



BARWY NAUKI

JAROSŁAW CHROSTOWSKI

FRAGMENT PUBLIKACJI WYDANEJ
Z OKAZJI JUBILEUSZU 70-LECIA
INSTYTUTU FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

70 LAT
INSTYTUTU FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO PAN
1955 – 2025

KRAKÓW 2025

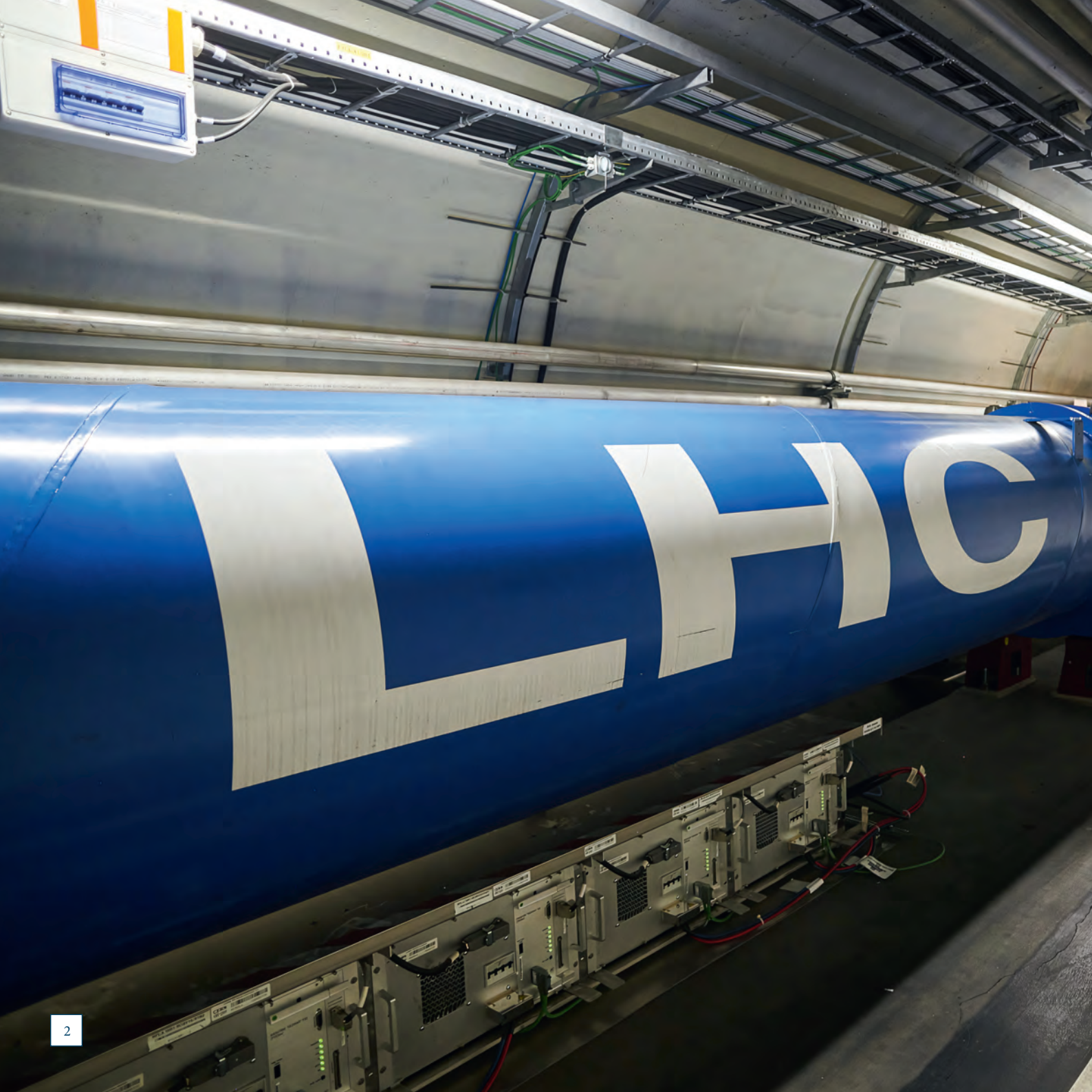
BARWY NAUKI – WYBRANE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE OSTATNIEJ DEKADY

” W pracy naukowej konieczny jest entuzjazm, trzeba się bardzo interesować tym, co się robi, mieć ten wewnętrzny motor, który stale podtrzymuje działanie, żeby nie oklapnąć, żeby nie przestać, żeby do czegoś ciągle dążyć

prof. Andrzej Z. Hryniewicz

We wnętrzu zderzenia

Wszystkie obiekty wokół nas mają jakąś masę. Banalne? Bezspornie! Mniej trywialne było znalezienie odpowiedzi, skąd ta masa się bierze. Pochodzenie 99% masy atomów i cząsteczek wyjaśniono w ostatnich dekadach faktem posiadania energii kinetycznej przez kwarki i gluony w protonach i neutronach (czyli





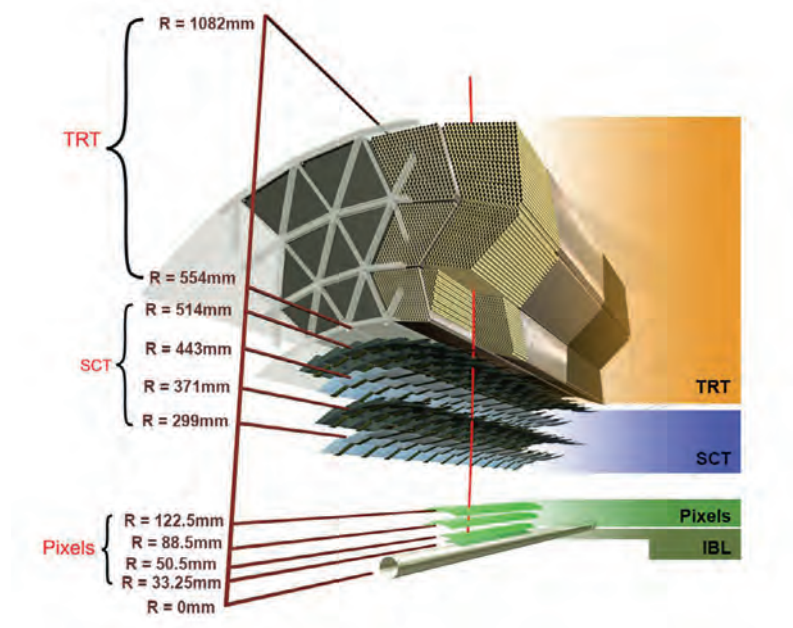
nukleonach, składnikach jąder atomowych). Na potwierdzenie natury mechanizmu odpowiedzialnego za masy cząstek elementarnych – owego brakującego procenta – przyszło jednak czekać aż do 2012 roku. Dopiero wtedy w Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider), działającym w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN pod Genewą, odkryto ślady wskazujące na istnienie bozonów Higgsa, cząstek o krytycznym znaczeniu dla proponowanego mechanizmu. Osiągnięcie, dopełniające listę cząstek elementarnych Modelu Standardowego, uznaje się za największy sukces fizyków zaangażowanych w budowę i eksploatację LHC – w chwili uruchomienia będącego największym, najdroższym i najbardziej skomplikowanym urządzeniem stworzonym przez ludzkość.

Wiązki protonów i ciężkich jonów przyspieszane w Wielkim Zderzaczu Hadronów są używane w wielu eksperymentach z zakresu fizyki wysokich energii. Wśród nich największym zespołem detektorów dysponuje współpraca ATLAS, nie bez powodu grupująca kilka tysięcy fizyków z niemal dwustu instytucji naukowych kilkudziesięciu państw. Specjaliści z naszego Instytutu we współpracy z krakowską Akademią Górniczo-Hutniczą (AGH) wnieśli szczególny wkład w projektowanie, budowę i eksploatację działającego tu krzemowego mikropaskowego detektora wewnętrznego (Semiconductor Tracker). Układ ten jest niezbędny dla rekonstrukcji torów cząstek powstających w zderzeniach wiązek, umożliwia pomiary

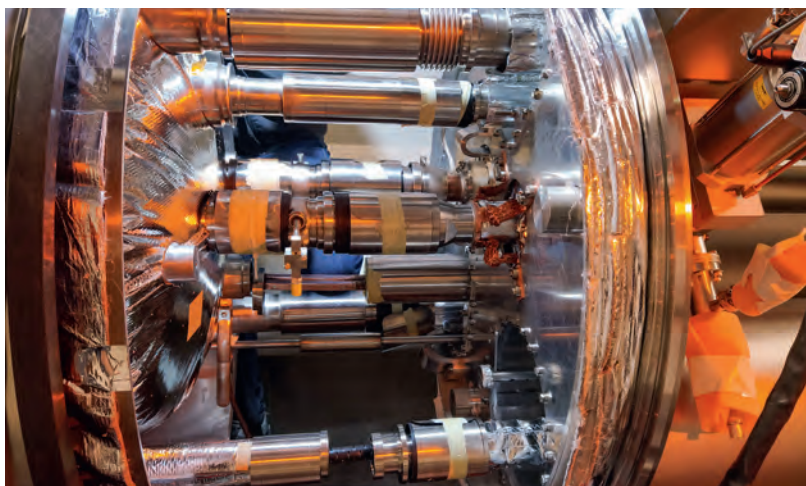
◀ Fot. Magnesy dipolowe LHC w tunelu (źródło: CERN)

ich pędów oraz innych parametrów zderzeń. Gdy za około pięć lat Wielki Zderzacz Hadronów wznowi pracę, już jako HL-LHC (High Luminosity LHC), we wnętrzu ATLAS-a będzie pracowała zmodernizowana wersja „krakowskiego” detektora SCT, przystosowana do działania z wiązkami o zwiększonej świetlności.

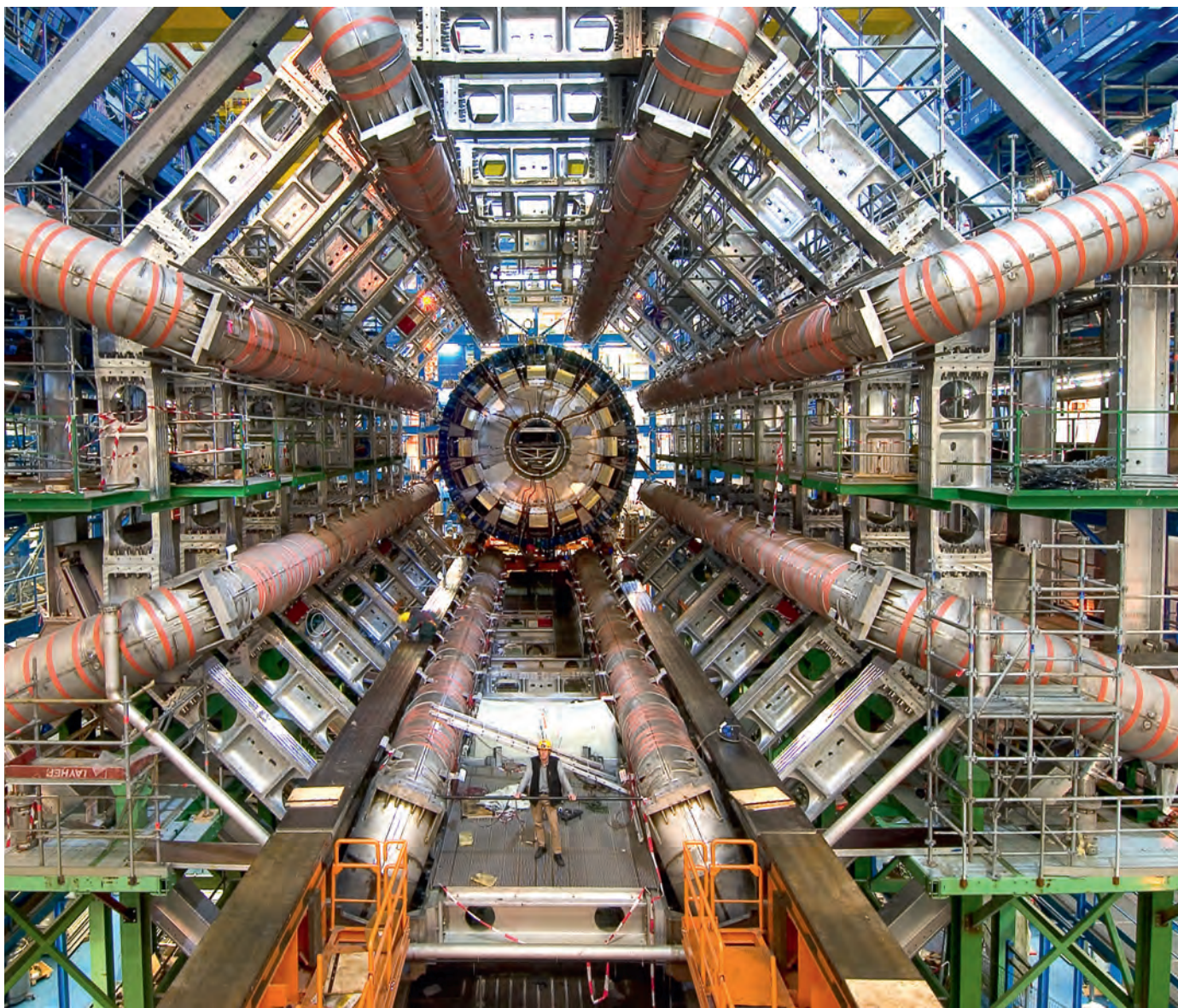
Narzędzie jest ważne, lecz zawsze ważniejsze jest tworzone za jego pomocą dzieło. W przypadku eksperymentów z fizyki wysokich energii chodzi, oczywiście, o nową wiedzę o naturze rzeczywistości na jej najbardziej podstawowym poziomie. W latach 70. ubiegłego wieku powstał wspomniany już Model Standardowy, złożona struktura teoretyczna skonstruowana w celu spójnego opisanie znanych cząstek elementarnych materii (kwarków, a także elektronów, mionów, taonów i związanych z tą trójką neutrin) oraz sił elektromagnetycznych (fotonów) i jądrowych (gluonów w przypadku oddziaływań silnych, bozonów W i Z w przypadku oddziaływań słabych). Dopełnieniem listy cząstek elementarnych



▲ Fot. Schematyczny widok wewnętrznego detektora ATLAS (źródło: CERN)



▲ Fot. Instalacja dwóch kriostatów przyłączyowych HL-LHC (źródło: CERN)



▲ Fot. Detektor eksperymentu ATLAS w CERN (źródło: CERN)



▲ Fot. Zespół z IFJ PAN w tunelu LHC w CERN, od lewej dr Maciej Trzebiński, dr inż. Bartosz Dziedzic, dr inż. Elżbieta Banaś oraz Giulio Avoni z INFN Bologna

Modelu Standardowego był właśnie bozon Higgsa. Okazał się on jednak cząstką tak trudną do wyprodukowania i obserwacji, że mimo upływu kilkunastu lat od odkrycia jego właściwości wciąż nie zostały poznane z zadowalającą dokładnością.

W badaniach nad bozonami Higgsa nasi fizycy wyraźnie zaznaczyli swoją obecność. Wraz z naukowcami z RWTH Aachen University w Aachen oraz Max-Planck-Institut für Physik z Garching zaproponowali na przykład uwzględnienie pewnych poprawek przy wyznaczaniu przekroju czynnego na produkcję bozonów Higgsa w oddziaływaniach gluon-gluon. Przekrój czynny mówi, jak często w zderzeniach ustalonego typu można spodziewać się pojawienia danej cząstki; oddziaływania gluonów wybrano zaś dlatego, że to właśnie

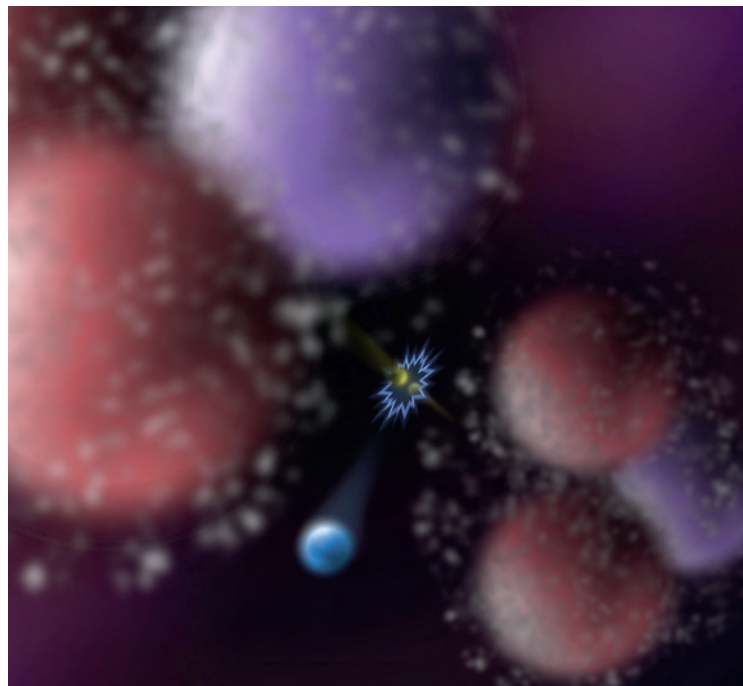
one odpowiadają za powstanie około 90% bozonów Higgsa, których ślady obecności zauważono w detektorach eksperymentu ATLAS. Standardowo pomijane z uwagi na trudności obliczeniowe, poprawki okazały się wносить niemal jedną piątą do wartości poszukiwanego przekroju czynnego. Nowością było tu także uwzględnienie wpływu mas kwarków pięknych. Tylko skąd nagle kwarki piękne, skoro w akceleratorze LHC dochodzi do zderzeń protonów, cząstek zbudowanych z dwóch kwarków górnych i jednego dolnego? Chwilowa obecność we wnętrzach protonów kwarków o większych masach, takich jak kwark piękny, jest dobrze znaną konsekwencją kwantowego charakteru oddziaływań silnych, wiążących kwarki w protonie. Ostatecznie wartości przekroju czynnego na produkcję bozonu Higgsa w zderzeniach gluonów okazały się być praktycznie

identyczne ze zmierzonymi w eksperymentach. Zgodność ta pozwoliła stwierdzić, że w badanym mechanizmie narodzin bozonów Higgsa nie widać zwiastunów poszukiwanej od dawna „nowej fizyki”.

Przekonanie o istnieniu jakiejś nowej fizyki wynika z faktu, że za pomocą Modelu Standardowego nie można udzielić odpowiedzi na szereg fundamentalnie ważnych pytań. Dlaczego cząstki elementarne mają takie a nie inne masy? Dlaczego tworzą rodziny? Z czego składa się ciemna materia, której ślady obecności tak wyraźnie widać w kosmosie? Z czego wynika przewaga materii nad antymaterią we Wszechświecie? Model Standardowy wymaga rozszerzenia także dlatego, że w ogóle nie uwzględnia tak powszechnego oddziaływania jak grawitacja. Wobec ogromu niewiadomych, uporczywy brak jakichkolwiek śladów nowej fizyki w danych z akceleratora LHC staje się równie intrygujący i irytujący, co inspirujący.

Jedna z propozycji poszukiwań nowej fizyki, niedawno przeanalizowana w naszym Instytucie, miała związek z mechanizmem powstawania par bozonów Higgsa. Zgodnie z przewidywaniem Modelu Standardowego jest to proces tak rzadki, że na razie nie powinien być rejestrowany. Zjawiska wykraczające poza znaną fizykę mogłyby jednak zwiększać prawdopodobieństwo kreacji par bozonów Higgsa do wartości umożliwiającej ich obserwację w dotychczasowych danych. Badania nad takimi przypadkami prowadzi się z myślą o ich weryfikacji nie tylko w obecnych urządzeniach, ale także

w powstających lub nawet dopiero projektowanych akceleratorach przyszłości. W Instytucie od wielu lat prowadzimy również poszukiwania dodatkowych bozonów Higgsa, zwłaszcza cięższych lub naładowanych elektrycznie. Istnienie takich cząstek jest przewidywane w ramach wielu modeli „nowej fizyki”, a ich obserwacja byłaby bezsprzecznym dowodem na zjawiska wykraczające poza Model Standardowy. Niezależnie od przyjętego podejścia i jego poziomu abstrakcji, każda kolejna analiza sprawia, że coraz lepiej rozumiemy własności bozonów Higgsa – wciąż najbardziej tajemniczych cząstek Modelu Standardowego.

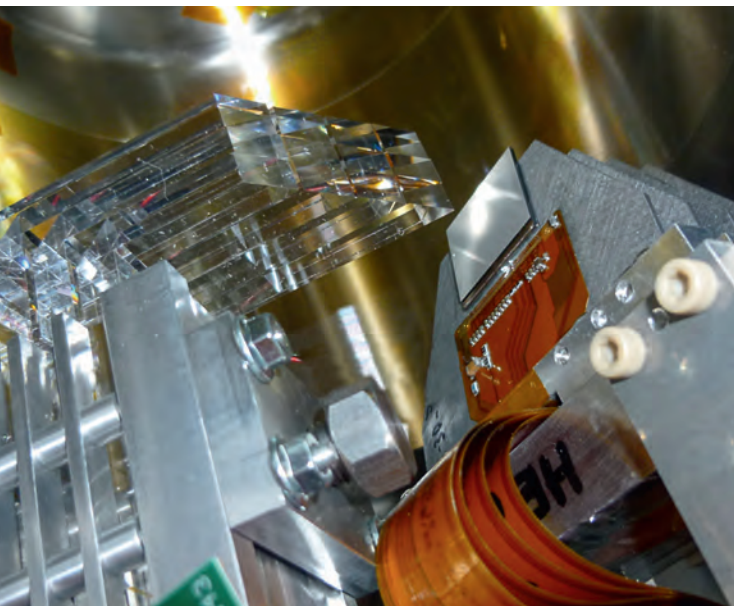


▲ Fot. Artystyczna wizja procesu narodzin bozonów Higgsa

Ale eksperyment ATLAS to nie tylko bozony Higgsa. Wyjątkowo precyzyjne i kompletne pomiary z użyciem detektora AFP (ATLAS Forward Proton), zbudowanego przy istotnym udziale naszych pracowników, umożliwiły obserwację spektakularnych procesów zamiany dwóch fotonów w materię i antymaterię. To nietrywialna sytuacja, ponieważ fotony na ogół się nie zderzają: gdy jedną świecącą latarkę skierujemy ku włączonej drugiej, próżno oczekiwać niecodziennych fajerwerków. Lecz sytuacja wygląda inaczej przy niektórych subtelnych zderzeniach z udziałem wysokoenergetycznych protonów. Jako cząstka naładowana, rozpędzony proton jest otoczony polem elektrycznym. Ponieważ nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych są fotony, proton można traktować jako obiekt otoczony fotonami. Gdy

więc protony się zderzają, może również dojść do kolizji między fotonami, co z kolei prowadzi do kreacji materii i antymaterii. *W najczęściej obserwowanych przypadkach kreacji pojedynczy foton przekształca się w cząstkę i antycząstkę. Zjawisko badane przez nas ma odmienną naturę: para cząstka-antycząstka powstaje tu wskutek oddziaływania między dwoma fotonami. Po raz pierwszy o możliwości występowania takich procesów donoszono już w 1934 roku – tłumaczy prof. dr hab. Janusz Chwastowski, kierownik zespołu fizyków IFJ PAN zaangażowanego w prace nad detektorami AFP.*

Gdy w trakcie interakcji protonów w detektorze ATLAS dochodzi do zderzenia dwóch fotonów, rezultatem może być para elektron i pozyton (czyli dodatnio naładowany elektron) albo mion i antymion (mion jest ok. 200 razy bardziej masywnym odpowiednikiem elektronu). Cząstki te rozbiegają się pod dużymi kątami w stosunku do wiązek protonów i są rejestrowane wewnątrz głównego detektora ATLAS. Zjawiska takie były już obserwowane. Lecz protony odpowiedzialne za wytworzenie fotonów, które się zderzyły, praktycznie nie zmieniają kierunku swojego ruchu. Wylatują więc z detektora i wraz z innymi protonami wiązki są odchylane przez magnesy, by podążać wewnątrz zakrzywionej rury próżniowej akceleratora. Jednak proton, który wyemitował foton, niesie nieco mniejszą energię niż pozostałe protony wiązki. Pole magnetyczne odchyła go inaczej, a to oznacza, że stopniowo będzie się od wiązki odsuwał. Właśnie takie protony



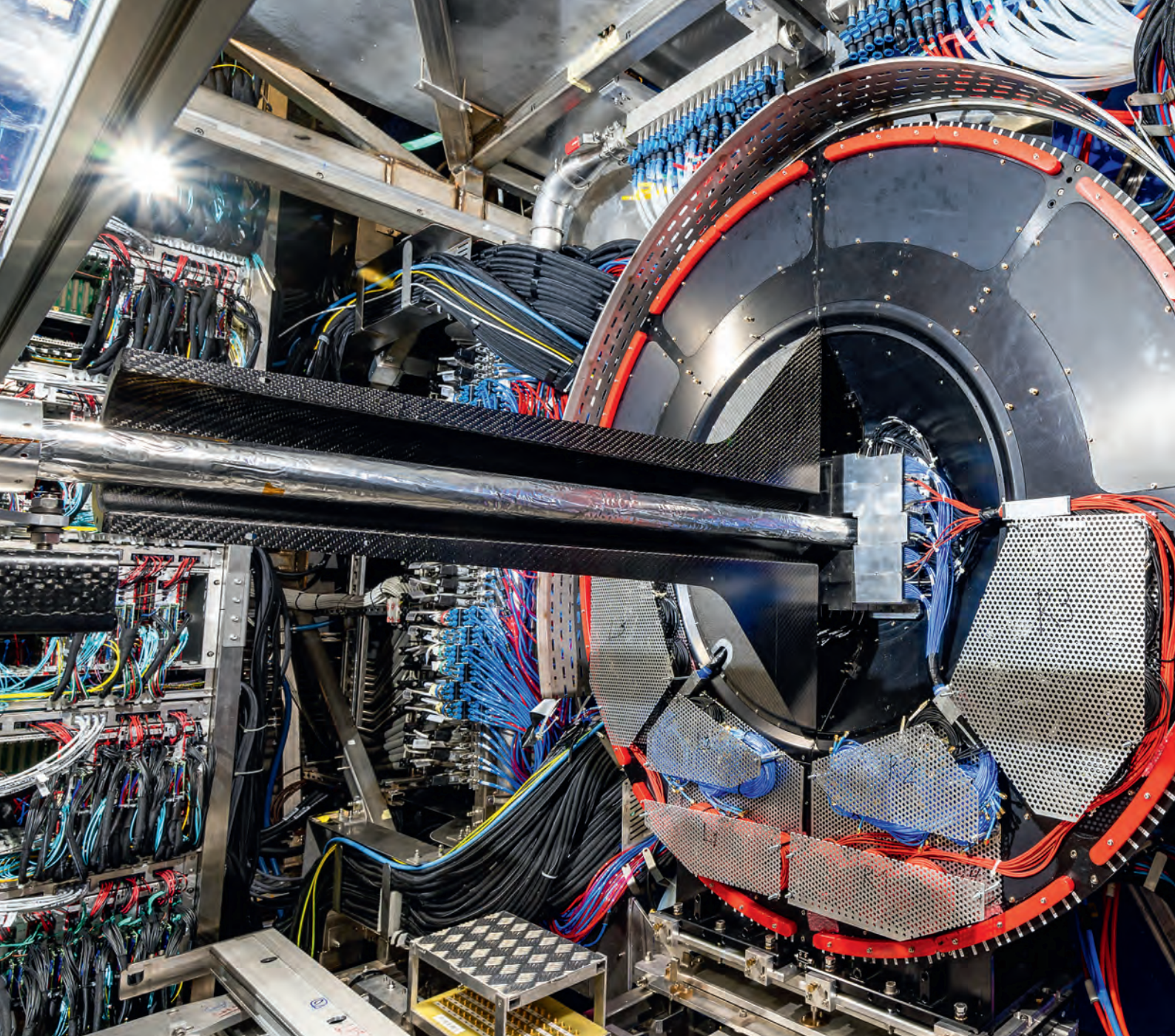
◀ Fot. Detektor AFP podczas instalacji w tunelu LHC

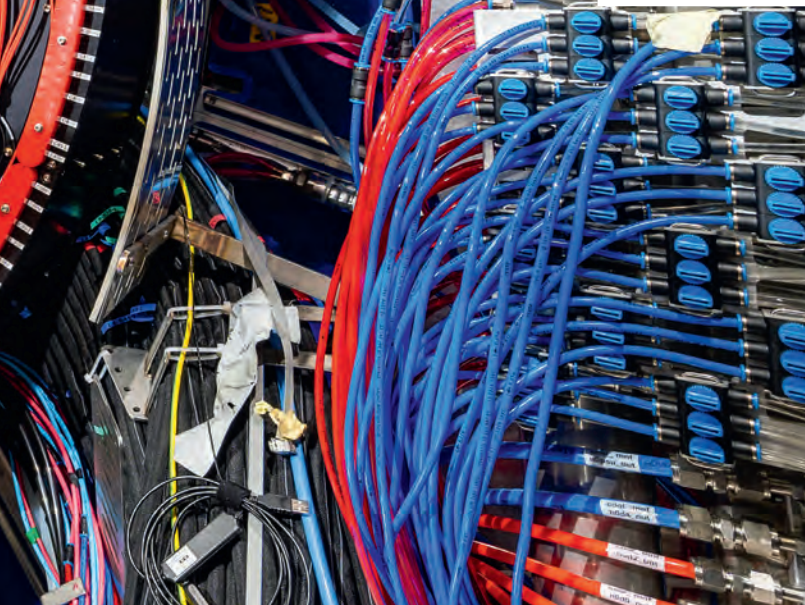
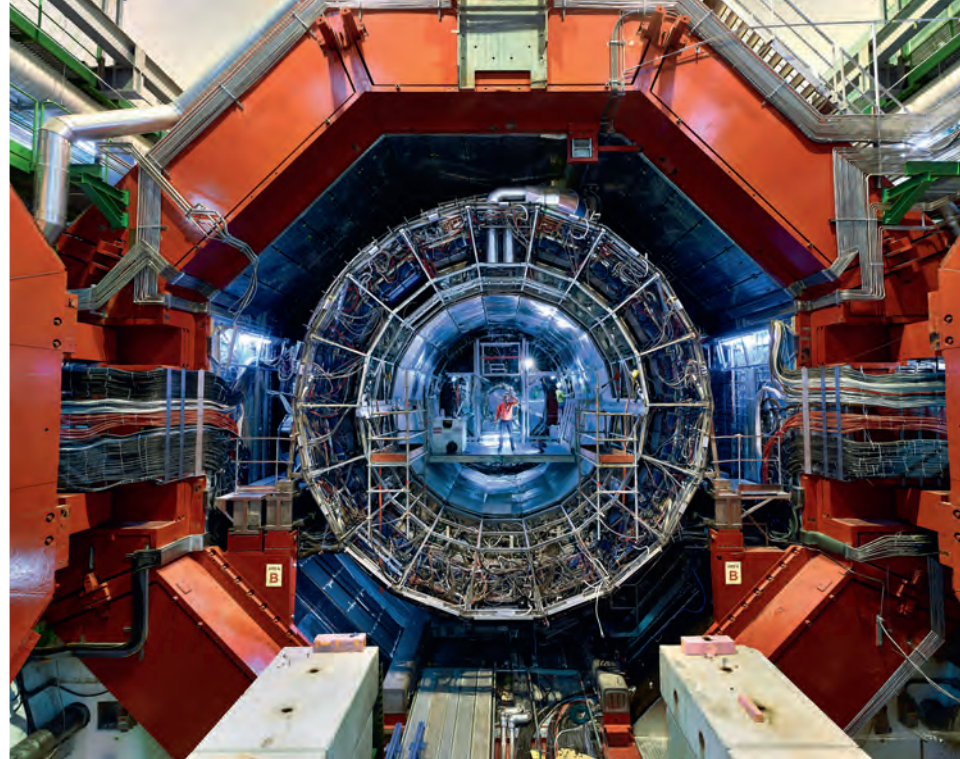
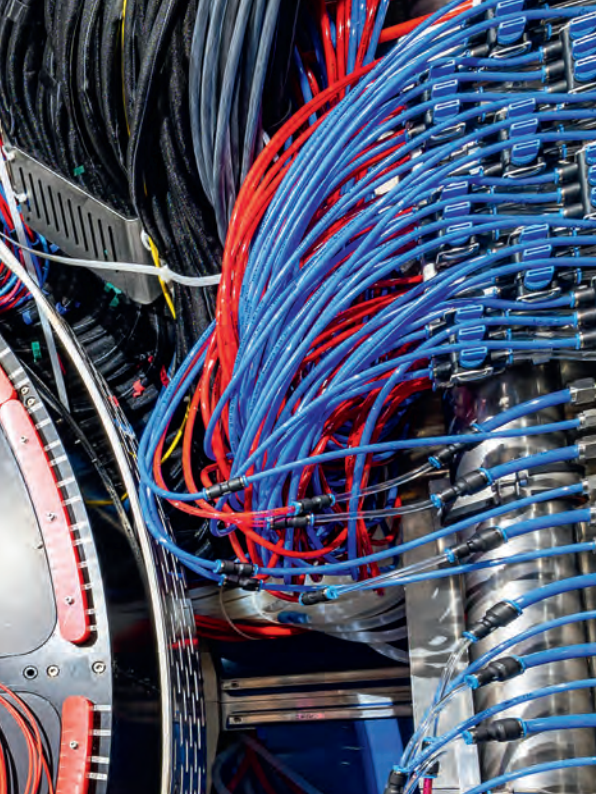
ze znakomitą dokładnością statystyczną (9 sigma!) zarejestrowano za pomocą czujników AFP umieszczonych w odległości ponad 200 m od punktu zderzenia. W połączeniu z cząstkami wykrytymi wewnątrz detektora ATLAS, obserwacje te pozwoliły potwierdzić kreację materii i antymaterii w zderzeniach dwóch fotonów.

W stosunku do kolizji protonów czy fotonów, złożoność zderzeń jąder atomowych jest istotnie większa. Jednocześnie wszystko dzieje się tak ekstremalnie szybko i w skalach tak małych (liczonych w zaledwie setkach femtometrów; $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), że bezpośrednia obserwacja tych procesów nie jest możliwa. Otoczone enigmą są zwłaszcza zjawiska zachodzące we wczesnych etapach zderzeń ciężkich jonów, kiedy to może dojść do formowania się plazmy kwarkowo-gluonowej. Jest to stan materii, w którym kwarki i gluony zachowują się jak cząstki swobodne (w otaczającym nas świecie kwarki i gluony zawsze są związane oddziaływaniem silnym i pozostają we wnętrzach hadronów – czyli takich zlepeków jak protony, neutrony bądź mezony). Plazma kwarkowo-gluonowa istnieje tylko przez trudną do wyobrażenia chwilę, ponieważ gwałtownie się rozszerza i stygnie, tworząc cząstki wtórne, rejestrowane później w detektorach. O tym, czy doszło do powstania plazmy kwarkowo-gluonowej, można wnioskować analizując tak zwane korelacje przód-tył między cząstkami wyprodukowanymi w zderzeniach. *Korelacje te mierzą zależności między liczbą cząstek wyprodukowanych do przodu i do tyłu podczas zderzenia przeciwbieżnych wiązek ciężkich jonów. Co prawda zależności te dotyczą cząstek bardzo oddalonych od siebie,*

jednak niosą informacje o wczesnym etapie zderzenia. Dzieje się tak, ponieważ korelacja między cząstkami wyemitowanymi do przodu i do tyłu mogła powstać tylko zanim cząstki te się od siebie oddaliły, czyli na początku zderzenia – mówi dr Iwona Sputowska.

Relacja między liczbą cząstek wyprodukowanych do przodu i do tyłu jest wrażliwa na fluktuacje sposobu, w jaki dwa jądra atomowe zderzyły się ze sobą, na przykład czy zderzyły się czołowo, czy tylko się musnęły. Fizycy radzą sobie z tym problemem, wprowadzając zmienne nazywane silnie intensywnymi, tak zdefiniowane, aby nie zależały ani od tego, w jaki sposób dwa jony zderzyły się ze sobą, ani od tego, jak bardzo sposób zderzenia fluktuował w badanej grupie przypadków. Jednak analiza danych ze zderzeń jąder ołowiu z ołowiem i ksenonu z ksenonem w ramach eksperymentu ALICE pozwoliła stwierdzić, że najpopularniejsze modele używane do opisu zjawiska nie odtwarzają poprawnie zachowania pewnej zmiennej silnie intensywnej, oznaczanej literą sigma. Była to sugestia, że przyjęte w tych modelach założenia na temat mechanizmów produkcji cząstek mogą być błędne. W tym momencie pomocne okazały się modele zderzeń zaproponowane niemal pół wieku temu przez krakowskich teoretyków. Potraktowali oni zderzenia ciężkich jąder atomowych jako wielokrotne kolizje pojedynczych nukleonów (protonów, neutronów) jednego jądra z pojedynczymi nukleonami drugiego jądra (w modelu zranionych nukleonów) bądź jako kolizje indywidualnych kwarków (w modelu zranionych kwarków). W modelach tych zakłada się, że





◀ ▲ Fot. Eksperyment ALICE na akceleratorze LHC w CERN
(źródło: CERN)

za produkcję cząstek wtórnych odpowiadają pojedyncze, niezależne źródła, którymi są odpowiednio albo nukleony, albo kwarki. Gdy dopuszczono tu możliwość, że średnie źródło może emitować cząstki w przód z nieco innym prawdopodobieństwem niż w tył, po raz pierwszy dla maksymalnych energii zderzeń w LHC udało się wyznaczyć funkcję fragmentacji, wiążącą liczbę cząstek produkowanych przez nukleony w modelu z liczbą cząstek mierzonych w detektorach.

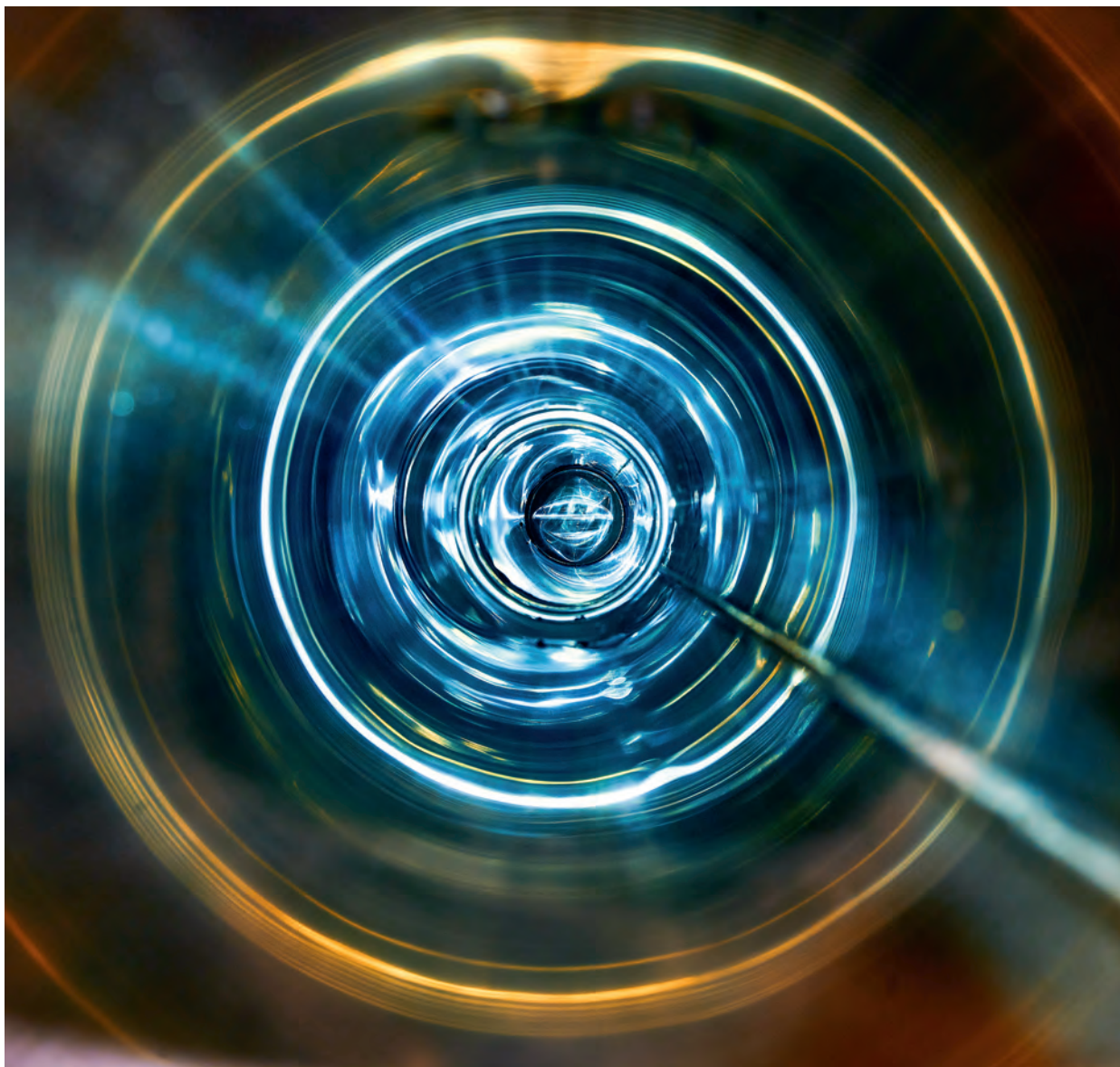
Podkreślenia w tym miejscu wymaga fakt, że wkład naszych naukowców w działanie kolaboracji ALICE nie ogranicza się do udziału w zbieraniu danych, ich analizie

i interpretacji. Odgrywali oni kluczową rolę m.in. w komputerowym modelowaniu komory projekcji czasowej (służącej do trójwymiarowej rekonstrukcji torów cząstek) przed jej zbudowaniem, a następnie w jej kalibracji przy użyciu radioaktywnego kryptonu. Uczestniczyli też w budowie i późniejszej kalibracji kalorymetru elektromagnetycznego, służącego do detekcji fotonów, elektronów i mezonów neutralnych. We współpracy z fizykami z AGH zbudowano również szybki tryger FIT (Fast Interaction Trigger) – jeden z kluczowych elementów detekcyjnych eksperymentu, do dziś nadzorowany i modernizowany przez krakowskich naukowców. IFJ PAN odgrywa także wiodącą rolę przy konstruowaniu kalorymetru FoCAL (Forward Calorimeter), detektora zdolnego rejestrować wysokoenergetyczne fotony, elektrony i hadrony, powstającego z myślą o kolejnych iteracjach eksperymentu ALICE. Nie miały wkład wniesiono również w rozwój oprogramowania używanego przez naukowców kolaboracji.

ATLAS i ALICE są zaliczane do grona najśłynniejszych i największych eksperymentów realizowanych na wiązkach Wielkiego Zderzacza Hadronów. Spektakularnych wyników potrafią jednak dostarczyć także przedsięwzięcia mniejszej skali. Znakomitym przykładem jest projekt NA61/SHINE, którego istotną część stanowią fizycy z Polski. Zespół pracuje z wiązkami dostarczonymi przez akcelerator SPS (Super Proton Synchrotron), obecnie funkcjonujący m.in. jako ostatni etap kaskady synchrotronów wstępnie rozpędzających protony i jądra atomowe dla LHC. Nasi specjaliści zajmują się tu całością systemu

gazowego komór projekcji czasowej, kalibracją procesu identyfikacji cząstek, koordynują też prace nad całością oprogramowania. Prowadzą również badania występujących w zderzeniach efektów elektromagnetycznych, produkcji mezonów z tzw. ukrytą dziwnością oraz uczestniczą w poszukiwaniach punktu krytycznego silnie oddziałującej materii. Wysiłek włożony w projekt NA61/SHINE przynosi wymierne efekty. Pomiary podczas zderzeń wiązek jąder argonu i skandu doprowadziły niedawno do zaskakującego odkrycia: niespodziewanie dużego łamania jednej z istotnych symetrii świata kwantów.

Z równań chromodynamiki kwantowej – teorii opisującej oddziaływanie silne odpowiedzialne za sklejanie się kwarków w mniej lub bardziej trwałe cząstki – wynika, że gdyby kwarki wszystkich typów (zapachów) miały te same masy, oddziaływanie silne nie preferowałoby żadnego z nich. W rzeczywistości masy kwarków poszczególnych rodzajów znacząco się różnią i symetria ta pozostaje złamana. Istnieje jednak pewien wyjątek: masy kwarków dwóch najbliższych zapachów (dolnego i górnego) są zbliżone. Oddziaływania silne traktują więc kwarki dolne i górne wystarczająco podobnie, by można mówić o istnieniu przybliżonej symetrii zapachowej. Ma ona niebagatelne znaczenie praktyczne. Dzięki niej wiadomo na przykład, że jeśli zderzenie o dużej energii, zachodzące z udziałem kwarków dolnych, produkuje z pewnym prawdopodobieństwem jakieś cząstki wtórne, to z niemal tym samym prawdopodobieństwem inne, odpowiadające im cząstki wtórne powstałyby w zderzeniu, w którym byłyby obecne kwarki górne (i *vice versa*).

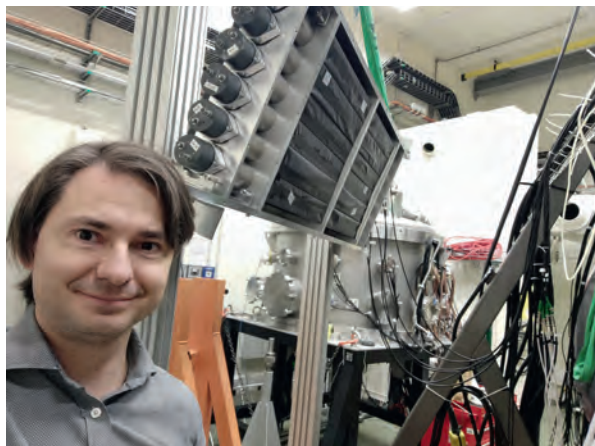


▲ Fot. Wnętrze detektora PSD (Projectile Spectator Detector) używanego w eksperymencie NA61/SHINE w CERN (źródło: CERN)

Zespół eksperymentu NA61/SHINE analizował mezony K (kaony), produkowane w różnych odmianach podczas wysokoenergetycznych zderzeń jąder atomowych argonu i skandu. Pierwotnie grupa planowała pomiary wyłącznie kaonów elektrycznie naładowanych. Wiadomo było, że w zderzeniach powstają także krótkożyjące kaony neutralne, bez ładunku elektrycznego, jednak ich mierzenie nie wydawało się warte zachodu. Z symetrii zapachowej wynikało przecież, że po dodaniu liczb kaonów ujemnych i kaonów dodatnich wynik powinien z dobrym przybliżeniem odpowiadać liczbie kaonów neutralnych. Ostatecznie pomiary kaonów neutralnych przeprowadzono, a ich rezultaty okazały się statystycznie znacząco odbiegać od dotychczasowych przewidywań teoretycznych. *Zwykle przyjmuje się, że rozbieżności w danych eksperymentalnych, wynikające z przybliżonego charakteru symetrii zapachowej, nie przekraczają 3 % w tym zakresie energii. My natomiast donosimy o nadprodukcji kaonów naładowanych sięgającej aż 18 %!* – zauważa prof. dr hab. Andrzej Rybicki. Intrygujący jest fakt, że jądra skandu i argonu przed zderzeniami zawierały nieco więcej kwarków dolnych, tymczasem po zderzeniu to kwarków górnych było więcej. Czy za zaobserwowane zjawisko odpowiadają niedociągnięcia obecnych modeli teoretycznych używanych do opisu zderzeń jądrowych? A może widać tu pierwsze przejawy wspomnianej, długo poszukiwanej „nowej fizyki”? O tym rozstrzygną kolejne badania grupy NA61/SHINE, w tym eksperymenty zaplanowane do przeprowadzenia po przerwie modernizacyjnej akceleratora LHC.

Materia (prawie) bez tajemnic

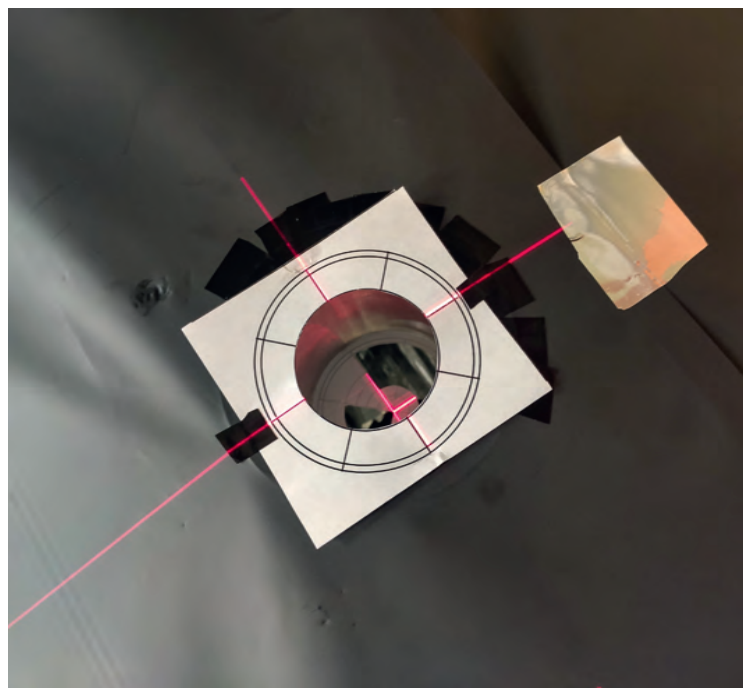
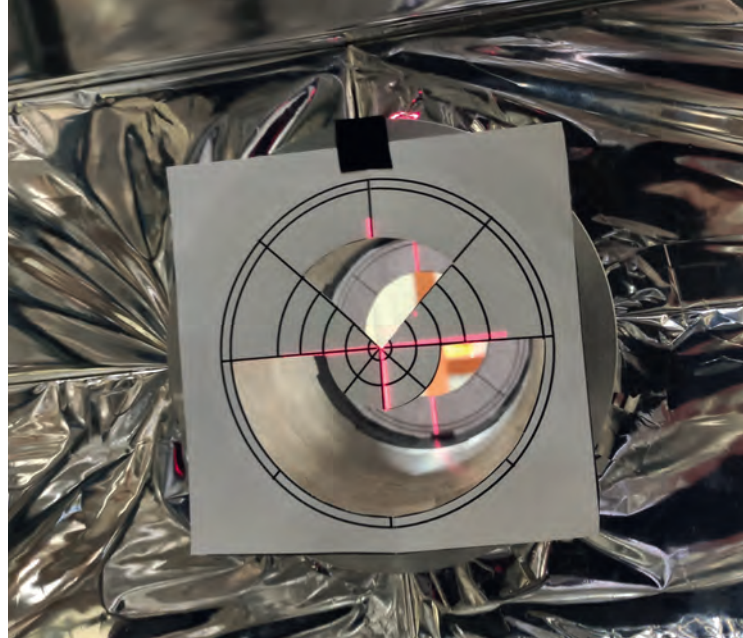
Należące do naszego Instytutu Centrum Cyklotronowe Bronowice (CCB), wybudowane nakładem ponad 260 milionów złotych, dysponuje cyklotronem C-230 zdolnym rozpędzać protony do energii 230 megaelektronowoltów (MeV). Jedną z czterech działających tu linii eksperymentalnych powstała z myślą o badaniach materii trudnych do zrealizowania w innych ośrodkach fizycznych. *To konsekwencja specyficznych cech tego urządzenia. Na świecie niemal wszystkie akceleratory dostępne dla fizyków nadają protonom energie albo wyraźnie mniejsze, albo wyraźnie większe niż nasz* – wyjaśnia prof. dr hab. Adam Maj, podkreślając jednocześnie, że w świecie fizyki centrum w Bronowicach jest zaliczane do bardzo wąskiego grona dużych ośrodków akceleratorowych, wśród których wyróżnia się zdolnością do szybkiej zmiany energii protonów.



▲ Fot. Układ detekcyjny BINA (Big Instrument for Nuclear Polarization Analysis), dr Wiktor Parol

Na ciekawe rezultaty naukowe nie trzeba było długo czekać. Wzbudzone zderzeniem z protonem o odpowiednio dobranej energii, jądro ciężkiego pierwiastka może się rozpaść na cząstki wtórne lub przejść do niższego stanu energetycznego, co jest połączone z emisją kwantu promieniowania gamma. Oba przypadki zasadniczo się różnią: energie cząstek wtórnych mogą być praktycznie dowolne, podczas gdy energie kwantów gamma muszą odpowiadać różnicom między konkretnymi stanami energetycznymi jądra. Powyższe oznacza, że to właśnie kwanty gamma niosą najcenniejszą informację o budowie jądra atomowego, między innymi o jego oscylacjach. Pobudzone protonami, jądra atomowe mogą bowiem wpadać w różne drgania, w tym nazywane gigantycznymi rezonansami (przymiotnik podkreśla, że obejmują one całe jądro atomowe). Gigantyczne rezonanse występują w dwóch podstawowych odmianach. W przypadku gigantycznego rezonansu dipolowego protony i neutrony w jądrze oscylują względem siebie. Jako całość powierzchnia jądra nie zmienia wtedy kształtu, jedynie wpada w vibracje. Dla odmiany rezonans kwadrupolowy przejawia się pod postacią deformacji całej powierzchni jądra, które zaczyna naprzemiennie się spłaszczać i wydłużać wzdłuż pewnego kierunku.

W badaniach zrealizowanych w CCB przyglądano się jądrom ołowiu ^{208}Pb ostrzeliwanym protonami. Dzięki stanowisku pomiarowemu z wyrafinowaną komorą rozproszeń i licznymi systemami detekcyjnymi, w tym z układem do pomiaru wysokoenergetycznego

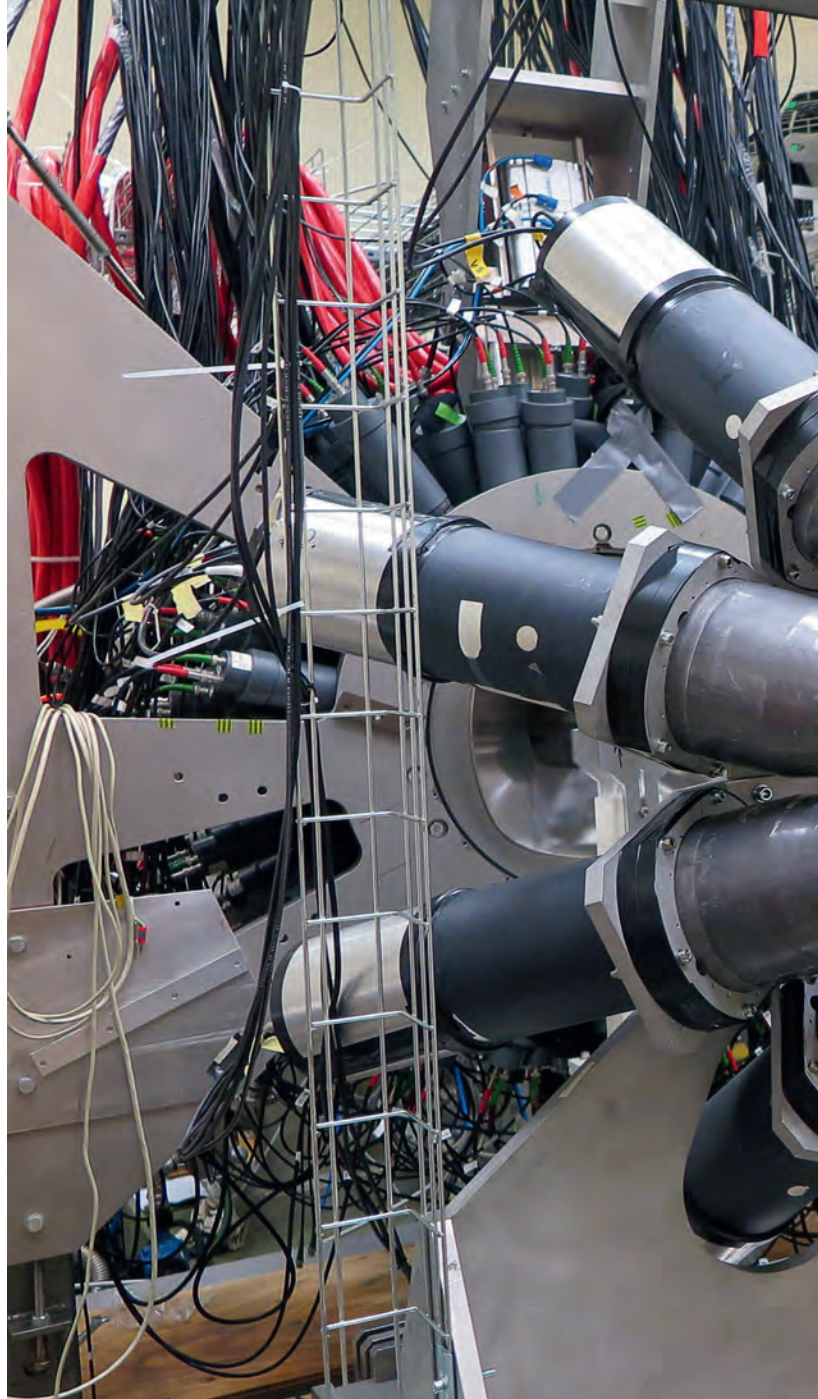


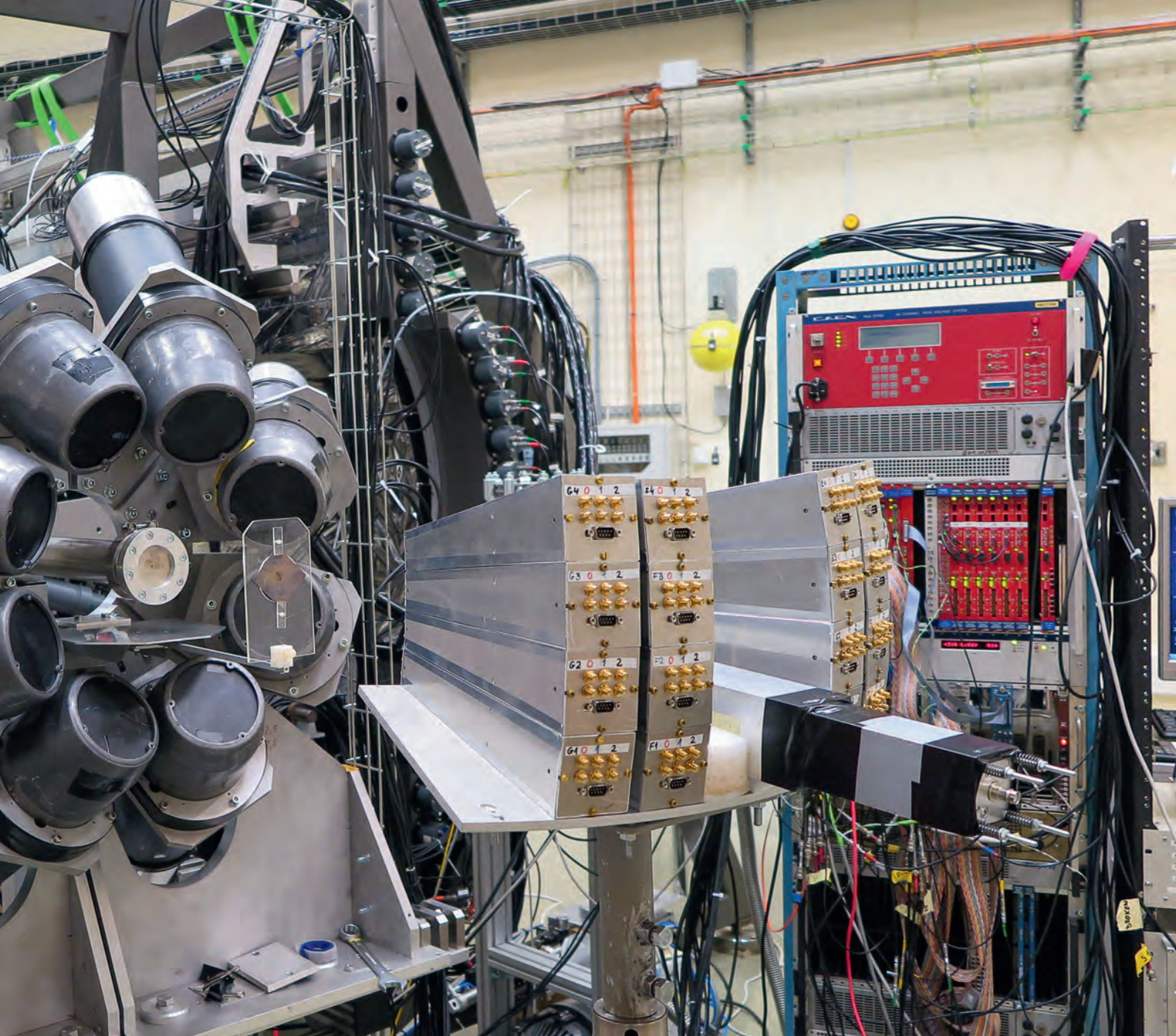
▲ Fot. Pozycjonowanie detektora w CCB IFJ PAN

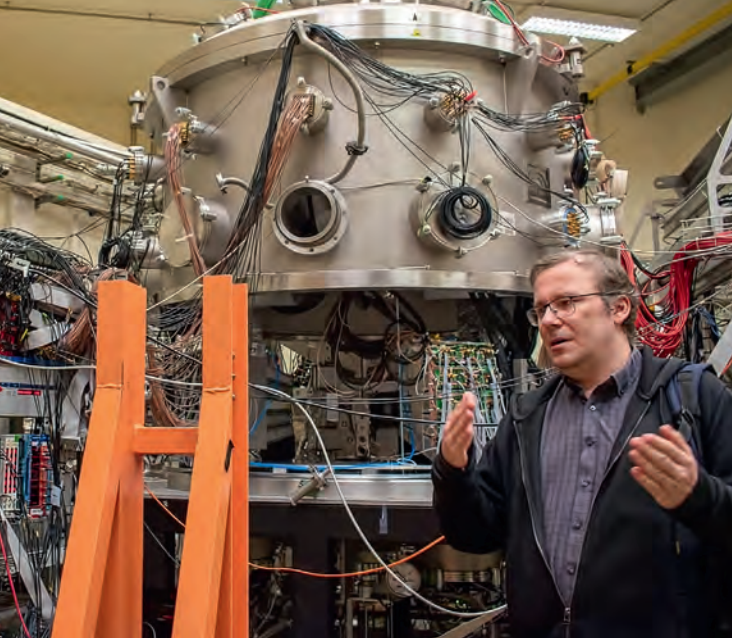
promieniowania gamma HECTOR (High Energy γ -ray deTeCTOR) oraz ze zbudowanym w Krakowie matrycowym detektorem rozproszonych protonów KRATTA (KRAków Triple Telescope Array), udało się zarejestrować rozpady z emisją kwantów gamma pochodzące z rezonansów w jądrach „zimnych”, czyli wzbudzonych na stanach podstawowych. Co jednak szczególnie istotne, zauważono w ten sposób drgania jąder jako całości, będące efektem gigantycznego rezonansu kwadrupolowego. Zgodnie z przewidywaniami, powierzchnia jądra ołowiu ^{208}Pb po zderzeniu z protonem okazała się oscylacyjnie deformować, podobnie jak elastyczna piłeczka odbita od podłoża czy ściany. W chwili publikacji artykułu z wynikami pomiarów jedyna wcześniejsza – ale niezwerifikowana! – obserwacja analogicznych oscylacji jądrowych liczyła ponad trzydzieści lat.

Aczkolwiek wymagająca od strony technicznej i teoretycznej, obserwacja drgań związanych z deformacjami kształtu jąder ołowiu ^{208}Pb została zrealizowana jako swoista rozgrzewka, wstęp do długiego ciągu bardziej wyrafinowanych eksperymentów dotyczących podobnych zjawisk w innych jądrach atomowych. Badacze z ośrodka cyklotronowego w Bronowicach prowadzą już kolejne pomiary z użyciem ulepszonej aparatury, rozbudowanej o zespół detektorów scyntylacyjnych nowej generacji PARIS. Układ ten powstał (i ciągle jest rozwijany) w ramach międzynarodowego projektu zainicjowanego i koordynowanego przez naszych naukowców.

► Fot. Układy detekcyjne HECTOR i KRATTA w CCB IFJ PAN







▲ Fot. Próżniowa komora rozprożeń na stanowisku do badań z fizyki jądrowej w CCB IFJ PAN, dr inż. Michał Ciemała

Szczególne zainteresowanie budzą obecnie rezonanse znane jako pigmejskie oraz drgania jąder atomowych o kształtach niesferycznych, których zachowanie ustawnie umyka przewidywaniom teoretyków.

Uwagę świata nauki przyciągnęły także inne nasze wyniki, w tym dotyczące jąder węgla ^{13}C wzbudzanych w zderzeniach z protonami wiązki cyklotronowej do wysokich stanów energetycznych, określanym mianem rozciągniętych ze względu na posiadanie maksymalnego krętu dostępnego przy wzbudzeniu nukleonu do wyższej powłoki. Stan rozciągnięty znajduje się w kontinuum energetycznym, gdzie różne stany energetyczne jądra nakładają się na siebie. Zachowania tak specyficznie wzbudzonych jąder atomowych są wyjątkowo niewdzięczne do obserwacji, ponieważ badany stan

bardzo trudno wyselekcjonować podczas pomiarów. Mimo to wysiłki podjęte w szerokiej współpracy międzynarodowej z udziałem fizyków z Włoch, Francji, Belgii, Holandii, Niemiec i Rumunii pozwoliły ustalić sposoby rozpadu tak wzbudzonych jąder węgla. Prace rozszerzono później o pomiary rozciągniętych stanów kwantowych jąder azotu ^{14}N , węgla ^{12}C i tlenu ^{16}O .

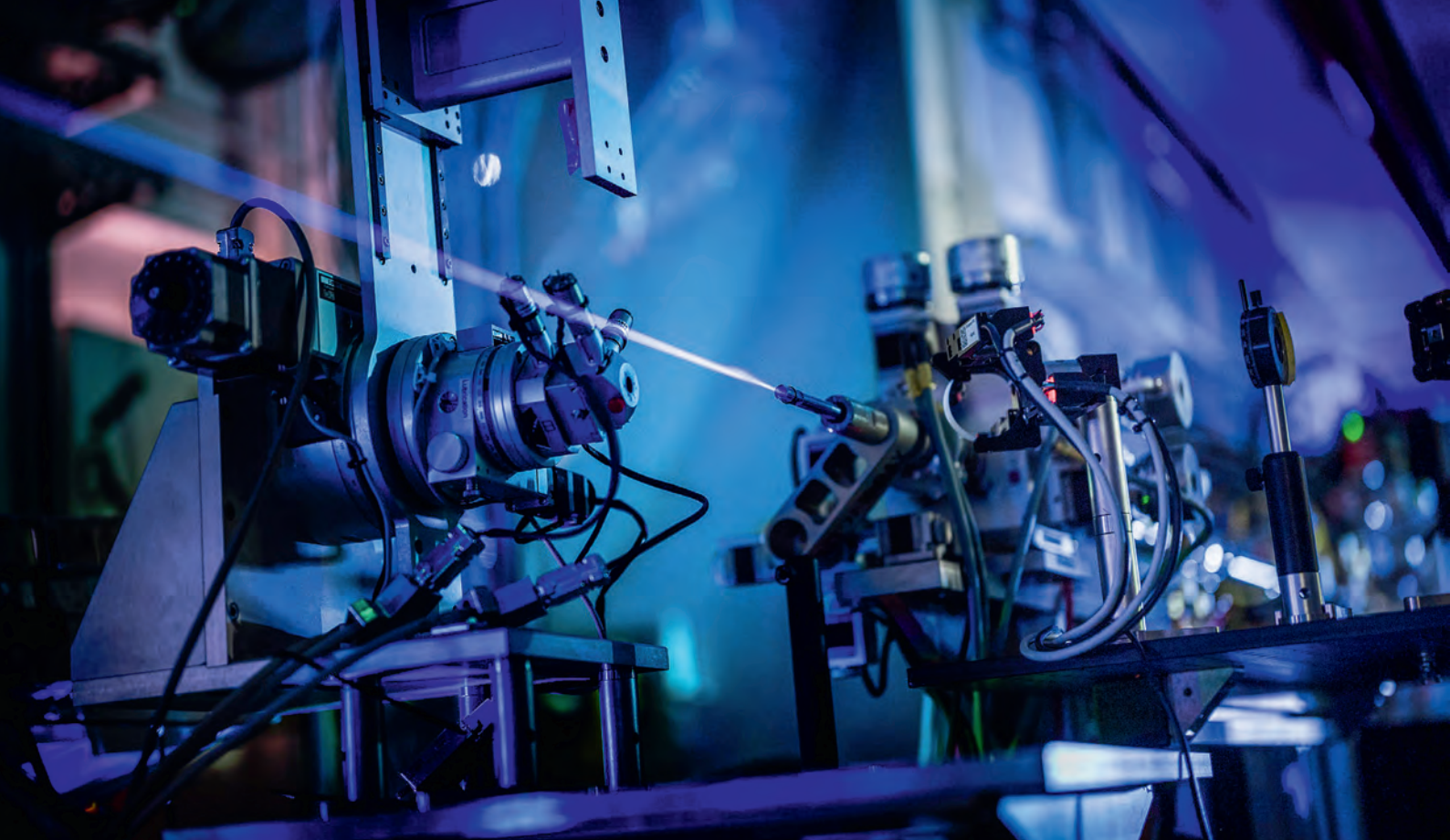
O ile ostrzał materii protonami jest źródłem cennej wiedzy o jądrach atomowych i tworzących je składnikach, w tym tych najbardziej fundamentalnych, o tyle w badaniach nad właściwościami atomów, cząsteczek i ich układów bardziej przydają się fotony, zwłaszcza w postaci potężnych impulsów promieniowania rentgenowskiego o czasach trwania liczonych w femtosekundach (czyli rzędu 10^{-15} s). Takie impulsy potrafią generować rentgenowskie lasery na swobodnych elektronach (X-Ray Free-Electron Laser, XFEL), urządzenia działające w zaledwie kilku miejscach na świecie. Czołowe miejsce wśród nich zajmuje laser European XFEL o długości niemal 3.5 km, zbudowany w ośrodku synchrotronowym DESY pod Hamburgiem jako wspólne przedsięwzięcie kilkunastu europejskich państw. Ze strony polskiej w projekcie uczestniczy także IFJ PAN. Nasi fizycy, inżynierowie i technicy odpowiadali za montaż i sprawdzanie – w tym w warunkach kriogenicznych – magnesów nadprzewodzących, wnęk rezonansowych i modułów przyspieszających, będących kluczowymi składnikami infrastruktury lasera; krakowskie korzenie ma ponadto kompletny system informatyczny do analizy danych z testów.

Ciągnący się całymi kilometrami europejski XFEL może sprawiać wrażenie tworu niewiele mającego wspólnego z codziennym życiem kogokolwiek z nas. Ale to właśnie tutaj prowadzi się badania, które w dostatecznie odległej przyszłości mogą tę codzienność w istotny sposób ukształtować. Sterowane impulsami laserowymi ultraszybkie urządzenia nanoelektroniczne nowej generacji, takie jak przełączniki magnetyczne czy dynamiczne pamięci komputerowe, nie powstaną nim nie zrozumiemy, jak w materiale zbudowanym ze starannie dobranych warstw dochodzi do błyskawicznej demagnetyzacji pod wpływem impulsu z lasera rentgenowskiego oraz jakie procesy wpływają na czasy powrotu zdemagnetyzowanych domen do stanu pierwotnego. Sukcesem może się tu pochwalić międzynarodowy zespół fizyków ze



▲ ► Fot. Moduły przyspieszające i wnęki rezonansowe testowane dla E-XFEL przez inżynierów i techników Działu Budowy Aparatury i Infrastruktury Naukowej





▲ Fot. Pierwszy obraz wiązki w ośrodku E-XFEL (źródło: E-XFEL; Jan Hosan)

szczególnie istotnym wkładem naszych pracowników, odpowiedzialny za stworzenie modelu teoretycznego XSPIN. Model ten i związane z nim oprogramowanie po raz pierwszy pozwalają kontrolować demagnetyzację wywołaną promieniowaniem rentgenowskim. *Dla konkretnego materiału wielowarstwowego możemy teraz tak dopasować parametry impulsów laserowych – ich energię, czas trwania i natężenie – aby demagnetyzacja zachodziła w określonej potrzebami skali przestrzennej i/lub czasowej* – opisuje prof. dr hab. Beata Ziaja-Motyka.

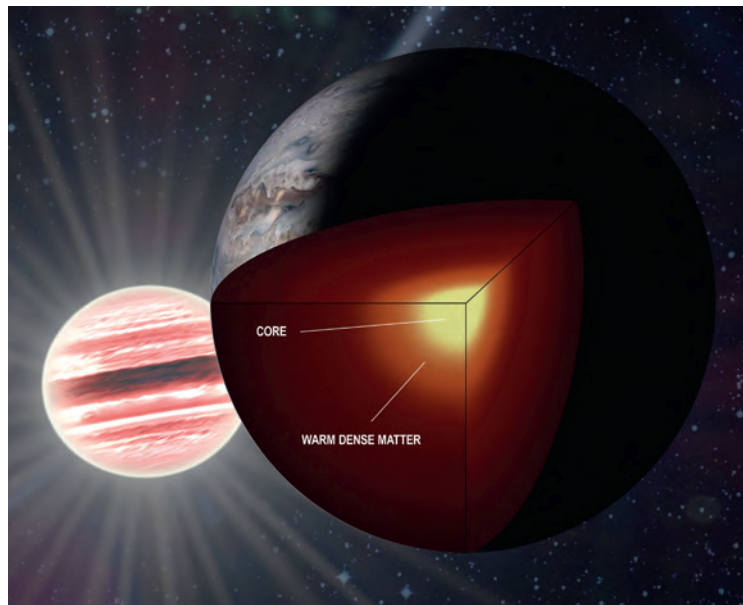
A co się stanie, gdy European XFEL oświecili próbki miedzi impulsami promieniowania rentgenowskiego o czasie trwania 15 femtosekund i różnych, stopniowo rosnących natężeniach? Odpowiedź otrzymaliśmy w ramach działań kolejnego międzynarodowego zespołu z naszym udziałem – i była ona tak ciekawa, że trafiła na łamy prestiżowego czasopisma „Nature Physics”. Otóż gdy pojedynczy rentgenowski impuls laserowy docierał do oświetlanej próbki, powodował silną jonizację materiału. Uwalniane w jej trakcie elektrony miały dość

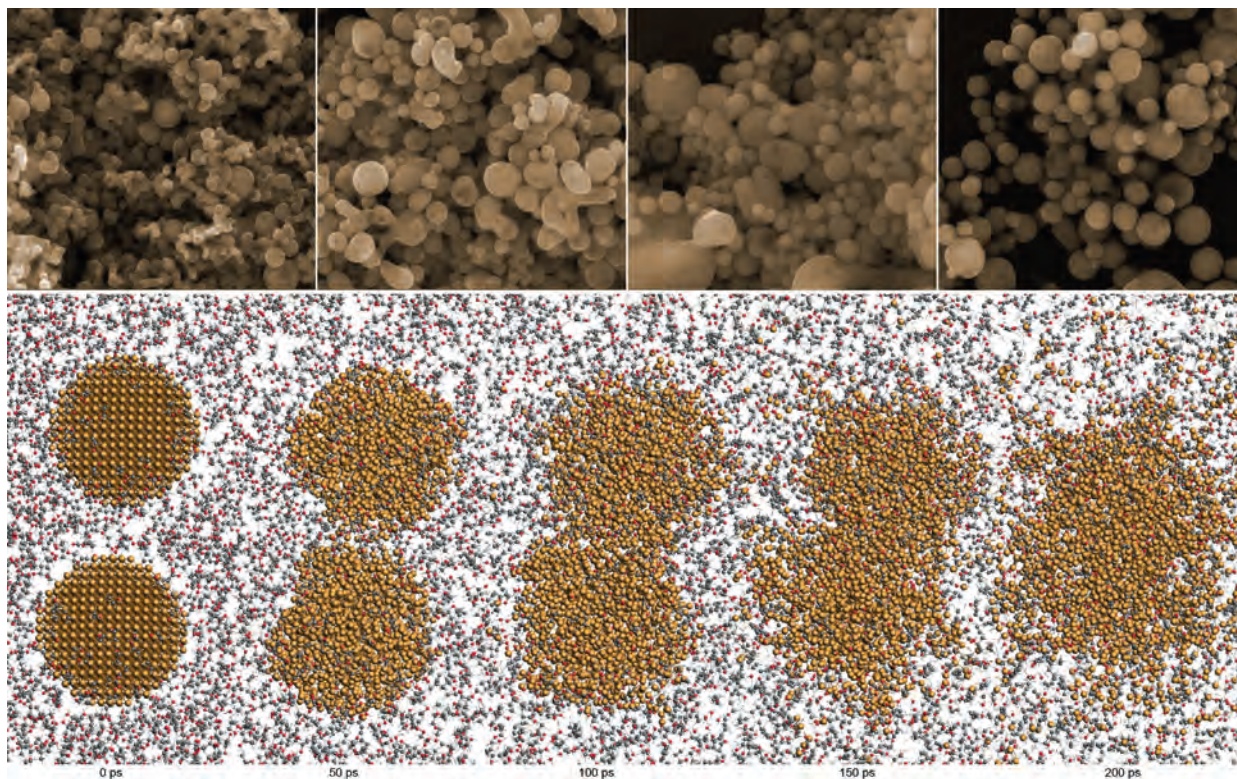
duże energie. W tak specyficznych warunkach miedź przechodziła w stan ciepłej gęstej materii, charakteryzujący się temperaturą rzędu kilku tysięcy stopni przy gęstości bliskiej gęstości ciała stałego. Materia w takiej postaci jest dość powszechna we Wszechświecie, występuje między innymi we wnętrzach małych gwiazd i planet gazowych, jednak jej wytworzenie i analizowanie w laboratorium to zadania bardzo trudne. Tym razem na podstawie ilości przechodzącego przez tę materię promieniowania można było wnioskować o zmianach jonizacji w obserwowanym układzie, co pozwoliło eksperymentalnie potwierdzić obecność ciekawego zjawiska: gdy natężenie promieniowania stawało się dostatecznie wysokie, ciepła gęsta materia stawała się dla impulsów z lasera przezroczysta. I choć omawiane badania wydają się dotyczyć głębi kosmosu, mogą się przydać również w drodze na Ziemię, ciepła gęsta materia pojawia się bowiem w trakcie ablacji metalowych osłon termicznych statków kosmicznych powracających z orbity. Kto zresztą wie, czy kiedyś nie przyda się nam na co dzień, skoro odgrywa niebagatelną rolę w niektórych rodzajach kontrolowanej fuzji jądrowej?

Lasery – tyle że już nie rentgenowskie – okazują się być przydatne przy pracach nad materiałami przeznaczonymi do bardziej konwencjonalnych źródeł energii niż fuzja. W naszym Instytucie wykorzystuje się lasery do otrzymywania w kontrolowany sposób submikronowych

cząstek kompozytów o ustalonych rozmiarach i składzie chemicznym. Gdy zawiesinę z nanocząstkami oświetla się impulsami laserowymi o odpowiednich parametrach, znajdujące się w niej drobiny stapiają się i trwale zlepiają w konglomeraty, przy okazji gwałtownie przechodząc mniej lub bardziej skomplikowane reakcje chemiczne. Jeden z ostatnio tak otrzymanych materiałów kompozytowych, termodynamicznie niestabilny tlenek miedzi Cu_2O_3 , okazał się mieć nadspodziewanie wysoką efektywność w katalizowaniu etanolu, związku uważanego za obiecujące źródło energii dla ogniw paliwowych. Odkrycie jest obiecujące choćby z uwagi na potencjalne zastosowania komercyjne: w obecnych ogniwach etanolowych krytyczną rolę podczas katalizy pełni platyna, droższa od miedzi niemal 250 razy.

► Fot. Ciepła gęsta materia występuje w środku planet-olbrzymów typu Jowisza oraz wewnątrz małych gwiazd – brązowych karłów (źródło: IFJ PAN / NASA)





▲ Fot. Kolejne fazy aglomeracji nanocząstek miedzi i jej tlenków, zachodzące w pierwszych 200 pikosekundach laserowego stapiania

Przykładów interesujących materiałów, którym przyglądają się nasi fizycy, nie brakuje. Uwagę przyciągają choćby prace nad gąbkami magnetycznymi. Są to porowate materiały molekularne o właściwościach magnetycznych zmieniających się w sposób odwracalny w zależności od ich... wilgotności (a konkretniej: w zależności od liczby uwieczonych wewnątrz próbki cząsteczek wody, alkoholu czy innego rozpuszczalnika). Poszukiwanie i charakteryzowanie gąbek magnetycznych staje się

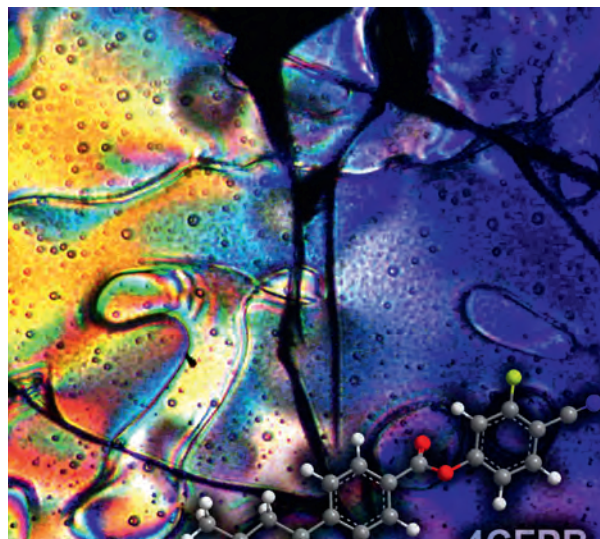
coraz istotniejsze z uwagi na ich niesztampowe właściwości. Odpowiednio zaprojektowane, substancje tego typu mogą na przykład selektywnie absorbować wodę, oleje czy inne rozpuszczalniki, później zaś łatwo je oczyścić za pomocą pola magnetycznego. Ale atrakcji potrafią dostarczyć również lepiej poznane materiały, na przykład ciekłe kryształy. Wprowadzone do wnętrza nanoporów, okazują się wywierać na nie ujemne ciśnienie – nie rozpychają ścianek wokół siebie, lecz je przyciągają.

Fakt ten był wcześniej znany, w przeciwieństwie do sposobów, jak zmierzyć wartość tego ciśnienia. Nasi fizycy rozwiązali problem, opracowując unikatową metodą pośrednią: o wartości ujemnego ciśnienia w krzemowych nanoporach z ciekłym kryształem 4CFPB wnioskowano na podstawie zmian innych parametrów fizycznych. W ten sposób po raz pierwszy udało się oszacować wartość ujemnego ciśnienia w nanoporach, które okazało się sięgać niemal -200 atmosfer – aż rząd wielkości więcej niż ujemne ciśnienie odpowiedzialne za transport wody w drzewach.

Badania nad strukturą i właściwościami materii w IFJ PAN to znakomite potwierdzenie starej prawdy o tym, że przyroda nieustannie zaskakuje człowieka – ale tylko wtedy, gdy ten potrafi ją umiejętnie obserwować i analizować.

Z promieniowaniem za pan brat

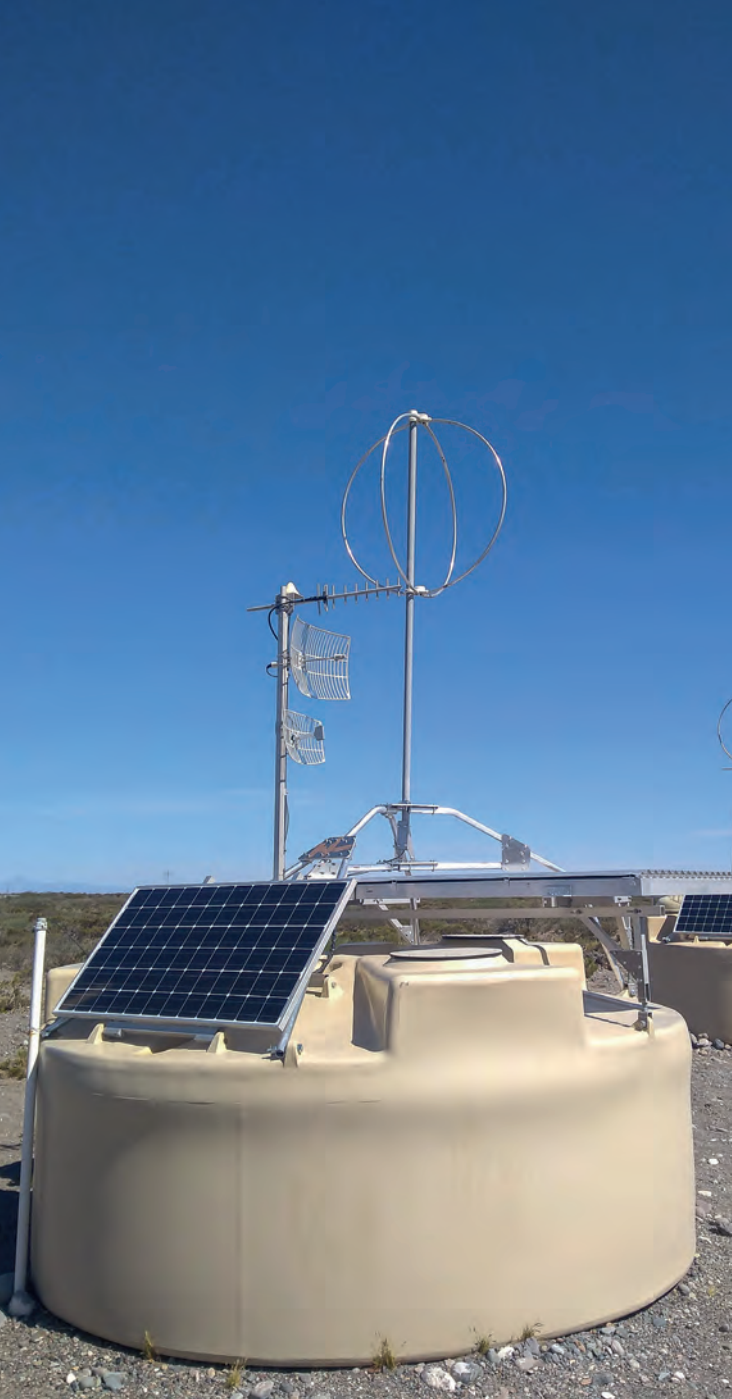
Energie nadawane cząstkom przez nawet najpotężniejsze akceleratory błędą wobec energii cząstek docierających do Ziemi z otchłani kosmosu. Aby badać te ostatnie, nasi naukowcy uczestniczą między innymi w pracach Pierre Auger Observatory w zachodniej Argentynie. Główną częścią obserwatorium jest niemal 1600 w pełni autonomicznych stacji detekcyjnych, rozstawionych na obszarze 3000 km². Każda stacja jest wypełniona dwunastoma tonami ultraczystej wody i wyposażona w detektory scyntylacyjne, zdolne rejestrować fotony promieniowania Czerenkowa (pojawiają się one, gdy do zbiornika wpadnie cząstka poruszająca



▲ Fot. Szkło fazy nematycznej ciekłego kryształu



▲ Fot. Laboratorium szerokopasmowej spektroskopii dielektrycznej utworzone przez dr hab. inż. Małgorzatę Jasiurkowską-Delaporte

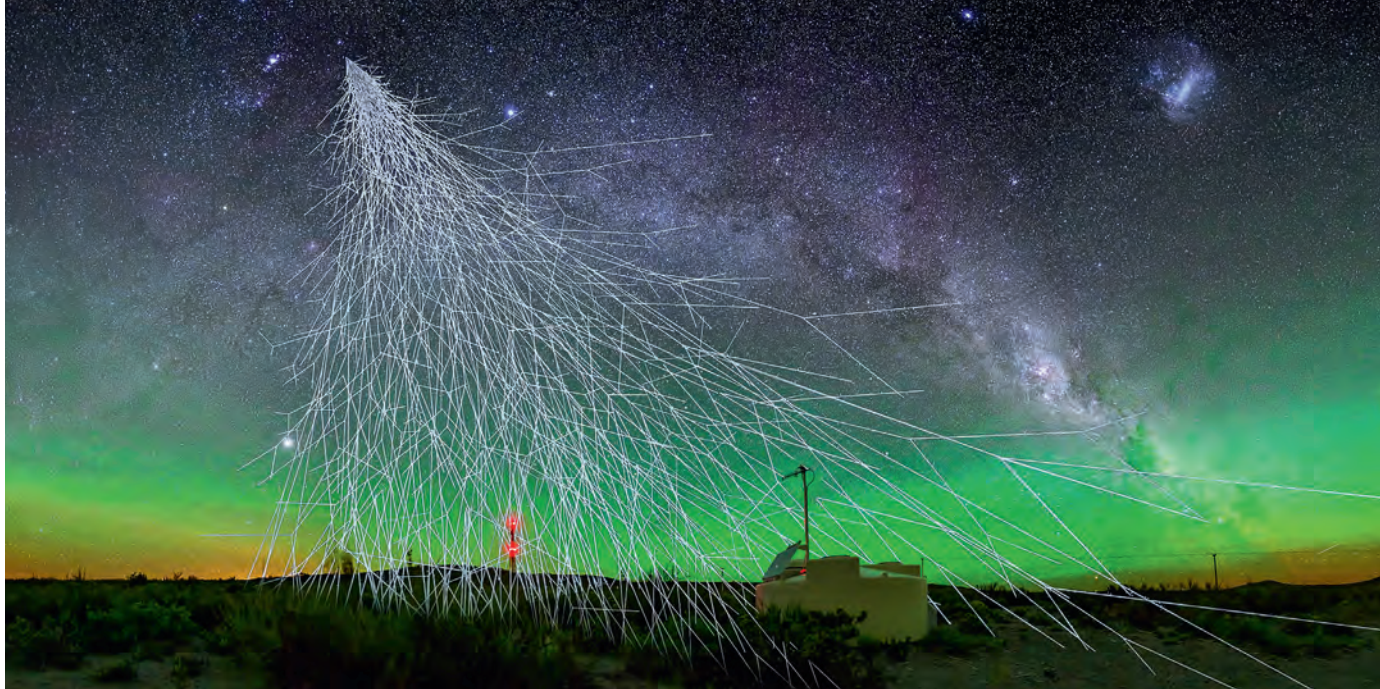


się z prędkością większą od prędkości światła w wodzie). Mamy tu niebagatelny wkład sprzętowy: specjaliści z naszego Instytutu opracowali technikę montażu i testowania wspomnianych detektorów oraz zbudowali i przetestowali detektory do 228 stacji.

Obserwatorium Pierre’a Augera powstało z myślą o rejestrowaniu wielkich pęków atmosferycznych – ogromnych kaskad cząstek wtórnych, inicjowanych wysoko w ziemskiej atmosferze przez promieniowanie kosmiczne najwyższych energii. Gdy docierają do powierzchni naszej planety, kaskady te mogą liczyć nawet miliardy cząstek. Spektakularnym sukcesem międzynarodowego zespołu odpowiedzialnego za budowę i działanie obserwatorium, raportowanym w „Science” (jednym z najbardziej prestiżowych czasopism naukowych świata), było wykazanie, że kilkadziesiąt tysięcy cząstek wtórnych, zarejestrowanych przez stacje detekcyjne, miało związek z promieniowaniem nadlatującym z kierunku wykluczającego źródło wewnątrz naszej galaktyki. Był to dowód, że cząstki promieniowania kosmicznego o energiach nawet milion razy większych od protonów przyspieszanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów pochodzą z odległości istotnie większych od rozmiarów Drogi Mlecznej.

HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory) to inne wielkie obserwatorium astrofizyczne, gdzie można spotkać naszych pracowników.

◀ Fot. Stacja detekcyjna w Pierre Auger Observatory
(źródło: PA Observatory)



▲ Fot. Szkic wielkiego pęku atmosferycznego oraz wodny detektor czerenkowski Obserwatorium Pierre Auger w zachodniej Argentynie (źródło: A. Chantelauze, S. Staffi, L. Bret)

Instalacja, znajdująca się na zboczu wulkanu Sierra Negra w Meksyku, składa się z 300 stalowych zbiorników z wodą, a każdy został wyposażony w kilka fotopowielaczy. HAWC zazwyczaj rejestruje kosmiczne fotony o energiach od dziesiątków GeV do setek TeV (giga- i teraelektronowoltów). Są to energie dla promieniowania elektromagnetycznego rekordowe: nawet trylion razy większe od energii fotonów światła widzialnego i kilkunastokrotnie większe od energii protonów przyspieszanych w akceleratorze LHC. Współcześnie przyjmowano, że za powstawanie elektromagnetycznego promieniowania kosmicznego o tak dużych energiach są odpowiedzialne strugi materii emitowane z jąder aktywnych galaktyk – kwazarów – z których najbliższy jest oddalony od Ziemi aż o 600 milionów lat świetlnych.

W obserwacjach z udziałem naszych naukowców udało się jednak dowieść, że ekstremalnie energetyczne fotony mogą się rodzić także w mikrokwazarach, obiektach obecnych nawet wewnątrz naszej galaktyki. Źródłem fotonów o energiach przekraczających 200 TeV okazał się bowiem mikrokwazar V4641 Sagittarii, leżący w tle gwiazdozbioru Strzelca, w odległości zaledwie ~20 tysięcy lat świetlnych od Ziemi. Odkrycie miało niebagatelną rangę, ponieważ procesy zachodzące w mikrokwazarach zachodzą w przyjaznej ludziom skali czasowej: w ciągu dni, nie setek tysięcy czy milionów lat, jak ma to miejsce w przypadku kwazarów.

W badaniach astrofizycznych atmosfera często stanowi poważną przeszkodę. Gdy więc to konieczne

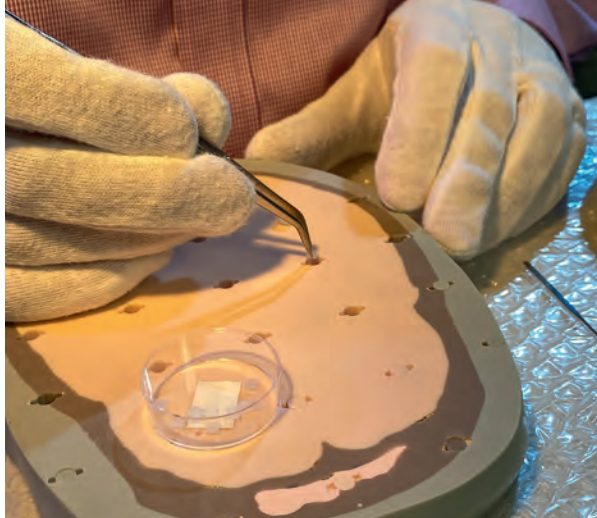
(i możliwe!), obserwatoria przenosi się nad nią, na pokłady satelitów krążących wokół Ziemi. Niestety, masa i rozmiary satelitarnej aparatury badawczej są dziś silnie limitowane ograniczeniami współczesnej techniki raketowej. To ograniczenie być może zniknie w najbliższych dekadach, gdy ludzie wrócą na Księżyc i stopniowo na jego powierzchni zacznie powstawać rozbudowana infrastruktura naukowa. Ale nim tak się stanie, musimy w pełni rozumieć, jak ludzki organizm reaguje na to, przed czym atmosfera go chroni: na promieniowanie kosmiczne. Zawiera ono przecież wszystkie rodzaje naturalnie występujących cząstek i jąder atomowych, o bardzo szerokim zakresie energii, na ogół daleko

wykraczających poza wartości spotykane w warunkach ziemskich.

Aby zdobyć informacje o dawkach promieniowania kosmicznego pochłanianych przez poszczególne części ciała przyszłych astronautów oraz ich potencjalnych skutkach biologicznych, w ramach misji NASA o nazwie Artemis I przeprowadzono eksperyment MARE. Choć bezzałogowa, misja Artemis I była pierwszą od dekad wyprawą księżycową załogowego statku kosmicznego. Podczas testowego lotu statek „Orion” nie był jednak pusty. Jego „załoga” składała się z dwóch ludzkich fantomów, każdego o wadze 39 kg (przy czym na jeden z nich



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



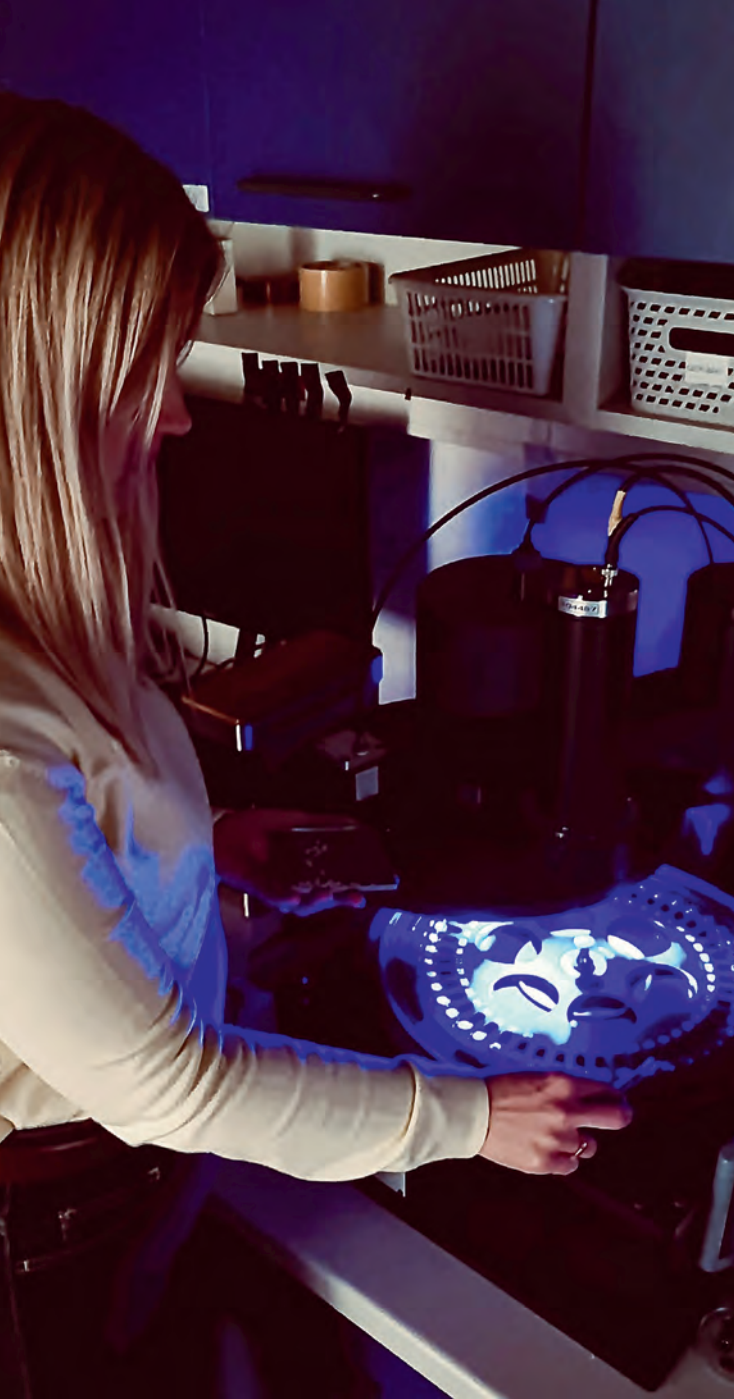
▲ Fot. Montaż detektorów termoluminescencyjnych w fantomie (źródło: DLR)

założono specjalnie zaprojektowany pancerz ochronny AstroRad). Niemal 600 detektorów termoluminescencyjnych, którymi nafaszerowano oba manekiny, powstało w laboratoriach naszego Instytutu.

Detektory dla eksperymentu MARE miały postać cienkich, białych pastylek o średnicy kilku milimetrów. Wykonano je z fluorku litu wzbogaconego o starannie dobrane domieszki, dzięki którym w materiale pojawiły się dodatkowe, metastabilne poziomy energetyczne. Gdy cząstki promieniowania kosmicznego przelatują przez tak skomponowany materiał, dochodzi do jonizacji atomów. Niektóre z wybitych elektronów trafiają wówczas na poziomy metastabilne, gdzie niczym w pułapce mogą przebywać nawet przez wiele lat. Kluczowe znaczenie ma fakt, że im więcej cząstek promieniowania kosmicznego przeleci przez detektor, tym większa liczba elektronów zostanie uwięziona w pułapkach. Odczyt dawki promieniowania zarejestrowanej przez tak skonstruowany



▲ Fot. Statek kosmiczny Orion w misji Artemis 1 (źródło: NASA/Joel Kowsky)



detektor jest możliwy dzięki zjawisku termoluminescencji. W laboratorium poszczególne detektory stopniowo podgrzewa się do temperatury kilkuset stopni Celsjusza. Dostarczona energia powoduje, że elektrony zaczynają wyskakiwać z kolejnych metastabilnych pułapek energetycznych, a część z nich szybko rekombinuje, czemu towarzyszy emisja fotonów. W rezultacie pojawia się łatwe do zmierzenia świecenie, przez fizyków nazywane termoluminescencją. Nasze detektory ze swojej roli wywiązały się znakomicie: obleciały Księżyc i wróciły na Ziemię, przynosząc bezcenne informacje o wpływie promieniowania kosmicznego na ludzki organizm.

Termoluminescencyjne detektory to tylko jeden z elementów szerokiego wachlarza przyrządów i technik pomiarowych związanych z detekcją promieniowania, od lat rozwijanych w IFJ PAN. Dowodem wysokich kompetencji naszych naukowców w tej dziedzinie jest ich udział w budowie spektrometru neutronowego wysokiej rozdzielczości HNRS oraz kompaktowego spektrometru neutronów prędkich NS-GEM, obu przeznaczonych dla prototypowego reaktora termojądrowego ITER. Przyrządy te są częścią systemów diagnostycznych reaktora, które potrafią gromadzić dane o parametrach neutronów i fotonów gamma emitowanych w reakcjach termojądrowych, co będzie miało krytyczne znaczenie dla kontroli i diagnostyki formującej się plazmy. Badania naukowe prowadzone w reaktorach termojądrowych

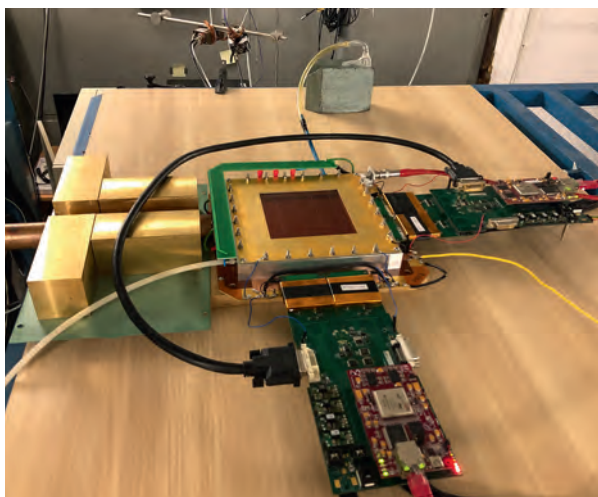
◀ Fot. Czytnik termoluminescencji i optycznie stymulowanej luminescencji w Zakładzie Fizyki Radiacyjnej i Dozymetrii, dr inż. Anna Mrozik

(tokamakach i stelleratorach) wabią fizyków możliwościami generowania czystej, praktycznie niewyczerpywalnej energii. W przeciwieństwie do tradycyjnych elektrowni jądrowych, nie będą produkowały długowiecznych odpadów radioaktywnych ani nie stworzą ryzyka katastrof na dużą skalę. ITER to najbardziej zaawansowany z rozwijanych eksperymentalnych reaktorów termojądrowych. Rozpisany na dziesięciolecia projekt powstaje dzięki zaangażowaniu naukowców z kilkudziesięciu krajów świata.

Jeszcze innym przykładem technik związanych z rejestrowaniem promieniowania mogą być precyzyjne pomiary z użyciem nowatorskich metod spektrometrii mas, co w połączeniu z ich ultraniskimi limitami detekcji pozwoliło naszym naukowcom przeprowadzić



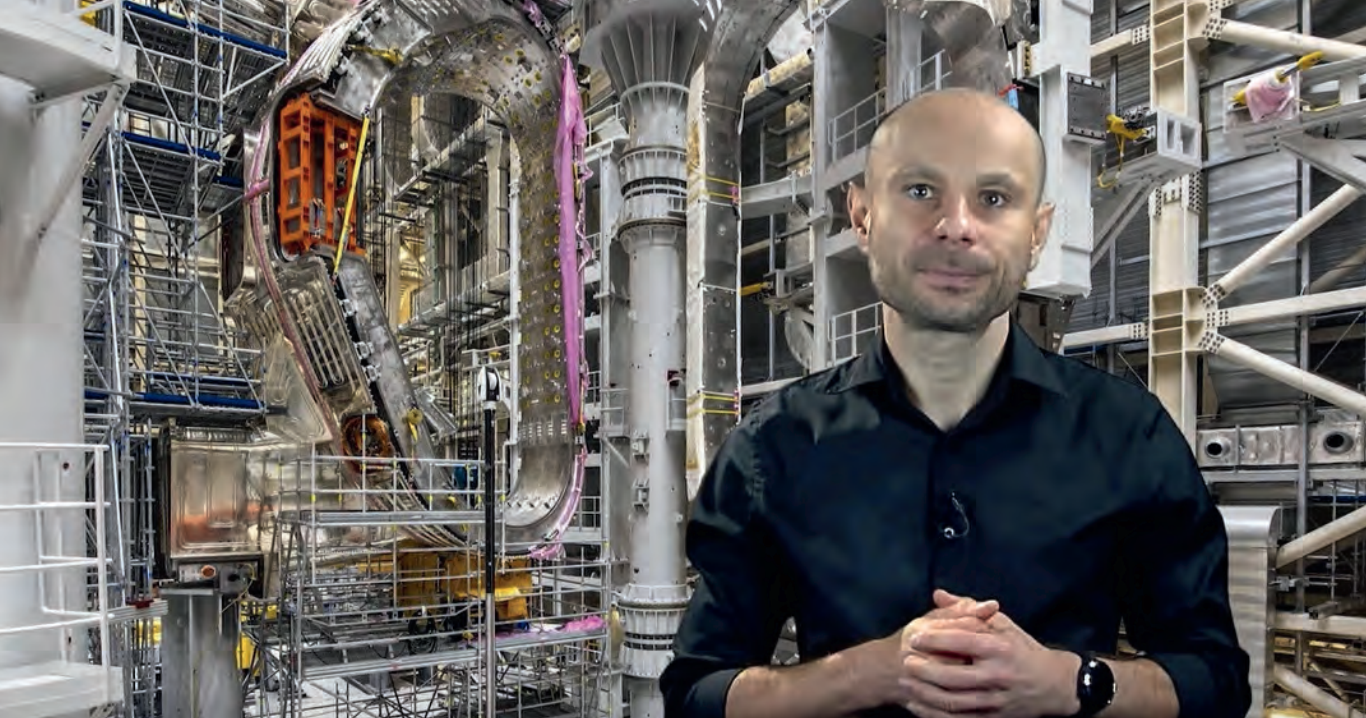
▲ Fot. Hala montażowa tokamaka ITER, od lewej dr inż. Arkadiusz Kurowski, dr hab. inż. Urszula Wiącek, prof. Urszula Woźnicka, prof. Marek Scholz



▲ Fot. Spektrometr neutronów prędkich NS-GEM na stanowisku pomiarowym przy generatorze neutronów prędkich IGN-14



▲ Fot. Reaktor termojądrowy ITER (źródło: ITER Organization)



▲ Fot. Systemy diagnostyczne plazmy termojądrowej dla reaktora ITER, dr hab. Jakub Bielecki

pierwsze na szeroką skalę analizy rozkładu stężeń plutonu w skali całej planety. Radioaktywne pierwiastki – takie jak ołów ^{210}Pb , aktyń ^{227}Ac , bizmut ^{214}Bi czy potas ^{40}K – nie są w przyrodzie niczym niezwykłym. Pluton ma jednak sztuczne pochodzenie: do środowiska trafiał głównie podczas prób jądrowych, awarii reaktorów oraz w wyniku wypadków satelitów i sond kosmicznych przenoszących radioaktywne źródła energii. Rozprzestrzeniane głównie przez atmosferę, sztuczne radioizotopy mają tendencję do kumulowania się m.in. w naturalnych, niewielkich zagłębieniach na powierzchniach lodowców, w postaci ciemnych osadów zwanych kriokonitami. *Typowy dołek kriokonitowy ma nie więcej niż kilkadziesiąt centymetrów średnicy i głębokości i jest wynikiem nagromadzenia materii organicznej oraz zanieczyszczeń:*

radionuklidów, metali ciężkich, pestycydów, mikroplastiku bądź antybiotyków – wyjaśnia dr hab. inż. Edyta Łokas i dodaje, że stężenia aktywności plutonu w kriokonicie są – szczególnie na półkuli północnej – rzędy wielkości wyższe niż w innych matrycach środowiskowych stosowanych do monitorowania stanu przyrody, takich jak porosty, mchy, gleby i osady.

Na potrzeby badań stworzono bazę danych dla izotopów plutonu $^{238,239,240}\text{Pu}$ wykrytych w kriokonicie pobranym przez międzynarodowy zespół w latach 2000-2020 z 49 lodowców półkuli północnej i południowej, w tym z Arktyki, Alp, Himalajów i Antarktydy. W ten sposób możliwe stało się monitorowanie rozprzestrzeniania się tych zanieczyszczeń. Stwierdzono na przykład, że stężenia

plutonu $^{239,240}\text{Pu}$ są istotnie wyższe na półkuli północnej, co odzwierciedla nierównomierną między półkulami depozycję plutonu z testów broni jądrowej. Bardzo wysokimi stężeniami sztucznych izotopów cechowały się zwłaszcza próbki pobrane z leżącego niecałe 200 kilometrów na zachód od Oslo lodowca Blåisen. Obserwacja ta dotyczyła w szczególności cezu ^{137}Cs (jednoznacznie wiążanego z katastrofą w Czarnobylu), ameryku ^{241}Am , bizmutu ^{207}Bi oraz plutonu $^{239,240}\text{Pu}$. Z kolei niespotykane proporcje izotopów $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ w kriokonitach lodowca Exploradores w Patagonii skłoniły do przypuszczeń, że nadmiar ^{238}Pu może być tu związany z upadkiem rosyjskiej sondy kosmicznej Mars-96, która zatонуła u wybrzeży Chile w 1996 roku. Podkreślenia wymaga, że badania kriokonitu mają jeszcze jeden ważny wymiar praktyczny, związany z faktem, że topniejące lodowce mogą go uwolnić w dużych ilościach do środowiska, stwarzając realne zagrożenie dla lokalnych ekosystemów.

Razem ku zdrowiu

Gdy na przełomie lat 40. i 50. XX wieku prof. dr hab. Henryk Niewodniczański, dzisiejszy patron IFJ PAN, podejmował pierwsze próby prowadzenia badań eksperymentalnych z fizyki jądrowej – jeszcze w zrujnowanym po wojnie Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego – sztuczne źródła promieniowania w postaci preparatów torowych musiał wypożyczać ze szpitali. Dziś to w Centrum Cyklotronowym Bronowice lekarze ze współpracujących z nami ośrodków onkologicznych wraz z naszymi pracownikami przeprowadzają



▲ Fot. Pobór próbek kriokonitu z lodowca, dr hab. inż. Edyta Łokas

nowoczesne zabiegi terapii nowotworów przy użyciu wiązek protonowych.

Centrum Cyklotronowe Bronowice to dziś jedno z najnowocześniejszych miejsc w Europie, gdzie fizyka służy człowiekowi. Aż trzy z czterech działających tu stanowisk przeznaczono do zadań medycznych. Napromienianie wiązkami protonowymi rozpoczęto w 2011 roku – od pierwszego w Polsce stanowiska do protonoterapii nowotworów oka, które Instytut zaprojektował, zbudował i samodzielnie certyfikował. W listopadzie 2016 roku ruszyła terapia z użyciem gantry, czyli obrotowego ramienia umożliwiającego precyzyjne napromienianie nowotworów w różnych lokalizacjach ciała. Radioterapia protonowa w CCB opiera się na metodzie wiązki ołówkowej,



▲ Fot. Centrum Cyklotronowe Bronowice



▲ Fot. Widok ogólny stanowiska radioterapii protonowej nowotworów oka przy cyklotronie C-230

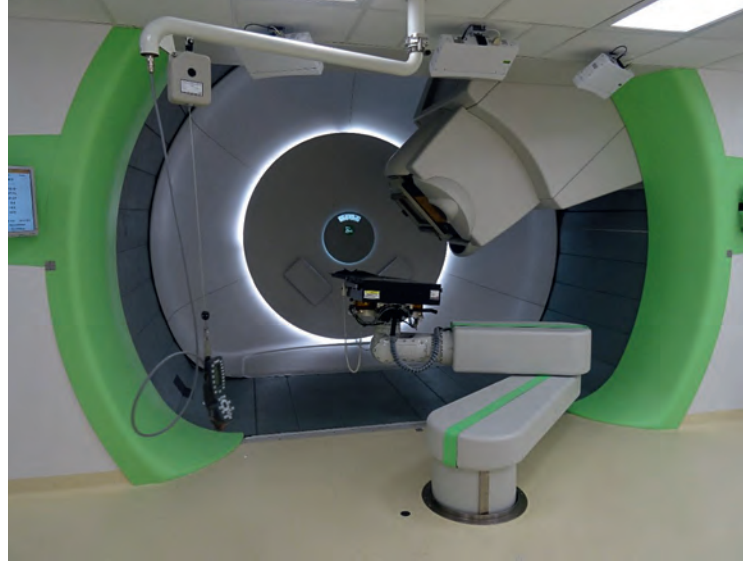
pozwalającej z niezwykłą dokładnością niszczyć komórki nowotworowe, minimalizując przy tym uszkodzenia zdrowych tkanek. Instytut odegrał istotną rolę nie tylko w budowie infrastruktury, ale i w rozwijaniu nowatorskich narzędzi. Zespół CCB stale pracuje nad zwiększaniem skuteczności i utrzymaniem bezpieczeństwa terapii. Rozwijane są modele do planowania leczenia oparte na symulacjach Monte Carlo, technologie monitorowania dawki oraz systemy do kontroli jakości, które prowadzą do podniesienia bezpieczeństwa realizowanych tu zabiegów. Prowadzone są również nowatorskie badania z zakresu dozymetrii oraz radiobiologii.

Wypada tu podkreślić, że z usług bronowickiego Centrum – obecnie jedynego w Polsce ośrodka, gdzie możliwe jest prowadzenie nowoczesnych terapii protonowych – skorzystało już blisko dwa tysiące pacjentów. Współpracujemy z wieloma instytucjami naukowymi i medycznymi, zapewniając chorym dostęp do terapii opartej na najnowszych osiągnięciach nauki. Centrum Cyklotronowe Bronowice to dowód na to, jak daleko może zaprowadzić wizja naukowca – jeśli spotka się z determinacją i zaangażowaniem kolejnych pokoleń.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN prowadzi szeroko zakrojone badania na rzecz zdrowia człowieka również poza CCB. Współczesna nauka wymusza specjalizację, zarówno aparatury, teorii, jak i samych badaczy. Gdy jednak istnieje możliwość połączenia wiedzy i umiejętności z różnych dziedzin, rezultaty współpracy nierzadko są spektakularne.

Spójrzmy chociażby na... multifraktale i zbudowane na ich podstawie narzędzia do analiz statystycznych. Podstawową cechą „zwykłych” fraktali jest ich samopodobieństwo: powiększając je prędzej czy później zobaczymy strukturę bardzo podobną do początkowej lub wręcz identyczną. A co się stanie, gdy w prosty sposób połączymy kilka fraktali? Rezultatem na ogół będziemy. Istnieją jednak takie operacje matematyczne, które splatają fraktale w struktury złożone (multifraktale) zachowujące zdolność do samopodobieństwa. Przy czym w zwykłych fraktalach samopodobieństwo ujawnia się, gdy ich dowolny fragment skalujemy o czynnik dla danego fraktala zawsze stały, podczas gdy różne fragmenty multifraktali trzeba skalować w różny sposób. Własność ta powoduje, że o ile analizy z użyciem zwykłych fraktali pozwalają wychwycić zależności liniowe, o tyle multifraktale potrafią ujawniać istnienie korelacji mniej oczywistych, nieliniowych. Co jednak mogą mieć wspólnego nietrywialne obiekty świata abstrakcyjnej matematyki na przykład z prozą rzeczywistości osób chorych na stwardnienie rozsiane? Okazuje się, że bardzo wiele.

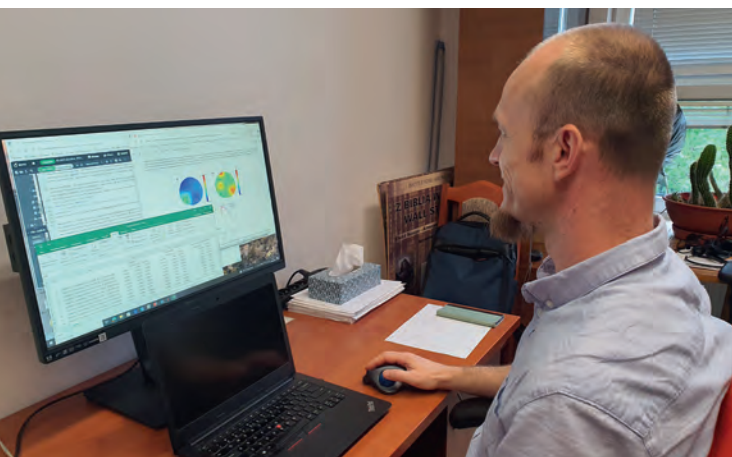
Stwardnienie rozsiane jest obecnie nieuleczalną chorobą prowadzącą do degeneracji ośrodkowego układu nerwowego, co skutkuje spowalnianiem przetwarzania informacji przez chorego oraz postępującą utratą koordynacji ruchowej. Grupę kilkudziesięciu osób ze wstępnie rozwiniętym stwardnieniem rozsianym (oraz odpowiednio dużą grupę kontrolną) poddano obserwacjom w ramach projektu realizowanego przez nasz Instytut we współpracy z lekarzami z Uniwersytetu



▲ Stanowisko gantry w Centrum Cyklotronowym Bronowice w IFJ PAN

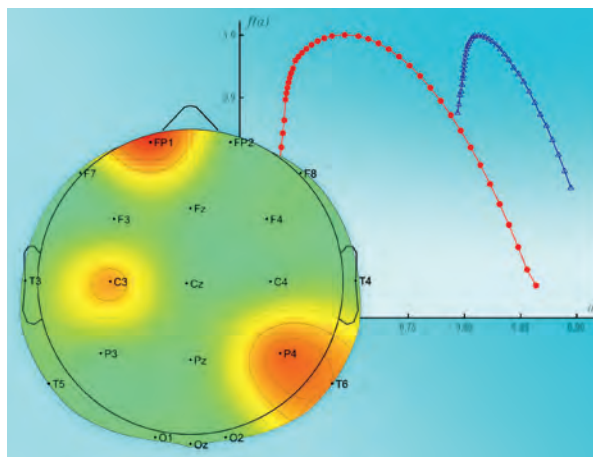


▲ Fot. Stanowiska gantry w Centrum Cyklotronowym Bronowice w IFJ PAN



▲ Fot. Multifraktalna detekcja wczesnych faz stwardnienia rozsianego, dr hab. inż. Paweł Oświecimka

Jagiellońskiego oraz naukowcami Politechniki Krakowskiej i Uniwersytetu SWPS. W ciągu dwóch lat wszystkie osoby kilkakrotnie przeszły nieinwazyjne badania elektroencefalograficzne, podczas których rejestrowano aktywność elektryczną mózgu za pomocą czepków wyposażonych w 256 elektrod próbkowanych tysiąc razy na sekundę każda. *Sumaryczna ilość zgromadzonych danych okazała się tak duża, że wykonanie pełnego zestawu analiz multifraktalnych zajmie naszemu zespołowi lata* – podkreśla dr hab. Paweł Oświecimka. Jednak już pierwsze analizy doprowadziły do ważnego spostrzeżenia: u osób ze wstępnie rozwiniętym stwardnieniem rozsianym komunikacja między neuronami miała charakter bardziej złożony, wykazujący cechy multifraktalne. Badacze sądzą, że mózg próbuje kompensować powstający w wyniku choroby deficyt i szuka dróg obejścia uszkodzonych obszarów, co prowadzi do reorganizacji sieci.



Funkcje tych obszarów starają się przejąć inne, wciąż efektywnie pracujące grupy neuronów, a to przejawia się we wzroście złożoności aktywności elektrycznej organu. Odkrycie ma szansę zrewolucjonizować metody detekcji wczesnych faz stwardnienia rozsianego, dziś ograniczone do wysoce subiektywnych ankiet bądź inwazyjnego i kosztownego rezonansu magnetycznego.

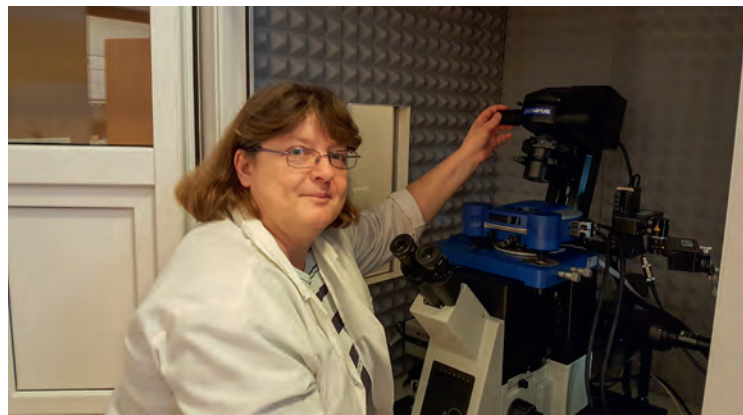
Nie powinno zaskakiwać, że obszarem medycyny szczególnie przyciągającym uwagę społeczną jest onkologia. Już w 1999 roku w naszym Instytucie wykazano, że w stosunku do zdrowych, komórki nowotworowe charakteryzują się zwiększoną deformowalnością cytoszkieletu, ułatwiającą im przeciskanie się przez wąskie naczynia układu krwionośnego czy limfatycznego i formowanie przerzutów. Dziś wiemy, że komórki nowotworów piersi, jelita, pęcherza moczowego oraz prostaty

w początkowych fazach transformacji nowotworowej stają się bardziej miękkie, aczkolwiek komórki innych, na przykład białaczek, sztywnieją. Co więcej, zmiany właściwości mechanicznych komórek zaczynają się pojawiać wcześniej niż optyczne zmiany nowotworowe. Pomiar właściwości mechanicznych komórek można byłoby więc wykorzystać – przynajmniej w odniesieniu do pewnych typów nowotworów – do bardzo wczesnego wykrywania pacjentów zagrożonych rakiem, jednakże tylko pod warunkiem, że badania byłyby rzeczywiście wiarygodne.

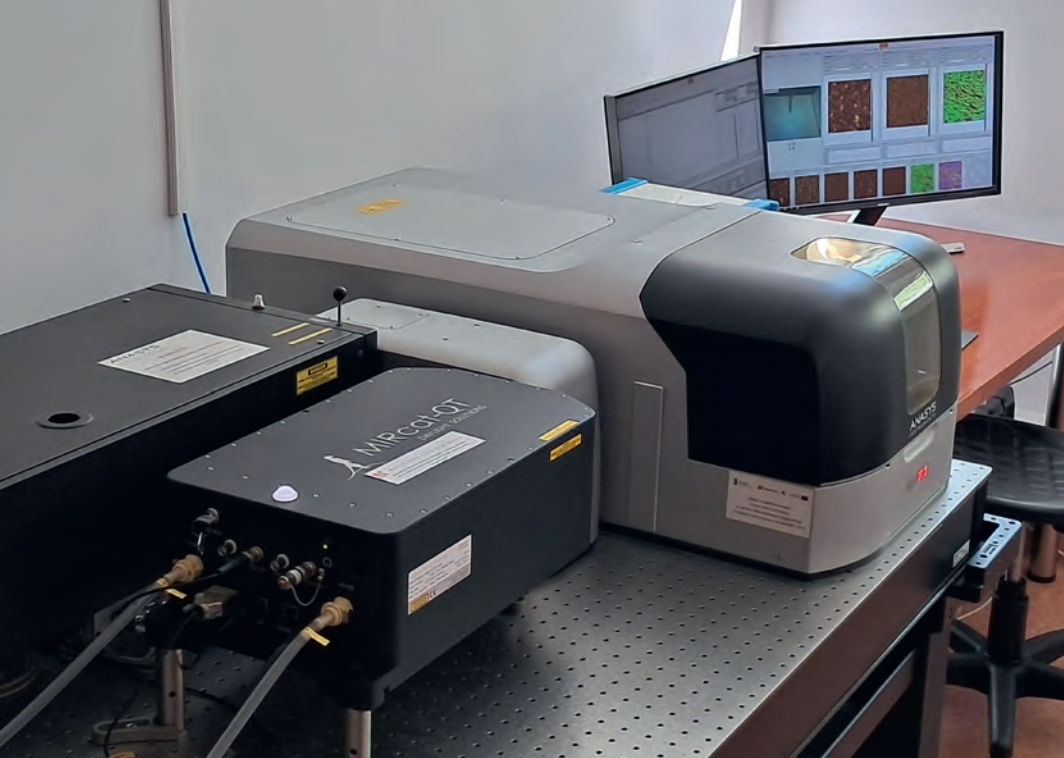
Zmiany właściwości biomechanicznych komórek można mierzyć za pomocą stosunkowo tanich mikroskopów sił atomowych AFM (Atomic Force Microscope). Urządzenia te na ogół służą do obrazowania mikroświata, nawet w skali pojedynczych atomów. Ale umożliwiają coś jeszcze: za pomocą ich sond można działać na badane podłoże precyzyjnie ustaloną siłą. Jeśli podłożem jest komórka, jej mechaniczna odpowiedź pozwala wyznaczyć współczynnik sprężystości (moduł Younga) i na tej podstawie wyciągać wnioski o elastyczności nie tylko struktur przy błonie komórkowej, ale nawet w pobliżu jądra komórkowego. Kilkuletnia współpraca naszych naukowców z koleżankami i kolegami z uniwersytetów w Amsterdamie, Barcelonie, Bremie, Lille, Marsylii, Mediolanie i Münster zaowocowała starannie opracowaną procedurę pomiarów właściwości mechanicznych komórek. Gdy procedura przejdzie fazę badań klinicznych, może trafić do codziennej praktyki diagnostycznej, skracając czas badań próbek pobranych od pacjentów

z kilku tygodni do zaledwie paru dni i jednocześnie przyspieszając wykrywanie wczesnych faz raka.

Efekty synergiczne w szczególnie spektakularny sposób pojawiają się właśnie dzięki nowatorskim sposobom łączenia technik spektroskopowych i mikroskopowych. Jako pierwsi w Polsce integrujemy mikroskopię sił atomowych (AFM) ze spektroskopią absorpcyjną w podczerwieni i spektroskopią ramanowską, co przy nanometrycznej rozdzielczości pozwala w unikatowy sposób analizować materiały biologiczne pod kątem molekularnych zmian patologicznych w komórkach, tkankach i płynach ustrojowych. Do najważniejszych osiągnięć należy tu odkrycie nowych biomarkerów stanów przednadcisnieniowych i schorzeń kardiologicznych, cukrzycy typu 2, zaćmy, nowotworów ślinianek i chorób neurodegeneracyjnych. Pionierskie w skali światowej okazały się m.in. analizy budowy i struktury chromosomów człowieka i ich uszkodzeń radiacyjnych, wykonane techniką AFM-IR.



▲ Fot. Prof. Małgorzata Lekka przy mikroskopie sił atomowych



◀ Fot. Pierwszy w Polsce i drugi na świecie spektrometr NanoIR-2 w konfiguracji z dwoma laserami: optical parametric oscillator (OPO) i quantum cascade laser (QCL) w Laboratorium Obrazowania Spektroskopowego

Wszystkie te prace mają wymierne znaczenie medyczne: umożliwiają projektowanie nowych, skuteczniejszych terapii. Ponadto, łącząc działania terapeutyczne z diagnostycznymi, prowadzimy zaawansowane badania nad metodami obrazowania i spektroskopii zlokalizowanej magnetycznego rezonansu jądrowego (MRI/MRS). Tu także głównym celem jest rozwój nowoczesnych metod diagnostyki i leczenia chorób cywilizacyjnych.

Kolejny – spośród jakże wielu z powodu ograniczonej objętości tej publikacji pominiętych! – przejaw interdyscyplinarnych zależności we współczesnej nauce wiąże się z już wspomnianym centrum medyczno-akceleratorowym Bronowice. Praktyka dowodzi, że

wyniki prowadzonych tu badań potrafią daleko wykraczać poza ramy radioterapii protonowej. Przykład? Nanocząstki złota, służące jako radiouczulacze wzmacniające efektywność terapii antyrakowej. W literaturze tematu dominowało przekonanie, że im mniejsze nanocząstki, tym lepiej, ponieważ takie łatwiej wnikają do wnętrza komórek rakowych. Nasi naukowcy zaczęli więc nanocząstki złota syntetyzować sami i sprawdzać ich wpływ na komórki nowotworowe. Rezultaty były... nieoczekiwane. Sferyczne nanocząstki o rozmiarach 10 nanometrów okazały się praktycznie nieszkodliwe dla badanej linii komórkowej, wysoką śmiertelność zauważono natomiast wśród komórek wystawionych na działanie nanocząstek aż 200-nanometrowych o budowie gwiazdzistej. Wyjaśnienie tej obserwacji stało

się możliwe dzięki użyciu pierwszego w Polsce mikroskopu holotomograficznego, działającego w naszym Instytucie.

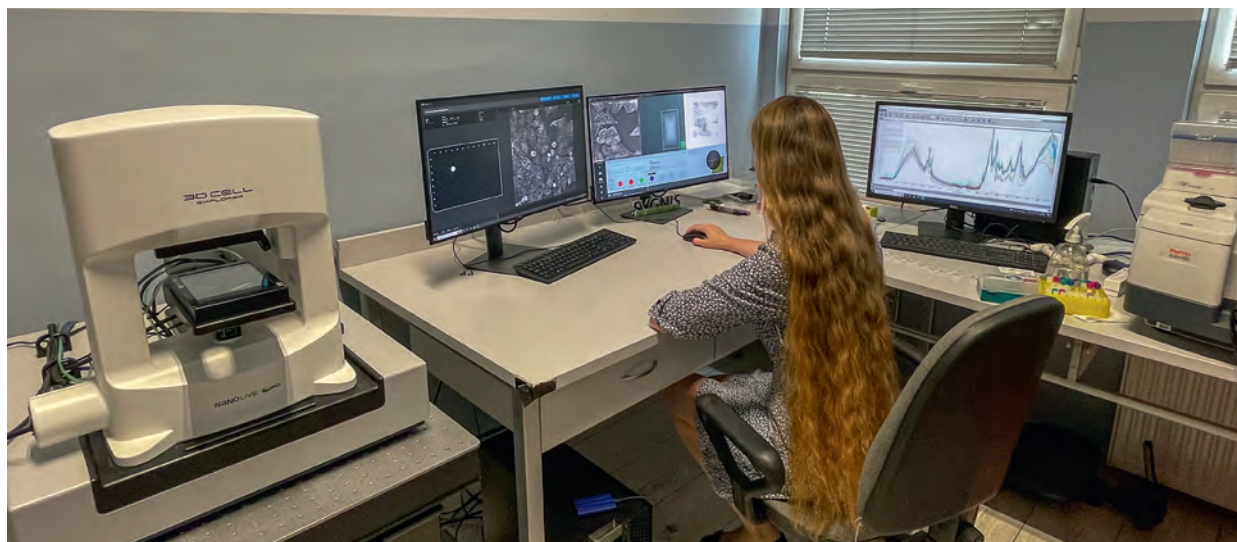
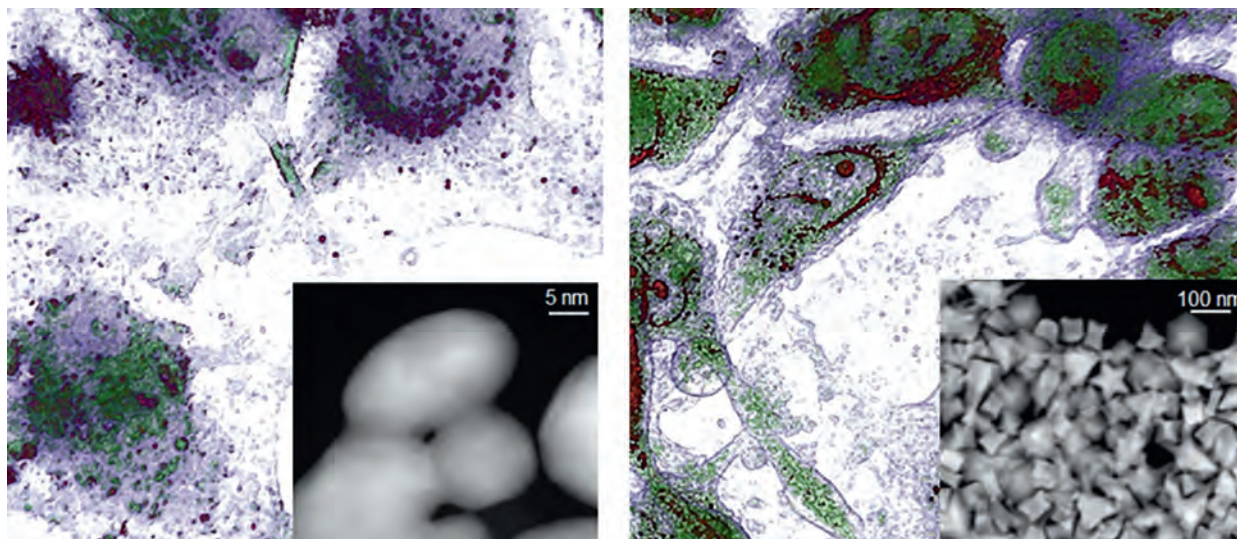
Typowy tomograf komputerowy skanuje ludzkie ciało za pomocą promieniowania rentgenowskiego i przekrój po przekroju odtwarza jego przestrzenną strukturę wewnętrzną. W biologii podobną funkcję od niedawna pełni właśnie mikroskop holotomograficzny, gdzie komórki są omiotane wiązką promieniowania elektromagnetycznego o tak dobranej energii, by fotony nie zaburzały metabolizmu komórek. Rezultatem skanowania jest zbiór holograficznych przekrojów zawierający informację o rozkładzie zmian współczynnika załamania światła. A ponieważ światło inaczej załamuje się na cytoplazmie, a inaczej na błonie komórkowej czy jądrze komórkowym, można na tej podstawie odtworzyć trójwymiarowy obraz zarówno samej komórki, jak i jej wnętrza. Holotomografia nie wymaga preparowania próbek ani wprowadzania do wnętrza komórek żadnych obcych substancji. Interakcje nanocząstek złota z komórkami rakowymi można więc było obserwować w środowisku niezaburzonym, bezpośrednio w inkubatorze, gdzie te ostatnie były hodowane, do tego z rozdzielczością nanometryczną, ze wszystkich stron jednocześnie i praktycznie w czasie rzeczywistym.

W seriach doświadczeń na trzech liniach komórkowych – dwóch glejaka i jednej jelita grubego – naszym naukowcom udało się zauważyć, że małe, sferyczne nanocząstki rzeczywiście łatwo wnikały do wnętrza



▲ Fot. Tomograf doświadczalny magnetycznego rezonansu z horyzontalnym magnesem nadprzewodzącym 9.4 T w Zakładzie Tomografii Magnetyczno-Rezonansowej

komórek rakowych, ale te mimo początkowego stresu się regenerowały, a nawet zaczynały się ponownie dzielić. W przypadku komórek nowotworowych jelita grubego nanocząstki złota były z nich wręcz wypychane. Sytuacja wyglądała inaczej dla dużych nanocząstek o kształcie gwiazdzystym. Ich ostre zakończenia dziurawiły błony komórkowe, co skutkowało narastaniem stresu oksydacyjnego komórek. Gdy te przestawały sobie radzić z naprawami coraz liczniejszych szkód, uruchamiał się mechanizm apoptozy, czyli programowanej śmierci. Model procesu osadzania się nanocząstek we wnętrzu komórek nowotworowych, zbudowany na podstawie tak zgromadzonych danych, pozwala dziś



▲ Fot. Zrekonstruowane zdjęcia holotomograficzne komórek nowotworowych glejaka wielopostaciowego (na górze) wykonane za pomocą mikroskopu Nanolive (na dole) po ok. pięciu godzinach działania sferycznych i gwiaździstych nanocząstek złota, dr hab. inż. Joanna Depciuch-Czarny

Handwritten mathematical derivations and Feynman diagrams on a green chalkboard. The diagrams show particle interactions with various labels like p_1 , p_2 , q_1 , q_2 , k , and q_1-k . The equations involve denominators like P^2 and P^4 , and terms like $(2kq_1)$ and $(2kq_2)$.

badaczom zajmującym się interakcjami nanocząstek z komórkami nowotworowymi znacząco zawęzić liczbę wariantów nanocząstek wymagających weryfikacji eksperymentalnej, co przekłada się na wymierną redukcję kosztów badań i zwiększanie ich tempa.

Gdzie sprzęt nie sięga

Fizyka dysponuje dziś wyrafinowanymi narzędziami badawczymi, nierzadko o skomplikowanej budowie, potężnych rozmiarach i imponujących możliwościach. Jednak prędzej czy później wszystkie one okazują się niewystarczające wobec złożoności przyrody i rozmiarów jej skal przestrzennych i czasowych. W takich przypadkach dramatycznie wzrasta rola teorii. Możliwie budowane modele, ustawicznie korygowane tak, by jak najlepiej

odtwarzać dotychczasowe dane, ułatwiają badaczom zrozumienie obserwowanych procesów, pozwalają też formułować przewidywania możliwe do zweryfikowania za pomocą przyrządów istniejących lub właśnie projektowanych. Nie ma się co czarować: bez odpowiednich podstaw teoretycznych nawet najlepsza fizyka doświadczalna stałaby się nieodróżnialna od magii.

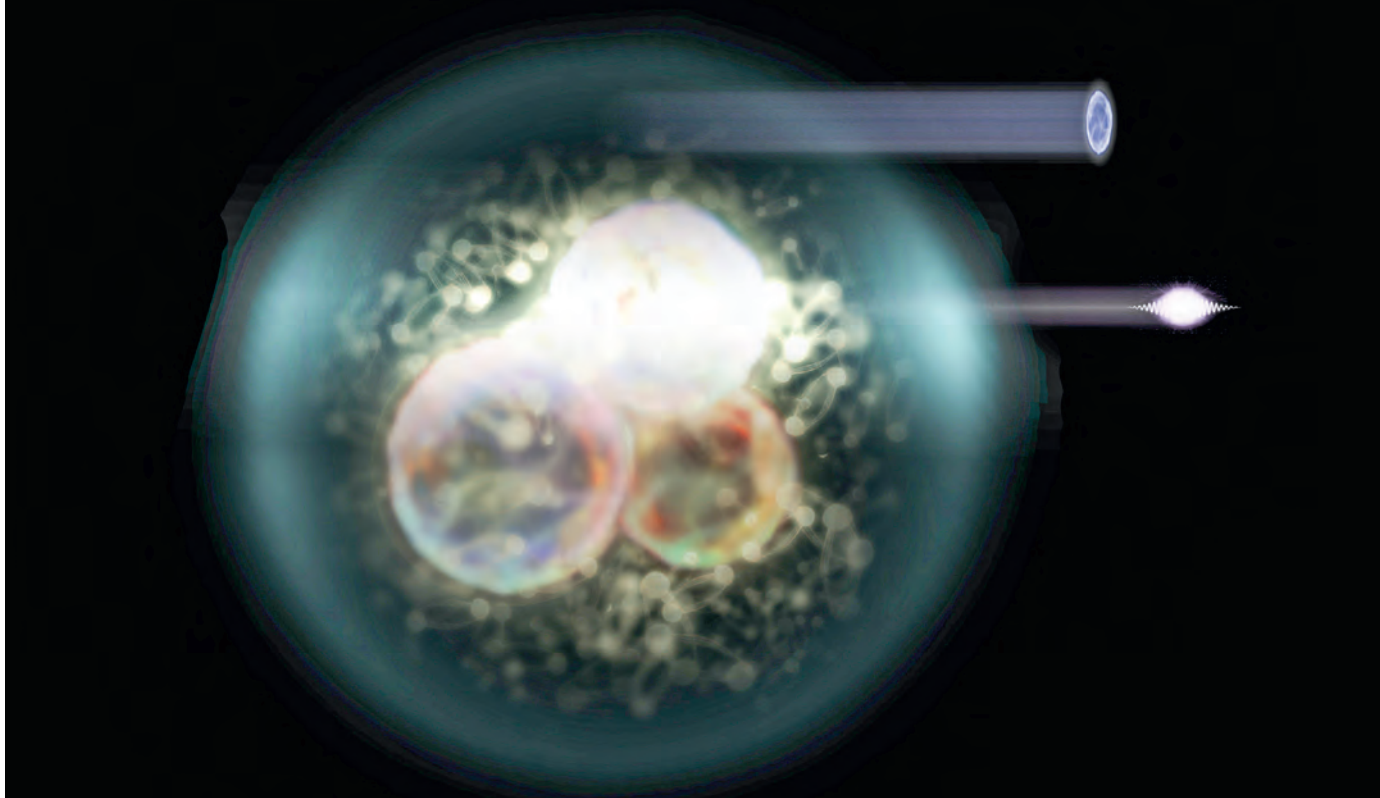
W ostatnich latach teoretycy z naszego Instytutu wnieśli niebagatelną wkład w wielkie wyzwanie fizyki cząstek elementarnych: opis wnętrza protonu. W ramach międzynarodowego zespołu w nowatorski sposób – bo za pomocą narzędzi kwantowej teorii informacji i zjawiska kwantowego splątania – przedstawili złożone interakcje znajdujących się w protonach kwarków, gluonów



▲ Fot. Zebranie pracowników Oddziału Fizyki Teoretycznej, od lewej dr Ananya Tapadar, Trina Basu (KISD), dr Mohammed Boukidi, dr Jim M. John, dr hab. Andreas van Hameren, dr hab. Sebastian Sapeta, dr hab. inż. Paweł Oświęćmka

i ustawicznie „kipiącego” między nimi morza cząstek wirtualnych. O splątaniu między obiektami kwantowymi mówimy wtedy, gdy wartości jakiejś cechy jednego obiektu reagują na jej zmiany w innym mimo tego, że informacja o zmianie nie miała czasu, by zostać między nimi przesłana za pomocą jakiegokolwiek nośnika transportowanego przez przestrzeń. W przypadku wnętrza protonu splątanie okazuje się występować na trudnych do wyobrażenia odległościach rzędu jednej biliardowej metra i mniejszych i jest cechą kolektywną: dotyczy nie kilku partonów w protonie (czyli kwarków i gluonów), lecz wszystkich. Formalizm zbudowany

z uwzględnieniem faktu, że wewnątrz protonu jest maksymalnie splątane, a miarą tego splątania może być jego entropia, pozwolił po raz pierwszy wytłumaczyć dane ze wszystkich aktualnie dostępnych pomiarów związanych z rozpraszaniem się cząstek wtórnych produkowanych w trakcie głęboko nieelastycznych zderzeń elektronów (bądź pozytonów) z protonami. Przewiduje się, że nowe narzędzie teoretyczne ułatwi interpretację pomiarów z przyszłych zderzaczy, takich jak Electron-Ion Collider (EIC), który na początku następnej dekady zostanie uruchomiony w laboratorium w Brookhaven w USA.



▲ Fot. Elektron podczas głęboko nieelastycznego zderzenia z protonem emitujący wysokoenergetyczny foton; wizualizacja poglądowa

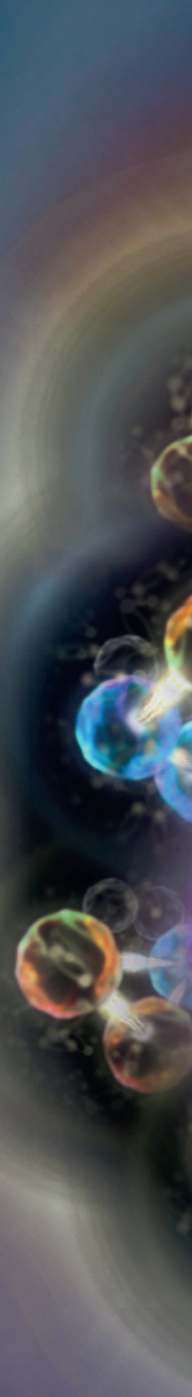
Sztuką jest zbudować dobry model, ale nie mniejszą – uzgodnić modele już istniejące i zweryfikowane. Spójrzmy na przykład na jądra atomowe ostrzeliwane elektronami. Gdy elektrony mają stosunkowo niskie energie, jądra zachowują się tak, jakby były zbudowane z nukleonów, podczas gdy przy wysokich energiach elektronów wewnątrz jąder atomowych zaczyna się dostrzegać partony. Choć od odkrycia nukleonów minął niemal wiek, a partonów pół stulecia, nikt nie zdołał za pomocą modeli kwarkowo-gluonowych odtworzyć wyników eksperymentów przy niskich energiach, gdy w jądrach atomowych widać tylko protony i neutrony. Nikt – do zeszłego roku, kiedy to

międzynarodowa grupa badawcza nCTEQ wreszcie mogła ogłosić sukces. *Zajmowaliśmy się funkcjami rozkładu partonów, używanymi do odwzorowania, jak kwarki i gluony rozkładają się wewnątrz protonów i neutronów oraz w całym jądrze atomowym. Za ich pomocą można dla konkretnego jądra atomowego wyznaczać mierzalne parametry, takie jak prawdopodobieństwo powstania określonej cząstki w zderzeniu elektronu lub protonu z jądrem – tłumaczy dr hab. Aleksander Kusina, jeden z trzech naszych teoretyków uczestniczących w pracach zespołu. W świeżo zaproponowanym modelu krytyczną rolę odegrały poprawki odwzorowujące zjawisko łączenia się pewnych*

nukleonów w pary. Co szczególnie istotne, przewidywania modelu okazały się zgodne z odpowiednimi danymi zebranymi w detektorach akceleratora LHC. Ciekawostką może być tu fakt, że na jednym z najpopularniejszych serwisów naukowych świata, Phys.org, gdzie każdego dnia ukazuje się kilkadziesiąt doniesień o wynikach badań naukowych z całego świata, wzmianka o opisanym tu osiągnięciu okazała się trzecia pod względem popularności w całym 2024 roku.

Wysokoenergetyczne zderzenia protonów z protonami bądź jądrami ołowiu to kolejny szczebel w drabinie złożoności przyrody. I tu nasi teoretycy mają się czym pochwalić. Jeszcze w 2019 roku przedstawili dokładny opis przebiegu takich zjawisk przy największych energiach dostępnych w akceleratorze LHC. Efektem kolizji są wówczas strumienie cząstek wtórnych, w żargonie fizyków nazywane dżetami. Część z nich rozbiega się na boki, jednak część zachowuje kierunek ruchu zbliżony do pierwotnego. *Każdy proton czy neutron to twór ekstremalnie dynamiczny, wypełniony nieustannie kipiącym morzem gluonów. Z tą dynamiką wiąże się ciekawy fakt: w zależności od zachowania swoich cząstek składowych, proton może być raz mniej, a raz bardziej gęsty. Właśnie dlatego przypadki zderzeń z dżetami „do przodu” są dla nas tak interesujące. Dotyczą bowiem sytuacji, gdy jeden proton był rzadki, czyli zachowywał się jak pocisk, a drugi był gęsty, czyli zachowywał się jak tarcza – mówi prof. dr hab. Krzysztof Kutak.*

- Fot. Artystyczna wizja jądra atomowego formowanego przez protony i neutrony składające się z kwarków powiązanych gluonami





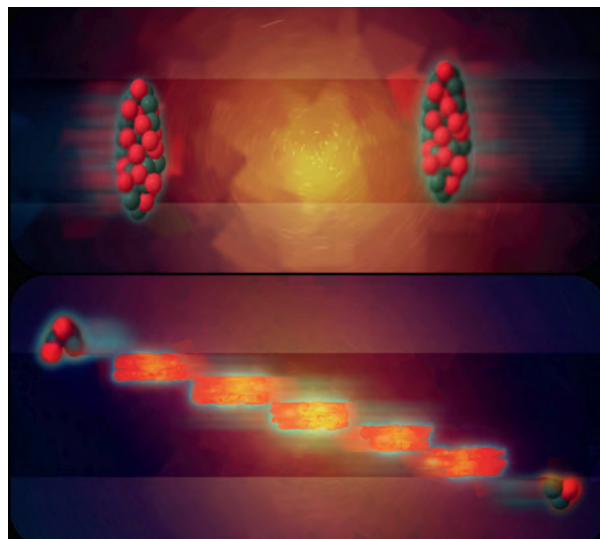
Do sukcesu naszych fizyków przyczyniło się tu spostrzeżenie, że przy najwyższych energiach zderzeń w LHC opis dżetów do przodu wymaga uwzględnienia dwóch dodatkowych czynników: saturacji i efektu Sudakowa. Pierwszy z nich ma związek z faktem, że wraz ze zwiększaniem energii zderzeń rośnie liczba gluonów tworzących się wewnątrz protonów. Proces ten nie trwa w nieskończoność. Przy dostatecznie dużej energii zderzeń gluonów pojawia się tak dużo, że zaczynają ze sobą rekombinować. Wytwarza się wtedy dynamiczna równowaga między produkcją gluonów a ich rekombinacją – co jest nazywane saturacją. Z kolei efekt Sudakowa dotyczy przypadków, gdy wskutek kwantowych efektów związanych z emisją wirtualnych cząstek różnica pędów wygenerowanych dżetów jest większa od pędów partonów inicjujących produkcję dżetów. Oba zjawiska były znane wcześniej, lecz na ogół zaniedbywano je lub uwzględniano tylko jeden. Udoskonalony model z powodzeniem zweryfikowano dzięki danym zebranych w eksperymencie ATLAS przy akceleratorze LHC.

Największym wyzwaniem są jednak przypadki, gdy w grę wchodzi zderzenia masywnych jąder atomowych przy wielkich energiach. Interakcje między cząstkami powstającej plazmy kwarkowo-gluonowej, zdominowane przez oddziaływania silne, stają się tak skomplikowane, że współczesna fizyka nie radzi sobie z ich ścisłym opisem. Na szczęście istniejące ograniczenia można próbować omijać. Jak? Wyjaśnienie zaczniemy od spostrzeżenia, że rozpędzone do prędkości przyświatlnych masywne jądra atomowe wskutek efektów

opisywanych teorią względności wyglądają w laboratorium jak protonowo-neutronowe „placki” spłaszczone w kierunku ruchu. Zderzenie takich placków 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 żadnej przeszkody i kontynuują niezakłócony lot; w żargonie fizycznym nazywa się je „obserwatorami”. Nasi fizycy podzielili więc jądrowe placki wzdłuż kierunku ruchu na szereg pasków. Każde jądro w przekroju wyglądało wówczas jak stos ułożonych jedna na drugiej cegieł (w modelu ich wysokość i szerokość 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 przebiegało między dwiema protonowo-neutronowymi cegiełkami, a więc w sposób znacznie łatwiejszy do opisanego za pomocą matematyki. Jak się nieco później okazało, podobny w budowie model smug ogniowych inna grupa fizyków zaproponowała jeszcze w końcu lat 80. ubiegłego wieku. *My stworzyliśmy naszą konstrukcję niezależnie i dla innego przedziału energetycznego. 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* – podkreśla prof. dr hab. Antoni Szczurek.

Inspiracją do budowy modelu, jak i źródłem danych dla jego późniejszej weryfikacji, były w tym przypadku pomiary zebrane dla zderzeń masywnych jąder atomowych w trakcie eksperymentu NA49 przy akceleratorze SPS w CERN-ie z udziałem fizyków z naszego Instytutu. Krakowski model smug ogniowych okazał się w co najmniej 90% zgodny z danymi eksperymentalnymi.

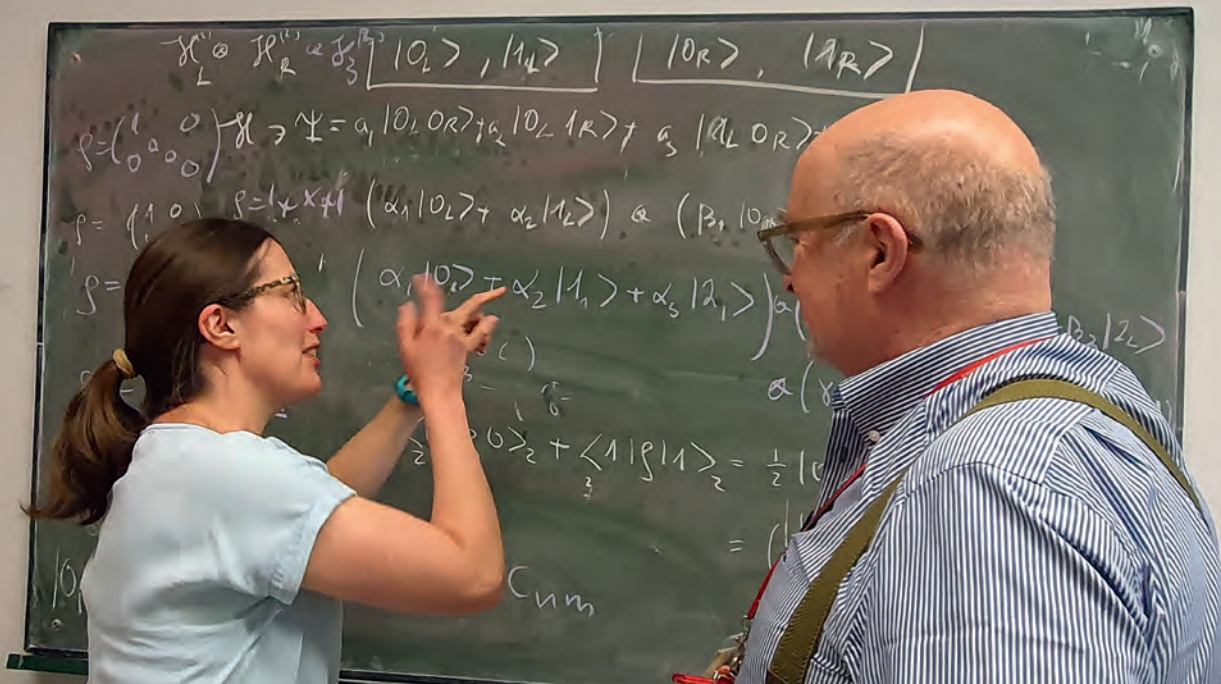
Ale zainteresowania naszych teoretyków nie ograniczają się do świata wielkich energii. Spójrzmy na przykład na ruch falowy, opisywany za pomocą równania zwanego falowym. Gdy w drugiej połowie XIX wieku rozwijała się technika telegraficzna, zmodyfikowano je by uwzględnić wygaszanie prądu płynącego przez ośrodek (czyli kabel telegraficzny). Powstało wówczas równanie telegrafistów, opisujące, jak prąd elektryczny propaguje się z tłumieniem wzdłuż jednego wymiaru przestrzennego. W ostatnich latach umiejętnie uogólnione równanie telegrafistów znalazło nowe zastosowanie: zaczęto je używać także do opisu dyfuzji i transportu ciepła. Był tu jednak pewien intrygujący niuans. Otóż w rozwiązaniach równania falowego, a więc bez tłumienia, występuje efekt Dopplera – pozorna zmiana częstotliwości fal emitowanych przez źródło poruszające się względem obserwatora. Wszyscy to znamy: dźwięk nadjeżdżającego pociągu czy syrena zbliżającej się szybko karetki mają zauważalnie wyższe częstotliwości niż wtedy, gdy te pojazdy się od nas oddalają. Nasi teoretycy dowiedli, że efekt Dopplera pojawia się także w rozwiązaniach równań telegrafisty związanych z transportem ciepła. Zdobyta wiedza może mieć wymierne przełożenie



▲ Fot. Poglądowa wizualizacja modelu smug ogniowych, gdzie zamiast skomplikowanych zderzeń wielu protonów i neutronów analizuje się oddziaływania między jądrami atomowymi podzielonymi wzdłuż kierunku ruchu na „cegiełki”

praktyczne wszędzie tam, gdzie w grę wchodzi transport ciepła na małych odległościach. Lepsze zrozumienie mechanizmów transportu ciepła pozwoli stworzyć bezpieczniejsze techniki pracy z laserowymi narzędziami chirurgicznymi, może też zwiększyć efektywność metod odprowadzania nadmiaru ciepła z poparzonych tkanek. Zyskać może nawet kosmetologia, zainteresowana minimalizowaniem niepożądanych efektów termicznych pojawiających się podczas zabiegów kosmetycznych.

Fizyka to przede wszystkim statystyka, a ta swoimi zastosowaniami obejmuje także szereg obszarów zwykłego życia. Nic dziwnego, że narzędzia do statystycznych



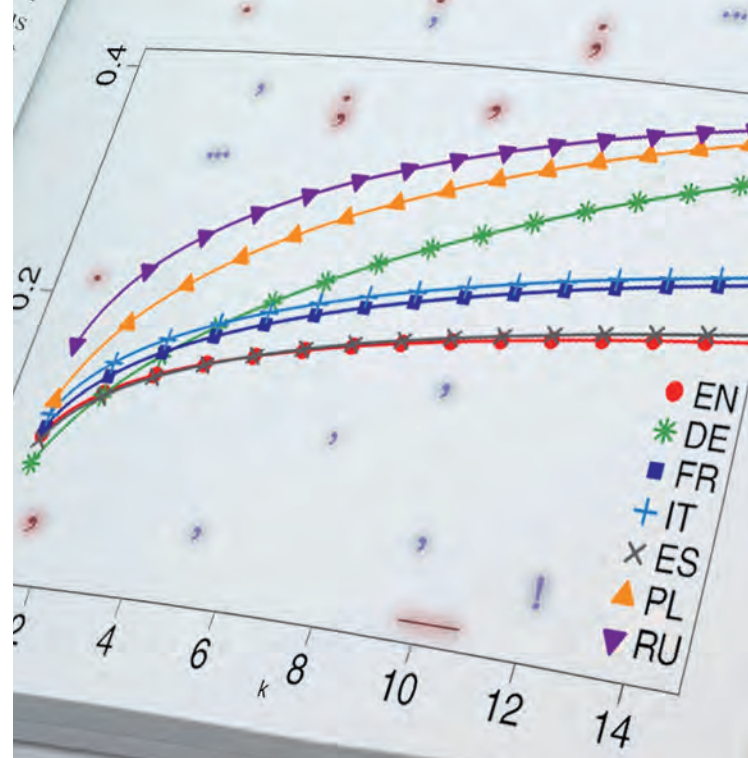
▲ Fot. Prof. Katarzyna Górka i prof. Andrzej Horzela w trakcie dyskusji nad problemem splątania

analiz multifrakalnych, wypracowane przez naszych teoretyków, są używane przy opisach zjawisk nierzadko daleko wykraczających poza pierwotne ramy dziedziny. *Analizy matematyczne z użyciem multifraktali są cennym źródłem informacji o dynamice zjawisk zachodzących na różnych poziomach złożoności. Ich ważną zaletą jest chociażby fakt, że pozwalają łatwo usunąć wpływ bieżących, długofalowych trendów* – zauważa prof. dr hab. Stanisław Drożdż. Za pomocą multifraktali w naszym Instytucie z powodzeniem podjęto próby m.in. opisanie zmian aktywności słonecznej, geomorfologii struktur pasm górskich, dynamiki rynków finansowych (w tym kryptowalut) czy niuansów malarstwa, gdzie formalizm multifrakalnych analiz powierzchniowych ma szansę wspomagać ekspertów przy ustalaniu autentyczności

obrazów, identyfikacji ich autorstwa, klasyfikacji warsztatu mistrzów pędzla, a być może nawet przy wycenieniu dzieł. Szczególnym zainteresowaniem światowych mediów cieszyły się multifrakalne analizy interpunkcji oryginalnych wersji językowych najwybitniejszych dzieł światowej literatury, powstałych dzięki geniuszowi takich twórców jak de Cervantes, Conrad, Dickens, Doyle, Dumas, Eco, Goethe, Hemingway, Hugo, Kipling, Orwell, Reymont, Salinger, Sienkiewicz czy Verne. W trakcie badań zauważono tu, że interpunkcja wydaje się być integralną i dopełniającą częścią wszystkich badanych języków, aczkolwiek nie w każdym jej rola jest równie wyraźna. Jednak w każdym przypadku po uwzględnieniu interpunkcji nasze języki okazywały się być strukturami bardziej kompletnymi, niż się dotychczas wydawało.

Z działań i obszarów aktywności Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk płynie oczywisty wniosek: fizyka jest obecna wszędzie, w każdej skali czasu, przestrzeni i energii, na krańcach obserwowalnego Wszechświata i w codziennej rzeczywistości człowieka, a nawet w subtelnościach tworzonych przez niego arcydzieł literatury pięknej czy malarstwa. Jakże głęboko w tym kontekście brzmią słowa wypowiedziane kiedyś przez Richarda Feynmana, jednego z najwybitniejszych fizyków XX wieku:

” Poeci twierdzą, że nauka niszczy piękno gwiazd, że dla niej są one tylko kulami gazu. Ja, także, patrzę nocą w gwiazdy, i czuję je. Lecz widzę mniej – czy więcej?



▲ Fot. Funkcje hazardu pokazują prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnego znaku interpunkcyjnego w zależności od długości pozbawionej interpunkcji sekwencji wyrazów



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK