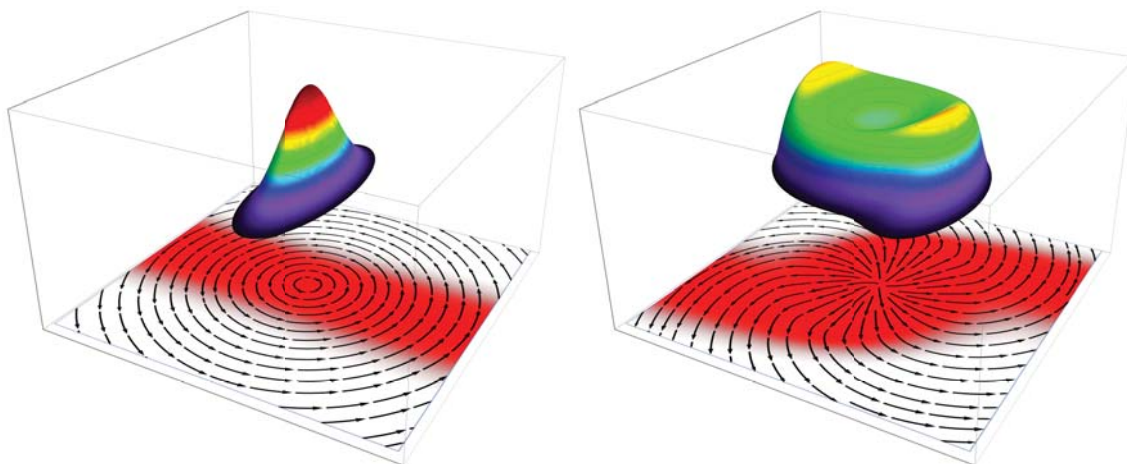
75

Każdy proton i każdy neutron składa się z kilku kwarków zlepionych oddziaływaniami silnymi przenoszonymi przez cząstki pośredniczące nazywane gluonami. Gdy zbudowane z protonów i neutronów ciężkie jony, rozpędzone do prędkości bardzo bliskich prędkości światła, zderzają się ze sobą, zwykle ulegają zniszczeniu przekształcając się w egzotyczny płyn: plazmę kwarkowo-gluonową. Z uwagi na swą znikomą lepkość, plazma ta jest uznawana za najdoskonalszy płyn we Wszechświecie. Nowe pomiary eksperymentalne sugerują jednak, że cząstki opuszczające plazmę wykazują nietrywialne uporządkowanie kierunku spinu. W celu wytłumaczenia tych wyników, grupa naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz z ośrodka badań ciężkich jonów GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung w Darmstadt (Niemcy) zaprezentowała nowy model relatywistycznych przepływów plazmy kwarkowo-gluonowej, uwzględniający zjawiska powstające wskutek kwantowego wirowania tworzących ją cząstek.

Dziesiątki mikrosekund po Wielkim Wybuchu plazma kwarkowo-gluonowa wypełniała cały Wszechświat. Ostygła jednak błyskawicznie i gluony pozlepiały kwarki w grupki – cząstki, z których jest zbudowany nasz świat. W rezultacie kwarkowo-gluonowy płyn można dziś obserwować tylko jako efekt zderzeń ciężkich jonów o bardzo dużych energiach. Zderzenia tego typu przeprowadza się obecnie w zaledwie kilku ośrodkach akceleratorowych na świecie.

Przepływami cieczy i gazów zajmuje się hydrodynamika, dziedzina rozwijana od wieków. Po pojawieniu się teorii względności klasyczną hydrodynamikę rozszerzono o zjawiska relatywistyczne, występujące wtedy, gdy płyn płynie z prędkościami bliskimi prędkości światła. Po narodzinach teorii kwantowej hydrodynamikę z czasem rozbudowano także o opisy przepływów cząstek ze spinem.

Spin jest cechą cząstek elementarnych związaną z własnościami ich funkcji falowych względem operacji obrotu. Może przyjmować jedynie dyskretne wartości, np. 0, 1/2, 1, 3/2 itp. Kierunek spinu cząstek o spinie 1/2 może być równy +1/2 lub -1/2 względem dowolnej osi. Niezerowa polaryzacja cząstek o spinie 1/2 oznacza, że wyprodukowane cząstki chętniej przyjmują jeden kierunek spinu (+1/2 albo -1/2).



Ultrarelatywistyczny przepływ plazmy kwarkowo-gluonowej ze spinem. Po lewej stan początkowy układu, po prawej – wynik ewolucji hydrodynamicznej. Strzałki w dolnej płaszczyźnie pokazują linie przepływu plazmy. Zaczerwioniony obszar to rejon spolaryzowanych cząstek, który ewoluuje zgodnie z przepływem materii. Górne wykresy przedstawiają profile temperatury plazmy. (Źródło: IFJ PAN).

„Hydrodynamika to doskonałe narzędzie opisu wielu zjawisk fizycznych. My poszerzyliśmy jej zakres stosowalności. Jako pierwsi przedstawiliśmy spójny opis relatywistycznych przepływów cząstek ze spinem $1/2$ ”, wyjaśnia prof. dr hab. Wojciech Florkowski (IFJ PAN, UJK, EMMI), który we współpracy z grupą prof. Bengta Frimana (GSI) opracował nowy model przepływów.

Prace nad modelem relatywistycznych przepływów ze spinem zostały zainspirowane niedawnymi pomiarami polaryzacji spinów cząstek znanych jako hiperony Lambda (są to zlepki trzech kwarków: górnego, dolnego i dziwnego, o całkowitym spinie $1/2$), rejestrowanych w zderzeniach ciężkich jonów. Fizycy od dawna wykonywali eksperymenty, w których próbowano lepiej poznać polaryzację hiperonów Lambda. Pomiary były jednak obarczone znaczną niepewnością. Dopiero niedawno w doświadczeniach zrealizowanych w Brookhaven National Laboratory na Long Island w pobliżu Nowego Jorku wykazano, że spiny hiperonów Lambda tworzących się w zderzeniach ciężkich jąder rzeczywiście są spolaryzowane.

Od dłuższego czasu wiadomo, że spin obiektu kwantowego wnosi wkład do jego całkowitego momentu pędu. Na przykład w materiałach ferromagnetycznych można zaobserwować efekt Einsteina-de Haasa: gdy niespolaryzowany układ zostanie umieszczony w polu magnetycznym, spiny tworzących go cząstek zaczynają się orientować zgodnie z polem magnetycznym, a to oznacza, że żeby zachować całkowity moment pędu układ musi zacząć się obracać. Zaobserwowanie polaryzacji hiperonów Lambda powstających w wyniku przekształceń plazmy kwarkowo-gluonowej wskazuje więc na trudną do pominięcia rolę spinu w kształtowaniu przepływu tejże plazmy.

Model zaprezentowany przez grupę fizyków z IFJ PAN i GSI to uogólnienie hydrodynamiki płynu doskonałego. Ponieważ w opisywanych układach występuje spin, w opisie teoretycznym należało uwzględnić zasadę zachowania momentu pędu.

„Tak jak temperatura jest związana z zasadą zachowania energii, prędkość z zasadą zachowania pędu, a potencjał elektryczny z zasadą zachowania ładunku, tak w opisywanych przez nas układach polaryzacja spinu jest związana z zasadą zachowania momentu pędu. Gdy się uwzględni tę zasadę, otrzymuje się dodatkowe równania, lepiej opisujące ewolucję układu”, tłumaczy prof. Florkowski.

Plazma kwarkowo-gluonowa jest tak egzotycznym stanem materii, że jeszcze przez dziesiątki, a może nawet setki lat nie będzie mowy o jej technologicznych zastosowaniach. Opisywane badania mają jednak już dziś ważne implikacje. Relatywistyczne przepływy cząstek ze spinem są bowiem nowym oknem na świat oddziaływań silnych, które wiążą kwarki m.in. w protonach i neutronach. Oddziaływania silne pełnią więc we Wszechświecie ogromnie ważną rolę, są jednak niezwykle skomplikowane do opisu. Dlatego badacze mają nadzieję, że w relatywistycznych przepływach ze spinem będzie można te oddziaływania poznać nieco lepiej.

Przedstawione badania były współfinansowane m.in. z środków ExtreMe Matter Institute (EMMI), który działa przy ośrodku badań ciężkich jonów GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung w Darmstadt (Niemcy).

KONTAKT:

prof. dr hab. Wojciech Florkowski
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628469
email: wojciech.florkowski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

W. Florkowski, B. Friman, A. Jaiswal, E. Speranza, *Relativistic fluid dynamics with spin*, Phys. Rev. C, **97** (2018) 041901,
doi: 10.1103/PhysRevC.97.041901.



Kraków, 10 maja 2017

W ZDERZENIACH JĄDER ATOMOWYCH TWORZĄ SIĘ „OGNISTE SMUGI”

Przy wielkich energiach zderzenie masywnych jąder atomowych w akceleratorze generuje setki, a nawet tysiące cząstek, wchodzących między sobą w liczne interakcje. W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazano, że przebieg tego złożonego procesu można przedstawić za pomocą zaskakująco prostego modelu: ekstremalnie gorąca materia oddala się od miejsca kolizji rozciągając się wzdłuż pierwotnego toru lotu w smugi, przy czym im smuga bardziej odległa od osi zderzenia, tym większa jej prędkość.

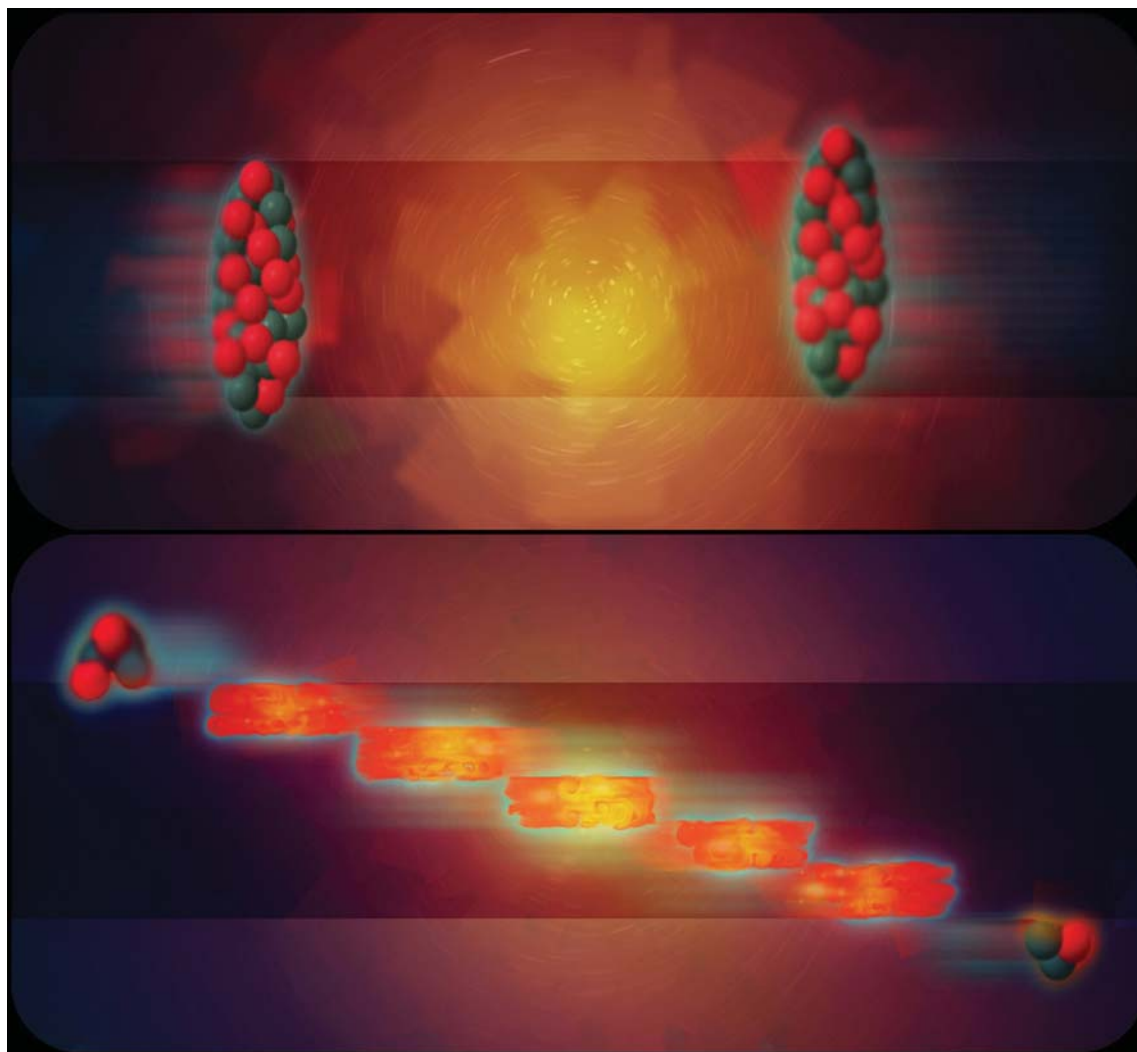
78

Gdy dwa masywne jądra atomowe zderzają się przy wielkich energiach, powstaje najbardziej egzotyczna forma materii: zachowująca się jak płyn doskonały plazma kwarkowo-gluonowa. Z teoretycznych rozważań fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie wynika, że po zderzeniu plazma ta rozmywa się w smugi wzdłuż kierunku zderzenia, poruszające się tym szybciej, im bardziej są odległe od osi zderzenia. Model, jego przewidywania oraz efekty ich konfrontacji z dotychczasowymi danymi eksperymentalnymi przedstawiono w czasopiśmie „Physical Review C”.

Zderzenia jąder atomowych zachodzą ekstremalnie szybko i na odległościach liczonych w zaledwie setkach femtometrów (czyli w setkach milionowych części jednej miliardowej metra). Warunki fizyczne są wyjątkowo wyrafinowane i bezpośrednia obserwacja przebiegu zjawiska nie jest obecnie możliwa. W takich sytuacjach nauka radzi sobie konstruując modele teoretyczne i konfrontując ich przewidywania z danymi zebranymi w doświadczeniach. W przypadku omawianych zderzeń ogromnym utrudnieniem jest jednak fakt, że powstający w ich wyniku konglomerat cząstek to plazma kwarkowo-gluonowa. Interakcje między cząstkami plazmy są zdominowane przez oddziaływania silne i tak skomplikowane, że współczesna fizyka nie radzi sobie z ich ścisłym opisem.

„Nasza grupa postanowiła skoncentrować się na zjawiskach elektromagnetycznych zachodzących w trakcie zderzeń, ponieważ są one znacznie łatwiejsze do wyrażenia w języku matematyki. W efekcie nasz model okazał się dostatecznie prosty, byśmy bez większych kłopotów mogli skorzystać w nim z zasad zachowania energii i pędu. Później przekonaliśmy się, że mimo przyjętych uproszczeń przewidywania modelu pozostają w co najmniej 90% zgodne z danymi eksperymentalnymi”, mówi dr hab. Andrzej Rybicki (IFJ PAN).

Rozpędzone do dużych prędkości masywne jądra atomowe, obserwowane w laboratorium, wskutek efektów wynikających z teorii względności spłaszczają się w kierunku ruchu. Gdy dwa takie protonowo-neutronowe „placki” nadlatują ku sobie, zderzenie na ogół nie jest centralne: tylko część protonów i neutronów jednego jądra trafia w drugie, wchodząc w gwałtowne interakcje i formując plazmę kwarkowo-gluonową. Jednocześnie niektóre zewnętrzne fragmenty jądrowych „placków” nie napotykają na swej drodze żadnej przeszkody i kontynuują niezakłócony lot; w żargonie fizyków nazywa się je obserwatorami.



Fragmenty skrajnie gorącej materii, wytworzonej w zderzeniu ciężkich jąder atomowych w akceleratorze SPS w europejskim ośrodku CERN, oddalają się od siebie z dużymi prędkościami formując smugi wzdłuż kierunku zderzenia. (Źródło: IFJ PAN, Iwona Sputowska).

„Nasza praca została zainspirowana danymi zebranych we wcześniejszych doświadczeniach ze zderzaniem jąder atomowych, m.in. w akceleratorze SPS. Ze zbadanych przez nas efektów elektromagnetycznych pojawiających się w tych zderzeniach wynikało, że plazma kwarkowo-gluonowa porusza się z tym większą prędkością, im bliżej obserwatorów się znajduje”, mówi dr Rybicki.

Aby odwzorować taki przebieg zjawiska, krakowscy fizycy postanowili podzielić jądra wzdłuż kierunku ruchu na szereg pasów – „cegiełek”. Każde jądro w przekroju wyglądało więc jak stos ułożonych jedna na drugiej cegieł (w modelu ich wysokość wynosiła jeden femtometr). Zamiast rozważać skomplikowane interakcje z użyciem oddziaływań silnych oraz zawite przepływy pędów i energii między setkami i tysiącami cząstek pochodnych, model redukował zagadnienie do kilkudziesięciu równoległych zderzeń, z których każde zachodziło między dwiema protonowo-neutronowymi cegiełkami.

Przewidywania modelu naukowcy z IFJ PAN skonfrontowali z danymi zebranych dla zderzeń masywnych jąder atomowych w trakcie eksperymentu NA49 w akceleratorze SPS (Super Proton Synchrotron). Zderzacz ten znajduje się w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN pod Genewą, gdzie do jego najważniejszych zadań należy obecnie rozpędzanie cząstek wstrzeliwanych do wnętrza akceleratora LHC.

„Z uwagi na skalę trudności technicznych, wyniki eksperymentu NA49 są obciążone trudnymi do zredukowania czy wyeliminowania błędami pomiarowymi. W rzeczywistości dokładność naszego modelu może być więc nawet większa niż wspomniane 90%. To uprawnia nas do stwierdzenia, że nawet jeśli w zderzeniach działają jakieś dodatkowe, jeszcze nieuwzględnione mechanizmy fizyczne, nie

powinny już w istotny sposób wpływać na teoretyczny szkielet modelu”, komentuje doktorant Mirosław Kiełbowicz (IFJ PAN).

Po opracowaniu modelu zderzeń „ceglanych stosów”, badacze z IFJ PAN odkryli, że bardzo podobną konstrukcję teoretyczną, określaną jako model smug ogniowych, zaproponowała grupa fizyków z Lawrence Berkeley Laboratory (USA) i Centre d’Etudes Nucléaires de Saclay (Francja) – i to już w 1978 roku.

„Dawny model smug ogniowych, o którym zresztą wspominałyśmy w naszej publikacji, zbudowano pod kątem opisu innych zderzeń, zachodzących przy niższych energiach. My stworzyliśmy naszą konstrukcję niezależnie i dla innego przedziału energetycznego”, mówi prof. dr hab. Antoni Szczurek (IFJ PAN, Uniwersytet Rzeszowski) i podkreśla: „Istnienie dwóch niezależnych modeli, bazujących na podobnej idei fizycznej i dających dobrą zgodność z pomiarami w różnych zakresach energii zderzeń, zwiększa prawdopodobieństwo, że podstawy fizyczne, na których te modele zbudowano, są poprawne”.

Krakowski model smug ogniowych dostarcza nowych informacji o ekspansji plazmy kwarkowo-gluonowej w wysokoenergetycznych zderzeniach masywnych jąder atomowych. Opis przebiegu tych zjawisk będzie dalej rozwijany w ramach kolejnego międzynarodowego eksperymentu, SHINE, który już się rozpoczął na akceleratorze SPS.

Badania grupy z IFJ PAN zostały sfinansowane z grantu SONATA BIS Narodowego Centrum Nauki.

KONTAKT:

dr hab. Andrzej Rybicki
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628447
email: andrzej.rybicki@ifj.edu.pl

prof. dr hab. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628212
email: antoni.szczurek@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

A. Szczurek, M. Kiełbowicz, A. Rybicki, *Implications of energy and momentum conservation for particle emission in A+A collisions at energies available at the CERN Super Proton Synchrotron*, Phys. Rev. C, **95** (2017) 024908, doi: 10.1103/PhysRevC.95.024908.



Kraków, 14 czerwca 2018

ROSNA SZANSE NA WYKRYCIE „GRUDEK” W JĄDRACH ATOMOWYCH

Jak naprawdę wyglądają jądra atomowe? Czy znajdujące się w nich protony i neutrony są rozmieszczone chaotycznie? A może łączą się w klastry alfa, czyli grudki zbudowane z dwóch protonów i dwóch neutronów? W przypadku kilku lekkich jąder doświadczalne potwierdzenie indywidualizmu bądź rodzinnej natury nukleonów będzie teraz łatwiejsze dzięki przewidywaniom przedstawionym przez fizyków z Krakowa i Kielc.

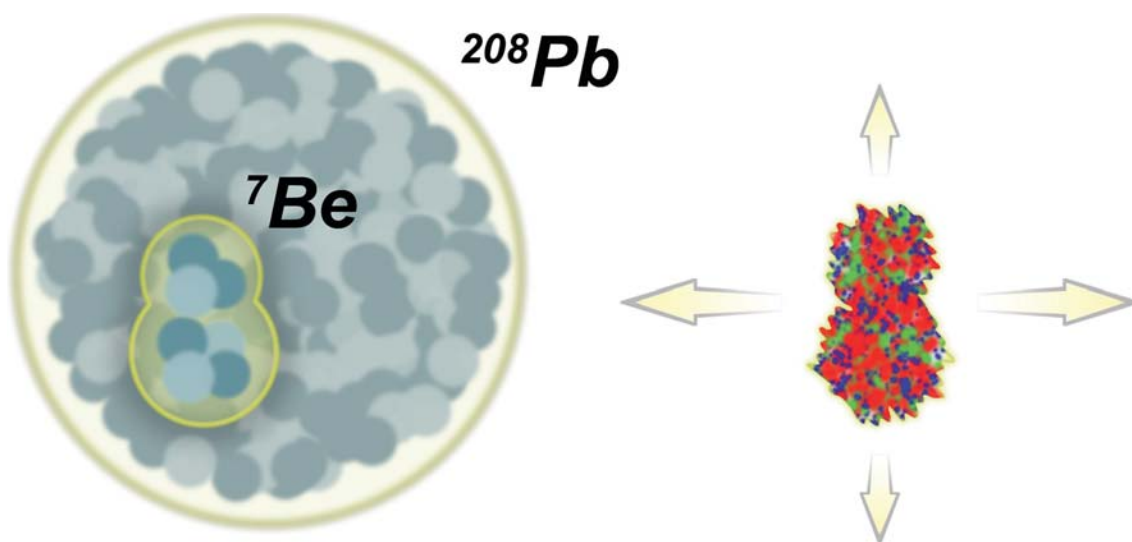
Każdy w miarę sumienny licealista dokładnie wie, jak wygląda jądro atomowe: to zlepek przypadkowo rozmieszczonych protonów i neutronów (czyli nukleonów). Sami fizycy nie mają jednak tak jednoznacznych wyobrażeń. Już w 1931 roku, zaledwie 20 lat po odkryciu jądra atomowego, pojawiły się pierwsze sugestie, że protony i neutrony w jądrach atomowych łączą się w jądra helu, a więc w grupki dwóch protonów i dwóch neutronów, często nazywane klastrami alfa. Jądra atomowe są jednak obiektami tak skrajnie małymi i trudnymi do zbadania, że choć od pierwszych przewidywań upłynął już niemal wiek, wciąż nie udało się jednoznacznie potwierdzić występowania w nich klastrów alfa.

Łączenie się obiektów w grupy sprzyja obniżaniu energii w układach fizycznych. Ten potężny, uniwersalny mechanizm występuje w przyrodzie w różnych skalach wielkości: kwarki łączą się w mezony lub bariony, atomy w cząsteczki, gwiazdy w galaktyki, a galaktyki w grupy galaktyk. W przypadku jąder atomowych symulacje komputerowe sugerują, że np. w jądrze berylu ${}^9\text{Be}$ znajdują się dwa klastry alfa i jeden neutron (cały kompleks z wyglądu przypominałby hantel). W jądrze węgla ${}^{12}\text{C}$ powinny znajdować się trzy klastry alfa (kształt jądra byłby więc trójkątny), cztery w tlenie ${}^{16}\text{O}$ (tu jądro przypominałoby piramidę), dziesięć w wapniu ${}^{40}\text{Ca}$ i czternaście w niklu ${}^{56}\text{Ni}$.

W 2014 roku naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, we współpracy z fizykami z Universidad de Grenada, przedstawili sposób wykrycia śladów pierwotnej struktury jąder atomowych w rozkładzie prędkości cząstek rozbiegających się z punktu zderzenia ultrarelatywistycznych lekkich jąder atomowych z tarczą zbudowaną z jąder ciężkich, takich jak ołów ${}^{208}\text{Pb}$ czy złoto ${}^{197}\text{Au}$. Ówczesne przewidywania koncentrowały się wokół sposobów detekcji klastrów alfa w jądrach węgla ${}^{12}\text{C}$.

„W naszej najnowszej publikacji, napisanej wraz z fizykami z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, przedstawiamy bardziej szczegółowe przewidywania dotyczące możliwości zaobserwowania śladów klastrów alfa w jądrach atomowych. Pokazujemy przy tym, jak klastry te można byłoby wykryć w kolejnych jądrach, nie tylko węgla ${}^{12}\text{C}$, ale także berylu ${}^7\text{Be}$ i ${}^9\text{Be}$ oraz tlenu ${}^{16}\text{O}$ ”, mówi prof. dr hab. Wojciech Broniowski (IFJ PAN, UJK).

Metoda wykrycia klastrów alfa w jądrach atomowych, opisana w publikacji wyróżnionej przez redaktorów czasopisma „Physical Review C”, opiera się na ciekawej zależności. Ciężkie jądra atomowe, nawet gdyby składały się z klastrów alfa, są tak duże, że z dobrym przybliżeniem można je traktować jako dość jednorodne kule. Gdy w takie jądro z prędkością ultrarelatywistyczną (a więc bardzo bliską



W zderzeniu jądra berylu ${}^7\text{Be}$ z jądrem ołowiu ${}^{208}\text{Pb}$ (po lewej) powstaje obłok plazmy kwarkowo-gluonowej (po prawej). Początkowy kształt obłoku i prędkości jego ekspansji w różnych kierunkach noszą informację o pierwotnej budowie jądra berylu. (Źródło: IFJ PAN).

prędkości światła) uderza lekkie jądro atomowe, energia zderzenia jest tak wielka, że protony i neutrony na ułamki sekund rozpadają się na kwarki i zlepiające je gluony. Powstaje wówczas prawdopodobnie najbardziej egzotyczny płyn: plazma kwarkowo-gluonowa.

„W naszej pracy zauważamy, że jeśli lekkie jądro atomowe nie jest jednorodne, obłok plazmy kwarkowo-gluonowej utworzony w wyniku zderzenia jest zdeformowany. Jego kształt przynajmniej w pewnym stopniu będzie odpowiadał kształtowi lekkiego jądra. Plazma będzie się więc rozlewała na wszystkie strony, ale w różnych kierunkach z nieco innymi prędkościami”, wyjaśnia dr hab. Maciej Rybczyński, prof. UJK.

Plazma kwarkowo-gluonowa stygnie tak szybko, że bezpośrednie jej zaobserwowanie nie jest obecnie możliwe. Już po kilku femtosekundach (milionowych części jednej miliardowej sekundy) kwarki i gluony łączą się ponownie w cząstki w procesie nazywanym hadronizacją.

„W kierunkach, w których plazma kwarkowo-gluonowa płynęła nieco szybciej, możemy się spodziewać nieco większych prędkości cząstek powstałych przy hadronizacji. Jeśli więc z dostateczną precyzją zarejestrujemy pędy cząstek rozbiegających się z punktu zderzenia, potencjalnie jesteśmy w stanie z drobnych różnic wydobyć informację o kształcie jądra, które uderzyło w tarczę. Na dodatek informacja ta będzie dotyczyła jądra w stanie podstawowym”, tłumaczy Milena Piotrowska, doktorantka UJK.

Badania fizyków z IFJ PAN i UJK, współfinansowane z grantów Narodowego Centrum Nauki, dostarczają konkretnych przewidywań teoretycznych. Kolejny krok należy teraz do fizyków doświadczalnych pracujących przy akceleratorach o dużych energiach, takich jak Super Proton Synchrotron (SPS) czy Large Hadron Collider (LHC) w europejskiej organizacji CERN bądź Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) w amerykańskim Brookhaven National Laboratory. Ponieważ eksperymenty potwierdzające grudkowatą strukturę jąder atomowych nie wymagają rozbudowy obecnie działającej aparatury, będzie można je przeprowadzić już w najbliższych latach.

KONTAKT:

prof. dr hab. Wojciech Broniowski
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628431
email: wojciech.broniowski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

M. Rybczyński, M. Piotrowska, W. Broniowski, *Signatures of α clustering in ultrarelativistic collisions with light nuclei*, Phys. Rev. C, **97** (2018) 034912, doi: 10.1103/PhysRevC.97.034912.



Kraków, 19 października 2016

ZNALEZIONO NAJLŹEJSZE SUPERZDEFORMOWANE TRÓJOSIOWO JĄDRO ATOMOWE

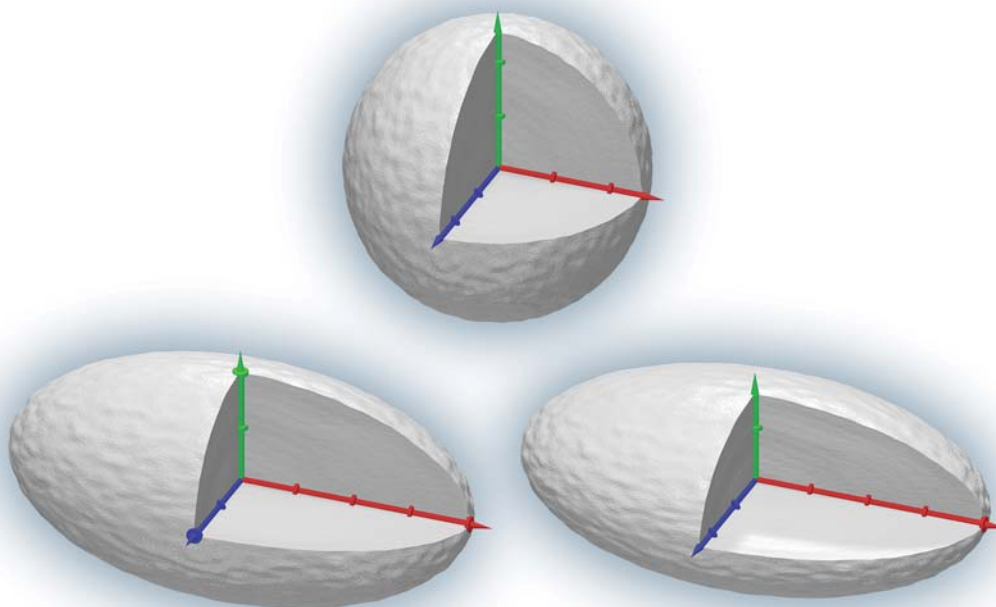
Jądra atomowe ciężkich pierwiastków nie muszą mieć kształtu kulistego: mogą być wyraźnie wydłużone lub spłaszczone wzdłuż jednej, dwóch, a nawet trzech osi. Międzynarodowa grupa fizyków, kierowana przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie i Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego, właśnie przedstawiła wyniki eksperymentów wskazujących, że do skomplikowanych superdeformacji jąder atomowych dochodzi także w pierwiastkach znacznie lżejszych.

83

Większość ciężkich jąder atomowych wcale nie wygląda jak idealne kule: są nieznacznie spłaszczone lub wydłużone. Na łamach prestiżowego czasopisma „Physical Review Letters” zaprezentowano wyniki eksperymentów dowodzących, że bardzo wyraźne i skomplikowane deformacje, dotychczas obserwowane wyłącznie w ciężkich jądrach atomowych, pojawiają się nawet w tak lekkich pierwiastkach jak wapń. Badania przeprowadzili naukowcy Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie i Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego (ŚLCJ) przy szerokiej współpracy międzynarodowej.

„O tym, że jądra atomowe mogą być nieznacznie zdeformowane nawet w lekkich pierwiastkach, było wiadomo od kilku lat. W naszych eksperymentach wykazaliśmy jednak, że w przypadku jąder wapnia ^{42}Ca dochodzi do szczególnie wyraźnej i złożonej deformacji, nazywanej superdeformacją trójosiową. Podobne efekty były dotychczas obserwowane tylko w jądrach ciężkich, zbudowanych z około 130-170 protonów i neutronów”, mówi prof. dr hab. Adam Maj (IFJ PAN), który wraz z prof. Faicaelem Azaiezem z francuskiego Institut de Physique Nucléaire d’Orsay był jednym z głównych pomysłodawców poszukiwań.

Jądra atomowe liczą od jednego protonu do ponad 200 protonów i neutronów. Sklejone oddziaływaniami silnymi, przewyciężającymi potężne odpychanie elektrostatyczne między dodatnio naładowanymi protonami, jądra są strukturami kształtowanymi przez bardzo złożone zjawiska kwantowe. Dynamika zachodzących tu procesów jest taka szybka, że gdy w odpowiednio długim przedziale czasu (a w mikroświecie są nim nawet ułamki sekund) przyjrzymy się jądru atomowemu, zobaczymy tylko statystycznie uśredniony kształt jądra. W części przypadków jest nim po prostu kula. Od lat pięćdziesiątych XX wieku znane są jednak jądra wydłużone, niekiedy znacznie, np. do elipsoidy o jednej osi dwukrotnie dłuższej od pozostałych – mówimy wtedy o superdeformacji jądrowej (stosunkowo często spotyka się także jądra rozciągnięte w proporcji 3:2). Możliwe są przy tym zniekształcenia jeszcze bardziej wyrafinowane, gdy do dużych odstępstw od kulistości dochodzi nie względem jednej, lecz nawet wzdłuż trzech osi. Tak zniekształcone jądra są określane jako superzdeformowane trójosiowo i były dotychczas obserwowane wyłącznie w pierwiastkach ciężkich.



Jądra atomowe pierwiastków nie zawsze są kuliste, jak na górnym rysunku. Przy większej liczbie protonów i neutronów jądro może być w różnym stopniu wydłużone lub skrócone wzdłuż jednej, dwóch, a nawet trzech osi. Ten ostatni przypadek, pokazany w prawym dolnym rogu, jest nazywany superdeformacją trójosiową. (Źródło: IFJ PAN).

84

Jądra atomowe mają rozmiary kilku femtometrów, czyli milionowych części miliardowej części metra. Bezpośrednia obserwacja tak małych obiektów nie jest możliwa. Informację o ich strukturze zdobywa się więc metodami mniej lub bardziej pośrednimi, analizując promieniowanie gamma emitowane przez jądra przechodzące od stanów o większych energiach do stanów o energiach mniejszych. W zależności od budowy jąder i sposobu wzbudzenia, stany wzbudzone mogą mieć różną naturę: jądro może w różny sposób wibrować jako całość, ale może także np. zostać pobudzone do rotacji. Polskich fizyków interesowały zwłaszcza te ostatnie stany, rotacyjne.

Obecnie za najbardziej wiarygodne są uznawane obserwacje deformacji jąder atomowych dokonywane za pomocą wzbudzeń kulombowskich. Jądra wzbudzają się w ten sposób wskutek zderzeń zachodzących wyłącznie za pośrednictwem oddziaływań elektromagnetycznych. W efekcie opis teoretyczny zjawiska nie musi uwzględniać niezwykle złożonych oddziaływań silnych i w praktyce wystarczają doskonale znane narzędzia elektrodynamiki klasycznej.

Doświadczenia nad superdeformacją lekkich jąder atomowych polegały na bardzo dokładnej obserwacji i analizie promieniowania gamma emitowanego przez jądra wapnia ^{42}Ca , wzbudzone do stanów rotacyjnych w wyniku zderzenia z tarczami zbudowanymi z ołowiu ^{208}Pb lub złota ^{197}Au (każde uderzające w tarczę jądro ^{42}Ca miało energię kinetyczną 170 MeV, czyli milionów elektronowoltów). Pomiary przeprowadzono za pomocą detektora promieniowania gamma AGATA, znajdującego się we włoskim ośrodku INFN Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL). Detektor ten jest najnowocześniejszym z obecnie działających na świecie germanowych detektorów promieniowania gamma, skonstruowanym we współpracy międzynarodowej i charakteryzującym się ekstremalnie dużą zdolnością rozdzielczą. Eksperyment dotyczący superdeformacji jąder wapnia był pierwszym zrealizowanym za pomocą tego wyrafinowanego przyrządu.

„W trakcie przetwarzania danych z detektora AGATA używaliśmy wielu metod i narzędzi, m.in. znanego w środowisku fizyków jądrowych programu GOSIA do analizy wzbudzeń kulombowskich, rozwijanego od kilkunastu lat w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów. Okazało się, że wzbudzone jądra wapnia ^{42}Ca są superdeformowane i jednocześnie trójosiowe, co znajduje potwierdzenie w obliczeniach wykorzystujących zaawansowane teorie budowy jądra atomowego”, mówi dr Katarzyna Hadyńska-Klęk (ŚLCJ), która przeprowadziła analizę danych.

Wzbudzenie jądra wapnia ^{42}Ca do stanu superzdeformowanego trójosiowo wymaga dostarczenia stosunkowo niewielkiej ilości energii (ok. 2 MeV). Energetycznie stan superzdeformowany leży więc bardzo blisko niemal kulistego stanu podstawowego. Z tego powodu fizycy mówią o pewnej koegzystencji kształtów obu stanów.

„Pełna analiza danych zebranych w Legnaro zajęła nam trzy lata. Po drodze musieliśmy jeszcze wykonać inny, uzupełniający eksperyment, na warszawskim cyklotronie. Jego wyniki pozwoliły wykluczyć jeden z alternatywnych wariantów interpretacji danych z detektora AGATA”, mówi dr Paweł Napiorkowski, kierujący projektem w ŚLCJ.

Odkrycie trójosiowej superdeformacji w wapniu ^{42}Ca pomoże lepiej zrozumieć zjawiska w jądrach atomowych. Współczesne narzędzia teoretyczne nie pozwalają bowiem na dokładne modelowanie jąder o liczbie atomowej znacznie przekraczającej 40, co ograniczało rozwój badań nad superdeformacjami. Tymczasem w przypadku wapnia wiele przeszkód teoretycznych znika. Jest też prawdopodobne, że pomiary i analizy będzie można w przyszłości użyć do poszukiwań innych superzdeformowanych stanów o niskiej energii wzbudzenia, w tym o dłuższych czasach życia niż typowe milionowe miliardowych części sekundy. Znalezienie takich stanów pozwoliłoby myśleć o wytworzeniu inwersji obsadzeń, czyli sytuacji, w której większość jąder atomowych przebywałaby nie w stanie podstawowym, a w tym samym stanie wzbudzonym. Byłby to ważny krok w kierunku budowy lasera jądrowego, zdolnego emitować spójne jądrowe promieniowanie gamma.

Współpraca między ośrodkami krakowskim i warszawskim odbywa się w ramach konsorcjum Narodowe Laboratorium Cyklotronowe (NLC). W badaniach ważną rolę odegrali uczeni z wielu krajów, w szczególności dr Jose Javier Valiente Dobon (INFN LNL, Włochy) i dr Magda Zielińska (ŚLCJ, Polska; CEA, Francja). Po stronie polskiej badania sfinansowano z grantów Narodowego Centrum Nauki i Unii Europejskiej.

KONTAKT:

prof. dr hab. Adam Maj
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 606 291860, +48 12 6628141
email: adam.maj@ifj.edu.pl

dr Paweł Napiorkowski
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 604 226689
email: pjn@slcj.uw.edu.pl

PRACE NAUKOWE:

K. Hadyńska-Klęk, (A. Maj, G. Anil Kumar, P. Bednarczyk, M. Ciemała, A. Czermak, B. Dulny, B. Fornal, J. Grębosz, M. Kmiecik, M. Krzysiek, K. Mazurek, W. Męczyński, S. Myalski, J. Styczeń, B. Wasilewska, M. Ziębliński) et al., *Superdeformed and triaxial states in ^{42}Ca* , Phys. Rev. Lett., **117** (2016) 062501, doi: 10.1103/PhysRevLett.117.062501.



Kraków, 7 września 2017

PODWÓJNIE MAGICZNE JĄDRO OŁOWIU 208 – WIRUJE, A NIE POWINNO!

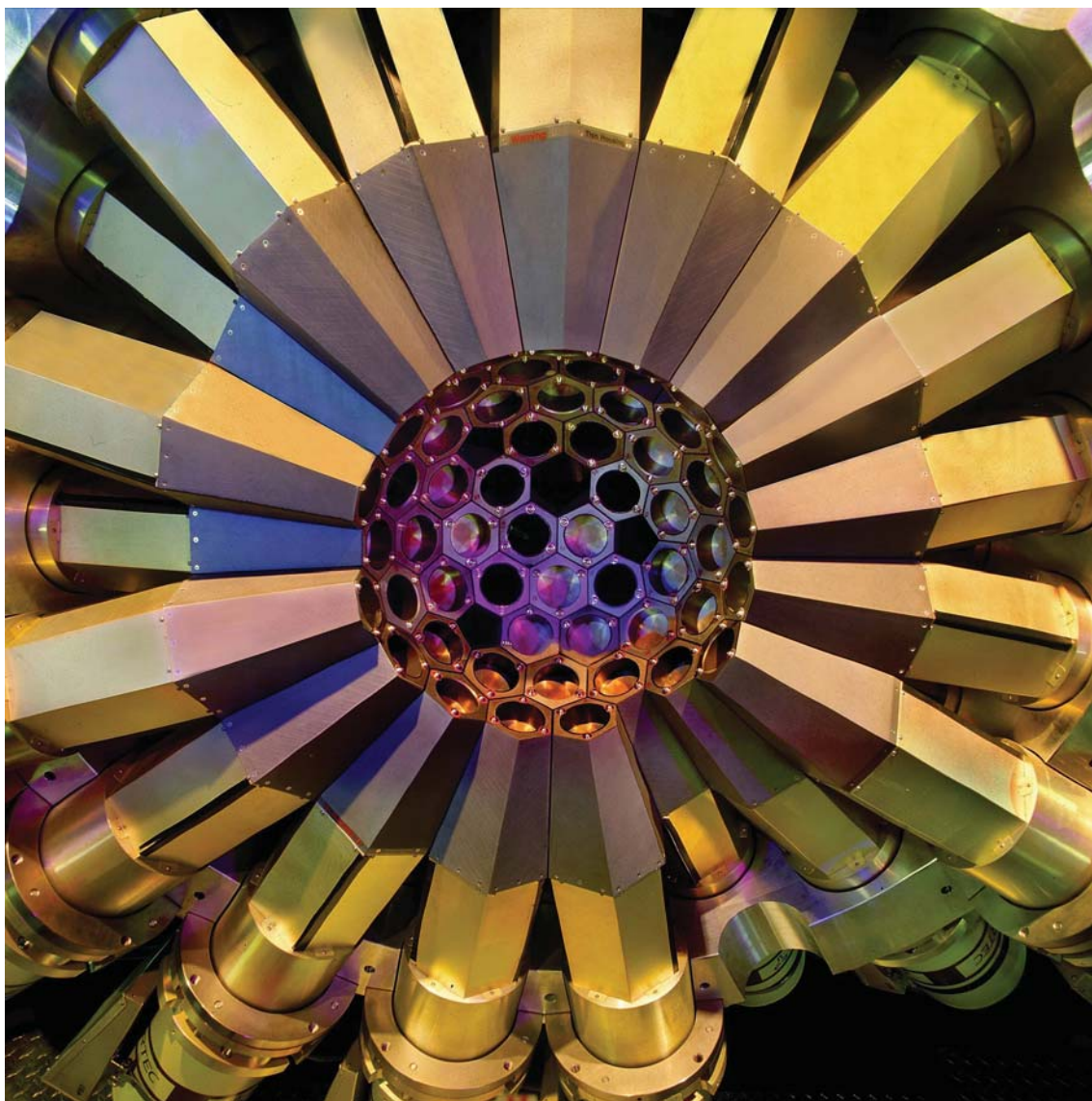
Jądra atomowe na ogół wyobrażamy sobie jako mniej lub bardziej kuliste, ale zawsze dość chaotyczne zlepki protonów i neutronów. Eksperymenty w Argonne National Laboratory, inspirowane przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, próbują weryfikować te naiwne wyobrażenia. Używając analogii astronomicznej można powiedzieć, że o ile większość jąder w zarysie jest podobna do obiektów skalistych, takich jak księżycy czy planetoidy o różnych kształtach, o tyle jądra ołowiu 208 w pewnych warunkach przypominają planety otoczone gęstą atmosferą, która może się przetaczać wokół sztywnego rdzenia.

86

Od kilkunastu lat fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie we współpracy z naukowcami z Argonne National Laboratory (ANL) w Illinois, USA, prowadzą badania nad własnościami jąder atomów ołowiu 208. Niedawno opublikowana analiza, podsumowująca eksperymenty przeprowadzone w ANL z użyciem nadprzewodzącego akceleratora ATLAS oraz Gammasphere, najbardziej wyrafinowanego detektora promieniowania gamma na świecie, doprowadziła do ciekawych wniosków. Okazuje się, że w pewnych warunkach w jądrach ołowiu 208 powstają nowe, stosunkowo trwałe i nieprzewidziane przez teorię stany energetyczne. Co więcej, natrafiono na wskazówki sugerujące istnienie w takich jądrach wcześniej nigdy nieobserwowanej struktury o kolektywnym charakterze.

„Jądra atomowe można wzbudzać do różnych stanów energetycznych, w tym do takich, w których będą bardzo szybko wirować. Jednak nie wszystkie jądra w takich stanach muszą się rzeczywiście obracać”, mówi prof. dr hab. Rafał Broda (IFJ PAN), pierwszy autor publikacji wyróżnionej przez redakcję czasopisma „Physical Review C”, i wyjaśnia: „Jądro ołowiu 208 składa się z 82 protonów i 126 neutronów i z bardzo dobrym przybliżeniem może być traktowane jako kuliste. Gdy za pomocą równań mechaniki kwantowej opisujemy jądra o takim kształcie, mówienie o obrocie jądra przestaje mieć sens, ponieważ pozycje w różnych fazach obrotu są nierozróżnialne, nie ma więc zmian energii. Dlatego przyjmuje się, że jądra kuliste nie wirują, a związana z obrotem wielkość fizyczna – spin jądra – pochodzi w całości od kilku sprzężonych ze sobą nukleonów poruszających się po swoich orbitach. Tymczasem z naszych badań wynika, że w jądrach ołowiu 208 obserwuje się w szerokim zakresie wielkości spinu, aż po stany wysokospinowe, sekwencję stanów, którą można interpretować jako związaną z kolektywnym obrotem. Pytanie za milion brzmi więc: co w takim jądrze się obraca?”

We współczesnej fizyce budowę całych atomów opisuje się za pomocą modelu powłokowego. Przyjmuje się w nim, że elektrony, niosące ujemny ładunek elektryczny, poruszają się w znacznych odległościach wokół dodatnio naładowanego, praktycznie punktowego jądra. Duże prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest jednak tylko w pewnych obszarach – tam, gdzie energia elektronów przyjmuje



Jedna z półkul Gammasphere, najbardziej zaawansowanego detektora promieniowania gamma. (Źródło: Roy Kaltschmidt, Lawrence Berkeley Lab photographer).

ściśle określone wartości. Jądro w atomie jest więc otoczone przez przestrzenną strukturę, utworzoną przez mniejszą lub większą liczbę powłok energetycznych. Każda powłoka ma pewną maksymalną pojemność i jeśli liczba elektronów ją przekroczy, nadmiarowe elektrony muszą się rozlokować na następnej, bardziej oddalonej od jądra powłoce.

Gdy najbardziej zewnętrzna powłoka elektronowa zapełni się elektronami, atom niechętnie wchodzi w reakcje z innymi atomami bądź cząsteczkami. W chemii takie pierwiastki nazywa się gazami szlachetnymi ze względu na ich szczególną stabilność i brak aktywności chemicznej.

Jądra atomowe to obiekty znacznie bardziej złożone od atomów traktowanych jako punktowy ładunek dodatni otoczony gromadką odległych elektronów. Nukleony, czyli tworzące jądra protony i neutrony, mają masy tysiące razy większe niż elektron, na dodatek wszystkie cząstki znajdują się blisko siebie i wchodzi w liczne interakcje jądrowe i elektromagnetyczne. Dlatego w swoim czasie wielkim zaskoczeniem dla fizyków było odkrycie, że model powłokowy sprawdza się także w odniesieniu do jąder atomowych. Sytuacja jest tu jednak ciekawsza, bo neutrony i protony tworzą w jądrze własne powłoki, które są szczególnie stabilne dla liczb nukleonów znanych jako liczby magiczne. Jądra z całkowicie zapełnionymi powłokami protonowymi i neutronowymi fizycy nazywają podwójnie magicznymi. Ołów 208 jest w tym gronie wyjątkowy, ponieważ jest najbardziej masywnym jądrem podwójnie magicznym.

Własności jąder ołowiu 208 w stanach o małym spinie są poznane dość dobrze, natomiast w przypadku stanów wysokospinowych do niedawna było znacznie gorzej. Jądra atomowe w takich stanach wytwarza się bowiem w procesie fuzji zachodzącej w zderzeniach, do których dochodzi podczas ostrzału tarczy z odpowiednio dobranego materiału dopasowanymi cząstkami bombardującymi. Niestety, nie istnieje kombinacja cząstki-tarcza zdolna wyprodukować jądra ołowiu 208 w stanach wysokospinowych. To dlatego od trzech dekad grupa krakowska pod kierunkiem prof. Brody pracuje nad wykorzystaniem zderzeń głęboko nieelastycznych do badań jąder niedostępnych w procesach fuzji. W zderzeniach tego typu jądra bombardujące wchodzi w interakcję z jądrami tarczy, ale się z nimi nie zlewają.

„Jądro w stanie wysokospinowym – efekt zderzenia głęboko nieelastycznego – jest wzbudzone i stara się powrócić do stanu o najniższej energii. Pozbywa się jej nadmiaru w kilku-kilkunastu etapach, w każdym emitując promieniowanie gamma o charakterystycznej dla danego przeskoku energii. Analizując energie tego promieniowania jesteśmy w stanie zdobyć wiele informacji o budowie jąder atomowych i zachodzących w nich procesach”, wyjaśnia dr Łukasz Iskra (IFJ PAN).

W najnowszej analizie wykorzystano pomiary zrealizowane w ANL wspólnie z grupą prof. Roberta Janssensa. W doświadczeniach tych tarcze z ołowiu 208 lub uranu 238 ostrzeliwano jonami ołowiu 208, selenu 82, germanu 76, niklu 64 bądź wapnia 48. Promieniowanie gamma rejestrował detektor Gammaphere, składający się ze 108 wysokiej jakości detektorów germanowych (ten spektakularny przyrząd można zobaczyć m.in. w filmie „The Hulk”).

Ku zaskoczeniu badaczy, najnowsza analiza pozwoliła wykryć w jądram ołowiu 208 struktury i zjawiska nieprzewidziane przez dotychczasową teorię. Zaobserwowano wiele nowych stanów energetycznych, a trzy z nich okazały się stanami izomerycznymi, a więc znacznie trwalszymi niż inne. W zwykłych stanach jądro znajduje się przez pikosekundy. Tymczasem w jednym ze znalezionych stanów izomerycznych jądro przebywało nawet 60 nanosekund (miliardowych części sekundy), czyli tysiące razy dłużej.

Najciekawsze okazały się wyniki sugerujące kolektywną rotację – w jądrze, które przecież jest kuliste, a więc z punktu widzenia mechaniki kwantowej nie powinno się obracać! Badacze przypuszczają, że przy dużych spinach w jądrze ołowiu 208 tworzy się sztywny rdzeń, którym jest drugie pod względem masy podwójnie magiczne jądro, czyli cyna 132. Wydaje się, że rdzeń ten nie wiruje, za to obraca się warstwa zewnętrzna, uformowana przez pozostałe 76 nukleonów.

„Począwszy od pewnych stanów wysokospinowych, jądro ołowiu 208 przestaje być obiektem jednorodnie sztywnym, takim jak na przykład geologicznie niemal martwy Księżyc. Lepszą analogią astronomiczną byłby obiekt skalisty z bardzo gęstą atmosferą, jednak nie tak spokojną, jak na Wenus czy Tytanie. Ta atmosfera powinna się szybko przemieszczać nad powierzchnią, a zatem mogłaby mieć naturę globalnego huraganu”, mówi prof. Broda.

We współczesnej fizyce model powłokowy jest podstawowym narzędziem opisu jąder atomowych. Nowe efekty, dotychczas niemożliwe do przewidzenia w jego ramach, a wykryte dzięki polsko-amerykańskim eksperymentom z jądrami ołowiu 208, umożliwią teoretykom uwzględnienie w nim kolejnych zjawisk i zwiększą precyzję jego przewidywań.

KONTAKT:

prof. dr hab. Rafał Broda
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628243
email: rafal.broda@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

R. Broda, (Ł.W. Iskra, J. Wrzesiński, B. Fornal, N. Cieplicka-Oryńczak, W. Królas, B. Szpak) et al., *Doubly magic ²⁰⁸Pb: High-spin states, isomers, and E3 collectivity in the yrast decay*, Phys. Rev. C, **95** (2017) 064308, doi: 10.1103/PhysRevC.95.064308.



Kraków, 19 lipca 2017

PIERWSZE LEKKIE JĄDRO ATOMOWE Z DRUGĄ TWARZĄ

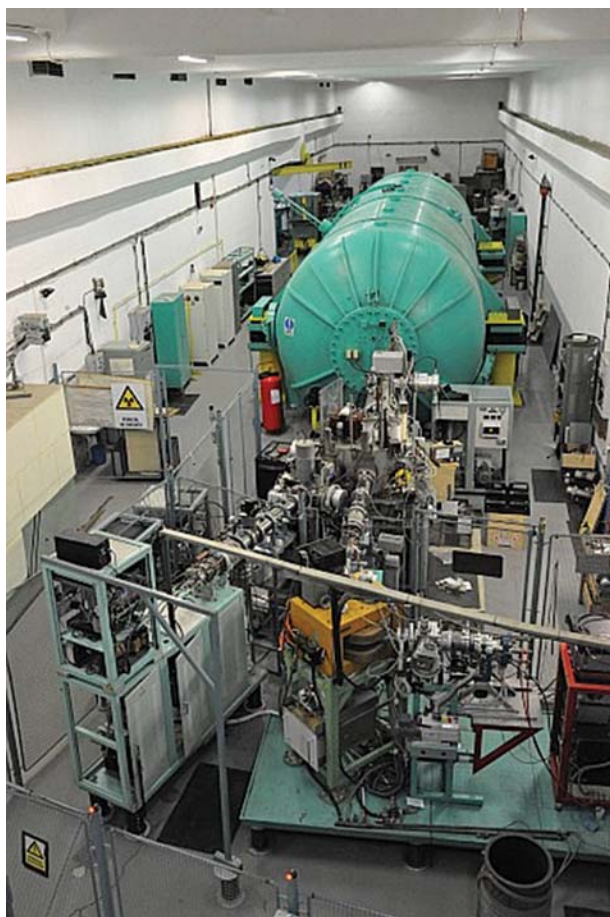
Z pewnym przybliżeniem jądra atomowe wyglądają jak kule, w większości przypadków mniej lub bardziej zniekształcone. Gdy jądro zostanie wzbudzone, jego kształt może się zmienić, lecz tylko na ekstremalnie krótką chwilę, po czym wraca do stanu pierwotnego. W miarę trwałą „drugą twarz” jąder atomowych obserwowano dotychczas tylko u najbardziej masywnych pierwiastków. W spektakularnym eksperymencie fizyków z Polski, Włoch, Japonii, Belgii i Rumunii po raz pierwszy udało się ją zarejestrować w jądrze uznawanym za lekkie.

Jądra atomowe potrafią zmieniać swój kształt w zależności od ilości posiadanej energii lub prędkości, z jaką się obracają. Zmiany związane tylko z dodawaniem energii (a zatem bez uwzględniania obrotów) bywają w miarę stabilne wyłącznie w jądrach najbardziej masywnych pierwiastków. Teraz się okazuje, że jądra pierwiastków znacznie lżejszych, takich jak nikiel, również mogą nieco dłużej zastygnąć w swoim nowym kształcie. Odkrycia dokonał zespół naukowców z włoskiego Università degli Studi di Milano (UniMi), Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, rumuńskiego Narodowego Instytutu Fizyki i Inżynierii Jądrowej (IFIN-HH), japońskiego Uniwersytetu Tokijskiego oraz belgijskiego Uniwersytetu Brukselskiego. Obliczenia niezbędne do przygotowania eksperymentu okazały się tak skomplikowane, że do ich przeprowadzenia trzeba było użyć infrastruktury komputerowej składającej się z około miliona procesorów. Wysiłek nie poszedł na marne: publikacja opisująca osiągnięcie została wyróżniona przez redaktorów prestiżowego czasopisma fizycznego „Physical Review Letters”.

Zbudowane z protonów i neutronów, jądra atomowe na ogół są uważane za obiekty kuliste. Tymczasem w rzeczywistości większość jąder atomowych to struktury w mniejszym lub większym stopniu zdeformowane, spłaszczone lub wydłużone wzdłuż jednej, dwóch, a nierzadko nawet wszystkich trzech osi. Co więcej, tak jak piłka spłaszcza się mniej lub bardziej w zależności od siły wywieranej na nią przez dłoń, tak jądra atomowe mogą zmieniać swoją deformację w zależności od ilości posiadanej energii, nawet gdy się nie kręcą.

„Gdy jądro atomowemu dostarczymy odpowiednią porcję energii, może ono przejść do stanu o innej deformacji kształtu niż typowa dla stanu podstawowego. Taka nowa deformacja – mówiąc obrazowo: nowa twarz – jest jednak bardzo nietrwała. Jak piłka po odsunięciu dłoni, którą ją wcześniej zniekształcała, tak jądro wraca do swojej pierwotnej postaci, tyle że robi to znacznie, znacznie szybciej, w czasach rzędu miliardowych części jednej miliardowej sekundy lub nawet krótszych. Zamiast o drugiej twarzy jądra atomowego, lepiej więc chyba mówić tu tylko o grymasie...”, opisuje prof. dr hab. Bogdan Fornal (IFJ PAN), w którego grupie badawczej znajdowali się dr Natalia Cieplicka-Oryńczak, dr Łukasz Iskra i dr inż. Mateusz Krzysiek.

W ostatnich kilkudziesięciu latach zebrano dowody potwierdzające, że w jądrach niewielkiej liczby pierwiastków występuje jednak stosunkowo stabilny stan ze zdeformowanym kształtem. Pomiar wykazały, że



Międzynarodowy zespół fizyków zarejestrował w eksperymencie w rumuńskim ośrodku akceleratorowym IFIN-HH „drugą twarz” jąder atomowych niklu-66: stosunkowo stabilny stan wzbudzony, w którym jądro ma zmieniony kształt. (Źródło: IFIN-HH).

90

jądra niektórych aktywnoców – pierwiastków o liczbach atomowych od 89 (aktyn) do 103 (lorens) – są zdolne utrzymać swoją „drugą twarz” nawet dziesiątki milionów razy dłużej niż pozostałe jądra. Aktywnocze to pierwiastki o sumarycznej liczbie protonów i neutronów znacznie przekraczającej 200, a więc bardzo masywne. Wśród nieobrcających się jąder pierwiastków lżejszych dotychczas nigdy nie zaobserwowano stanu wzbudzonego ze zdeformowanym kształtem, charakteryzującego się zwiększoną stabilnością.

„Wraz z prof. Michele Sferrazzą, obecnie pracującym na uniwersytecie w Brukseli, już na początku lat 90. zwróciliśmy uwagę, że dwa teoretyczne modele wzbudzeń jądrowych przewidują istnienie w miarę stabilnych stanów ze zdeformowanym kształtem w jądrach pierwiastków lekkich. Wkrótce pojawił się trzeci model, który także prowadził do podobnych wniosków. Naszą uwagę przykuł nikiel-66, ponieważ występował w przewidywaniach wszystkich trzech modeli”, wspomina prof. Fornal.

Możliwość doświadczalnego poszukiwania względnie stabilnych stanów ze zdeformowanym kształtem w jądrze Ni-66 pojawiła się jednak dopiero niedawno. Nowa metoda eksperymentalna, zaproponowana przez prof. Silvię Leoni (UniMi), w połączeniu z obliczeniowo niezwykle wyrafinowanym modelem powłokowym Monte Carlo, skonstruowanym przez teoretyków z Uniwersytetu Tokijskiego, umożliwiły zaprojektowanie odpowiednich, precyzyjnych pomiarów. Ostatecznie doświadczenie zrealizowano na akceleratorze 9 MV FN Pelletron Tandem działającym w rumuńskim Narodowym Instytucie Fizyki i Inżynierii Jądrowej (IFIN-HH).

W eksperymencie w Bukareszcie tarczę z niklu-64 ostrzeliwano jądrami tlenu-18. W stosunku do tlenu-16, który jest głównym (99,76%) izotopem tlenu atmosferycznego, jądra te zawierają dwa dodatkowe neutrony. W trakcie zderzeń oba nadmiarowe neutrony mogą być przekazywane jądrze niklu, co prowadzi do powstania niklu-66, którego kształtem podstawowym jest prawie idealna kula. Przy właściwie dobranych energiach zderzeń niewielka część tak utworzonych jąder Ni-66 trafia do pewnego stanu ze zdeformowanym kształtem, który – jak wykazały pomiary – okazał się nieco trwalszy od wszystkich innych stanów wzbudzonych związanych ze znacznym odkształceniem. Innymi słowy, jądro znalazło się w lokalnym, głębokim minimum potencjału.

„Zmierzone przez nas wydłużenie czasu życia stanu ze zdeformowanym kształtem jądra Ni-66 nie jest tak spektakularne jak u aktynowców, gdzie sięgało dziesiątków milionów razy. My zarejestrowaliśmy wzrost jedynie pięciokrotny. Niemniej i tak pomiar okazał się wyjątkowy, ponieważ wśród jąder lekkich jest pierwszą obserwacją tego typu”, podsumowuje prof. Fornal i podkreśla, że zmierzone czasy opóźnienia powrotu do stanu podstawowego są akceptowalnie zgodne z wartościami dostarczonymi przez nowy model teoretyczny, co dodatkowo podnosi rangę osiągnięcia. Żaden z wcześniejszych modeli deformacji jądrowych nie pozwalał bowiem na tak szczegółowe przewidywania. Nowe podejście teoretyczne powinno więc być pomocne przy opisie jeszcze nieodkrytych kilku tysięcy jąder atomowych.

Po stronie polskiej badania sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki.

KONTAKT:

prof. dr hab. Bogdan Fornal
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628207
email: bogdan.fornal@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

S. Leoni, (B. Fornal, N. Cieplicka-Oryńczak, Ł.W. Iskra, M. Krzysiek) et al., *Multifaceted quadruplet of low-lying spin-zero states in ^{66}Ni : Emergence of shape isomerism in light nuclei*, Phys. Rev. Lett., **118** (2017) 162502, doi: 10.1103/PhysRevLett.118.162502.



Kraków, 14 grudnia 2016

NUKLEARNY SURFING: ZAOBSERWOWANO, JAK PROTONY „ŁAPIĄ FAŁĘ” NA POWIERZCHNI JĄDER ATOMOWYCH

Nie wystarczy wyczekać na dobrą fałę, trzeba jeszcze umieć na nią „wskoczyć”. Problemy tak dobrze znane surferom okazują się być nieobce nawet... protonom. Niedawno zakończony eksperyment, zrealizowany przez fizyków z Polski, Włoch i Francji, dostarcza nowych informacji o surfingu absolutnie ekstremalnym: o protonach synchronizujących swój ruch z wibracjami jądra atomowego.

92

O jądrach atomowych można powiedzieć wiele rzeczy mniej lub bardziej pewnych, ale co do jednej nie ma żadnych wątpliwości: wcale nie są tworam tak nudnymi, jak je nam przedstawiano na zajęciach w szkole. Dowodem może być najnowszy eksperyment fizyków jądrowych, w którym badano skłonność protonów w jądrach atomowych do... wyrafinowanych form rozrywki. Zespół naukowców z włoskiego Università degli Studi di Milano (UniMi) oraz Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie w szerokiej współpracy międzynarodowej po raz pierwszy zmierzył czasy potrzebne pojedynczym protonom w jądrze atomowym do synchronizowania się z oscylacjami jądra. Osiągnięcie można zobrazować za pomocą przemawiającej do wyobraźni analogii: niektóre protony potrafią surfować po powierzchni jądra atomowego, a my wreszcie wiemy, jak długo muszą czekać nim „złapią fałę”.

Jądra atomowe zawierają od jednego protonu do ponad 200 protonów i neutronów i – podobnie jak atomy – mogą pochłaniać i emitować pewne porcje energii. W atomach procesom tym towarzyszą przejścia elektronów na (odpowiednio) dalsze lub bliższe jądra orbitale, grupujące się w powłoki elektronowe. Jak elektrony wokół jądra, tak protony i neutrony w samych jądrach znajdują się w ciągłym ruchu. Choć nie krążą wokół wyróżnionego punktu, okazuje się, że i tu można mówić o istnieniu w jądrach pewnych powłok o dobrze określonych energiach. Na ogół miejsca w tych powłokach mogą być zajmowane zarówno przez protony, jak i przez neutrony. Niektóre powłoki są jednak zarezerwowane wyłącznie dla protonów, a inne wyłącznie dla neutronów.

Przeskok na sąsiednią powłokę może niekiedy wymagać wchłonięcia lub wyemitowania dużej porcji energii (taka sytuacja pojawia się zwłaszcza wtedy, gdy powłoki są zapełnione). Jeśli dostępnej energii jest mniej, jądro nadal może zmienić swój stan energetyczny, tyle że w bardziej wyrafinowany sposób: zaczyna wibrować. Wiadomo, że może wtedy dojść do sprzężenia się ruchu protonu czy neutronu z oscylacjami jądra. Na pierwszy rzut oka zjawisko wydaje się bardzo abstrakcyjne. Tymczasem podobny mechanizm odgrywa główną rolę w jednym z kultowych, masowo uprawianych sportów świata. Mowa, naturalnie, o surfingu.



Jak surfer z falą, tak proton może się sprzęgać z wibracjami jądra atomowego. Na zdjęciu w roli protonu pęcherzyk powietrza graficznie wyciągnięty spod powierzchni wody. (Źródło: IFJ PAN, jch).

„Surferzy potrafią długo czekać na odpowiednią falę. Ale jej pojawienie się wcale nie gwarantuje dobrej zabawy! Jeśli surfer się zagapi, fala go minie, a on jedynie podskoczy na jej powierzchni jak korek czy spławik. Niezapomnianą frajdę będzie miał tylko ten surfer, który ze swą deską zdąży <wskoczyć na falę>. Surfing polega więc właśnie na sprzęganiu się surfera z falą. Coś podobnego w odpowiednich warunkach robią protony: „wskakują” na oscylacje powierzchni jądra atomowego i podróżują wraz z nimi. I chyba surfują profesjonalniej niż ludzie, bo przecież w ekstremalnych warunkach, no i bez deski...”, tłumaczy z uśmiechem prof. Bogdan Fornal (IFJ PAN).

Sprzęganie się protonu z wibracjami jądra jest trudne do badania, gdyż potrzebny jest układ, w którym samotny proton znajduje się na zewnątrz powłok w pełni zapełnionych wieloma protonami i neutronami. Aby zaobserwować „protonowych surferów”, włosko-polski zespół zrealizował w laboratorium Institut Laue-Langevin w Grenoble eksperyment, w którym milimetrowych rozmiarów grudki uranu ^{235}U i plutonu ^{241}Pu poddano naświetlaniu neutronami. W celu zwiększenia szansy na wychwycenie przez jądra atomowe, neutrony znacznie spowolniono. Gdy neutron przyłączał się do jądra w tarczy, stawało się ono niestabilne i rozpadało się na różne sposoby. Wśród produktów rozpadu znajdowały się wzбудzone jądra antymonu ^{133}Sb .

„Jądro antymonu ^{133}Sb to w zasadzie jądro cyny ^{132}Sn z dodatkowym protonem. A cyna ^{132}Sn jest szczególna: zawiera 50 protonów i 82 neutrony, dokładnie tyle, żeby całkowicie zapełnić i powłokę neutronową, i protonową. W takim jądrze – nazywamy je podwójnie magicznym – przeskok między powłokami wymaga emisji lub absorpcji dużej ilości energii. Antymon ^{133}Sb był więc dla nas tak interesujący, bo mamy tu skłonny do wpadania w wibracje kompaktowy rdzeń oraz jeden luźniej związany proton, czyli układ wręcz idealny do badania sprzężeń”, wyjaśnia prof. Fornal.

Jądra antymonu ^{133}Sb pozbywały się nadmiaru energii przez emisję kilku kwantów gamma o ściśle określonych energiach. W eksperymencie rejestrowano to promieniowanie, a wyniki porównywano z przewidywaniami teoretyków. Tak ustalono, przez które stany energetyczne jądra ^{133}Sb wracały do stanu podstawowego. Okazało się, że ścieżka rozpadu składa się z dwóch części: jednej z protonem niesprzężonym oraz drugiej, z protonem sprzężonym z oscylacjami jądra. Z zebranych danych wynika, że gdy już dojdzie do sprzężenia, jądro traci energię szybciej, a samo sprzężenie zostaje zachowane na wszystkich kolejnych stopniach drabiny energetycznej.

„Po raz pierwszy zmierzaliśmy czas potrzebny protonowi na sprzęgnięcie się z oscylacjami jądra. Dzięki temu wiemy już, że gdy proton wskoczy na falę, zachowuje się jak rasowy surfer: pozostaje na

niej do końca, czyli do momentu, gdy jądro osiągnie stan podstawowy. Tym, co sprawia protonowi największą trudność, okazuje się samo przechodzenie między stanami niesprzężonymi a sprzężonymi, czyli wsiadanie na falę”, mówi prof. Fornal.

Co ciekawe, z oscylacjami powłok może być jednocześnie sprzężonych kilka protonów. Uprawiają one wtedy coś w rodzaju surfingu grupowego, na dodatek w bardzo wyrafinowanej formie: sprzęgają się nie tylko z falami, ale także między sobą.

Wyniki eksperymentu, po stronie polskiej finansowanego z grantów Narodowego Centrum Nauki, mają znaczenie m.in. w kontekście poszukiwań kolejnych, bogatych w neutrony jąder atomowych. Nauka zna obecnie 258 stabilnych jąder atomowych i ok. 3000 niestabilnych – mniej więcej tyle, ile jest aktualnie odkrytych planet pozasłonecznych. Przewiduje się, że wszystkich jąder atomowych może być 7-9 tys. Na odkrycie i zbadanie czeka więc przynajmniej drugie tyle jąder atomowych, ile udało się poznać w całej historii fizyki jądrowej. W poszukiwaniach niezwykle pomocny byłby jednolity, spójny model jądra atomowego. Oddziaływania w jądrach atomowych są jednak tak skomplikowane, że mimo trwających od dekad wysiłków, na razie nie udało się go stworzyć.

Gdy w szkole rozważa się np. oddziaływanie elektrostatyczne między dwoma ciałami z ładunkami elektrycznymi, jest ono dość łatwe do opisanie, ponieważ ładunki są dwa, a siła między nimi zależy tylko od ich wzajemnej odległości. Protony i neutrony w jądrze spaja jednak oddziaływanie silne, zależące nie tylko od odległości między każdą oddziałującą parą cząstek jądrowych, ale także od wzajemnej i ciągle się zmieniającej orientacji ich spinów (momentów obrotowych). Na dodatek jądra ciężkich pierwiastków są układami zawierającymi nie dwie cząstki, lecz wiele protonów i neutronów – wszystkie oddziałują ze sobą, a każdy porusza się w polu wytwarzanym przez pozostałe. Cały układ jest tak skomplikowany, że dotychczas zbudowano tylko jego przybliżone modele, z których każdy w miarę dobrze opisuje jedynie pewne aspekty jądrowej rzeczywistości.

W tej sytuacji wszelkie jakościowo nowe pomiary doświadczalne są niezwykle ważne.

„Nasz wspólny eksperyment w ILL dostarczył danych, które umożliwiły mojej grupie skonstruowanie nowego modelu, lepiej opisującego sprzężanie się protonów z oscylacjami jądra. Po raz pierwszy możemy tu np. wyliczyć prawdopodobieństwa, z jakimi rozpadną się poszczególne stany energetyczne w tak wzbudzonych jądrach. W efekcie potrafimy lepiej przewidywać właściwości kolejnych jąder z nadmiarem neutronów, w tym tych, które dopiero czekają na odkrycie”, podsumowuje prof. Silvia Leoni (UniMi).

Model zbudowany na podstawie doświadczenia zaprojektowanego przez fizyków z UniMi i IFJ PAN ma znaczenie m.in. dla lepszego zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych za powstanie we Wszechświecie pierwiastków cięższych od żelaza (co wynika z faktu, że jądra takich pierwiastków tworzyły się w procesach inicjowanych przez szybkie wyłapywanie neutronów emitowanych w dużych ilościach w trakcie wybuchów supernowych). Innym potencjalnym obszarem zastosowań modelu jest energetyka jądrowa. Jego użycie pozwoli tu lepiej przewidywać, jak rozpadają się jądra utworzone w wyniku reakcji zachodzących w reaktorach, a zatem przyczyni się do dalszego podnoszenia poziomu ich bezpieczeństwa.

KONTAKT:

prof. dr hab. Bogdan Fornal
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk tel. +48 12 6628207 email: bogdan.fornal@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

G. Bocchi, (B. Fornal, N. Cieplicka-Oryńczak, B. Szpak) et al., *The mutable nature of particle-core excitations with spin in the one-valence-proton nucleus ^{133}Sb* , Phys. Lett. B, **760** (2016) 273-278, doi: 10.1016/j.physletb.2016.06.065.



**MATERIAŁY
I TECHNOLOGIE
Z PRZYSZŁOŚCIĄ**



Kraków, 5 września 2017

REWOLUCJA W BATERIACH LITOWO-JONOWYCH CORAZ BARDZIEJ REALNA

Współczesny świat nie może się już obejść bez przenośnych urządzeń elektronicznych, takich jak smartfony, tablety, laptopy, aparaty fotograficzne czy kamery. Wiele z tych urządzeń jest zasilanych z baterii litowo-jonowych, które mogłyby być mniejsze, lżejsze, bezpieczniejsze i bardziej wydajne, gdyby znajdujący się w nich płynny elektrolit zastąpić substancją w formie stałej. Obiecującym kandydatem na stały elektrolit wydaje się nowa klasa materiałów na związkach litu, zaprezentowana przez fizyków ze Szwajcarii i Polski.

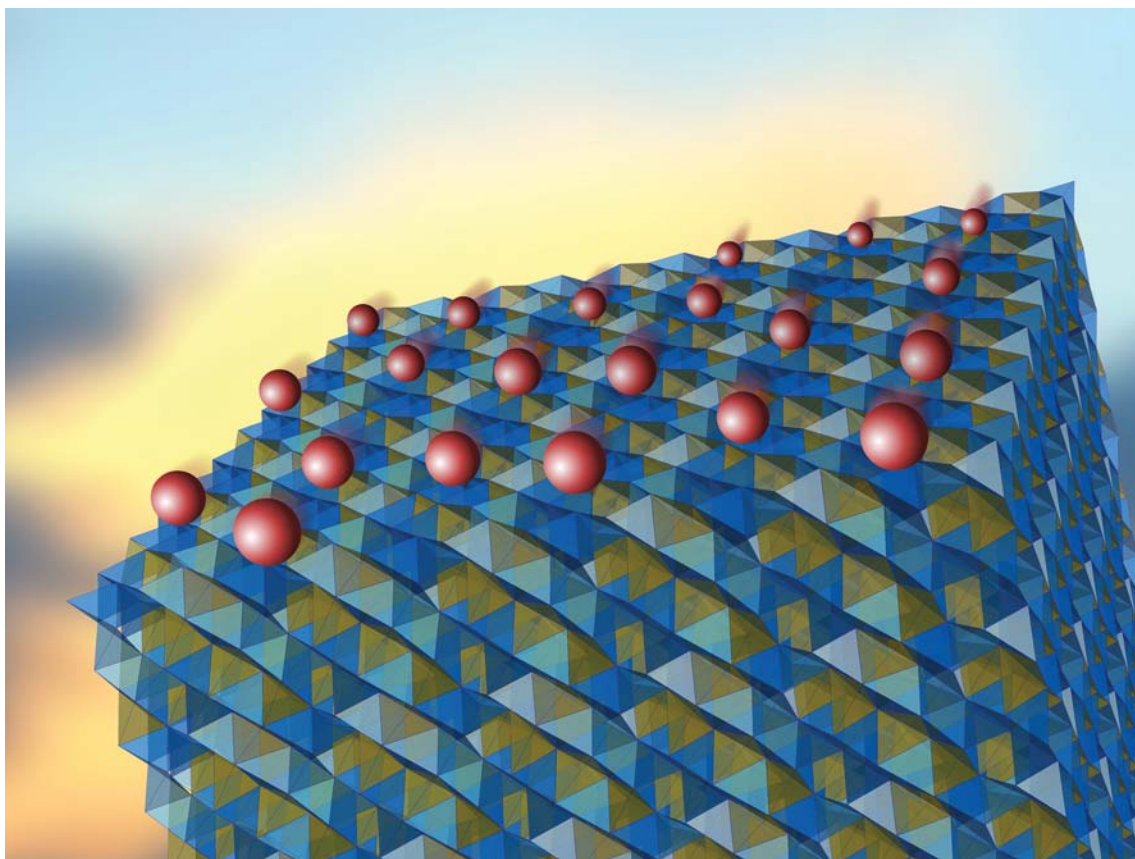
97

Komercyjnie dostępne baterie litowo-jonowe składają się z dwóch elektrod połączonych ciekłym elektrolitem. Elektrolit ten utrudnia inżynierom redukcję rozmiarów i masy baterii, a na dodatek może wyciec; znajdujący się w odsłoniętych elektrodach lit wchodzi wówczas w kontakt z tlenem w powietrzu i ulega samozapłonowi. Kłopoty firmy Boeing, która na wiele miesięcy musiała wstrzymać loty samolotów Dreamliner, są spektakularnym przykładem problemów, jakie przysparza eksploatacja współczesnych baterii litowo-jonowych.

W laboratoriach od lat trwają poszukiwania materiałów stałych zdolnych zastąpić ciekłe elektrolity. Do najpopularniejszych kandydatów należą związki, w których jony litu znajdują się w otoczeniu jonów siarki lub tlenu. W publikacji w czasopiśmie „Advanced Energy Materials” szwajcarsko-polski zespół naukowców zaprezentował jednak nową klasę związków jonowych, gdzie nośnikami ładunku są jony litu poruszające się w środowisku cząsteczek aminowych (NH_2) i borowodorkowych (BH_4). Część eksperymentalną projektu badawczego zrealizowano w szwajcarskim federalnym ośrodku badań materiałowych Empa w Dübendorfie oraz na Uniwersytecie Genewskim (UG). Za opis teoretyczny mechanizmów prowadzących do wyjątkowo dużej przewodności jonowej nowego materiału odpowiadał prof. dr hab. Zbigniew Łodziana z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

„Zajmowaliśmy się amido-borowodorkiem litu, substancją wcześniej znaną jako niezbyt dobry przewodnik jonowy. Związek ten wytwarza się mieląc ze sobą dwa składniki w proporcji 1 do 3. Nikt dotychczas nie sprawdzał, co się dzieje z przewodnością jonową, gdy proporcje między tymi składnikami zostaną zmienione. Zrobiliśmy to dopiero my i raptem się okazało, że zmniejszając liczbę grup NH_2 do pewnej wartości granicznej można znacznie poprawić przewodność. Wzrasta ona tak bardzo, że staje się już porównywalna z przewodnością ciekłych elektrolitów!”, mówi prof. Łodziana.

Kilkudziesięciokrotny wzrost przewodności jonowej nowego materiału, zaobserwowany jako efekt zmiany proporcji tworzących go składników, otwiera nowy, dotychczas nieeksplorowany kierunek poszukiwań kandydatów na stały elektrolit. Wcześniej na świecie koncentrowano się niemal wyłącznie



98

Amido-borowoderek litu to obiecujący kandydat na stały elektrolit. Struktura krystaliczna tego materiału składa się z dwóch podsieci, tu przedstawionych w różnych kolorach. W odpowiednich warunkach jony litu (czerwony), zwykle znajdujące się w komórkach elementarnych tylko jednej podsieci (żółtej), przenoszą się do pustych komórek drugiej podsieci (niebieskiej), gdzie mogą się swobodnie propagować. (Źródło: IFJ PAN).

na zmianach kompozycji chemicznej substancji. Teraz okazuje się, że na etapie produkcji związków kluczową rolę mogą odgrywać same proporcje między składnikami używanymi do ich wytworzenia.

„Nasz amido-borowoderek litu to przedstawiciel nowej, obiecującej klasy materiałów-kandydatów na stały elektrolit. Jednak zanim baterie zbudowane na takich związkach trafią do użytku, musi jeszcze upłynąć trochę czasu. Na przykład między elektrolitem a elektrodami nie powinny zachodzić żadne reakcje chemiczne prowadzące do ich degradacji. Ten problem wciąż czeka na optymalne rozwiązanie”, zauważa prof. Łodziana.

Perspektywy badań są obiecujące. Naukowcy z Empa, UG i IFJ PAN nie ograniczyli się bowiem do samego scharakteryzowania właściwości fizyko-chemicznych nowego materiału. Związek został użyty jako elektrolit w typowym półogniwie $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Półogniwo miało dobrą wydajność, która w testach polegających na 400-krotnym ładowaniu i rozładowaniu okazała się stabilna. Poczyniono też obiecujące kroki ku rozwiązaniu innego ważnego problemu. Opisany w publikacji amido-borowoderek litu wykazywał bowiem świetną przewodność jonową dopiero od temperatury ok. 40 stopni Celsjusza. W najnowszych doświadczeniach udało się ją już obniżyć poniżej temperatury pokojowej.

Pod względem teoretycznym nowy materiał pozostaje jednak wyzwaniem. Dotychczasowe modele konstruowano dla substancji, w których jony litu poruszały się w środowisku atomów. W nowym materiale jony przemieszczają się wśród lekkich cząsteczek, które zmieniając swoją przestrzenną orientację ułatwiają im ruch.

„W zaproponowanym modelu znakomita przewodność jonowa to konsekwencja specyficznej budowy sieci krystalicznej badanego materiału. Sieć ta składa się w rzeczywistości z dwóch podsieci. Okazuje się, że jony litu przebywają tu w komórkach elementarnych tylko jednej podsieci. Jednak bariera

dyfuzji między podsieciami jest niska. W odpowiednich warunkach jony przenoszą się więc do drugiej, pustej podsięci, w której mogą się dość swobodnie przemieszczać”, wyjaśnia prof. Łodziana.

Przedstawiony opis teoretyczny tłumaczy tylko część obserwowanych cech nowego materiału. Mechanizmy odpowiedzialne za jego dużą przewodność z pewnością są bardziej złożone. Ich lepsze zrozumienie powinno znacząco przyspieszyć poszukiwania optymalnych związków na stały elektrolit i w konsekwencji skrócić proces komercjalizacji nowych źródeł prądu, które z dużym prawdopodobieństwem zrewolucjonizują przenośną elektronikę.

KONTAKT:

prof. dr hab. Zbigniew Łodziana
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628267
email: zbigniew.lodziana@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

Y. Yan, R.S. Kühnel, A. Remhof, L. Duchêne, E.C. Reyes, D. Rentsch, Z. Łodziana, C. Battaglia, *A Lithium Amide-Borohydride Solid-State Electrolyte with Lithium-Ion Conductivities Comparable to Liquid Electrolytes*, Adv. Energy Mater., 7 (2017) 1700294, doi: 10.1002/aenm.201700294.



Kraków, 8 marca 2017

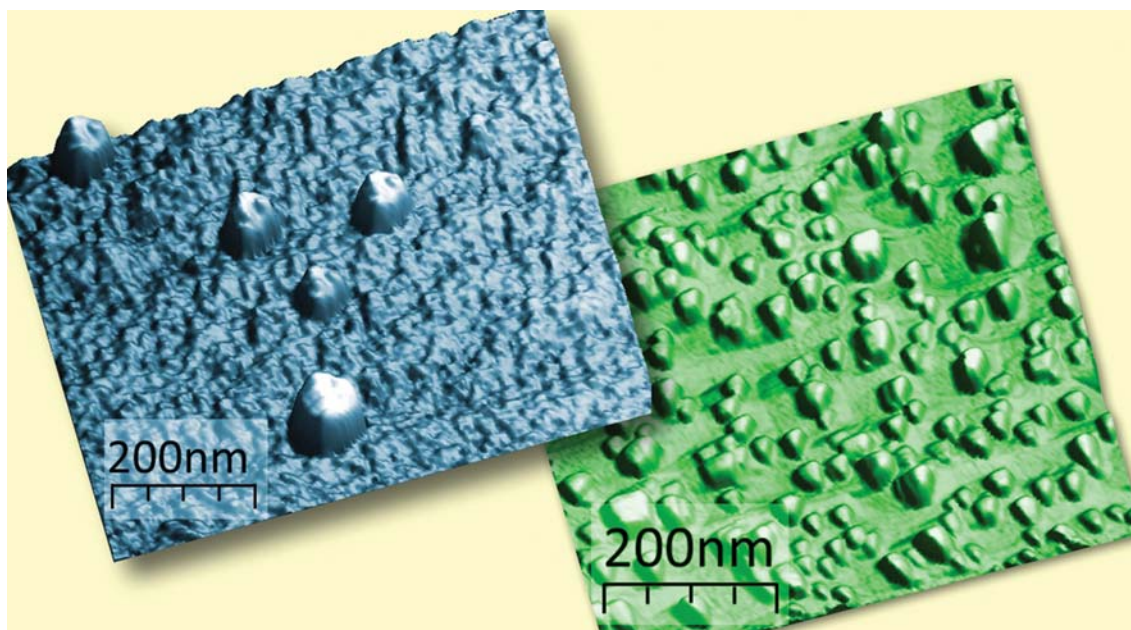
NANOINŻYNIERIA FONONOWA: NOWO ODKRYTE DRGANIA NANOWYSP EFEKTYWNIJ ROZPROSZĄ CIEPŁO

Dwukrzemek europu już od pewnego czasu przyciąga uwagę naukowców. Uznawany za obiecujący dla elektroniki i spintroniki, materiał ten został ostatnio poddany przez zespół fizyków z Polski, Niemiec i Francji kompleksowym badaniom wibracji jego sieci krystalicznych. Wyniki przyniosły niespodziankę: osadzone na podłożu z krzemu, niektóre struktury dwukrzemku europu okazują się drgać w sposób wyraźnie poszerzający możliwości projektowania nanomateriałów.

Drgania atomów w sieciach krystalicznych materiałów nie są chaotyczne, lecz mniej lub bardziej uporządkowane. Wzbudzenia sieci, nazywane fononami, zależą od wielu czynników, takich jak symetria kryształu czy masy atomów. Inaczej oscylują atomy w głębi litego kryształu, inaczej na jego powierzchni, jeszcze inaczej, gdy materiał tworzy na podłożu np. nanowyspy, czyli niewielkie klastry atomowe. Międzynarodowy zespół fizyków, złożony z naukowców Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, Politechniki w Karlsruhe (PK) oraz Europejskiego Centrum Promieniowania Synchrotronowego (The European Synchrotron, ESRF) w Grenoble, po raz pierwszy kompleksowo przebadali, jak zmieniają się wibracje sieci krystalicznej dwukrzemku europu (EuSi_2) w zależności od ukształtowania jego struktur osadzonych na podłożu z krzemu. Badania przyniosły niezwyklej rezultat: w próbce, w której nanowyspy dwukrzemku europu się stykały, zaobserwowano drgania nowego typu.

„Zwykle przez nanoinżynierię rozumie się modyfikowanie materiału w skali nanometrów, czyli miliardowych części metra. Badania nad dwukrzemkiem europu, w których uczestniczyliśmy, pozwalają nam zaproponować coś więcej: nanoinżynierię fononową, czyli taką, w której starannie projektuje się nie tyle samą strukturę materiału, ile drgania atomów w jego sieci krystalicznej”, mówi dr hab. Przemysław Piekarczyk (IFJ PAN).

W kryształce EuSi_2 każdy atom europu w głębi sieci jest otoczony przez 12 atomów krzemu. Układ ma symetrię nazywaną tetragonalną: odległość między atomami w jednym kierunku jest tu inna niż w dwóch pozostałych kierunkach. Dwukrzemek europu to metaliczny związek, który łatwo wiąże się z krzemem, charakteryzuje się też rekordowo niską tzw. barierą Schottky'ego (czyli barierą energii potencjalnej napotykaną przez elektrony przy przechodzeniu z metalu do krzemu). Materiały tego typu już dziś są interesujące z uwagi na potencjalne zastosowania w układach nanoelektronicznych, np. w technologii MOSFET używanej przy produkcji współczesnych procesorów. Jednak w niskich temperaturach dwukrzemek europu wykazuje także ciekawe własności magnetyczne, co czyni go atrakcyjnym dla następczyni elektroniki: spintroniki.



Zdjęcia mikroskopowe powierzchni pokrytej wyraźnie rozseparowanymi nanowypami dwukrzemku europu (po lewej) oraz nanowypami stykającymi się ze sobą (po prawej). (Źródło: IFJ PAN).

Związki ziem rzadkich z krzemem nie były dotychczas kompleksowo badane pod kątem drgań sieci, a te odgrywają przecież fundamentalną rolę m.in. w transporcie ciepła. Tymczasem w układach nanoelektronicznych, gdzie ciepło wydziela się w dużych ilościach, właściwości cieplne materiału stają się nie mniej ważne od jego cech elektrycznych czy magnetycznych.

Grupa dr. Svetoslava Stankova (PK) opracowała procedurę epitaksjalnego wytwarzania nanostruktur dwukrzemku europu, polegającą na osadzeniu w warunkach ultrawysokiej próżni niewielkich ilości atomów europu na podgrzewanym podłożu z krystalicznego krzemu. Dobierając temperaturę podłoża i liczbę atomów europu można w ten sposób otrzymywać struktury EuSi_2 o określonej morfologii.

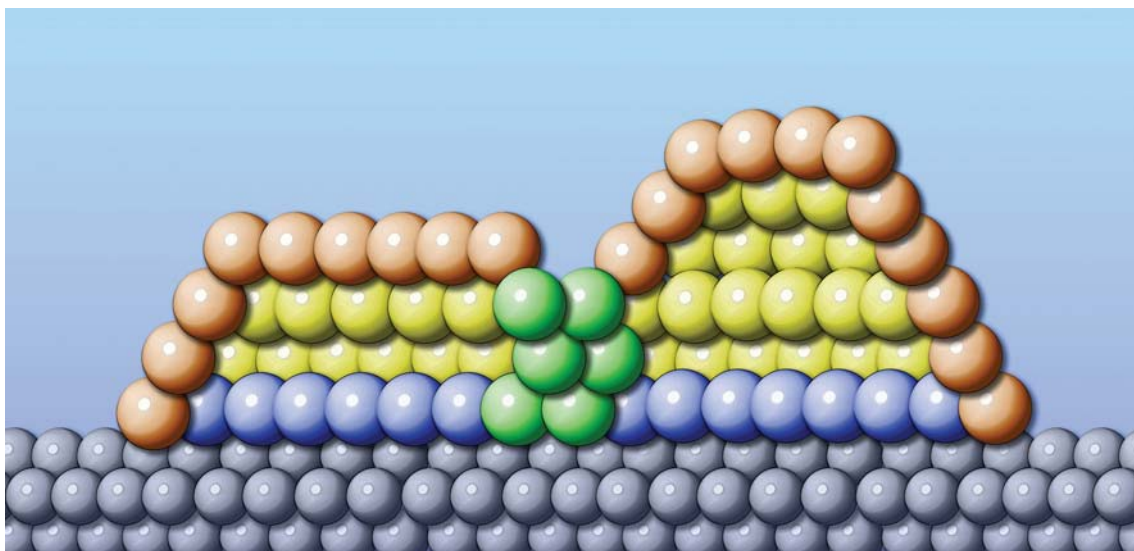
„W eksperymencie skoncentrowaliśmy uwagę na czterech przypadkach: jednorodnej powłoce, którą można było traktować jak lity kryształ, powłoce mocno pofałdowanej oraz na dwóch strukturach zbudowanych z nanowyp”, mówi dr Stankov i wyjaśnia: „Nanowyspa jest efektem samoorganizacji atomów osadzających się na podłożu: to wyraźnie wyodrębnione skupisko atomów, osiągające rozmiary rzędu kilkudziesięciu nanometrów przy wysokości kilkunastu nanometrów. Najciekawsze okazały się próbki, w których nanowyspy dwukrzemku europu były od siebie całkowicie odizolowane oraz takie, gdzie nanowyspy mogły się ze sobą stykać”.

Próbki wytwarzano w komorze ultrawysokiej próżni na linii pomiarowej rezonansu jądrowego w synchrotronie ESRF, gdzie od razu analizowano ich właściwości za pomocą nieelastycznego rozpraszania jądrowego (Nuclear Inelastic Scattering, NIS).

„NIS to najnowocześniejsza metoda bezpośredniego pomiaru energii drgań atomowych w nanostrukturach, z bardzo wysoką zdolnością rozdzielczą. Sieć krystaliczną oświetla się tu fotonami o dużych energiach, tak dobranych, by wskutek ich absorpcji przez jądra atomowe wzbudzić grupy atomów do drgań określonego rodzaju i wyznaczyć ich spektrum energetyczne”, dodaje dr Stankov.

W IFJ PAN przeprowadzono badania teoretyczne. Realizowano je metodami ab initio, opartymi na podstawowych prawach mechaniki kwantowej i fizyki statystycznej, używając oprogramowania PHONON napisanego przez prof. dr. hab. Krzysztofa Parlińskiego (IFJ PAN). Grupa krakowska zajmowała się nie tylko modelowaniem drgań sieci krystalicznej struktur dwukrzemku europu, ale także ustalaniem warunków przeprowadzania eksperymentów w synchrotronie ESRF.

„W Grenoble rejestrowano tylko energie drgań atomów europu. Krzywe otrzymane z pomiarów bardzo dobrze zgadzały z naszymi obliczeniami dla litego kryształu oraz dla powierzchni. Mogliśmy te dane uzupełnić o nasze przewidywania dotyczące ruchów atomów krzemu, co pomogło lepiej zinterpretować wyniki”, wyjaśnia prof. Parliński.



Struktura stykających się nanowyp dwukrzemku europu na podłożu z krzemu. Krzem oznaczono kolorem czarnym, lity kryształ dwukrzemku europu – kolorem żółtym. Warstwa brązowa to powierzchnia nanowypsy, niebieska – interfejs z podłożem, a zielona obejmuje styk między nanowypami. Dodatkowe drgania zaobserwowano w obrębie atomów przedstawionych w kolorze zielonym. (Źródło: IFJ PAN).

102

Szczególnie interesujące wyniki otrzymano dla próbek z nanowypami. W przypadku podłoża pokrytego rozseparowanymi nanowypami zaobserwowano znaczny wzrost amplitud drgań atomów europu – o 70% względem drgań w kryształach. Tak duży skok przekłada się na wyraźnie większe możliwości w zakresie transportu ciepła. Najciekawszy efekt pojawił się jednak w próbce z nanowypami przylegającymi do siebie. Na styku między nanowypami dostrzeżono dodatkowe drgania, o charakterystycznej energii. Chociaż przewidywane wcześniej teoretycznie, zostały po raz pierwszy potwierdzone eksperymentalnie. Ich istnienie to kolejna „furtka”, przez którą materiał może odprowadzać ciepło do otoczenia. Za pomocą stykających się nanowyp realnie staje się więc znaczne zwiększenie efektywności transportu ciepła w nanostrukturach.

„W trakcie analiz materiałowych naukowcy zwykle przyglądają się właściwościom próbki o ustalonej morfologii. My opisaliśmy całe spektrum możliwych struktur dwukrzemku europu. Zaawansowany model teoretyczny i precyzyjne pomiary pozwoliły po raz pierwszy dokładnie prześledzić, jak drgania sieci krystalicznej materiału zmieniają się w zależności od sposobu zabudowania podłoża”, podkreśla dr Piekarz.

Prace badawcze nad dwukrzemkiem europu, po stronie polskiej finansowane z grantu HARMONIA Narodowego Centrum Nauki, a po niemieckiej przez Helmholtz Association (PK, projekt VH-NG-625), mają charakter podstawowy. Zdobyta wiedza, zwłaszcza w zakresie drgań sieci krystalicznych pojawiających się na styku sąsiednich nanowyp i związanych z tym zjawiskiem wyraźnych zmian w transporcie ciepła, jest uniwersalna. Po odpowiedniej adaptacji będzie można ją wykorzystać do projektowania właściwości cieplnych innych materiałów niż dwukrzemek europu.

KONTAKT:

dr hab. Przemysław Piekarz
kierownik Zakładu Komputerowych Badań Materiałów
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628281
email: przemyslaw.piekarz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

A. Seiler, (P. Piekarz, K. Parliński) et al., *Anomalous lattice dynamics of EuSi₂ nanoislands: role of interfaces unveiled*, Phys. Rev. Lett., **117** (2016) 276101, doi: 10.1103/PhysRevLett.117.276101.



GDY CIEPŁO PRZESTAJE BYĆ ZAGADKĄ, SPINTRONIKA STAJE SIĘ REALNIEJSZA

Rozwój spintroniki zależy od materiałów gwarantujących kontrolę nad przepływem prądów spolaryzowanych magnetycznie. Trudno jednak mówić o kontroli, gdy nieznanne są szczegóły transportu ciepła przez złącza między materiałami. Ciepła luka w naszej wiedzy została właśnie wypełniona dzięki polsko-niemieckiemu zespołowi fizyków, który po raz pierwszy dokładnie opisał zjawiska dynamiczne zachodzące na złączu między ferromagnetykiem a półprzewodnikiem.

103

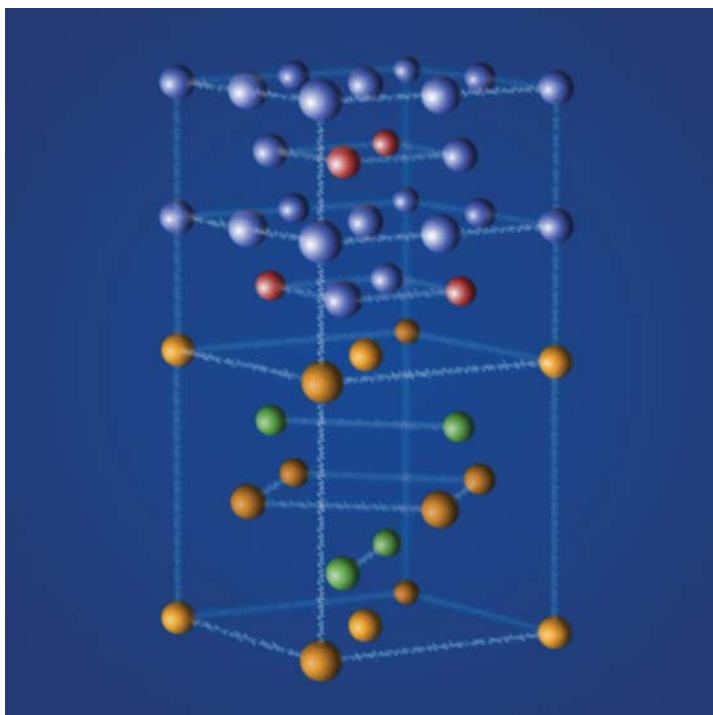
Spintronika to następczyni wszechobecnej elektroniki. W urządzeniach spintronicznych prądy elektryczne próbuje się zastępować prądami spinowymi. Obiecującym materiałem dla tego typu zastosowań wydaje się być złącze arsenku galu z krzemianem żelaza: na każde cztery elektrony przepływające przez złącze aż trzy niosą tu informację o kierunku momentu magnetycznego. Do tej pory niewiele było jednak wiadomo, jak zmieniają się właściwości dynamiczne złącza, decydujące o przepływie ciepła. Połączenie sił Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, Instytutu Technologicznego w Karlsruhe (KIT), Instytutu Paula Drudego w Berlinie i ośrodka badawczego DESY w Hamburgu pozwoliło tę zagadkę wreszcie rozwiązać.

„Układy z krzemianu żelaza Fe_3Si i arsenku galu $GaAs$ są szczególne. Oba materiały znacznie różnią się właściwościami: pierwszy jest bardzo dobrym ferromagnetykiem, drugi to półprzewodnik. Natomiast stałe sieci, czyli charakterystyczne odległości między atomami, w obu materiałach różnią się zaledwie o 0,2%, są więc niemal identyczne. W rezultacie materiały te świetnie się łączą, a na złączach nie ma defektów ani znaczących naprężeń”, mówi dr hab. Przemysław Piekarz (IFJ PAN).

Grupa skoncentrowała się na przygotowaniu teoretycznego modelu drgań sieci krystalicznych w badanym złączu. Istotną rolę odegrało tu oprogramowanie PHONON, stworzone i od ponad 20 lat rozwijane przez prof. dr hab. Krzysztofa Parlińskiego (IFJ PAN). W oparciu o podstawowe prawa mechaniki kwantowej wyliczane są tu siły oddziaływań między atomami, co pozwala rozwiązywać równania opisujące ruch atomów w sieciach krystalicznych.

Dr hab. Małgorzata Sternik (IFJ PAN), która wykonała większość obliczeń, wyjaśnia: „W naszym modelu podłożem jest arsenek galu, którego najbardziej zewnętrzna warstwa składa się z atomów arsenu. Nad nią znajdują się naprzemiennie ułożone warstwy z atomami żelaza i krzemu oraz samego żelaza. Drgania atomowe wyglądają inaczej dla litego kryształu, a inaczej w pobliżu interfejsu. Dlatego badaliśmy, jak zmienia się widmo drgań w zależności od odległości od interfejsu”.

Dynamika atomów w kryształach nie jest przypadkowa. Materiały te charakteryzują się dużym uporządkowaniem. W efekcie ruch atomów nie jest tu chaotyczny, lecz podlega pewnym, niekiedy bardzo złożonym wzorcom. Za transport ciepła odpowiadają głównie fale akustyczne poprzeczne. Oznacza to,



Model interfejsu GaAs/Fe₃Si. Atomy arsenu oznaczone kolorem pomarańczowym, galu – zielonym, krzemu – czerwonym, żelaza – niebieskim (Źródło: IFJ PAN).

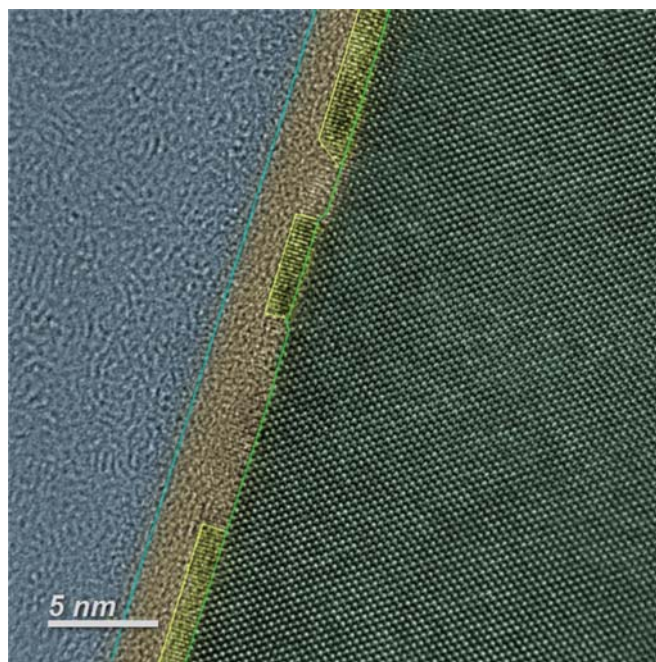
że przy analizie dynamiki sieci badacze musieli ze szczególną uwagą przyglądać się drganiom atomowym zachodzącym w płaszczyźnie równoległej do złącza. Gdyby fale drgań atomów w obu materiałach były do siebie dopasowane, ciepło efektywnie przepływałoby przez złącze.

104

Próbki materiałów Ge/Fe₃Si/GaAs, zawierające różną liczbę monowarstw krzemianu żelaza (3, 6, 8 oraz 36), zostały przygotowane w Instytucie Paula Drudego przez Jochena Kalta, doktoranta w Instytucie Technologicznym w Karlsruhe. Same doświadczenia zrealizowano w synchrotronie Petra III, na linii pomiarowej Dynamics Beamline P01 w ośrodku DESY.

„Pomiar widma drgań atomowych w ultracienkich warstwach jest wielkim wyzwaniem dla fizyków ciała stałego”, mówi kierujący eksperymentem dr Svetoslav Stankov (KIT) i dodaje: „Dzięki wyjątkowym

Zdjęcie mikroskopowe próbki z łączem arsenku galu GaAs i krzemianu żelaza Fe₃Si. Podłoże GaAs w kolorze zielonym, warstwy Fe₃Si w żółtym, kolorem brązowym oznaczono ochronną warstwę germanu (Źródło: IFJ PAN).



własnościom promieniowania synchrotronowego, potrafimy obecnie za pomocą nieelastycznego rozpraszania jądrowego wyznaczyć z dużą rozdzielczością widmo drgań atomowych w nanostrukturach. W naszych pomiarach wiązka promieniowania synchrotronowego padała na złącze w kierunku praktycznie równoległym do jego powierzchni. Takie ustawienie gwarantowało możliwość obserwacji drgań atomowych zachodzących równoległe do złącza. Co więcej, jest to pomiar selektywny dla atomów żelaza, bez zaburzenia pochodzącego od tła”.

Okazało się, że mimo podobieństw struktury krystalicznej obu materiałów, drgania atomów w pobliżu interfejsu znacznie różnią się od tych w litym materiale. Obliczenia z pierwszych zasad doskonale pokryły się z wynikami eksperymentalnymi, odtwarzając nowe cechy w widmach drgań atomów.

„Niemal doskonała zgodność teorii z eksperymentem otwiera drogę do nanoinżynierii fononowej, która może doprowadzić do powstania bardziej wydajnych urządzeń termoelektrycznych i efektywnego zarządzania przepływem ciepła”, podsumowuje dr Stankov.

Złącze Fe₃Si/GaAs okazało się doskonałym układem do badania własności dynamicznych i spintronicznych. W przyszłości zespół naukowców, finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (2017/25/B/ST3/02586), Helmholtz Association (HGF, VH-NG-625) i German Ministry for Research and Education (BMBF, 05K16VK4), zamierza rozszerzyć zakres badań interfejsu w celu dokładnego poznania jego własności elektronowych i magnetycznych.

KONTAKT:

dr hab. Przemysław Piekarz
kierownik Zakładu Komputerowych Badań Materiałów
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628281
email: przemyslaw.piekarz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

J. Kalt, (M. Sternik, O. Sikora, P. Piekarz, K. Parliński) et al., *Lattice dynamics of epitaxial strain-free interfaces*, Phys. Rev. B, **98** (2018) 121409, doi: 10.1103/PhysRevB.98.121409.



Kraków, 20 kwietnia 2016

ANTYMATERIA POMAGA W ODKRYWANIU TAJEMNIC CIEKŁYCH KRYSZTAŁÓW

Chaos typowy dla cząsteczek cieczy, uporządkowanie charakterystyczne dla kryształów. Istnieją stany materii łączące tak przeciwstawne cechy: to ciekłe kryształy. Dzięki ciekawemu użyciu antymaterii, w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazano, że struktury tworzone przez cząsteczki niektórych ciekłych kryształów w rzeczywistości muszą wyglądać inaczej niż dotychczas sądzono.

106

Ciekłe kryształy spotykamy w wielu dziedzinach techniki. W przyszłości materiały te, zastosowane np. w charakterze półprzewodników organicznych, mogą się jeszcze upowszechnić. Jednak by było to możliwe, należy wciąż prowadzić badania podstawowe z zastosowaniem różnych technik eksperymentalnych, pozwalających poznać strukturę tych związków i ich dynamikę. W tym celu w krakowskim Instytucie Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) przeprowadzono nowe doświadczenia nad ciekłymi kryształami w fazie smektycznej E (SmE). Smektyki tego typu są zbudowane z dobrze uporządkowanych i odseparowanych od siebie warstw cząsteczek. Dotychczas uważano, że odległość między poszczególnymi warstwami cząsteczek jest tu bardzo mała. Badania przeprowadzone przez krakowskich fizyków pozwoliły zweryfikować poprawność obecnych modeli i precyzyjniej określić strukturę fazy kryształopodobnej.

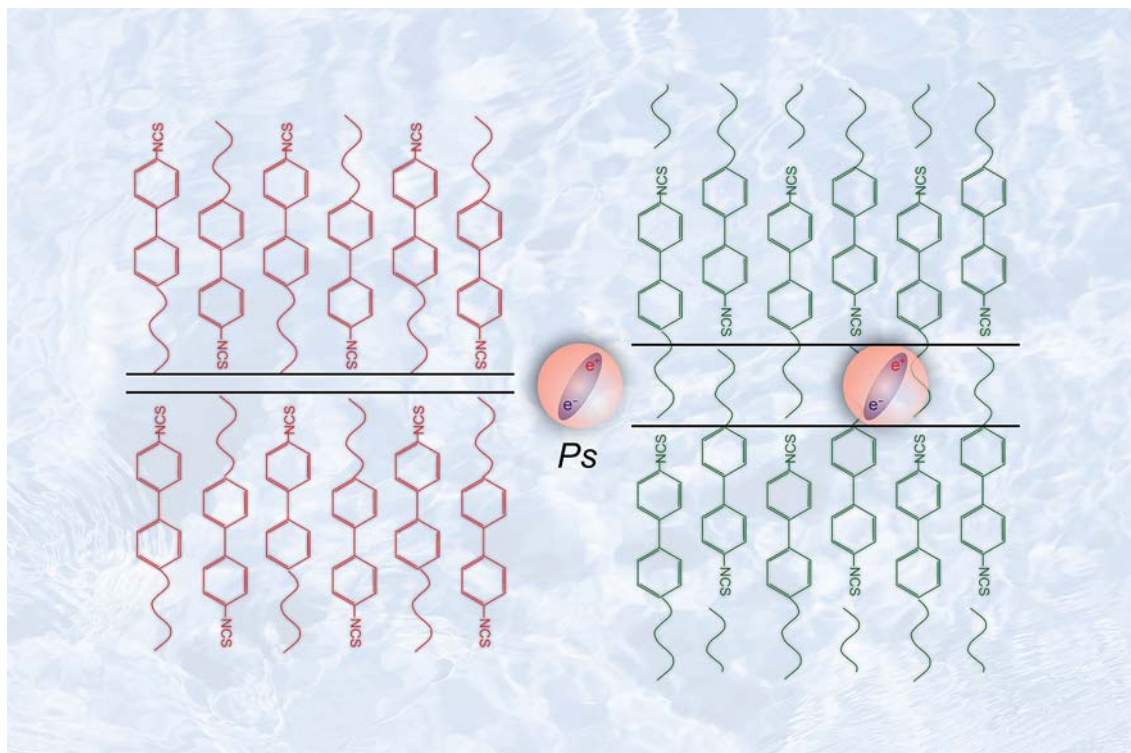
„Sięgnęliśmy po ciekawą technikę pomiarową, rzadko stosowaną w przypadku ciekłych kryształów. Metoda wykorzystuje specyficzne właściwości pozytonów, czyli antymaterialnych odpowiedników zwykłych elektronów”, wyjaśnia dr hab. Ewa Dryzek (IFJ PAN).

Pozyton jako antycząstka elektronu ma ładunek dodatni. Gdy pozyton napotyka elektron może dojść do anihilacji, czyli przekształcenia masy obu cząstek w promieniowanie elektromagnetyczne o charakterystycznej energii.

„W świecie zwykłej materii antymateria jest wytwarzana w procesach fizycznych jedynie w śladowych ilościach. My w trakcie naszych pomiarów korzystaliśmy z pozytonów powstających w wyniku rozpadów promieniotwórczych izotopu sodu 22 ”, mówi dr Ewa Juszyńska-Gałązka (IFJ PAN).

Pozytony ze źródła radioaktywnego wnikały do badanego materiału, w którym napotykały elektrony. Przed anihilacją para pozyton i elektron może utworzyć egzotyczny atom zwany pozytem. W materii miękkiej, czyli np. w ciekłych kryształach lub polimerach, pozyton może się tworzyć w nanoporach, czyli niewielkich, pustych przestrzeniach między cząsteczkami. Pomiar jego czasu życia, czyli czasu między emisją pozytonu ze źródła radioaktywnego a anihilacją, pozwala wyznaczyć wielkość tych nanoporów. Im mniejsze nanopory, tym anihilacja zachodzi szybciej.

W trakcie badań w IFJ PAN, zrealizowanych m.in. dzięki wcześniejszej współpracy z grupą dr hab. Bożeny Jasińskiej z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, naświetlano pozytonami związek 4TCB, znany m.in. z tego, że krystalizuje nie ze spadkiem, a ze wzrostem



Ciekłe kryształy typu SmE mają inną budowę niż dotychczas zakładano, wykazały pomiary z użyciem cząstek antymaterialnych, przeprowadzone w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Po lewej dotychczasowy model budowy smektyków SmE, po prawej nowy model, z wyraźną szczeliną między warstwami, dostatecznie dużą, by mógł się w niej ulokować pozyt (egzotyczny atom zbudowany z elektronu i pozytonu). (Źródło: IFJ PAN).

107

temperatury. Otrzymane wyniki wskazywały, że w badanym materiale tworzy się pozyt. Jednak biorąc pod uwagę obowiązujący model uporządkowania cząsteczek w fazie smektycznej E trudno było wskazać miejsce, w którym mógłby się on zmieścić.

„Z naszych pomiarów wynikało, że pozyt znajduje się w nanoporach o rozmiarach ok. sześciu angstromów, czyli sześciu dziesięciomiliardowych części metra. Wyniki te okazały się spójne z jednym z wariantów nowego modelu budowy smektyków E, który dopiero niedawno został zaproponowany przez grupę prof. Kazuyi Saito z Japonii”, mówi dr Dryzek.

Pomiary potwierdziły, że łańcuchy alkilowe – „ogony” cząsteczek – są w stanie ciekłym, czyli mają taką swobodę ruchów jak w cieczy izotropowej. Warto w tym miejscu wspomnieć, że w cieczach, wskutek oddziaływania z otaczającymi cząsteczkami, pozyt, „rozpychając się” sam wytwarza wokół siebie niewielką pustą przestrzeń. Taki układ można sobie wyobrazić jako bąbelek z pozytem w środku.

Japoński model smektyka E, zaproponowany na podstawie badań kalorymetrycznych i dyfrakcyjnych, zakładał, że cząsteczki ciekłego kryształu są ułożone w dwóch warstwach: pierwsza zawiera sztywne pierścienie fenylowe, druga łańcuchy alkilowe.

„W tym momencie wszystkie informacje zaczęły do siebie pasować! Pozyt może sobie wytworzyć bąbelek w warstwie zawierającej alkilowe ogony, ponieważ są one w stanie ciekłym. Rozmiar tak powstałego bąbelka zgadza się z szerokością warstwy”, mówi dr Dryzek.

Pomiary zależności czasu życia pozytu od temperatury potwierdziły, że w niskich temperaturach (ciekłego azotu) szybko schłodzony 4TCB tworzy szkło, w którym pozyt nie powstaje. Ruchy alkilowych ogonów są zamrożone i pozyt nie może wytworzyć bąbelka. Wraz ze wzrostem temperatury następuje mięknięcie szkła, które można opisać jako powstawanie w materiale domen cieczipodobnych. To właśnie w tych fragmentach zaczyna się tworzyć pozyt.

Spektroskopia anihilacji pozytonów jest stosowana w badaniach materiałowych metali, półprzewodników i polimerów. Wyniki z IFJ PAN udowadniają, że umiejętnie używana, metoda ta może być źródłem bardzo interesujących i szczegółowych informacji także o strukturze ciekłych kryształów.

KONTAKT:

dr hab. Ewa Dryzek
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628438, +48 12 6628370
email: ewa.dryzek@ifj.edu.pl

dr Ewa Juszyńska-Gałązka
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628234, +48 12 6628140
email: ewa.juszyńska@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

E. Dryzek, E. Juszyńska-Gałązka, *Positronium formation and annihilation in liquid crystalline smectic-E phase revisited*, Phys. Rev. E, **93** (2016) 022705, doi: 10.1103/PhysRevE.93.022705.



**WSZĘDOBYLSKA
FIZYKA**



Kraków, 18 października 2017

CHAOS RZĄDZI NAWET PROSTĄ ELEKTRONIKĄ

To naprawdę zaskakujące: okazuje się, że wśród prostych układów elektronicznych, zbudowanych z zaledwie paru elementów, wiele zachowuje się chaotycznie, w niezwykle skomplikowany, praktycznie niemożliwy do przewidzenia sposób. Fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie odkryli, przebadali i opisali kilkadziesiąt nowych, nietypowych układów tego typu. Co szczególnie ciekawe, jeden z układów generuje impulsy napięcia bardzo podobne do wytwarzanych przez neurony, robi to jednak tysiące razy szybciej.

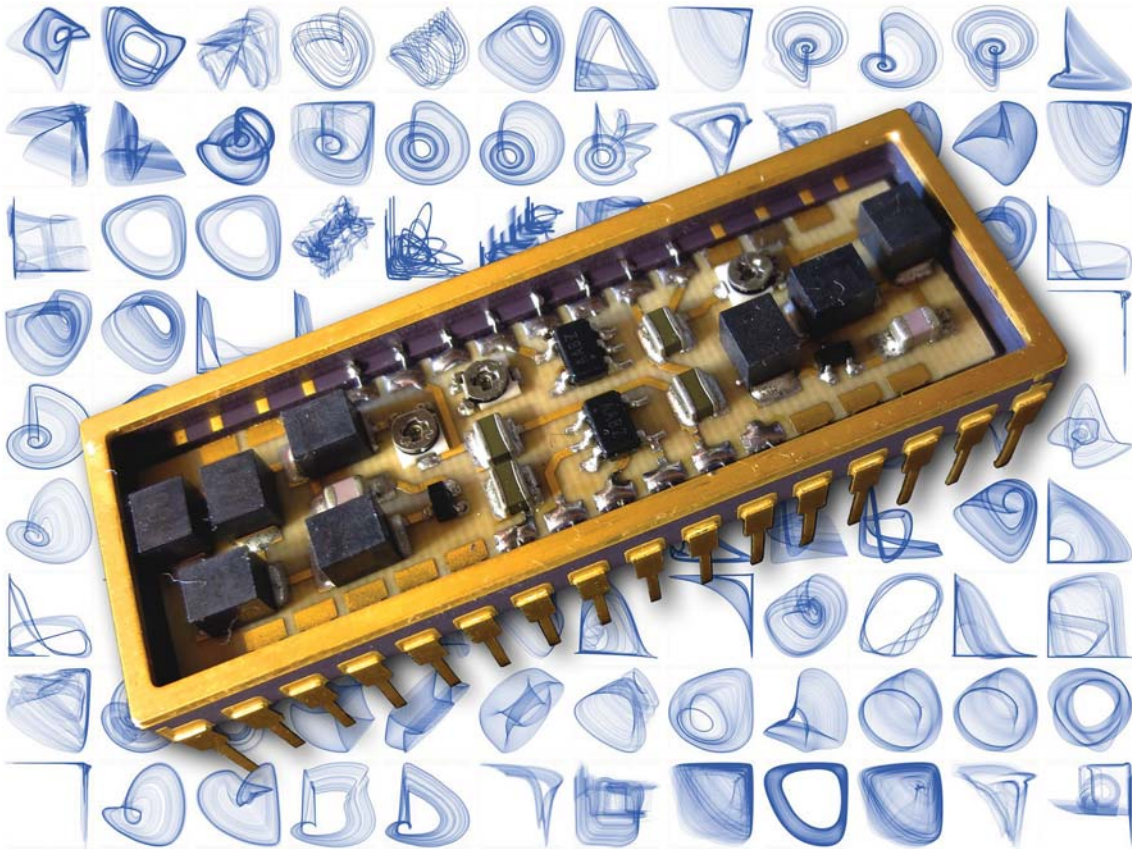
111

Zaledwie kilka tranzystorów, oporników, kondensatorów i cewek wystarczy do zbudowania układów elektronicznych zachowujących się w sposób praktycznie niemożliwy do przewidzenia. Nawet w tak prostych układach chaotyczne oscylacje o skomplikowanej naturze okazują się być nie wyjątkiem, lecz normą, wykazali naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. W publikacji w czasopiśmie „Chaos” przedstawili oni 49 nowych, nietypowych chaotycznych oscylatorów elektronicznych – nie zaprojektowanych, lecz odkrytych za pomocą symulacji komputerowych.

„Elektronika zwykle kojarzy się z urządzeniami działającymi precyzyjnie i zawsze zgodnie z oczekiwaniami. Z naszych badań wyłania się jej zupełnie inny obraz. Już w układach elektronicznych zawierających ledwie jeden czy dwa tranzystory chaos okazuje się wszechobecny! Przewidywalne i zawsze takie same reakcje urządzeń elektronicznych, używanych przez nas wszystkich na co dzień, to nie odzwierciedlenie natury elektroniki, lecz wysiłków projektantów”, mówi pierwszy autor publikacji, dr Ludovico Minati (IFJ PAN).

Potocznie przez chaos rozumiemy brak porządku. W fizyce pojęcie to funkcjonuje nieco inaczej: o układzie mówi się, że zachowuje się chaotycznie, gdy nawet bardzo małe zmiany parametrów wejściowych skutkują dużymi zmianami na wyjściu. Ponieważ różnego typu fluktuacje są naturalną cechą świata, w praktyce układy chaotyczne wykazują ogromne bogactwo zachowań – tak wielkie, że precyzyjne przewidzenie ich reakcji jest bardzo trudne, a nierzadko wręcz niemożliwe. Układ może więc sprawiać wrażenie zachowującego się zupełnie przypadkowo, mimo że w rzeczywistości jego ewolucja przebiega wedle pewnego skomplikowanego wzorca.

Zachowania chaotyczne są tak złożone, że do dziś nie ma metod pozwalających na efektywne projektowanie obwodów elektronicznych tego typu. Fizycy z IFJ PAN podeszli więc do problemu inaczej. Zamiast od podstaw konstruować chaotyczne oscylatory, zdecydowali się je... odkrywać. Strukturę układów, tworzoną z elementów dostępnych komercyjnie, odwzorowywano jako ciąg 85 bitów. Modelowane układy w maksymalnej konfiguracji składały się ze źródła zasilania, dwóch tranzystorów, opornika i sześciu kondensatorów lub cewek, połączonych w obwód zawierający osiem węzłów. Tak przygotowane ciągi bitów poddawano następnie przypadkowym modyfikacjom. Symulacje zrealizowano na superkomputerze Cray XD1.



Wiele prostych układów elektronicznych może się zachowywać w trudny do przewidzenia, chaotyczny sposób, wykazali naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Zdjęcie przedstawia przyrząd zbudowany z dwóch właśnie odkrytych oscylatorów. W tle tzw. atraktory, ilustrujące różnorodność i bogactwo zachowań nowych układów. (Źródło: IFJ PAN).

112

„Nasze poszukiwania odbywały się metodą na ślepo, w gigantycznej przestrzeni oferującej 2 do potęgi 85 możliwych kombinacji. W trakcie symulacji przeanalizowaliśmy mniej więcej dwa miliony układów, a więc ekstremalnie mały obszar całej dostępnej przestrzeni. W tym gronie ok. 2500 układów wykazywało interesujące zachowania”, mówi dr Minati i podkreśla, że chaotyczne oscylatory elektroniczne były znane już wcześniej. Dotychczas wydawało się jednak, że występują tylko w kilku odmianach, a ich skonstruowanie wymaga pewnego wysiłku i odpowiedniej złożoności układu.

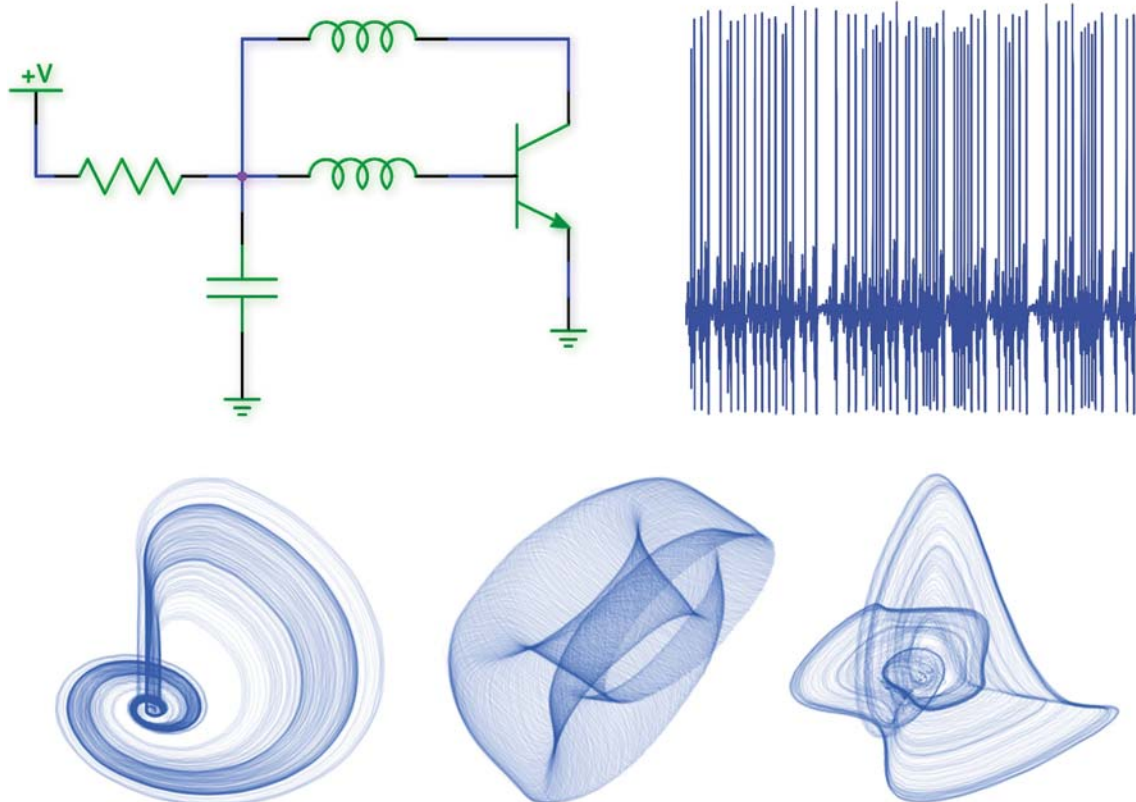
Fizycy z IFJ PAN analizowali działanie nowych układów za pomocą programu SPICE, powszechnie stosowanego przy projektowaniu obwodów elektronicznych. W przypadku zachowań chaotycznych możliwości symulacyjne SPICE okazały się jednak niewystarczające. Dlatego 100 najciekawszych układów zbudowano fizycznie i przebadano w laboratorium. W celu poprawienia jakości generowanych sygnałów w trakcie testów niejednokrotnie dokonywano delikatnego „tuningu” parametrów elementów składowych. Ostatecznie liczbę interesujących układów zredukowano do 49. Najmniejszy chaotyczny oscylator składał się z jednego tranzystora, jednego kondensatora, jednego opornika i dwóch cewek. Większość znalezionych układów wykazywała nietrywialne, chaotyczne zachowania o niekiedy zadziwiającej skali złożoności. Złożoność tę można zwizualizować za pomocą specjalnych wykresów – atraktorów, w geometryczny sposób odwzorowujących charakter zmian aktywności układu w czasie. Analizy statystyczne sygnałów wytwarzanych przez nowe oscylatory nie wykazały jednak śladów dwóch istotnych cech spotykanych w wielu układach samoorganizujących: krytyczności i multifraktalności.

„O multifraktalności można byłoby mówić, gdyby różne fragmenty wykresu obrazującego zmiany napięcia, powiększane w różnych miejscach w różny sposób, ujawniały podobny do pierwotnego charakter zmian. Z kolei z krytycznością mielibyśmy do czynienia, gdyby układ znajdował się w stanie, w którym w każdej chwili mógłby przechodzić z trybu regularnego do chaotycznego bądź odwrotnie. Takich zjawisk w badanych oscylatorach nie zauważyliśmy”, tłumaczy prof. dr hab. Stanisław Drożdż

(IFJ PAN, Politechnika Krakowska) i dodaje: „Układy w stanie krytycznym na ogół mają więcej możliwości reagowania na zmiany w swoim środowisku. Nic więc dziwnego, że krytyczność jest zjawiskiem dość często spotykanym w naturze. Wiele wskazuje, że układem pracującym w stanie krytycznym jest na przykład ludzki mózg”.

Sz szczególnie ciekawy okazał się jeden ze znalezionych oscylatorów, który generował skoki napięcia przypominające wzbudzenia typowe dla... neuronów. Podobieństwo impulsów było tu uderzające, lecz nie całkowite.

„Nasz sztuczny analog neuronu okazał się znacznie szybszy od swego biologicznego pierwowzoru: impulsy powstawały tysiące razy częściej! Gdyby nie brak krytyczności i multifraktalności, szybkość pracy tego obwodu uprawniałaby do mówienia wręcz o elektronicznym superneuronie. Być może taki układ istnieje, tylko my go jeszcze nie znaleźliśmy. Na razie musimy się więc zadowolić ‘prawie superneuronem’”, komentuje z uśmiechem dr Minati.



Chaotyczne zmiany napięcia okazują się typowe nawet dla kilkuelementowych obwodów elektronicznych. W lewym górnym rogu zamieszczono schemat najprostszego chaotycznego oscylatora znalezionego przez fizyków z IFJ PAN w Krakowie. Po prawej serie impulsów wykazujące duże podobieństwo do wzbudzeń neuronów, generowane przez jeden z nowo odkrytych układów. W dolnym rzędzie kilka tzw. atraktorów, ilustrujących złożoność zachowań nowych układów. (Źródło: IFJ PAN).

Krakowscy fizycy zademonstrowali także, że wskutek łączenia znalezionych układów w pary pojawiają się zachowania o jeszcze większej skali złożoności. Sprzęgnięte układy w jednych sytuacjach pracowały perfekcyjnie synchronicznie, niczym muzycy grający unisono, w innych jeden z obwodów przejmował rolę lidera, w jeszcze innych wzajemne powiązanie oscylatorów było tak zagmatwane, że ujawniało się dopiero po przeprowadzeniu uważnej analizy statystycznej.

W celu przyspieszenia rozwoju badań naukowych nad systemami elektronicznymi imitującymi zachowanie ludzkiego mózgu, schematy wszystkich układów znalezionych przez fizyków z IFJ PAN zostały upublicznione. Zainteresowani mogą je pobrać z adresu:
<ftp://ftp.aip.org/epaps/chaos/E-CHAOEH-27-012707>.

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl

dr Ludovico Minati
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628241
email: ludovico.minati@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

L. Minati, M. Frasca, P. Oświęcimka, L. Faes, S. Drożdż, *Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity*, *Chaos*, 27 (2017) 073113, doi: 10.1063/1.4994815.



OD PODŁÓG KATEDR PO UKŁADY TRANZYSTOROWE: WSPANIAŁY POTENCJAŁ GENERATYWNY TRÓJKĄTA SIERPIŃSKIEGO

Jeden tranzystor, zaledwie parę cewek i kondensatorów. Nawet tak prosty układ elektroniczny może stać się oscylatorem o zaskakującym bogactwie zachowań. Struktura połączeń układu powinna jednak mieć budowę fraktalną i... cechować się pewnymi niedoskonałościami. Czy podobne reguły mogłyby wyjaśniać różnorodność i złożoność reakcji ludzkiego mózgu?

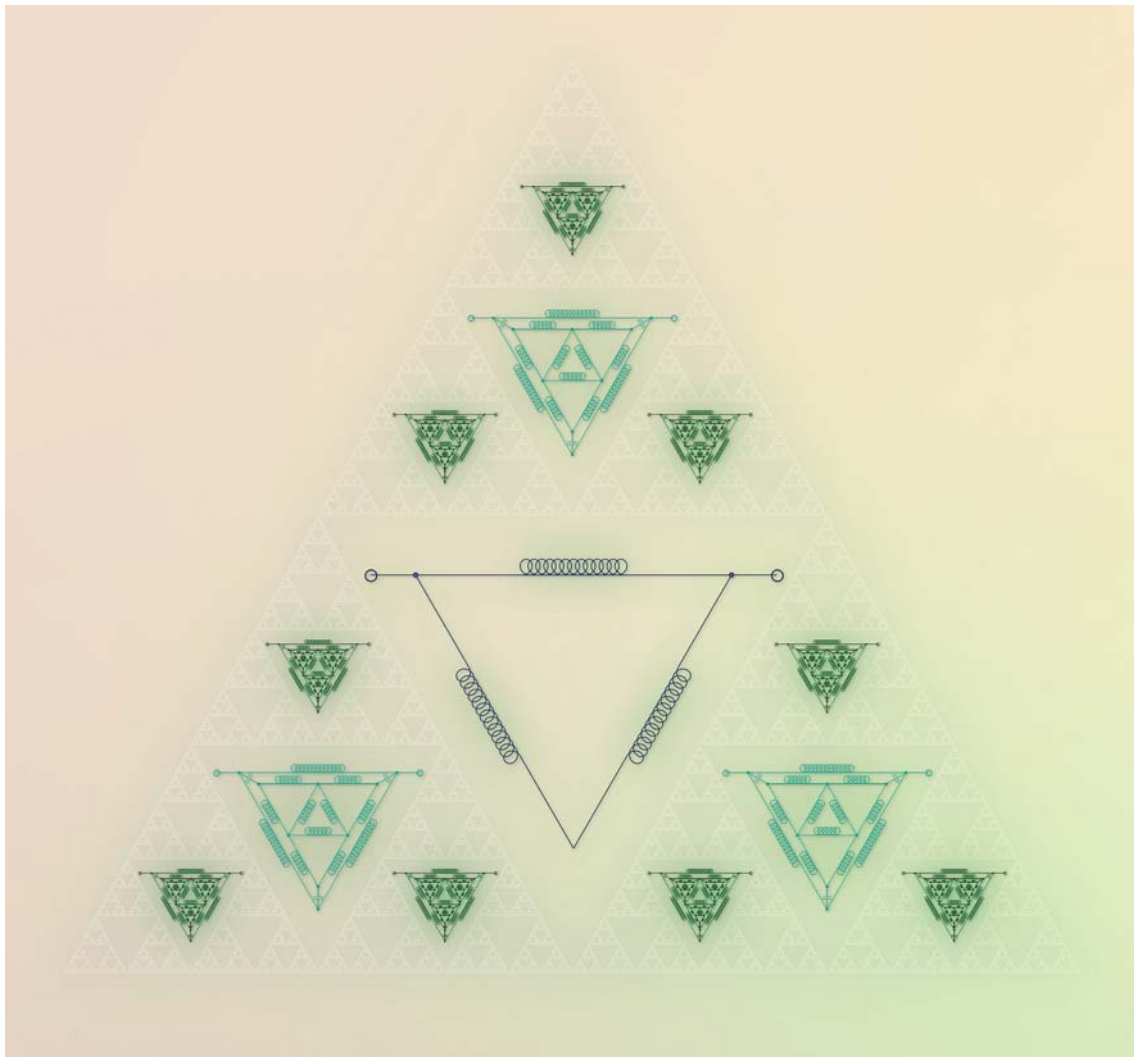
115

Intuicja podpowiada, że samopodobieństwo pojawia się tylko w układach o tak ogromnej złożoności jak sieci neuronowe w mózgu, czy też w fascynujących bogactwem kształtów przyrody, jak w słynnych kwiatostanach brokułów Romanesco. W Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, przy udziale partnerów z włoskich uniwersytetów w Katanii i Trydencie, dokonano odkrycia, które w pewnych aspektach podważa to przekonanie. Naukowcy skonstruowali elementarny oscylator elektroniczny z zaledwie jednym tranzystorem. Jak się okazuje, nawet tak prosty układ, jeśli zawiera cewki indukcyjne i kondensatory połączone w strukturę o cechach fraktalnych, generuje sygnały elektryczne o zadziwiająco bogatej charakterystyce.

Zazwyczaj nie zwracamy uwagi, jak wiele obiektów w naszym otoczeniu wygląda podobnie niezależnie od tego, z jak daleka czy bliska im się przyglądamy. Całość czasami jest podobna do swych części! Ta niezwykła cecha, znana jako samopodobieństwo, to wyróżnik matematycznych fraktali. Samopodobieństwo nie jest jednak domeną wyłącznie matematyki. Widać je w kształtach chmur, liniach wybrzeży, w budowie roślin czy nawet w nas samych. Fraktalne kształty mają nasze oskrzela i naczynia krwionośne, a w mniejszej skali widać je w dendrytach czy w sieciach połączeń między neuronami w mózgu.

Dlaczego fraktale są wszechobecne? Pytanie to już długo nurtuje naukowców, lecz dopiero od niedawna doczekało się zainteresowania ze strony inżynierów, starających się wykorzystać samopodobieństwo do zagęszczania obwodów elektrycznych. Próbuje się w ten sposób miniaturyzować m.in. anteny. Możliwe jest także tworzenie innych prostych obwodów fraktalnych, na przykład poprzez odpowiednie łączenie cewek i kondensatorów. Niezależnie od swych rozmiarów, układy tego typu zawsze miałyby samopodobny kształt – i ciekawe właściwości. Dotychczas jednak nikt nie testował, jak takie fraktalne obwody sprawdzałyby się w oscylatorze.

„Nasze najnowsze badania rozpoczęliśmy od ekstremalnie prostego układu, który odkryliśmy rok wcześniej. To naprawdę maleństwo: składa się zaledwie z jednego tranzystora, dwóch cewek, jednego kondensatora i jednego opornika. Mimo to, w zależności od geometrii połączeń i parametrów cewek i kondensatorów, układ wykazuje różnorodną, niekiedy bardzo złożoną aktywność. Zastanawialiśmy



Trzy iteracje prostych elektronicznych oscylatorów na tle trójkąta Sierpińskiego. (Źródło: IFJ PAN).

się więc, co by się stało, gdybyśmy zaczęli zastępować poszczególne cewki coraz mniejszymi, samopodobnymi obwodami”, mówi dr hab. Ludovico Minati (IFJ PAN), główny autor publikacji w renomowanym czasopiśmie naukowym „Chaos”.

Przy generowaniu fraktali korzysta się z wielu algorytmów. Jeden z najprostszych zaczyna się od wykreślenia trójkąta, a następnie połączenia środków jego boków. Powstają tak cztery mniejsze trójkąty: trzy przy wierzchołkach i jeden pośrodku. Trójkąt w środku należy zignorować, a w pozostałych trójkątach powtarza się całą procedurę. Odpowiednio duża liczba iteracji prowadzi do uformowania trójkąta Sierpińskiego, fraktala nazwanego w ten sposób na cześć polskiego matematyka, który badał jego właściwości. W rzeczywistości trójkąt Sierpińskiego był jednak znany wcześniej: już średniowieczni artyści Marmorari Romani stosowali go jako element dekoracyjny na posadzkach kościołów w rejonie Lacjum (środkowe Włochy).

Zaintrygowani pomysłem przekształcenia analizowanego obwodu we fraktal, naukowcy z Krakowa postanowili wkomponować w niego kolejne i kolejne struktury, wedle wzorca charakterystycznego dla trójkąta Sierpińskiego, tyle że wykonane z cewek i kondensatorów. I tu czekała na nich niespodzianka. Choć obwody do testów laboratoryjnych wykonano z najwyższą precyzją, ich schematy zachowania nie wykazywały poziomu złożoności i piękna przewidywanego przez symulacje komputerowe!

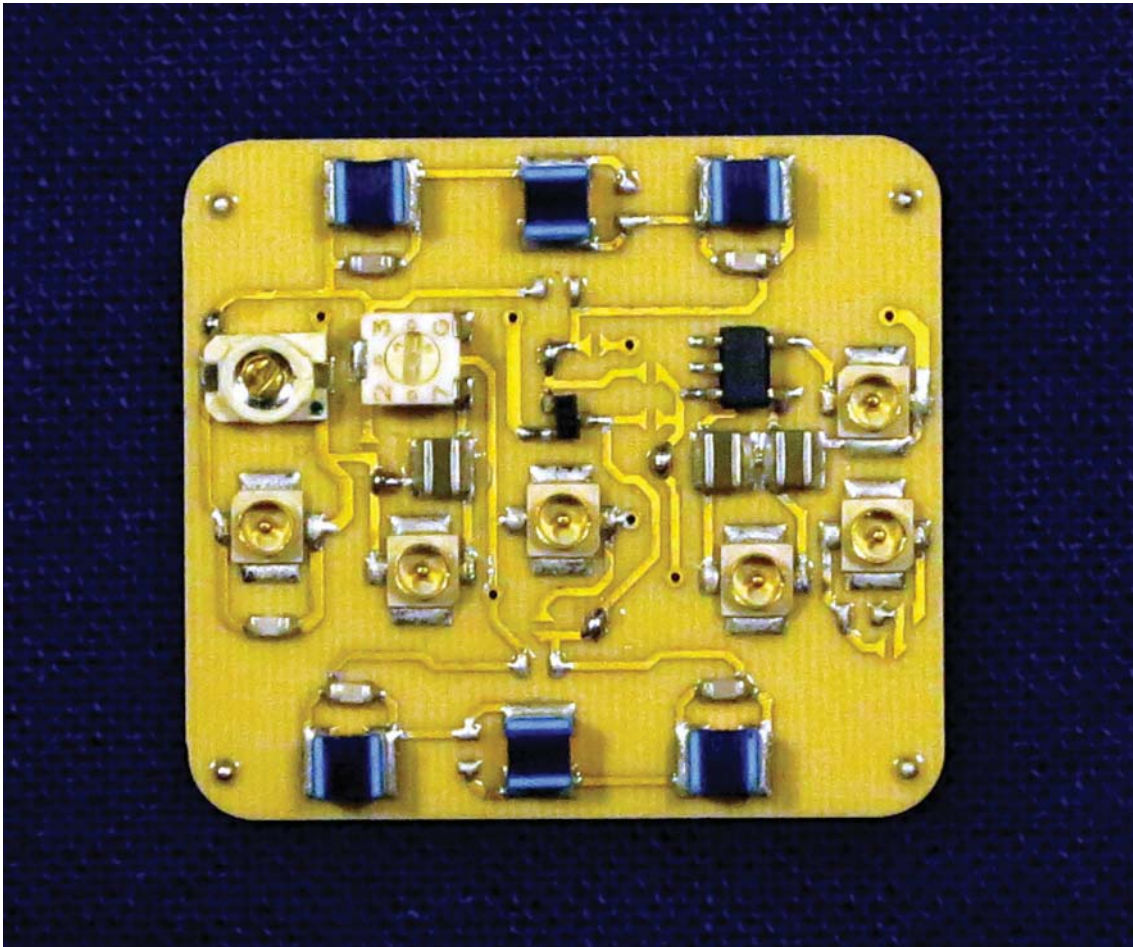
Gdy bada się wykonane z cewek proste obwody o strukturze trójkąta, generowane przez nie sygnały nie wydają się specjalnie złożone. Po rozbudowaniu pierwotnego trójkąta o kolejne iteracje z cewek i łączących je kondensatorów, zwiększa się głębokość fraktala. Sygnały stają się szybko tak skomplikowane,

że w pewnym momencie ich opis wymaga użycia aż dziesięciu wymiarów! Gdy jednak struktury zbadane za pomocą symulacji numerycznych próbuje się przekształcić w prawdziwe obwody, rezultat rozczarowuje: bogactwo dynamiki prawdziwego układu jest sporo mniejsze od oczekiwanego, zmniejsza się też liczba wymiarów niezbędnych do jego opisu. Efekt ten jest konsekwencją faktu, że rzeczywiste elementy obwodu nigdy nie są idealne, co prowadzi do swobodnego „rozmycia” fraktala.

„Na początku byliśmy tym odkryciem po prostu rozczarowani. Dopiero po pewnym czasie zrozumieliśmy, że mamy do czynienia z interesującym zjawiskiem, którego istnienia pierwotnie po prostu nie byliśmy świadomi. Kluczem do usunięcia zaburzeń powstałych wskutek niedoskonałości rzeczywistych elementów okazały się bowiem nie próby poprawienia fraktalnej struktury, lecz... jej uszkodzenie!”, mówi dr Minati, nadal sprawiając wrażenie nieco zaskoczonego.

Piękno tkwi w niedoskonałości. Frazę tę nierzadko słychać z ust artystów, a najnowsze badania fizyków z IFJ PAN zdają się ją wzmacniać. Eksperymentalnie stwierdzono bowiem, że fraktalne oscylatory elektroniczne przejawiają bardziej złożone rezonanse, gdy ich struktura zostanie nieznacznie zaburzona, na przykład poprzez usunięcie części obwodu lub wprowadzenie nowego połączenia. Rezonanse podobne do tak otrzymywanych zwykle pojawiają się po losowym przetasowaniu wszystkich elementów obwodu. W rzeczywistych, fizycznie istniejących układach elektronicznych, pozwoliły odtworzyć całe bogactwo zachowań, które wcześniej wydawało się bezpowrotnie stracone wskutek nieco niższej jakości rzeczywistych elementów elektronicznych.

„Perfekcja to domena matematyki, nie biologii czy fizyki. Większość fraktali widocznych w naturze wcale nie jest perfekcyjna, co zazwyczaj odbieramy jako oczywistą wadę. Tymczasem nasze rozumienie roli tych niedoskonałości może być najzwyczajniej bardzo ograniczone”, zauważa prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).



Rzeczywiste oscylatory elektroniczne zwiększają dynamikę zachowań dzięki niedoskonałościom w strukturze fraktalnych połączeń. (Źródło: IFJ PAN).

Z badań krakowskich fizyków wynika, że w prostych, fraktalnych oscylatorach elektronicznych niedoskonałości w strukturze połączeń radykalnie zwiększają dynamikę zachowań. Spostrzeżenie to prowokuje do pewnych spekulacji związanych z budową i funkcjonowaniem ludzkiego mózgu.

„Możemy skłaniać się ku przekonaniu, że niedoskonałości w sieci połączeń między neuronami powstały przypadkowo w trakcie odtwarzania jakiejś domyślnie perfekcyjnej struktury. Lecz w rzeczywistości prawdopodobnie tak nie jest. Ich obecność może służyć konkretnemu celowi i być wręcz wynikiem długotrwałej selekcji naturalnej. Sieci neuronowe z wadami będą bowiem przejawiały większe bogactwo zachowań! Kto więc wie, czy zainspirowani tą obserwacją nie zaczniemy pewnego dnia produkować komputerów, które rozmyślnie nie będą doskonałe?”, podsumowuje prof. Drożdź.

KONTAKT:

dr hab. Ludovico Minati
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628241
email: ludovico.minati@ifj.edu.pl

prof. dr hab. Stanisław Drożdź
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

L. Minati, M. Frasca, G. Giustolisi, P. Oświęcimka, S. Drożdź, L. Ricci, *High-dimensional dynamics in a single-transistor oscillator containing Feynman-Sierpiński resonators: Effect of fractal depth and irregularity*, *Chaos*, **28** (2018) 093112, doi: 10.1063/1.5047481.



Kraków, 23 sierpnia 2018

GENEZA KSZTAŁTU: NIE MA MAGII W SYNCHRONIZACJI NA ODLEGŁOŚĆ

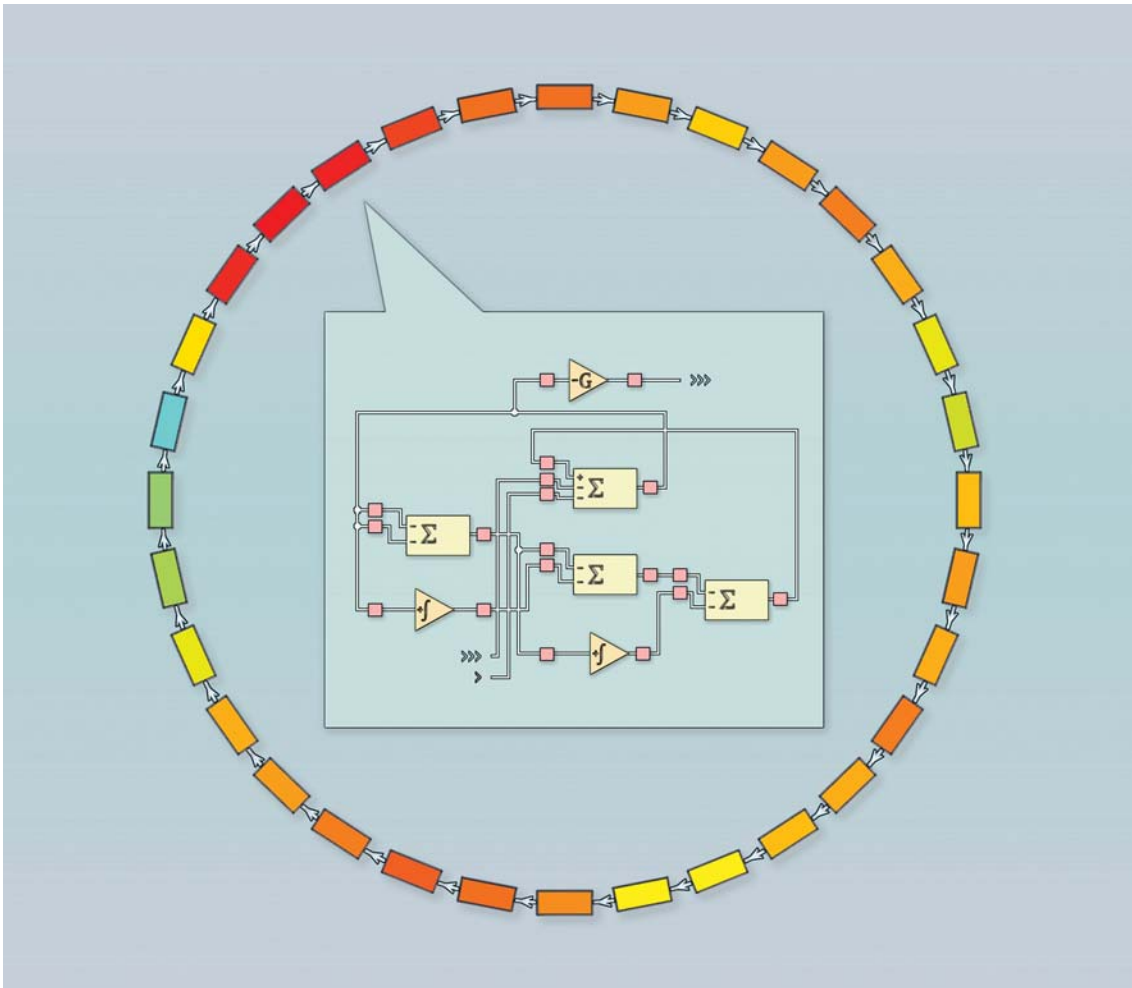
W niektórych układach fizycznych nawet dość odległe od siebie elementy potrafią synchronizować swoje akcje. Zjawisko na pierwszy rzut oka wygląda dość tajemniczo. Na przykładzie sieci prostych elektronicznych oscylatorów połączonych w pierścień naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie wykazali jednak, że w rzeczywistości synchronizację na odległość można – przynajmniej w pewnych przypadkach – bardzo dobrze wytłumaczyć.

119

Do najbardziej fascynujących procesów fizycznych, chemicznych czy biologicznych z dużym prawdopodobieństwem należą te, w których „coś” powstaje z „niczego”. Dlaczego w pozornie jednorodnej warstwie cieczy nagle pojawiają się rozchodzące się koncentryczne kręgi, jak w przypadku reakcji Biełousowa-Żabotyńskiego? Dlaczego stułbia może mieć wiele ramion, zawsze rozmieszczonych tak regularnie? Co powoduje, że w sieci kilkunastu połączonych w pierścień prostych oscylatorów elektronicznych niektóre odległe elementy nagle zaczynają działać w tym samym rytmie? U podstaw podobnych procesów leżą uniwersalne, lecz wciąż słabo poznane mechanizmy synchronizacji aktywności elementów składowych układu. Niuanse jednego z takich mechanizmów zostały właśnie wyjaśnione przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie w współpracy z fizykami z włoskich uniwersytetów w Palermo i Katanii.

Synchronizacja prowadząca do wyłonienia się kształtów (czyli odmiany morfogenezy) może się przejawiać w układach o różnej naturze, a za jej występowanie mogą być odpowiedzialne różne mechanizmy. Metaforycznie zjawisko można zobrazować za pomocą tego, co się dzieje w dość jednorodnym gronie początkowo nieznanych sobie uczestników dużego przyjęcia. W krótkim czasie uformują się tu dobrze widoczne grupki zainteresowań, w ramach których ludzie będą spędzali większość czasu na rozmowach między sobą. Tego typu zjawisko, będące rezultatem specyficznych cech pewnych elementów bądź powstające wskutek przypadkowych zdarzeń, jest określane mianem synchronizacji grupowej lub klastrowej. Występuje ono w wielu układach fizycznych, a przykładem może być choćby synchronizacja neuronów w ludzkim mózgu.

„W naszych najnowszych badaniach zajmowaliśmy się nieco podobnym rodzajem synchronizacji: synchronizacją na odległość. Mówimy o niej wtedy, gdy swoje akcje synchronizują elementy lub grupy elementów, które nie znajdują się w bezpośrednim kontakcie ze sobą. Co ciekawe, synchronizacja na odległość zachodzi w taki sposób, że nie wpływa na zachowanie elementów pośredniczących w przekazie informacji. Przypomina to sytuację, gdy dwóch ludzi wymienia między sobą informacje za pośrednictwem kuriera, przy czym kurier nie tylko nie potrafi odczytać treści komunikatów, ale nierzadko jest wręcz całkowicie nieświadomy istnienia ukrytego przekazu”, tłumaczy dr hab. Ludovico Minati (IFJ PAN), główny autor publikacji w znanym czasopiśmie naukowym „Chaos”.



Synchronizacja na odległość w sieci prostych oscylatorów elektronicznych połączonych w pierścieni. Za efekt jest odpowiedzialna periodyczna fluktuacja składowej o niskiej częstotliwości, prowadząca do wzorców przypominających prążki dyfrakcyjne. Fluktuacje poszczególnych oscylatorów przedstawiono za pomocą kolorów. (Źródło: IFJ PAN).

Synchronizację na odległość obserwuje się między neuronami w odległych od siebie obszarach mózgu, między zjawiskami pogodowymi zachodzącymi nad różnymi kontynentami, a nawet między elementami obwodów elektronicznych. W 2015 roku dr Minati, wówczas na University of Trento, opisał taką synchronizację w sieciach zbudowanych z zaledwie kilkunastu prostych oscylatorów elektronicznych połączonych szeregowo w pierścieni. Zauważono wtedy, że poszczególne oscylatory próbowały się synchronizować nie tylko z najbliższymi sąsiadami w pierścieniu, ale także z niektórymi bardziej odległymi, a jednocześnie pozostawały w mniejszym stopniu zdesynchronizowane z pozostałymi.

„Obserwowaliśmy ten efekt z prawdziwym zafascynowaniem, ponieważ pojawił się w urządzeniu znacznie mniejszym niż mózg, a nade wszystko radykalnie od niego prostszym. Zjawisko zostało dokładnie opisane, nie byliśmy jednak w stanie w pełni zrozumieć jego natury. Zadowolające wyjaśnienie przedstawiliśmy dopiero w naszej najnowszej publikacji”, mówi dr Minati.

Naukowcy z IFJ PAN badali pierścienie oscylatorów eksperymentalnie oraz za pomocą symulacji komputerowych. Przełomowe okazało się spostrzeżenie, że informacja musi się propagować w pierścieniach nie za pomocą jednej, lecz aż trzech częstotliwości (pod tym względem zjawisko przypomina stosowaną w radiotechnice modulację amplitud). Każdy oscylator nie tylko generował własny sygnał o chaotycznej naturze, ale także reagował na sygnały pochodzące z pobliskich oscylatorów, a przenoszone w pozostałych dwóch pasmach. W zależności od swojej fazy w danym oscylatorze, sygnały te wzmacniały się lub osłabiały w sposób przypominający interferencję. Badacze obserwowali wtedy wzorce przypominające doskonale znane z optyki prążki dyfrakcyjne. Między oscylatorami, w których dochodziło do interferencyjnego wzmocnienia lub wygaszenia, pojawiały się efekty typowe dla synchronizacji na odległość.

W celu lepszego zrozumienia natury obserwowanej synchronizacji, krakowscy fizycy poddawali pierścienie oscylatorów dodatkowym testom. Badano wrażliwość synchronizacji na szum o dużej intensywności wprowadzany w różne miejsca układów, symulowano różną liczbę oscylatorów w pierścieniu oraz efekty pojawiające się przy jego otwarciu. Analiza wyników pozwoliła ustalić, że w badanych pierścieniach oscylatorów synchronizacja na odległość jest nie tyle cechą charakterystyczną dla całego układu, ile wynikiem lokalnych oddziaływań poszczególnych oscylatorów z ich otoczeniem. Przy okazji sprawdzono także, czy synchronizacja na odległość mogłaby służyć do przenoszenia sygnału wprowadzanego do układu z zewnątrz. Wynik był jednak negatywny.

„Zrozumienie mechanizmów związanych z występowaniem złożonych współzależności między elementami w układach o różnej naturze jest wielkim wyzwaniem w naukach o zjawiskach nieliniowych. My dobrze poznaliśmy tylko pewną klasę mechanizmów odpowiedzialnych za niektóre rodzaje synchronizacji na odległość. Pełniejsza wiedza o podobnych procesach miałaby ogromne znaczenie teoretyczne i praktyczne. Kto wie, może potrafilibyśmy przewidywać na przykład kolektywne zachowania różnych sieci społecznych czy nawet rynków finansowych?”, podsumowuje prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

Osoby zainteresowane prowadzeniem własnych badań nad synchronizującymi się oscylatorami elektronicznymi mogą z poniższego adresu pobrać materiały uzupełniające, w tym schematy układów eksperymentalnych: <ftp://ftp.aip.org/epaps/chaos/E-CHAOEH-27-012707>.

KONTAKT:

dr hab. Ludovico Minati
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628241
email: ludovico.minati@ifj.edu.pl

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

L. Minati, L. Faes, M. Frasca, P. Oświęcimka, S. Drożdż, *Apparent remote synchronization of amplitudes: a demodulation and interference effect*, *Chaos*, **28** (2018) 063124, doi: 10.1063/1.5026980.



Kraków, 22 listopada 2018

CZAS NA HIPERKRACH, MÓWIĄ MULTIFRAKTALNE ANALIZY GŁÓWNEGO INDEKSU GIEŁDOWEGO

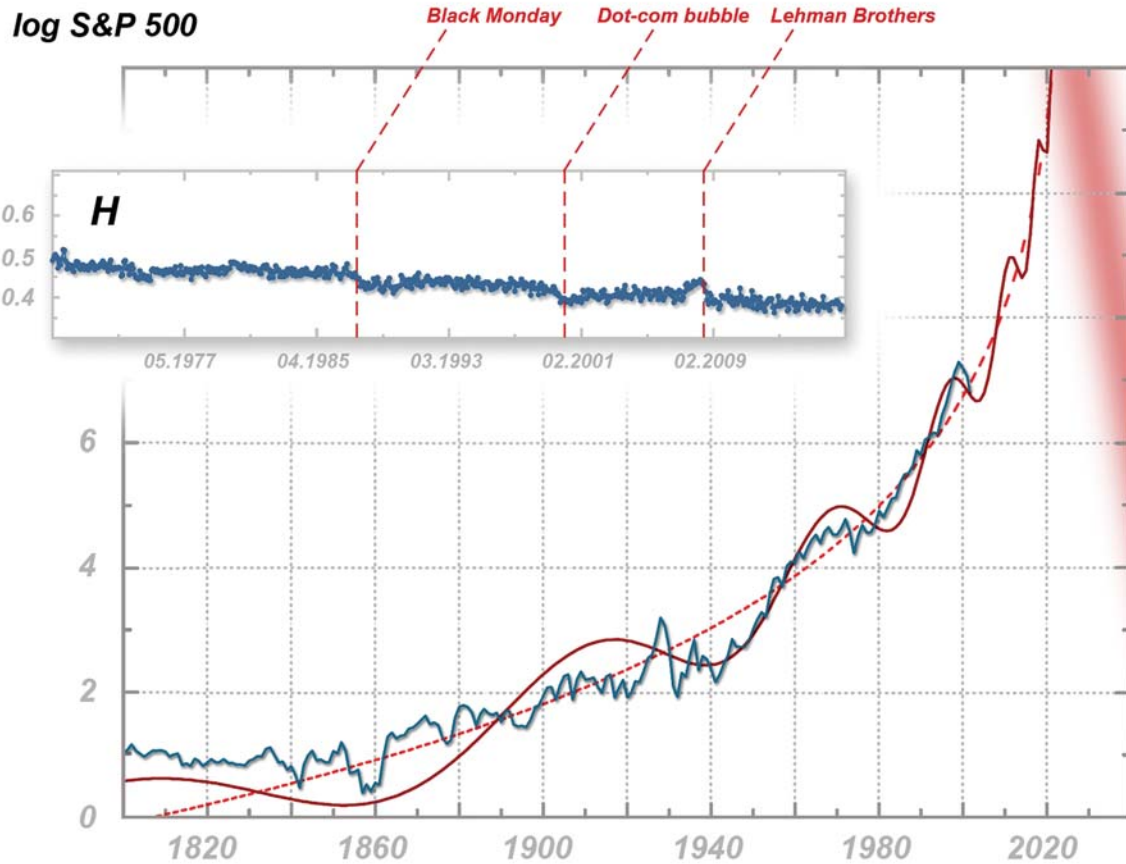
Nieodległa przyszłość globalnej gospodarki rysuje się w skrajnie czarnych barwach. Ta pesymistyczna prognoza płynie z zaawansowanych analiz statystycznych indeksu giełdowego S&P 500, opublikowanych ostatnio przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Na ich podstawie badacze wyjaśniają, dlaczego za kilka do kilkunastu lat można się spodziewać krachu finansowego jakiego w dziejach jeszcze nie było – i przy okazji tłumaczą, dlaczego czytając ten tekst masz szansę ocalić świat.

Czarny Poniedziałek, pęknięcie bańki internetowej czy upadek banku Lehman Brothers. Wydarzenia te zachwiały światową gospodarką. Wkrótce możemy jednak mieć do czynienia z tak gigantycznym załamaniem rynków finansowych, że wszystkie wcześniejsze krachy wydadzą się przy nim mało istotnymi potknięciami. Ta katastroficzna wizja wyłania się z multifraktalnych analiz rynków finansowych, zaprezentowanych na łamach cenionego czasopisma „Complexity” przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie – i współgra z ich wcześniejszymi prognozami sprzed kilkunastu lat.

„Dane są, niestety, dość jednoznacznie. Wygląda na to, że począwszy od połowy lat dwudziestych wysoce prawdopodobny jest globalny krach finansowy o dotychczas niespotykanej skali. Tym razem zmiana będzie jakościowa. Wręcz radykalna!”, mówi prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

W swojej najnowszej publikacji naukowcy z IFJ PAN przyglądali się różnym danym ekonomicznym, m.in. dziennym notowaniom indeksu Standard & Poor 500 w okresie od stycznia 1950 roku do grudnia 2016 (S&P 500 to największy indeks giełdowy świata, uwzględniający 500 największych spółek, w znacznej części o charakterze globalnym). Podstawowym celem artykułu krakowskich badaczy nie było snucie katastroficznych prognoz, lecz wiarygodne przedstawienie zagadnień związanych z występowaniem efektów multifraktalnych (a więc takich, w których by zobaczyć samopodobieństwo różne fragmenty badanej struktury trzeba powiększać z różną szybkością) w finansowych szeregach czasowych (czyli np. w notowaniach cen czy w wartościach indeksów giełdowych). Szczególną uwagę naukowców zwrócił wykres przedstawiający zmiany wykładnika Hursta, wyliczonego dla indeksu S&P 500 na podstawie widm multifraktalnych otrzymanych w trakcie analiz.

Wykładnik Hursta może przyjmować wartości od 0 do 1 i odzwierciedla stopień podatności układu do zmiany trendu. Gdy jest równy 0,5, badana fluktuująca wielkość ma przy kolejnym pomiarze takie samo



Multifraktalne i fraktalne źródła niepokoju gospodarki świata. Na górze zmiany wykładnika Hursta dla indeksu Standard & Poor 500 w ostatnim półwieczu, z zaznaczonymi momentami krachów finansowych. Poniżej oscylacje logarytmu indeksu S&P 500 w latach 1800-2003 z ekstrapolacją do roku 2025. (Źródło: IFJ PAN).

123

prawdopodobieństwo zmiany na plus, co na minus. Wartości poniżej 0,5 sygnalizują większą skłonność do przemienności kierunków fluktuacji: wzrost zwiększa prawdopodobieństwo spadku lub odwrotnie, co w kontekście finansów można interpretować jako symptom nerwowości. Wartości powyżej 0,5 wskazują na persystentny charakter zmian i skłonność układu do budowania trendu. Po wzroście mamy wtedy większe prawdopodobieństwo kolejnego wzrostu, a po spadku – większe kolejnego spadku.

Za rynki stabilne, dojrzałe, uznaje się takie, których wykładnik Hursta jest równy 0,5 lub wykazuje niewielkie odchylenia od tej wartości. Wykres wykładnika Hursta dla indeksu S&P 500 rzeczywiście zaczyna się od 0,5. 19 października 1987 roku dochodzi jednak do krachu – to słynny Czarny Poniedziałek. Wykładnik nieznacznie się wtedy obniża, niemniej przez ponad dekadę znów zachowuje w miarę stały poziom. Na przełomie wieków pojawia się wyraźny spadek, a już w marcu 2000 roku pęka bańka internetowa. Tak jak wcześniej, tak po niej wykładnik Hursta ponownie się stabilizuje, jednak na krótszy okres. Już pod koniec pierwszej dekady nagle zaczyna szybko rosnąć, by załamać się po bankructwie banku Lehman Brothers we wrześniu 2008 roku. Od tego momentu wykładnik Hursta nie tylko nie powrócił w okolice wartości 0,5, ale w ostatniej dekadzie dość wyraźnie i systematycznie zszedł nawet poniżej szczególnie niepokojącej wartości 0,4.

„Tym, co również uderza w zmianach wykładnika Hursta dla indeksu S&P 500, są skracające się odstępy czasowe między kolejnymi krachami oraz fakt, że po każdym załamaniu wskaźnik nigdy nie wracał do pierwotnego poziomu. Mamy tu wyraźny sygnał, że nerwowość rynku światowego narasta cały czas, od dekad, niezależnie od zmieniających się ludzi, podmiotów gospodarczych czy technologii”, zauważa prof. Drożdż.

Zaobserwowana zależność koresponduje z inną, wykrytą przez prof. Drożdża i jego współpracowników już w 2003 roku. W publikacji w czasopiśmie „Physica A: Statistical Mechanics and its

Applications” na jednym z wykresów przedstawiono wtedy zmiany logarytmu z indeksu S&P 500 począwszy od roku 1800 (wartości sprzed wprowadzenia indeksu S&P 500 zrekonstruowano na podstawie danych historycznych). Zygzakowata krzywa wyginała się wzdłuż sinusoidy o rosnącej częstotliwości, coraz dynamiczniej wznoszącej się ku asymptocie usytuowanej w okolicach roku 2025. Każdy kolejny krach był tu poprzedzony mniejszymi wahnięciami, swoistymi minikrachami, które nazwano prekursorami. Wiele prekursorów miało swoje, jeszcze mniejsze prekursory, wykazując w ten sposób pewne samopodobieństwo.

„Rzecz w tym, że analogiczna samopodobna zależność może działać także w większych skalach czasowych. Wtedy dotychczasowe krachy byłyby jedynie prekursorami wydarzenia znacznie większego i bardziej groźnego. Gdy proces o podobnej dynamice pojawia się w fizyce, mówimy o przejściu fazowym II rodzaju, takim jak pojawianie się czy też zanik właściwości magnetycznych w materiale magnetycznym w pobliżu temperatury Curie”, mówi prof. Drożdż.

Otwarte pozostaje pytanie o wiarygodność tak pesymistycznej prognozy. Jeśli w najbliższych latach rynki finansowe jakościowo się nie zmieniają, czarny wariant rozwoju wydarzeń ma szansę stać się rzeczywistością. Trzeba jednak pamiętać o istotnej różnicy między światami matematyki czy fizyki, a światem finansów. Prawa i modele matematyczne konstruowane w ramach fizyki są skuteczne i w miarę nieskomplikowane m.in. z uwagi na wewnętrzną prostotę i niezmienność obiektów, których dotyczą. Rynki finansowe mają znacznie bardziej złożony charakter. Ich uczestnicy są zmienni: pamiętają, uczą się, potrafią reagować zarówno logicznie, jak i emocjonalnie. Nie brakuje przykładów udowadniających, że gdy wśród istotnej liczby uczestników rynku upowszechni się wiedza o jakimś prawie mającym moc prognozowania, rynek błyskawicznie się zmienia, a wykryta regularność zanika. Czy podobnie będzie w przypadku nadciągającego hiperkrachu?

Problem w tym, że nie wiadomo, co i jak musiałoby wpłynąć na rynek globalny, by zapobiec nadciągającemu załamaniu. Lekarstwem mogłyby być na przykład formujące się rynki kryptowalut, ale czy na pewno się nim staną? Nie wiadomo. Nie jest nawet pewne, czy dysponując wiedzą o koniecznych zmianach udałoby się je wprowadzić w zaledwie kilka lat – a nie wygląda na to, żebyśmy mieli ich więcej do dyspozycji. Przyszłość gospodarki światowej począwszy od połowy lat 20. jawi się więc w czarnych barwach.

„Na tej prognozie chyba tylko my nie możemy stracić. Jeśli bowiem hiperkrach się zdarzy, w spektakularny sposób wykażemy siłę naszych multifraktałnych narzędzi statystycznych. Osobiście wolałbym jednak, aby do niego nie doszło. Gdy tak się stanie i hiperkrach nie nadejdzie, nadal pozostanie nam całkiem dopuszczalna interpretacja, że nasza prognoza była... poprawna, lecz dzisiejszą informacją prasową wpłynęliśmy na zachowania uczestników rynków i, no cóż, właśnie ocaliliśmy świat!”, zauważa z lekkim przymrużeniem oka prof. Drożdż.

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Krakowska
tel: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozd@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

S. Drożdż, R. Kowalski, P. Oświęcimka, R. Rak, R. Gębarowski, *Dynamical Variety of Shapes in Financial Multifractality, Complexity*, **2018** (2018) 7015721, doi: 10.1155/2018/7015721.

S. Drożdż, F. Grümmer, F. Ruf, J. Speth, *Log-Periodic Self-Similarity: an Emerging Financial Law?*, *Physica A*, **324** (2003) 174, doi: 10.1016/S0378-4371(02)01848-4.



Kraków, 10 października 2018

BITCOIN LEPSZY OD DOLARA?

Już sama nazwa nie budzi zaufania: kryptowaluty. Zlepki bitów, przez wielu uznawane za pieniądź wątpliwej natury. Zaawansowane analizy statystyczne rynku bitcoina, wykonane w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, nie wykazały jednak żadnych istotnych różnic między jego podstawowymi parametrami statystycznymi, a ich odpowiednikami wyznaczonymi dla respektowanych rynków finansowych. Wszystko wskazuje na to, że bitcoin jest lepszą walutą niż na pierwszy rzut oka mógłby się wydawać.

Bitcoin, pierwsza i do dziś najbardziej rozpowszechniona kryptowaluta, przez wielu inwestorów wciąż jest traktowany ze sporą nieufnością. Potocznej opinii przeczy szczegółowa analiza statystyczna rynku bitcoina (BTC), przeprowadzona w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. Opublikowana w uznanym czasopiśmie naukowym „Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science”, analiza stawia bitcoina – a potencjalnie i inne kryptowaluty – w zaskakująco pozytywnym świetle.

Wiarygodność tradycyjnych walut wydaje się być w istotnej części psychologicznym artefaktem wynikającym z charakteru ich ewolucji. Podświadomie sądzimy, że skoro kiedyś za pieniądzem stało konkretne dobro materialne, tak jest i dziś. A przecież pod względem fizycznym tradycyjne waluty już jakiś czas temu stały się tym samym, czym kryptowaluty są od chwili narodzin: zlepkiem bitów w pamięciach bankowych komputerów. O rzeczywistej wartości waluty decyduje obecnie nie to, co za nią stoi, ale przede wszystkim to, co się z tą walutą dzieje – czyli jej rynek.

„Gdy po upadku socjalizmu w Europie Środkowej i Wschodniej zaczęły się kształtować nowe, wschodzące rynki finansowe, w naturalny sposób pojawiło się pytanie o ich stabilność. Zidentyfikowano wówczas szereg kryteriów statystycznych, ułatwiających ocenę dojrzałości rynku. Zainteresowało nas, jakie wyniki otrzymalibyśmy, gdybyśmy za ich pomocą przyjrzeliby się wycenianemu obecnie na setki miliardów dolarów rynkowi bitcoina?”, mówi prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

Analizie poddano zmiany cen bitcoina w okresie od 2012 roku do kwietnia 2018 roku, notowane w sekwencjach jednonuminutowych. Na pierwszy ogień trafiły stopy zwrotu. Istnieje dobra ilościowa ewidencja na to, że na dojrzałym rynku i w dostatecznie krótkich skalach czasowych ich rozkłady prawdopodobieństwa podlegają odwrotnemu prawu kubicznemu. Pod tą groźnie brzmiącą nazwą kryje się prosta zależność: rozkład jest opisany odwrotnością trzeciej potęgi badanej wielkości.

„Początkowo otrzymywane przez nas wykresy wyglądały dość koślawo, co nie wróżyło niczego obiecującego. Gdy jednak uważniej przyjrzelibyśmy się danym, raptem się okazało, że owa koślawość pochodzi z pierwszych dwóch lat badanego okresu, a więc z czasu, gdy rynek dopiero się kształtował. Później stopy zwrotu fluktuowały już zgodnie z odwrotnym prawem kubicznym”, mówi prof. Drożdż.



Czy bitcoin rzuci dolara z piedestału? (Źródło: IFJ PAN).

126

Pod lupę badaczy trafiła następnie zmienność stóp zwrotu. Na dojrzałych rynkach globalnych znaki stóp zwrotu (informujące o tym, czy zarabiamy, czy tracimy) nie są ze sobą skorelowane – i taką właśnie cechą wykazuje rynek bitcoina. Korelacje czasowe w dynamice finansów mogą się jednak pojawić w subtelniejszych zależnościach, na przykład w różnych formach klasteryzacji zmienności. O tego typu efekcie mówi się wtedy, gdy zakres zmienności badanej wielkości ustala się na mniej więcej stałym poziomie na pewien czas określający rozmiar klastra, po czym zakres się zmienia do wielkości znacząco mniejszych lub większych od poprzedniej – i tego typu przemienność ewoluuje w czasie.

Z klasteryzacją zmienności wiąże się inna cecha: niechęć układu do zmiany trendu. Niechęć ta jest opisywana za pomocą parametru znanego jako wykładnik Hursta. Przyjmuje on wartości od 0 do 1. Wykładnik równy 0,5 oznacza, że przy kolejnym pomiarze badana wielkość ma takie samo prawdopodobieństwo zmiany na plus, co na minus. Wartości poniżej 0,5 sygnalizują skłonność do fluktuowania i odpowiadają sytuacji, gdy wzrost zwiększa prawdopodobieństwo spadku (lub odwrotnie). Wartości powyżej 0,5 wskazują na persistencyjny charakter zmian: po wzroście mamy większe prawdopodobieństwo kolejnego wzrostu, po spadku – większe kolejnego spadku. Okazuje się, że dla rynku bitcoina wykładnik Hursta zbliża się do wartości 0,5, charakterystycznej dla rynków o wysokiej renomie.

„Jedną z bardziej wyrafinowanych cech sygnalizujących dojrzałość rynku jest multifraktalna natura jego charakterystyk. Multifraktale to fraktale fraktali, czyli obiekty, w których żeby zobaczyć samopodobieństwo, różne fragmenty fraktala trzeba powiększać z różną szybkością. Analizy multifraktalne ujawniają zależności istniejące w wielu skalach. W przypadku bitcoina wykryliśmy multifraktalność właśnie w funkcjach fluktuacji stóp zwrotu, szczególnie dobrze widoczną w ostatnim półroczu badanego okresu. Była ona tego samego typu jak dla normalnych, dojrzałych rynków, takich jak rynki akcji, dolara, ropy czy obligacji”, mówi prof. Drożdż i podsumowuje: „Najważniejsze parametry statystyczne rynku bitcoina bardzo jednoznacznie wskazują, że już od wielu miesięcy spełnia on wszystkie istotne kryteria finansowej dojrzałości. Wydaje się, że w przypadku innych kryptowalut można będzie oczekiwać pojawienia się podobnej transformacji. Jeśli to się stanie, największy rynek świata, Forex, może się doczekać bardzo realnej konkurencji”.

Ujęte w szerszym kontekście, powyższe stwierdzenia prowadzą do intrygującej obserwacji. Rzeczywisty rynek walutowy osiąga dojrzałość przy wydatnej pomocy banku centralnego lub rządu. Bitcoin natomiast dojrzał samodzielnie, wyłącznie dzięki własnym cechom, integralnie wkomponowanym w fundamenty swego rynku. Zatem którą z tych walut powinniśmy uważać za strukturalnie lepszą?

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozd@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

S. Drożdż, R. Gębarowski, L. Minati, P. Oświęcimka, M. Wątorek, *Bitcoin market route to maturity? Evidence from return fluctuations, temporal correlations and multiscaling effects*, *Chaos*, **28** (2018) 071101, doi: 10.1063/1.5036517.



Kraków, 10 stycznia 2018

JAKIMI SIECIAMI STRUMIENI PŁYNĄ NAUKOWE IDEE?

Gdy naukowcy mają ciekawy pomysł, jego rezultatem zwykle jest wspólna publikacja. W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wykazano, że śledząc zależności między współautorami, można nie tylko zobaczyć ścieżki, którymi przepływają naukowe idee, ale także odtworzyć strukturę naukowej współpracy i wykryć tworzące się społeczności. Co ciekawe, zaproponowana metoda analizy może być skutecznym narzędziem walki z terrorystami i... nieuczciwymi politykami.

128

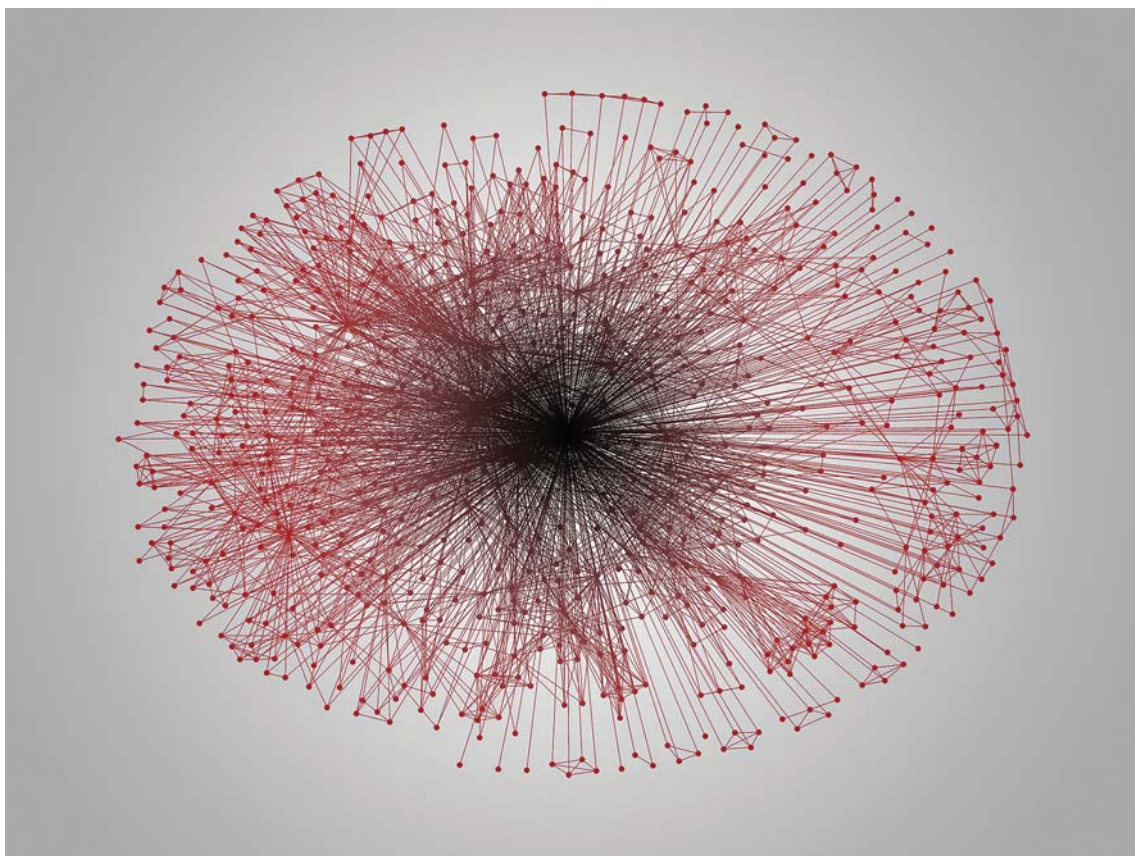
Panta rhei, wszystko płynie. Jeśli Heraklit z Efezu miał rację, płynąć powinny nie tylko rzeki, ale również idee. Śledzenie przepływów zwykłych idei może być trudne. W przypadku idei naukowych jest znacznie łatwiej: wymieniający je naukowcy zwykle dokonują wspólnych publikacji. Grupa badaczy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, kierowana przez prof. dr. hab. Stanisława Drożdża (IFJ PAN, Politechnika Krakowska), przeanalizowała struktury powiązań między współautorami prac naukowych, tworzące się wokół tak wybitnych postaci współczesnej nauki jak Harry Eugene Stanley czy Edward Witten. Zobrazowane w postaci grafów, wyniki badań dają unikatowy wgląd w różne formy współczesnej współpracy naukowej.

„W projektach naukowych uczestniczy obecnie coraz więcej ludzi, a sama nauka staje się coraz bardziej interdyscyplinarna. Wzrasta skala trudności badanych zagadnień naukowych, mamy też do czynienia z szybkim rozwojem nowoczesnych metod komunikacji. Wszystko to powoduje, że powiązania między naukowcami mają dziś nie tylko znaczną złożoność, ale i stale rosnącą dynamikę”, mówi prof. Drożdż.

Przystępując do analizowania struktur współpracy naukowej, krakowscy badacze skorzystali z pomysłu nawiązującego do postaci Paula Erdősa, jednego z najwybitniejszych matematyków XX wieku. Erdős był autorem i współautorem ok. 1500 publikacji, przy których współpracowało łącznie ponad 500 osób. Wyjątkowa aktywność naukowa Erdősa sprowokowała matematyków do wymyślenia liczb Erdősa, odzwierciedlających naukowe „pokrewieństwo” danej osoby z samym Erdősem. W myśl definicji, Erdős miał przyporządkowaną liczbę 0, naukowiec, który napisał publikację wraz z nim – 1, naukowiec, który napisał publikację z osobą mającą liczbę Erdősa równą 1 – liczbę 2 itd.

„Nasz pomysł polegał na tym, aby w podobny sposób przeanalizować powiązania naukowe kilku współczesnych wybitnych uczonych i zobrazować je w postaci grafów, czyli zbiorów węzłów i łączących je linii. Naturalnie centralnym węzłem każdego grafu był wybrany przez nas uczyony; pozostałe węzły odpowiadały jego kolejnym, bliższym lub dalszym współpracownikom. W takim ujęciu powiązania między węzłami można interpretować jako przepływy idei skutkujące napisaniem wspólnej publikacji”, tłumaczy prof. Drożdż.

Najprostszym grafem wykonanym wedle powyższych zasad byłby graf Paula Diraca, angielskiego fizyka-teoretyka, który zawsze publikował prace jako jedyny autor. Graf Diraca składałby się więc po



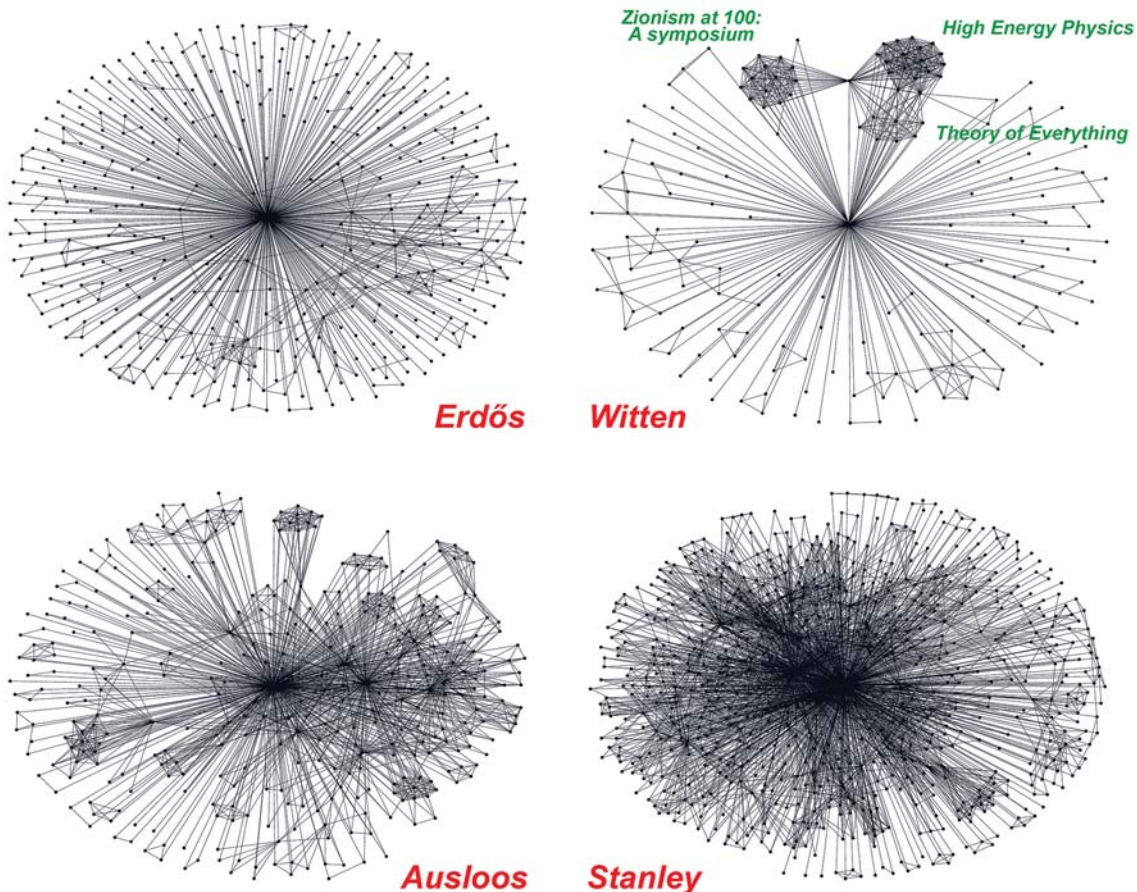
Graf przedstawiający przepływ idei inicjowanych przez prof. H. Eugene Stanleya. Powiązania między współpracownikami pokazują istnienie kilku wyraźnie widocznych podsieci, odpowiadających społecznościom naukowym koncentrującym się na konkretnych tematach badawczych. (Źródło: IFJ PAN).

prostu z jednego węzła. Mało ciekawą topologię miałyby też grafy tych współczesnych przedsięwzięć naukowych, w których uczestniczą setki naukowców, przyporządkowanych do wielu kolejnych publikacji w sposób nierzadko wyłącznie administracyjny (to częsta sytuacja w przypadku złożonych, wieloletnich eksperymentów, realizowanych np. przy akceleratorze LHC czy detektorach fal grawitacyjnych LIGO). Grafy takie składałby się z dużej liczby węzłów, przy czym większość z nich łączyłaby się ze wszystkimi innymi. Sieć połączeń jest tu tak zagęszczona, że trudno się dopatrzeć jakichkolwiek interesujących zależności.

Graf samego Erdősa także okazał się umiarkowanie ciekawy: liczne połączenia rozchodziły się z centralnego węzła promieniście do wielu węzłów sąsiednich – i niemal zawsze się na nich kończyły. Tylko niektóre węzły symbolizujące współpracowników Erdősa łączyły się ze sobą. Wpływ na taki a nie inny kształt struktury miał w tym przypadku prawdopodobnie fakt, że istniejące w XX wieku narzędzia komunikacji były znacznie słabiej rozwinięte niż obecnie i wielu naukowcom, zwłaszcza mniej znanym, było znacznie trudniej nawiązywać nowe kontakty.

„Gdy Erdős zajmował się matematycznym opisem sieci odzwierciedlających ludzkie interakcje, przewidywał, że struktura połączeń będzie dość demokratyczna: większość węzłów będzie w bezpośrednim kontakcie z porównywalną, choć niezbyt dużą, liczbą innych węzłów. Ale na przełomie wieków po raz pierwszy dokonano wizualizacji dużej sieci: Internetu. Nagle się okazało, że sieć ta ma znacznie mniej demokratyczną budowę: zaledwie 20% węzłów ma dostęp do 80% połączeń. Samoorganizację wynikającą z działania podobnego prawa potęgowego odkryliśmy w sieci prof. Stanleya”, zauważa prof. Drożdż.

Profesor H. Eugene Stanley jest interdyscyplinarnym fizykiem statystycznym, współautorem kilkudziesięciu publikacji rocznie. Jego wskaźnik Hirscha, odzwierciedlający liczbę i oddźwięk publikacji naukowych, należy do najwyższych w naukach przyrodniczo-technicznych. W otaczającej Stanleya sieci przepływu idei widać wiele wyróżnionych węzłów, wokół których grupują się kolejne, reprezentujące



Grafy ilustrujące powiązania naukowe Paula Erdősa, Edwarda Wittena, Marcela Ausloosa i H. Eugene Stanleya. W sieci Wittena wyraźnie widać trzy podsieci odpowiadające konkretnym tematom. (Źródło: IFJ PAN).

naukowców rozwijających własne badania, a zainspirowanych pracami Stanleya. Część z nich, odpowiadająca takim postaciom nauki jak Marcel Ausloos, Shlomo Havlin czy Sergey Buldyrev, w podobnie kreatywny sposób oddziaływała na swoich współpracowników, skupiając wokół siebie własne społeczności. W efekcie sieć Stanleya nabrała cech hierarchicznych, w wielu miejscach wykazując samopodobieństwo charakterystyczne dla obiektów fraktalnych.

Hierarchiczność sieci idei wcale nie jest cechą uniwersalną ani charakterystyczną dla wybitnych postaci dzisiejszej nauki. Graf ilustrujący naukowe powiązania Edwarda Wittena, znanego fizyka matematycznego rozwijającego teorię strun, okazał się mieć budowę w ogólnym zarysie przypominającą prostą gwiazdę, tak dobrze widoczną u Erdősa. U Wittena widać jednak obecność kilku wyraźnych, odseparowanych od siebie podstruktur. Odpowiadają one społecznościom zajmującym się konkretnymi tematami, np. teorią wszystkiego czy fizyką wysokich energii.

„Zaproponowana przez nas procedura matematyczna umożliwia wykrycie powiązań między ludźmi, które nie zawsze są dostrzegane na pierwszy rzut oka. Istnienie niektórych społeczności stało się oczywiste dopiero wtedy, gdy konstruując grafy uwzględniliśmy fakt, że połączenia między węzłami mogą mieć różną siłę. Część autorów może przecież publikować wspólne prace wielokrotnie”, zauważa prof. Drożdż.

W sieciach kontaktów międzyludzkich matematyka pozwala ujawniać obecność społeczności powiązanych wspólnymi ideami. Metody analizy zaproponowane przez krakowskich fizyków mogłyby więc być użyte do innych celów, np. do śledzenia struktur organizacji terrorystycznych. Ale można sobie wyobrazić i inne, bardziej pokojowe zastosowania. Na przykład kto wie, czy współczesne demokracje nie funkcjonowałyby efektywniej, gdyby przed wyborami każdy z nas mógł obok zdjęcia kandydata zobaczyć graf ilustrujący sieć jego powiązań z innymi osobami?

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

S. Drożdż, A. Kulig, J. Kwapien, A. Niewiarowski, M. Stanuszek, *Hierarchical organization of H. Eugene Stanley scientific collaboration community in weighted network representation*, *J. Informetr.*, **11** (2017) 1114-1127, doi: 10.1016/j.joi.2017.09.009.



Kraków, 21 stycznia 2016

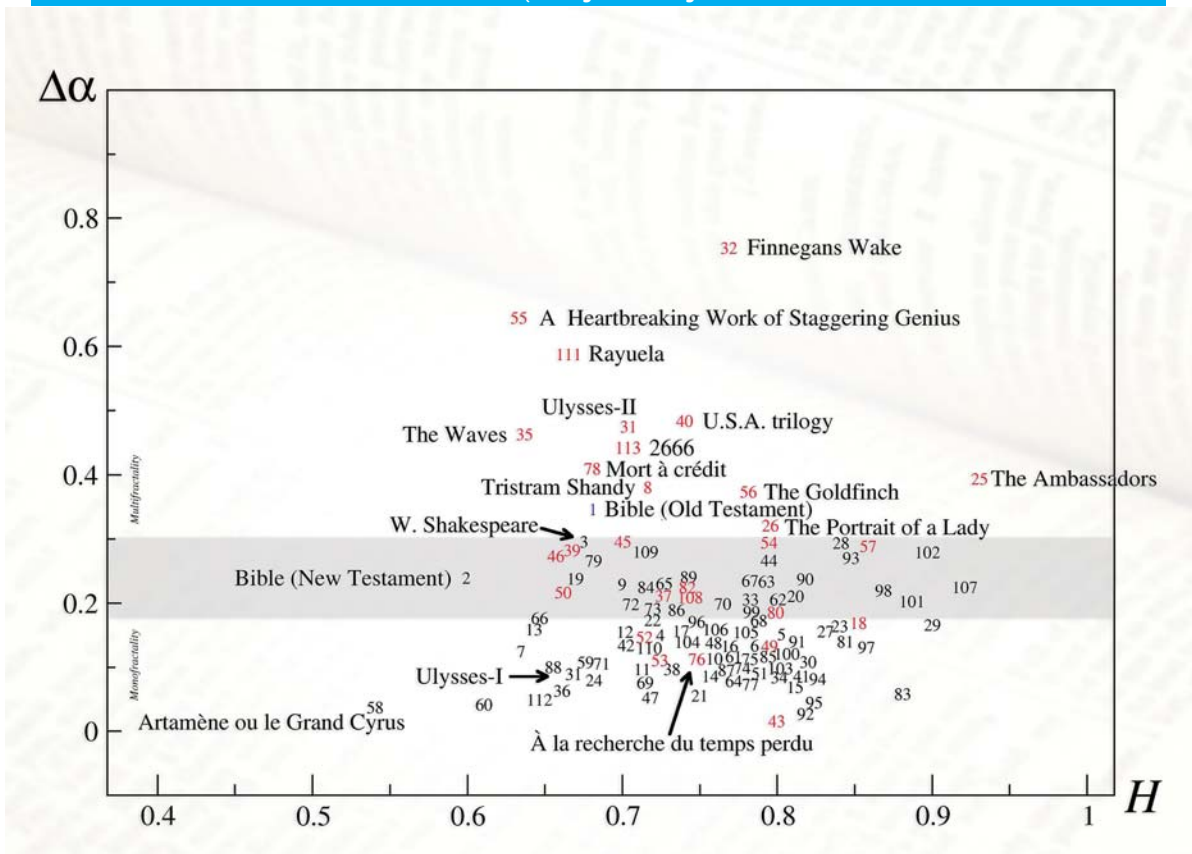
W SŁYNNYCH DZIELACH LITERACKICH WIDAĆ MULTIFRAKTALE I KASKADY ŚWIADOMOŚCI

James Joyce, Julio Cortázar, Marcel Proust, Henryk Sienkiewicz czy Umberto Eco. Zaskakujące, ale niezależnie od języka, dzieła literackie najsłynniejszych autorów pod pewnymi względami okazują się mieć budowę fraktalną. Analizy statystyczne przeprowadzone w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie ujawniły jednak fakt jeszcze bardziej intrygujący. Kompozycja utworów jednego z gatunków literackich cechuje się wyjątkową dynamiką, o strukturze kaskadowej (lawinowej). Ten typ narracji okazuje się mieć charakter multifraktalny, czyli jest fraktalem fraktali.

Dla niejednego książkowego mola zaawansowane równania i wykresy to ostatnie rzeczy, z którymi chciałby mieć bliższy kontakt. Przed matematyką trudno jednak uciec. Fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie przeprowadzili szczegółową analizę statystyczną ponad stu słynnych dzieł światowej literatury, napisanych w kilku językach i kojarzonych z różnymi gatunkami literackimi. Książki, badane pod kątem korelacji ujawniających się w zmianach długości zdań, okazały się być rządzone dynamiką o charakterze kaskadowym. Fakt ten oznacza, że budowa tych książek jest w istocie fraktalna. W przypadku kilkunastu dzieł ich matematyczna złożoność okazała się wyjątkowa, porównywalna ze strukturą tak skomplikowanych obiektów matematycznych jak multifraktale. Co ciekawe, w analizowanej puli wszystkie utwory multifraktalne okazały się należeć do jednego gatunku literackiego.

Fraktale to samopodobne obiekty matematyczne: gdy zaczynamy powiększać ich jeden czy drugi fragment, prędzej czy później zobaczymy strukturę przypominającą obiekt wyjściowy. Typowe fraktale, zwłaszcza te szerzej znane, jak trójkąt Sierpińskiego czy zbiór Mandelbrota, są monofraktalami. Stwierdzenie to oznacza, że tempo powiększania w każdym miejscu fraktala jest takie samo, liniowe: jeśli gdzieś przeskalowaliśmy go x razy i zobaczyliśmy strukturę podobną do pierwotnej, to samo powiększenie w innym miejscu także ujawni strukturę podobną.

Multifraktale są bardziej zaawansowanymi konstrukcjami matematycznymi: to fraktale fraktali. Powstają z fraktali „splcionych” ze sobą w odpowiedni sposób i w odpowiednich proporcjach. Multifraktal nie jest zwykłą sumą fraktali i nie można go rozłożyć z powrotem na fraktale składowe, ponieważ już sam sposób splotu ma charakter fraktalny. Powoduje to, że aby zobaczyć strukturę podobną do pierwotnej, różne fragmenty multifraktala trzeba powiększać z różną szybkością. Multifraktal jest więc obiektem o charakterze nieliniowym.



Multifraktalność dzieł literackich. Liczby odpowiadają numerom dzieł literackich w badanej puli (szczegółowy wykaz jest dostępny w publikacji naukowej). Kolorem czerwonym oznaczono dzieła tradycyjnie przypisywane do gatunku strumienia świadomości. Na osi pionowej odłożono tzw. szerokość spektrum multifraktalnego – im jest ona bliższa jedności, tym tekst ma budowę bardziej multifraktalną. Oś pozioma to tzw. stopień trwałości trendów H , w tym przypadku w długości zdań. Jego większa wartość oznacza, że jest większe prawdopodobieństwo wystąpienia długiego zdania bezpośrednio po długim, a krótkiego po krótkim. $H=0.5$ oznacza brak tego typu tendencji. (Źródło: IFJ PAN).

„Analizy w wielu skalach, prowadzone z użyciem fraktali, pozwalają w zwarty sposób ująć informacje o korelacjach między danymi na rozmaitych poziomach złożoności badanego układu i wskazują na hierarchiczną organizację zjawisk i struktur występujących w naturze. Można więc oczekiwać, że język naturalny, który jest wielkim ewolucyjnym osiągnięciem świata przyrody, też będzie wykazywał takie korelacje. Ich istnienie w dziełach literackich nie było jednak jak dotąd przekonująco udokumentowane. Tymczasem okazało się, że gdy spojrzeć na te dzieła z właściwej perspektywy, takie korelacje są nie tylko częste, ale w niektórych utworach wykazują szczególnie wyrafinowaną matematyczną złożoność”, mówi prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

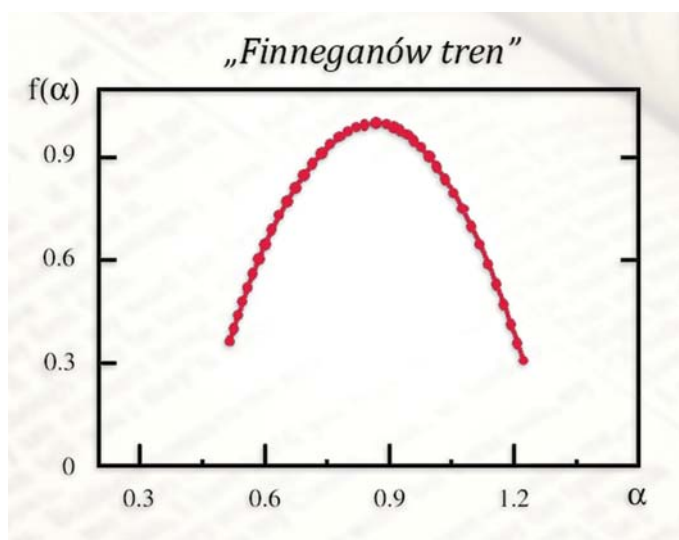
Badaniom poddano 113 utworów literackich napisanych w językach angielskim, francuskim, niemieckim, włoskim, polskim, rosyjskim i hiszpańskim. Wśród autorów znalazły się tak znane postaci jak Honoré de Balzac, Arthur Conan Doyle, Julio Cortázar, Charles Dickens, Fiodor Dostojewski, Alexandre Dumas, Umberto Eco, George Elliot, Victor Hugo, James Joyce, Thomas Mann, Marcel Proust, Władysław Reymont, William Shakespeare, Henryk Sienkiewicz, John R. R. Tolkien, Lew Tołstoj czy Virginia Woolf. Wybrane dzieła liczyły nie mniej niż 5000 zdań, co zapewniało statystyczną wiarygodność analiz.

Aby przekształcić tekst w poddające się analizie statystycznej ciągi liczbowe, w każdej książce zliczono długości zdań, wyrażone liczbą wyrazów (alternatywna metoda, zliczania znaków w zdaniu, okazała się nie mieć większego wpływu na wnioski płynące z analizy). W danych szukano następnie zależności – najpierw tych najprostszych, czyli liniowych. Chodziło o odpowiedź na pytanie: jeśli zdań o pewnej długości jest x razy więcej niż zdań o innej długości, to czy te same proporcje zostaną zachowane, gdy spojrzymy na zdania odpowiednio dłuższe lub krótsze?

„Wszystkie badane przez nas utwory wykazywały samopodobieństwo pod względem organizacji długości zdań. Jedne bardziej wyraziste – tu wyróżniali się zwłaszcza *The Ambassadors* Henry’ego Jamesa – inne zdecydowanie mniej, z ekstremalnym przypadkiem francuskiego XVII-wiecznego romansu *Artamene ou le Grand Cyrus*. Korelacje były jednak ewidentne, a zatem teksty te miały budowę fraktalną”, komentuje dr hab. Paweł Oświęcimka (IFJ PAN) i zaznacza jednocześnie, że fraktalność tekstu w praktyce nigdy nie będzie tak perfekcyjna jak w świecie matematyki. Fraktale matematyczne można bowiem powiększać w nieskończoność. Tymczasem liczba zdań w każdej książce jest skończona i na pewnym etapie skalowania zawsze pojawi się przeszkoda w postaci końca zbioru danych.

Sprawy przybrały szczególnie interesujący obrót, gdy fizycy z IFJ PAN zaczęli tropić zależności nieliniowe. W większości klasycznych tekstów ujawniały się one słabo lub w umiarkowanym stopniu. W trakcie analiz wyłonił się jednak zbiór kilkunastu dzieł o bardzo wyraźnej strukturze multifraktalnej. Niemal wszystkie książki tej grupy okazały się być przedstawicielami jednego gatunku literackiego, szerzej znanego jako strumień świadomości. Jedynym wyjątkiem była Biblia, a konkretnie Stary Testament – książka do tej pory nigdy nie kojarzona z tym gatunkiem literackim.

„Absolutnym rekordzistą pod względem multifraktalności okazało się *Finnegans Wake* Jamesa Joyce’a. Wyniki naszych analiz w przypadku tego tekstu praktycznie w niczym nie odbiegają od otrzymanych dla idealnych, czysto matematycznych multifraktali”, mówi prof. Drożdż.

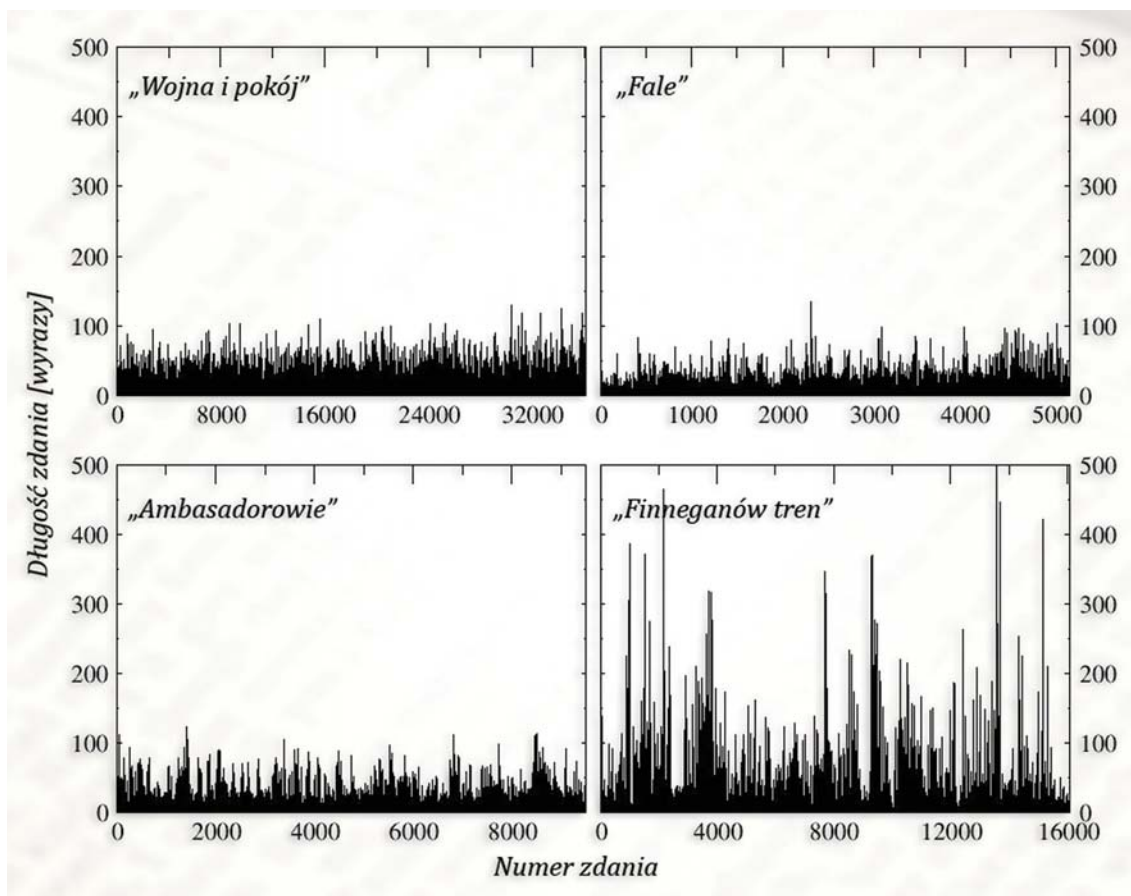


„*Finnegánów tren*” poddany analizie multifraktalnej. Tak idealny kształt wykresu jest charakterystyczny dla czysto matematycznych multifraktali. Na osiach poziomych stopień osobliwości, na pionowych – spektrum osobliwości. (Źródło: IFJ PAN).

Wśród najbardziej multifraktalnych dzieł znalazły się także: „*A Heartbreaking Work of Staggering Genius*” Dave’a Eggersa, „*Rayuela*” Julio Cortáзара, „*Ulysses*” Jamesa Joyce’a, „*U.S.A. trilogy*” Johna Dos Passosa, „*The Waves*” Virginii Woolf i „*2666*” Roberto Bolano. Jednocześnie sporo dzieł zwykle zaliczanych do strumienia świadomości okazało się mieć niewielkie korelacje multifraktalne. Były one trudno zauważalne zwłaszcza w takich książkach jak „*Atlas Shrugged*” Ayn Randy czy „*A la recherche du temps perdu*” Marcela Prousta.

„Nie jest do końca jasne, czy utwory należące do strumienia świadomości rzeczywiście ujawniają głębsze cechy naszej świadomości, czy raczej wyobrażenia literatów na jej temat. Trudno się więc dziwić, że przypisanie dzieła do tego czy innego gatunku bywa subiektywne. Widzimy tu zresztą możliwość ciekawego zastosowania naszej metodologii: w przyszłości może ona pomagać w bardziej obiektywnym przyporządkowaniu książek do tego czy innego gatunku literackiego”, zauważa prof. Drożdż.

Analizy multifraktalne tekstów literackich, przeprowadzone w IFJ PAN, zostały opublikowane w *Information Sciences*, prestiżowym czasopiśmie nauk informatycznych. Publikacja przeszła rygorystyczną weryfikację: z uwagi na interdyscyplinarny charakter tematyki redaktorzy powołali od razu aż sześciu recenzentów.



Sekwencje długości zdań wyrażonych liczbą wyrazów w czterech dziełach literackich, reprezentatywnych dla różnego stopnia ich kaskadowego charakteru. (Źródło: IFJ PAN).

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
 Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
 tel. +48 12 6628220
 email: stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

S. Drożdż, P. Oświęcimka, A. Kulig, J. Kwapien, K. Bazarnik, I. Grabska-Gradzińska, J. Rybicki, M. Stanuszek, *Quantifying origin and character of long-range correlations in narrative texts*, Information Sciences, **331** (2016) 32-44, doi: 10.1016/j.ins.2015.10.023.



Kraków, 30 listopada 2016

KLUCZOWA ROLA POMIJANEGO SKŁADNIKA JĘZYKA I LITERATURY

Wszystko wskazuje na to, że udało się rozwiązać zagadkę występującą we wszystkich ludzkich językach, od niemal stu lat intrygującą zwłaszcza matematyków i lingwistów zajmujących się badaniami statystycznymi literatury. Nowe analizy częstotliwości występowania wyrazów w najsłynniejszych książkach, przeprowadzone przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, pokazują, że nasze języki są strukturami bardziej złożonymi i bardziej kompletnymi niż się nam dotychczas wydawało.

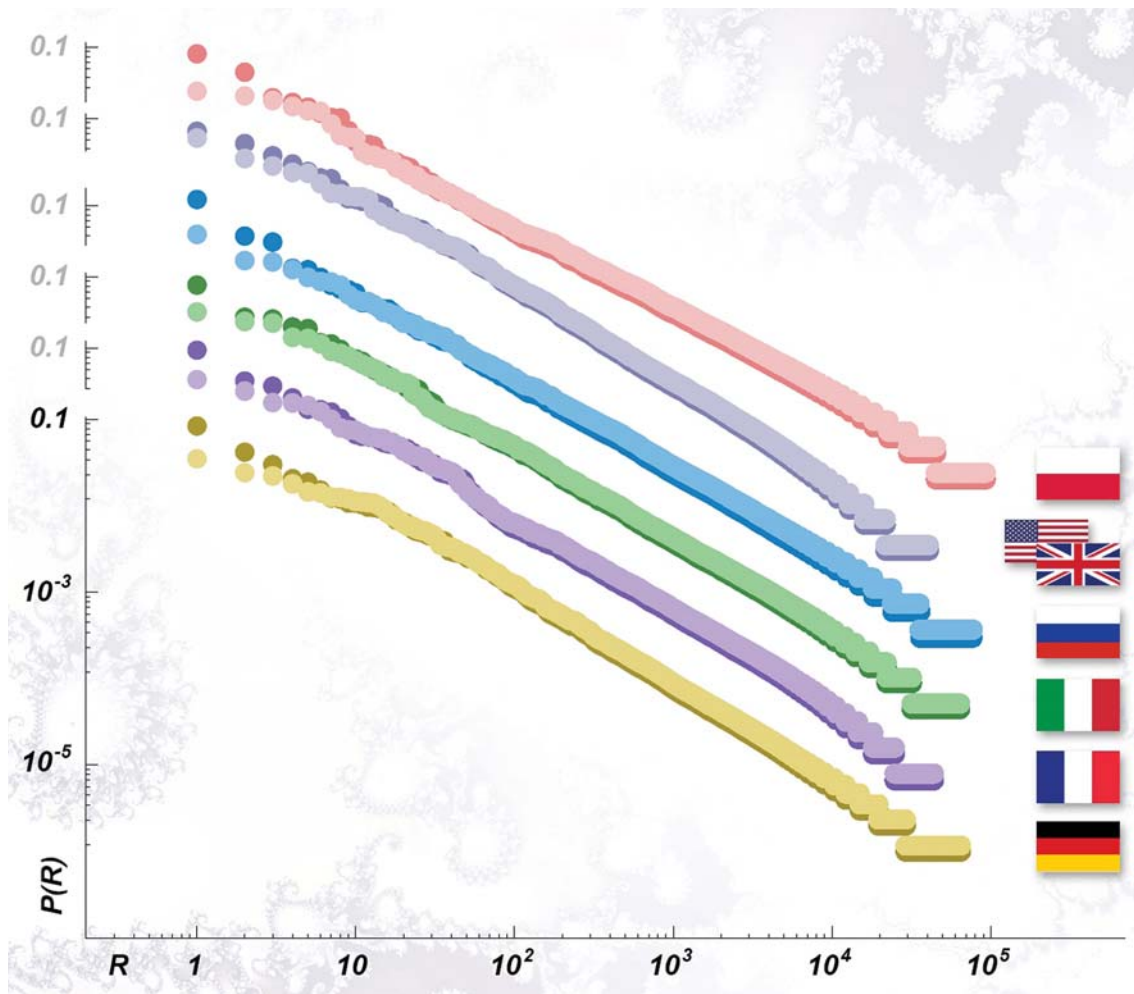
136

Z dobrym przybliżeniem, za 80% twoich sukcesów odpowiada 20% spośród twoich starań. Ta słynna zależność sprawdza się w zaskakująco wielu dziedzinach. Widać ją na przykład we wszystkich językach, zarówno w mowie, jak i w piśmie: za 80% długości wypowiedzi odpowiada zaledwie 20% najpopularniejszych słów, co prawdopodobnie wynika m.in. z faktu, że gdy rozmawiamy ze sobą, chcemy przekazać jak najwięcej treści, ale jak najmniejszym wysiłkiem. Opisująca to zjawisko zależność była jednym z pierwszych poznanych praw potęgowych i dziś nosi nazwę prawa Zipfa. Szybko się okazało, że w rzeczywistości nie jest ona tak banalna, jakby mogłoby się na pierwszy rzut oka wydawać. Naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie właśnie wykazali, że pewne zagadkowe cechy prawa Zipfa, od dziesięcioleci intrygujące zwłaszcza osoby zajmujące się statystyczną analizą tekstów literackich, są konsekwencją niedoceniań roli jednego ze składników języka.

„Mniej więcej rok temu za pomocą szczegółowych analiz statystycznych wykazaliśmy, że długości zdań w literaturze, czyli odległości między kropkami, wykazują bardzo złożone zależności o charakterze multifrakalnym, szczególnie wyraźnie widoczne w dziełach należących do gatunku określanego jako nurt świadomości. Był to intrygujący rezultat, który skłonił nas do przyjrzenia się z większą uwagą roli innych znaków interpunkcyjnych, zwłaszcza w kontekście prawa Zipfa. Wyniki, które teraz otrzymaliśmy, każą nam w nowy sposób spojrzeć nie tylko na rolę interpunkcji w języku, ale nawet na sam język”, mówi prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

Wykresy obrazujące prawo Zipfa w przypadku tekstów wykonuje się według mało skomplikowanej procedury. Dla każdego wyrazu zlicza się, jak często występuje on w tekście. Temu wyrazowi, który występuje najczęściej, przyporządkowuje się rząd 1, kolejnemu – rząd 2 itd. (w bogatych tekstach rzędy mogą przekraczać 10 tys.; wyrazy egzotyczne zwykle pojawiają się powyżej rzędu 1000). Prawo Zipfa mówi, że prawdopodobieństwo wystąpienia wyrazu jest odwrotnie proporcjonalne do jego rzędu: im większy rząd, tym prawdopodobieństwo to jest mniejsze. Wykresy przedstawiające tę zależność mają (na skali logarytmicznej) postać prostej.

Od czasu spopularyzowania przez amerykańskiego lingwistę George'a Zipfa, jego prawo nie przestaje zadziwiać. Jak coś tak skomplikowanego jak struktury tworzone za pomocą języka można opisać tak prostym prawem? Zagadek było więcej. Dość wcześnie zauważano, że wykresy dotyczące częstotliwości występowania wyrazów dla rzędów bliskich jedności odginają się nieco w dół od prostej. Owo odgięcie szczególnie intrygowało Benoit Mandelbrota, wielkiego francuskiego matematyka polskiego pochodzenia, który zajmował się tym zagadnieniem przez wiele lat. Zaproponował on nawet własną poprawkę do oryginalnego prawa Zipfa, lepiej odwzorowującą odgięcie (warto w tym miejscu wspomnieć, że to m.in. prace nad prawem Zipfa pchnęły Mandelbrota ku koncepcji fraktali).



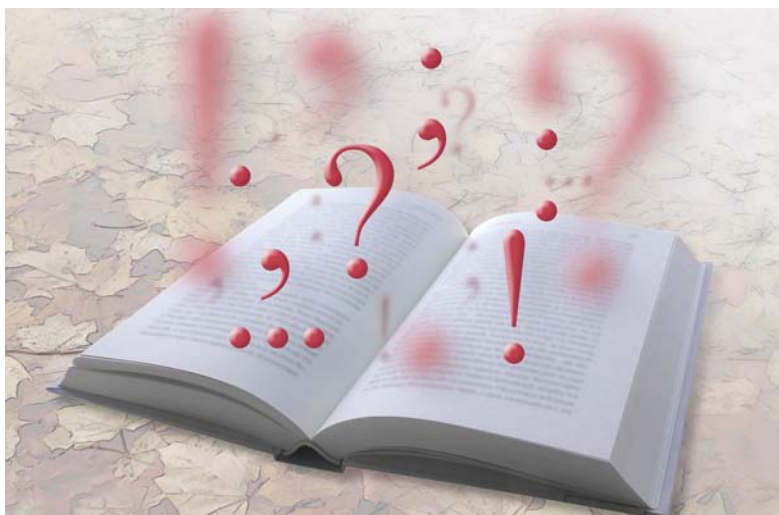
Prawdopodobieństwo wystąpienia wyrazu (oś pionowa) w zależności od jego rzędu (oś pozioma) w różnojęzycznych dziełach literatury światowej. Zagadkowe odchylenie od prostej, widoczne na jaśniejszych wykresach dla małych rzędów, znika po uwzględnieniu interpunkcji (wykresy ciemniejsze). (Źródło: IFJ PAN).

W swoich najnowszych badaniach fizycy z IFJ PAN poddali analizie teksty napisane w sześciu językach indoeuropejskich, należących do grup germańskiej (angielski i niemiecki), romańskiej (francuski i włoski) i słowiańskiej (polski i rosyjski). Użyto dzieł literackich z archiwów Projektu Gutenberg (www.gutenberg.org), o długości co najmniej pięciu tysięcy zdań. W każdym z języków z co najmniej pięciu różnych tekstów utworzono także jeden dodatkowy, liczący około miliona wyrazów. Wszędzie usunięto wyrazy niezwiązane z przenoszoną treścią, takie jak „rozdział”, „część” czy „epilog”, a także charakterystyczne dla danego języka skróty, np. „Mr.” czy „Dr.”, które po wykasowaniu kropek traktowano jako odrębne wyrazy. Zlikwidowano także przypisy, numery stron i inne znaki o charakterze bardziej typograficznym: cudzysłowy i nawiasy.

„Ostatecznie znakami interpunkcyjnymi uwzględnianymi w naszych analizach były przecinki, dwukropki i średniki, a za znaki kończące zdania uznaliśmy kropki, wykrzykniki, pytajniki i wielokropki”, precyzuje dr hab. Jarosław Kwapien (IFJ PAN), jeden ze współautorów publikacji w znanym czasopiśmie naukowym „Information Sciences”.

Wśród badanych dzieł znalazły się m.in.: „1984” George’a Orwella, „Moby Dick” Hermana Melville’a, „Ulysses” Jamesa Joyce’a, „Gulliver’s Travel” Jonathana Swifta, „Gone with the Wind” Margaret Mitchell, „Also sprach Zarathustra” Friedricha Nietzschego, „Der Prozess” Franza Kafki, „Der Zauberberg” Thomasa Manna, „Madame Bovary” Gustave’a Flauberta, „Le Fantôme de L’Opéra” Gastona Leroux, „Il pendolo di Foucault” Umberto Eco, „Giacinta” Luigiiego Capuany, „Przedwiośnie” Stefana Żeromskiego, „Ziemia obiecana” Władysława Reymonta, „Lalka” Bolesława Prusa, „Anna Karenina” i „Wojna i pokój” Lwa Tołstoja, a także „Bracia Karamazow” Fiodora Dostojewskiego.

Interpunkcja pełni w języku równie ważną rolę co słowa, ujawniają analizy multifraktalne przeprowadzone w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. (Źródło: IFJ PAN).



Uwzględnienie znaków interpunkcyjnych doprowadziło do interesującego rezultatu: zakrzywienie wykresu Zipfa dla wyrazów o rzędach bliskich jedności praktycznie zniknęło. Nowe wykresy układały się niemal dokładnie wzdłuż prostej, a więc zgodnie z pierwotną postacią prawa Zipfa. Poprawka do tego prawa, wprowadzona przez Mandelbrota, okazała się w ogóle zbędna.

„Gdy znaki interpunkcyjne zaczynamy traktować jak wyrazy, to one zaczynają zajmować rzędy bliższe jedności i zakrzywienie wykresów Zipfa w zasadzie znika. Zatem po uwzględnieniu interpunkcji każdy badany przez nas język zaczyna wyglądać jak twór bardziej spójny! Dlatego uzasadnione wydaje się stwierdzenie, że interpunkcja jest dla języka równie ważna jak słowa, a język bez niej staje się po prostu niekompletny”, mówi prof. Drożdż.

Nowe wykresy nadal wykazują kilka interesujących cech. Na przykład w językach słowiańskich po uwzględnieniu znaków interpunkcyjnych wykres Zipfa układa się praktycznie idealnie wzdłuż prostej, podczas gdy w czterech pozostałych co prawda wyraźnie się prostuje, lecz w nieco mniejszym stopniu i pewne odchylenie wciąż jest widoczne, zwłaszcza w języku angielskim.

„Może w trakcie analiz tekstów w językach niesłowiańskich nie uwzględniliśmy ich jakichś dodatkowych, specyficznych cech?”, zastanawia się prof. Drożdż, ale rozważa też inną, ciekawszą interpretację: „Może być też tak, że przyczyną niepełnej redukcji zakrzywienia tkwi w samym języku. Na przykład w angielskim może mieć źródło w łatwo dostrzegalnej tendencji autorów do ograniczania liczby znaków interpunkcyjnych. Jeśli ten ostatni powód jest prawdziwy, może warto się zastanowić, czy nadmierne redukowanie interpunkcji na pewno jest działaniem korzystnym i czy czasami nie niszczy wewnętrznej integralności języka?”

Odkrycie fizyków z IFJ PAN potencjalnie może mieć znaczenie wykraczające poza badania lingwistyczne. Odchylenie części wykresu Zipfa od prostej dla rzędów bliskich jedności jest obserwowane w wielu dziedzinach i ma różnorodną, nie zawsze do końca dobrze zrozumianą naturę. Skoro w wykresach przygotowanych na podstawie dzieł literackich zniknęło ono po uwzględnieniu czynnika powszechnego, lecz dotychczas uważanego za nieistotny, być może także w niektórych innych przypadkach można byłoby je usunąć poprzez uwzględnienie w analizach elementu do tej pory uznawanego za pozbawiony większej roli.

KONTAKT:

prof. dr hab. Stanisław Drożdż
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 6628220
email: stanislaw.drozd@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

A. Kulig, J. Kwapień, T. Stanisz, S. Drożdż, *In narrative texts punctuation marks obey the same statistics as words*, Information Sciences, 375 (2017) 98-113, doi: 10.1016/j.ins.2016.09.051.

**BADAJĄC
FUNDAMENTY
RZECZYWISTOŚCI
FIZYCZNEJ**



CZASOPRZESTRZEŃ – TWÓR DOBRZE ZNANYCH AKTORÓW?

Wśród większości fizyków panuje przekonanie, że struktura czasoprzestrzeni w nieznanym sposobie formuje się w okolicy skali Plancka, a więc na odległościach bliskich jednej trylionowej części metra. Jednak uważne rozważania podważają jednoznaczność tego przewidywania. Sporo argumentów przemawia za tym, że do narodzin czasoprzestrzeni może dochodzić w wyniku procesów zachodzących znacznie „bliżej” naszej rzeczywistości: na poziomie kwarków i ich zlepków.

Czym jest czasoprzestrzeń? Absolutną, niezmienną, zawsze i wszędzie istniejącą areną wydarzeń? A może jest tworem dynamicznym, wyłaniającym się w jakiś sposób na pewnej skali odległości, czasu bądź energii? Odwołania do absolutu nie są mile widziane przez dzisiejszą fizykę. Powszechnie się sądzi, że czasoprzestrzeń jest emergentna. Nie jest jednak jasne, gdzie miałby zachodzić proces jej narodzin. Gros fizyków skłania się ku przypuszczeniu, że czasoprzestrzeń tworzy się w skali Plancka, na odległościach bliskich jednej trylionowej części metra. W artykule w czasopiśmie „Foundations of Science” prof. dr hab. Piotr Źenczykowski z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie porządkuje dotychczasowe spostrzeżenia różnych autorów na temat formowania się czasoprzestrzeni i argumentuje, że hipoteza o jej powstawaniu w skali kwarków i hadronów (czyli zlepków kwarków) jest z wielu powodów bardzo racjonalna.

Pytania o naturę przestrzeni i czasu nurtują ludzkość co najmniej od starożytności. Czy przestrzeń i czas są odseparowane od materii i tworzą „pojemnik” na ruchy i zdarzenia zachodzące z udziałem cząstek, jak w V wieku p.n.e. chciał Demokryt? A może są atrybutami materii i bez niej nie mogłyby istnieć, jak wiek później sugerował Arystoteles? Mimo upływu tysiącleci, kwestie te nie doczekały się rozstrzygnięcia. Mało tego, oba podejścia – tak przeciwstawne! – są głęboko wplecione w filary współczesnej fizyki. W mechanice kwantowej zdarzenia rozgrywają się bowiem na sztywnej arenie, z jednorodnie płynącym czasem. Tymczasem w ogólnej teorii względności materia deformuje elastyczną czasoprzestrzeń (rozciąga ją i skręca), a czasoprzestrzeń mówi cząstkom, jak mają się poruszać. Innymi słowy, w jednej teorii aktorzy wchodzi na gotową scenę, by odegrać swoje role, podczas gdy w drugiej tworzą scenografię w trakcie przedstawienia, ta zaś wpływa na ich zachowania.

W 1899 roku niemiecki fizyk Max Planck zauważył, że za pomocą pewnych kombinacji niektórych stałych przyrody można otrzymać jednostki miary o bardzo fundamentalnej naturze. Zaledwie trzy stałe – prędkość światła c , stała grawitacji G i stała Plancka h – wystarczyły do utworzenia jednostek odległości, czasu i masy, równych (odpowiednio) $1,62 \cdot 10^{-35}$ m, $5,39 \cdot 10^{-44}$ s oraz $2,18 \cdot 10^{-5}$ g. Zgodnie z obecnie popularnym przekonaniem, czasoprzestrzeń miałaby się tworzyć właśnie na poziomie długości Plancka. W istocie nie ma jednak żadnych merytorycznych argumentów przemawiających za racjonalnością tej hipotezy.



Tak jak interakcje między ziarnami piasku formują gładką powierzchnię plaży, tak znana nam czasoprzestrzeń mogłaby być efektem relacji pojawiających się między kwarkami i ich zlepkami. (Źródło: IFJ PAN).

142

Zarówno nasze najbardziej wyrafinowane eksperymenty, jak i opisy teoretyczne, sięgają skali kwarków, a więc poziomom 10-18 m. Skąd więc wiadomo, że na drodze do długości Plancka – przez kilkanaście kolejnych, coraz mniejszych rzędów wielkości – czasoprzestrzeń zachowuje swoją strukturę? W istocie nie jesteśmy nawet pewni, czy pojęcie czasoprzestrzeni jest racjonalne na poziomie hadronów! Podziałów nie da się przecież prowadzić w nieskończoność, bo na którymś etapie pytanie o następną mniejszą część po prostu przestaje mieć sens. Doskonałym przykładem jest tu temperatura. Pojęcie to sprawdza się znakomicie w skali makro, lecz gdy po kolejnych podziałach materii docieramy do skali pojedynczych cząstek, traci rację bytu.

„Obecnie dąży się najpierw do skonstruowania skwantowanej, dyskretnej czasoprzestrzeni, a dopiero potem ‘zaludnia’ się ją dyskretną materią. Gdyby jednak czasoprzestrzeń była produktem kwarków i hadronów, zależność byłaby odwrotna: to dyskretny charakter materii powinien wymuszać dyskretność czasoprzestrzeni!”, mówi prof. Żenczykowski, po czym dodaje: „Planck kierował się matematyką, chciał stworzyć jednostki z jak najmniejszej liczby stałych. Ale matematyka to jedno, a związek z rzeczywistym światem to drugie. Na przykład podejrzana wydaje się wartość masy Plancka. Można by się spodziewać, że będzie miała wartość charakterystyczną raczej dla świata kwantów. Tymczasem ona odpowiada mniej więcej 1/10 masy pchły, a ta jest obiektem jak najbardziej klasycznym”.

Skoro chcemy opisywać świat fizyczny, powinniśmy skłaniać się ku argumentom fizycznym, a nie matematycznym. I tak, gdy za pomocą równań Einsteina opisujemy Wszechświat w dużych skalach, konieczne staje się wprowadzenie dodatkowej stałej grawitacyjnej, znanej jako stała kosmologiczna Lambda. Jeśli więc konstruując fundamentalne jednostki rozszerzymy pierwotny zestaw trzech stałych o Lambdę, w przypadku mas otrzymamy nie jedną, a trzy fundamentalne wartości: $1,39 \cdot 10^{-65}$ g, $2,14 \cdot 10^{56}$ g i $0,35 \cdot 10^{-24}$ g. Pierwszą z nich można byłoby interpretować jako kwant masy, druga jest na poziomie masy obserwowalnego Wszechświata, trzecia zaś jest zbliżona właśnie do mas hadronów (na przykład masa neutronu to $1,67 \cdot 10^{-24}$ g). Analogicznie, po uwzględnieniu Lambdy pojawia się jednostka odległości równa $6,37 \cdot 10^{15}$ m, bardzo zbliżona do rozmiarów hadronów.

„Zabawy ze stałymi są jednak podejrzane, ponieważ wiele zależy od tego, które stałe wybierzemy. Na przykład, gdyby czasoprzestrzeń rzeczywiście była produktem kwarków i hadronów, to jej właściwości, w tym prędkość światła, też powinny być emergentne. To z kolei oznacza, że prędkości światła nie powinno być wśród stałych podstawowych!”, zauważa prof. Żenczykowski.

Za powstawaniem czasoprzestrzeni w skali kwarków i hadronów przemawiają także właściwości samych cząstek elementarnych. Model Standardowy nie tłumaczy na przykład, dlaczego istnieją trzy generacje cząstek, ani skąd się biorą ich takie a nie inne masy oraz wartości liczb kwantowych zwanych

wewnętrzny, wśród których są izospin, hiperładunek czy kolor. W obrazie przedstawionym przez prof. Żenczykowskiego wartości te można powiązać z pewną sześciowymiarową przestrzenią utworzoną z położenia cząstek i ich pędów. Tak skonstruowana przestrzeń traktuje położenia cząstek (materię) oraz ich ruchy (procesy) z jednakową wagą. Okazuje się, że własności mas czy wewnętrznych liczb kwantowych mogą być wówczas konsekwencją własności algebraicznych przestrzeni 6D. Co więcej, własności te tłumaczyłyby także brak możliwości zaobserwowania swobodnych kwarków.

„Narodziny czasoprzestrzeni mogą być związane ze zmianami organizacji materii zachodzącymi w skali kwarków i hadronów w bardziej pierwotnej, sześciowymiarowej przestrzeni fazowej. Nie bardzo wiadomo, co dalej zrobić z tym obrazem. Każdy kolejny krok będzie wymagał wyjścia poza to, co wiemy. A my nie znamy nawet reguł gry, w którą bawi się z nami przyroda, musimy je dopiero odgadnąć! Wydaje się jednak bardzo racjonalne, by wszelkie konstrukcje zaczynać od materii, ponieważ jest ona czymś fizycznym i eksperymentalnie dostępnym. W tym ujęciu czasoprzestrzeni byłyby jedynie naszą idealizacją związków między materią”, podsumowuje prof. Żenczykowski.

KONTAKT:

prof. dr hab. Piotr Żenczykowski
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628278 (preferowany email)
email: piotr.zenczykowski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

P. Żenczykowski, *Quarks, Hadrons, and Emergent Spacetime*, Found. Sci., 24 (2019) 287-305, doi: 10.1007/s10699-018-9562-2.



Kraków, 14 lutego 2019

I KWANTOWE, I KLASYCZNE – STANY Z POGRANICZA ŚWIATÓW

Własności kwantowe wydają się nam niezwykle egzotyczne nie bez powodu: naszymi zmysłami po prostu nie dostrzegamy ich w otaczającym nas świecie. Okazuje się jednak, że granica między egzotyczną rzeczywistością kwantową a tą klasyczną wcale nie musi być tak ostra, jak mogłoby się wydawać. Krakowscy naukowcy pokazali, że mogą istnieć stany kwantowe, które z jednej strony wykazują najbardziej charakterystyczne cechy kwantowe, a z drugiej są tak bliskie stanom klasycznym, jak tylko jest to możliwe w ramach mechaniki kwantowej.

144

Świat codzienny, klasyczny, dramatycznie różni się od świata kwantów. W tym pierwszym w zasadzie wszystko da się precyzyjnie zmierzyć i przewidzieć. Każdy obiekt klasyczny istnieje tu w konkretnym miejscu przestrzeni, w konkretnym stanie, i nie jest zdolny do natychmiastowej reakcji na to, co się dzieje z innymi, oddalonymi od niego obiektami. Tymczasem w świecie kwantów zamiast pewności mamy tylko prawdopodobieństwo, obiekty mogą przebywać w różnych miejscach i stanach jednocześnie, a dzięki zjawisku splątania kwantowego wydają się natychmiast reagować na to, co się stało z ich dowolnie odległymi partnerami. Współpraca teoretyków z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz matematyka z Instytutu Matematyki Uniwersytetu Jagiellońskiego (IM UJ) pozwoliła jednak wykazać, że oba światy mogą mieć ze sobą więcej wspólnego niż można byłoby przypuszczać. W publikacji zamieszczonej w zbiorze artykułów „Coherent States and Their Applications: A Contemporary Panorama” opisali oni wyjątkowe stany kwantowe układu dwóch cząstek, wykazujące jednocześnie cechy i klasyczne, i kwantowe.

Powszechnie uważa się, że w świecie klasycznym efekty kwantowe są niezauważalne i opisując układ klasyczny można je bezpiecznie pominąć. Takie myślenie prowadzi do naiwnego poglądu, że jeśli coś zachowuje się klasycznie, to nie zachowuje się kwantowo – i odwrotnie. W rzeczywistości tak nie jest. Świat klasyczny jest światem układów złożonych z ogromnej liczby obiektów kwantowych, a jego obserwowalne na co dzień własności są, jak głosi zasada korespondencji, granicznym przypadkiem własności tych ostatnich. Zrozumienie natury tego przejścia granicznego nie jest proste i fizycy wciąż mają na tym polu wiele do zrobienia.

„W naszych rozważaniach zajęliśmy się problemem postawionym ponad 80 lat temu przez jednego ze współtwórców mechaniki kwantowej, Erwina Schrödingera. Chodzi o możliwość współistnienia w jednym układzie kwantowym własności oddzielnie uważanych za kwantowe bądź klasyczne. Spróbujemy znaleźć odpowiedź na pytanie, czy mogą one występować naraz, czy też się wzajemnie wykluczają. Wspólnie z prof. dr. hab. Franciszkiem Szafranem z Instytutu Matematyki UJ wykazaliśmy, że w układzie dwóch cząstek kwantowych pewne cechy klasyczne i kwantowe rzeczywiście mogą pokojowo koegzystować”, mówi dr hab. Katarzyna Górka (IFJ PAN).

Sztandarową ilustracją nieintuicyjności świata kwantów jest słynna zasada nieoznaczoności Heisenberga. Mówi ona, że dla żadnej cząstki (dla prostoty o ustalonej masie) nie można jednocześnie



W określonych warunkach pewne stany kwantowe (reprezentowane przez wirujące monety) mogą współistnieć ze stanami klasycznymi (monety leżące na stole), wykazali naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN i Uniwersytetu Jagiellońskiego. (Źródło: IFJ PAN).

zmierzyć z dowolną precyzją położenia i prędkości. Jeśli znamy dokładnie położenie cząstki, nie będziemy wiedzieli nic o jej prędkości; jeśli znamy dokładnie prędkość, nie będziemy potrafili wskazać położenia. Co więcej, niepewność pomiarów zależy od stanu, w którym znajduje się cząstka, a ponieważ cząstki kwantowe mogą być w różnych stanach, to i niepewności mogą być różne. Stany, w których zasada nieoznaczoności Heisenberga jest zminimalizowana, są nazywane koherentnymi i wykazują bardzo duże podobieństwo do stanów obserwowanych w układach klasycznych.

Podstawową – i jednocześnie niezwykle ciekawą – własnością układów kwantowych jest ich zdolność do superpozycji, czyli przebywania w stanie będącym mieszaniną (kombinacją) pewnych szczególnych (a przy tym obserwowalnych) stanów zwanych bazowymi. W świecie klasycznym taka kwantowa superpozycja nie występuje, można ją jednak próbować sobie wyobrazić za pomocą dość intuicyjnego przykładu: monety wirującej na stole. Moneta jest tu w stanie przypominającym superpozycję dwóch stanów bazowych: orła i reszki. Możemy nawet dokonać „pomiaru”, czyli docisnąć wirującą monetę do blatu (lub poczekać, aż zrobi to za nas grawitacja). Niszczymy wtedy superpozycję i moneta przeskakuje do jednego z dwóch, jak najbardziej klasycznych, stanów: leży ku górze albo orłem, albo reszką.

„Powyzsza analogia jest dalece niepełna. Moneta jest obiektem klasycznym i gdy wiruje, orzeł i reszka cały czas istnieją niezmiennie, moneta zaś jedynie nie potrafi wybrać między nimi. W układzie mamy więc tak naprawdę trzy istotnie różne stany”, wyjaśnia dr hab. Andrzej Horzela (IFJ PAN). „Tymczasem w superpozycji kwantowej jest tylko jeden stan. Przywołując analogię do wirującej monety powinniśmy w nim widzieć jakąś formę orłoreszki, a może reszkoorła. Coś, co umyka naszym wyobrażeniom, klasycznej intuicji, a może nawet zdrowemu rozsądkowi. A co zrobić, jeżeli nasz stan kwantowy jest na dodatek stanem koherentnym, a więc uważanym za najbliższy stanom klasycznym, w których zawsze mamy albo orła, albo reszkę?”

Splątanie jest uważane za najważniejszą oznakę kwantowości układu, koherentność – za cechę sygnalizującą bliskość klasyczności. Stany znalezione przez krakowskich fizyków są, przynajmniej w sensie matematycznym, jednocześnie i koherentne, i splątane w odniesieniu do całego układu obu cząstek.

„Stany kwantowe o podobnej naturze były rozważane już wcześniej. Wytwarzano je nawet doświadczalnie, zaczynając od dwóch stanów koherentnych, które następnie plątano. Tak otrzymany stan jest splątany, ale jako całość nie musi być koherentny. Nasze stany są skonstruowane w sposób zapewniający, że pozostają one jednocześnie koherentne (czyli minimalizują zasadę nieoznaczoności)

i splątane. Zatem można je interpretować jako obiekty, które przejawiają własności z jednej strony bliskie klasycyzacji, a z drugiej uważane za typowo kwantowe. Przejawem ich kwantowości jest to, że opisują układ dwóch cząstek, których nie można rozdzielić nawet wtedy, kiedy cząstki te nie oddziałują ze sobą”, tłumaczy dr Horzela.

Wynik krakowskich naukowców ma charakter matematyczny. Pozostaje otwarte pytanie, czy znalezione stany można wytworzyć w laboratorium. Wydaje się, że nie istnieją żadne przeciwwskazania, które mogłyby uniemożliwić ich istnienie. Ostateczną odpowiedź przyniesie jednak tylko doświadczenie. Eksperymentatorzy, zwłaszcza optycy kwantowi, mają więc szerokie pole do popisu.

KONTAKT:

dr hab. Katarzyna Górską
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628161
email: katarzyna.gorska@ifj.edu.pl

dr hab. Andrzej Horzela
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628383
email: andrzej.horzela@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

K. Górską, A. Horzela, F.H. Szafraniec, *Coherence, squeezing and entanglement – an example of peaceful coexistence*, Chapter 5 in: *Coherent States and Their Applications: A Contemporary Panorama*, ed. J.P. Antoine, F. Bagarello, J.P. Gazeau, Springer Proceedings in Physics vol. 205, Switzerland, Springer, 2018 (2018) 89-117; math-ph/1801.00352, ISBN: 978-3-319-76731-4 doi: 10.1007/978-3-319-76732-1_5.

**DZIAŁALNOŚĆ
POPULARYZATORSKA
I OBECNOŚĆ IFJ PAN
W MEDIACH**



DZIAŁALNOŚĆ POPULARYZATORSKA

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk aktywnie uczestniczy w regularnie odbywających się publicznych imprezach popularyzatorskich, zakrojonych na szeroką skalę. Niektóre z tych wydarzeń organizowane są co roku wspólnie z innymi instytucjami naukowymi. Wśród najważniejszych z nich są m. in.:

FESTIWAL NAUKI I SZTUKI W KRAKOWIE

Wśród licznych stanowisk, prezentujących krakowskie uczelnie i instytucje naukowe, corocznie podczas festiwalu przedstawiane są ekspozycje przygotowane przez pracowników i doktorantów Instytutu. Zwiedzający stanowisko IFJ PAN mogą uczestniczyć m.in.: w „podróży do początków Wszechświata”, dowiedzieć się, z czego jest zbudowany i jaki będzie jego los oraz zapoznać się z badaniami prowadzonymi w Europejskim Centrum Badań Jądrowych CERN. Zainteresowani mogą zapoznać się z tajnikami radioterapii protonowej komórek nowotworowych, w szczególności z działaniem cyklotronu i stanowisk terapeutycznych w Centrum Cyklotronowym Bronowice (CCB). Po-



149



nadto naukowcy Instytutu tłumaczą zainteresowanym, czym są fale grawitacyjne, ciemna materia i czarne dziury oraz na czym polega „łapanie” cząstek promieniowania kosmicznego przy użyciu aplikacji pobranej na własnego smartfona, czyli czym jest międzynarodowy projekt CREDO (Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory), zainicjowany w Instytucie w 2016 roku.

MAŁOPOLSKA NOC NAUKOWCÓW

Organizacja Małopolskiej Nocy Naukowców jest corocznie największym przedsięwzięciem Instytutu promującym naukę. W namiotach usytuowanych na terenach zielonych Instytutu pracownicy naukowi i doktoranci przedstawiają dokonania i osiągnięcia sześciu oddziałów naukowych IFJ PAN, obejmujące prezentacje i doświadczenia z udziałem publiczności. Przygotowany jest także Namiot Konstruktora, w którym każdy ma możliwość zbudowania prostych modeli urządzeń (takich jak: spektroskop, poduszkowiec, peryskop, kalejdoskop). Modele te później można zabrać do domu. Wszyscy odwiedzający w tym czasie Instytut, mogą zwiedzić najciekawsze laboratoria na szlaku „W labiryncie nauki”. W ramach „Kina naukowego”, cyklicznie wyświetlane są filmy popularnonaukowe, m.in.:

„Tajemniczy Świat Jąder Atomowych”, „Badamy tajemnicę DNA” „Kronika Bronowicka”, których twórcą jest pracownik Instytutu: dr hab. Jerzy Grębosz, a także film „Przesuwanie horyzontów” w reżyserii Wiktora Niedzickiego. Każdego roku wydarzeniu temu towarzyszą ciekawe przedsię-

wzięcia, jak m.in. „Triki fizyki” – pokaz eksperymentów, w których przyroda odsłania swoje magiczne oblicze, „Fizyka dla dorosłych” – pokazy doświadczeń fizycznych dozwolonych od lat osiemnastu lub

„Gdzie jest granica poważnej fizyki?”, czyli interaktywny wykład połączony z pokazem prostych doświadczeń, mogących stać się początkiem amatorskich projektów badawczych. Dla młodszych uczestników przewidziano dodatkową atrakcję – Naukowe podchody – grę zadaniową, nawiązującą do praw i zjawisk fizycznych spotykanych w codziennym życiu. Uczestnicy podchodów wyposażeni w mapę terenów Instytutu, ułatwiającą

dotarcie do zadań konkursowych, rozwiązują kolejne niebanalne zadania. Od 2018 roku kolejną atrakcją Małopolskiej Nocy Naukowców jest przygotowana wystawa eksponatów oraz starych przyrządów doświadczalnych pokazujących jak kiedyś uprawiano fizykę – tzw. Lamusownia. Corocznie w tym dniu Instytut odwiedza ponad tysiąc pasjonatów nauki.



PIKNIK NAUKOWY POLSKIEGO RADIA I CENTRUM NAUKI KOPERNIK

Cykliczna impreza plenerowa, popularyzująca naukę, organizowana jest każdego roku w Warszawie na Stadionie Narodowym. Popularyzatorzy nauki z Instytutu poprzez wykonywane eksperymenty stawiają sobie za cel rozbudzanie ciekawości i inspirowanie do samodzielnego poszerzania wiedzy. Prezentują m.in. jak domowo-kuchennymi sposobami można zilustrować efekt cieplarniany, chromatografię cieczową oraz wykazać wpływ rodzaju gleby na absorpcję różnych substancji. Uczestnicy pikniku mogą dowiedzieć się o sposobach pomiaru radonu, o zabezpieczeniach anty-radonowych stosowanych w budynkach oraz o różnych możliwościach detekcji promieniowania jądrowego, jak również poznać zastosowanie magnesów w leczeniu, czy też poszerzyć swoją wiedzę na temat promieniowania i jego wpływu na zdrowie człowieka. Prezentowane przez IFJ PAN pokazy to m. in. „Promieniowanie jonizujące i jego propagacja w środowisku”, „Transport skażeń w środowisku”, „Przyspiesz cząstkę w akceleratorze”, „Przełom w nauce? Teraz Twój ruch – badaj Wszechświat smartfonem!”.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ PAN ORGANIZUJE I WSPÓŁTWORZY RÓWNIEŻ INNE WYDARZENIA POPULARYZUJĄCE NAUKĘ

We współpracy z International Particle Physics Outreach Group (IPPOG) i CERN, pracownicy naukowcy Instytutu corocznie organizują **Międzynarodowe Warsztaty Fizyki Cząstek Elementarnych** dla uczniów szkół średnich (w ramach „International Masterclasses – Hands on Particle Physics”). Każdego roku odbywają się również praktyki studenckie – **Laboratorium fizyki cząstek elementarnych** – IFJ PAN Particle Physics Summer Student Programme. Te wydarzenia mają na celu zachęcanie stu-

151



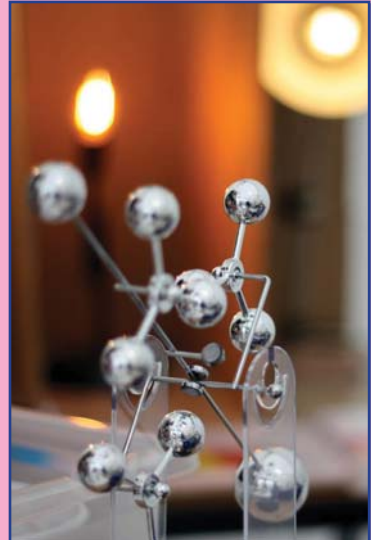
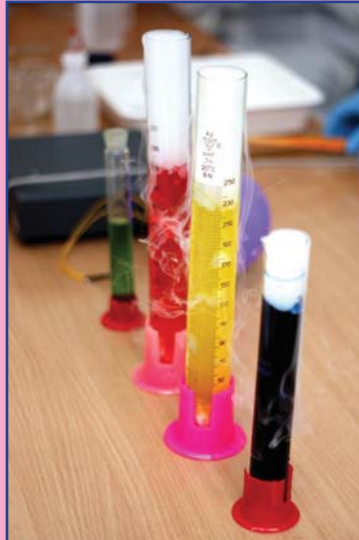
dentów fizyki i nauk pokrewnych do włączenia się w badania w zakresie fizyki cząstek elementarnych poprzez umożliwienie im dokonania samodzielnej analizy najnowszych danych doświadczalnych z eksperymentów ATLAS, ALICE, Belle, LHCb, NA61/SHINE czy T2K.

W ramach popularyzacji nauki możliwe jest **zwiedzanie wybranych laboratoriów Instytutu** w małych grupach. Wycieczki te mogą wybrać program zwiedzania spośród udostępnianych laboratoriów, gdzie naukowcy prezentują półgodzinne prelekcje na temat badań prowadzonych w danej pracowni. Od 2018 roku organizowany jest **Dzień Otwarty**, podczas którego naukowcy przedstawiają studentom



152





aktualne oferty praktyk studenckich i prac dyplomowych, ale także prezentują laboratoria, punkty preparatyki próbek i sprzęt doświadczalny, jak również omawiają i wyjaśniają prowadzone badania naukowe w tych pracowniach. Daje to szansę na indywidualne spotkania z potencjalnymi opiekunami praktyk studenckich czy prac dyplomowych. Informacja o tym wydarzeniu jest rozpowszechniana na uczelniach całej Polski oraz wśród kół naukowych z kraju.

W Instytucie odbywają się również cieszące się ogromnym zainteresowaniem wśród dzieci i młodzieży szkół podstawowych i średnich **widowiska popularnonaukowe**, prowadzone przez Wiktora Niedzickiego – znanego popularyzatora fizyki oraz dr Dominikę Kuźmę z IFJ PAN. W wydarzeniach tych z wielkim aplauzem bierze udział blisko



tysiąc uczniów szkół podstawowych i średnich z Krakowa i okolic. Przy okazji cyklu widowisk popularnonaukowych w 2018 roku Instytut wydał książeczkę zawierającą opisy i zdjęcia ilustrujące wybrane proste doświadczenia fizyczne dla najmłodszych, zatytułowaną „Czwarte Laboratorium Wiktora”.

Instytut wspiera **konkursy z dziedziny fizyki**, m.in.: Małopolski Konkurs z Fizyki i Astronomii dla uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych oraz ogólnopolski konkurs „Eksperyment Łańcuchowy”, organizowany z inicjatywy studentów Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu

Jagiellońskiego w Krakowie. Pracownicy Instytutu również sami przygotowują ciekawe przedsięwzięcia – m.in. konkurs na projekt tatuażu zmywalnego, zatytułowany Tatuaż z fizyką w tle lub Łowcy cząstek, polegający na drużynowym wykrywaniu cząstek wtórnego promieniowania kosmicznego oraz radioaktywności lokalnej przy pomocy smartfonów wyposażonych w aplikację CREDO Detector. Celem konkursu jest stworzenie sieci użytkowników aplikacji CREDO Detector, propagowanie idei współtworzenia nauki przez osoby niebędące profesjonalnymi naukowcami, umożliwienie dzieciom i młodzieży uczestnictwa w badaniach naukowych i współautorstwa odkryć naukowych. W akcję zaangażowanych jest kilkuset uczniów z kilkudziesięciu szkół w kraju.





155





MEDIA INFORMACYJNE I SPOŁECZNOŚCIOWE

Instytut Fizyki Jądrowej PAN, to nie tylko wspaniałe środowisko pracy twórczej, ale przede wszystkim społeczność naukowców, inżynierów i całej załogi. To instytucja dobrze znana w regionie, w Polsce i poza jej granicami. Różne formy elektronicznej komunikacji społecznościowej służą przybliżeniu i zacieśnieniu tych relacji.

Instytut corocznie zamieszcza na globalnym naukowym serwisie prasowym: EurekAlert! notatki o znaczących osiągnięciach naukowych, dokonanych z istotnym udziałem badaczy z IFJ PAN, które były opublikowane w renomowanych czasopismach. Doniesienia prasowe na tym serwisie miały od kilku do kilkunastu tysięcy otwarć w miesiącu. Notatki o tych osiągnięciach ukazały się także w szeregu mediów informacyjnych w Polsce, w tym PAP Nauka w Polsce. Serwis EurekAlert! (www.eurekalert.org) jest prowadzony przez American Association for the Advancement of Science.



Instytut prowadzi również aktywną działalność na portalach **Facebook**, **Twitter** czy **YouTube**, zamieszczając informacje i filmy dotyczące działalności IFJ PAN i bieżących działań popularyzatorskich podejmowanych przez Instytut. Swoje profile na Facebooku prowadzą także laboratoria i zakłady naukowe Instytutu, m.in. Laboratorium Dozymetrii Indywidualnej i Środowiskowej, Zakład Materiałów Magnetycznych i Nanostruktur.

Prowadzone są również profile: IFJ PAN Particle Physics Summer Student Programme, projektu CREDO oraz konferencji Epiphany.

Pracownicy IFJ PAN często zapraszani są przez różne instytucje nauki i kultury do wygłaszania wykładów popularyzatorskich, udziału w panelach dyskusyjnych i przeprowadzania ćwiczeń laboratoryjnych. Współpracują również z mediami, publikując swoje teksty na blogach popularnonaukowych, takich jak Crazy Nauka, czy też występując w telewizji np. w programie TVP Sonda 2 lub w audycjach radiowych.



NIECH CI FIZYKA NIE UMYKA

Zamieszczone w niniejszej publikacji materiały powstały na bazie osiągnięć naukowych, jakie w formie informacji prasowych udostępniliśmy mediom.

Osiągnięcia te zaprezentowaliśmy również w internetowym serwisie EurekaAlert!, zawierającym wiadomości z różnych dziedzin nauki. Treść książki została ujęta w sześć rozdziałów, uporządkowanych tematycznie w taki sposób, aby zwiększyć jej czytelność. Jest to jednak opis tylko części prowadzonych w Instytucie prac naukowych – kolejna publikacja i odkrycia wciąż jeszcze przed nami.



**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk**



**NARODOWE CENTRUM RADIOTERAPII HADRONOWEJ
CENTRUM CYKLOTRONOWE
BRONOWICE**

DLA MEDYCYNY

terapia nowotworów za pomocą wiązki protonowej

DLA NAUKI I PRZEMYSŁU

- ☑ fizyka jądrowa
- ☑ fizyka medyczna
- ☑ dozymetria
- ☑ radiobiologia
- ☑ inżynieria materiałowa

<https://ccb.ifj.edu.pl>

+48 12 399 62 00

sekretariat.ccb@ifj.edu.pl

DAWKI INDYWIDUALNE SOCZEWKI OCZU

Zakres dawek : 0,1 mSv - 1 Sv



Nowoczesna metoda pomiaru dawek na soczewki oczu dawkomierzami OD-12

ZALETY METODY TERMOLUMINESCENCYJNEJ

- ✓ Najnowocześniejsza metoda
- ✓ Pomiar dawki od 0,03 mGy
- ✓ Wymiana dawkomierzy - tylko 4 x w roku
- ✓ Najwyższa jakość usługi
- ✓ Szybka obsługa klienta
- ✓ Najtańsza kontrola dawek na rynku



PRZYJAZNA OBSŁUGA KLIENTA



**Kategoria A i B narażenia pracowników
na promieniowanie jonizujące**
Kontrola środowiska pracy

Nasz adres:
ul. E. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Sekretariat - umowy, zlecenia, przesyłki
tel.: 12 662 84 57
ladis@ifj.edu.pl

Laboratorium - pomiary dawek, świadectwa
tel.: 12 662 82 14

Laboratorium - pomiary dawek na dłonie
tel.: 12 662 80 73

<http://ladis.ifj.edu.pl>



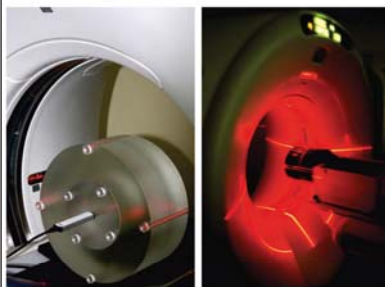
INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



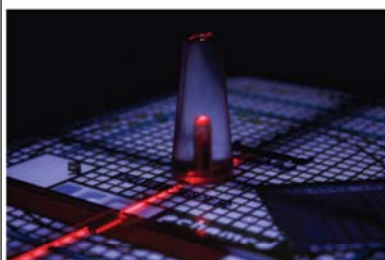
AB 1317

Laboratorium Dozymetrii
Indywidualnej i Środowiskowej

Sprzęt do testowania aparatury rentgenowskich



Pomiar indeksu dawki oraz pomiary fantomem CATPHAN 600 w TK



Fantom ALPHA - pomiary geometrii wiązki promieniowania rentgenowskiego

<http://ladis.ifj.edu.pl>

Przyjazna Obsługa Klienta



Nasz adres:
ul. E. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

tel.: 12 662 80 81
kom.: 606 233 955
e-mail: rtg@ifj.edu.pl

<http://ladis.ifj.edu.pl>

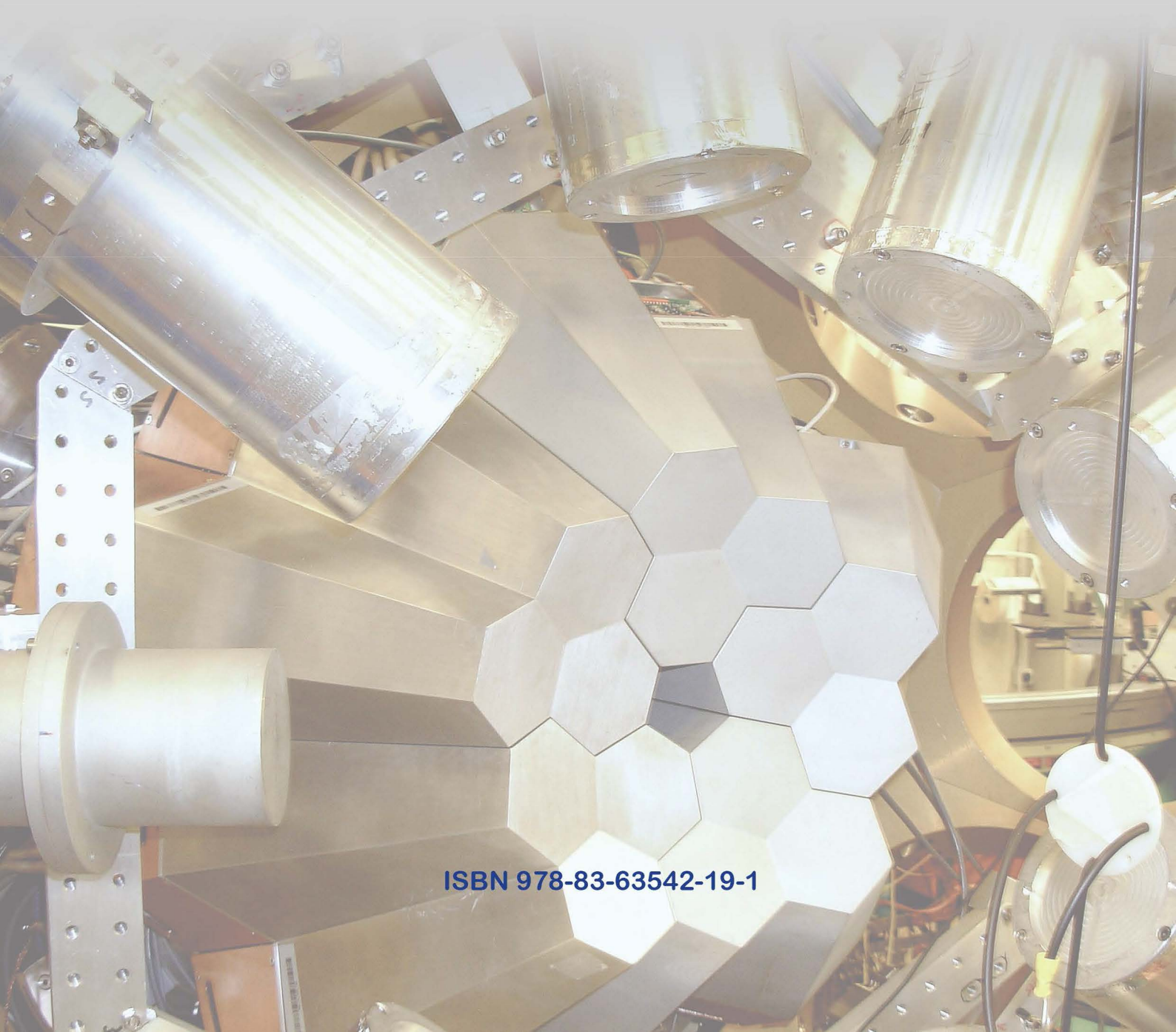


INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



AB 1317

Laboratorium Dozymetrii
Indywidualnej i Środowiskowej



ISBN 978-83-63542-19-1