

Z kamerą wśród egzotycznych nuklidów

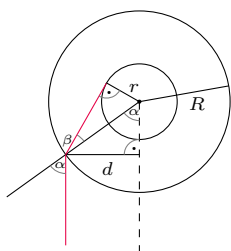
Marek PFÜTZNER*

*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



Rozwiązanie zadania F 1025.

Obserwator zewnętrzny jako wewnętrzny brzeg rurki zaobserwuje promień styczny do tego brzegu i opuszczający zewnętrzną powierzchnię rurki najdalej od jej środka.



Mamy:

$$\begin{aligned}d &= R \sin \alpha, \\r &= R \sin \beta, \\ \sin \alpha &= n \sin \beta.\end{aligned}$$

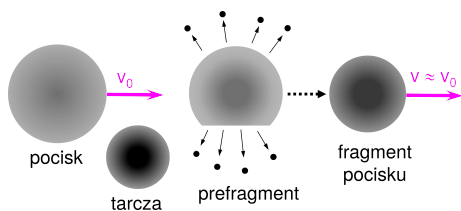
Otrzymujemy: $d = n \cdot r$. Jest to wynik poprawny, jeśli $r < R/n$. Gdy $r \geq R/n$, to obserwator zewnętrzny nie może dostrzec wewnętrznego brzegu rurki.

W centrum każdego atomu znajduje się jądro złożone z neutronów i protonów. Siły jądrowe wiążą te cząstki (zwane nukleonami) w bardzo ciekawy obiekt, którego rozmiary są rzędu femtometrów ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), a gęstość rzędu 10^{17} kg/m^3 . Gdy wokół jądra atomowego złożonego z określonej liczby N neutronów i Z protonów krąży Z elektronów, to taki obojętny elektrycznie atom nazywamy nuklidem. Jedno z podstawowych pytań, jakie możemy postawić, to: ile różnych nuklidów może istnieć, a dokładniej, dla jakich kombinacji liczb N i Z jądro nuklidu będzie związane przez czas znacznie dłuższy niż 10^{-21} s , czyli dłuższy od typowego czasu przemian zachodzących pod wpływem sił jądrowych? Wiemy, że pewne liczby N i Z tworzą nuklidy trwałe, występujące w przyrodzie. W laboratoriach potrafimy jednak tworzyć nuklidy o innych liczbach nukleonów, które okazują się nietrwałe, promieniotwórcze, ale żyją dostatecznie długo, by spełnić powyższą definicję istnienia. Te nuklidy, które mają największą dysproporcję pomiędzy liczbami N i Z , w stosunku do nuklidów trwałych, i które są na granicy jądrowego istnienia, nazywamy *egzotycznymi*.

Okazuje się, że w teorii jądra atomowego nie potrafimy znaleźć dokładnej odpowiedzi na postawione powyżej pytanie. Co więcej, im dalej od nuklidów trwałych, tym trudniej o dokładne przewidywania teoretyczne. Trzeba jednak przyznać, że stoimy tu przed jednym z najtrudniejszych zadań fizyki: opisać kwantowy obiekt złożony z wielu składników oddziałujących silnie, a na domiar złego występujące tu siły są bardzo złożone i nie do końca poznane. W tej sytuacji ogromną rolę odgrywają badania doświadczalne. Postęp w poznawaniu i rozumieniu nuklidów odbywa się dzięki ciągłemu współdziałaniu eksperymentatorów i teoretyków. Ci pierwsi wytwarzają nowe nuklidy i mierzą ich własności, dostarczając dane potrzebne tym drugim do budowania i ulepszania modeli teoretycznych. Dążymy do opracowania jak najlepszych modeli, bo są one sprawdzianem tego, czy dobrze zrozumieliśmy badane zjawiska, a to przecież jest głównym celem badań naukowych. Jest też inny powód, praktyczny. Czasem potrzebne są własności nuklidów, dla których nie ma żadnych danych doświadczalnych. Na przykład jeden z astrofizycznych procesów nukleosyntezy, tzw. proces szybkiego wychwyty neutronów (proces r) zachodzi z udziałem nuklidów tak bardzo neutrono-nadmiarowych, że są one daleko poza zasięgiem współczesnych eksperymentów, a możliwe, że wielu z nich nigdy nie uda się wytworzyć w laboratorium. Astrofizycy badający powstawanie pierwiastków chemicznych w kosmosie muszą w takim przypadku zdać się na przewidywania teoretyczne.

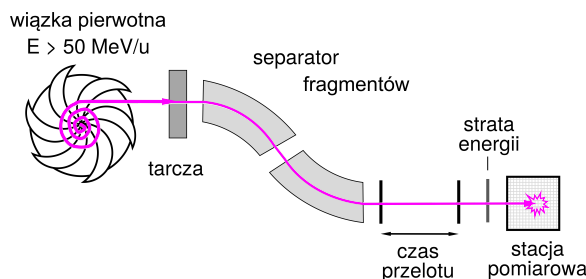
Liczba wytworzonych i zbadanych nuklidów rośnie z czasem, w miarę postępu technik doświadczalnych, a szczególnie metod przyspieszania cząstek i ciężkich jonów. Sto lat temu mieliśmy wiedzę o około 100 nuklidach (choć wtedy nie było tego pojęcia i nie znano jeszcze neutronu). Wiedza ta pochodziła z prac pionierów promieniotwórczości i z badań izotopów trwałych pierwiastków, prowadzonych z użyciem spektrometrów masowych. Na początku lat 80. ubiegłego wieku w tablicy nuklidów było już około 2200 pozycji, a obecnie znamy ich około 3300. Prace w tej dziedzinie nie ustają – w ostatnich kilku latach odkrywano średnio około 30 nowych nuklidów rocznie. Najnowsze i najbardziej zaawansowane modele teoretyczne przewidują, że wszystkich możliwych nuklidów powinno być około 7000. Oznacza to, że w eksploracji świata nuklidów osiągnęliśmy zaledwie jego połowę, a więc mamy przed sobą jeszcze drugie tyle do poznania.

W ostatnich trzech dekadach największe postępy w wytwarzaniu nuklidów egzotycznych zawdzięczamy metodzie wykorzystującej reakcję fragmentacji pocisku. Reakcja ta wymaga przyspieszenia ciężkich jonów do energii większej niż 50 MeV/nukleon . Ich prędkość jest wtedy większa niż 30% prędkości światła – są to więc cząstki relatywistyczne. Wiązka takich pocisków pada na tarczę, w której zachodzi reakcja. Przy tak dużej energii przebieg reakcji możemy w przybliżeniu opisać w prosty sposób: gdy jądro pocisku „zahaczy” o jądro tarczy, to zostanie ucięte, a fragment pocisku poleci dalej z prawie niezmienną prędkością i kierunkiem lotu (rys. 1). Wielkość fragmentu zależy od stopnia przekroczenia zderzających się cząstek, który jest losowy. Łatwo zobaczyć, że w wyniku takich zderzeń można wytworzyć w zasadzie każde jądro, które ma mniej nukleonów niż jądro pocisku. Pociskami są jony nuklidów trwałych, zatem prawdopodobieństwo wytworzenia jądra



Rys. 1. Schemat reakcji fragmentacji. W wyniku zderzenia jądra pocisku, rozpędzonego do prędkości relatywistycznej, ze spoczywającym jądrem tarczy pocisk ulega obcięciu. Powstający prefragment jest silnie wzbudzony i wyrzuca nukleony. Powstały fragment porusza się z prędkością bliską początkowej prędkości pocisku

egzotycznego, które znacznie różni się od pocisku, jest bardzo małe, dlatego wymagane są wiązki pocisków o jak największej intensywności. Tarcza jest na tyle cienka, że produkty reakcji, jak i pociski, które nie wywołały reakcji, przelatują przez nią z niewielką stratą energii. Za tarczą mamy więc intensywną wiązkę wszystkich możliwych produktów reakcji i dużą część pierwotnej wiązki pocisków. Z tej różnorodnej mieszaniny musimy teraz wyłowić interesujące nas produkty, których jest zazwyczaj bardzo mało. Służy do tego tzw. separator fragmentów, złożony układ jonowo-optyczny, w którym odpowiednio uformowane pola magnetyczne przepuszczają tylko jony o wybranych cechach. Na koniec, znacznie zredukowana i oczyszczona wiązka produktów kierowana jest do układów detekcyjnych, gdzie dokonuje się pomiarów wyselekcjonowanych produktów (rys. 2).



Rys. 2. Bardzo uproszczony schemat eksperymentu. Wiązka pocisków pada na tarczę, w której zachodzi reakcja fragmentacji. Przez separator fragmentów przechodzą tylko produkty, których masa i ładunek są w wybranym wąskim przedziale. Pomiar czasu przelotu (prędkości), położenia (odchylenia przez pole magnetyczne) oraz straty energii w materiale detektora pozwalają wyznaczyć masę i ładunek produktu w czasie lotu. Ostatnia faza pomiaru, kiedy pocisk wbija się w materiał detektora i ostatecznie zatrzymuje, nazywa się *implantacja*. W eksperymentach omawianych w artykule wszystkie produkty docierające do końcowego detektora były całkowicie zjonizowane – ich ładunek elektryczny był równy liczbie atomowej Z . W końcowej stacji pomiarowej obserwujemy rozpad promieniotwórczy wybranych produktów

Opisana metoda fragmentacji ma kilka ważnych zalet wynikających z dużej prędkości produktów reakcji. Docierają one do końcowych detektorów po czasie rzędu mikrosekundy, co umożliwia badanie przemian o bardzo krótkich czasach życia. Mogą głęboko wbijać się w materiał detektora (*implantacja*), co pozwala rejestrować ich rozpady promieniotwórcze z dużą wydajnością. Ale najważniejsza zaleta wynika z możliwości pełnej identyfikacji jonów w locie. W końcowej części separatora, gdzie intensywność cząstek jest już niewielka, jony przelatują przez kilka cienkich detektorów, które mierzą czas przelotu, położenie, a także straty energii w materiale detektora. Na podstawie tych wartości można niemal natychmiast

i często jednoznacznie określić liczby N i Z lecącego jonu, zanim wpadnie on do końcowej stacji pomiarowej. Skutkiem tego jest nadzwyczajna selektywność – potrafimy identyfikować pojedyncze, wybrane egzotyczne nuklidy, a potem obserwować ich przemiany promieniotwórcze. Zasadnicza idea metody fragmentacji pocisku jest, jak widać, bardzo prosta. Wyzwanie polega na tym, że akceleratory przyspieszające ciężkie jony do wysokiej energii i odpowiednie do tej energii separatory są masywne i kosztowne. Dlatego technikę tę stosuje się tylko w kilku laboratoriach na świecie.

Metoda fragmentacji pocisku okazała się kluczowa w badaniach skrajnie neutrono-deficytowego izotopu żelaza ^{45}Fe . Nuklid ten ma 26 protonów i tylko 19 neutronów, aż o 9 mniej niż najlżejszy trwały izotop tego pierwiastka ^{54}Fe . Na początku nie było wiadomo, czy tak egzotyczny nuklid istnieje, czy da się go w ogóle wytworzyć. Pierwszy eksperyment przeprowadziliśmy z moimi współpracownikami w 1996 roku w niemieckim laboratorium GSI Darmstadt. Pociskami były jony izotopu niklu ^{58}Ni , przyspieszone do energii 600 MeV/nukleon, które padały na tarczę berylową o grubości około 2 cm. Produkty reakcji wpadały do separatora fragmentów o długości około 70 m, na koniec którego docierało około 200 jonów na sekundę. Po trzech dniach eksperymentu zidentyfikowaliśmy wśród nich 3 przypadki ^{45}Fe . Odnalezienie igły w stogu siana nie wydaje się przy tym zadaniem trudnym. Aby powstało jądro ^{45}Fe , od pocisku trzeba oderwać dokładnie 2 protony i 11 neutronów. O tym, jak mało prawdopodobne jest takie zdarzenie, świadczy fakt, że w trakcie pomiarów na tarczę padło około 10^{14} pocisków. W 2001 roku przeprowadziliśmy drugi eksperyment w tym samym laboratorium i w tych samych warunkach, ale tym razem byliśmy przygotowani do detekcji rozpadów. Próba ta zakończyła się dużym sukcesem, gdyż odkryliśmy nowy rodzaj przemiany promieniotwórczej – jednoczesną emisję dwóch protonów ($2p$) przez ^{45}Fe .

Zidentyfikowane jony wychodzące z separatora były zatrzymywane w detektorach krzemowych. Służyły one do rejestracji momentu implantacji jonu w detektor i do pomiaru całkowitej energii wyzwalonej podczas rozpadu promieniotwórczego. Teraz zaobserwowaliśmy 6 przypadków ^{45}Fe . Dla 5 z nich udało się zanotować moment rozpadu i zmierzyć wydzieloną przy tym energię. Wyznaczony czas półrozpadu ^{45}Fe wyniósł około 3 ms. W czterech przypadkach wydzielana się energia około 1 MeV. Dokładna analiza tych zdarzeń, biorąc pod uwagę także informacje z innych detektorów, doprowadziła do wniosku, że można je wyjaśnić tylko założeniem, że z jądra ^{45}Fe zostały wyemitowane dwa protony jednocześnie. Gdyby emitowany był tylko jeden proton, to czas półrozpadu powinien być dużo krótszy, poniżej 10^{-15} s. Dla emisji cząstki α szacunki wskazywały czas rzędu 10^{10} s. Brak obserwacji fotonów o energii 511 keV, emitowanych przy anihilacji pozytonów, wykluczył z kolei przemianę β^+ . Mimo bardzo małej próbki (4 zdarzenia!) argumenty

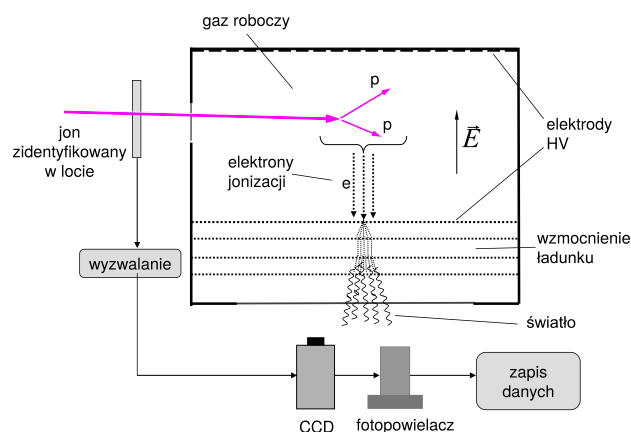
Detektor krzemowy działa tak, że przechodząca przez niego cząstka naładowana, taka jak proton, jonizuje materiał detektora, wskutek czego powstaje impuls elektryczny. Po wzmocnieniu przez elektronikę amplituda tego impulsu jest miarą energii, jaką w detektorze zostawiła ta cząstka. W naszej sytuacji jądro ^{45}Fe było wбите głęboko w dość gruby detektor, tak że emitowane cząstki musiały się zatrzymać wewnątrz niego, czyli zostawić w nim całą swoją energię. Jeśli emitowane są dwie cząstki jednocześnie, to każda z nich daje swój impuls, ale oba te impulsy nakładają się – elektronika odczytuje to jako jeden impuls, tyle że większy. Nie ma możliwości zobaczenia, czy rejestrowany impuls był wywołany przez jeden proton o większej energii, czy dwa jednoczesne protony o mniejszych energiach. Nie można też sprawdzić, jaka to była cząstka – czy proton, czy może cząstka alfa. Widzimy tylko impuls, który mówi, że nastąpił rozpad z emisją cząstki lub cząstek, i mierzymy całkowitą energię, jaka się wydzieliła. Natomiast detektor gazowy pozwala śledzić trajektorie poszczególnych cząstek.

na rzecz hipotezy emisji $2p$ były mocne i statystycznie wiarygodne. Co więcej, w podobnym eksperymencie we francuskim laboratorium GANIL, gdzie także zastosowano reakcję fragmentacji wiązki ^{58}Ni , ale przy niższej energii, 75 MeV/nukleon, zanotowano 12 przypadków rozpadu ^{45}Fe , w pełni potwierdzając obserwacje z GSI.

Pozostał jednak pewien niedosyt. Podkreśliśmy, że wykorzystywany w opisanym eksperymencie detektor krzemowy nie rejestrował dwóch oddzielnych protonów, tylko sumę ich energii. A chcielibyśmy wiedzieć, jak oba protony dzielą się tą energią i jaki jest statystyczny rozkład kątów między torami cząstek. Aby w pełni poznać ten nowy rodzaj promieniotwórczości, należało zbudować urządzenie, które zarejestruje tory lotu i energię każdego z protonów osobno.

Do tego celu doskonale nadaje się detektor wypełniony gazem, bo w ośrodku o małej gęstości tory cząstek są dostatecznie długie. Do obserwacji torów cząstek w przestrzeni fizycy cząstek elementarnych rozwinęli technikę komór dryfowych z projekcją czasu (TPC, *Time Projection Chamber*). Postanowiliśmy zbudować detektor do obserwacji rozpadów jądrowych w oparciu o tę ideę. Kluczową rolę odegrali tu nasi koledzy z pracowni detektorów dla fizyki cząstek, a w szczególności prof. Wojciech Dominik, który opracował zupełnie nowatorską metodę odczytu sygnałów.

W uproszczeniu zasada działania naszego detektora jest następująca (rys. 3). Jego komora wypełniona jest mieszkanką gazową, głównie helu i argonu. Cząstki naładowane poruszające się w tym gazie, takie jak



Rys. 3. Zasada działania detektora OTC

wpadający jon lub protony emitowane podczas rozpadu, jonizują gaz (odrywają elektrony od atomów gazu), przez co tracą energię, aż do zatrzymania. W objętości aktywnej występuje jednorodne pole elektryczne, więc oderwane elektrony dryfują w tym polu ze stałą prędkością (rzędu 1 cm/ μs) w kierunku płaszczyzny anody, gdzie znajduje się obszar tzw. wzmocnienia ładunkowego. Następuje tu znaczne powielenie liczby elektronów w układzie specjalnych elektrod wytwarzających silne pola elektryczne. W typowych detektorach TPC powielone elektrony zbiera się na elektrodach odczytujących jako impuls elektryczny i przetwarza dalej metodami elektronicznymi. Innowacyjność naszego podejścia polega na tym, że zamiast odczytywać sygnały elektryczne, rejestrujemy światło emitowane przez atomy gazu wzbudzone przez elektrony na końcowym etapie wzmocnienia. Do tego celu służy specjalna kamera cyfrowa CCD oraz fotopowielacz. Migawkę wyzwalamy, na pewien ustalony czas ekspozycji, w momencie, gdy do detektora wpada interesujący jon. Na uzyskanej fotografii zobaczymy rzut torów cząstek, przelatujących przez detektor w trakcie ekspozycji, na płaszczyznę anody. Z kolei fotopowielacz rejestruje całkowite natężenie światła w funkcji czasu – jego sygnał wyjściowy jest próbkowany przez oscyloskop cyfrowy. Pozwala to ustalić czasową kolejność zdarzeń i zmierzyć np. czas, jaki upływa między zatrzymaniem jonu w gazie a jego rozpadem z emisją cząstek. Co więcej, dzięki stałej i znanej prędkości dryfu elektronów w komorze, czasowy przebieg sygnału z fotopowielacza niesie informację o położeniu w kierunku dryfu, prostopadłym do powierzchni anody. Łącząc informacje z CCD i z fotopowielacza, można w pełni zrekonstruować tor cząstki w przestrzeni i wyznaczyć jej energię. Ze względu na kluczową rolę detekcji światła w naszym detektorze nazwaliśmy go OTC (*Optical TPC*). Jest to urządzenie unikatowe, a przy tym znacznie prostsze i tańsze od klasycznych detektorów TPC ze skomplikowanym elektronicznym odczytem sygnałów.

W 2007 r., wyposażeni w detektor OTC, podjęliśmy kolejną próbę zbadania ^{45}Fe , tym razem w amerykańskim laboratorium NSCL przy Michigan State University w East Lansing. Ponownie wykorzystaliśmy wiązkę ^{58}Ni , ale o energii 160 MeV/nukleon. Intensywność wiązki była dużo większa niż w poprzednich eksperymentach – teraz zaobserwowaliśmy sto kilkadziesiąt przypadków ^{45}Fe ! Ale co najważniejsze, na zdjęciach CCD zobaczyliśmy wyraźne ślady dwóch protonów wychodzących z punktu, w którym zatrzymał się jon ^{45}Fe (rys. 4ab, zobacz na okładce). Około 90 zdarzeń emisji $2p$ udało się w pełni zrekonstruować, co przyniosło pierwsze informacje o mechanizmie tego zjawiska. Okazało się, że jest to proces 3-ciałowy, którego nie da się opisać jako sekwencji rozpadów dwu-ciałowych. Porównanie zmierzonego rozkładu kątów między protonami z modelem teoretycznym wykazało, że rozkład ten niesie pewną informację o stanie jądra przed rozpadem, a to bardzo cenna wiedza o nuklidzie tak egzotycznym i dostępnym w tak nikłych ilościach.

Na fotografiach rozpadów ^{45}Fe ujrzeliśmy jeszcze coś ciekawego! Mimo że najczęstszym sposobem rozpadu ^{45}Fe jest emisja $2p$, to ulega on też, jak każdy nuklid neutrono-deficytowy, przemianom β^+ . W przypadku nuklidów dalekich od trwałości jądro po przemianie β jest często tak wzbudzone, że wyrzuca protony – jest to znane zjawisko tak zwanej emisji cząstek opóźnionych. I rzeczywiście, wśród rozpadów ^{45}Fe zaobserwowaliśmy około 40 przypadków przemiany β^+ z emisją jednego i dwóch protonów opóźnionych, zgodnie z oczekiwaniem. Takie protony mogliśmy łatwo odróżnić od protonów z emisji $2p$, ponieważ mają dużo większą energię, a zatem dłuższe tory. Ku naszemu zaskoczeniu zobaczyliśmy jednak kilka zdarzeń z emisją trzech protonów opóźnionych – była to pierwsza obserwacja takiego procesu (rys. 4c, zob. okładka). I to jeszcze nie koniec. W trakcie eksperymentu do detektora wpadały też jony ^{43}Cr , który jest również bardzo egzotycznym nuklidem i którego rozpad rejestrowaliśmy (^{43}Cr tworzy się także po emisji $2p$ przez ^{45}Fe). Wśród nich znaleźliśmy zdarzenia emisji jednego, dwóch, a także trzech protonów opóźnionych. Odkryliśmy więc ten nowy proces od razu w dwóch nuklidach!

W następnym eksperymencie, który przeprowadzony został w 2011 roku w NSCL, użyliśmy detektora OTPC do badania innego bardzo egzotycznego nuklidu, ^{48}Ni . Jako pocisku użyliśmy ponownie ^{58}Ni , który jest najlżejszym trwałym izotopem niklu. Aby wytworzyć ^{48}Ni , w reakcji trzeba oderwać od pocisku dokładnie 10 neutronów i ani jednego protonu. Takie zdarzenie jest niezwykle mało prawdopodobne. Dlatego mimo bardzo dobrych warunków doświadczalnych,

po dziesięciu dniach pomiaru, zaobserwowaliśmy tylko 6 rozpadów ^{48}Ni . Cztery z nich przedstawiały jednoczesną emisję dwóch protonów (rys. 5, zob. okładka)! Odkryliśmy w ten sposób kolejny przypadek promieniotwórczości $2p$. Doniesienie o tym wyniku ukazało się w czasopiśmie *Physical Review C*. W zeszłym roku czasopismo to obchodziło 50. rocznicę powstania i z tej okazji redakcja wybrała spośród wszystkich opublikowanych prac „kamienie milowe” 50-lecia. Wśród wyróżnionych publikacji znalazła się nasza, o emisji $2p$ przez ^{48}Ni , i była jedyną, której głównymi autorami byli fizycy polscy.

Detektor OTPC został wykorzystany w wielu innych projektach poświęconych poszukiwaniu i badaniu rzadkich przemian egzotycznych nuklidów. Wykazaliśmy między innymi, że proces emisji trzech protonów opóźnionych zachodzi też w ^{31}Ar i ^{23}Si . Znamy więc już cztery nuklidy, w których zachodzi taka przemiana – i wszystkie zostały odkryte za pomocą naszego detektora. Badaliśmy też bardzo rzadkie przemiany nuklidów z nadmiarem neutronów. Na przykład po przemianie beta ^6He raz na milion przypadków stan końcowy rozpada się na cząstkę α i deuteron. W laboratorium CERN mogliśmy wbijać do detektora paczki zawierające od kilkuset do kilku tysięcy jonów ^6He i następnie czekać na rozpad z emisją cząstek. Udało nam się takie rozpad zaobserwować (rys. 6, zob. okładka) i uzyskać nowe, wcześniej niedostępne informacje o ich przebiegu.

W przyszłości planujemy następne eksperymenty. Mamy nadzieję, że uda nam się zrobić jeszcze wiele fotografii rzadkich przemian jądrowych, które poszerzą naszą wiedzę o nuklidach na granicy istnienia.



Zadania

Przygotował Dominik BUREK

M 1675. Na tablicy wypisane są liczby od 1 do 1 000 000. Ahmed wykreśla wszystkie liczby pierwsze, a następnie Hamza skreśla wszystkie liczby podzielne przez

2, 3, 4, ..., 100, oraz 1000, 1001, 1002, ..., 10 000.

Udowodnij, że iloczyn pozostałych liczb jest potęgą (o wykładniku większym niż 1) pewnej liczby całkowitej. Rozwiązanie na str. 17

M 1676. W kole matematycznym jest 49 uczniów. Wiadomo, że jeśli trzech członków tego koła nie zna się parami, to dwójka z nich ma w kole wspólnego znajomego. Udowodnij, że jeden z uczniów ma co najmniej 6 znajomych w kole.

Rozwiązanie na str. 15

M 1677. Punkty P i Q leżą na odcinku AB trójkąta nierównoramiennego ABC , tak że $AC = AP$ i $BC = BQ$. Symetralna odcinka PQ przecina dwusieczną kąta ACB w punkcie R (wewnątrz trójkąta). Udowodnij, że

$$\sphericalangle PRQ + \sphericalangle ACB = 180^\circ.$$

Rozwiązanie na str. 14

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1025. Wewnętrzny promień cienkiej rurki szklanej jest równy r . Jaki jest „widoczny” promień wewnętrzny d rurki, gdy obserwowana jest z zewnątrz, z odległości znacznie większej od jej zewnętrznego promienia R ?

Rurka wykonana jest ze szkła o współczynniku załamania n .

Rozwiązanie na str. 1

F 1026. Neutrino są cząstkami elementarnymi o bardzo małej masie spoczynkowej i bardzo słabo oddziałującymi z materią, co powoduje, że niezmiernie trudno je badać. 23 lutego 1987 roku w detektorze Kamiokande zarejestrowano „błysk” neutrin trwający $\Delta t \approx 2$ s. Energie zarejestrowanych neutrin mieściły się w zakresie od około 8 MeV do około 40 MeV. Przyjęto, że zostały one wyemitowane podczas wybuchu supernowej SN1987A odległej od Ziemi o $L \approx 170\,000$ lat świetlnych. Przyjmij, że obserwowane neutrino wyemitowane zostały jednocześnie, i na tej podstawie oszacuj ich masę spoczynkową m_ν .

Rozwiązanie na str. 11