

POSTĘPY FIZYKI

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO POŚWIĘCONE UPOWSZECZNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ



Słońce w koronie

Polscy nauczyciele w CERN

Trzy pokolenia Olimpiady Fizycznej

Andrzej Trautman 1933–2026

2 / 2026
TOM 77

UKAZUJE SIĘ OD 1949 ROKU

ZARZĄD GŁÓWNY:

Stanisław Kistryn (prezes), Bogdan Kowalski (sekretarz generalny), Izabela Skwira-Chalot (skarbnik), Teresa Rząca-Urban (prezes honorowy), Jerzy Garbarczyk, Dariusz Grech, Bohdan Grządkowski, Jerzy Jarosz, Dariusz Kajewski, Wiesław Leoński, Andrzej Łapiński, Adam Maj, Aneta Mika, Wiesław Nowak, Aneta Szczygielska-Łaciak, Andrzej Wyszomółka (wiceprezes)

BIURO ZARZĄDU GŁÓWNEGO:

ul. Pasteura 5

02-093 Warszawa

tel. (+22) 553 28 56 pok. 4.56 (4. piętro)

e-mail: biuro@ptf.net.pl

Polskie Towarzystwo Fizyczne

www.ptf.net.pl

Jesteśmy organizacją pożytku
publicznego, KRS: 0000051642

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW:

Krzysztof Szymański (Białystok), Yuriy Zorenko (Bydgoszcz), Piotr Gębara (Częstochowa), Paweł Możejko (Gdańsk), Jerzy Bodzenta (Gliwice), Paweł Zajdel (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Roman Płaneta (Kraków), Marcin Turek (Lublin), Karol Jakub Jędrzejczak (Łódź), Katarzyna Książek (Opole), Andrzej Łapiński (Poznań), Paweł Jakubczyk (Rzeszów), Tomasz Wróblewski (Słupsk), Adam Balcerzak (Szczecin), Wiesław Nowak (Toruń), Krzysztof Petelczyc (Warszawa), Ewa Dębowska (Wrocław), Justyna Kalaga (Zielona Góra)

SPIS TREŚCI

Słońce w koronie (M. Tomczak)	2
O promieniowaniu grawitacyjnym (A. Trautman)	7
Stopy o wysokiej entropii – skąd ten szum wokół nich? (A. Pikul, R. Idczak)	11
Kwartal Badań	17
Polscy nauczyciele w CERN (T. Kacik)	20
Scenariusz lekcji: Od kwarków do cząsteczek – budujemy modele materii	24
Detekcja mionów za pomocą tub Geigera-Müllera (A. Siótkowska)	27
Fizyka – zabija magię? A może jest wielkim iluzjonistą? (M. Karasińska)	30
Fizyka zaczyna się od ludzi Rozmowa z prof. Mirosławem Karpierzem	32
Zapytaj Fizyka	35
Trzy pokolenia Olimpiady Fizycznej (J. Mostowski)	37
Czarnobylska osłona (M. Rabiński)	43
Andrzej Trautman (1933–2026) (J. Kowalski-Glikman)	46
Tadeusz Jackowicz Korczyński (1960–2026) (A. Gadomski)	49
Karol Heinz Jankowski (1937–2025) (I. Grabowski, J. Karnowski)	50
Recenzja: Słownik biograficzny fizyków polskich (J. Garbarczyk)	51
Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego	52

REDAKCJA:

Jerzy Garbarczyk – redaktor naczelny
Krzysztof Petelczyc – sekretarz redakcji
Adam Pikul
Agnieszka Gąsczyk-Furtak
e-mail: postepy.fizyki@ptf.net.pl

RADA REDAKCYJNA:

Adam Maj (przewodniczący)
Andrzej Kajetan Wróblewski (czł. honorowy)
Grażyna Chetkowska
Jerzy Garbarczyk
Maciej Lisicki
Tomasz Pietrzak
Adam Pikul
Piotr Sułkowski
Andrzej Wilczek

ISSN 0032-5430, ISSN 2658-2422 (online)

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Kwartalnik POSTĘPY FIZYKI jest wydawany
we współpracy z WYDZIAŁEM FIZYKI
UNIwersytetu Warszawskiego

Szanowni Czytelnicy,

z ogromną przyjemnością przekazujemy Państwu drugi w 2026 roku numer Postępów Fizyki. Być może część z Państwa przyzwyczała się już do nowej struktury naszego kwartalnika, na którą składają się trzy wyodrębnione działy poświęcone kolejno: badaniom naukowym, dydaktyce fizyki oraz wydarzeniom i postaciom ważnym dla naszego środowiska.



W dziale **BADANIA I PERSPEKTYWY** zamieszczamy autoreferat doktorski zmarłego niedawno prof. Andrzeja Trautmana. Jest to, przedstawiony w nowej szacie graficznej, przedruk jego artykułu opublikowanego w PF w 1959 roku, dotyczącego promieniowania grawitacyjnego. Ponadto, w dziale tym proponujemy dwa inne artykuły: jeden o tegorocznym zaćmieniu Słońca (które nastąpi 12 sierpnia 2026 r.) i drugi o niezwykłych właściwościach wysoko-entropowych stopów. Dopełnieniem działu jest *Kwartal badań*, czyli przedstawienie najważniejszych, naszym zdaniem, publikacji naukowych z ostatnich trzech miesięcy.



W dziale **SZKOŁA I UCZELNIA** przedstawiamy rozmowę z Mirosławem Karpierzem, prorektorem Politechniki Warszawskiej i obecnym przewodniczącym Komitetu Fizyki PAN. Poza tym informujemy, między innymi, o niedawnej wizycie polskich nauczycieli w CERN-ie, proponujemy scenariusz lekcji szkolnej o strukturze materii oraz pogłębiamy wiedzę młodszych (a może też starszych) fizyków, odpowiadając na pytania w cyklicznej rubryce *Zapytaj Fizyka*.



W dziale **LUDZIE I WYDARZENIA** publikujemy trzy wspomnienia, w tym o prof. Andrzeju Trautmanie (1933–2026) oraz *Kronikę* naszego środowiska, w której dużo piszemy o zakończonej niedawno jubileuszowej 75. Olimpiadzie Fizycznej. W związku z tym jubileuszem publikujemy też okolicznościowy artykuł przedstawiający historię kolejnych olimpiad, przeplataną fotografiami oraz uzupełnioną interesującymi danymi statystycznymi. Warto pamiętać, że niewiele młodsza od Postępów Fizyki Olimpiada zawsze odgrywała i nadal odgrywa wielką rolę w dopływie talentów zasilających fizykę w naszym kraju.

Serdecznie zapraszam do lektury!

Jerzy E. Garbarczyk
redaktor naczelny



MICHAŁ TOMCZAK (UNIwersytet Wrocławski, Wydział Fizyki i Astronomii)

SŁOŃCE W KORONIE

12 sierpnia 2026 r. Słońce nad Polską niemal zniknie za tarczą Księżyca, a w północnej Hiszpanii odsłoni na chwilę swoją koronę — subtelną, rozległą i na co dzień niewidoczną część atmosfery. To widowisko, znane głównie jako jedno z najbardziej poruszających zjawisk na niebie, jest zarazem wyjątkową okazją do przypomnienia, jak wiele całkowite zaćmienia wniosły do poznania naszej gwiazdy. Od dawnych wypraw zaćmieniowych, przez zagadkę coronium, po współczesne badania rozbłysków, koronalnych wyrzutów materii i pogody kosmicznej, korona słoneczna pozostaje obszarem pełnym tajemnic — pięknym, dynamicznym i mającym realny wpływ na życie technologicznej cywilizacji na Ziemi.

12 sierpnia 2026 r. czeka nas pamiętne widowisko na niebie. Będzie nim częściowe zaćmienie Słońca o bardzo wysokiej fazie osiągnącej w Polsce nawet 0,85. Warto nadmienić, że ostatni raz w naszym kraju częściowe zaćmienie Słońca o wyższej fazie nastąpiło jeszcze w poprzednim wieku, bo 11 sierpnia 1999 r.

Tak wysoka faza oznacza, że stosunkowo blisko Polski można spodziewać się sytuacji, w której cała tarcza Słońca skryje się za naszym satelitą. I rzeczywiście, pas całkowitego zaćmienia przetnie północną część Półwyspu Iberyjskiego. Hiszpanię, obleganą przez turystów każdego lata, czeka w tym dniu dodatkowy najazd miłośników turystyki zaćmieniowej. Co ciekawe, dwie największe metropolie, Barcelona i Madryt, powinny cieszyć się wówczas jednak zaskakująco niską frekwencją, ponieważ znajdują się poza wyróżnionym pasem dającym możliwość obserwowania całkowitego zaćmienia Słońca (Rys. 1).

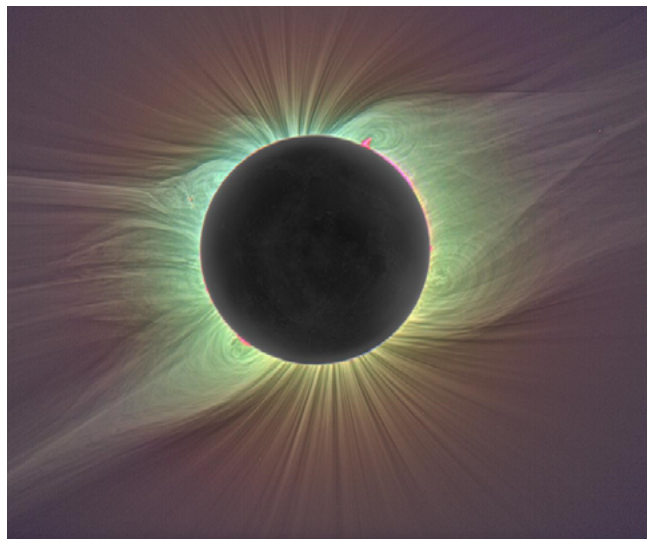


Rys. 1. Usytuowanie pasa całkowitego zaćmienia Słońca 12 sierpnia 2026 r. na obszarze Hiszpanii

Mogłoby się wydawać, że nie ma większego znaczenia, czy tarcza słoneczna jest całkowicie przesłonięta, czy też jakiś minimalny jej fragment nadal pozostaje odkryty. Różnica jest jednak fundamentalna! Jasne światło fotosfery rozpraszające się w ziemskiej atmosferze nie pozwala dostrzec subtelnego świecenia korony słonecznej. Każdy, kto choć raz był świadkiem całkowitego zaćmienia Słońca, może potwierdzić, że kontrast pomiędzy zazwyczaj oglądaną na niebie przeraźliwie jasną kulą fotosfery a fantazyjnie porożpinaną wokół niej otoczką emanującą dyskretnym blaskiem należy do przeżyć trwale zapadających w pamięć.

Chociaż każdego roku zjawisko zaćmienia Słońca może zachodzić od dwa do nawet pięciu razy, mieszkaniowiec wybranego miejsca na powierzchni naszej planety ma statystycznie niktę szansę podziwiania całkowitego zaćmienia Słońca w trakcie swojego życia. Wynika to z kilku faktów: korytarze pełnego zaćmienia są stosunkowo wąskie, często przebiegają przez tereny niezamieszkałe, a ponadto pogoda zawsze może splotać obserwatorowi figla. Kto pragnie więc zobaczyć koronę słoneczną na własne oczy, musi podróżować! Bardzo długo jednak problemem było dotarcie w odpowiednim czasie we wskazane miejsce na kuli ziemskiej.

Pojęcie wyprawy zaćmieniowej weszło do kalendarza wielu zawodowych astronomów dopiero w drugiej połowie XIX wieku, a klasyczna turystyka zaćmieniowa upowszechniła się mniej więcej 100 lat później. O ile dla większości widzów obserwacja zjawiska całkowitego zaćmienia pozostanie przeżyciem natury estetyczno-kontemplacyjnej, o tyle dla astronomów obserwacje korony stanowiły wyzwanie, bo zmuszały do udzielenia odpowiedzi na pytanie o naturę tego, co uwidacznia się oczom szczęśliwca.

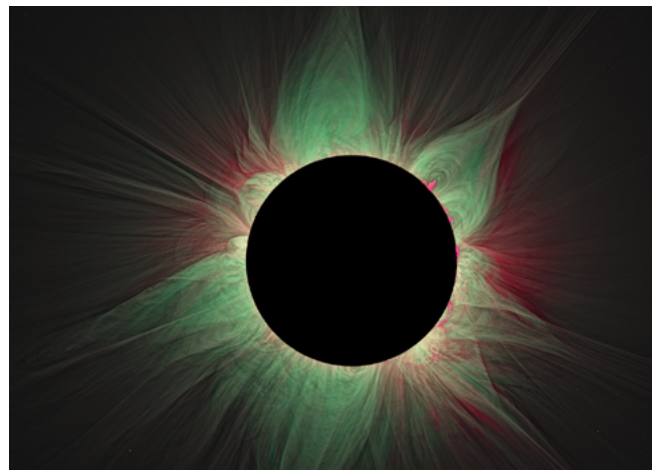


Rys. 2. Korona Słońca zarejestrowana przez Miroslava Druckmüllera w trakcie całkowitego zaćmienia Słońca w 2008 r.

POZNAWANIE TAJEMNIC KORONY SŁONECZNEJ

Definitywnie odrzucono najpierw hipotezę, że w trakcie całkowitego zaćmienia Słońca uwidaczniają się chmury spływające... Księżyc, a przekonujących dowodów dostarczył m.in. warszawski astronom Adam Prażmowski (1821–1885). Stosunkowo szybko zauważona została zasadnicza różnica w wyglądzie korony w zależności od stopnia zaplamienia powierzchni Słońca. Występowanie plam słonecznych jest najdłużej obserwowanym wskaźnikiem aktywności magnetycznej naszej gwiazdy i właśnie na tej podstawie wprowadzone zostało pojęcie 11-letnich cykli aktywności z ich maksimami i minimami. I tak, korona słoneczna obserwowana w okolicach minimum aktywności jest znacząco asymetryczna, z wyraźną koncentracją wyciągniętych struktur, nazywanych proporcami, w obszarze okołorównikowym (Rys. 2). To właśnie one nasuwają skojarzenia z elementami ozdobnymi korony królewskiej, od której wzięła nazwę ta część atmosfery Słońca. Natomiast w maksimum aktywności proporce rozbiegają się niemal symetrycznie we wszystkich kierunkach (Rys. 3). Ponieważ ich kształt trudno jest wytłumaczyć wyłącznie działaniem grawitacji, stały się w ten sposób jedną z pierwszych przesłanek obecności pola magnetycznego w atmosferze Słońca. Nastąpiło to dużo wcześniej niż George Ellery Hale (1868–1938) zauważył rozszczepienia zeemanowskie niektórych linii widmowych zarejestrowanych w centralnych częściach plam słonecznych.

Zadziwiająco długo nie można było dać definitywnej odpowiedzi na pytanie, jakie właściwie warunki fizyczne panują w koronie słonecznej. Wiedzę tę pozyskiwano na podstawie analizy spektralnej, która bazowała jednak głównie na identyfikacji pierwiastków odpowiedzialnych za pochodzenie zarejestrowanych linii widmowych poprzez analogię z pomiarami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych. Widma korony rejestrowane często w warunkach polowych i pod ogromną presją czasową (zaćmienie całkowite trwa w danym miejscu na powierzchni Ziemi nie dłużej niż 7,5 minuty!) były zaskakująco zróżnicowane. Niekiedy bardzo przypominały widmo fotosfery z licznymi liniami absorpcyjnymi opisanymi jeszcze przez Josepha von Fraunhofera (1787–1826). Innym razem w ogóle nie udawało się wyodrębnić jakichkolwiek linii widmowych, choć kształt *continuum* nie różnił się od tego, który był znany dla fotosfery.



Rys. 3. Korona Słońca zarejestrowana przez Miroslava Druckmüllera w trakcie całkowitego zaćmienia Słońca w 2023 r.

Obserwacje te sugerowały mocno, że temperatura korony nie różni się znacząco od temperatury fotosfery, a słabsza emisja może być spowodowana jedynie mniejszą gęstością tej warstwy. Kluczem do rozwiązania okazała się zielona linia emisyjna o długości fali 5303 Å zaobserwowana w trakcie całkowitego zaćmienia w 1869 r. przez Charlesa Augustusa Younga (1834–1908) i Williama Harknessa (1837–1903), której nie udało się wówczas zidentyfikować. Ponieważ w latach 1860–1863 istnienie kilku pierwiastków (cezu, rubidu, talu, indu) zostało udowodnione na podstawie obecności linii widmowych, których nie można było przypisać żadnemu znanemu wcześniej pierwiastkowi, takie rozwiązanie zaproponowano również w tym przypadku, postulując istnienie nieznanego dotąd pierwiastka o nazwie *coronium*.

Na weryfikację tej hipotezy trzeba było czekać aż 70 lat. W zupełnie już innej epoce, stosując formalizm mechaniki kwantowej, Bengt Edlén (1906–1993) i Walter Grotrian (1890–1954) pokazali, że *coronium* nie istnieje, a tajemnicza linia pochodzi od jonu trzynastokrotnie zjonizowanego żelaza, który wymaga bardzo wysokich temperatur niedostępnych w ówczesnych laboratoriach. Zamiast dworować sobie z naiwności wyznawców *coronium*, warto przypomnieć, iż w widmie korony zarejestrowanym przez Pierre Julesa Janssena (1824–1907) podczas całkowitego zaćmienia w 1868 r. żółta linia o długości 5875 Å zinterpretowana została jako dowód na istnienie helu – pierwiastka nieznanego wówczas na Ziemi, a Janssen figuruje w dzisiejszych almanachach jako jego odkrywca.

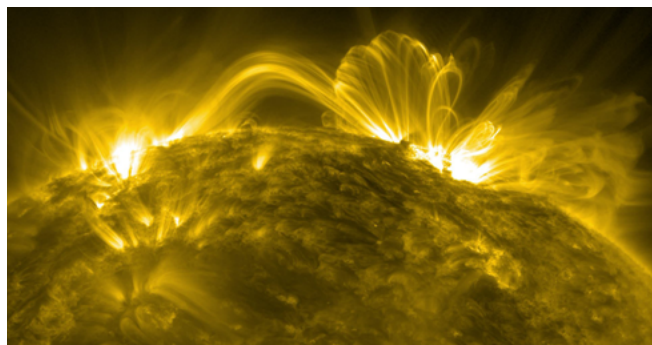
Linii podobnych do zielonej linii żelaza zidentyfikowano w widmie korony więcej i wszystkie pochodziły od wysoko zjonizowanych atomów pierwiastków dobrze znanych na Ziemi (żelaza, niklu, wapnia). Co więcej, wszystkie zostały zaklasyfikowane jako linie wzbronione, a więc mające szanse zaistnienia jedynie w bardzo rozrzedzonym ośrodku. Od tego też czasu używamy pojęcia plazmy koronalnej jako synonimu materii o milionowych temperaturach i bardzo niskiej gęstości. Z chwilą podania prawidłowej interpretacji można było logicznie wyjaśnić wszystkie rodzaje widm, jakie dotąd zostały zmierzone dla korony. Gorąca materia nie emituje promieniowania w zakresie widzialnym z wyjątkiem linii wzbronionych, a świecenie korony obserwowane w trakcie całkowitego zaćmienia to światło fotosfery odbite przez materię korony. Bardzo ruchliwe swobodne elektrony rozmywają drobne detale widma, jakim są linie, natomiast zdecydowanie wolniejsze ziarna pyłu wiernie odtwarzają kształt widma fotosferycznego.

W latach 20. XX wieku pojawiły się pierwsze koronografy – teleskopy wyposażone w tzw. sztuczny księżyc blokujący światło fotosfery – oraz wąskopasmowe filtry interferencyjno-polarizacyjne, które w ograniczonym zakresie pozwalały na obserwowanie korony słonecznej bez konieczności wyczekiwania na całkowite zaćmienie Słońca. Nadal dawały jednak możliwość przyglądania się koronie jedynie z boku, a słoneczne światło rozproszone w ziemskiej atmosferze ograniczało możliwość identyfikowania szczegółów obrazu do obszaru stosunkowo blisko powierzchni Słońca.

KORONA W PEŁNEJ KRASIE

Zgodnie z prawem przesunięć Wiena gorąca plazma koronalna świeci głównie w dalekim ultrafiolecie i w miękkim promieniowaniu rentgenowskim, a te zakresy fal elektromagnetycznych są efektywnie absorbowane przez ziemską atmosferę. Dlatego koronę w pełnej krasie zaczęto podziwiać dopiero dzięki obserwacjom satelitarnym. Nareszcie też możliwe stało się jej oglądanie również na tle tarczy Słońca, ponieważ stosunkowo chłodna fotosfera nie dodaje niczego od siebie w tym zakresie widma.

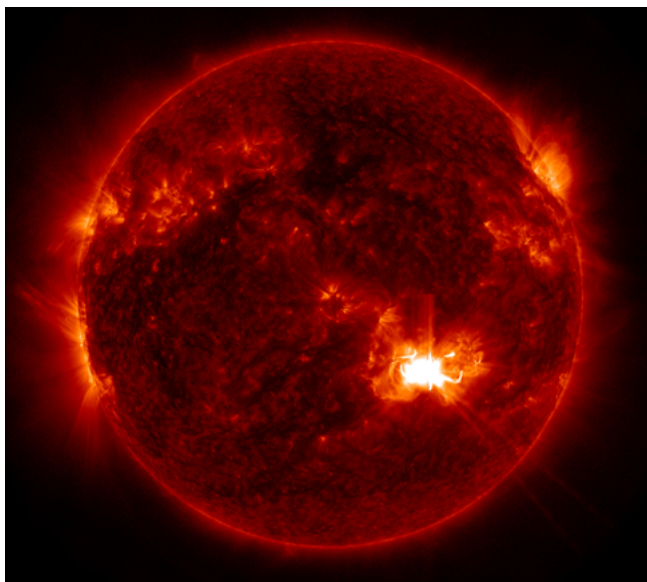
Dzięki rozwojowi coraz doskonalszych, trwalszych i bardziej uniwersalnych instrumentów koronę słoneczną można dziś śledzić niemal nieprzerwanie. Obserwacje prowadzone z pobliza Ziemi, m.in. dzięki satelitom SOHO, Hinode i SDO, obejmując różne zakresy promieniowania elektromagnetycznego, a misje, takie jak STeReO, Parker Solar Probe i Solar Orbiter pozwalają oglądać koronę także z innych kierunków i odległości.



Rys. 4. Fragment korony Słońca zarejestrowany przez satelitę SDO 12 lipca 2012 r. za pomocą filtra 171 Å

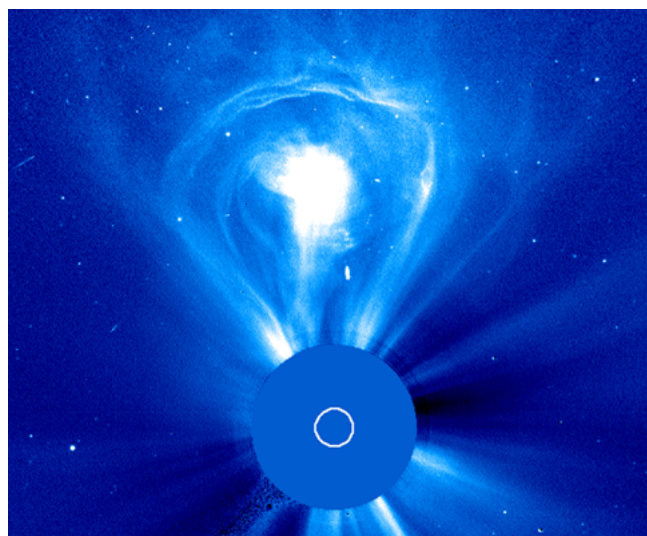
Szeroko dostępne w Internecie przykłady obserwacji ukazują niezwykle zróżnicowane bogactwo struktur występujących w koronie. Dominują pętle magnetyczne zakotwiczone na powierzchni Słońca i grupujące się w fantazyjnie skomplikowane arkady, wachlarze, fontanny i inne, jeszcze bardziej zawikłane struktury (Rys. 4). Ich rozmiary zawierają się w bardzo szerokim zakresie wartości: od setek kilometrów (to granica rozdzielczości obecnie stosowanych teleskopów dla bardzo krótkich fal) aż po kilka milionów kilometrów, a więc znacznie więcej niż promień naszej gwiazdy. Obserwowane struktury podlegają nieustannym zmianom zachodzącym w różnej skali czasowej, ponieważ pętle te oscylują, podnoszą się, kurczą, ulegają deformacji lub nikną, by ustąpić miejsca nowym. Ponadto w każdej z nich zachodzi nieustanna wędrówka plazmy na zewnątrz lub do środka, w zależności od chwilowego bilansu zysków albo strat energetycznych. W konsekwencji zmienia się temperatura i koncentracja plazmy, co wpływa na nieustanne lokalne wzrosty i spadki jasności.

Co jakiś czas na tym jakże żywiołowo zmieniającym się tle uwidaczniają się zjawiska utożsamiane z aktywnością magnetyczną naszej gwiazdy. Niekiedy któraś z tych struktur gwałtownie jaśnieje w wyniku uwolnienia większej porcji energii zgmagazynowanej dotąd w polu magnetycznym. Jest to duże wyzwanie dla detektorów, ponieważ przy dotychczasowym czasie ekspozycji sygnał w tym miejscu ulega silnej saturacji. Z drugiej jednak strony skrócenie czasu ekspozycji powoduje, że słabiej świecące otoczenie nie zdąży się naświetlić i wygląda, jakby cała korona przygasła (Rys. 5).



Rys. 5. Rozbłysk słoneczny klasy X2.2 zarejestrowany przez satelitę SDO 9 maja 2024 r. za pomocą filtra 131 Å

W innych okolicznościach zmiany w dotychczasowej konfiguracji pola magnetycznego mogą doprowadzić lokalnie do utraty równowagi i erupcji, w wyniku której cała struktura opuszcza koronę i zaczyna rozchodzić się w przestrzeni międzyplanetarnej w postaci obłoku plazmy, który niesie ze sobą pole magnetyczne (Rys. 6). Ciekawostką jest, że te spektakularne zjawiska, określane dzisiaj jako koronalne wyrzuty materii (ang. Coronal Mass Ejections, CMEs), zostały zidentyfikowane pierwszy raz dopiero na początku lat 70. XX wieku dzięki umieszczeniu koronografu na pokładzie jednej z pierwszych misji satelitarnych.



Rys. 6. Koronalny wyrzut materii zarejestrowany 27 lutego 2000 r. przez koronograf LASCO zainstalowany na satelicie SoHO. Białe kółko pokazuje usytuowanie tarczy Słońca, zaś większe koło – obszar przestoniaty za pomocą sztucznego księżyca



Rys. 7. Układ trzech ciał – Słońca, Ziemi i Księżyca – daje zadziwiające bogactwo wariantów zaćmień Słońca, jakie możemy obserwować z powierzchni naszej planety. Kluczowe znaczenie ma fakt, że Słońce jest niemal tyle razy większe od Księżyca, ile wynosi iloraz średnich odległości Ziemia–Słońce i Ziemia–Księżyc. Oznacza to, że oba ciała niebieskie mają porównywalne rozmiary kątowe (na ilustracji proporcje nie są zachowane).

Średnio co 29,5 dnia Księżyc jest w nowiu, czyli ustawia się pomiędzy Ziemią i Słońcem. Ponieważ jednak płaszczyzna jego orbity okołozemskiej tworzy kąt 5 stopni z płaszczyzną orbity okołosłonecznej Ziemi, zaćmienie Słońca może nastąpić jedynie wtedy, gdy nów przypada w pobliżu węzłów, czyli miejsc przecięcia się tych dwóch płaszczyzn. Kiedy nów następuje daleko od węzłów, stożek cienia Księżyca omija Ziemię.

Sytuację dodatkowo komplikuje fakt, że orbita Ziemi i orbita Księżyca nie są idealnie kołiste. Jeżeli więc Księżyc będąc w nowiu i w pobliżu któregoś z węzłów swojej orbity znajduje się w okolicach apogeum (tzn. jego rozmiar kątowy jest mniejszy niż zwykle), a dodatkowo Ziemia jest blisko perihelium (tzn. rozmiar kątowy Słońca jest większy niż zwykle), nie będzie wówczas w stanie zasłonić całej tarczy Słońca i nastąpi zaćmienie obrączkowe

ZDANI NA ŁASKĘ JEJ KRÓLEWSKIEJ MOŚCI

Praktycznie dopiero te współczesne obserwacje korony słonecznej uzmysłowiły nam w pełnej okazałości, jak bardzo jesteśmy na Ziemi podatni na procesy nieustannie zachodzące właśnie w tej części atmosfery Słońca. Rozbłyśki potrafią znacząco zmienić stan ziemskiej jonosfery, co wprowadza zakłócenia w łączności radiowej z aparaturą pracującą na niezliczonej już obecnie liczbie satelitów. CMEs są w stanie wywołać silne burze geomagnetyczne, których przejawami są efektowne zorze występujące nawet na umiarkowanych szerokościach geograficznych, ale indukowane równocześnie przepływy prądów na powierzchni Ziemi grożą globalnymi awariami energetycznych sieci przesyłowych.

Inne procesy związane z rozbłyskami i CMEs powodują, że Słońce zachowuje się jak gigantyczny akcelerator, który selektywnie przyspiesza cząstki do prędkości subrelatywistycznych. Kiedy propagują się one w kierunku gęstszych warstw atmosfery, prowadzi to do emisji twardego promieniowania rentgenowskiego, a niekiedy nawet promieniowania gamma, które dodatkowo potęgują procesy jonizacyjne w ziemskiej atmosferze. Strumienie rozpędzonych cząstek – definiowane jako SEP (Solar Energetic Particles) – mogą dotrzeć również w okolice Ziemi i potrafią na długie godziny wziąć we władanie przestrzeń wokół biegunów magnetycznych, co wymusza korekty w przebiegu niektórych tras samolotowych.

DALSZE WYZWANIA

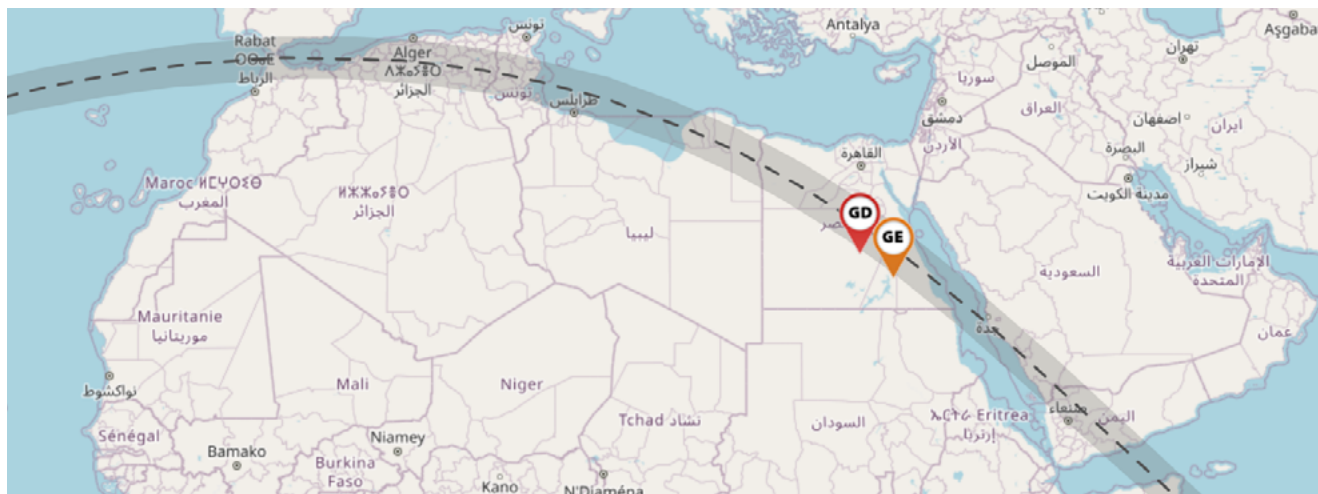
Wymienione powyżej niektóre przykłady związków Ziemia–Słońce w pełni już uzasadniają nasze ciągle potęgujące się zainteresowanie koroną słoneczną, ale to nie jedyna motywacja dla prowadzenia badań. Korona to unikatowe laboratorium wysokotemperaturowej plazmy, w którym z bezpiecznej odległości i przy stosunkowo niedużym koszcie

można identyfikować i śledzić procesy zachodzące w znacznie krótszej skali czasowej w ziemskich akceleratorach i tokamakach, gdzie kosztem olbrzymich nakładów finansowych kolejne pokolenia naukowców próbują rozwiązać zagadkę budowy materii oraz pozyskiwania energii termojądrowej. Wreszcie znajomość korony słonecznej kształtuje naszą wiedzę o niezliczonych gwiazdach aktywnych magnetycznie, dla których z racji odległości nigdy nie będziemy w stanie pozyskać równie szczegółowych danych obserwacyjnych.

Jest jeszcze problem, który nadal spędza sen z powiek każdego heliofizyka: dlaczego korona jest tak gorąca i w jaki sposób ta własność wpływa na nieustający wypływ materii z naszej gwiazdy zwany wiatrem słonecznym? Oczywiście każdy znawca tematu przytoczy w tym miejscu dwa standardowe rozwiązania: dyssypacja energii fal generowanych przez ruchy konwekcyjne u podstawy fotosfery albo drobnoskalowe rozbłyśki, zwane nanorozbłyskami, których mnogość ma dostarczać koronie odpowiedniej ilości energii.

Natura tych zjawisk i ich skala przestrzenna są niestety bardzo trudne do zdalnej detekcji za pomocą obserwacji. To między innymi właśnie dlatego w dobie satelitarnych obserwacji korony, zaćmienia Słońca nie stały się ponownie przede wszystkim domeną miłośników wrażeń natury estetycznej. Niezwykle jasne Słońce przyzwyczaiło nas, że dysponujemy pod dostatkiem emitowanych przez nie fotonów, ale inaczej jest w przypadku niezwykle rozrzedzonej korony. W tym przypadku liczba zliczeń fotonów, zwłaszcza dla zjawisk krótkotrwałych, jest niedostateczna w sensie statystycznym.

Do iluminowania korony wystarczy jednak posłużyć się światłem fotosfery, która dysponuje odpowiednią ilością fotonów, pod warunkiem, że uda się wyeliminować te, które pochodzą bezpośrednio z tej warstwy. Taka sytuacja zachodzi oczywiście w trakcie każdego całkowitego zaćmienia Słońca. Możliwa staje się wówczas identyfikacja zmian w lokalizacji



Rys. 8. Usytuowanie pasa całkowitego zaćmienia Słońca 2 sierpnia 2027 r.

materii w wybranym fragmencie korony, na przykład w związku z propagacją jakiegoś rodzaju fali. Równie dokładnych wyników nie zapewniają nawet koronografy kosmiczne, w których obraz ulega deformacji na skutek dyfrakcji ze względu na niewielką odległość pomiędzy sztucznym księżycem a ogniskiem teleskopu. Można więc podsumować, że pomimo dużego postępu w technikach obserwacyjnych tradycyjne sposoby nadal bywają nie do zastąpienia.

ESPAÑA FOREVER?

Wróćmy jednak do tegorocznego zaćmienia. Wybierający się do Hiszpanii na obserwacje powinni pamiętać, że nastąpi ono blisko wieczora i będzie trwać zaledwie 2 minuty. Słońce wznosić się będzie wówczas zaledwie kilka-kilkanaście stopni nad horyzontem, co może skutkować obecnością różnego rodzaju efektów atmosferycznych, takich jak na przykład deformacja obrazu Słońca. Takie usytuowanie naszej gwiazdy praktycznie wykluczy możliwość heliofizycznego wykorzystania wykonanych obserwacji, ale może nawet uatrakcyjnić walory estetyczne zrobionych wówczas zdjęć. Blask Słońca niewiele minut przed zachodem nie wydaje się już tak oślepiający, przestrzegam jednak przed wpatrywaniem się w naszą gwiazdę nieuzbrojonym okiem. Chrońmy nasz wzrok za pomocą filtra lub co najmniej „analogowej” okopconej szybki.

Jeżeli komuś nie będzie dane na własne oczy obserwować całkowitego zaćmienia Słońca w sierpniu, to niemal dokładnie za rok pojawi się druga szansa. 2 sierpnia 2027 r. pas całkowitego zaćmienia ponownie obejmie Hiszpanię, tym razem jednak jej południowe skrawki, ale również północną Afrykę i Arabię Saudyjską (Rys. 8). Warunki obserwacyjne powinny być zdecydowanie lepsze: zjawisko nastąpi w godzinach przedpołudniowych, a czas trwania całkowitego zaćmienia w wybranym miejscu pasa wyniesie od 3 do nawet 6 minut. 26 stycznia 2028 r. Hiszpania jeszcze raz przyciągnie pasjonatów zaćmień, ale będzie to „tylko” zaćmienie obrączkowe.

Miłośnicy obserwowania efektownych zaćmień Słońca z terenu Polski muszą uzbroić się w cierpliwość i... zapewnić sobie długowieczność. Zaćmienia obrączkowe nastąpią bowiem dopiero 13 lipca 2075 r. i 23 lipca 2093 r., a zaćmienie całkowite nawet w kolejnym wieku. 7 października 2135 r. pas zaćmienia obejmie część Dolnego Śląska. Ciekawe, czy będzie komu jeszcze wówczas zanucić „Eclipse” z płyty „Dark Side of the Moon” zespołu Pink Floyd?

AUTOR

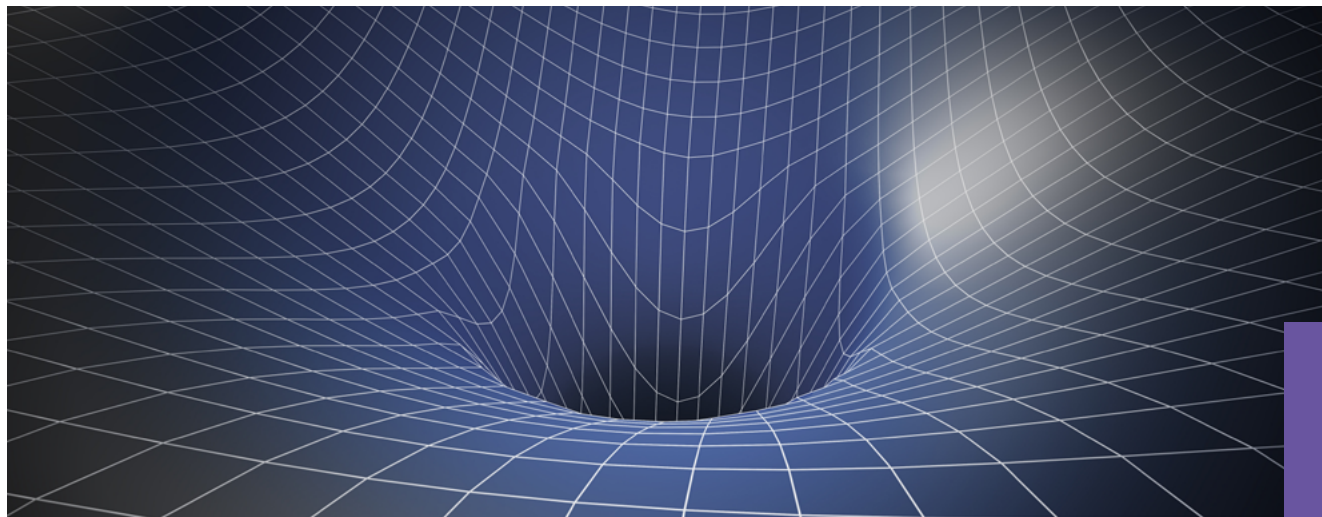


Prof. dr hab. **Michał Tomczak** (ORCID: 0000-0002-8674-4806) jest profesorem w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu Wrocławskiego, dziekanem Wydziału Fizyki i Astronomii UWr oraz prezesem Polskiego Towarzystwa Astronomicznego. Jego zainteresowania naukowe obejmują heliofizykę, fizykę Słońca, rozkłady słoneczne oraz koronę słoneczną.

NAD POLSKĄ

12 sierpnia 2026 r. z terenu Polski widoczne będzie głębokie częściowe zaćmienie Słońca. Zjawisko rozpocznie się około 19:10–19:18 czasu letniego, zależnie od miejsca obserwacji, a maksimum nastąpi około 19:56–20:09. W Warszawie zaćmienie zacznie się o 19:14, osiągnie maksimum o 20:02, kiedy Księżyc przesłoni ok. 85% średnicy tarczy Słońca, i zakończy się tuż po zachodzie Słońca. W Gdańsku zaćmienie będzie widoczne w godzinach 19:11–20:03–20:53, w Krakowie – 19:18–19:56–20:58, a we Wrocławiu – 19:17–20:09–20:58.

Obserwacje należy prowadzić wyłącznie z użyciem certyfikowanych filtrów słonecznych przeznaczonych do bezpośredniej obserwacji Słońca, najlepiej zgodnych z normą ISO 12312-2. Zwykłe okulary przeciwsłoneczne, przydymione szkło, folie, płyty CD czy prowizoryczne filtry nie zapewniają pełnej ochrony, ponieważ mogą przepuszczać szkodliwe zakresy promieniowania. W Polsce zjawisko będzie przez cały czas zaćmieniem częściowym, dlatego nie będzie ani chwili, w której wolno patrzeć na Słońce bez ochrony wzroku. Szczegółnej ostrożności wymagają lornetki, teleskopy, lunety, aparaty fotograficzne i teleobiektywy, bo skupiają one promieniowanie słoneczne. Dlatego filtr musi być zamocowany przed obiektywem, od strony Słońca, a nie przy oku. Patrzeć przez sprzęt optyczny z samymi okularami zaćmieniowymi jest niebezpieczne. Bezpieczną alternatywą pozostaje obserwacja pośrednia, np. projekcja obrazu Słońca przez niewielki otwór na jasny ekran — pod warunkiem, że nie patrzy się przez ten otwór bezpośrednio na Słońce.



ANDRZEJ TRAUTMAN (INSTYTUT FIZYKI PAN)

O PROMIENIOWANIU GRAWITACYJNYM

PRZEDRUK ARTYKUŁU Z POSTĘPÓW FIZYKI 10 (3) Z 1959 R.

Wkład prof. Andrzeja Trautmana do teorii fal grawitacyjnych był kluczowy. Obejmował on przede wszystkim sformułowanie samej definicji niepłaskiej fali grawitacyjnej – częścią tej definicji było określenie energii przenoszonej przez falę. Podanie tej definicji było zadaniem wyjątkowo trudnym ze względu na ogólną zasadę względności oraz zasadę równoważności, na których oparta jest współczesna teoria grawitacji. Zagadnienia definicji fali grawitacyjnej i jej energii omówione są w niniejszym artykule z 1959 roku.

Dalszy wkład prof. Trautmana do teorii fal grawitacyjnych polegał na znalezieniu (wspólnie z Ivozem Robinsonem) ścisłych rozwiązań równań Einsteina spełniających rzeczoną definicję fali grawitacyjnej. Rozwiązania te znane są obecnie jako metryki Robinsona–Trautmana. Od tego momentu można było uznać, że ogólna teoria względności dopuszcza istnienie niepłaskich fal grawitacyjnych.

/dr hab. Andrzej Okołów – Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego/

GENEZA I AKTUALNOŚĆ PROBLEMU

Zagadnienie fal i promieniowania grawitacyjnego liczy przeszło 40 lat. Wkrótce po sformułowaniu zasad ogólnej teorii względności Einstein opublikował pracę^[1] zawierającą teorię fal płaskich i promieniowania słabych pól grawitacyjnych, tzn. teorię opartą na liniowym przybliżeniu równań grawitacji. Praca ta została później rozwinięta przez Weyla^[2] i Eddingtona^[3]. W 1937 r. Einstein i Rosen^[4] podjęli próbę znalezienia rozwiązań ścisłych, przedstawiających fale płaskie. Doszli oni wtedy do wniosku, że takie rozwiązania muszą być osobliwe, a więc нефизyczne; udało im się jednak znaleźć fale cylindryczne. W tym samym okresie problem promieniowania został zaatakowany z innej strony w związku z pracami Einsteina, Infelda i Hoffmanna^[5] nad równaniami ruchu w ogólnej teorii względności. Od początku było jasne, że rozwiązania przyjmowane w metodzie Einsteina, Infelda i Hoffmanna (EIH) opisują pola typu fali stojącej. Opierając się na analogiach z elektrodynamiką Infeld^[6] zbadał wpływ tzw. członów promienistych i pokazał, że nie dają one

żadnych poprawek do równań ruchu aż do 7 rzędu włącznie (równania newtonowskie są w metodzie EIH równaniami czwartego rzędu). Następnie Hu^[7], a ostatnio Peres^[8] wykonali obliczenia uwzględniające poprawki promieniste w 9. rzędzie. Wynik rachunków Hu był pozornie paradoksalny: równania ruchu miały taki kształt, jak gdyby wypromienianiu energii grawitacyjnej towarzyszyło ujemne tarcie promieniste. Niedawno Bondi^[9] znalazł ściśle rozwiązanie równań pola grawitacyjnego, reprezentujące fale płaskie bez osobliwości. Marder^[10] zbadał możliwe postaci tensora energii–pędu materii wytwarzającej fale cylindryczne oraz przytoczył przykłady idealnych eksperymentów, pozwalających wykryć promieniowanie grawitacyjne. Pirani^[11] i Lichnerowicz^[12] podali geometryczną charakterystykę czasoprzestrzeni, których lokalna struktura przypomina falę płaską.

Dotychczas w doświadczeniu nie udało się wykryć żadnych śladów promieniowania grawitacyjnego. W ostatnich latach zagadnienie to stało się jednak przedmiotem pewnego zainteresowania, głównie w związku z próbami skwantowania pola grawitacyjnego.

1 A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wissensch., 154 (1918)

2 H. Weyl, Raum, Zeit, Materie, Berlin 1921

3 A. S. Eddington, Proc. Roy. Soc. A 102, 269 (1922)

4 A. Einstein i N. Rosen, Journ. Franklin Inst. 223, 43 (1937)

5 A. Einstein, L. Infeld i B. Hoffmann, Ann. Math. 39, 65 (1938)

6 L. Infeld, Phys. Rev. 53, 836 (1938)

7 N. Hu, Proc. Roy. Irish Acad. 51 A, 87 (1947)

8 A. Peres, Nuovo Cimento 11, 644 (1959)

9 H. Bondi, Nature 179, 1072 (1957)

10 L. Marder, Proc. Roy. Soc. A 244, 524 (1958)

11 F. A. E. Pirani, Phys. Rev. 105, 1089 (1957)

12 A. Lichnerowicz, Comptes Rendus 246, 893 (1958)

ANALOGIE MIĘDZY GRAWITACJĄ A ELEKTRODYNAMIKĄ

Cała problematyka promieniowania grawitacyjnego jest oparta na analogiach między teorią grawitacji i elektrodynamiką. Nie jest łatwo podać definicję promieniowania w ogólnej teorii względności. Zamiast to czynić, lepiej jest badać, które ze zjawisk towarzyszących promieniowaniu w elektrodynamice występują również w teorii grawitacji. Promieniowanie elektromagnetyczne jest związane z możliwością przenoszenia na odległość energii pod postacią fal, a matematycznie — z charakterem hiperbolicznym równań Maxwella. Wiąże się z tym istnienie tarcia promienistego powodującego, że według elektrodynamiki klasycznej elektron w atomie powinien spadać na jądro^[13]. Przenosząc to zagadnienie do teorii grawitacji pytamy, czy można spodziewać się zjawiska spadania Ziemi na Słońce pod wpływem grawitacyjnego tarcia promieniowania. Dalej, w teorii grawitacji nasuwa się konieczność sformułowania warunków brzegowych, analogicznych do warunków wypromieniowania w elektrodynamice. Nieciągłości pola elektromagnetycznego, które można uważać za matematyczne odpowiedniki czoła fali, rozchodzą się w próżni po charakterystykach, tzn. z prędkością światła. Podobnie skoki tensora krzywizny mogą opisywać czoło fali grawitacyjnej.

Dokładniejsze badanie wymienionych tu analogii wiąże się z dużymi trudnościami. Spowodowane są one ogólną niezmienniczością teorii Einsteina. Fizyczną podstawą ogólnej niezmienniczości jest zasada równoważności, a jej konsekwencją — nieliniowość równań pola. Innymi słowy, istota trudności leży w osobiwym charakterze pola grawitacyjnego, którego potencjały równocześnie opisują strukturę metryczną czasoprzestrzeni. W związku z tym: 1. nie ma zasady superpozycji pól grawitacyjnych, 2. w ogólnej teorii względności trudno jest określić pojęcie energii oraz 3. brak jest prostego związku między promieniowaniem a charakterem ruchu ciał. Omówimy teraz pokrótce istotę tych trudności.

Brak zasady superpozycji pól grawitacyjnych utrudnia konstruowanie rozwiązań falowych, uniemożliwia wprowadzenie funkcji Greena itp. Nie to stanowi jednak główną trudność. Widać to na przykładzie elektrodynamiki Borna-Infelda, która też jest nieliniowa, a nie nastrocza większych kłopotów, jeśli chodzi o zagadnienie fal i promieniowania.

Bardzo trudno jest w sensowny sposób wprowadzić pojęcie energii grawitacyjnej. Jeśli składowe tensora metrycznego $g_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$) są potencjałami pola grawitacyjnego, to zgodnie z ogólnymi zasadami teorii pola można się spodziewać, że gęstość energii będzie pewną formą kwadratową symboli Christoffela. Wiadomo jednak, że dla dowolnego punktu czasoprzestrzeni można dobrać taki układ

współrzędnych, w którym wszystkie symbole Christoffela znikają. Inaczej mówiąc, przez wybór układu odniesienia można w danym punkcie „wytransformować” pole grawitacyjne; fizyczne źródło tego faktu leży w zasadzie równoważności, a więc u samych podstaw ogólnej teorii względności. Widać już stąd, że w żadnym razie nie można mówić o lokalnym rozkładzie energii grawitacyjnej. W ogólnej teorii względności nie ma tensorowych praw zachowania^[14] w postaci zwykłej dywergencji, a więc nie ma również „dobrego” wektora Poyntinga, który by służył do obliczania strumienia promieniowanej mocy. Czasami wysuwa się pogląd, że pole grawitacyjne jest reprezentowane raczej przez tensor Riemanna niż przez symbole Christoffela. Jeśli tak, to energię pola grawitacyjnego należałoby opisywać przy pomocy formy kwadratowej zbudowanej z tensora krzywizny. Można skonstruować w ten sposób pewien tensor czwartego rzędu o własnościach przypominających tensor energii-pędu pola elektromagnetycznego^[15].

W elektrodynamice istnieje bezpośredni związek promieniowania z przyspieszonym ruchem ładunków. Natomiast w teorii grawitacji każde sferyczne i nieobracające się ciało porusza się po geodetyce, czyli po prostej, a więc właściwie ruchem jednostajnie postępowym.

Pewne informacje na temat promieniowania grawitacyjnego, a mianowicie to, że o ile istnieje, to jest bardzo słabe, można otrzymać bez żadnych rachunków, z ogólnych rozważań jakościowych. W elektrodynamice prawo zachowania ładunku uniemożliwia fale kuliste, możliwe jest jedynie promieniowanie dipolowe oraz wyższego rzędu. Promieniowanie dipolowe znika, gdy wszystkie ładunki mają ten sam stosunek e/m . Podobnie jest w teorii grawitacji. Prawo zachowania masy uniemożliwia fale kuliste (twierdzenie Birkhoffa), a prawo zachowania pędu — promieniowanie dipolowe. Możliwe są tylko fale kwadrupolowe i wyższe. Można inaczej wytłumaczyć brak promieniowania dipolowego tym, że stosunek czynnej masy grawitacyjnej do masy inercjalnej jest dla każdego ciała równy jedności.

BRAK JEST PROSTEGO ZWIĄZKU MIĘDZY PROMIENIOWANIEM A CHARAKTEREM RUCHU CIAŁ

Einstein w pracy z 1918 r. obliczył promieniowanie kwadrupolowe obracającego się pręta w pierwszym liniowym przybliżeniu. Rachunek ten jest powtarzany we wszystkich podręcznikach teorii względności. Nie przesądza on jednak sprawy istnienia promieniowania grawitacyjnego. Pole przybliżone, otrzymane przez Einsteina, jest okresowe i ma reprezentować promieniowanie. Można natomiast pokazać, że okresowe pole grawitacyjne, będące ścisłym rozwiązaniem równań pola, może opisywać tylko fale stojące. Łatwo to zrozumieć, gdyż wypromieniowaniu muszą towarzyszyć efekty sekularne, a więc pole nieperiodyczne. Aby odpowiedzieć na pytanie, czy pole znalezione przez Einsteina może opisywać promieniowanie, trzeba przejść do wyższych rzędów aproksymacji.

13 Jeśli przyjąć rozwiązanie równań pola w postaci potencjałów opóźnionych. Elektrodynamika jako teoria niezmiennicza względem odbicia czasu nie wyróżnia potencjałów opóźnionych względem przedwczesnych. Aby zapewnić zgodność z doświadczeniem, uzupełnia się ją dodatkowymi warunkami (np. Sommerfelda), wprowadzającymi „strzałkę czasu”. Takie postępowanie nie jest zadowalające z punktu widzenia teorii, ale dyskusja tego problemu nie mieści się w ramach niniejszego artykułu.

14 Jak wiadomo, istnienie dziesięciu tensorowych praw zachowania w szczególnej teorii względności jest konsekwencją własności symetrii przestrzeni Minkowskiego, która dopuszcza 10-parametrową grupę izometrii (transformacji Lorentza) [W. A. Fock, Teoria prostranstwa, wriemieni i tiagotienija, Moskwa 1955]; [A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., Cl. III, 5, 721 (1957)]

15 I. Robinson (informacja prywatna)

Einstein i inni obliczając promieniowaną energię opierali się na tzw. pseudotensorze energii-pędu, który jest pewną formą kwadratową pierwszych pochodnych $g_{\mu\nu}$, a więc nie jest tensorem. W związku z tym przedstawianie promieniowanej mocy w postaci całki powierzchniowej grawitacyjnego wektora Poyntinga jest niejednoznaczne, zależy od wyboru układu współrzędnych. Infeld^[16] ostatnio pokazał, że dla pola grawitacyjnego wytwarzanego przez izolowany układ ciał zawsze można wybrać taki układ współrzędnych, aby strumień wektora Poyntinga przez zamkniętą powierzchnię w nieskończoności był równy zeru.

CZŁONY PROMIENISTE W METODZIE EIH

Powstaje zatem pytanie, czy nie jest tak, że wszystkie rozwiązania lub zjawiska, które określa się mianem promieniowania grawitacyjnego, są związane z wyborem układu i można je przez wybór innego układu usunąć. Że jednak tak nie jest, widać już chociażby z istnienia fal płaskich lub cylindrycznych. Trochę trudniej jest zbadać ten problem w ramach metody EIH. Chodzi tu o problem usuwalności członów promienistych przez wybór układu^[17]. Aby wyjaśnić istotę zagadnienia, rozwińmy względem $1/c$ skalarny potencjał opóźniony

$$\frac{a(t - r/c)}{r} = \frac{a(t)}{r} - \frac{1}{c} \dot{a}(t) + \frac{1}{2c^2} \ddot{a}(t) + \dots$$

Tego typu rozwinięcia używane są w metodzie EIH^[18]. Rozwinięcie potencjału symetrycznego różni się od powyższego tym, że nie zawiera nieparzystych potęg $1/c$ — wyrazy te noszą nazwę promienistych. Podobnie można rozwinąć potencjały elektromagnetyczne A_μ oraz potencjały grawitacyjne $g_{\mu\nu}$. Jeśli chodzi o potencjały elektromagnetyczne i grawitacyjne, to ich postać przy zadanym polu nie jest jednoznaczna. Pierwsze można zmieniać przez cechowanie, a drugie — przez transformację układu. Warunkiem anihilowalności potencjałów elektromagnetycznych A jest znikanie pola $f = \text{rot } A$, a warunkiem anihilowalności potencjałów grawitacyjnych — znikanie tensora krzywizny. W metodzie aproksymacyjnej odpowiada temu znikanie zlinearyzowanego tensora Riemanna. Zgodnie z wynikami Infelda^[19] pierwszymi członami promienistymi, które mogą dać przyczynki do równań ruchu w dziewiątym rzędzie, są pola g_{ik} . g_{ik} , g_{ik} ($i, k = 0, 1, 2, 3$). Wskaźniki pod symbolem funkcji oznaczają tu rząd rozwinięcia względem $1/c$.

Warunkiem anihilowalności tych pól jest $R_{i00k} = 0$ ($R_{\mu\nu\rho\sigma}$ oznacza tensor krzywizny). Okazuje się jednak, że istnieją człony promieniste, zgodne z równaniami pola i ruchu, dla których $R_{i00k} \neq 0$. Pola takie są więc istotnie różne od pól opisywanych przez zwykłą metodę EIH, w której przyjmuje się $g_{ik} = g_{0k} = g_{00} = 0$.

Dla przykładu można przeprowadzić^[20] rachunki w przypadku dwu ciał o równych masach, poruszających się w teorii Newtona po okręgu. W równaniach ruchu do 9. rzędu pojawiają się poprawki promieniste. Otrzymane w ten sposób równania ruchu są typu

$$\ddot{x} + 2a\dot{x} + \omega^2(x)x = 0$$

gdzie $a > 0$ jest stałą. Ale wynik ten nie oznacza jeszcze, że ruch jest tłumiony i ciała spadają na siebie. Postać równań ruchu zależy od układu współrzędnych; można przez transformację układu usunąć człon $2a\dot{x}$. Ta sama uwaga stosuje się do równań otrzymanych przez Hu i Peres.

W każdym razie widać jednak, że określonemu ruchowi newtonowskiemu odpowiada w wyższych rzędach przybliżień więcej niż jedno pole grawitacyjne. Wśród tych pól jest jedno odpowiadające fali stojącej; otrzymuje się je w metodzie EIH przez opuszczanie członów promienistych. Są również takie pola, które przypominają potencjały opóźnione lub przedwcześnie. Dalszego zbadania wymaga natomiast znaczenie fizyczne takich pól, tzn. charakter ewentualnych zmian sekularnych ruchu ciał wytwarzających te pola.

INTERPRETACJA RÓWNAŃ RUCHU W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

Chcielibyśmy w tym miejscu zwrócić uwagę na interpretację fizyczną równań ruchu w ogólnej teorii względności. W fizyce newtonowskiej oraz w szczególnej teorii względności można bezpośrednio z postaci równań ruchu albo z kształtu ich rozwiązania odczytać charakter ruchu, a więc kształt toru, okres itp. Potrzebna tu jest tylko znajomość stosowanego układu współrzędnych (np. kartezjański, biegunowy). W ogólnej teorii względności nie dysponujemy tak wygodnymi układami współrzędnych. Aby znaleźć obserwowalne elementy ruchu konieczne tu są dwie rzeczy: znajomość pola metrycznego $g_{\mu\nu}(x)$ oraz linii świata ciał $x^a = x^a(\lambda)$, ewentualnie postaci równań ruchu. Natomiast nie wystarcza (poza szczególnymi przypadkami) sama znajomość linii świata czy też równań ruchu. Przez transformację układu współrzędnych można zmieniać postać równań ruchu i kształt funkcji $x^a(\lambda)$, ale oczywiście nie można zmie-

ABY ZNALEŹĆ OBSERWOWALNE ELEMENTY RUCHU W TEORII WZGLĘDNOŚCI KONIECZNE SĄ DWIE RZECZY: ZNAJOMOŚĆ POLA METRYCZNEGO ORAZ LINII ŚWIATA CIAŁ, EWENTUALNIE POSTACI RÓWNAŃ RUCHU

niać efektów obserwowalnych, takich jak ruch perihelium. W szczególności przez transformację układu można usunąć człon $2a\dot{x}$ z przytoczonych równań ruchu 9. rzędu. Jednak nie oznacza to jeszcze, że ruch opisywany przez te równania nie będzie się różnił od ruchu otrzymywanego w metodzie EIH.

Ważne jest to, że pola metryczne będą w obu przypadkach istotnie różne, niesprowadzalne jedno do drugiego przez przekształcenie układu współrzędnych.

WARUNKI BRZEGOWE I NIECIĄGŁOŚCI

W związku z wielością rozwiązań równań Einsteina powstaje potrzeba sformułowania odpowiednich warunków brzegowych, analogicznych do warunków Sommerfelda

16 L. Infeld, Equations of motion and gravitational radiation, Ann. of Physics (w druku) [6, 341 – przyp. red.]

17 A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., série des sci. math., astr. et phys., 6, 627 (1958)

18 A. Einstein, L. Infeld i B. Hoffmann, Ann. Math. 39, 65 (1938)

19 L. Infeld, Phys. Rev. 53, 836 (1938)

20 A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., série des sci. math., astr. et phys., 6, 627 (1958)

w elektrodynamice. Warunki takie powinny mieć charakter geometryczny, tzn. wyróżniać pewne pola grawitacyjne, ale nie wyróżniać układów współrzędnych. Nie udało się do tej pory takich warunków podać; warunki sformułowane przez Focka^[21] i później zmodyfikowane^[22] wyróżniają pewną klasę układów, mianowicie układy „asymptotycznie harmoniczne”, tzn. takie, które w nieskończoności przestrzennej spełniają warunek de Dondera $\left(\sqrt{-g}g^{\mu\nu}\right)_{;\nu} = 0$. Wśród warunków brzegowych znajduje się żądanie, aby spełniające je pola dopuszczały układy współrzędnych, w których g_{00} różni się od tensora Minkowskiego η_{00} o wielkości rzędu $1/r$. Warunki wypromieniowania posiadają pewne interesujące konsekwencje. Pola, które je spełniają, zachowują się w nieskończoności przestrzennej lokalnie jak fala płaska. W oparciu o warunki wypromieniowania oraz wyróżnione w ich sformułowaniu układy współrzędnych można próbować ujednoznaczyć definicję energii i pędu w ogólnej teorii względności^[23]. Mówiąc nie- zbyt ściśle okazuje się, że energia i pęd, obliczone przez całkowanie pseudotensora po nieograniczonej hiperpowierzchni przestrzennej, stanowią wektor względem klasy przekształceń układu zachowujących postać warunków brzegowych w nieskończoności. Mówiąc o nieskończoności mamy tu na myśli obszar położony przestrzennie daleko od rozpatrywanego układu ciał (np. systemu słonecznego), a nie nieskończoność w znaczeniu kosmologicznym.

Dotychczas nie wiadomo, czy oprócz pól statycznych istnieją inne pola spełniające postulowane warunki brzegowe. Bergmann^[24] i niektórzy inni fizycy^[25] uważają, że nawet zagadnienie dwóch ciał nie posiada rozwiązań galileuszowych w nieskończoności, tzn. rozwiązań spełniających w pewnych układach warunek $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + O(1/r)$ dla $r \rightarrow \infty$. Pewnym argumentem na rzecz takiego poglądu jest pojawianie się wyrazów typu $\log r/r$ w drugim rzędzie aproksymacji względem stałej grawitacyjnej^[26].

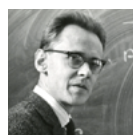
W elektrodynamice nieciągłości pola lub jego pochodnych rozchodzą się z prędkością światła i mają strukturę

geometryczną fali płaskiej. Podobnie jest w teorii grawitacji^[27]. Okazuje się, że skoki tensora krzywizny mogą zachodzić w próżni tylko na powierzchniach zerowych i posiadają tę samą strukturę, co płaska fala grawitacyjna. Oprócz związków algebraicznych rządzących skokami tensora Riemanna można wyprowadzić równanie różniczkowe, które opisuje zmiany nieciągłości wzdłuż bicharakterystyk (promieni grawitacyjnych)^[28]. Rachunki wykonane w najprostszym przypadku pola Schwarzschilda pokazują, że w odpowiednim układzie współrzędnych skoki tensora krzywizny maleją jak $1/r$ w funkcji odległości r od centrum.

Konkludując, można w następujący sposób scharakteryzować obecny stan zagadnienia promieniowania grawitacyjnego. Wyniki Infelda^[29] wskazują na to, że nie można mówić o przenoszeniu energii na odległość przy pomocy promieniowania grawitacyjnego. Nasuwają się poważne wątpliwości, czy pojęcie energii grawitacyjnej ma sens. Z drugiej strony mamy szereg faktów, takich jak istnienie fal grawitacyjnych, występowanie „członów promienistych” w metodzie EIH, możliwość sformułowania w teorii grawitacji warunków brzegowych typu Sommerfelda lub propagacja nieciągłości po charakterystykach. Zjawiska te nie mają odpowiedników w newtonowskiej teorii grawitacji i związane są z hiperbolicznością równań Einsteina. Jeśli nie uważa się przenoszenia energii na odległość za atrybut promieniowania, to można zjawiska te określić mianem promieniowania grawitacyjnego.

Autor pragnie wyrazić gorące podziękowania Profesorowi L. Infeldowi i Docentowi J. Plebańskiemu za zachętę do podjęcia tego tematu oraz za pomoc w czasie jego opracowywania. Pomocy w postaci cennych dyskusji udzielili również Prof. P. G. Bergmann, Prof. H. Bondi, Dr F. A. E. Pirani, Dr I. Robinson i Dr W. Tulczyjew.

AUTOR



Prof. dr hab. **Andrzej Trautman** był fizykiem teoretycznym, profesorem Uniwersytetu Warszawskiego, członkiem rzeczywistym oraz wiceprezesem PAN. Należał do najważniejszych przedstawicieli polskiej i światowej szkoły teorii względności; jego prace dotyczyły przede wszystkim grawitacji, ogólnej teorii względności, fal grawitacyjnych, geometrii czasoprzestrzeni oraz teorii Einsteina-Cartana. Zmarł 27 lutego 2026 roku.

- 27 A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., Cl. III, 5, 273 (1957)
- 28 A. Trautman, Comptes Rendus, 246, 1500 (1958)
- 29 L. Infeld, Phys. Rev. 53, 836 (1938)

21 W. A. Fock, Teoria prostranstwa, wriemieni i tiagotienija, Moskwa 1955

22 A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., série des sci. math., astr. et phys., 6, 407 (1958)

23 A. Trautman, Bull. Acad. Polon. Sci., série des sci. math., astr. et phys., 6, 407 (1958)

24 P. G. Bergmann (informacja prywatna)

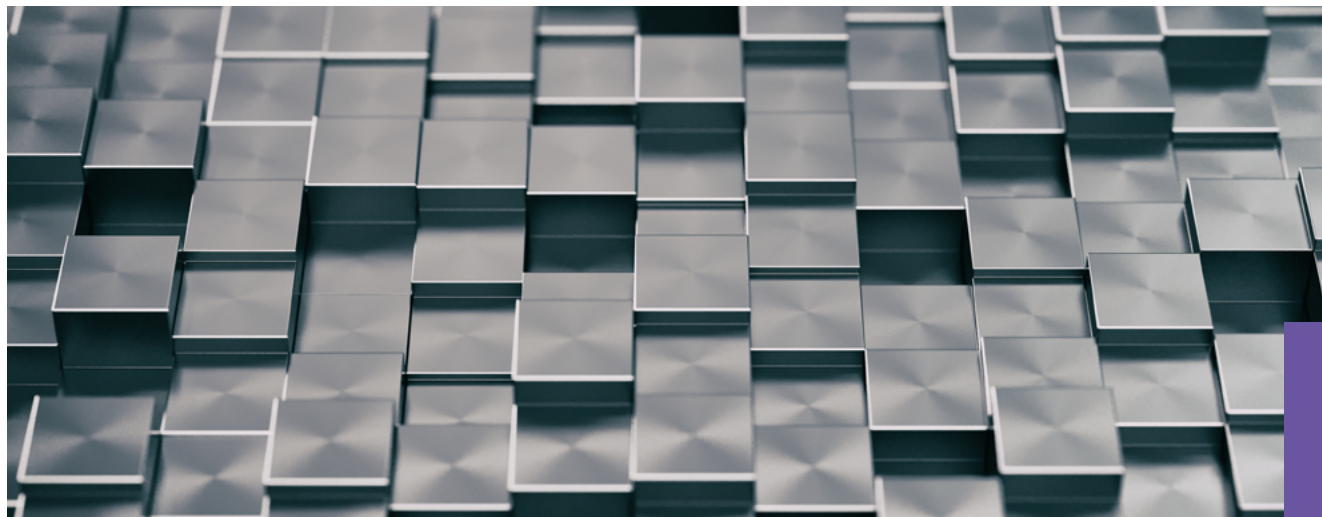
25 A. Papapetrou, Ann. Physik (6) 20, 399 (1957); (7) 2, 87 (1958)

26 W. A. Fock, Teoria prostranstwa, wriemieni i tiagotienija, Moskwa 1955;

W. B. Bonnor, Nature 181, 1196 (1958) oraz Phil. Trans. Roy. Soc. (w druku)

NAGRODA NOBLA

Gdy Andrzej Trautman pisał ten artykuł, fale grawitacyjne były jeszcze przede wszystkim problemem teoretycznym. Nie było jasne, czy są rzeczywistym zjawiskiem fizycznym, czy tylko skutkiem szczególnego wyboru współrzędnych w ogólnej teorii względności. W kolejnych dekadach teoria została rozwinięta przez wielu badaczy. Powstał ścisły opis fal grawitacyjnych emitowanych przez układy astrofizyczne, a pośrednie potwierdzenie ich istnienia przyniosły obserwacje pulsara podwójnego Hulse’a–Taylora. Przełom nastąpił 14 września 2015 roku, gdy detektory LIGO po raz pierwszy bezpośrednio zarejestrowały fale grawitacyjne pochodzące ze zderzenia dwóch czarnych dziur. W 2017 roku Rainer Weiss, Barry C. Barish i Kip S. Thorne otrzymali za ten sukces Nagrodę Nobla z fizyki. Teoretyczne pytanie, które w 1959 roku wymagało wielkiej ostrożności, stało się podstawą nowej astronomii.



ADAM PIKUL (INSTYTUT NISKICH TEMPERATUR I BADAŃ STRUKTURALNYCH IM. W. TRZEBIATOWSKIEGO PAN WE WROCŁAWIU)

RAFAŁ IDCZAK (UNIwersYTET WROCŁAWSKI, WYDZIAŁ FIZYKI I ASTRONOMII)

STOPY O WYSOKIEJ ENTROPII – SKĄD TEN SZUM WOKÓŁ NICH?

Stopy o wysokiej entropii (ang. High-Entropy Alloys, HEA) od mniej więcej dwóch dekad zajmują stałe i ważne miejsce w programach wielu konferencji naukowych poświęconych fizyce ciała stałego i nauce o materiałach. Powodem są ich wyjątkowe właściwości, które budzą duże zainteresowanie ze względu na potencjalne zastosowania technologiczne. W tym artykule przedstawiamy krótko obecny stan wiedzy na temat tych wyjątkowych stopów oraz najważniejsze wyniki kilkuletniej pracy zespołu naukowców z Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego oraz z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

SŁOWO O ŁĄCZENIU METALI

Aby zrozumieć istotę stopów o wysokiej entropii, musimy odwołać się do termodynamiki, a dokładniej do termodynamicznego opisu syntez chemicznych. Zaprezentowane podejście jest siłą rzeczy bardzo ogólne, wręcz podstawowe, ale w zupełności wystarczy do zrozumienia istoty HEA.

Wyobraźmy sobie zatem, co się dzieje, kiedy próbujemy połączyć kilka pierwiastków chemicznych (w szczególności metali) ze sobą^[1]. Z termodynamicznego punktu widzenia w procesie ich mieszania zmienia się energia wewnętrzna układu, którym jest zbiór atomów wszystkich mieszanych składników. (Mówimy na razie o mieszaniu, bo połączenie chemiczne pierwiastków niekoniecznie musi nastąpić). Ponieważ energia wewnętrzna jest trudna do określenia, o wiele wygodniej jest posługiwać się energią swobodną Gibbsa G (zwaną też entalpią swobodną), a dokładniej zmianą tej energii ΔG podczas procesu termodynamicznego^[2]. Wyraża się ona przez różnicę zmiany entalpii ΔH oraz iloczynu temperatury i zmiany entropii zachodzącej w danym procesie, tj. $T\Delta S$. W przypadku próby łączenia pierwiastków rozpatrujemy zmianę energii swobodnej Gibbsa związaną z mieszaniem składników, czyli:

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T \Delta S_{\text{conf}} \quad (1)$$

Indeks conf w przypadku zmiany entropii jest tożsamy z indeksem mix, ale używa się go dla podkreślenia faktu, że entropia zmienia się – jak za chwilę zobaczymy – ze względu na ułożenie (konfigurację) atomów w układzie.

Aby uzyskać nowy produkt syntezy, zmiana energii swobodnej Gibbsa w procesie łączenia pierwiastków musi być ujemna, czyli proces musi być dla danego układu korzystny energetycznie. Musi być więc spełniony podstawowy warunek:

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T \Delta S_{\text{conf}} < 0 \quad (2)$$

W wielu klasycznych układach metalicznych dominującą rolę odgrywa zmiana entalpii, jednak w stopach wieloskładnikowych wkład entropowy może stać się istotny, zwłaszcza w wysokich temperaturach. Rozważmy, z jaką jej zmianą możemy mieć do czynienia. Dość oczywiste scenariusze są następujące:

- $\Delta H_{\text{mix}} < 0$ (czyli energia wewnętrzna produktu jest wyraźnie niższa od łącznej energii wewnętrznej substratów). Z taką sytuacją mamy do czynienia wtedy, kiedy pierwiastki składowe chętnie się łączą ze sobą. W rezultacie w wyniku syntezy metali otrzymujemy krystalograficznie uporządkowany związek międzymetaliczny. Oznacza to, że atomy poszczególnych metali zajmują pewne określone pozycje w strukturze krystalicznej i tworzą

1 Zob. np. Józef Szafara „Termodynamika chemiczna stosowana” (WNT, Warszawa, 2016, ISBN: 9788320433708).

2 Krótkie przypomnienie definicji i znaczenia potencjałów termodynamicznych przedstawione zostało w ramce pod artykułem.

między sobą wiązania (tutaj: metaliczne lub kowalencyjne). (Odpowiednikiem tego scenariusza w przypadku niemetali byłoby otrzymanie nowego związku chemicznego, na przykład wody w wyniku połączenia wodoru i tlenu).

- $\Delta H_{\text{mix}} \lesssim 0$ (czyli energia wewnętrzna produktu jest tylko nieco niższa od sumy energii wewnętrznej substratów).

W tym przypadku atomy metali nie unikają się wzajemnie i mogą się połączyć ze sobą, przy czym jest im to raczej obojętne, z czym się łączą i obok jakiego sąsiada w strukturze krystalicznej się znajdują. W wyniku takiego procesu otrzymujemy stopy metaliczne lub roztwory stałe o prostych strukturach krystalicznych (np. bcc, fcc lub hcp), w których pozycje atomowe w każdej komórce elementarnej są obsadzone przez atomy pierwiastków składowych w przybliżeniu losowo. (Odpowiednikiem tego typu procesu w przypadku cieczy i lekkich pierwiastków byłoby otrzymanie roztworu, na przykład wodnego roztworu soli kuchennej).

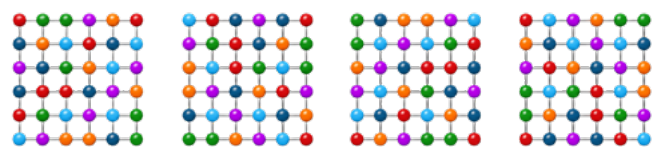
- $\Delta H_{\text{mix}} > 0$ (czyli energia wewnętrzna produktu jest wyższa od energii wewnętrznej oddzielnych pierwiastków).

W tym przypadku atomy różnych pierwiastków nie mają absolutnie żadnego powodu do mieszania się, więc unikają się wzajemnie. W wyniku próby syntezy takich pierwiastków otrzymujemy co najwyżej niejednorodny zlepek poszczególnych metali, które wprawdzie się stopiły, ale nie wymieszały. Taki „stop” jest niejednorodny, a jego niejednorodność czasem widać nawet gołym okiem. (Odpowiednikiem takiej próby syntezy w przypadku cieczy byłaby na przykład próba połączenia oleju z wodą).

A jak to się ma do stopów o wysokiej entropii? Przypomnijmy, że ściśle rzecz biorąc, o powodzeniu syntezy decyduje nie tyle zmiana samej entalpii, ale zmiana energii swobodnej Gibbsa (2), czyli również zmiana entropii konfiguracyjnej. Cóż to takiego?

ENTROPIA KONFIGURACYJNA

Rozważmy zbiór N kulek o różnych kolorach wymieszanych ze sobą w przypadkowy sposób, ale ułożonych na pewnej określonej, dwuwymiarowej siatce N dozwolonych pozycji. Będą one reprezentowały atomy pierwiastków składowych stopu, a siatka – strukturę krystaliczną. Niech tych różnych atomów (kolorów) będzie n . Dla uproszczenia przyjmijmy też, że liczba atomów każdego rodzaju (kulek każdego koloru) jest jednakowa i wynosi N/n . Pytanie brzmi: na ile sposobów możemy rozmieścić takie kulki na naszej siatce? Rys. 1 pokazuje zaledwie cztery przykładowe sposoby rozmieszczenia kulek. W termodynamice każdy z takich możliwych sposobów rozmieszczenia elementów układu nazywamy mikrostanem układu (innymi słowy, rys. 1 przedstawia cztery mikrostany). Zauważmy, że tych mikrostanów może być ogromna liczba, ponieważ mogą się one różnić od



Rys. 1. Kilka przykładowych sposobów rozmieszczenia różnokolorowych kulek symbolizujących atomy na dwuwymiarowej siatce kwadratowej (tj. mikrostanów układu).

siebie zaledwie położeniem dwóch kulek o różnych kolorach! (Uwaga: zamiana miejscami kulek tego samego koloru to nie jest dla nas zmiana stanu – nie jesteśmy w stanie różnić atomów tego samego pierwiastka).

Dzięki kombinatoryce wiemy, że liczba takich mikrostanów (oznaczymy ją symbolem Ω) wynosi^[3]:

$$\Omega = \frac{N!}{\left(\frac{N}{n}\right)! \left(\frac{N}{n}\right)! \dots} = \frac{N!}{\left(\frac{N}{n}\right)!^n}. \quad (3)$$

Uważni Czytelnicy na pewno zauważą, że jest to uogólnienie dobrze znanego z liceum symbolu Newtona:

$$\Omega = \binom{k}{1} = \frac{k!}{1!(k-1)!}, \quad (4)$$

który opisuje liczbę możliwych wyborów podzbioru o określonej liczbie elementów l z większego zbioru o liczbie elementów k , czyli de facto liczbę możliwych konfiguracji dwóch podzbiorów: l oraz $k - l$. (Aby dostrzec tę analogię, należy przyjąć, że kolor determinuje tylko liczbę elementów podzbioru, a losowaniu podlegają ich położenia).

Ale wróćmy do naszych kolorowych kulek. Skoro znamy już liczbę możliwych konfiguracji takiego układu, to możemy obliczyć entropię układu. Zgodnie z definicją Boltzmann^[4] entropia układu o liczbie mikrostanów Ω wynosi:

$$S_{\text{conf}} = k_B \ln \Omega, \quad (5)$$

gdzie k_B oznacza stałą Boltzmann, lub w wersji dla jednego mola cząsteczek:

$$S_{\text{conf}} = R \ln \Omega \quad (6)$$

gdzie R oznacza stałą gazową (obydwa wzory pochodzą z rozważań właściwości gazu doskonałego w ramach mechaniki statystycznej, ale są one uniwersalne). Wtedy:

$$S_{\text{conf}} = R \ln \frac{N!}{\left(\frac{N}{n}\right)!^n} \approx R \ln n, \quad (7)$$

przy czym pominęliśmy tutaj przekształcenia prowadzące do uproszczenia wzoru (wykorzystuje się w tym celu dobrze znany wzór Stirlinga: $\ln n! \approx n \ln n - n$). Ponieważ stan wyjściowy ma z definicji entropię zerową (dowolny, odseparowany zbiór jednokolorowych kulek ma entropię $R \ln 1 = 0$, więc ich suma jest również zerowa), to zmiana entropii konfiguracyjnej po wymieszaniu będzie opisywana wzorem:

$$\Delta S_{\text{conf}} \approx R \ln n. \quad (8)$$

Wynika stąd ważny wniosek: im więcej pierwiastków użyjemy do syntezy, z tym większą zmianą entropii konfiguracyjnej będziemy mieć do czynienia.

To jest kluczowa obserwacja. Zauważmy bowiem, że jeśli liczba pierwiastków użytych do syntezy będzie wystarczająco duża, zmiana entropii konfiguracyjnej może zdominować zmianę energii swobodnej Gibbsa we wzorze (1) i uczynić ją ujemną nawet w przypadku $\Delta H_{\text{mix}} > 0$. Innymi słowy: wysoka entropia konfiguracyjna może stabilizować roztwór stały nawet wtedy, gdy entalpia mieszania nie faworyzuje jednoznacznie takiej fazy.

Uwaga: opis ten zakłada jednak idealnie losowe rozmieszczenie atomów, podczas gdy w rzeczywistych HEA mogą występować lokalne preferencje chemiczne i lokalny porządek bliskiego zasięgu. Ponadto ostateczna struktura stopu zależy również od takich czynników jak entalpia mieszania, różnice promieni atomowych (rys. 2), struktura elektronowa oraz efekty kinetyczne.

3 Zob. np. Witold Lipski „Kombinatoryka dla programistów” (WNT, Warszawa, 2007, ISBN: 9788320432596).

4 Patrz ramka pod artykułem.

STOPY O WYSOKIEJ ENTROPII

W tym momencie z naszych rozważań wyłączymy zupełnie związki międzymetaliczne, a zajmijmy się już tylko stopami metalicznymi (a przynajmniej z dominującym udziałem metali). Z punktu widzenia liczby pierwiastków metali biorących udział w syntezie (a co za tym idzie wielkości zmiany entropii konfiguracyjnej) przez długi czas rozróżniało się trzy grupy takich stopów^[5]:

- $\Delta S_{\text{conf}} < R \ln 2$ (tj. $\Delta S_{\text{conf}} < 0,69R$) – stopy o niskiej entropii (ang. low-entropy alloys, LEA). Przykładem takiego stopu jest stal węglowa i stal nierdzewna (składają się one przede wszystkim z żelaza i węgla w znaczących ilościach, choć zawierają oczywiście pewne niezbędne domieszki).
- $R \ln 2 \leq \Delta S_{\text{conf}} < R \ln 5$ (tj. $0,69R \leq \Delta S_{\text{conf}} < 1,61R$) – stopy o średniej entropii (ang. medium-entropy alloys, MEA). Do tej kategorii należą specjalistyczne stopy głównie do zastosowań medycznych i lotniczych.
- $\Delta S_{\text{conf}} \geq R \ln 5$ (tj. $\Delta S_{\text{conf}} \geq 1,61R$) – stopy o wysokiej entropii.

Przyjmowało się więc dość powszechnie, że stopy o wysokiej entropii muszą zawierać co najmniej pięć pierwiastków składowych w znaczących i niekoniecznie równych ilościach (w praktyce ich atomy muszą stanowić co najmniej 5% wszystkich atomów w próbce). Obecnie granica ta nie jest traktowana rygorystycznie, bo wiele stopów HEA zawiera tylko cztery składniki. Oprócz tego część środowiska naukowego odchodzi od definicji opartej wyłącznie na liczbie składników jako zbyt uproszczonej.

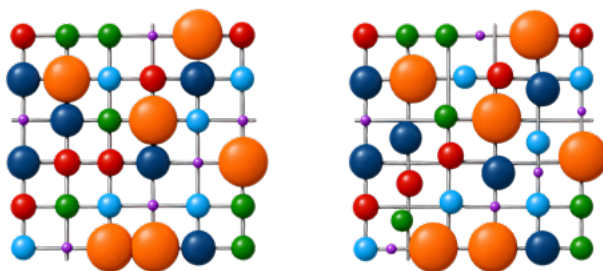
WŁAŚCIWOŚCI STOPÓW O WYSOKIEJ ENTROPII

Można by w tym miejscu zapytać, co czyni stopy o wysokiej entropii wartymi badania. Mówiąc bardzo ogólnie: ich właściwości mechaniczne połączone z ciekawymi właściwościami fizycznymi. Można wyróżnić cztery efekty obserwowane w tych stopach, przy czym wszystkie one są ze sobą mocno powiązane^[6].

Po pierwsze – jak wykazaliśmy wyżej – przypadkowe rozmieszczenie atomów daje niższą energię swobodną. Dlatego omawiane stopy mają często postać stabilnych lub metastabilnych roztworów stałych i krystalizują zwykle w bardzo prostych strukturach krystalicznych o wysokiej symetrii (regularnej bcc lub fcc, rzadziej heksagonalnej hcp i o niższej symetrii). Zgodnie z postacią członu $-T \Delta S_{\text{conf}}$ wysoka temperatura zwiększa wkład entropowy do energii swobodnej, co może sprzyjać stabilizacji roztworu stałego.

5 L. Sun, R. J. Cava "High-entropy alloy superconductors: Status, opportunities, and challenges", *Physical Review Materials* 3, 090301 (2019).

6 Y. F. Ye i in. "High-entropy alloy: challenges and prospects", *Materials Today* 19, 349 (2016).



Rys. 2. Model dwuwymiarowego stopu o wysokiej entropii złożonego z atomów o różnych rozmiarach bez zmiany pozycji atomów (po lewej) i z przykładową deformacją sieci (po prawej).

Nie należy jednak zapominać o tym, że wysoka temperatura może też aktywować segregację i wydzielenie, więc jednofazowość nie jest gwarantowana.

Po drugie, w stopach o wysokiej entropii mamy do czynienia z efektem dystorsji sieci. W tym miejscu należy sobie uświadomić, że rzeczywiste elementy naszego układu, czyli atomy poszczególnych pierwiastków różnią się od siebie chemicznie i fizycznie, choćby wielkością i modulem sprężystości. To powoduje, że prosta sieć krystaliczna stopu o wysokiej entropii jest lokalnie i losowo zdeformowana. To z kolei jest źródłem trwałych naprężeń na poziomie atomowym – zakotwiczenia dyslokacji i trudniejszego ich ruchu. W konsekwencji HEA charakteryzują się wyższą twardością i wyższą granicą plastyczności, wyższą odpornością na pękanie i propagację mikropęknięć, a także podwyższoną odpornością na napromienianie (ang. irradiation), czyli powstawanie defektów w sieci krystalicznej pod wpływem promieniowania jonizującego.

Po trzecie, w wielu HEA obserwuje się obniżoną ruchliwość atomów i wysoką stabilność mikrostruktury, choć dawniej postulowany uniwersalny efekt powolnej dyfuzji jest dziś przedmiotem dyskusji. Niemniej jednak ze względu na obecność w stopie wielu pierwiastków o różnych energiach wiązania i promieniach atomowych zakłócone są kanały dyfuzji atomów w sieci krystalicznej. Dzięki temu stopy o wysokiej entropii wykazują zmniejszone tempo pełzania i rekrytalizacji w wysokich temperaturach, stąd mają bardzo stabilną mikrostrukturę przez długi czas – mają mniejszą skłonność do tworzenia wydzielen, wzrostu ziaren i segregacji pierwiastków, tworzenia faz drugorzędnych, co zwiększa odporność chemiczną HEA (choćby na korozję).

Z tego względu stopy o wysokiej entropii są obiecującą klasą materiałów dla zastosowań wymagających wysokiej odporności mechanicznej, termicznej i chemicznej oraz długotrwałej stabilności eksploatacyjnej. W różnych opracowaniach i Internecie najczęściej mówi się o ich potencjalnym wykorzystaniu jako materiału na łopatki turbin w silnikach lotniczych lub w elektrowniach, osłony termiczne i przewody ciepłe reaktorów jądrowych, opancerzenie, powłoki, osłony i elementy rakiet i statków kosmicznych, narzędzia skrawające, łożyska pracujące w agresywnym środowisku (np. w kwasach), wymienniki ciepła i rury w reaktorach chemicznych, zawory, pompy i mieszałki, a także jako implanty biomedyczne, śruby, płytki i endoprotezy.

Z punktu widzenia fizyki bodaj najistotniejszy jest czwarty efekt, tzw. efekt koktajlu, który polega na tym, że stop wielu różnych metali może mieć zupełnie unikatowe właściwości, znacznie różniące się od prostej sumy właściwości pierwiastków składowych. Z tego powodu myśli się o stopach o wysokiej entropii jako o materiałach funkcjonalnych, czyli materiałach o specjalnych właściwościach, m.in. magnetycznych, termoelektrycznych, katalitycznych, jako o materiałach magazynujących wodór, czy też jako o materiałach nadprzewodzących.

NADPRZEWODNIKI HEA

W projekcie, który mieliśmy przyjemność prowadzić, zajmowaliśmy się poszukiwaniem stopów o wysokiej entropii wykazujących nadprzewodnictwo. Choć zjawisko to odkryto ponad sto lat temu i jest ono dziś wykorzystywane w silnych elektromagnesach m.in. w rezonansie magnetycznym, akceleratorach cząstek czy w laboratoriach badających

właściwości fizyczne materii, jego szersze zastosowanie nadal ograniczają wysokie koszty oraz wymagania technologiczne. Szczególnym problemem są właściwości mechaniczne wielu materiałów nadprzewodzących, które bywają kruche i trudne w eksploatacji. To właśnie dlatego stopy HEA wzbudziły zainteresowanie naukowców.

W 2014 roku Primož Koželj i jego współpracownicy z Uniwersytetu w Ljublanie w Słowenii donieśli na łamach czasopisma *Physical Review Letters* o odkryciu nadprzewodnictwa w stopie o wysokiej entropii^[7]. Stop o składzie chemicznym $\text{Ta}_{34}\text{Nb}_{33}\text{Hf}_8\text{Zr}_{14}\text{Ti}_{11}$ został otrzymany metodą topienia łukowego i wykazywał jednofazową strukturę typu bcc pomimo obecności w nim pięciu różnych pierwiastków o znacznie różniących się promieniach atomowych i masach. Szczegółowe badania oporu elektrycznego, ciepła właściwego oraz podatności magnetycznej przeprowadzone w niskich temperaturach wykazały, że materiał ten jest konwencjonalnym nadprzewodnikiem II rodzaju o temperaturze krytycznej $T_c \approx 7,3$ K oraz górnym polu krytycznym $\mu_0 H_{c2} \approx 8,2$ T.

Był to przełomowy moment, ponieważ wcześniej wydawało się mało prawdopodobne, że tak złożone, wieloskładnikowe układy będą sprzyjać powstawaniu uporządkowanych stanów kwantowych, takich jak nadprzewodnictwo. Odkrycie to zainspirowało szereg badaczy do poszukiwań nadprzewodników HEA i otworzyło nowe kierunki badań nad mechanizmami nadprzewodnictwa w warunkach ekstremalnego nieporządku. Początkowo badano układy podobne do oryginalnego stopu $\text{Ta}_{34}\text{Nb}_{33}\text{Hf}_8\text{Zr}_{14}\text{Ti}_{11}$, ale wraz z upływem czasu odkryto wiele nowych stopów HEA wykazujących właściwości nadprzewodzące.

DLACZEGO NADPRZEWODNIKI HEA SĄ CIEKAWE

Po ponad dekadzie intensywnych badań nadprzewodniki HEA wyłaniają się jako osobna i niezwykle interesująca klasa materiałów nadprzewodzących. Ich właściwości różnią się znacząco od tych obserwowanych w innych nadprzewodnikach, takich jak niektóre czyste pierwiastki, konwencjonalne lub amorficzne stopy, ceramiki tlenkowe lub nadprzewodniki żelazowe. Różnorodność możliwych kombinacji składu chemicznego oraz stechiometrii sprawia, że nadprzewodniki HEA oferują ogromną przestrzeń do projektowania materiałów o pożądanym parametrach.

Obecnie nadprzewodniki HEA dzieli się na cztery główne typy w zależności od struktury krystalicznej^[8]:

- Typ A – stopy zawierające metale przejściowe grup 3, 4 i 5, inne metale przejściowe trzeciego okresu oraz półmetale, takie jak Si i Ge. Krystalizują w strukturze bcc o stosunkowo małych parametrach sieciowych.
- Typ B – stopy złożone wyłącznie z metali przejściowych piątego okresu (szczególnie późnych grup). One również krystalizują w strukturze bcc, ale o większych parametrach sieciowych.
- Typ C – stopy krystalizujące w strukturze chlorku ceszu (CsCl), tworzone z mieszanek metali wczesnych i późnych grup bloku d.
- Typ D – stopy o strukturze hcp.

Jedną z najbardziej zaskakujących właściwości nadprzewodników HEA jest ich niezwykła odporność na działanie wysokiego ciśnienia. Przykładowo nadprzewodnictwo

w stopie TaNbHfZrTi utrzymuje się nieprzerwanie aż do 190 GPa^[9], co odpowiada warunkom panującym w zewnętrznym jądrze Ziemi. Tak wysoka stabilność fazy nadprzewodzącej jest zjawiskiem niemal niespotykanym wśród znanych nadprzewodników. Ciekawą obserwacją jest także to, że T_c nadprzewodników HEA zależy nie tylko od liczby elektronów walencyjnych (VEC), ale również od obecności konkretnych pierwiastków, szczególnie Nb i Ti, które znacząco podnoszą T_c nawet przy tej samej wartości VEC. Wskazuje to na możliwość precyzyjnego projektowania właściwości nadprzewodzących poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego.

Kolejnym istotnym aspektem jest zdolność nadprzewodników HEA do przenoszenia bardzo wysokich gęstości prądu krytycznego J_c . W szczególności stopy o strukturze bcc, takie jak TaNbHfZrTi ^[10] czy NbScTiZr ^[11] przygotowane za pomocą odpowiedniej obróbki cieplnej osiągają wartości J_c porównywalne z obserwowanymi w komercyjnych przewodach Nb-Ti. Zjawisko to jest ściśle związane z obecnością naprężeń sieciowych oraz mikrostrukturą eutektyczną, które pełnią rolę efektywnych centrów kotwiczenia wirów magnetycznych. W niektórych materiałach HEA zaobserwowano również tzw. *fish tail effect*, czyli nietypowe zwiększenie J_c w wyższych polach magnetycznych, związane z obecnością nanometrycznych faz wtórnych (np. klastrow o rozmiarze ok. 10 nm)^[12]. Tego typu mikrostruktury przypominają znane z przewodów Nb-Ti wytrącenia α -Ti, które są kluczowe dla ich wysokiej wydajności. *Fish tail effect* wskazuje na obecność skutecznych centrów kotwiczenia w wysokich polach, co jest kluczowe dla zastosowań technologicznych, np. w magnesach nadprzewodzących pracujących w silnych polach.

Połączenie wymienionych właściwości z wysoką odpornością mechaniczną, chemiczną i termiczną charakterystyczną dla wielu stopów o wysokiej entropii sprawia, że nadprzewodniki HEA są interesujące nie tylko z punktu widzenia badań podstawowych, ale również potencjalnych zastosowań technologicznych.

NADPRZEWODNIKI HEA ODKRYTE WE WROCŁAWIU

Grupa naukowców z Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego oraz z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN kierowana przez jednego z nas (dr. hab. Rafała Idczaka, prof. uczelni) jest obecnie jednym z najbardziej aktywnych zespołów zajmujących się nadprzewodnikami HEA w Polsce. W ciągu ostatnich kilku lat udało nam się przeprowadzić szereg kompleksowych badań nad strukturą krystaliczną, właściwościami fizycznymi oraz strukturą elektronową nowych materiałów HEA.

Do najważniejszych osiągnięć naszego zespołu należy odkrycie pierwszych nadprzewodzących HEA zawierających Mo, W i Th: $(\text{NbTa})_{0,67}(\text{MoHfW})_{0,33}$ ^[13] oraz $(\text{NbTa})_{0,67}(\text{MoWTh})_{0,33}$ ^[14]. Osoby zorientowane w materiałach nadprzewodzących zauważą z pewnością, że zastosowano tutaj metodę dodawania kolejnych pierwiastków do znanego wcześniej stopu nadprzewodzącego NbTa, tak aby uczynić z niego stop o wysokiej entropii.

9 K. Jasiewicz i in. "Pressure effects on the electronic structure and superconductivity of $(\text{TaNb})_{0.67}(\text{HfZrTi})_{0.33}$ high entropy alloy", *Physical Review B* 100, 184503 (2019).

10 S.-G. Jung i in. "High critical current density and high-tolerance superconductivity in high-entropy alloy thin films", *Nature Communications* 13, 3373 (2022).

11 J. Kitagawa i in. "Superconducting properties of eutectic high-entropy alloy superconductor NbScTiZr ", *Materials Today Communications* 40, 109690 (2024).

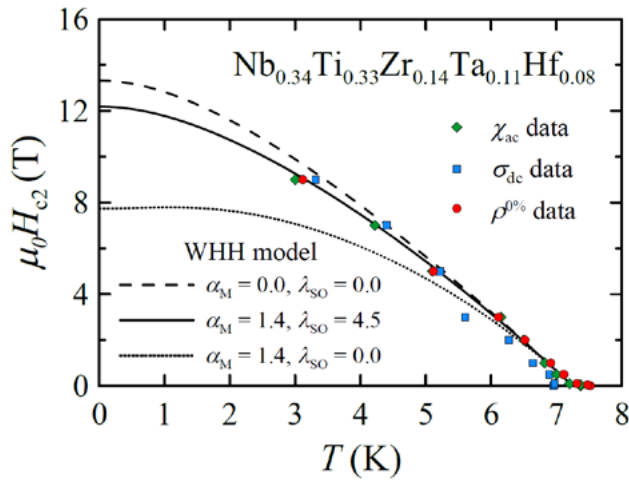
12 L. Gao i in. "Fish tail effect and the vortex phase diagram of high-entropy alloy superconductor", *Applied Physics Letters* 120, 092602 (2022).

13 P. Sobota i in. "Superconductivity in the high-entropy alloy $(\text{NbTa})_{0.67}(\text{MoHfW})_{0.33}$ ", *Physical Review B* 106, 184512 (2022).

14 P. Sobota i in. "Superconductivity in high-entropy alloy system containing Th", *Scientific Reports* 13, 16317 (2023).

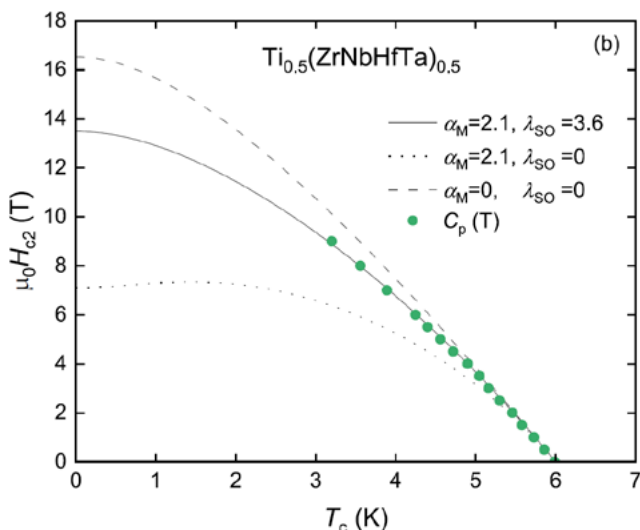
7 P. Koželj i in. "Discovery of a Superconducting High-Entropy Alloy", *Physical Review Letters* 113, 107001 (2014).

8 L. Zeng i in. "Recent advances in high-entropy superconductors", *NPG Asia Materials* 16, 60 (2024).



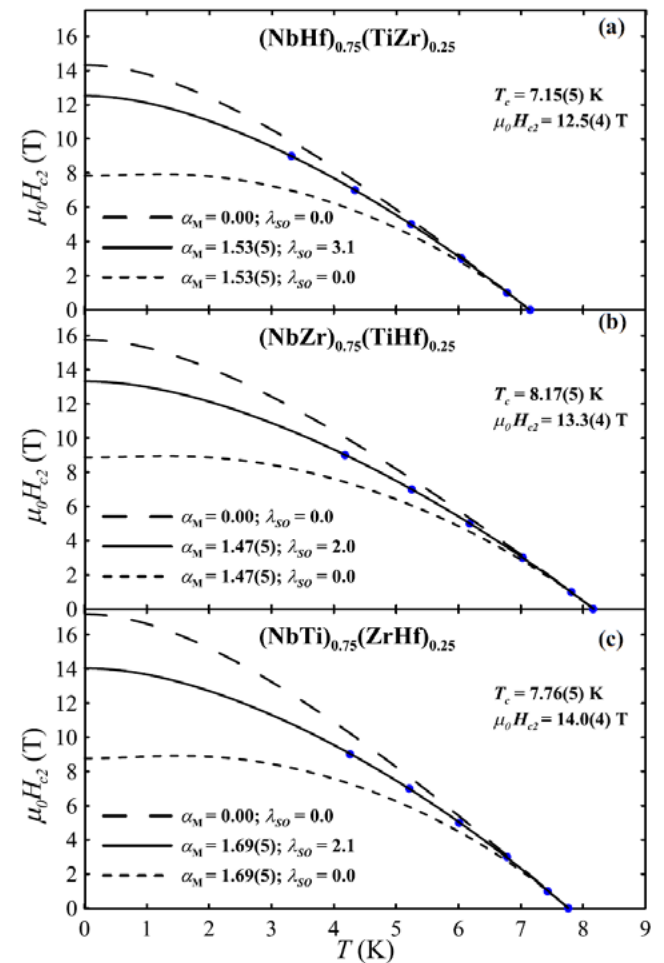
Rys. 3. Zależność $\mu_0 H_{c2}(T)$ dla stopu $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}$ sporządzona na podstawie analizy wyników pomiarów oporności właściwej, ciepła właściwego oraz namagnesowania przy użyciu modelu WHH^[15]; szczegóły analizy opisane zostały w pracy Materials 16, 5814 (2023), z której została zapożyczona ilustracja.

Ponieważ otrzymane w ten sposób materiały oparte na matrycy NbTa wykazują stosunkowo niskie wartości parametrów krytycznych, rozpoczęliśmy syntezę nowych stopów opartych na matrycy NbTi, która – jak wiadomo – ma znacznie lepsze właściwości nadprzewodzące niż NbTa. Pierwszym krokiem było przygotowanie stopu $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}$ ^[15], w którym zawartości Ti i Ta zostały zamienione względem wcześniej znanego $\text{Nb}_{0.33}\text{Ta}_{0.34}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ti}_{0.11}$ ^[16]. Rys. 3 przedstawia diagram fazowy nadprzewodnictwa w układzie $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}$ otrzymany na podstawie wyników eksperymentów oraz ich analizy przy użyciu modelu WHH (Werthamera–Helfand–Hohenberga)^[17]. Pokazuje on, że nowy stop ma znacznie wyższe górne pole krytyczne $\mu_0 H_{c2}(0)$ niż stop pierwotny (odpowiednio 12,2 T i 8,3 T) przy zachowaniu podobnej temperatury krytycznej T_c (odpowiednio 7,5 K i 7,3 K), co przekłada się bezpośrednio na wyższy potencjał aplikacyjny stopu $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}$.



Rys. 4. Zależność $\mu_0 H_{c2}(T)$ dla stopu $\text{Ti}_{0.5}(\text{ZrNbHfTa})_{0.5}$ sporządzona na podstawie analizy wyników pomiarów ciepła właściwego przy użyciu modelu WHH^[15]; szczegóły analizy można znaleźć w pracy Acta Materialia 285, 120666 (2025), z której została zapożyczona ilustracja.

Zauważyliśmy również, że chociaż czysty tytan krystalizujący w strukturze heksagonalnej jest bardzo słabym nadprzewodnikiem pierwszego rodzaju ($T_c < 0,4$ K, $\mu_0 H_{c2}(0) < 0,1$ T), to stopy o strukturze bcc i dużej zawartości Ti osiągają znacznie lepsze parametry nadprzewodzące. Skłoniło nas to do rozpoczęcia syntezy nowych HEA bogatych w tytan. Przypuszczaliśmy, że stopy tego typu mogą wykazywać wyższe wartości T_c i H_{c2} niż wcześniej badany $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Hf}_{0.08}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}$ ^[13]. I rzeczywiście, $\text{Ti}_{0.5}(\text{ZrNbHfTa})_{0.5}$ oraz $\text{Ti}_{0.5}(\text{VNbHfTa})_{0.5}$ okazały się nadprzewodnikami o $T_c \approx 6$ K oraz $\mu_0 H_{c2}(0) > 12$ T^[18]. Szczególnie interesujący okazał się stop $\text{Ti}_{0.5}(\text{ZrNbHfTa})_{0.5}$, dla którego wyznaczono wartość $\mu_0 H_{c2}(0) = 13,5$ T (rys. 4). Zgodnie z obecnym stanem wiedzy jest to najwyższa wartość spośród wszystkich znanych nadprzewodników HEA o strukturze bcc.



Rys. 5. Diagramy fazowe $\mu_0 H_{c2}(T)$ dla stopów $(\text{NbHf})_{0.75}(\text{TiZr})_{0.25}$, $(\text{NbZr})_{0.75}(\text{TiHf})_{0.25}$ oraz $(\text{NbTi})_{0.75}(\text{ZrHf})_{0.25}$ sporządzone na podstawie analizy wyników pomiarów ciepła właściwego przy użyciu modelu WHH^[15]; szczegóły analizy zostały omówione w artykule Physical Review B 112, 014513 (2025), z którego zapożyczono ilustrację.

W jednej z najnowszych prac naszego zespołu pokazaliśmy, że reguła Matthiasa, wiążąca temperaturę przejścia nadprzewodzącego z liczbą elektronów walencyjnych (VEC), nie wystarcza do przewidywania właściwości nadprzewodzących HEA. Zbadaliśmy trzy izoelektronowe stopy: $(\text{NbHf})_{0.75}(\text{TiZr})_{0.25}$, $(\text{NbZr})_{0.75}(\text{TiHf})_{0.25}$ oraz $(\text{NbTi})_{0.75}(\text{ZrHf})_{0.25}$, wszystkie o tej samej wartości VEC = 4,375^[19]. Mimo identycznej liczby elektronów walen-

15 R. Idczak i in., "Enhanced Superconducting Critical Parameters in a New High-Entropy Alloy $\text{Nb}_{0.34}\text{Ti}_{0.33}\text{Zr}_{0.14}\text{Ta}_{0.11}\text{Hf}_{0.08}$ ", Materials 16, 5814 (2023).

16 P. Koželj i in., "Discovery of a Superconducting High-Entropy Alloy", Physical Review Letters 113, 107001 (2014).

17 N. R. Werthamer, E. Helfand, and P. C. Hohenberg, "Temperature and Purity Dependence of the Superconducting Critical Field, H_{c2} . III. Electron Spin and Spin-Orbit Effects", Physical Review 147, 295–302 (1966)

18 P. Sobota i in., "New type of Ti-rich HEA superconductors with high upper critical field", Acta Materialia 285, 120666 (2025).

19 R. Idczak i in., "Violation of Matthias rule: Elemental composition as the key determinant of critical temperature in bcc high-entropy superconductors", Physical Review B 112, 014513 (2025).

cyjnych stopy te wykazywały wyraźnie różne temperatury krytyczne – od 7,14 K do 8,17 K, co zostało zaprezentowane na rys. 5. Zaobserwowaliśmy również, że najwyższe wartości $\mu_0 H_{c2}(0)$ osiągały stopy bogate w tytan. Innymi słowy, o właściwościach nadprzewodzących HEA decyduje nie tylko liczba elektronów walencyjnych, ale również konkretny skład chemiczny stopu.

ŁYŻKA DZIEGCIU

Na zakończenie należy zaznaczyć, że wiele proponowanych zastosowań stopów HEA nie doczekało się jeszcze szerokiego wdrożenia przemysłowego i pozostaje na etapie badań lub wczesnej komercjalizacji. Istotnym ograniczeniem są wysokie koszty surowców, ponieważ stopy te często zawierają znaczne udziały drogich pierwiastków zamiast powszechnie stosowanych tanich metali, takich jak żelazo. Problemem bywają również trudności technologiczne związane z syntezą i obróbką materiałów wieloskładnikowych, które nierzadko wymagają wysokich temperatur i precyzyjnej kontroli procesu.

Dodatkowym wyzwaniem pozostaje ogromna liczba możliwych kombinacji składu chemicznego, utrudniająca przewidywanie właściwości nowych stopów. Jednocześnie

sprawia to, że stopy HEA pozostają jedną z najbardziej fascynujących klas współczesnych materiałów. Wciąż odkrywane są nowe układy o zaskakujących właściwościach mechanicznych, magnetycznych czy nadprzewodzących, a granice możliwości tych materiałów nadal nie są dobrze poznane. Stopy HEA są stosunkowo młodą klasą materiałów, dlatego niewykluczone, że część technologii przyszłości będzie oparta właśnie na stopach, które dziś istnieją jedynie w laboratoriach.

AUTORZY



Prof. dr hab. **Adam Pikul** (ORCID: 0000-0002-5998-0707) jest profesorem Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Specjalizuje się w fizyce materii skondensowanej, zwłaszcza w badaniach magnetyzmu, układów silnie skorelowanych, materiałów kwantowych opartych na aktywnościach oraz stopów o wysokiej entropii.



Dr hab. **Rafał Idczak**, prof. UWr (ORCID: 0000-0002-4001-8649) jest profesorem na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego. Zajmuje się naukowo projektowaniem i charakteryzacją materiałów funkcjonalnych, w tym nadprzewodzących stopów o wysokiej entropii.

FUNKCJE STANU W TERMODYNAMICE

Z II zasady termodynamiki wiadomo, że izolowany układ termodynamiczny dąży do stanu równowagi, a w procesie tym entropia wzrasta, osiągając maksimum. Pojęciem stowarzyszonym z entropią jest prawdopodobieństwo termodynamiczne Ω , które definiujemy jako liczbę możliwych mikrostanów, odpowiadających danemu makrostanowi (p, V, T) . Zauważmy, że parametr Ω , podobnie jak entropia S również rośnie podczas przebiegu procesu i osiąga w stanie równowagi swoje maksimum. Jest to konsekwencją naturalnego założenia, że prawdopodobieństwo termodynamiczne w tym stanie powinno być największe. Jeśli tak, to istnieje jakaś zależność funkcyjna $S = f(\Omega)$. Entropia (podobnie jak energia) jest wielkością addytywną, zaś prawdopodobieństwo termodynamiczne jest wielkością multiplikatywną. Oznacza to, że jeżeli mamy dwa niezależne podukłady A i B i odpowiadające im dwa niezależne makrostany, to ich całkowita entropia wyraża się wzorem:

$$S = S_A + S_B = f(\Omega) = f(\Omega_A \cdot \Omega_B) = f(\Omega_A) + f(\Omega_B)$$

Funkcją, która spełnia zależność: $f(\Omega_A \cdot \Omega_B) = f(\Omega_A) + f(\Omega_B)$ jest logarytm. Zatem $S \sim \ln \Omega$.

Z fenomenologicznej definicji entropii $\Delta S = \Delta Q / T$ (zwanej czasem ciepłem zredukowanym) wiemy, że wymiar entropii to J/K. Otrzymane wyżej wyrażenie logarytmiczne musimy zatem pomnożyć przez wielkość o tym wymiarze. Intuicja fizyczna podpowiada nam, że wielkością tą powinna być fundamentalna stała fizyki, jaką jest stała Boltzmanna $k_B \cong 1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$.

Poza energią wewnętrzną U definiowane są także inne potencjały termodynamiczne, których użyteczność polega między innymi na tym, że w określonych warunkach wielkości te osiągają swoje minima i określają kierunek procesów samorzutnych.

Entalpia: $H = U + pV$.

Entalpia swobodna (funkcja Gibbsa): $G = H - TS$.

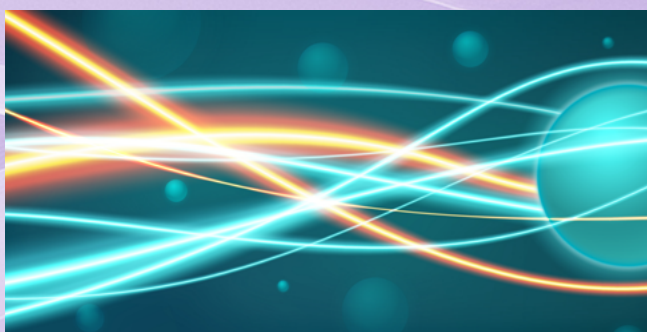
Energia swobodna (funkcja Helmholtza): $F = U - TS$.

Widzimy też, że $G - F = pV$. W ciałach stałych, które są mało ściśliwe, ta różnica jest do pominięcia, co oznacza, że $\Delta G \cong \Delta F$ oraz $\Delta H \cong \Delta U$. W przebiegu procesów termodynamicznych stosujemy oczywiście przyrosty omawianych wielkości. Wszystkie potencjały termodynamiczne są funkcjami stanu, tzn. ich zmiany zależą tylko od stanu końcowego i początkowego procesu. Funkcje stanu należy odróżnić od funkcji procesu, takich jak ciepło Q lub praca W , które dodatkowo zależą od drogi, tzn. od sposobu przejścia ze stanu początkowego do końcowego. Warto zapamiętać, że w warunkach izotermiczno-izobarycznych minimum przyjmuje funkcja G , zaś w warunkach izotermiczno-izochorycznych minimum osiąga funkcja F . Podobnie, energia U osiąga minimum w warunkach izoentropowo-izochorycznych (S, V – stałe) zaś entalpia H w warunkach izoentropowo-izobarycznych. Entropia S w układach izolowanych w stanie równowagi zawsze osiąga maksimum.



KWARTAŁ BADAŃ

Nowe wyniki badań z udziałem polskich fizyków



DWA RODZAJE EKSCYTONÓW W JEDNYM KRYSZTALE MAGNETYCZNYM

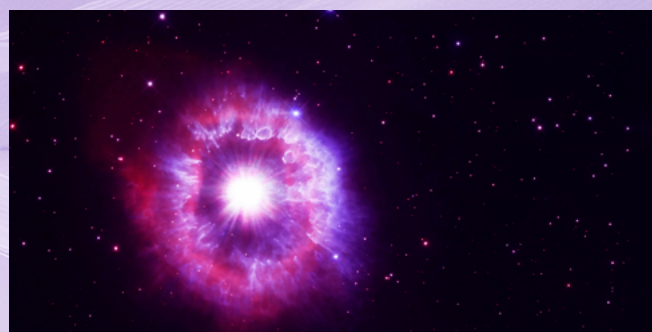
W pracy opublikowanej w *Nature Communications* międzynarodowy zespół badaczy pod kierunkiem naukowców z Politechniki Wrocławskiej zbadał właściwości ekscytonów w warstwowym półprzewodniku magnetycznym CrSBr.

Przypomnijmy, że ekscytony, czyli związane pary elektronu i dziury, odpowiadają między innymi za optyczne właściwości półprzewodników i są kluczowe dla przyszłych technologii optoelektronicznych oraz spinowo-fotonicznych. W CrSBr współistnieją dwa różne typy ekscytonów: bardziej zlokalizowany ekscyton typu Frenkla (XA) oraz zdelokalizowany ekscyton typu Wanniera-Motta (XB). Takie współwystępowanie dwóch typów ekscytonów w jednym dwuwymiarowym materiale jest rzadkie i pozwala bezpośrednio porównywać dwa fundamentalne reżimy fizyki ekscytonów.

Łącząc spektroskopię magnetooptyczną w bardzo silnych polach magnetycznych (do 85 T) z obliczeniami ab initio, badacze wykazali, że ekscyton XB reaguje na zmiany magnetyzmu materiału nawet dziesięciokrotnie silniej niż XA. Wynika to z jego większego rozmiaru przestrzennego i silniejszego powiązania ze strukturą pasmową kryształu.

CrSBr stanowi wyjątkową platformę do analizowania sprzężenia między ekscytonami, magnetyzmem i drganiami sieci krystalicznej. Wskazują one również na to, że do opisu takich silnie skorelowanych materiałów konieczne są zaawansowane metody obliczeniowe dla wielu ciał, które wykraczają poza klasyczne modele fenomenologiczne.

Opracowano na podstawie publikacji:
Maciej Śmirtka i in., Distinct magneto-optical response
of Frenkel and Wannier excitons in CrSBr,
Nature Communications 17, 1777 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-026-68482-5



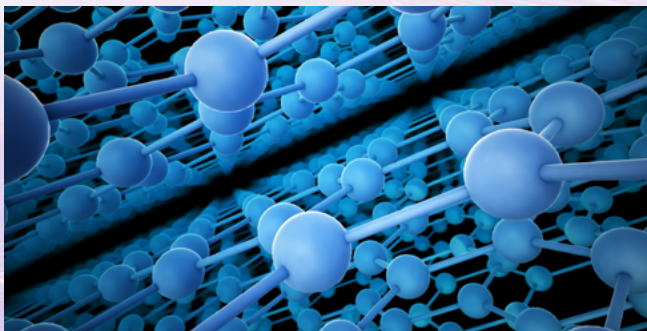
JAK POWSTAJĄ CIĘŻKIE PIERWIASTKI PO ZDERZENIACH GWIAZD NEUTRONOWYCH?

Zderzenia gwiazd neutronowych oraz układów gwiazda neutronowa–czarna dziura należą do najbardziej energetycznych zjawisk we Wszechświecie. Oprócz krótkich błysków gamma (GRB) mogą one prowadzić do powstania tzw. kilonowych – krótkotrwałych rozbłysków optycznych zasilanych rozpadem promieniotwórczym ciężkich pierwiastków. W pracy opublikowanej przez zespół z Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w czasopiśmie *Astronomy & Astrophysics* zbadano, jak takie pierwiastki powstają w materii wyrzucanej z dysku akrecyjnego, który tworzy się wokół czarnej dziury po zderzeniu kompaktowych obiektów. Autorzy przeprowadzili szczegółowe symulacje numeryczne uwzględniające ogólną teorię względności, pola magnetyczne oraz emisję neutrin. Dzięki temu mogli prześledzić zarówno ruch materii, jak i jej skład chemiczny.

Okazuje się, że z dysku wyrzucane są strumienie materii bogatej w neutrony. To właśnie w nich zachodzi tzw. proces r, prowadzący do powstawania bardzo ciężkich pierwiastków, takich jak złoto czy uran. Właściwości tych strumieni – ich masa, prędkość i skład – zależą od parametrów układu, takich jak masa dysku czy rotacja czarnej dziury. Praca pokazuje też, że w wielu rozważanych modelach energia dostępna do zasilania dżetu jest zbyt mała, aby wyjaśnić najjaśniejsze błyski gamma obserwowane wraz z kilonowymi. Może to prowadzić do sytuacji, w której obserwujemy kilonową bez wyraźnego GRB. Opublikowane wyniki pomagają lepiej zrozumieć pochodzenie najcięższych pierwiastków we Wszechświecie oraz interpretację obserwacji towarzyszących zderzeniom gwiazd neutronowych.

Opracowano na podstawie publikacji:
A. Janiuk i in., Chemical evolution and kilonova
implications of post-merger accretion disk winds,
Astronomy & Astrophysics 707, A307 (2026),
DOI: 10.1051/0004-6361/202557832





ELEKTRONY 2D UKRYTE W KRYSTALE 3D

W fizyce ciała stałego zwykle zakłada się, że sposób poruszania się elektronów dość wiernie odzwierciedla budowę kryształu. Jeśli materiał ma strukturę trójwymiarową, to i transport elektronów powinien być zasadniczo trójwymiarowy. Międzynarodowy zespół, z udziałem badaczy z AGH w Krakowie, sprawdził, czy można ten związek rozłączyć.

Badając związek HfSn_2 , autorzy pokazali, że mimo silnych wiązań 3D elektrony zachowują się w dużej mierze jak w układzie dwuwymiarowym. Kluczowe okazało się chiralne ułożenie warstw o strukturze plastra miodu, które chroni pasma 2D i pozwala im dominować w transporcie.

Własności elektronowe materiału nie muszą więc odpowiadać jego budowie przestrzennej. To otwiera nową drogę projektowania materiałów topologicznych i spintronicznych, w których funkcjonalność można ukryć wewnątrz pozornie zwykłej struktury 3D.

Opracowano na podstawie publikacji: Hai Lin i in.,
Decoupling structural and electronic dimensionality:
2D transport in a 3D honeycomb chiral stacking,
Matter 9 (2), 102578 (2026), DOI: 10.1016/j.matt.2025.102578



KONTROLA UKŁADU KWANTOWEGO BEZ ZAGŁĄDANIA DO ŚRODKA

Dynamiczny rozwój technologii kwantowych – takich jak komputery kwantowe czy kryptografia – rodzi pytanie, jak sprawdzić, czy urządzenia rzeczywiście działają zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej. Tradycyjne metody wymagają dokładnej wiedzy o aparaturze, co nie zawsze jest możliwe. Dlatego rozwija się podejście niezależne od urządzeń (device-independent), oparte wyłącznie na analizie wyników pomiarów.

W pracy opublikowanej w *Nature Physics* zaproponowano uniwersalną metodę tzw. self-testingu, która pozwala wnioskować o właściwościach stanów kwantowych, także mieszanych, oraz wykonywanych pomiarów. Metoda wykorzystuje sieci kwantowe z wieloma niezależnymi źródłami splątania i odpowiednio dobrane nierówności Bella. Jeśli obserwowane korelacje spełniają określone warunki, można na ich podstawie odtworzyć – z dokładnością do znanych równoważności, takich jak lokalne przekształcenia

czy sprzężenie zespolone – strukturę stanów i operacji pomiarowych, bez znajomości szczegółów urządzenia. W przypadku stanów kwantowych certyfikacja ma charakter pośredni i opiera się na ich zdalnym przygotowaniu w sieci.

Jest to pierwsze podejście, które w jednym schemacie obejmuje tak ogólny przypadek, w tym pomiary typu POVM (*Positive Operator-Valued Measure*) oraz stany mieszane. Wyniki są ważne dla fizyki podstawowej i zastosowań: pogłębiają rozumienie związku między nielokalnością a strukturą układów kwantowych oraz mogą pomóc w tworzeniu bardziej wiarygodnych technologii kwantowych. Autorzy, w tym Remigiusz Augustiak z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, podkreślają, że rozważany schemat sieciowy jest zasadniczo możliwy do realizacji przy użyciu współczesnych technologii, choć część jego elementów pozostaje eksperymentalnie wymagająca.

Opracowano na podstawie publikacji: S. Sarkar i in.,
A universal scheme to self-test any quantum state or
measurement, Nature Physics 22, 446 (2026),
DOI: 10.1038/s41567-026-03181-y



ULTRAZIMNE CZĄSTECZKI JAKO NOWE NARZĘDZIE POSZUKIWAŃ FIZYKI POZA MODELEM STANDARDOWYM

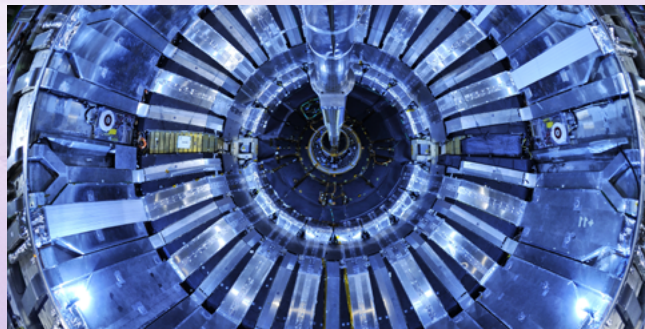
Dynamiczny rozwój fizyki precyzyjnych pomiarów sprawia, że cząsteczki stają się ważnym narzędziem w poszukiwaniu nowej fizyki wykraczającej poza Model Standardowy. Jednym z kluczowych celów jest pomiar elektrycznego momentu dipolowego elektronu (eEDM), którego niezerowa wartość oznaczałaby naruszenie podstawowych symetrii.

W pracy opublikowanej w *Physical Review X* polsko-włoski zespół naukowców z dominującym udziałem fizyków z Uniwersytetu Warszawskiego zaproponował nowy typ układów do takich badań: ultrazimne cząsteczki iterbu i chromu. Ich zaletą jest szczególna kombinacja właściwości: ciężki atom iterbu wzmacnia efekty relatywistyczne, a chrom dostarcza niesparowanego elektronu. Dzięki temu cząsteczka jest bardzo czuła na poszukiwany efekt. Istotną rolę odgrywa także nietypowa struktura poziomów energetycznych, pozwalająca łatwo zorientować cząsteczkę w polu elektrycznym. To umożliwia dokładniejsze pomiary. Autorzy pokazali również, że takie cząsteczki można wytwarzać i kontrolować znanymi technikami fizyki ultrazimnych atomów.

Szacowana czułość eksperymentu może być ponad dziesięć razy lepsza niż w obecnych pomiarach. Oznacza to realną szansę na wykrycie nowych efektów. Praca wskazuje też, że podobne podejście można wykorzystać do badania subtelnych własności materii.

Opracowano na podstawie publikacji: A. Ciamei i in.,
Ultracold High-Spin Σ -State Polar Molecules for New
Physics Searches, Physical Review X 16, 011052 (2026),
DOI: 10.1103/wlq7-9p41





REKORDOWO DOKŁADNY POMIAR MASY BOZONU W

Międzynarodowy zespół eksperymentu CMS (*Compact Muon Solenoid*) przy Wielkim Zderzaczu Hadronów w ośrodku CERN opublikował na łamach *Nature* wyniki pierwszego wysokoprecyzyjnego pomiaru masy bozonu W wykonanego przez ten eksperyment. Zespół wyznaczył wartość masy bozonu W na $m_W = 80\,360,2 \pm 9,9$ MeV, co pozostaje zgodne z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Bozon W jest nośnikiem oddziaływań słabych, a jego masa stanowi jeden z kluczowych parametrów Modelu Standardowego. Szczególnie istotne jest porównanie wyniku eksperymentalnego z przewidywaniami tzw. globalnych dopasowań elektroslabych, ponieważ ewentualne odchylenia mogłyby wskazywać na wpływ nowych, nieodkrytych jeszcze cząstek pojawiających się w poprawkach kwantowych.

Pomiar wykonano na podstawie analizy ponad 100 milionów rozpadów $W \rightarrow \mu\nu$ zarejestrowanych w zderzeniach proton-proton o energii 13 TeV. Analiza opierała się na bardzo precyzyjnej rekonstrukcji pędu mionów oraz zaawansowanych modelach teoretycznych opisujących produkcję bozonów W w zderzeniach hadronowych.

Wynik CMS ma szczególne znaczenie w kontekście wcześniejszego pomiaru eksperymentu CDF w Fermilabie (*Collider Detector at Fermilab*), który sugerował możliwą niezgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego. Nowy rezultat CMS nie potwierdza tej rozbieżności i stanowi istotny krok w kierunku wyjaśnienia tzw. zagadki masy bozonu W.

Opracowano na podstawie publikacji:
The CMS Collaboration, High-precision measurement of the W boson mass with the CMS experiment, *Nature* 652, 321 (2026), DOI: 10.1038/s41586-026-10168-5



ŚLADY WSPÓLNEGO RUCHU CZĄSTEK W ZDERZENIACH PROTONÓW

W czasopiśmie *Nature Communications* opublikowano najnowsze wyniki eksperymentu ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) – jednego z największych eksperymentów działających przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN-ie. Naukowcy zaobserwowali, że nawet w zderzeniach pojedynczych protonów mogą pojawiać się efekty przypominające zachowanie materii powstającej w zderzeniach ciężkich jąder atomowych.

Dotychczas sądzono, że tzw. plazma kwarkowo-gluonowa – bardzo gorący stan materii istniejący krótko po Wielkim Wybuchu – powstaje tylko w dużych układach, np. podczas zderzeń jąder ołowiu. Nowe wyniki sugerują jednak, że pewne cechy takiej materii mogą pojawiać się także w dużo mniejszych zderzeniach protonów. Badacze analizowali sposób, w jaki po zderzeniu rozlatują się różne cząstki, m.in. piony, kaony i protony. Okazało się, że zachowują się one tak, jakby wcześniej uczestniczyły we wspólnym, kolektywnym ruchu. Najlepiej opisują to modele zakładające, że po zderzeniu kwarki i gluony przez bardzo krótki czas zachowują się kolektywnie, podobnie jak w plazmie kwarkowo-gluonowej.

Autorzy podkreślają, że nie oznacza to jeszcze jednoznacznego odkrycia plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach protonów. Wyniki są jednak ważną wskazówką, że nawet bardzo małe układy cząstek mogą krótko wykazywać kolektywne zachowanie kwarków i gluonów przed utworzeniem hadronów.

Opracowano na podstawie publikacji:
The ALICE Collaboration, Observation of partonic flow in proton-proton and proton-nucleus collisions, *Nature Communications* 17, 2585 (2026), DOI: 10.1038/s41467-025-67795-1



NOWY EFEKT KWANTOWY W METALU KAGOME

Naukowcy z Krakowa i Warszawy uczestniczyli w badaniach opublikowanych w *Advanced Materials*, dotyczących nowego zjawiska kwantowego w materiale CsTi_3Bi_5 . Należy on do tzw. metali kagome – układów o szczególnej geometrii sieci krystalicznej, sprzyjającej pojawianiu się nietypowych efektów kwantowych.

Fizycy od kilku lat podejrzewali, że w takich materiałach mogą występować tzw. prądy pętlowe, czyli uporządkowane ruchy elektronów po zamkniętych ścieżkach w sieci krystalicznej. Ich wykrycie jest jednak bardzo trudne, ponieważ generują bardzo słabe sygnały magnetyczne. W opublikowanej pracy wykorzystano zaawansowaną technikę fotoemisji ARPES z kołowo spolaryzowanym światłem synchrotronowym. Badacze odkryli nietypową zależność między polaryzacją światła a spinem elektronów, nazwaną anomalią spinowo-optyczną o strukturze helikalnej (*anomalous spin-optical helical effect*). Wyniki są zgodne z interpretacją zakładającą obecność prądów pętlowych i silnych korelacji spinowo-orbitalnych.

Efekt zaobserwowano mimo braku klasycznych sygnałów silnego magnetyzmu, co sugeruje istnienie subtelniejszych form porządku kwantowego. Autorzy podkreślają, że odkryte zjawisko może stać się narzędziem do badania egzotycznych faz materii oraz zależności między światłem a spinem elektronów w nowoczesnych materiałach kwantowych.

Opracowano na podstawie publikacji: F. Mazzola i in., Anomalous Spin-Optical Helical Effect in Ti-Based Kagome Metal, *Advanced Materials* 38 (21), e22533, DOI: 10.1002/adma.202522533





TOMASZ KACIK

POLSCY NAUCZYCIELE W CERN

RELACJA Z PROGRAMU

THE POLISH TEACHER PROGRAMME 2026

Wyobraź sobie miejsce, w którym naukowcy próbują odpowiedzieć na pytania zadawane od tysięcy lat: Z czego zbudowany jest Wszechświat? Dlaczego istnieje materia? Co działo się w pierwszych ułamkach sekundy po Wielkim Wybuchu? Odpowiedzi na te pytania naukowcy poszukują w CERN-ie – największym laboratorium fizyki cząstek na świecie, położonym na granicy Szwajcarii i Francji. W marcu 2026 roku odwiedziła to miejsce grupa polskich nauczycieli w ramach programu The Polish Teacher Programme 2026. Przez sześć dni, od 22 do 27 marca, zagłębiali się w świat nauki, który na co dzień znany jest głównie z podręczników, wykładów i... filmów science fiction.

Ta wizyta była jak wejście do „wnętrza” Wszechświata – miejsca, gdzie bada się jego najmniejsze elementy i największe tajemnice.

CERN – LABORATORIUM WIĘKSZE NIŻ WYOBRAŹNIA

CERN to nie tylko Wielki Zderzacz Hadronów (LHC), choć to właśnie on przyciąga najczęściej uwagi. To ogromny kompleks laboratoriów, hal testowych, centrów danych i budynków badawczych. To tutaj w 2012 roku potwierdzono istnienie bozonu Higgsa, a wcześniej — w latach 80. — odkryto cząstki odpowiedzialne za oddziaływanie słabe. W tym miejscu powstał pierwszy serwer World Wide Web, a technologie opracowane w CERN-ie trafiają dziś do medycyny, przemysłu i energetyki. Dla nauczycieli, którzy na co dzień tłumaczą uczniom, czym jest atom, fala elektromagnetyczna czy prędkość światła, zobaczenie tego wszystkiego na własne oczy było jak przejście z dwuwymiarowego rysunku do trójwymiarowej rzeczywistości.



W budynku 2 Wydziału Elektroniki i Informatyki dla Fizyki (ECP) Tim Berners-Lee i Robert Cailliau stworzyli wszystkie fundamentalne technologie World Wide Web.

INTENSYWNE SZKOLENIE – FIZYKA, KTÓRA ŻYJE

Program dla nauczycieli nie miał charakteru popularnonaukowej atrakcji dla zwiedzających. Było to intensywne spotkanie z nowoczesną fizyką, prowadzone przez naukowców i specjalistów pracujących na co dzień w CERN-ie.

Program rozpoczął się, wydawałoby się, dość klasycznie: od cyklu trzech wykładów poświęconych cząstkom elementarnym oraz Modelowi Standardowemu, prowadzonych przez dr. hab. Pawła Maleckiego z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Już po pierwszych spotkaniach stało się jednak jasne, że nie mamy do czynienia z typowym kursem akademickim, lecz z przedsięwzięciem o wyjątkowej atmosferze i ambitnym charakterze, w którym naukowa pasja łączyła się z autentyczną ciekawością świata.

To właśnie w Głównym Audytorium CERN-u Peter Higgs oraz François Englert dowiedzieli się o przyznaniu im Nagrody Nobla za teoretyczne przewidzenie istnienia bozonu Higgsa. Świadomość, że siedzimy w tej samej sali, w której rozgrywały się jedne z najważniejszych momentów współczesnej fizyki, robiła ogromne wrażenie.

Wracając do wykładu, zapadło mi w pamięć ciekawe stwierdzenie, które do mnie przemówiło, a dotyczyło przełomowych odkryć w nauce na przykładzie bozonu Higgsa. Na slajdzie zobaczyliśmy schemat:

SZALONY POMYSŁ → PRZESŁANKI → ODKRYCIE



Autor artykułu siedzący na miejscu, na którym Peter Higgs dowiedział się o przyznaniu mu Nagrody Nobla.

Najpierw pojawia się odważna, często wydająca się wręcz abstrakcyjna idea. Następnie naukowcy przez lata gromadzą teoretyczne i eksperymentalne przesłanki potwierdzające jej sensowność. Dopiero na końcu przychodzi moment odkrycia — chwila, która dla świata zewnętrznego wydaje się nagłym sukcesem, choć w rzeczywistości jest efektem wieloletniej pracy, cierpliwości i konsekwencji.

Co było tym szalonym pomysłem w przypadku bozonu? Po prostu Peter Higgs wprowadził do Modelu Standardowego nowe pole sił (skalarnie!), aby wyjaśnić, dlaczego bozony W i Z mają masę (spontaniczne łamanie symetrii cechowania). Z historii nauki wiemy, że niestety ten szablon działania bardzo często nie prowadzi do odkrycia.

Od zagadnień związanych z budową materii przeszliśmy do jeszcze bardziej fascynującego świata antymaterii. W tę niezwykłą tematykę wprowadziła nas dr Barbara Latacz z CERN-u, pokazując, jak współczesna fizyka próbuje odpowiedzieć na pytanie, dlaczego we Wszechświecie dominuje materia, mimo że po Wielkim Wybuchu materia i antymateria powinny powstać w równych ilościach.



Pierwszy udany transport antymaterii

Wykład pozwolił nam spojrzeć na antymaterię nie jak na element science fiction, lecz jako rzeczywisty obiekt badań prowadzonych każdego dnia w laboratoriach CERN-u. Dowiedzieliśmy się, w jaki sposób naukowcy wytwarzają i badają antycząstki oraz jakie znaczenie mogą mieć te badania dla zrozumienia początków Wszechświata i fundamentalnych praw fizyki.

W tym miejscu pojawiła się następna myśl, która szczególnie zwróciła moją uwagę: aby obserwować antymaterię (antyprotony) przy małych prędkościach, należy je najpierw spowolnić w decelatorach i spułapkować. Zatem CERN to nie tylko akceleratory, ale też spowalniacze. Jak się później okazało, szczęście dopisało nam również na polu antymaterii, ponieważ w dniu 24 marca byliśmy naoczniymi świadkami pierwszego transportu (na razie po terenie CERN-u) 92 antyprotonów w ramach projektów PUMA i STEP wykorzystujących pułapki Penninga.

Skoro CERN, to oczywiście akceleratory i detektory cząstek — serce współczesnych badań nad strukturą materii.

W świat tych niezwykłych urządzeń wprowadzili nas dr Piotr Traczyk z CERN-u i prof. dr hab. Sławomir Wronka z Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Szczegółowo przedstawili nam, jak cernowskie akceleratory przyspieszają protony do prędkości bliskiej prędkości światła, dlaczego droga przyspieszonego protonu wiedzie przez pięć akceleratorów (Linac4, Booster, PS, SPS, LHC) i jak wygląda praca detektorów (ATLAS, CMS, LHCb i ALICE). Na koniec dowiedzieliśmy się, że CERN szykuje się na Long Shutdown 3 (LS3), czyli trzecie duże wyłączenie akceleratorów w celu modernizacji LHC. Gdy projektowano LHC, oceniano, że będzie następować ok. 20 zderzeń ze 150 miliardów protonów w jednej przeciwbieżnej paczce co 25 milisekund. Obecnie tych zderzeń obserwuje się 40–90 (nominalnie 60). Po usprawnieniach, przerwie technicznej w High-Luminosity LHC (HL-LHC) planuje się nawet 160 zderzeń. A co w przyszłości? Już są plany na 100-kilometrowy akcelerator Future Circular Collider (FCC) i nowe odkrycia.

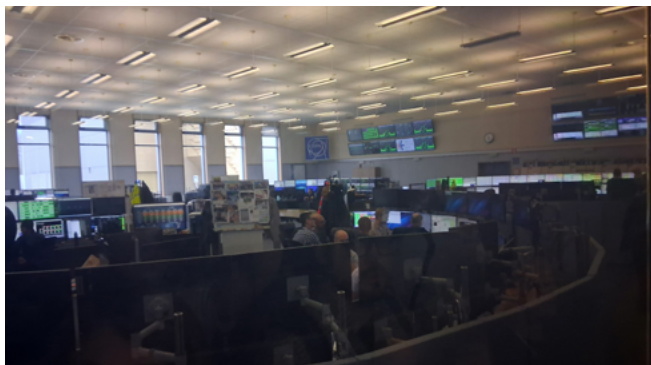
Tak duża liczba zderzeń generuje potężną ilość informacji (mierzoną w petabajtach na sekundę), którą należy obrobić, tzn. przefiltrować (ang. trigger) i zachować tylko te, które odbiegają od normy, tzn. są interesujące. W ten sposób otrzymuje się ok. 1000 interesujących zdarzeń, czyli 10 GB/s. Te zagadnienia omówił nam inżynier baz danych w CERN-ie Andrzej Nowicki. Ogromnym zaskoczeniem było, że w CERN-ie do przechowywania danych w dalszym ciągu wykorzystuje się „zwykłe” taśmy magnetyczne.

Dowiedzieliśmy się także, że kosmos to taki naturalny akcelerator cząstek promieniowania kosmicznego, zatem dlaczego nie przenieść detektorów cząstek poza atmosferę Ziemi. Historię i wyniki badań eksperymentu Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) przedstawił nam dr Andrzej Siemko z Massachusetts Institute of Technology (MIT). Dane uzyskane przez eksperyment AMS nie są w pełni zgodne z przewidywaniami modeli teoretycznych, co może wskazywać na istnienie zjawisk, których współczesna fizyka jeszcze nie potrafi wyjaśnić.

CERN to nie tylko Model Standardowy, ale także fizyka jądrowa i jej wykorzystanie m.in. w medycynie. Projekt ISOLDE przedstawiła nam dr Magdalena Kowalska z CERN-u. To właśnie w tym projekcie można było poczuć, na czym polega prawdziwa interdyscyplinarność w nauce. To właśnie tu produkuje się i bada rzadkie izotopy promieniotwórcze wykorzystywane w fizyce jądrowej, fizyce atomowej, chemii, naukach o materiałach, biologii i medycynie, umożliwiając badania od struktury jąder atomowych po procesy biologiczne i nowe techniki obrazowania.



Komora mgłowa z widocznymi śladami pozostawionymi przez cząstki



Centrum Sterowania CERN (CCC)

Nauczyciel fizyki nie tylko żyje wiedzą, ale też chce ją doświadczać. To moment, w którym fizyka cząstek przestała być abstrakcją, a stała się czymś, co można było dosłownie „zobaczyć” i „dotknąć”. Niestety mieliśmy tylko jedną taką sesję warsztatową, choć trzeba przyznać... emocjonującą. Nauczaliśmy się korzystać z narzędzi edukacyjnych CERN-u i, co najważniejsze, zbudowaliśmy własny detektor cząstek w postaci komory mgłowej (ang. *cloud chamber*), a następnie identyfikowaliśmy cząstki po zostawionych przez nie śladach.

ZWIEDZANIE LABORATORIÓW – PODRÓŻE PO ŚWIECIE TECHNOLOGII

Najbardziej spektakularną częścią programu były wizyty w miejscach, które większość osób zna jedynie ze zdjęć. W ciągu kilku dni zobaczyliśmy naprawdę imponującą część infrastruktury CERN.

Centrum Sterowania CERN (CCC) to prawdziwy „mostek kapitański” całego kompleksu – mózg, z którego kontroluje się wiązki cząstek, systemy chłodzenia, zasilania oraz bezpieczeństwa akceleratorów. Setki ekranów, wykresów i parametrów monitorowanych przez operatorów, inżynierów i specjalistów od kriogeniki sprawiają, że miejsce to przypomina połączenie centrum NASA z futurystycznym laboratorium.

Choć wejście do działającego tunelu było niemożliwe, znaleźliśmy się tuż obok... a dosłownie za tymi drzwiami znajdował się Wielki Zderzacz Hadronów. To 27 kilometrów zaawansowanej technologii pracującej w służbie nauki. W zamian mogliśmy zobaczyć – a nawet dotknąć – pierwszy akcelerator CERN, zbudowany w 1957 roku synchrocyklotron (SC). To właśnie w nim po raz pierwszy zaobserwowano rzadki rozpad pionu na elektron i neutrino, zgodny z teorią słabych oddziaływań.



W oddali, za drzwiami znajduje się tunel LHC

Ośrodek Testowania Magnesów (SM18) to główna hala testowa CERN, w której bada się nadprzewodzące magnesy, kable zasilające, wnęki RF i inne elementy wymagające ekstremalnie niskich temperatur. Jest to jedyne miejsce, gdzie CERN może pełnoskalowo testować swoje magnesy przed instalacją w akceleratorach.

Choć wejście do podziemnych hal podczas pracy detektora było niemożliwe, zobaczyliśmy modele ATLAS-a oraz jego centrum dowodzenia *ATLAS Control Room*. To właśnie stąd fizycy i inżynierowie monitorują każdy aspekt działania jednego z najważniejszych eksperymentów współczesnej fizyki – tego, który w 2012 roku (razem z CMS) doprowadził do odkrycia bozonu Higgsa i nadal poszukuje nowych zjawisk.



Synchrocyklotron (SC)

Choć sam detektor CMS – gigantyczny „aparat fotograficzny” – był niedostępny, czekała na nas niespodzianka, która okazała się jedną z najbardziej spektakularnych atrakcji całej wizyty. Zjechaliśmy 100 metrów pod ziemię – dokładnie na poziom, na którym przebiega tunel LHC. Świadczyły o tym m.in. tabliczki ostrzegające przed promieniowaniem. Odwiedziliśmy również halę SX5, w której zmontowano detektor CMS. To miejsce, gdzie ogromna, ważąca 14 tysięcy ton konstrukcja została złożona niczym gigantyczna układanka.

SPOTKANIA Z NAUKOWCAMI – FIZYKA Z LUDZKĄ TWARZĄ

Jednym z najważniejszych elementów programu były rozmowy z naukowcami i pracownikami CERN-u. Fizycy opowiadali o swojej pracy, o tym, jak wygląda dzień w laboratorium, jak współpracują zespoły z różnych krajów i jak wygląda droga od pomysłu do publikacji naukowej. Poznaliśmy wielu ciekawych pracowników, np. młodego człowieka pracującego w CERN-ie jako geodeta przemysłowy. Dla nauczycieli było to niezwykle inspirujące – bo pokazywało, że nauka to nie tylko równania i wykresy, ale przede wszystkim pasja i współpraca ludzi różnych narodowości i zawodów, czasem bardzo odległych od siebie.

CO Z TEGO WYNIKA DLA POLSKICH UCZNIÓW?

Wiedza zdobyta w CERN nie zostaje w Genewie. Z tego, co wiem i widziałem, bo to nie pierwszy przecież wyjazd, po powrocie do Polski nauczyciele: prowadzą lekcje o fizyce cząstek i inspirują uczniów do działania, tworzą koła naukowe, przygotowują uczniów do konkursów i olimpiad, współpracują z centrami nauki i uczelniami. W ten sposób inspiracja z CERN-u trafia do tysięcy młodych ludzi, którzy być może w przyszłości sami będą pracować przy akceleratorach. A sam CERN oferuje wiele oficjalnych programów edukacyjnych zarówno dla uczniów, jak i studentów – od letnich szkół po staże i wykłady.

Dla uczniów szkół średnich CERN ma bogatą ofertę edukacyjną. Najpełniejsze informacje można zaczerpnąć z oficjalnego portalu edukacyjnego CERN – *Inspire and Educate*. Szczególnie polecam trzy programy:

- *CERN-Solvay Education Programme* – program edukacyjny w ramach Science Gateway zawierający krótkie filmy DIY, kurs online dla uczniów czy międzynarodowy obóz naukowy w CERN-ie,
- *Beamline for Schools (BL4S)* – międzynarodowy konkurs dla szkół. Uczniowie proponują własny eksperyment i mogą go wykonać na prawdziwej wiązkę cząstek,
- *International Masterclasses – Hands-on Particle Physics* – program współorganizowany przez CERN, w którym uczniowie analizują prawdziwe dane z LHC i łączą się z CERN na żywo.

Dla studentów najbardziej znanym programem letnim CERN jest *CERN Summer Student Programme*, skierowany do studentów I i II stopnia. Uczestnicy przez 8–13 tygodni pracują w zespołach badawczych, biorą udział w wykładach i warsztatach oraz zwiedzają laboratoria. Informacje o możliwościach udziału w programach studenckich CERN są dostępne w serwisie *Summer Studentship – Careers at CERN*. Osobną propozycją dla osób zainteresowanych zaawansowanymi technologiami IT, obliczeniami wielkiej skali, chmurą, cyberbezpieczeństwem i sztuczną inteligencją jest *CERN openlab Summer Student Programme*. Warto również korzystać z obszernej bazy nagrań i materiałów wykładowych z letnich szkół CERN, gromadzonej od 1997 roku w ramach *CERN Summer Student Lectures*. To bardzo dobre źródło do samodzielnej nauki fizyki cząstek, akceleratorów i informatyki. Na stronie CERN regularnie pojawiają się także ogłoszenia o innych szkołach i programach letnich, takich jak *INFIERI*

International Summer School, CERN–Fermilab HCP Summer School czy *I.FAST Challenge-Based Innovation Programme*.

Nauka nie rozwija się w próżni. Potrzebuje ludzi, którzy potrafią ją zrozumieć, przekazać i zaszczyć pasję kolejnym pokoleniom. CERN doskonale to rozumie — dlatego inwestuje w edukację nauczycieli. A nauczyciele, wracając do swoich szkół, stają się ambasadorami nauki.

PODRÓŻ, KTÓRA ZMIENIA SPOSÓB PATRZENIA NA ŚWIAT

Wizyta polskich nauczycieli w CERN w dniach 22–27 marca 2026 roku była czymś więcej niż szkoleniem. Była spotkaniem z nauką na najwyższym poziomie, z ludźmi, którzy każdego dnia próbują odpowiedzieć na pytania o naturę rzeczywistości. Była też przypomnieniem, że nauka nie jest zamknięta w laboratoriach – żyje w szkołach, w ciekawości uczniów, w pasji nauczycieli. A jeśli choć jeden uczeń, zainspirowany opowieściami z CERN-u, zdecyduje się zostać fizykiem, inżynierem czy astronomem — to znaczy, że ta podróż miała sens.

AUTOR



Tomasz Kacik jest nauczycielem dyplomowanym, laureatem tytułu Nauczyciel Pomorza 2024, ekspertem z ponad dwudziestoletnim doświadczeniem w edukacji. Pracował zarówno w szkołach podstawowych, jak i średnich. Obecnie uczy fizyki w I Liceum Ogólnokształcącym w Tczewie. Równolegle pełni funkcję nauczyciela-konsultanta oraz doradcy metodycznego w Pomorskim Centrum Edukacji Nauczycieli w Gdańsku.



Oficjalny portal edukacyjny CERN



Program edukacyjny CERN-Solvay



Konkurs fizyczny Beamline for Schools

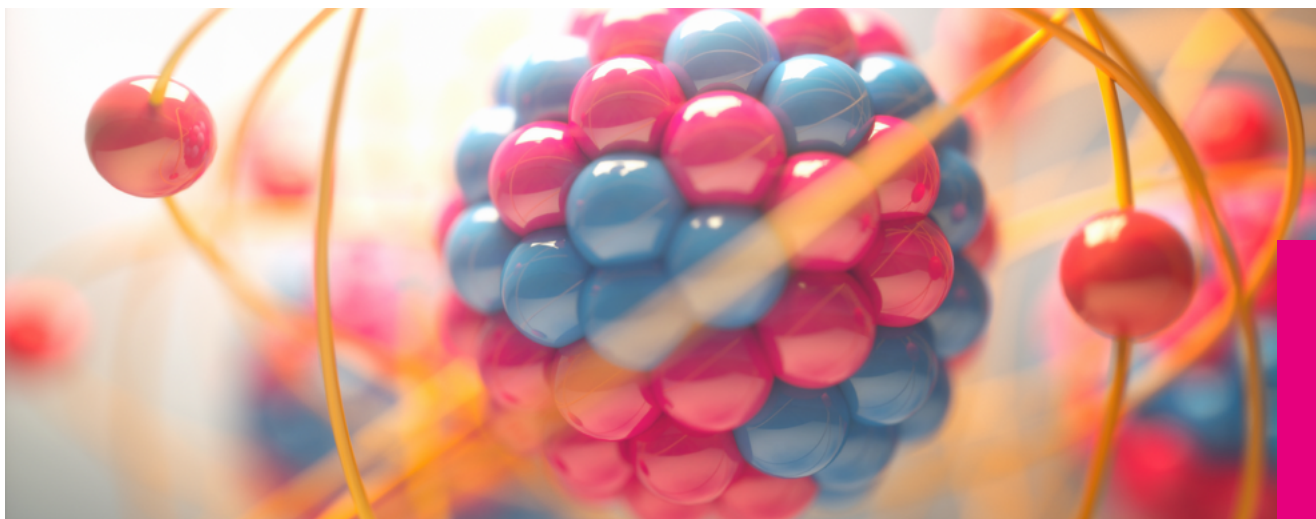
KOMORA MGŁOWA Z CERN

Komora mgłowa to jeden z najwcześniejszych detektorów cząstek. Dziś takie urządzenia mają przede wszystkim znaczenie edukacyjne: pozwalają zobaczyć ślady cząstek jonizujących, które normalnie pozostają niewidoczne. CERN opisuje wersję możliwą do zbudowania z prostych materiałów: przezroczystego pojemnika, suchego lodu i alkoholu izopropylowego. Celem konstrukcji jest wytworzenie przy dnie komory cienkiej warstwy przesyconych par alkoholu, w której przelot cząstki pozostawia widoczny ślad kondensacji.

Do dna pojemnika mocuje się od wewnątrz filc o grubości około 3 mm, który będzie nasączony alkoholem izopropylowym. Drugim ważnym elementem jest czarna metalowa płyta. Czerń jest istotna nie ze względów mechanicznych, lecz obserwacyjnych: na ciemnym tle łatwiej zobaczyć jasne, delikatne ślady kondensacji. Płyta spoczywa na pojemniku z suchym lodem, który chłodzi ją od spodu. Przed uruchomieniem komory filc nasącza się 99-procentowym izopropanolem. Następnie czarną metalową płytę kładzie się na suchym lodzie, a przezroczysty pojemnik ustawia się do góry dnem na zimnej płycie. W ten sposób filc nasączony alkoholem znajduje się u góry, a bardzo zimna powierzchnia metalowa — na dole. CERN zaleca, aby przygotować filc tuż przed położeniem płyty na suchym lodzie, ponieważ zbyt długie wystawienie zimnej płyty na powietrze może spowodować osadzanie się na niej szronu, pogarszającego widoczność śladów.

Po zamknięciu komory alkohol izopropylowy paruje z filcu i opada ku dołowi, ponieważ jego pary są cięższe od powietrza. Przy zimnej metalowej płycie pary silnie się ochładzają. Powstaje obszar przesycony: alkohol pozostaje jeszcze w fazie gazowej, choć w tych warunkach łatwo może się skroplić. Gdy przez taki obszar przelatuje naładowana cząstka, jonizuje pary alkoholu, a powstałe jony inicjują kondensację. Wzdłuż toru cząstki tworzy się cienka smuga drobnych kropelek, widoczna jako jasna nitka nad czarnym dnem.

Do obserwacji potrzebne jest boczne oświetlenie, skierowane tuż nad metalową płytę, czyli w obszar czuły komory. CERN zaleca też przyciemnienie pomieszczenia. Początkowo w komorze widać zwykle mgiełkę alkoholu przypominającą delikatny deszcz. Po kilku minutach, gdy układ się ustabilizuje termicznie, powinny pojawić się pojedyncze ślady cząstek — cienkie, jasne linie przypominające pajęczne nici przesuwające się tuż nad dnem komory.



SCENARIUSZ LEKCJI

OD KWARKÓW DO CZĄSTECZEK – BUDUJEMY MODELE MATERII

Lekcja ma charakter modelowy i interdyscyplinarny. Scenariusz został zainspirowany wizytą nauczycieli w CERN – Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych – gdzie bada się fundamentalną strukturę materii, cząstki elementarne oraz oddziaływania między nimi. Celem zajęć jest pokazanie uczniom, że materia ma budowę hierarchiczną: cząsteczki są zbudowane z atomów, atomy z jąder i elektronów, a jądra z protonów i neutronów. W wariantcie rozszerzonym można również wspomnieć, że protony i neutrony mają strukturę wewnętrzną związaną z kwarkami. Nie należy jednak traktować kwarków jako obowiązkowego elementu podstawy programowej szkoły podstawowej, lecz jako ciekawostkę nawiązującą do współczesnych badań prowadzonych m.in. w CERN.

Zajęcia można przeprowadzić w dwóch wariantach trudności. Dla klas 1–3 najważniejsze jest intuicyjne zrozumienie, że świat składa się z bardzo małych „cegiełek”, których nie widzimy gołym okiem, ale które możemy przedstawiać za pomocą modeli. Na tym poziomie nie trzeba wprowadzać szczegółowych nazw cząstek ani obliczeń. Wystarczy praca konstrukcyjna, porównywanie wielkości oraz rozmowa o tym, że modele pomagają wyobrazić sobie obiekty zbyt małe, by można je było bezpośrednio zobaczyć.

Dla klas 7–8 lekcja może służyć uporządkowaniu pojęć: atom, jądro atomowe, proton, neutron, elektron, nukleon, cząsteczka, liczba atomowa i liczba masowa. Uczniowie mogą również pracować ze skalą wielkości, porównując rozmiary jąder atomowych, atomów i cząsteczek. Warto jednak podkreślić, że wszystkie wykonywane modele są uproszczeniami i nie zachowują rzeczywistych proporcji. Szczególnie ważne jest zaznaczenie, że elektrony nie są małymi kulkami krążącymi po klasycznych orbitach wokół jądra, choć model powłokowy może być użytecznym szkolnym przybliżeniem.

Przed lekcją warto przygotować materiały do pracy grupowej: klocki, plastelinę, kulki, druciki, wykałaczki, kartki z opisami cząstek i pierwiastków oraz prosty plakat lub schemat pokazujący kolejne poziomy budowy materii. Dobrze sprawdzą się osobne karty pracy dla grup: kwarki/protony/neutrony, jądro atomowe, atom oraz cząsteczki. W przypadku młodszych uczniów karty powinny zawierać przede wszystkim instrukcje obrazkowe i proste polecenia konstrukcyjne. W przypadku starszych można dodać obliczanie ładunku protonu i neutronu z ładunków kwarków, interpretację liczby atomowej i masowej oraz prosty zapis powłokowy, np. hel: 2, węgiel: 2,4, tlen: 2,6.

Podczas realizacji zajęć nauczyciel powinien dbać o to, aby uczniowie nie traktowali modeli zbyt dosłownie. Modele mają pomagać w zrozumieniu relacji między elementami budowy materii, a nie wiernie odtwarzać ich wygląd ani skalę. Dobrym punktem podsumowania jest pytanie: „Co w naszym modelu jest zgodne z wiedzą naukową, a co zostało uproszczone?”. Dzięki temu uczniowie uczą się nie tylko budowy materii, lecz także samego sensu modelowania w nauce.

Lekcję można zakończyć prezentacją modeli przygotowanych przez grupy. Każda grupa powinna krótko wyjaśnić, co przedstawia jej model, z jakich elementów został zbudowany oraz jaki poziom organizacji materii pokazuje. W starszych klasach warto dodatkowo poprosić uczniów o wskazanie, jakie są ograniczenia ich modelu i jak zmienia się skala obiektów od jądra atomowego do cząsteczki.

Przedmiot/poziom: edukacja wczesnoszkolna, fizyka, chemia / szkoła podstawowa (warianty z dwiema ścieżkami trudności)

Autor: Tomasz Kacik, Pomorskie Centrum Edukacji Nauczycieli w Gdańsku

Temat:

OD KWARKÓW DO CZĄSTECZEK – BUDUJEMY MODELE MATERII

Grupa: uczniowie nauczania wczesnoszkolnego, uczniowie klas 7–8 szkoły podstawowej

Czas trwania: 45–90 minut (1–2 godziny lekcyjne)

CELE ZAJĘĆ

Cele ogólne:

1. rozwijanie myślenia modelowego i systemowego;
2. łączenie elementów wiedzy z fizyki, chemii, matematyki, techniki i sztuki;
3. rozwijanie pracy zespołowej i kreatywnego rozwiązywania problemów;
4. zrozumienie, że materia ma budowę hierarchiczną: cząsteczki składają się z atomów, atomy z jąder i elektronów, a jądra z protonów i neutronów.

Cele szczegółowe – uczeń:

Edukacja wczesnoszkolna (klasy 1–3):

- rozumie, że przedmioty są zbudowane z bardzo małych elementów;
- wie, że atom można traktować jako bardzo małą „cegiele” materii;
- wykonuje prosty model według instrukcji;
- porównuje obiekty w skali jakościowej: małe–duże, większe–mniejsze;
- współpracuje w grupie.

Klasy 7–8 szkoły podstawowej:

- opisuje budowę atomu z użyciem pojęć: jądro atomowe, proton, neutron, elektron;
- wyjaśnia, że protony i neutrony tworzą jądro atomowe, odróżnia atom od cząsteczki;
- posługuje się pojęciami liczby atomowej i liczby masowej;
- stosuje przybliżone skale wielkości: fm, pm, nm;
- rozumie, że każdy model jest uproszczeniem rzeczywistości;
- opcjonalnie poznaje informację, że protony i neutrony mają strukturę wewnętrzną związaną z kwarkami.

POWIĄZANIE Z PODSTAWĄ PROGRAMOWĄ

Edukacja wczesnoszkolna (klasy 1–3):

- wykonywanie prostych modeli i prac technicznych;
- obserwowanie i porządkowanie obiektów;
- współpraca w grupie;
- rozwijanie pojęcia wielkości, porównywania i prostych relacji przestrzennych.

Fizyka (kl. 7–8):

- » budowa materii;
- » pojęcia: atom, jądro atomowe, proton, neutron, elektron;
- » posługiwanie się skalą i porównywanie rozmiarów obiektów fizycznych.

Chemia (kl. 7–8):

- » ziarnista budowa materii, atomy i cząsteczki;
- » budowa atomu;
- » symbole pierwiastków i wzory związków chemicznych;
- » tworzenie i interpretowanie modeli cząsteczek.

Matematyka / Technika / Plastyka:

- skala i proporcje;
- projektowanie i wykonywanie modeli;
- tworzenie form przestrzennych;
- dokumentacja pracy zespołowej.

PRZEBIEG ZAJĘĆ

Faza wprowadzająca (10–15 min)

1. Nauczyciel pokazuje plakat przedstawiający różne poziomy budowy materii (kwarki → protony/neutrony → jądro → atom → cząsteczka),
2. Nauczyciel zadaje pytanie: Z czego zbudowany jest świat?

Edukacja wczesnoszkolna (klasy 1–3):

3. Prosta metafora: *Tak jak dom składa się z cegieł, tak świat składa się z bardzo małych cegiełek – atomów.*

Klasy 7–8 szkoły podstawowej:

3. Krótka prezentacja skali:
 - kwark: $< 10^{-18} \text{ m} = 1 \text{ am (ATTOMETR)}$ – informacja rozszerzająca
 - nukleon (proton/neutron): $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm (FEMTOMETR)}$
 - atom: $10^{-10} \text{ m} = 100 \text{ pm (PIKOMETR)} = 1 \text{ Å (ANGSTREM)}$
 - cząsteczka: $10^{-10} \text{ m} - 10^{-8} \text{ m} = 0,1 - 10 \text{ nm (NANOMETR)}$

Faza realizacyjna – praca w grupach (25–50 min)

Uczniowie dzielą się na 4 grupy, każda tworzy model innego poziomu budowy materii:

GRUPA 1 – kwarki → protony i neutrony

Uczniowie otrzymują informację o dwóch typach kwarków:

- kwark dolny (d)
- kwark górny (u)

Tworzą z klocków lub plasteliny kwarki, przypisując im kształt (z dostępnych klocków) lub kolor i łączą je w:

- proton (uud)
- neutron (udd)

Wariant dla klas 7–8:

Uczniowie dodatkowo otrzymują informację o ładunku kwarków:

- kwark dolny (d): $-1/3 e$
- kwark górny (u): $+2/3 e$

Uczniowie obliczają ładunek całkowity protonu i neutronu. Nauczyciel dopowiada, że kwarki nie występują swobodnie w zwykłych warunkach i że jest to model bardzo uproszczony.

GRUPA 2 – jądro atomowe

Uczniowie otrzymują informacje o nukleonach:

- proton (p)
- neutron (n)

Tworzą z klocków lub plasteliny nukleony (można użyć tych stworzonych przez grupę 1) przypisując im kształt (z dostępnych klocków) lub kolor i tworzą jądro wybranego pierwiastka:

- hel ${}^4\text{He}$ (2p+2n)
- węgiel ${}^{12}\text{C}$ (6p+6n)
- tlen ${}^{16}\text{O}$ (8p+8n)

Wariant dla klas 7–8:

Na podstawie znajomości liczby masowej A i atomowej Z danego pierwiastka uczniowie wyznaczają liczbę neutronów i protonów w jądrze oraz elektronów w atomie, a także obliczają ładunek jądra.

GRUPA 3 – atom

Uczniowie tworzą uproszczony model atomu:

- jądro umieszczają w centrum;
- wokół jądra zaznaczają elektrony;
- liczba elektronów w obojętnym atomie jest równa liczbie protonów.

Wariant dla klas 7–8:

Uczniowie mogą rozmieścić elektrony na powłokach w prostym modelu powłokowym, np.:

- hel: 2,
- węgiel: 2, 4,
- tlen: 2, 6,
- neon: 2, 8.

Nauczyciel podkreśla, że jest to model uproszczony. Elektrony nie są małymi kulkami krążącymi po klasycznych orbitach jak planety wokół Słońca. Model powłokowy pomaga jednak zrozumieć, że elektrony są związane z atomem i znajdują się w przestrzeni wokół jądra.

Nauczyciel zwraca też uwagę na skalę: atom jest w dużej mierze pustą przestrzenią. Średnica atomu jest zwykle około 10 000–100 000 razy większa od średnicy jego jądra, dlatego model wykonany z klocków lub plasteliny nie może zachować rzeczywistych proporcji.

GRUPA 4 – cząsteczki

Uczniowie budują modele cząsteczek z kulek symbolizujących atomy:

- wody H_2O
- dwutlenku węgla CO_2
- tlenu O_2
- metanu CH_4

Wariant dla klas 7–8:

Uczniowie porównują kształty cząsteczek (kątowna, liniowa, cząsteczka dwuatomowa, przestrzenna, tetraedryczna). Mogą też wskazać, że atomy w tych cząsteczkach są połączone wiązaniami kowalencyjnymi.

Faza podsumowania (15–20 min)

1. Prezentacja grup. Każda grupa przedstawia:
 - swój model
 - z jakich elementów został zbudowany
 - jaki poziom organizacji materii prezentuje
2. Nauczyciel inicjuje dyskusję:

Edukacja wczesnoszkolna (klasy 1–3):

- Który model był największy?
- Co było najtrudniejsze do zbudowania i dlaczego?

Klasy 7–8 szkoły podstawowej:

- Jak zmienia się skala obiektów?
- Dlaczego modele są uproszczone?
- Co w rzeczywistości wygląda inaczej?

EWALUACJA

Propozycje

- Karta samooceny (co zrobiłem?, czego się nauczyłem?)
- Ocena pracy grupowej
- Sprawdzenie rozumienia hierarchii budowy materii i ograniczeń modeli.
- Zdjęcia modeli i krótki opis w portfolio ucznia



Szkolne modele nukleonów

ANTONINA SIÓŁKOWSKA

DETEKCJA MIONÓW ZA POMOCĄ TUB GEIGERA-MÜLLERA

Wyróżniona pierwszym miejscem w konkursie „Fizyczne Ścieżki” (kat. Pokaz zjawiska fizycznego) praca pokazuje, że fizykę cząstek można przybliżyć za pomocą konstrukcji dostępnej także poza profesjonalnym laboratorium. Autorka, uczennica drugiej klasy liceum w Płocku, opisuje detektor mionów zbudowany własnoręcznie z dwóch tub Geigera-Müllera, bariery ołowiano-miedzianej i układu rejestracji impulsów. Prosty pokaz prowadzi od promieniowania kosmicznego i promieniowania tła do szczególnej teorii względności, pokazując, że ślady cząstek z górnych warstw atmosfery można badać także szkolnymi metodami.

SKĄD SIĘ BIORĄ MIONY NA ZIEMI?

Miony to jedne z wielu cząstek elementarnych będących częścią Modelu Standardowego. Niemal wszystkie ich właściwości (spin, ładunek, oddziaływanie) są identyczne z tymi, jakie mają elektrony. Są jednak 207 razy masywniejsze niż elektrony^[1] i w przeciwieństwie do elektronów są niestabilne – ich średni czas życia τ wynosi około 2,2 mikrosekundy^[2]. Istnieją też miony o ładunku dodatnim, które nazywamy antymionami.

Do badania mionów nie są potrzebne akceleratory cząstek, ponieważ są one nieustannie wytwarzane w ziemskiej atmosferze – stanowią jeden z produktów oddziaływania promieniowania kosmicznego pierwotnego z jądrami atomów gazów atmosferycznych. Miony wyprodukowane w taki sposób posiadają dodatkowo ogromną energię kinetyczną (około 6 GeV) oraz osiągają prędkości relatywistyczne (aż do 99,9% prędkości światła w próżni, czyli $v = 0,999c$). Gdyby zanegować wpływ efektów relatywistycznych, miony wytwarzane w atmosferze byłyby w stanie przemierzyć dystans średnio około kilkuset metrów:

$$s = v\tau = 0,999c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times 0,0000022[\text{s}] = 659[\text{m}]$$

Jest to znacznie mniej niż wynosi wysokość, na której powstają (około 15 km nad poziomem morza). Dlatego statystycznie rzecz biorąc, do powierzchni Ziemi docierałyby tylko nieliczne z nich – te, których czas życia wynosiłby 20–40 μs , co jest bardzo mało prawdopodobne.

Tymczasem rejestrowany eksperymentalnie strumień mionów atmosferycznych jest znacznie większy, niż przewidyują to klasyczne (tj. nierelatywistyczne) założenia. Dzieje się tak, ponieważ miony ze względu na swoją prędkość bliską prędkości światła podlegają efektom przewidywanym przez szczególną teorię względności – dylatacji czasu i skróceniu Lorentza, co umożliwia im przemierzanie znacznie dłuższych dystansów niż przewiduje fizyka nierelatywistyczna.

Można to oszacować następująco. W układzie odniesienia związanym z powierzchnią Ziemi średni czas życia mionu jest wydłużony, a jego wartość można określić za pomocą odpowiedniego przekształcenia Lorentza:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,0000022[\text{s}]}{\sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}}} \approx 0,0000492058[\text{s}] \approx 49,2[\mu\text{s}]$$

Natomiast z perspektywy mionu (czyli w układzie odniesienia związanym z mionem, w którym to układzie on się nie porusza) to grubość ziemskiej atmosfery ulega zmniejszeniu zgodnie z przekształceniem:

$$s' = s\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 15000[\text{m}] \times \sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}} = 670,7[\text{m}]$$

Jak widać, niezależnie od układu odniesienia efekty relatywistyczne umożliwiają mionom docieranie do powierzchni Ziemi. Pomiar strumienia mionów może więc stanowić eksperymentalne potwierdzenie szczególnej teorii względności Alberta Einsteina.

W JAKI SPOSÓB MOŻNA WYKRYWAĆ MIONY?

Z uwagi na swoją ogromną energię miony stanowią rodzaj promieniowania jonizującego. Metodą stosowaną do wykrywania mionów jest najczęściej użycie liczników

1 P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga, „CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022”, *Reviews of Modern Physics* 97, 025002 (2025), DOI: 10.1103/RevModPhys.97.025002

2 J. Beringer et al. (Particle Data Group), „Review of Particle Physics”, *Physical Review D* 86, 010001 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevD.86.010001.

scyntylacyjnych opartych na scyntylatorach (specjalnych materiałach wrażliwych na promieniowanie jonizujące) i fotopowielaczach. Scyntylatory emitują błyski światła o intensywności proporcjonalnej do energii cząstki, która wchodzi z nimi w interakcję. Liczniki scyntylacyjne są bardzo precyzyjne, ale też stosunkowo drogie (a im lepsze, tym droższe). Z tego powodu do detekcji mionów w tym projekcie zdecydowano się użyć znacznie bardziej przystępnych cenowo detektorów promieniowania – tub Geigera-Müllera, będących głównym elementem liczników Geigera-Müllera.

Tuby Geigera-Müllera działają na prostej zasadzie. Są one wypełnione gazem szlachetnym pod bardzo niskim ciśnieniem, a wewnątrz generowane jest silne statyczne pole elektryczne za pomocą dwóch elektrod: metalowej ścianki tuby oraz drutu przechodzącego przez środek tuby. Gdy cząstka promieniowania jonizującego przedostanie się przez tubę i dokona jonizacji gazu, powstaje wyładowanie lawinowe (tzw. wyładowanie Townsenda), co generuje impuls napięcia w obwodzie elektrycznym.

Oprócz mionów wykrycie w liczniku może być spowodowane przez inne źródła (nazywane tłem eksperymentalnym), takie jak naturalne promieniowanie ziemskie, reszta promieniowania kosmicznego, szum aparatury bądź pozostałości izotopowe po katastrofach jądrowych.

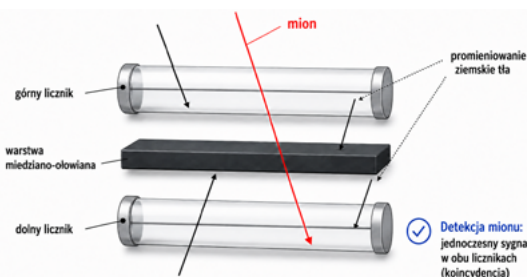
W przeciwieństwie do liczników scyntylacyjnych liczniki Geigera-Müllera nie umożliwiają rejestracji energii cząstki, która spowodowała jonizację, ponieważ amplituda impulsu jest praktycznie niezależna od energii cząstki inicjującej wyładowanie. Z tego powodu potrzebna jest inna (niż pomiar energii cząstek) metoda odróżnienia mionów od innych rodzajów promieniowania obecnego na powierzchni Ziemi.

By dokonać takiej filtracji, należy wykorzystać charakterystyczną cechę mionów: ich ogromną energię kinetyczną. Podczas gdy cząstki tła eksperymentalnego rzadko mają energię przekraczającą 3 MeV^[3], średnia energia mionów wytwarzanych w atmosferze wynosi na poziomie morza 4 GeV^[4], czyli ponad tysiąc razy więcej. Zdolność przenikania mionów przez materię jest w takim razie dużo większa niż pozostałych rodzajów promieniowania stanowiących część tła.

Z tego powodu zbudowany przeze mnie licznik mionów wykorzystuje dwie tuby Geigera-Müllera ustawione jedna pod drugą i rozdzielone płytką ołowiano-miedzianą. Detekcja mionu następuje wtedy, gdy oba liczniki zarejestrują impuls niemal jednocześnie (w bardzo krótkim odstępie czasu), co nazywamy koincydencją czasową. Tło eksperymentalne znacznie rzadziej powoduje takie jednoczesne zdarzenia, ponieważ albo nie posiada wystarczającej energii, aby przejść przez ścianki tuby i spowodować jonizację, albo przelatuje przez tuby pod niekorzystnym kątem, albo zbyt rzadko powoduje jonizację (jak to ma miejsce w przypadku promieniowania gamma), by wywołać koincydencję czasową. Innymi słowy, efektywność tub Geigera-Müllera jest znacznie niższa dla takich rodzajów promieniowania niż dla mionów, które dysponują energią rzędu GeV i z łatwością przenikają cienkie ścianki tuby Geigera-Müllera oraz jonizują gaz (do czego wystarczy zaledwie kilka lub kilkanaście eV).

Obydwa liczniki są umieszczone równolegle do powierzchni Ziemi tak, by jak największa ich powierzchnia

była skierowana w stronę górnych warstw atmosfery, ponieważ wtedy strumień mionów będzie największy. Im bowiem większy kąt nachylenia osi tuby do powierzchni Ziemi, tym większy dystans miony mają do pokonania od krańców atmosfery do układu pomiarowego. Płytką ołowiano-miedzianą stanowi dodatkową barierę przed niskoenergetycznym tłem (promieniowaniem beta i elektronami wtórnymi oraz niskoenergetycznym promieniowaniem gamma).



Rys. 1. Schemat działania dwóch liczników.

Rys. 1 wizualizuje działanie detektora. Czarne trajektorie symbolizują tło eksperymentalne, które posiada znikomą szansę wywołania koincydencji czasowej. Czerwona trajektoria symbolizuje mion, którego energia pozwala na przedostanie się przez warstwę ołowiano-miedzianą oraz jonizację gazu w obu licznikach niemal jednocześnie. Dzięki takiej konstrukcji detekcję mionu sygnalizuje prawie jednoczesne jego zarejestrowanie w obu tubach.

Do budowy przyrządu wykorzystano tuby Geigera-Müllera modelu CAJOE, często sprzedawane w Internecie jako zestaw z gotową płytką elektroniczną. Charakteryzują się one niską czułością na niskoenergetyczne promieniowanie jonizujące, co stanowi zaletę, ponieważ wspomaga filtrację tła eksperymentalnego. Całość wraz z płytą ołowiano-miedzianą została umieszczona na stojaku wydrukowanym z bioplastiku.

Rejestracja wykryć odbywa się na dwa sposoby. Pierwszy to świeące diody LED będące częścią obwodu elektrycznego: emitują one błysk światła za każdym razem, kiedy odpowiadający im licznik wykryje cząstkę. Jeśli więc obie diody zaświecą niemal jednocześnie, stanowi to silną przesłankę do wykrycia mionu.

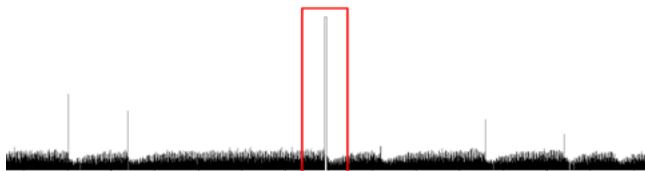


Rys. 2. Urządzenie wykrywające mion – świecą się obie diody. W przypadku wykrycia promieniowania ziemskiego tła, zaświeci się jedynie jedna dioda.

Drugi sposób polega na wykorzystaniu dodatkowego obwodu sumującego impulsy elektryczne emitowane przez licznik podczas wykryć. Za pomocą aplikacji PRA służącej do analizy danych z liczników scyntylacyjnych lub liczników Geigera-Müllera można rejestrować impulsy odpowiadające koincydencjom jako dwa razy wyższe (ze względu na dodanie się dwóch sygnałów), bądź szersze (ze względu na niewielkie

3 Z. Wu, B. Wang, J. Sun, Y. Wang, C. Zhao, „In-situ γ -ray analysis of ground surface radioactivity using portable HPGe γ spectrometer”, *Scientific Reports* 12, 9418 (2022), DOI: 10.1038/s41598-022-13770-5.

4 K. Nakamura et al. (Particle Data Group), „Review of Particle Physics”, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 37, 075021 (2010), DOI: 10.1088/0954-3899/37/7A/075021, dział 24.3.



Rys. 4. Analiza w programie ukazująca różnicę między pojedynczymi pulsami spowodowanymi przez inne rodzaje promieniowania tła, a pulsem spowodowanym przez wykrycie mionu.

opóźnienie między sygnałami i tzw. czas martwy liczników Geigera-Müllera, czyli czas potrzebny na dejonizację gazu po poprzednim wyładowaniu lawinowym i przygotowanie licznika do kolejnej jonizacji).

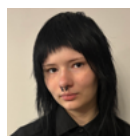
Obydwie opcje stanowią bardzo łatwy do interpretacji sposób sygnalizacji zdarzeń koincydencyjnych, dzięki czemu przyrząd może służyć do celów edukacyjnych i popularnonaukowych. Zamiast obwodu sumującego impulsy elektryczne można zastosować obwód koincydencyjny opracowany przez Bruna Rossiego. Stanowi on dokładniejszą metodę wykrywania dwóch impulsów pojawiających się w krótkim odstępie czasu i jest szeroko stosowany w eksperymentach fizyki cząstek.

WYNIKI ORAZ WNIOSKI

Podczas kilkugodzinnej pracy urządzenia zaobserwowano średnio 1,2 zdarzenia koincydencyjnego na minutę. Taki wynik nie jest stałą wartością dla urządzenia, ponieważ strumień mionów docierających do powierzchni Ziemi jest zależny

od warunków atmosferycznych, takich jak temperatura powietrza i ciśnienie, a także wysokość nad poziomem morza. Liczba mionów wykrywanych przez zbudowane przeze mnie urządzenie jest zgodna z modelami uwzględniającymi wpływ efektów relatywistycznych oraz z danymi zgromadzonymi przez inne eksperymenty badające miony wytwarzane w atmosferze^[5]. Dodatkowo urządzenie można wykorzystać do badania zależności strumienia mionów od kąta nachylenia, co umożliwia jeszcze bardziej precyzyjne pomiary weryfikujące szczególną teorię względności (poprzez analizę wpływu długości drogi przebywanej przez miony w atmosferze na ich liczbę wykrywaną na poziomie morza). Największym atutem tej konstrukcji jest jednak dostępność materiałów oraz stosunkowo prosta zasada działania. Dzięki temu jest idealnym narzędziem do przeprowadzania popularnonaukowych oraz amatorskich eksperymentów, podobnie jak detektory mionów używane do demonstracji, takie jak CosmicWatch bądź CosmicPi oparte na scyntylatorach.

AUTORKA



Antonina Siótkowska jest uczennicą Liceum Ogólnokształcącego im. Władysława Jagiełły w Płocku. W 2026 roku została laureatką konkursu „Fizyczne Ścieżki”, zapewniając sobie możliwość stażu badawczego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i Instytucie Fizyki PAN. W przyszłości chciałaby zobaczyć Wielki Zderzacz Hadronów i poznać dokładniej zjawisko produkcji par.

⁵ M. Aglietta et al. (LVD Collaboration), „Single muon angular distributions observed in the LVD particle astrophysics experiment”, *Astroparticle Physics* 2, 103–116 (1994), DOI: 10.1016/0927-6505(94)90033-7

KTO TO ZAMÓWIŁ?

Kiedy w latach 30. XX wieku odkryto w promieniowaniu kosmicznym cząstkę podobną do elektronu, lecz około 200 razy od niego cięższą, fizycy nie bardzo wiedzieli, co z nią zrobić. Elektron był potrzebny do zrozumienia budowy atomów, proton i neutron tworzyły jądra, neutrino ratowało zasadę zachowania energii w rozpadzie beta. A mion? Nie budował zwykłej materii, nie tworzył chemii, nie pasował do ówczesnego obrazu świata. Stąd słynne pytanie urodzonego w Rymanowie na Podkarpaciu Noblisty z fizyki Isidora Rabiego: „Kto to zamówił?”

Dziś wiemy, że właśnie ta pozorna zbędność była jego największym atutem. Odkrycie mionu pokazało, że świat cząstek elementarnych nie kończy się na składnikach znanej nam materii. Jest on cięższym krewnym elektronu: ma taki sam ładunek elektryczny i spin, należy do tej samej rodziny leptonów, ale jest znacznie masywniejszy i nietrwały. Żyje średnio około 2,2 mikrosekundy, po czym rozpada się na elektron oraz neutrino.

Miony „spadają” na nas z nieba – powstają w atmosferze, gdy wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego zderzają się z jądrami atomów powietrza. Wtórne cząstki rozpadają się następnie na miony, które docierają do powierzchni Ziemi. W każdej sekundzie przechodzą także przez nasze ciała, choć oczywiście bez detektorów nie jesteśmy w stanie ich zauważyć.

Ich obecność przy powierzchni Ziemi jest jednym z najładniejszych przejawów szczególnej teorii względności. Gdyby czas płynął dla nich tak samo jak dla obserwatora na Ziemi, większość mionów rozpadłaby się wysoko w atmosferze. Ponieważ jednak poruszają się z prędkościami bliskimi prędkości światła, ich czas życia w naszym układzie odniesienia ulega wydłużeniu. Prosty licznik mionów staje się więc małym laboratorium relatywistycznym.

Miony odegrały też ważną rolę w rozwoju fizyki cząstek. Elektron, mion i odkryty później taon tworzą trzy podobne, lecz różniące się masą cząstki. Ich istnienie prowadzi do pytania, dlaczego natura powtarza rodzinę leptonów w kolejnych generacjach. To jedna z głębszych zagadek Modelu Standardowego.

Szczególne znaczenie mają precyzyjne pomiary momentu magnetycznego mionu. Mion zachowuje się jak maleńki magnes, a jego własności można obliczać z ogromną dokładnością w ramach kwantowej teorii pola. Każda, nawet bardzo mała różnica między przewidywaniem a eksperymentem może być sygnałem, że w znanej teorii czegoś jeszcze brakuje.

Miony znalazły też zastosowania praktyczne. Dzięki dużej przenikliwości można wykorzystywać je do obrazowania wnętrza wielkich obiektów: wulkanów, piramid, reaktorów czy konstrukcji inżynierskich. Źródłem promieniowania nie jest wtedy urządzenie laboratoryjne, lecz kosmos.

Mion uczy, że postęp w fizyce często zaczyna się od kłopotliwego szczegółu. Pojawia się coś, czego nikt nie przewidział i co nie pasuje do gotowego porządku. Dopiero później okazuje się, że właśnie ten element otwiera nowy rozdział.



MARIA KARASIŃSKA

FIZYKA – ZABIJA MAGIĘ? A MOŻE JEST WIELKIM ILUZJONISTĄ?

Tekst wyróżniony pierwszym miejscem w konkursie „Fizyczne Ścieżki” (kat. „Esej”) prowadzi czytelnika od dziecięcego zachwytu tęczą, gwiazdami i zorzami polarnymi do pytania, czy nauka odbiera światu magię, czy raczej pozwala zobaczyć ją głębiej. Autorka, uczennica ósmej klasy szkoły podstawowej w Warszawie, pokazuje fizykę jako język ciekawości: wyjaśniając zjawiska, nie gasi zdumienia, lecz zamienia je w potrzebę dalszego odkrywania.

TĘCZA, KTÓREJ NIE DAŁO SIĘ DOTKNĄĆ

Miałam kilka lat, gdy po letniej burzy wyszłam z domu na podwórko i zobaczyłam tęczę na horyzoncie – była tak blisko. Wydawało mi się, że jeśli pobiegnę do niej wystarczająco szybko, mogłabym ją dotknąć. Może nawet znaleźć na jej końcu garnek złota, o którym czytał mi tata w jednej z bajek. Pamiętam, jak stałam na mokrej trawie, wpatrując się w ten kolorowy łuk, przekonana, że widzę coś naprawdę magicznego. Coś, co nie powinno pojawić się na tym szarym od chmur niebie.

Gdy byłam starsza, dowiedziałam się, że owa magia to załamanie i odbicie światła w kropelkach wody. Żadnej baśniowej magii i żadnego garnka ze złotem. Tylko prawa fizyki – matematyczne, przewidywalne w skutkach, bez cienia niepewności i emocji. Pamiętam, że tajemniczość zniknęła. Czułam lekkie rozczarowanie, jakby świat stał się w pełni przewidywalny, mniej ciekawy, a wszystko dało się wyjaśnić mądrym wzorem. Poczułam pewną pustkę. Czy tamtego dnia coś we mnie umarło? Czy wiedza zabiła magię?

Jako dziecko myślałam, że gwiazdy to świecące, żywe istoty zawieszone na niebie. Było mi smutno, gdy widziałam je spadające – myślałam, że wtedy umierają i bałam się, że wszystkie kiedyś znikną, a niebo będzie całe czarne. Pamiętam też, że widząc spadającą gwiazdę, szybko wymyślałam w głowie życzenia, żeby wypowiedzieć je przed jej zniknięciem. Moje późniejsze wizyty w planetarium odczarowały ten magiczny świat. Dowiedziałam się, że gwiazdy są ogromnymi kulami gorącego gazu. Znowu czary z dzieciństwa prysły jak bańka mydlana. Zamiast baśniowej tajemnicy ponownie pojawiły się prawa fizyczne. Nie rozumiałam jeszcze

wszystkiego, co usłyszałam w planetarium, ale zapamiętałam, że światło może przebyć bardzo długą drogę, zanim dostrzeżemy je naszym okiem. Nie mogłam zrozumieć tego, że gwiazda, której światło widzę, może już nie istnieć. Niby coś jest, bo przecież to widzę – jednak w rzeczywistości tu i teraz może tego nie być...

Brzmi jak wielkie oszustwo albo sztuczka wielkiego iluzjonisty. Pamiętam, że wydawało mi się to niesamowite: z jednej strony to rozumiałam, ale z drugiej było to tak niecodzienne i niezmiernie tajemnicze, że poczułam pewną ekscytację. Zupełnie tak jak wtedy, gdy zobaczyłam tęczę – tyle że już nie byłam małym dzieckiem.

Dziś wiem, że fizyka nie zabiła magii w mojej tęczy. Otworzyła drzwi do świata, w którym to wyobraźnia może być jedynym ograniczeniem. A emocje towarzyszące odkrywaniu nie różnią się od tych, których doświadczamy na pokazie magii. Wiem, że to brzmi trochę dziwnie, że mieszałam dziecięcą wyobraźnię z dorosłą fizyką, ale zaraz Wam to wszystko wyjaśnię.

MAGIA, KTÓRA ZMIENIA FORMĘ

Pomyślcie o atomach. Nie możemy ich zobaczyć gołym okiem – są zbyt małe. Ale fizyka mówi nam, że istnieją. Mówi, że wszystko wokół nas – powietrze, którym oddychamy, czy nawet moje ciało – składa się z pierwiastków, które same składają się z jeszcze mniejszych atomów. Możemy je sobie jedynie wyobrazić. Fizyka odkrywa przede mną świat, którego nie widać na pierwszy rzut oka i sprawia, że zadaję kolejne pytania: skąd w ogóle wzięły się te atomy? Z czego składają się protony i neutrony? Jaka jest najmniejsza cząstka we wszechświecie? Czy da się ją w ogóle zobaczyć...?

Naukowcy dużo mądrzejsi ode mnie zadawali sobie te pytania. Dzięki nim ludzkość przekraczała kolejne granice wiedzy, a wiele rzeczy, które kiedyś wydawały się niesamowite, albo nie do uwierzenia, jest teraz tak oczywiste, że wie o tym każde dziecko...

Dzisiaj nie potrafimy wyobrazić sobie życia bez smartfona. Każdy z nas jest w stanie przeprowadzić rozmowę wideo z drugą osobą oddaloną o tysiące kilometrów. Podróżujemy samolotami. Ale dla kogoś, kto żył 300–400 lat temu, to byłoby czary albo diabelskie sztuczki. Jeszcze wcześniej błyskawice interpretowano jako przejaw gniewu bogów. Wierzono, że zaćmienia Słońca czy Księżyca zwiastowały nadchodzące nieszczęścia. Dziś wiemy, że to potężne wyładowania elektrostatyczne, a zaćmienia Słońca czy Księżyca wynikają z wzajemnego położenia tych ciał niebieskich, krążących po swoich orbitach. Można powiedzieć, że postęp wiedzy i technologii odczarował świat i teraz jest mniej zagadkowy. Teraz już wiemy wszystko. Już nic nas nie zaskoczy i będzie wiało tylko nudą. Właśnie, że nie!

W 1895 roku odbył się pierwszy pokaz filmu braci Lumière, na którym widzowie zobaczyli wyłaniający się z ekranu projekcyjnego pociąg. Wyglądało to tak, jakby pociąg miał wjechać na widownię. Dla wielu ludzi było to tak niezwykłe, że podobno niektórzy uciekali z kina w obawie, że pociąg wjedzie do sali. Historycy mówią, że to raczej ubarwiona legenda niż prawdziwa panika. Już samo wyobrażenie takiego strachu pokazuje, jak bardzo to doświadczenie przypominało magię i jak bardzo sprytny magik oszukał kiedyś nasze zmysły.

Dziś każdy wie, że film to szybko wyświetlane kolejne obrazy, które nasze oczy i mózg odbierają jako ruch. To właśnie fizyka światła i optyka oka sprawiają, że mózg skleja nieruchome klatki w płynny ruch. Mechanizm, który kiedyś wydawał się magiczny, dziś jest dobrze zrozumiany i można go łatwo opisać. Ale mając tę wiedzę, człowiek zapragnął czegoś więcej. Ponad 130 lat temu ludzie byli przerażeni i zachwyceni magią nadjeżdżającego pociągu. Dzisiaj ta magia nie zniknęła – zmieniła tylko formę. Współczesne kina 3D, a nawet 4D i 5D wykorzystują fizykę światła, soczewek, projektorów i ruchu, by wywołać u widza podobny jak 130 lat temu efekt zachwytu, ekscytacji czy strachu. Obrazy wydają się wyskakiwać z ekranu – widzimy przestrzeń, odczuwamy wibracje, czujemy wodę i wiatr – wszystko dzięki prawom optyki, mechaniki i fizyki. To jest magia zaskoczenia w nowoczesnym wydaniu: nasze zmysły są oszukiwane, serce przyspiesza, a mózg przeżywa wrażenie czegoś niemożliwego.



Wąski skrawek Ziemi jest oświetlony na tle czerni kosmosu na zdjęciu wykonanym przez członka załogi Artemis II przez okno statku Orion.

Chociaż wiemy, że za tym stoi nauka, że stojąc nad przepaścią, jeśli poślizgniemy się, to tak naprawdę nic nam się nie stanie – bo przecież jesteśmy w bezpiecznym kinie – to ta świadomość nie odbiera nam emocji. Wręcz przeciwnie, mówimy sobie w duchu: *Wow! Jak super! Chcę jeszcze!* Zupełnie jak na pokazie magii z dzieciństwa.

FIZYKA ZDRADZA SEKRETY ILUZJONISTY

Magia, którą znałam jako dziecko, opierała się na niewiedzy – wszystko po prostu się działo na moich oczach i byłam tym oczarowana. Fizyka, którą teraz poznaję, zabija fałszywą magię: przesady, strach przed nieznanym i wiarę w cuda bez zrozumienia. W zamian za to daje nową magię – jeszcze bardziej niesamowitą – magię poznawania, szukania, zadawania pytań. Światło pochodzące z gwiazdy, której może już nie być, a które przecież widzę tu i teraz, nauczyło mnie zadawać nowe pytania. Emocje towarzyszące dziecięcej magii zamieniły się w ekscytację odkrywcy i fascynację związaną z podróżą w nieznanne. I to jest piękne, bo oznacza, że magia nigdy się nie kończy, że zawsze jest coś więcej do odkrycia. Na krańcach naszej wiedzy czeka tajemnica, a gdy zostanie ona rozwiązana, pojawi się następna. Ta magia jest inna, ale ja, choć nie jestem już małym dzieckiem, wciąż odczuwam ten sam zachwyt.

Chciałabym zobaczyć zorzę polarną. Wiem, że kiedyś to się stanie. Wyobrażam sobie ten moment, kiedy stojąc na śniegu, podniosę głowę i zobaczę taniec światła nade mną. Jestem pewna, że będzie to magiczna i niecodzienna chwila, a wiedza o tym, jak naprawdę powstaje zorza polarna, nie zabierze mi radości, podobnej do tej, gdy po raz pierwszy zobaczyłam tęczę. Wiem, że zobaczę coś więcej. Magik na scenie nie zdradza swoich sekretów – fizyka robi dokładnie odwrotnie. Mówi: *spójrz, pokażę ci, jak działa moja sztuczka*. Dlatego wiem, że oczyma wyobraźni przeniosę się wysoko nad Ziemię, by zobaczyć cząsteczki Słońca, które uderzają w atmosferę – tak jak na pokazie „Zorze – cudowne światła” w warszawskim Planetarium, gdzie zobaczyłam opis tego zjawiska.

Zobaczę coś więcej niż tylko przepiękną zorzę. Zobaczę wybuchy na Słońcu i wiatr słoneczny, który po pokonaniu 150 milionów kilometrów dociera do Ziemi, by zderzyć się z atomami tlenu i azotu w atmosferze. Będę wiedziała, że patrzę na coś, co łączy Słońce, Ziemię i mnie – stojącą tam na dole. Będę widzem i jednocześnie częścią tego magicznego pokazu.

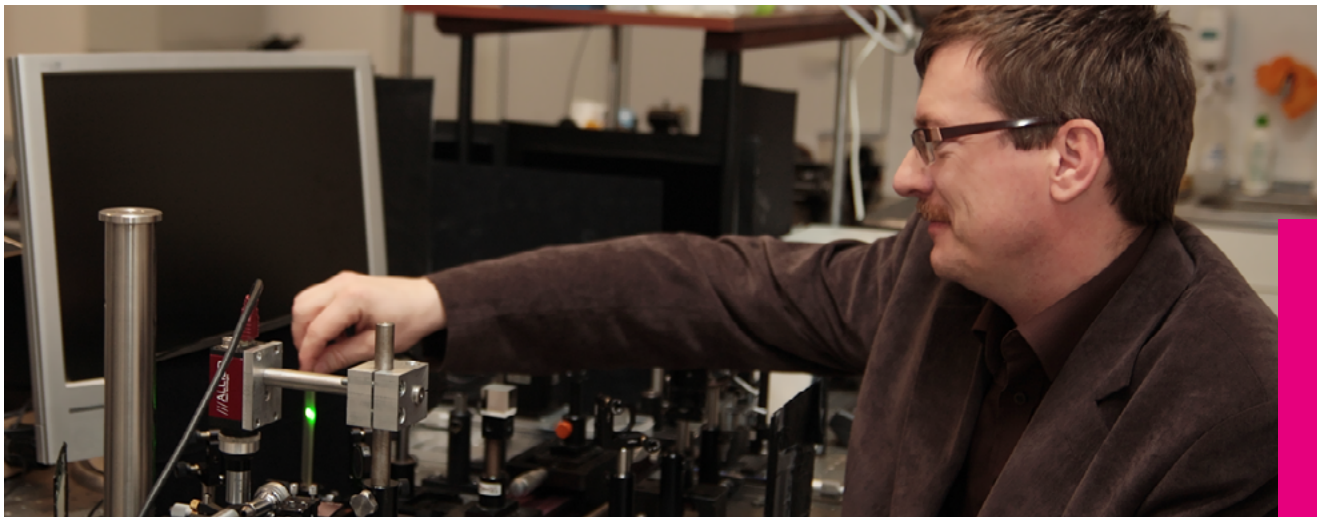
Czasem zastanawiam się, jak będzie wyglądał świat za 10 czy 20 lat. Co mnie wtedy zadziwi? Nie wiem dokładnie, co to będzie, ale wiem, że poczuję ekscytację, radość i doświadczę czegoś, co sprawi, że powiem sobie w myślach – to magiczne.

No dobrze, już teraz wiem, że na pewno jest jedna rzecz, której chciałabym doświadczyć. Chciałabym popatrzeć na Ziemię z okna promu kosmicznego i poczuć stan nieważkości. Wiem, czego się spodziewać, bo przecież to wynika z prawa ciążenia. Ale wiedzieć i poczuć, to zupełnie dwie inne sprawy. Ciekawe, o czym wtedy pomyślę, gdy poczuję tę magię...

AUTORKA



Maria Karasińska jest uczennicą ósmej klasy Społecznej Szkoły Podstawowej nr 26 im. prof. Jigoro Kano STO w Warszawie. W 2026 roku została laureatką konkursu Fizyczne Ścieżki. Z zainteresowaniem odkrywa prawa rządzące światem i towarzyszące im zjawiska, dostrzegając ich obecność w codziennym życiu.



FIZYKA ZACZYNA SIĘ OD LUDZI

ROZMOWA Z PROF. MIROSŁAWEM KARPIERZEM,
PRZEWODNICZĄCYM KOMITETU FIZYKI PAN
I PROREKTOREM POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Prof. Mirosław Karpierz, fizyk specjalizujący się w optyce nieliniowej i fotonice, należy do grona najczęściej cytowanych naukowców Politechniki Warszawskiej w obszarze fotoniki i optoelektroniki. Jest prorektorem PW, przewodniczącym Komitetu Fizyki PAN, a w przeszłości kierował także Oddziałem Warszawskim Polskiego Towarzystwa Fizycznego. W rozmowie opowiada przede wszystkim o ludziach obecnych na kolejnych etapach jego drogi: nauczycielach, promotorach, współpracownikach, studentach i doktorantach. Mówi o znaczeniu dobrego spotkania z fizyką w szkole i na uczelni, gdzie przyszli inżynierowie poznają nauki podstawowe oraz o tym, jak zachować kontakt z nauką, gdy obowiązki organizacyjne odsuwają od codziennej pracy badawczej. Rozmowa dotyczy też napięcia między tradycją akademicką a współczesnymi sposobami zarządzania uczelnią, kultury pracy i odpowiedzialności środowiska fizyków za jakość kształcenia.

Postępy Fizyki (PF): Panie Profesorze, jest Pan wymieniany w zestawieniach Top 2% najczęściej cytowanych naukowców PW w zakresie fotoniki i optoelektroniki. Zaczniemy jednak nie od liczb, lecz od ludzi: każdy fizyk ma na swojej drodze osoby, które zostają w pamięci na długo – dobrych nauczycieli, promotorów, starszych kolegów, czasem mistrzów. Kto był dla Pana szczególnie ważny, gdy wchodził Pan w świat fizyki?

Mirosław Karpierz (MK):

Studia na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej (FTiMS) Politechniki Warszawskiej wybrałem dzięki dobrym nauczycielom w IX LO im. Klementyny Hoffmanowej w Warszawie, w szczególności nauczycielowi fizyki, którym był Witold Łuczniak. Pracę dyplomową oraz doktorat pisałem pod opieką prof. Jana Petykiewicza, który zafascynował mnie optyką nieliniową i światłowoda-



mi (obie prace, podobnie jak moja habilitacja, dotyczyły nieliniowych optycznie zjawisk w światłowodach). Z kolei pracę w Instytucie Fizyki PW rozpocząłem w pracowni prof. Andrzeja Domańskiego, gdzie uczyłem się wykorzystywać światłowody do celów nitelekomunikacyjnych, m.in. w czujnikach optycznych.

W pracowni tej poznałem i zacząłem współpracę z prof. Tomaszem Wolińskim, który doktoryzował się u prof. Antoniego Adamczyka, specjalizującego się w fizyce ciekłych kryształów. To ułatwiło mi badania nad nieliniowością optyczną w ciekłych kryształach.

Prof. Petykiewicz był uczniem prof. Wojciecha Rubinowicza, a prof. Domański robił doktorat pod opieką prof. Bohdana Karczewskiego, którego opiekunem doktoratu był również prof. Rubinowicz. Czyli sięgając wstecz, moje korzenie naukowe wywodzić mogę od prof. Wojciecha Rubinowicza, który w latach 1917–1920 odbywał staże w pracowniach Arnolda Sommerfelda, a następnie Nielsa Bohra. Profesora Rubinowicza nigdy jednak nie poznałem osobiście, ponieważ zmarł, gdy byłem jeszcze w szkole podstawowej. Co ciekawe, w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, na specjalności optycznej Wydziału FTiMS PW studiowała Barbara Rubinowicz – wnuczka Profesora. Można powiedzieć, że tym samym „przekazaliśmy” jej dziedzictwo naukowe otrzymane od jej dziadka, ponieważ promotorem jej doktoratu był prof. Jan Petykiewicz. Warto też dodać, że w Instytucie Fizyki PW pracowali też inni uczniowie prof. Rubinowicza: dr hab. Kazimierz Gniadek, mgr Józef Krebs, a także prof. Adam Kujawski, który przeniósł się z IF PAN na Politechnikę w latach dziewięćdziesiątych.



prof. Jan Petykiewicz

PF: Wspomniał Pan o nauczycielach i mistrzach, ale w Pana historii pojawia się też dom rodzinny. Czy fizyka była w nim jakoś obecna, zanim stała się Pana własną drogą? Pytam również o Pana brata, którego wielu uczniów i nauczycieli zna z pokazów i filmów popularyzujących fizykę.

MK: Rzeczywiście, mój starszy brat Krzysztof pracuje na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Jest fizykiem ciała stałego i zajmuje się eksperymentalnym badaniem półprzewodników. Oprócz tego jest bardzo zaangażowany w popularyzację fizyki. Na YouTube można obejrzeć wiele filmów, w których przedstawia różne interesujące zjawiska i eksperymenty fizyczne. Z racji swoich pasji popularyzatorskich Krzysztof jest kierownikiem Pracowni Pokazów Wykładowych na Wydziale Fizyki UW.

Czy zainteresowanie fizyką moje i mojego brata wynika z genów – nie wiem tego do końca, ale obaj chodziliśmy do jednego liceum i, tak jak wspominałem, mieliśmy znakomitego nauczyciela fizyki, a był nim (przypomnę ponownie) prof. Witold Łucznik. Niestety zmarł on dwa lata temu, miał 96 lat. Skoro o rodzinie mowa, to mogę jeszcze dodać, że mamy z Krzysztofem dwie ciotki, które też są fizyczkami. Jedna z nich była nauczycielką fizyki w kilku liceach i technikach warszawskich, a druga przez lata pracowała w Unipressie (obecnie Instytut Wysokich Ciśnień PAN). Możliwe zatem, że coś jest na rzeczy z tymi genami.

PF: Mówiliśmy o tym, jak ważne jest dobre spotkanie z fizyką – w szkole, w domu, na studiach. A jak wygląda Pana własny kontakt ze studentami dzisiaj? Czy przy wielu obowiązkach organizacyjnych udaje się jeszcze zachować miejsce na dydaktykę i rozmowę o badaniach?

MK: Praca naukowa i prowadzenie zajęć ze studentami jest tym, co powodowało, że nigdy nie chciałem zmienić zawodu. Na pisanie prac naukowych niestety nie mam już czasu, ale staram się być na bieżąco i konsultować (jeśli się da) różne pomysły i wyniki badań uzyskiwane przez współpracowników (jestem członkiem Pracowni Optyki Nieliniowej

kierowanej przez prof. Urszulę Laudyn). Prowadzę też wykłady dla studentów Wydziału Fizyki PW (z teorii światłowodów oraz podstaw optyki i fotoniki), choć w zmniejszonym wymiarze pensum.

PF: Istnieje powiedzenie, że profesorem się jest, a dziekanem, prorektorem czy rektorem tylko się bywa. Z drugiej strony, kilka lat intensywnej pracy organizacyjnej może oddalić od codziennego uprawiania nauki. Czy po kadencji we władzach uczelni łatwo stać się na powrót aktywnym naukowcem?

MK: Mam taką nadzieję, ale też świadomość, że taki powrót nie jest łatwy. Dlatego staram się uczestniczyć (choć w sposób znacznie ograniczony) w życiu naukowym, bywać na konferencjach, dyskutować o sprawach naukowych, pomagać i konsultować różne pomysły. Jestem w dobrej sytuacji, bo mam współpracowników i znajomych, z którymi mogę rozmawiać o nauce i badaniach.

PF: Czy wśród takich osób są też Pana dawni studenci – ludzie, których drogę naukową obserwował Pan od początku?

INTUICJA I DOŚWIADCZENIE Z LAT POPRZEDNICH PODPOWIADAJĄ MI, ŻE LICZBĘ GODZIN Z FIZYKI I MATEMATYKI OGRANICZAJĄ TE WYDZIAŁY, KTÓRYM MNIEJ ZALEŻY NA WYSOKIM POZIOMIE KSZTAŁCENIA INŻYNIERSKIEGO (...). CZASAMI WINNI SĄ TEŻ TEMU SAMI FIZYCY, OFERUJĄC ZAJĘCIA NIEDOSTOSOWANE TREŚCIĄ I FORMĄ DO OCZEKIWAŃ I MOŻLIWOŚCI DZISIEJSZYCH STUDENTÓW

MK: Tak, oczywiście, miałem doktorantów i licznych magistrantów. Byłem promotorem 10 ukończonych prac doktorskich na Wydziale Fizyki PW. Wiele z nich dostało wyróżnienie. Niektórzy z moich uczniów są już profesorami uczelni albo pełnią ważne funkcje akademickie. Jedną z moich dawnych doktorantek, Katarzyna Rutkowska,

jest obecnie prodziekanem ds. nauczania na Wydziale Fizyki PW, a Urszula Laudyn – o czym już wspominałem – kieruje Zakładem Optyki i Fotoniki. Warto też wymienić Pawła Junga, autora wielu publikacji w renomowanych czasopismach, który odbył staż naukowy na Uniwersytecie Centralnej Florydy (UCF) w Orlando, a niedawno objął stanowisko profesora na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Miami.

PF: Rozmawiamy dotąd o ludziach, których fizyka wciągnęła na całe życie. Ale na politechnikach są też tysiące studentów, dla których fizyka nie jest pierwszym wyborem, tylko częścią drogi do zawodu inżyniera. Czy widzi Pan dziś ryzyko, że w programach takich studiów fizyka i matematyka będą traciły miejsce, choć bez nich trudno mówić o solidnym wykształceniu technicznym?

MK: Nie mam aktualnych danych na ten temat, ale zagrożenie takie na pewno występuje. Intuicja i doświadczenie z lat poprzednich podpowiadają mi, że liczbę godzin z fizyki i matematyki ograniczają te wydziały, którym mniej zależy na wysokim poziomie kształcenia inżynierskiego niż na zapewnieniu pensum swoim pracownikom. Czasami winni są też temu sami fizycy, oferując zajęcia niedostosowane treścią i formą do oczekiwań i możliwości dzisiejszych studentów. Na to nakłada się zmniejszająca się liczba studentów (m.in. niż demograficzny, skutki pandemii, mniejsza atrakcyjność klasycznych studiów wśród młodzieży), co prowadzi do tego, że niektóre jednostki, aby temu przeciwdziałać, proponują programy kształcenia mniej wymagające, za to o atrakcyjnych nazwach.

I tu też pojawia się rola naszego środowiska, abyśmy zwiększyli atrakcyjność nauczania fizyki, popularyzując ją jako przedmiot niekoniecznie bardzo łatwy, ale dający praktyczne umiejętności w wielu obszarach działalności człowieka i oczywiście w miejscach pracy.



Ze współpracownikami na Wydziale Fizyki PW w 2009 roku

PF: W środowisku akademickim coraz częściej słychać obawy, że uczelnie przejmują język i praktyki typowe dla korporacji: rozbudowane procedury, audyty, szkolenia, wskaźniki, zarządzanie przez standardy. Jedni widzą w tym potrzebną profesjonalizację, inni zagrożenie dla tradycji akademickiej i autonomii uczelni. Jak Pan patrzy na to napięcie?

MK: Tradycje akademickie są bardzo ważne, ale uczelnie muszą się zmieniać i dostosowywać do zmieniającego się świata. Ciągłe ważne jest etos akademicki, wiele osób o niego dba i mam nadzieję, że nie zaniknie, nie zostanie skomercjalizowany lub zastąpiony łatwymi do spełnienia standardami. Musimy jednak odpowiadać na wyzwania współczesności, na zmieniające się oczekiwania co do sposobu i form kształcenia oraz prowadzenia badań, a także do współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym. Nowe pokolenia studentów i pracowników mają inne potrzeby i inaczej podchodzą do życia niż ich poprzednicy sprzed kilkudziesięciu lat.

Powszechne stają się problemy natury psychicznej (depresje, stany lękowe, trudności w regulacji emocji, myśli samobójcze) i nieradzenie sobie ze stresem. Dlatego zmuszeni jesteśmy jako uczelnie wprowadzać rozwiązania poprawiające poziom kultury organizacyjnej: z jednej strony są to regulacje formalne, a z drugiej szkolenia i kontrola zachowań pracowniczych. Dążymy do tego, aby Politechnika Warszawska była miejscem przyjaznym do pracy i uczenia. Oczywiście przyjaznym dla pracowników i doktorantów, którzy solidnie i uczciwie podchodzą do pracy i badań oraz studentów, którzy chcą uzyskać solidne wykształcenie.

PF: Kiedy fizyk wykonuje zadania organizacyjne, zabiera ze sobą pewien sposób myślenia: analizowanie problemów, szukanie zależności, porządkowanie złożonych sytuacji. Czy to pomaga w pracy prorektora dużej uczelni technicznej?

MK: Wykształcenie w obszarze nauk ścisłych i technicznych, bo jestem fizykiem z tytułem inżyniera, na pewno pomaga w rozwiązywaniu problemów, również w obszarze zarządzania. Takie studia, ucząc analitycznego podejścia do rozwiązywania zagadnień i rozwijając logiczne myślenie, dają potrzebne do tego narzędzia. W zarządzaniu potrzebne są też umiejętności miękkie – do współpracy i kierowania ludźmi oraz wiedza z zakresu ekonomii i finansów. Pomimo że mam w tym trochę doświadczenia dzięki pełnieniu różnych funkcji w Uczelni, to refleksja „co ja tutaj robię?” wciąż co jakiś czas się u mnie pojawia.

PF: Skoro mówimy o zarządzaniu dużą uczelnią, zapytajmy też o drugą stronę tej pracy. Co najczęściej utrudnia dobre, spokojne prowadzenie spraw uczelni: przepisy, ograniczone środki, czy skala ludzkich problemów, które trzeba rozwiązywać?

MK: Niestety trochę jest takich spraw. Staramy się ograniczać nadmierne regulacje i racjonalizować działania w ramach przepisów prawa. Jako uczelnia publiczna podlegamy ograniczeniom ustawowym i musimy zachowywać dyscyplinę finansów przy ograniczonych środkach (udział nauki i szkolnictwa wyższego w polskim budżecie jest znacznie poniżej średniej europejskiej). Nie jest to łatwe, ale mamy radzące sobie z tym służby. Najbardziej absorbujące są jednak problemy pracownicze, co nie powinno dziwić w tak dużej uczelni jak Politechnika Warszawska.

PF: Poza pracą na Politechnice Warszawskiej kieruje Pan także Komitetem Fizyki PAN. To już perspektywa nie jednej uczelni, lecz całego środowiska fizyków w Polsce. Jaką rolę może dziś odgrywać taki komitet: bardziej doradcą, opiniotwórcą, integrującą, a może interwencyjną, gdy trzeba zabrać głos w sprawach ważnych dla nauki i kształcenia?

MK: Komitet liczy 45 członków, z czego 10 osób jest członkami PAN, a pozostali wybrani zostali na czteroletnią kadencję w powszechnych wyborach spośród profesorów zajmujących się naukami fizycznymi w polskich uczelniach i instytutach naukowych. Jest to zatem demokratycznie wybrana reprezentacja fizyków z różnych ośrodków naukowych rozsianych

po kraju. Zajmujemy się wszystkimi istotnymi zagadnieniami dla badań naukowych i kształcenia poprzez przeprowadzanie ocen i analiz, opiniujemy ustawy i rozporządzenia, a także przyjmujemy stanowiska, które kierujemy do władz państwowych (np. domagając się zwiększenia dofinansowania NCN czy

uwzględnieniu fizyki jako osobnego przedmiotu w programach szkolnych). Te ostatnie zazwyczaj przyjmujemy wspólnie z innymi komitetami naukowymi PAN oraz wspólnie z Polskim Towarzystwem Fizycznym i Ogólnopolskim Forum Dziekanów Wydziałów Fizyki i Dyrektorów Instytutów Fizyki.

Komitet pośredniczy w przyznawaniu dofinansowania konferencji, opiniuje kandydatury na członków zagranicznych PAN, pełni też funkcję komitetu narodowego ds. współpracy z Międzynarodową Unią Fizyki Czystej i Stosowanej (IUPAP), z Międzynarodową Komisją Optyki (ICO) oraz z Nuclear Physics European Collaboration Committee (NuPECC). Członkowie komitetów naukowych PAN (w tym i naszego Komitetu) będą mogli opiniować punktację niektórych czasopism naukowych. Przyznajemy również własną nagrodę wybitnym naukowcom szczególnie zasłużonym dla rozwoju nauk fizycznych. W poprzednich latach jej laureatami byli profesorowie Ryszard Horodecki, Wojciech Gawlik, Jan Misiewicz, Andrzej Maziewski i Henryk Szymczak, a w tym roku wręczymy ją prof. Józefowi Barnasiowi.

PF: Na koniec wróćmy do miejsca, z którym jest Pan związany od studiów: do Politechniki Warszawskiej. Uczelnia uroczyście obchodzi w tym roku 200 lat swojego istnienia. Co w tej historii jest szczególnie ważne z perspektywy fizyka i nauczyciela akademickiego?

MK: W 1826 roku z inicjatywy Stanisława Staszica powstała w Warszawie Szkoła Przygotowawcza do Instytutu Politechnicznego, a dzięki programom nauczania Józefa Skrodzkiego i Kajetana Garbińskiego, fizyka odgrywała w tej uczelni kluczową rolę. Niestety, po upadku powstania listopadowego Szkoła Przygotowawcza (a właściwie już Instytut Politechniczny) została zamknięta. Ze względu na niesprzyjający okres historyczny, następna próba utworzenia szkoły politechnicznej została podjęta dopiero na przełomie XIX i XX wieku, kiedy to w murach obecnej PW powstał Warszawski Instytut Politechniczny (niestety im. cara Mikołaja II), w którym językiem wykładowym był rosyjski. Była to jawna niesprawiedliwość, ponieważ Instytut został utworzony z funduszy i składek polskich przemysłowców, inżynierów, inteligencji oraz władz miejskich.



Uroczysta inauguracja jubileuszowego roku akademickiego 2025/26 na Politechnice Warszawskiej

Inicjatywa „Zapytaj Fizyka” to popularnonaukowy projekt Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, który pozwala zajrzeć za kulisy nauki. Dzięki uprzejmości prof. Piotra Sułkowskiego, kierownika tego projektu, także czytelnicy *Postępów Fizyki* mogą znaleźć odpowiedzi na nurtujące ich pytania w stałym dziale naszego pisma.

„Zapytaj Fizyka” na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego to nie tylko odpowiedzi, to także regularne wykłady popularnonaukowe (których nagrania można obejrzeć na YouTube) prowadzone przez wybitnych badaczy i pasjonatów nauki, którzy pokazują, że fizyka może być fascynującą opowieścią o tym, jak działa otaczający nas świat. Serdecznie zachęcamy do udziału!



JAKI MA KOLOR SŁOŃCE I DLACZEGO WIDZIMY JE JAKO ŻÓŁTE? OD CZEGO TO ZALEŻY I KIEDY MA INNE KOLORY?

Odpowiedzi udzielił Leszek Czechowski

Po pierwsze: nie sprawdzajmy koloru Słońca, patrząc na nie. Nawet krótka obserwacja gołym okiem grozi uszkodzeniem wzroku. Użycie lornetki do obserwacji Słońca, nawet przez ułamek sekundy, jest jeszcze bardziej groźne. O sposobach bezpiecznej obserwacji Słońca dowiadujemy się zwykle przy okazji zaćmienia. Na szczęście teraz łatwo znaleźć potrzebne informacje w internecie.^[1]

¹ Podajemy je także na stronie 6 niniejszego numeru *Postępów Fizyki*

Prawdziwie polska Politechnika Warszawska powstała 15 listopada 1915 roku, dokładnie tego samego dnia, co Uniwersytet Warszawski pod obecną nazwą. Myślę zatem, że odwoływanie się do korzeni sprzed 200 lat jest uzasadnione, zwłaszcza że odniesienia do polskości w czasach zaborów były niemożliwe. Dodam jeszcze, że z Politechniką związane są nazwiska wybitnych fizyków. Jan Czochrański, który ściśle rzecz biorąc był metalurgiem i fizykochemikiem, jest powszechnie znany jako twórca oryginalnej metody otrzymywania monokryształów, co w późniejszych latach miało kluczowy wpływ na rozwój fizyki ciała stałego i elektroniki. Wielki polski fizyk Mieczysław Wolfke to prekursor holografii i współodkrywcą nadciekłej odmiany helu. Warty upamiętnienia jest też Szczepan Szczeniowski – autor klasycznych już podręczników, na którym wychowywały się całe pokolenia studentów oraz główny inicjator Instytutu Fizyki, który dał początek obecnemu Wydziałowi Fizyki Politechniki Warszawskiej

PF: Panie Profesorze, bardzo dziękuję za rozmowę i gratuluję Politechnice Warszawskiej za te 200 lat pięknej tradycji, w tym tradycji związanej z fizyką.

Wywiad przeprowadził Jerzy E. Garbarczyk w kwietniu 2026 roku.



Przy zachodzie lub wschodzie Słońca obserwujemy silne poczerwienienie światła, co związane jest zarówno z rozpraszaniem jak i załamaniem światła. Ale, jak rozumiem, chodzi o kolor Słońca wysoko nad horyzontem. Odpowiedź nie jest oczywista ani jednoznaczna. Rzeczywiście na obrazach dziecięcych Słońce jest na ogół rysowane jako żółte. Ale jak dziecko ma narysować białe Słońce na białym papierze?

Najpierw jednak zajmijmy się obiektywnymi, fizycznymi czynnikami. Słońce, ogień lub żarówka świecą dzięki swojej wysokiej temperaturze i kolor ich światła zależy od temperatury. Temperatura najgorętszych części płomienia świecy to podobno ok. 2000 K, żarnika żarówki tradycyjnej – 2800 K. Na świecę i żarówkę możemy bezpiecznie popatrzeć. Jak byśmy nazwali barwę ich światła?

Ciało o temperaturze 4000 K świeci barwą białą, 5000 K – chłodnobiałą, 6500 K zimnobiałą. Czyste niebieskie niebo daje wrażenie koloru takie samo jak ciało o temperaturze 10000-15000 K. Ponieważ temperatura powierzchni Słońca (fotosfery) to 5780 K, to zgodnie z powyższym nazewnictwem jego światło powinniśmy określić jako zimno-białe (czyli lekko niebieskawą biel). Jednak w astronomii Słońce określa się jako żółtego karła!

Tutaj dochodzimy do względności koloru. Porównując szereg gwiazd, widzimy, że część ich jest bardziej żółtawa niż Słońce, a część bardziej niebieska. W stosunku do tych niebieskich gwiazd Słońce jest rzeczywiście żółtawe.

Nawet jeśli światło wysyłane przez Słońce określimy jako białe, to nie znaczy, że takie widzimy je na powierzchni Ziemi. Podczas przejścia światła przez atmosferę następuje jego rozpraszanie w atmosferze. Rozprasza się głównie światło niebieskie, a więc po przejściu przez atmosferę światło słoneczne rzeczywiście jest nieco bardziej żółte niż widziane w kosmosie.

Widzenie barwy jest też zjawiskiem fizjologicznym. Jeżeli oświetlimy pokój kolorowym światłem (np. niebieskimi lampkami choinkowymi), to moglibyśmy spodziewać się, że meble będziemy widzieli jako niebieskie. Doświadczenie wcale tego jednak nie potwierdza. Abyśmy mogli prawidłowo rozpoznać kolory, mózg stara się tak przesunąć skalę barw, aby dominujący kolor traktować jako biały i w tak poprawionym obrazie możemy wciąż rozpoznawać kolory (choć znacznie gorzej niż w świetle białym).

Widzenie barwy jest wreszcie zjawiskiem psychicznym. Słońce widzimy często na błękitnym niebie. Pojawia się kontrast barwny – nawet białe Słońce będzie widziane jako trochę zażółcone, bo tłem jest intensywnie niebieskie niebo (żółty jest dopełniającym kolorem do niebieskiego).

Warto też sprawdzić jak widzą Słońce artyści malarze. Zobaczmy w internecie np. takie obrazy: Lorraine „Port morski o wschodzie słońca”, C. Pissarro „Droga, zimowe słońce i śnieg”, Claude Monet, „Impresja, wschód słońca” i W. Turner „Dydoną wznosi Kartaginę”, „Port w Dieppe”. Poza Monetem z jego pomarańczowym Słońcem, Słońce jest raczej białawe, a nie żółte (jak malują dzieci).



CZY WEDŁUG TEORII GEOCENTRYCZNEJ MOŻNA OBLICZYĆ ZAĆMIENIE SŁOŃCA? JAK 2000 LAT TEMU POTRAFIŁI LUDZIE TO WYLICZYĆ I JAK PRZEWIDYWALI ZAĆMIENIA KSIĘŻYCA?

Odpowiedzi udzielił Leszek Czechowski

Obliczenie czasu zaćmienia Słońca lub Księżyca nie wymaga tworzenia modelu całego Układu Słonecznego. Względem Ziemi Słońce porusza się po elipsie (w ciągu roku), okrążając Ziemię. Podobnie Księżyc obiega Ziemię po elipsie (w ciągu tzw. miesiąca gwiazdowego). Wyznaczenie momentu zaćmienia Księżyca jest łatwiejsze, ponieważ zaćmienie to jest widoczne z dużej części naszej planety. Wyznaczenie zaćmienia Słońca jest trudniejsze, bo oprócz wyznaczenia momentu przejścia Księżyca przez tarczę Słońca trzeba wyznaczyć na jakim fragmencie Ziemi będzie to widoczne. A jest to pas o szerokości 300 km, czyli jego określenie wymaga dobrej znajomości szybkości ruchu obrotowego Ziemi i ruchów orbitalnych Księżyca i Słońca. Nie ma istotnego znaczenie, czy robimy to przy założeniu nieruchomości Słońca czy Ziemi. Wymagana dokładność do określenia zaćmień Słońca jest na tyle duża, że niektórzy uczeni wątpią czy rzeczywiście

starożytni potrafili je przepowiedzieć. Należy przypomnieć, że okresy ruchu orbitalnego Księżyca i Słońca oraz ruchu wirowego Ziemi są niewspółmierne, co oznacza, że zaćmienia nie powtarzają się ściśle nawet w okresie kilkudziesięciu lat. Być może starożytni pomagali sobie w obliczeniach, stosując różne przyrządy.

Rzeczywiście stosując zespoły połączonych ze sobą kół, można modelować ruchy ciał niebieskich (np. dysk z Nebry). Także budowle megalityczne (np. znana budowla w Stonehenge) mogły służyć do pomocy w obliczeniach astronomicznych. Jednak dla ludów europejskich ważniejsze bez wątpienia było prawidłowe przepowiedzenie pór roku niż zaćmień (mylonych często z zasłonięciami Słońca lub Księżyca przez chmury).



W WYKŁADACH PROF. KRZYSZTOFA MEISSNERA W SERWISIE YOUTUBE DOTYCZĄCYCH STYGNIĘCIA SŁOŃCA MOŻNA USŁYSZEĆ, ŻE „ZA KILKA MILIARDÓW LAT SŁOŃCE STANIE SIĘ CZERWONYM OLBRZYMEM, TEMPERATURY NA ZIEMI PRZEKROCZĄ 373 K. SŁOŃCE BĘDZIE W TYM CZASIE TRACIĆ ENERGIĘ, CZYLI JEGO TEMPERATURA SIĘ ZWIĘKSZY, BO W UKŁADACH GRAWITACYJNYCH JEST ODWROTNIE”. CO TO ZNACZY, ŻE JEST „ODWROTNIE”? CZEMU WRAZ Z UTRATĄ ENERGII SŁOŃCE BĘDZIE ZWIĘKSZAĆ TEMPERATURĘ NA ZIEMI?

Odpowiedzi udzielił prof. Krzysztof Meissner

Układy czysto grawitacyjne tracąc energię, np. przez promieniowanie, zacieśniają swoje orbity, co oznacza, że ciała je tworzące poruszają się szybciej, czyli mają efektywnie większą temperaturę, i na ten fakt chcę zwrócić uwagę w czasie wykładów. Jednak robię pewien skrót myślowy, gdyż Słońce obecnie nie jest układem czysto grawitacyjnym i wzrost jego temperatury wynika głównie z innego powodu — równowaga między ciśnieniem grawitacyjnym i produkcją energii w jądrze Słońca (która zależy od wielu parametrów) stopniowo się przesuwa w kierunku wyższych temperatur. Kiedy za kilka miliardów lat Słońce wypali wodór w jądrze do helu, przez pewien czas będzie układem prawie czysto grawitacyjnym i wtedy będzie się podgrzewać zmniejszając swój rozmiar, aż osiągnie w jądrze temperaturę „zapłonu” helu do węgla i tlenu. Wtedy ponowny wzrost ciśnienia odrzuci zewnętrzne warstwy na ogromne odległości, prawdopodobnie aż do orbity Ziemi, i stanie się czerwonym olbrzymem. Po jakimś czasie, odrzucając zewnętrzne warstwy, Słońce stanie się białym karłem składającym się głównie z jąder węgla i tlenu i zdegenerowanego gazu elektronów, świecącym znowu czysto grawitacyjnie, czyli w porównaniu z reakcjami termojądrowymi bardzo słabo.



JAN MOSTOWSKI (INSTYTUT FIZYKI PAN)

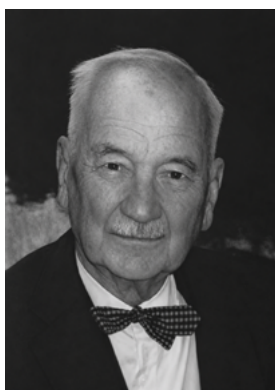
TRZY POKOLENIA OLIMPIADY FIZYCZNEJ

W tym roku Olimpiada Fizyczna obchodzi swoje 75-lecie. Niewiele instytucji edukacyjnych może pochwalić się tak długą, nieprzerwaną działalnością. Warto zwrócić uwagę, że 75 lat to trzy pokolenia uczniów, nauczycieli i organizatorów, których łączyła ta sama idea: stworzyć najzdolniejszej młodzieży przestrzeń do mierzenia się z prawdziwie wymagającymi problemami fizycznymi.

Początki Olimpiady sięgają początku lat pięćdziesiątych XX wieku – Polski powojennej, podporządkowanej politycznie Związkowi Radzieckiemu i odbudowującej się w realiach planowej industrializacji. Artykuł Jana Mostowskiego przypomina, jak w tych warunkach środowisko fizyków skupione wokół Polskiego Towarzystwa Fizycznego i Uniwersytetu Warszawskiego stworzyło przedsięwzięcie, które przetrwało do dziś jako jeden z najważniejszych sposobów odkrywania młodych talentów w Polsce.

Początki Olimpiady Fizycznej to wczesne lata pięćdziesiąte zeszłego wieku. Polska była wówczas zupełnie innym krajem niż jest dzisiaj. Pod względem politycznym kraj był w orbicie Związku Radzieckiego, a rządzący Polską byli całkowicie podlegli władzom Związku Radzieckiego. Gospodarczo kraj był zdewastowany po II wojnie światowej. Rozwój kraju polegał przede wszystkim na masowej industrializacji, koncentrowano się na rozwijaniu przemysłu ciężkiego, tak naprawdę pracującego na potrzeby sił zbrojnych Związku Radzieckiego. Mimo takich warunków uniwersytety działały. Fizyka i fizycy mieli nieco lepszą sytuację niż przedstawiciele innych nauk ze względu na rolę jaką odegrali w zbudowaniu bomby jądrowej.

POCZĄTKI OLIMPIADY FIZYCZNEJ



Wojciech Rubinowicz

Za powstaniem Olimpiady Fizycznej stał przede wszystkim Wojciech Rubinowicz – wybitny fizyk, przed II wojną światową profesor Uniwersytetu w Czerńowiecach i we Lwowie, a po wojnie profesor Uniwersytetu Warszawskiego. To on przekonał do tej idei wielu przedstawicieli środowiska fizyków, w szczególności Jerzego Pniewskiego i Leonarda Sosnowskiego. Wspólnie z fizykami skupionymi wokół Uniwersytetu

Warszawskiego oraz przy wsparciu Polskiego Towarzystwa Fizycznego rozpoczęto prace organizacyjne.

Formalnym początkiem starań był memoriał Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Fizycznego skierowany 18 marca 1951 roku do Ministerstwa Szkół Wyższych i Nauki. Już kilka miesięcy później, w grudniu 1951 roku, pierwsze tematy zadań olimpijskich trafiły do 1432 liceów i techników. Tempo działania było imponujące, choć trzeba pamiętać, że w realiach początku lat pięćdziesiątych skuteczność podobnych inicjatyw wymagała odpowiedniej oprawy ideologicznej. Jej charakter dobrze oddają fragmenty wspomnianego memoriału:

Kraje socjalizmu otaczają nauki przyrodnicze specjalną troską. Do jej przejawów należy zaliczyć Olimpiady Fizyczne organizowane każdego roku w Związku Radzieckim. Do zawodów olimpijskich przystępuje z zapalem młodzież szkół średnich całego kraju, a kierują olimpiadami najznakomitsi uczeni Związku Radzieckiego.

Wiadomo powszechnie, jaką rolę odegrało przeanalizowanie zdobyczy fizyki w rozwoju myśli naukowej Engelsa, jak baczna uwaga na zdobycze fizyki i wynikające z nich konsekwencje filozoficzne zwracał Lenin.

Fizyka ma również zasadnicze znaczenie dla zagadnień obronności kraju, tak obecnie istotnych wobec zakusów imperializmu zagrażających pokojowi światowemu.

Niedobór kadr w dziedzinie fizyki, będący spuścizną okresu przedwojennego i wojny, został szczególnie silnie uwypakowany w pracach Podsekcji Fizyki I Kongresu Nauki Polskiej

i w tezach przyjętych na Zjeździe Fizyków w Krakowie. Stan ten nie uległ zasadniczej poprawie w latach powojennych ze względu na niedostateczny i często przypadkowy dopływ kandydatów na studia fizyczne.

Jednym z najpilniejszych zadań stojących przed fizyką polską w okresie realizacji planu sześcioletniego jest zwielokrotnienie kadr pracowników naukowych i pedagogicznych. W celu radykalnego przełomu w tej dziedzinie i zapewnienia dopływu jak najliczniejszych kadr młodych fizyków Polskie Towarzystwo Fizyczne postanowiło wystąpić z inicjatywą zorganizowania zawodów uczniów szkół średnich pod nazwą „Olimpiada Fizyczna”. Zawody takie odbywają się, jak wiadomo, w Związku Radzieckim, gdzie cieszą się ogromną popularnością.

Memoriał podpisał prof. Leonard Sosnowski. Zastosowana argumentacja okazała się skuteczna, choć w rzeczywistości pierwsza Olimpiada Fizyczna w Związku Radzieckim odbyła się dopiero w 1964 roku.

Znakomitym świadectwem ówczesnych realiów był także zestaw dziesięciu sławnych fizyków wskazanych w materiałach olimpijskich jako wzory do naśladowania. Obok czterech bezdyskusyjnych geniuszy – Alberta Einsteina, Michaela Faradaya, Jamesa Clerka Maxwella i Isaaca Newtona – znalazło się tam miejsce dla czterech uczonych związanych z nauką rosyjską: Piotra Nikołajewicza Lebediewa, Emila Lenza, Michaiła Łomonosowa i Aleksandra Popowa. Do tej ósemki dołączono Marię Skłodowską-Curie oraz Fryderyka Joliot-Curie, wybitnego fizyka i zarazem działacza Komunistycznej Partii Francji.

Tak przygotowana argumentacja przyniosła natychmiastowy efekt. Niedługo po złożeniu memoriału w Dzienniku Urzędowym Ministerstwa Oświaty ukazało się Zarządzenie Ministra Oświaty i Prezesa Centralnego Urzędu Szkolenia Zawodowego z 28 września 1951 roku, nr II-śr. 5591/51, w sprawie zorganizowania w szkołach zawodów z fizyki. Dokument ten można uznać za formalny akt powołania Olimpiady Fizycznej.

Zgodnie z przyjętym regulaminem Polskie Towarzystwo Fizyczne powołało Komitet Główny Olimpiady Fizycznej w następującym składzie:

- Przewodniczący:
prof. dr Jerzy Pniewski,
- Kierownik Olimpiady:
prof. dr. Leonard Sosnowski,
- Delegat Polskiego Towarzystwa Fizycznego:
prof. dr Andrzej Sołtan,
- Delegat Polskiego Towarzystwa Fizycznego:
prof. mgr Aniela Wolska,
- Delegat Ministerstwa Oświaty:
Piotr Halfter,
- Delegat Ministerstwa Oświaty:
Władysław Chłapowski,
- Delegat Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego:
prof. mgr Bronisław Buras,
- Delegat Centralnego Urzędu Szkolenia Zawodowego:
Stanisław Kowal,
- Delegat Centralnego Urzędu Szkolenia Zawodowego:
Fryderyka Kamińska,
- Sekretarz Naukowy:
mgr Halina Chęcińska.

Najlepsi laureaci		ŁĄCZNIE	PROFIL MIEJSC
①	Jan Oficjański	3 tytuły	①①③
②	Pior Kossacki	3 tytuły	①① oraz 1 dalsze miejsce
③	Jarosław Simiński	2 tytuły	①①
③	Jerzy Tarasiuk	2 tytuły	①①
5.	Tomasz Motylewski	3 tytuły	①②③
6.	Jacek Wójcik	3 tytuły	①② oraz 1 dalsze miejsce
7.	Marek Czajkowski	3 tytuły	①② oraz 1 dalsze miejsce
8.	Jakub Supel	3 tytuły	①② oraz 1 dalsze miejsce
9.	Michał Rams	3 tytuły	①② oraz 1 dalsze miejsce
10.	Andrzej Komisarski	2 tytuły	①②
10.	Cezary Juszcak	2 tytuły	①②
10.	Witold Skiba	2 tytuły	①②

Utworzono również osiem Komitetów Okręgowych Olimpiady Fizycznej: w Gdańsku, Gliwicach, Lublinie, Łodzi, Poznaniu, Toruniu, Warszawie i Wrocławiu.

Mimo rozbudowanej, typowej dla tamtych czasów oprawy ideologicznej, I Olimpiada Fizyczna była przedsięwzięciem w pełni merytorycznym. Kierowali nią wybitni fizycy, a przygotowane zadania miały rzeczywiście olimpijski poziom. W roku szkolnym 1951/1952 w pierwszej Olimpiadzie wzięło udział 351 uczniów. Stefan Czarnecki w książce Olimpiady Fizyczne I–IV pisał, że było to niewiele w stosunku do oczekiwań Komitetu Głównego Olimpiady. Jak wynika z meldunków o przebiegu zawodów, jedną z głównych przyczyn malej frekwencji był obojętny stosunek niektórych nauczycieli do zawodów olimpijskich. Zdarzało się, że nauczyciele nie ogłaszali uczniom tematów. [...] Do zawodów finałowych zostało dopuszczonych 50 uczestników, w tym sześciu ze szkół technicznych (chłopców 47, a dziewcząt 3). Zawody odbyły się w Warszawie w dniach 25 i 26 kwietnia. Uczestnicy mieli zapewnione zakwaterowanie i wyżywienie. Zawody teoretyczne odbywały się w auli PWSP przy ulicy Myśliwieckiej 6/8, doświadczałne w pracowni PWSP i I pracowni Zakładu Fizyki Doświadczalnej UW. Dla uczestników zorganizowano odczyt naukowy, który wygłosił prof. dr Andrzej Sołtan, zwiedzanie autokarem Warszawy oraz uzyskano zbiorowe bilety do Teatru Narodowego na komedię Ostrowskiego „Las”. Zawody polegały na rozwiązaniu 4 zadań teoretycznych w ciągu 5 godzin (25 kwietnia) oraz zadania doświadczalnego w ciągu 4 godzin. W wyniku ocen Komitet Główny wytypował 21 zwycięzców. Trzej pierwsi zwycięzcy rozwiązali wszystkie zadania z wynikami bardzo dobrymi, wobec czego Komitet Główny przyznał im trzy pierwsze nagrody.

Pierwszymi laureatami zostali Iwo Białynicki-Birula, Andrzej Hildebrandt i Ryszard Kowalczyk. Wśród nagrodzonych znaleźli się również m.in. Zbigniew Dziuba, Kacper Zalewski, Dominik Rogula, Ryszard Engelking, Jan Stankowski i Tadeusz Pniewski. Jeden z nich Iwo Białynicki-Birula obecnie profesor i jeden z nestorów polskiej społeczności fizyków, wspominał po latach:

Jedno z zadań pamiętam dobrze, bo zawdzięczałem mu swój ówczesny sukces. A oto treść zadania: Jednorodny pręt stalowy o długości $2a = 1$ m wiruje dookoła osi pionowej przechodzącej przez jego środek i prostopadłej do jego długości. Wiedząc, że stal ulega zerwaniu przy naprężeniu $w = 1,95 \times 10^{10}$ dyn/cm² oraz znając jej gęstość $\rho = 7,8$ g/cm³, wyznaczyć liczbę n obrotów na sekundę, przy której pręt

Najlepsi nauczyciele laureatów	ŁĄCZNIE	PROFIL MIEJSC
① Marek Golka	43 laureatów	①①①①②②③ + 35
② Włodzimierz Zielicz	13 laureatów	①①①②③ + 8
③ Jan Szafraniec	27 laureatów	①①① + 22
4. Stanisław Lipiński	16 laureatów	①①① + 13
5. Elżbieta Zawistowska	42 laureatów	①①②②③③ + 35
6. Piotr Kononowicz	12 laureatów	①①②③ + 8
7. Agnieszka Bieniecka	4 laureatów	①①②③ + 7
8. Robert Stasiak	10 laureatów	①①③ + 7
9. Leopold Stefanek	3 laureatów	①① + 1
10. Józef Żółkiewicz	2 laureatów	①①
10. Stanisław Stefański	2 laureatów	①①

ulegnie zerwaniu. Na jakie części rozerwie się pręt i jaki jest ich dalszy ruch?

Ze względu na to, że siła działająca na element pręta zależy od odległości tego elementu od osi obrotu, rozwiązanie można było łatwo znaleźć, obliczając prościutką całkę funkcji od 0 do a . Umiejętność różniczkowania i całkowania nie była jednak w owych czasach powszechna wśród uczniów liceów ogólnokształcących, ale posiadali ją, choć brzmi to może nieco paradoksalnie, uczniowie techników. Technikum Mechaniczne w Rzeszowie, do którego uczęszczałem, miało doskonałych „przedwojennych” nauczycieli. Oprócz umiejętności odlewania, kucia na gorąco i skrawania można tam było nauczyć się także matematyki i fizyki. Gdybym nie rozwiązał dobrze zadania z prętem, pewnie nie zwyciężyłbym w zawodach, a to oznaczałoby konieczność podjęcia pracy w fabryce. W owych czasach obowiązywały bowiem nakazy pracy w instytucji wskazanej przez powołaną do tego komórkę. Dyplom Olimpiady Fizycznej dawał nie tylko wstęp bez egzaminu na wyższą uczelnię, miejsce w domu akademickim i stypendium, ale także automatycznie zwolnienie z nakazu pracy.

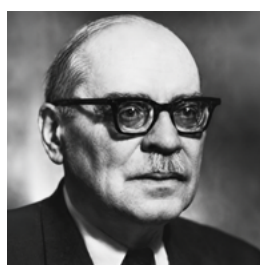
OLIMPIADA FIZYCZNA DZIŚ

Taki był początek Olimpiady Fizycznej. A jak jest w ostatnich latach? Zaczę od tego, że bardzo zmieniło się otoczenie społeczne, co oczywiście miało wpływ na Olimpiadę Fizyczną. W ciągu ostatnich 25 lat nastąpiły bardzo głębokie zmiany w wielu aspektach życia. Społeczeństwo bardzo się wzbogaciło w porównaniu do sytuacji z roku 1951. Dodatkowo w ostatnim ćwierćwieczu nastąpił bezprecedensowy rozwój elektroniki, telekomunikacji i związanych z tym urządzeń.

Rozwój społeczny ma to do siebie, że nigdy nie jest jednorodny. Niektóre aspekty życia społecznego rozwijają się szybciej niż inne, niektóre grupy społeczne zyskują a inne wręcz tracą lub rozwijają się wolniej, co też sprawia wrażenie regresu. Edukacja jest tą dziedziną, która nie skorzystała dostatecznie z ogólnego rozwoju kraju. Wprawdzie kolejne rządy dostrzegały konieczność zmian w systemie edukacji, ale wprowadzane reformy były chaotyczne, a często też miały inne cele niż podniesienie poziomu nauczania. W rezultacie reformy prowadziły do zmniejszenia roli przedmiotów ścisłych, w tym fizyki, w całym systemie.

Fizyka straciła swój prestiż w porównaniu do sytuacji sprzed 75 lat. W początkowych latach pięćdziesiątych zeszłego wieku cały świat był pod wrażeniem konstrukcji bomby jądrowej, którą stworzyli fizycy. To dawało fizykom do ręki duży atut. Obecnie fizycy nie mają takich argumentów, mimo że wnieśli olbrzymi wkład do rozwoju elektroniki, komputeryzacji, telekomunikacji itd.

Na tym tle może wydawać się czymś niezwykle, że Olimpiada Fizyczna zachowała zarówno swój charakter, jak i prestiż. Kolejne edycje Olimpiady Fizycznej odbywają się każdego roku. Przez wszystkie te lata organizatorem Olimpiady jest Polskie Towarzystwo Fizyczne, a finansowanie pochodzi z Ministerstwa Oświaty (obecnie: Ministerstwa Edukacji Narodowej). Również zmiany w regulaminie zawodów oraz w charakterze zadań są niewielkie. Jak widać, ani nieudane reformy systemu oświaty, ani spadek zaufania



Kolejni Przewodniczący Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej:
I Olimpiada Fizyczna (1951–1952): prof. dr Jerzy Pniewski
II–VI Olimpiada Fizyczna (1952–1956): prof. Tadeusz Skaliński
IV–XVII Olimpiada Fizyczna (1956–1968): prof. dr Szczepan Szczeniowski

XVIII–XXII Olimpiada Fizyczna (1968–1973): prof. dr hab. Iwo Białynicki-Birula
XXIII–XXXIV Olimpiada Fizyczna (1973–1985): prof. dr hab. Jerzy Mycielski
XXXV–XXXIX Olimpiada Fizyczna (1985–1990): prof. dr hab. Henryk Szymczak
XL Olimpiada Fizyczna (1990–1991): prof. dr hab. Jerzy Kołodziejczak

XL – XLIX Olimpiada Fizyczna (1991–2000): prof. dr hab. Jerzy Prochorow
L – LX Olimpiada Fizyczna (2000–2011): prof. dr hab. Jan Mostowski
LXI – LXVIII Olimpiada Fizyczna (2011–2019): prof. dr hab. Piotr Kossacki
LXIX – LXXV Olimpiada Fizyczna (od 2019): prof. dr hab. Andrzej Wysmotek

do fizyki w społeczeństwie nie wpłynął znacząco na postrzeganie nauki, w tym fizyki, przynajmniej wśród najzdolniejszych uczniów. Mimo że Olimpiada Fizyczna uchodzi za bardzo trudną, co jest uzasadnione, to jednak w ostatnich latach co roku około 1000 uczniów bierze w niej udział. Co roku około 20–30 osób, uczniów szkół średnich, uzyskuje tytuł laureata, a dodatkowo 50–60 osób tytuł finalisty. Obecnie nagrodą nie jest zwolnienie z nakazu pracy we wskazanej fabryce, jak to było w początkowych latach Olimpiady. W dalszym ciągu najcenniejszą nagrodą jest tytuł zwycięzcy i związany z tym prestiż. Ponadto wiele, może nawet większość wyższych uczelni, umożliwia olimpijczykom przyjęcie na wybrany kierunek studiów z pominięciem standardowej procedury. Zwycięzcy dostają też nagrody pieniężne i rzeczowe.

Zmiany w technologii wpłynęły też, do pewnego stopnia, na charakter zadań olimpijskich. Rozwój szeroko pojętej elektroniki zmienił zadania doświadczalne. Smartfony są obecnie powszechne, a jednocześnie są one doskonałymi przyrządami pomiarowymi. Za ich pomocą można mierzyć różne wielkości fizyczne, jak na przykład pole magnetyczne. Można też filmować stosunkowo szybkie procesy i następnie je analizować. Zastosowań jest mnóstwo. Dlatego co roku zadania olimpijskie wykonywane w domu przez uczestników, wymagają pomiarów wykorzystujących smartfon. Dodatkowo, co roku jedno zadanie wykonywane w domu polega na komputerowej symulacji procesów fizycznych.

Na przestrzeni lat zmieniali się jednak ludzie, zarówno organizatorzy Olimpiady jak i jej uczestnicy. Organizacją Olimpiady od początku jej istnienia zajmuje się kilkunastoosobowy Komitet Główny powoływany przez Zarząd Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Jego członkami są w większości pracownicy naukowi Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Instytutu Fizyki PAN. Tradycyjnie w skład Komitetu Głównego wchodzi nauczyciel fizyki ze szkoły średniej oraz student Wydziału Fizyki UW, na ogół były olimpijczyk.

Olimpiada ma w całej Polsce 13 Komitetów Okręgowych, a ich członkowie to na ogół pracownicy wyższych uczelni. W sumie w działalność Olimpiady zaangażowanych jest około 100 osób. Wszystkim, którzy pełnili lub pełnią funkcję w Komitetach Olimpiady należy się serdeczne podziękowanie.

W ciągu 75 lat istnienia Olimpiada Fizyczna nadała ponad 1000 tytułów laureata, niektórym osobom kilkakrotnie. Pełną listę laureatów można znaleźć na stronie Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej. Patrząc na te listy można się przekonać, jak wiele wybitnych osób rozpoczęło swoje kariery od udziału i zwycięstwa w Olimpiadzie Fizycznej.



Etap teoretyczny finału LXXIV Olimpiady Fizycznej w 2025 roku



Jedna z uczestniczek finałowego etapu doświadczalnego LVIII Olimpiady Fizycznej w 2009 roku

Wielu z nich to obecni profesorowie fizyki lub innych nauk. Młodszy to często aktywni pracownicy zajmujący się nie tylko nauką. Jeszcze młodszy to studenci lub uczniowie. Jak sądzimy, zwycięstwo w olimpiadzie ułatwiło im start życiowy.

Olbrzymią rolę w Olimpiadzie odgrywają nauczyciele. To im zawdzięczamy wykształcenie młodych ludzi. To oni przede wszystkim przygotowują i zachęcają swoich uczniów do nauki i sprawdzenia swoich sił w Olimpiadzie. Niektórzy wychowali już wielu olimpijczyków. Rekordzistami, którzy mają ponad 40 laureatów są: Elżbieta Zawistowska (XIV Liceum Ogólnokształcące im. Stanisława Staszica w Warszawie) i Marek Golka (XIII Liceum Ogólnokształcące w Szczecinie oraz VI Liceum Ogólnokształcącym w Radomiu). Zasłużonych nauczycieli jest znacznie więcej. Pełna lista nauczycieli olimpijczyków podana jest na stronie Komitetu Głównego Olimpiady. Trzeba dodać, że nie wszyscy dobrzy i zaangażowani nauczyciele mają możliwość wychowania olimpijczyka. Olimpiada Fizyczna jest trudna, jedynie kilkudziesięciu uczniów z całego kraju może dojść do finału. Serdecznie dziękujemy wszystkim nauczycielom za ich pracę nad kształceniem naszej młodzieży.



Laureaci LXXV Olimpiady Fizycznej w 2026 roku (od lewej: Borys Wawrzynów, Mikołaj Litwin, Dawid Chudzik) przy tradycyjnym torcie olimpijskim (fot: Paweł Cybin)

LAUREACI PIERWSZYCH MIEJSC W OLIMPIADACH FIZYCZNYCH 1951-2026:

Iwo Białynicki-Birula

(Technikum Mechaniczne w Rzeszowie),
nauczyciel: Kazimierz Krzyżanowski;

Andrzej Hildebrandt

(Szk. Ogólnokształcąca im. T. Reytana w W-wie),
nauczyciel: Józef Maciejewski;

Ryszard Kowalczyk

(Technikum Kolejowe w Warszawie),
nauczyciel: Antoni Wojtas.

Brunon Redmer

(Studium Przygotowawcze Politechniki Łódzkiej),
nauczyciel: Zdzisław Sobczak.

Jan Blinowski

(III Szkoła Ogólnokształcąca stopnia
podstawowego i licealnego TPD w Warszawie),

Piotr Decowski

(Liceum Ogólnokształcące w Puławach),
nauczyciel: Franciszek Kruk.

Zbigniew Pietrusiński

(VI LO TPD w Lublinie),
nauczyciel: Włodzimierz Kozyński.

Stanisław Lech Woronowicz

(SP i LO im. Wojciecha Kętrzyńskiego w Giżycku),
nauczyciel: Władysław Łapicki.

Andrzej Rajca

(I LO im. Stefana Żeromskiego w Kielcach),
nauczyciel: Anna Piekietniak.

Joachim Domsta

(SP i LO nr 3 w Gdańsku),
nauczyciel: Ludwik Fromczak.

Bogdan Nowak

(XXIV LO im. Marii Skłodowskiej-Curie w Łodzi),
nauczyciel: Henryk Małeckie

Zygmunt Kardysz

(Technikum Radiotechniczne w Dzierżonowie),
nauczyciel: Jarosław Kuśmider.

Krzysztof Jaroszek

(SP i LO w Dęblinie nr 6),
nauczyciel: Teresa Białeckie.

Andrzej Jamiołkowski

(LO im. Stanisława Staszica w Ciechocinku),
nauczyciel: Józef Brzeziński.

Paweł Mazela

(SP i LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu),
nauczyciel: Jan Szafranec.

Aleksy Bartnik

(LO im. Narczy Żmichowskiej w Warszawie),
nauczyciel: Piotr Halfter.

Bogdan Cichocki

(Technikum Chemiczne nr 3 w Warszawie),

Stefan Jackowski

(III LO im. Tadeusza Kościuszki w Łodzi),
nauczyciel: Wiesław Grzelak.

Przemysław Prusinkiewicz

(I LO im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu),
nauczyciel: Florentyna Jankowska.

Jan Oficjański

(VI LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu),
nauczyciel: Jan Szafranec.

Władysław Majewski

(VI LO im. Tadeusza Reytana w Warszawie),
nauczyciel: Antoni Urbański.

Stanisław Jerzy Szarek

(XIV LO im. Klementa Gottwalda w Warszawie),
nauczyciel: Marek Zwoliński.

Roman Stępniewski

(LO im. marsz. St. Małachowskiego w Płocku),
nauczyciel: Stanisław Stefański.

Jerzy Tarasiuk

(III LO im. Mikołaja Kopernika w Olsztynie),
nauczyciel: Józef Żółkiewicz.

Konrad Gajewski

(XLV LO im. Romualda Traugutta w Warszawie),
nauczyciel: Jacek Łoskot.

Krzysztof Kulpa

(Techn. Elektryczne w ZS Elektr. nr 1 w Warszawie),
nauczyciel: Leon Olszewski.

Jacek Maleta

(VI LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu),
nauczyciel: Marek Golka.

Sławomir Drażba

(II LO w Suwałkach),
nauczyciel: Romuald Miller.

Gotfryd Smolik

(Technikum Elektryczne w Zabrzu),
nauczyciel: Elżbieta Strzałkowska.

Grzegorz Szamel

(LO im. marsz. St. Małachowskiego w Płocku),
nauczyciel: Stanisław Stefański.

Aleksander Filip Żarnecki

(V LO im. Józefa Poniatowskiego w Warszawie),
nauczyciel: Stanisław Lipiński.

Cezary Juszcak

(XIV LO im. Polonii Belgijskiej we Wrocławiu),
nauczyciel: Marian Bąk.

Wojciech Zabołotny

(XLVIII LO im. E. Dembowskiego w Warszawie),
nauczyciel: Waldemar Kopacz.

Miroslaw Lis

(LO im. Mikołaja Kopernika w Tarnobrzegu),
nauczyciel: Jacek Bąk.

Jacek Wójcik

(I LO im. Kazimierza Brodzińskiego w Tarnowie),
nauczyciel: Adam Szklarz.

Witold Skiba

(I LO im. Mikołaja Kopernika w Bielsku-Białej),
nauczyciel: Zbigniew Kubica.

Piotr Kossacki

(XLV LO im. Romualda Traugutta w Warszawie),
nauczyciel: Stanisław Lipiński.

Tomasz Motylewski

(XXVI LO im. Małgorzaty Fornalskiej w Łodzi),
nauczyciel: Agnieszka Bieniecka.

Michał Rams

(XII LO w Krakowie),
nauczyciel: Tomasz Turek.

Jacek Piłszka

(I LO im. Tadeusza Kościuszki w Łomży),
nauczyciel: Wanda Jankowska.

Andrzej Komisarski

(I LO im. Mikołaja Kopernika w Łodzi),
nauczyciel: Hanna Szyburska.

Marek Czajkowski

(XIII LO w Szczecinie),
nauczyciel: Zbigniew Stółko.

Jarosław Simiński

(I LO im. Tadeusza Kościuszki w Legnicy),
nauczyciel: Leopold Stefanek.

Michał Szabelski

(XXVI LO im. Krzysztofa K. Baczyńskiego w Łodzi),
nauczyciel: Agnieszka Bieniecka.

Piotr Fiła

(I LO im. Tadeusza Kościuszki w Wieluniu),
nauczyciel: Zenona Stojęcka.

Marek Tomasz Biskup

(II LO im. St. Staszica w Starachowicach),
nauczyciel: Jacek Orzechowski.

Rafał Sarnecki

(XXXIII LO im. Mikołaja Kopernika w Warszawie),
nauczyciel: Włodzimierz Zielicz.

Mateusz Stefan Kwaśnicki

(III LO im. Adama Mickiewicza we Wrocławiu),
nauczyciel: Agnieszka Lewańska.

Marek Krzysztof Misztal

(II LO w Końskich),
nauczyciel: Robert Misztal.

Szymon Piotr Szafranec

(II LO im. M. Skłodowskiej-Curie w Gorzowie Wlkp.),
nauczyciel: Bogumiła Jankowska.

Magdalena Anna Gulewicz

(V LO im. Józefa Poniatowskiego w Warszawie),
nauczyciel: Anna Mazurkiewicz.

Sieciech Czajka

(V LO im. Józefa Poniatowskiego w Warszawie),
nauczyciel: Andrzej Majerowski.

Michał Paweł Piłipczuk

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciel: Elżbieta Zawistowska.

Tomasz Marek Smoleński

(VI LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu),
nauczyciel: Marek Golka.

Grzegorz Kępiasty

(I LO im. gen. Józefa Bema w Ostrołęce),
nauczyciel: Anna Maksimowska.

Adam Wyrzykowski

(V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie),
nauczyciel: Dagmara Sokołowska.

Adam Michał Ścibior

(VIII LO im. Adama Mickiewicza w Poznaniu),
nauczyciel: Jacek Gierszewski.

Krzysztof Lis

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciel: Robert Stasiak.

Michał Pacholski

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciel: Robert Stasiak.

Jakub Supeł

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciel: Włodzimierz Zielicz.

Paweł Czajka

(Liceum w ZS UMK Gimn. i Liceum Akad. w Toruniu),
nauczyciel: Maciej Wiśniewski.

Jan Marucha

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciel: Elżbieta Zawistowska.

Mateusz Raczynski

(XIII LO w Szczecinie),
nauczyciel: Marek Golka.

Jakub Boguta

(I LO im. Stanisława Staszica w Lublinie),
nauczyciele: Piotr Kamiński, Kamil Kononowicz.

Łukasz Białas

(XIII LO w Szczecinie),
nauczyciel: Marek Golka.

Juliusz Banecki

(Gdańskie Liceum Autonomiczne w Gdańsku),
nauczyciel: Artur Ludwikowski.

Emil Kisielewicz

(III LO im. Marynarki Wojennej RP w Gdyni),
nauczyciel: Artur Kolincio.

Korneliusz Piotr Obarski

(Pryw. Liceum im. Królowej Jadwigi w Lublinie),
nauczyciel: Piotr Kononowicz.

Stanisław Marcin Karpiejczyk

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),

Andrzej Franciszek Maroń

(XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie),
nauczyciele: Włodzimierz Zielicz, Łukasz Białas,
Mateusz Kamiński.

Mikołaj Litwin

(III LO im. Unii Lubelskiej w Lublinie),
nauczyciele: Regina Zawisza-Winiarczyk, Piotr
Kononowicz, Waldemar Berej.

Borys Wawrzynów

(IV LO z odd. dwujęz. im. S. Staszica, Sosnowiec),
nauczyciel: Dorota Marynowska.



MAREK RABIŃSKI (POLSKIE TOWARZYSTWO NUKLEONICZNE)

CZARNOBYLSKA OSŁONA

Od katastrofy czarnobylskiej minęło dokładnie 40 lat. Należy pamiętać, że nie zakończyła się ona wraz z ugaszeniem pożaru czwartego reaktora. Już kilka tygodni po awarii rozpoczęto prace nad konstrukcją, która miała jak najszybciej odizolować zniszczony blok od otoczenia. Tak powstał słynny Sarkofag – prowizoryczna, lecz gigantyczna osłona z betonu i stali, wzniesiona w warunkach wysokiego skażenia i ogromnej presji czasu. Po latach osłonę tę zastąpiła Nowa Bezpieczna Powłoka, zwana Arkadą: jedna z największych ruchomych konstrukcji inżynierskich świata, nasunięta nad reaktor w 2016 roku. Jej zadaniem jest nie tylko ochrona przed rozprzestrzenianiem się skażeń, ale także umożliwienie stopniowego demontażu starego Sarkofagu. Artykuł opisuje historię obu konstrukcji, skalę prac budowlanych, rzeczywisty poziom zagrożenia w Czarnobylskiej Strefie Wykluczenia oraz skutki uderzenia drona w Arkadę w lutym 2025 roku.

SARKOFAG

Awaria czwartego reaktora jądrowego Czarnobylskiej Elektrowni Atomowej im. W. Lenina 26 kwietnia 1986 roku o godzinie 1:23 nad ranem czasu moskiewskiego wywołała trwający dziesięć dni pożar, który zniszczył blok energetyczny. Kolejnym krokiem po wygaśnięciu 6 maja pożaru było zabezpieczenie otoczenia przed rozprzestrzenianiem się skażeń ze zniszczonego reaktora.

20 maja 1986 r. Ministerstwo Budowy Maszyn Średnich rozpoczęło planowanie likwidacji skutków awarii. W jednostkach podległych Ministerstwu opracowano 18 alternatywnych projektów zabezpieczenia, poczynając od koncepcji zasypania bloku warstwą ziemi, tłucznia i betonu. 12 sierpnia 1986 r. do realizacji zatwierdzono założenia konstrukcji znanej jako „Sarkofag”, a w państwach powstałych po rozpadzie ZSRR jako „Укрытие” („Schronienie”).

Północną stronę Sarkofagu utworzyły cztery stopnie (wysokości po około 12 m) ścian kaskadowych, za którymi zebrano i zalano betonem gruz ze zniszczonego reaktora. Zewnętrzny szalunek stopni kaskady o długości do 54 m i wysokości 12 m tworzyły metalowe elementy o masie ponad 100 ton każdy. Ściany boczne powstały z zalania betonem wnętrza ciągów pomieszczeń, natomiast zadaszenie było nową konstrukcją.

Dach opiera się na belkach zamocowanych w kierunku wschód–zachód: dwóch górnych, 40-metrowych, znajdujących się na poziomie +58 m i nazywanych „Samolotem” ze

względem na kształt, oraz największej, nazywanej „Mamucią”, o rozpiętości 70 m. Poniżej zamontowano belkę nazywaną „Ośmiornicą”, o ośmiu punktach podparcia.

Na pozostałościach starych konstrukcji bloku oraz belkach zbudowano strop z 27 rur stalowych o średnicy 1 metra i długości 36 m – oraz z pochyłych stalowych paneli pokrycia dachu. Przed fasadą zachodniej strony wzniesiono na 6-metrowym fundamencie ścianę przyporową z dziewięciu stalowych elementów o wysokości prawie 50 m, a przestrzeń między nią a oryginalną ścianą bloku reaktora wypełniono zbrojonym betonem. Metalowy szkielet nośny ściany wzmocniono przyporami.



Sarkofag na bloku 4 Elektrowni Czarnobylskiej

W pracach przy wznoszeniu Sarkofagu uczestniczyło 90 000 osób, pracujących w systemie zmianowym przez całą dobę. Użyto ponad 400 000 m³ betonu i 7 300 ton konstrukcji metalowych, przeniesiono 90 000 m³ ziemi. W 1986 roku nacisk kładziono na jak najszybsze zabezpieczenie zniszczonego bloku reaktora – nie budowano struktury, która miałaby trwać w perspektywie dziesięcioleci. Sarkofag postrzegano jako tymczasową osłonę do czasu ostatecznego rozwiązania zagadnienia składowania radioaktywnych pozostałości z awarii. W kolejnych dziesięcioleciach konstrukcję uzupełniano przez dodawanie instalacji zwiększających bezpieczeństwo, wzmocnień, natryskowe pokrywanie powierzchni polimerami itp.

ARKADA

20 grudnia 1995 roku w Ottawie podpisano porozumienie między grupą G7, Komisją Europejską i rządem Ukrainy, w sprawie zamknięcia do roku 2000 elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Następnie 20 listopada 1997 r. w Nowym Yorku konferencja 45 donatorów utworzyła fundusz *Chernobyl Shelter Fund*, którego celem jest wspieranie projektu. Zgromadzonymi środkami zarządzają niezależne instytucje zewnętrzne, niezwiązane z politycznymi strukturami Ukrainy, odizolowane od partykularnych interesów i grup wpływów.

Międzynarodowe konsorcjum ekspertów przeprowadziło kompleksową analizę rozwiązań technicznych i studiów wykonalności wybranych koncepcji zabezpieczenia Sarkofagu. Konkurs wygrało francuskie konsorcjum Novarka, którego projekt zakładał budowę ogromnej łukowej powłoki osłonowej, nazywanej Arkadą. O skali tej konstrukcji może świadczyć fakt, że wewnątrz zmieściłaby się nowojorska Statua Wolności o wysokości 93 m i rzymskie Koloseum o średnicy 188 m, a powierzchnia dachu odpowiada 12 boiskom piłkarskim.

Budowę formalnie rozpoczęto w 2010 roku, realizacja projektu napotykała jednak na nieprzewidywane utrudnienia i przeszkody ze strony ówczesnych władz Ukrainy. Ultimatum donatorów projektu Arkady zmusiło w końcu administrację prezydenta Wiktora Janukowycza do wydania ostatecznego zezwolenia na rozpoczęcie projektu, stąd montaż konstrukcji zainicjowano wiosną 2012 roku.

Główną konstrukcję Arkady tworzy 16 stalowych łuków kratownic o rozstawie 12,5 metra w kierunku wschód-zachód. Struktury łuków połączone są ze sobą pasami belek poprzecznych i ukośnymi zastrzałami, tworząc sklepienie cylindrycznej powłoki o wysokości 110 metrów, rozpiętości 270 metrów i długości 165 metrów, oraz o masie 36 tysięcy ton. Dach oraz wschodnia i zachodnia ściana fasady składają się z dwóch oddzielnych wielowarstwowych powłok – okładziny zewnętrznej i wewnętrznej. Odległość między zewnętrzną (dachową) i wewnętrzną (sufitową) warstwą to 12 m (dochodzi do 13,60 m na szczycie hali), przestrzeń między powłoką zewnętrzną a wewnętrzną (warstwa powłoki) ma objętość około 992 000 m³, przestrzeń pomiędzy wewnętrzną powłoką a Sarkofagiem (objętość hali Arkady) szacuje się na około 1 377 000 m³. Konstrukcja jest posadowiona na fundamentach z 20 000 m³ betonu.

Powłoka zewnętrzna Arkady jest wielowarstwową strukturą z uszczelnień, wełny mineralnej, 4 cm niechłonnej wilgoci pianki termoizolacyjnej z poliizocyjanuratu oraz membrany grubości 1,5 mm z kauczuku syntetycznego EPDM. Wewnątrz hali utrzymywane jest lekkie podciśnienie, więc w przypadku perforacji powłoki powietrze z zewnątrz jest zasysane do środka, a nie wydostaje się na zewnątrz.



Arkada nasunięta na reaktor nr 4 Elektrowni Czarnobylskiej

Budowę Arkady rozpoczęto w kwietniu 2012 roku, a w listopadzie 2016 roku nasunięto ją na Sarkofag nad zniszczonym czwartym blokiem energetycznym. W kolejnych miesiącach uszczelniono połączenia między nową a starą konstrukcją, elastycznymi membranami i dylatacjami.

Całkowity koszt wykonania Nowej Bezpiecznej Powłoki NSC zamknął się kwotą 1,6 miliarda euro. Wzrost kosztów ponad pierwotnie planowane 1,4 mld EUR oraz znaczące opóźnienia spowodowane były przez społeczno-polityczne perturbacje po stronie ukraińskiej.

Arkadę zaprojektowano, by w jej wnętrzu umożliwić bezpieczny demontaż zniszczonego reaktora nr 4 przy użyciu zdalnie obsługiwanych suwnic mostowych. Za ten etap rozbiórki odpowiada Bechtel Corporation – założona w 1898 roku duża amerykańska firma zarządzania projektami inżynieryjno-budowlanymi. W latach drugiej wojny światowej zrealizowano szereg zleceń departamentów obrony i energii, a od lat 50. XX wieku Bechtel prowadził budowy 80 procent wszystkich elektrowni jądrowych w USA. Na terenie Czarnobylskiej Elektrowni Atomowej uczestniczył od 1998 roku w naprawach struktury Sarkofagu oraz w pracach zespołu nadzorującego budowę Arkady.

Nowa Bezpieczna Powłoka posiada dwie suwnice podwieszone wewnątrz hali na kratownicach łuków. Suwnice poruszają się w kierunku wschód-zachód po prowadnicach wzdłuż hali, a ich rozpiętość (szerokość) w kierunku północ-południe wynosi 84 metry. Do nich podwieszone są trzy dźwigi z wymiennymi modułami manipulatorów, przy pomocy których nastąpi rozbiórka dotychczasowego Sarkofagu. Według pierwotnych ustaleń całkowita likwidacja Sarkofagu (do poziomu „gołej ziemi”) powinna zakończyć się do 2064 roku, ale obecna sytuacja geopolityczna bez wątpienia znacząco wydłuży ten okres.

CZARNOBYLSKA STREFA WYKLUCZENIA

W 1986 roku z obszaru wokół elektrowni ewakuowano 116 tysięcy osób. Po dwóch latach powróciło około 1 600 osób, około 2% ludności wiejskiej. Od 2022 roku większość pozostałych osiedleńców mieszka u swoich rodzin poza Strefą.

Czarnobylska Strefa Wykluczenia obejmuje:

- Strefę białoruską (Poleski Rezerwat Radiacyjno-Ekologiczny i Strefa Wysiedlenia) – 2 200 km²
- Strefę ukraińską (w tym strefę 10-km, miasteczko Czarnobyl, rezerwat w delcie Prypeci) – 2 600 km²



„Zrudziały las” wokół Elektrowni Czarnobylskiej

Poziom promieniowania na terenie Strefy (setki tysięcy razy mniejszy niż poziom wywołujący efekty zdrowotne):

- „zrudziały las” (0,5 km²) – 12 $\mu\text{Sv/h}$, przy ścianie Sarkofagu – 5–8 $\mu\text{Sv/h}$, jest to poziom gęsto zamieszkanego regionu Kerali (Indie), poziom 10 razy niższy niż w uzdrowisku Ramsar w Iranie i Guarapari w Brazylii
- na pozostałym obszarze – 0,02–0,25 $\mu\text{Sv/h}$, to znaczy mniej niż w Polsce (0,15–0,30 $\mu\text{Sv/h}$).

Na Ukrainie poziom naturalnego tła promieniowania jest o jedną trzecią niższy niż w Polsce. Przyczyną jest mniejsza kamienistość gleby, a to wydzielający się z granitu radon wnosi znaczący wkład w poziom tła. Dlatego w Czarnobylskiej Strefie Wykluczenia oprócz mogiłników odpadów z akcji likwidacji skutków awarii poziom promieniowania nie stanowi podstaw do niepokoju. Miejscem szczególnym jest oczywiście wnętrze Sarkofagu gdzie poziom jest wysoki.

W Strefie żyją ogromne liczby łosi, 4 000 dzików, 200–300 saren, 200 wilków, 300 borsuków, bobry, sprowadzone ze stepów konie Przewalskiego (około 200), żubry sprowadzone z Puszczy Białowieskiej oraz 5 niedźwiedzi brunatnych. W zbiornikach wodnych odnaleziono gatunki ryb, które w innych rejonach wytrzebili kłusownicy.

UDERZENIE DRONA W CZARNOBYLSKĄ ARKADĘ

14 lutego 2025 r. o godzinie 1:59 rano Arkada na terenie Czarnobylskiej Elektrowni Atomowej została uszkodzona od północnej strony uderzeniem drona. W wyniku uderzenia w zewnętrzną okładzinę na wysokości 87 m powstał otwór o średnicy ponad 2 metrów (i powierzchni 5 m²) a około 15 metrów kwadratowych nosi ślady eksplozji. Skrajnie wewnętrzna warstwa pozostała cała, ponieważ dron uderzył

przy zachodniej fasadzie w „garaż” suwnicy bramowej uszkadzając wyłącznie powłokę zewnętrzną i konstrukcję kratownicową, a nie powłokę wewnętrzną od strony hali i starego Sarkofagu. Uderzenie nastąpiło nad przestrzenią o głębokości 11 m (w kierunku wschód-zachód), między powłokami zachodniej fasady Arkady – z suwnicą i windami towarowymi. Po uderzeniu działały wszystkie układy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji oraz systemy monitoringu promieniowania. W żadnym z 39 punktów pomiarowych Arkady nie odnotowano wzrostu poziomu tła ani podczas uderzenia drona, ani po nim – tło promieniowania po ataku pozostało w granicach normy i wynosiło 0,57 $\mu\text{Sv/h}$, co jest wartością zaledwie czterokrotnie wyższą niż poziom naturalnego tła w Warszawie.

Za neutralizowaniem rosyjskich dronów stoi ukraiński system Pokrowa (ukr. Покрова – całun), w kościołach obrządku wschodniego kojarzony z „całunem wstawiennictwa Bogurodzicy”. System opiera się na skoordynowanym działaniu sieci podmieniania sygnałów nawigacji satelitarnej – sieć ukraińskich nadajników przekazuje w okolicy Kijowa sygnały rosyjskiego systemu GLONASS z rejonu np. Morza Czarnego. W wyniku tego drony zamiast lecieć na północną Ukrainę lecą na terytorium Białorusi i Rosji – bo tam według sfalszowanych współrzędnych znajdują się ich cele.

Brak jakichkolwiek dowodów, by atak był zaplanowany przez Federację Rosyjską. Dron rosyjski lecący z Białorusi w kierunku Kijowa został nieumyślnie przekierowany przez ukraińskie systemy obrony elektronicznej. Oficjalne komunikaty poważnych światowych agencji informacyjnych nie sugerują winy którejkolwiek ze stron. Uderzenie nastąpiło po odwołaniu alarmu przeciwlotniczego – co sugeruje, że dron zawracał z Białorusi po odzyskiwaniu na jej terenie sygnałów z właściwej sieci nawigacji.

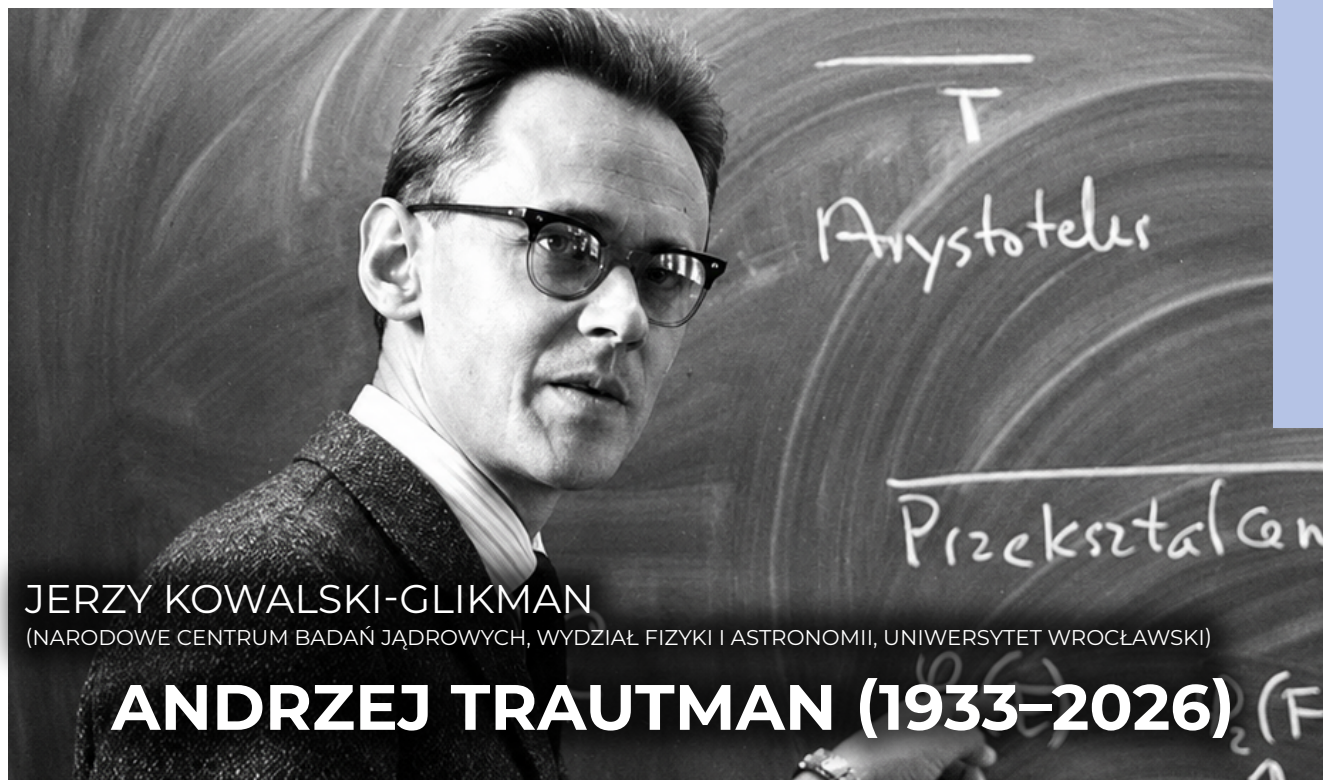
W połowie maja 2025 ministerstwo finansów Ukrainy podało przybliżone koszty odbudowy, oszacowane na 100 milionów euro. Uszkodzenia powłoki zostały już prowizorycznie zabezpieczone, choć oczywiście nie ma mowy o uzyskaniu parametrów szczelności Arkady. Z początkiem 2026 roku oszacowania firmy amerykańskiej utraciły jednak charakter techniczno-ekonomiczny i stały się elementem polityki Trumpa.

AUTOR



Dr hab. inż. **Marek Rabiński** (ORCID: 0000-0002-9875-370X) jest fizykiem i inżynierem związanym z Narodowym Centrum Badań Jądrowych, a także Polskim Towarzystwem Nukleonowym i Stowarzyszeniem Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej – SEREN. Zajmuje się fizyką i inżynierią plazmy wysokotemperaturowej oraz techniki jądrowej. Jest popularyzatorem wiedzy o energetyce jądrowej oraz skutkach awarii w Czarnobylu.





JERZY KOWALSKI-GLIKMAN

(NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH, WYDZIAŁ FIZYKI I ASTRONOMII, UNIWERSYTET WROCŁAWSKI)

ANDRZEJ TRAUTMAN (1933–2026)

27 lutego 2026 r. zmarł profesor Andrzej Trautman. Miał 93 lata. Prof. Trautman był jednym z najwybitniejszych polskich fizyków teoretyków, współtwórcą wielkiego przełomu w teorii grawitacji, który zaowocował zrozumieniem, czym są fale grawitacyjne i jak można ich istnienie obserwacyjnie zweryfikować.

Andrzej Trautman urodził się w Warszawie 4 stycznia 1933 roku. Jego ojciec Mieczysław był artystą malarzem i uczył rysunku w szkole średniej, a matka Eliza pochodziła z francusko-polskiej rodziny. Prof. Trautman wspominał, że zarobki ojca w okresie przedwojennym wynosiły ok. 300 złotych miesięcznie, co sytuowało jego rodzinę w klasie średniej, wiodącej życie skromne, lecz nie zmagającej się z wielkimi problemami materialnymi. Dzieciństwo Trautmana brutalnie przerwała wojna. Wakacje 1939 roku spędził z rodziną pod Lublinem, jednak tuż przed wybuchem wojny razem z matką wrócił do Warszawy. Ojciec został na wsi. Chłopiec przeżył oblężenie i bombardowanie stolicy, które mocno zapadły mu w pamięć. Po wkroczeniu Niemców wrócił z matką na wieś, gdzie spędzili trzy kolejne lata. W 1941 roku jego ojciec zmarł na serce. To wydarzenie jeszcze bardziej pogorszyło sytuację rodziny. Wiosną 1942 roku Andrzej z matką wrócili do Warszawy i zamieszkali w bardzo skromnych warunkach w wynajętym mieszkaniu. Mimo trudności kontynuował naukę – najpierw na wsi, później w prywatnej szkole na Ochocie. Powstanie Warszawskie zaskoczyło Trautmana z matką w trakcie wizyty u znajomych, zaś jego upadek był dla Trautmanów początkiem wieloletniej tułaczki. W trakcie i po zakończeniu wojny matka Trautmana w poszukiwaniu możliwości utrzymania przenosiła się wielokrotnie, aż w końcu znalazła się z synem w Paryżu, gdzie spędzili kilka lat, w trakcie których Trautman uczył się w polskiej szkole średniej i gdzie, w 1949 roku, w wieku 16 lat zrobił maturę. Rodzina przeniosła się wtedy z powrotem do Polski, jak wspominał Trautman – głównie dlatego, że we Francji nie stać by ich było na studia wyższe, i w tym samym roku Trautman zaczął studiować na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.^[1]

Od młodych lat Trautman interesował się naukami przyrodniczymi, szczególnie matematyką i fizyką. Jego młodości doświadczenie formacyjne miało miejsce jeszcze w czasach okupacji. Gdy miał dziesięć lat, dostał na imieniny niewielką sumę pieniędzy i postanowił wydać je na książkę. Początkowo wybrał powieść młodzieżową, ale szybko wrócił do księgarni i zamienił ją na książkę popularnonaukową „Świat ssaków”. Jak sam mówił – od tej chwili interesowały go już głównie książki naukowe. Tuż po maturze skłaniał się do studiowania matematyki lub fizyki, ale zniechęcony sugestiami nauczycielki fizyki: *„Słuchaj, jak skończysz fizykę lub matematykę, to zostaniesz nauczycielem gimnazjalno-licealnym tak jak ja, a ja ci mówię, że to jest bardzo nieciekawy i niewdzięczny zawód”*^[2], wybrał ostatecznie studia inżynierskie. Nie był to chyba wybór zbyt szczęśliwy. Trautman wspominał: *„Studia na Politechnice były bardzo ciężkie i mało interesujące. [...] Trudności sprawiał mi rysunek techniczny. [...] Musiałem [...] tuszem rysować na brystolu bardzo precyzyjne rysunki. Pod koniec I roku już wiedziałem, że to nie jest to”*^[2]. Postanowił studiować fizykę, ale pragnienia tego nie zdołał zrealizować, nie udało mu się bowiem uzyskać zgody władz na podjęcie równoległych studiów.

² P. Kielanowski, A. Martens „Moje pierwsze 50 lat na Hożej – rozmowa z Andrzejem Trautmanem,” *Postępy Fizyki* 58, 4 (2007)



Andrzej Trautman w Paryżu, 1949 r.

¹ A. Trautman and D. Salisbury, “Memories of my early career in relativity physics,” *Eur. Phys. J. H* 44 (2019) no.4-5, 391-413

Nie wiadomo, jak potoczyłyby się losy Andrzeja Trautmana, gdyby nie powrót do Polski w 1951 roku, opromienionego sławą współpracy z Einsteinem, znanego relatywistą Leopolda Infelda. Dla Trautmana, poważna przygoda z fizyką teoretyczną rozpoczęła się od uczestnictwa w wykładzie Infelda z teorii względności, gdzie poznał ówczesnego studenta, a późniejszego znanego profesora zajmującego się teorią względności – Jerzego Plebańskiego. Pod jego kierunkiem Trautman napisał w 1955 roku pracę magisterską i za jego namową rozpoczął w tym samym roku studia doktoranckie, formalnie pod kierownictwem Infelda, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Tematem jego rozprawy doktorskiej miały stać się fale grawitacyjne.

Proponując badania nad zagadnieniem fal grawitacyjnych Plebański wykazał się fantastyczną intuicją: o ile na pierwszej wielkiej konferencji zorganizowanej w Bernie w 1955 r. z okazji pięćdziesięciolecia szczególnej teorii względności, ale poświęconej głównie zagadnieniom ogólnej teorii względności, fale grawitacyjne nie były jeszcze godne wykładu plenarnego, o tyle dwa lata później, na konferencji w Chapel Hill stały się już jednym z najważniejszych przedmiotów dyskusji^[3]. Potrzeba było kolejnych kilku lat, by za sprawą grupy głównie młodych naukowców, grupy, w której Trautman grał jedno z pierwszych skrzypiec, problem fal grawitacyjnych został w pełni zrozumiany.

Na czym polegał ten problem? W Ogólnej Teorii Względności, ze względu na obecność symetrii względem dowolnej zmiany układu odniesienia, nie można prosto zdefiniować energii przenoszonej przez falę grawitacyjną; w przeciwieństwie do elektrodynamiki, energia ta nie może być wyrażona jako całka z mierzonej lokalnie gęstości. Innymi słowy, wydawało się, że gdy jeden obserwator przypisze fali grawitacyjnej pewną dodatnią energię, znajdzie się inny, dla którego energia ta będzie równa zeru. Powodowało to daleko idącą konfuzję, prowadzącą nawet do tego, że wielu znanych relatywistów, wśród nich Leopold Infeld, wątpiło w istnienie fizycznych fal grawitacyjnych. Na wspomnianej już konferencji w Bernie, w krótkim wystąpieniu współpracownik Einsteina, Nathan Rosen^[4] argumentował wręcz, że fale grawitacyjne w ogóle nie istnieją. Sytuacja doczekała się pewnego rozjaśnienia na konferencji w Chapel Hill w 1957 r.^[5], w trakcie dyskusji, w której główną rolę odegrali Richard Feynman i Hermann Bondi. Jak w swoim charakterystycznym, nieco aroganckim stylu, wspominał Feynman w liście do Weisskopfa parę lat później: *Byłem zaskoczony faktem, że problemowi temu poświęcono cały dzień obrad i że „eksperti” byli zdezorientowani. Jaki jest sens poszukiwania zachowanych tensorów energii itp. zamiast po prostu zapytać się, czy fala może wykonać pracę?*^[6] W tym samym liście Feynman odtwarza swoją, zaprezentowaną na tej konferencji propozycję konstrukcji detektora fal grawitacyjnych: *składa się on po prostu z dwóch paciorków nanizanych na sztywny pręt, wzdłuż którego mogą się one swobodnie przemieszczać (z niewielkim tarciem). Kiedy przez pręt przepływa fala grawitacyjna, siły atomowe utrzymują niezmienną długość pręta, ale odległość własna między paciorkami zmienia się harmonicznie. Z tego powodu paciorki*



Paul Dirac, Andrzej Trautman i Leopold Infeld, 1962 r.

ocierają się o pręt, wytwarzając ciepło^[6]. Niedługo po konferencji w Chapel Hill, Bondi doprecyzował pomysł Feynmana i tak zapoczątkowana została historia budowy detektorów fal grawitacyjnych uwieńczona, niemal 60 lat później, obserwacyjnym potwierdzeniem istnienia fal grawitacyjnych w 2015 roku.

Z pragmatycznego punktu widzenia podejście Feynmana jest oczywiście sensowne – budujemy detektor i sprawdzamy, czy fale grawitacyjne istnieją, czy nie – ale omija ono fundamentalny problem zrozumienia, czym są fale grawitacyjne i jak wpisują się one w ogólny pojęciowy schemat Einsteińskiej teorii grawitacji. W wyjaśnieniu tego podstawowego zagadnienia prof. Trautman odegrał kluczową rolę.

W 1955 roku, gdy Andrzej Trautman rozpoczął studia doktoranckie, falami grawitacyjnymi zainteresował się, za namową Markusa Fierza, wspomniany wcześniej Hermann Bondi, który postanowił, że tworzona właśnie przez niego w King's College nowa grupa badawcza poświęci się temu zagadnieniu. Jednym z członków tej nowo utworzonej grupy był były student Infelda, Felix Pirani. To do niego należało pierwsze znaczące uchylenie rąbka tajemnicy otaczającej fale grawitacyjne.

Punktem wyjścia rozważań Piraniego^[7] była podstawowa intuicja fizyczna i przywołanie analogii pomiędzy falą grawitacyjną a falą elektromagnetyczną. Wyobraźmy sobie układ, który w pewnej chwili zaczyna promieniować, elektromagnetycznie albo grawitacyjnie. W efekcie w czasoprzestrzeni pojawi się poruszający się z prędkością światła front fali, elektromagnetycznej lub grawitacyjnej. Jak scharakteryzować taki front fali? W przypadku elektromagnetycznym, na froncie tym pojawia się nieciągłość natężenia pola elektromagnetycznego, Pirani zaproponował, żeby podobnie front fali grawitacyjnej charakteryzować za pomocą nieciągłości natężenia pola grawitacyjnego – tensora Riemanna. Jest to definicja operacyjna: łatwo wymyślić detektor, który rejestrowałby skok natężenia pola elektromagnetycznego, podobnie łatwo wymyślić detektor, który podobnie rejestrowałby skok natężenia pola grawitacyjnego, jest to dokładnie rodzaj detektora wymyślony przez Feynmana i Bondiego: przed przejściem fali grawitacyjnej paciorki na pręcie są nieruchome, zaś przejście czoła fali powoduje, że zaczynają się poruszać. Ten obraz, jakże oczywisty ze współczesnego punktu widzenia, stał się punktem wyjścia do opracowania przez Piraniego teorii fal grawitacyjnych. Pod koniec 1957 roku Infeld zaprosił Piraniego na parę tygodni do Warszawy. Wizyta ta stała się przełomowym wydarzeniem w karierze naukowej Andrzeja Trautmana.

3 A. S. Blum, R. Lalli i J. Renn, "The renaissance of General Relativity: How and why it happened," *Annalen Phys.* 528 (2016), 344-349 DOI: 10.1002/andp.201600105

A. Blum, R. Lalli i J. Renn, "Gravitational waves and the long relativity revolution," *Nature Astron.* 2 (2018) no.7, 534-543 DOI: 10.1038/s41550-018-0472-6

4 Bardziej niż ze wspólnych prac z Einsteinem dotyczących fal grawitacyjnych zapamiętany jako współtwórca paradoksu EPR (Einsteina-Podolskiego-Rozena) - jednego z fundamentów fizyki kwantowej.

5 D. Rickles, C. M. DeWitt (red.), *The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference*, Edition Open Sources, Sources 5, 2011, DOI: 10.34663/9783945561294-00

6 J. Preskill i K. Thorne "Wprowadzenie", w Richard P. Feynman, *Wykłady z grawitacji*, Prószyński i S-ka (2006)

7 F. A. E. Pirani, "Invariant formulation of gravitational radiation theory," *Phys. Rev.* 105 (1957), 1089-1099 DOI: 10.1103/PhysRev.105.1089

Pomiędzy 1955 a 1957 rokiem Trautman prowadził samodzielne, niezależne badania nad falami grawitacyjnymi. Również w jego przypadku punktem wyjścia były fizyczne analogie między falami elektromagnetycznymi (które Trautman, dzięki swoim studiom politechnicznym, znakomicie znał) i falami grawitacyjnymi. W przeciwieństwie do Piraniego, Trautman koncentrował się na asymptotycznej postaci pól, daleko od źródeł. Zachowanie fali elektromagnetycznej daleko od źródła charakteryzowane jest tzw. warunkami Sommerfelda, które głoszą, że w przypadku promieniowania elektromagnetycznego, i potencjał pola i jego natężenie daleko od źródła zmniejszają się jak odwrotność odległości $1/r$ (w przeciwieństwie do znacznie szybciej zanikającego, jak $1/r^2$, pola Coulombowskiego pochodzącego od statycznego rozkładu ładunków). Trautman założył, że podobnie rzecz się ma z falami grawitacyjnymi, i założył to pozwoliło mu na dokonanie przełomu: badania Trautmana nie tylko odpowiadały na pytanie, co to znaczy, że czasoprzestrzeń (grawitacja to przecież czasoprzestrzeń!) promieniuje, ale też pozwoliły na precyzyjne rozwiązanie zagadki wypromieniowywanej energii. Trautman pokazał jak poprawnie zdefiniować energię niesioną przez falę grawitacyjną i jak powiązać zmianę masy/energii źródła z energią niesioną przez wypromieniowywaną przez nie falę grawitacyjną.

Wyniki Trautmana opublikowane zostały w dopiero co stworzonym przez Infelda periodyku *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences*, zupełnie na Zachodzie nieznanym. O ile więc Trautman doskonale znał najnowsze wyniki Piraniego, dla tego drugiego poznany w czasie wizyty w Warszawie dorobek Trautmana musiał być niemałym zaskoczeniem. Pirani zaprosił Trautmana do wygłoszenia cyklu wykładów w Londynie dla członków grupy Bondiego. Wykłady te, w których Trautman zarysował kompletną koncepcję fal grawitacyjnych, wygłoszone w wiosną 1958 natychmiast stały się sensacją w środowisku i nadały Trautmanowi status gwiazdy pierwszej wielkości.

W Londynie Trautman poznał swojego wieloletniego przyjaciela i współpracownika, Ivora Robinsona i we współpracy z nim parę lat później znalazł piękne, dokładne rozwiązanie próżniowych równań Einsteina, zwane rozwiązaniem Robinsona-Trautmana^[8], opisujące (w pewnym nieznaczonym uproszczeniu) fizyczną sytuację, w której źródło wypromieniowuje fale grawitacyjne, relaksując się do konfiguracji sferyczno symetrycznej, w której promieniowanie grawitacyjne zanika.

Pod koniec lat 1960. Trautman zajął się teorią Einsteina-Cartana, która uogólnia teorię Einsteina w przypadku obecności spinu, a jego wyniki stały się podstawowymi narzędziami używanymi w supergrawitacji i teorii strun. Zajmował się też matematyczną teorią wiązek włóknistych, które podobnie, dzięki jego wkładowi, stała się często używanym narzędziem w fizyce teoretycznej i matematycznej, a pod koniec swojej pracy naukowej – teorią spinorów i twistorów.

Kiedy w 1976 roku, z silnym postanowieniem zostania drugim Einsteinem, rozpocząłem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, prof. Trautman jawił mi się jak nieosiągalne bóstwo i moim największym marzeniem było, by móc z nim kiedyś współpracować. Podczas studiów

chodziłem na jego przepiękne, klarowne i eleganckie wykłady z geometrii różniczkowej (z których zapamiętałem dictum: *Aby zrozumieć teorię wiązek, wystarczy zrozumieć wiązkę S^3 nad S^2* , które przy każdej okazji cytuję moim studentom.) Trautman był niewysoki i drobny, ale posiadał nieprawdopodobną wręcz charyzmę, gdy mówił swoim cichym, spokojnym głosem, na sali nikt nie śmiał szepnąć.

Profesor Trautman był promotorem mojej pracy magisterskiej, a następnie doktoratu. Wtedy poznałem go z innej strony, jako łagodnego, miłego człowieka, z charakterystycznym nieśmiałym uśmiechem. Historia mojego doktoratu, jak się po latach zorientowałem, przypomina historię doktoratu, który Trautman pisał u Infelda. Infeld do końca życia powątpiewał w istnienie fal grawitacyjnych, co nie przeszkodziło mu we wspieraniu kariery naukowej jego doktoranta. Podobnie było u mnie. Kiedy zacząłem zajmować się doktoratem, Trautman wiele podróżował, więc spotykałem się z nim co kilka miesięcy. Przed wyjazdem zaproponował mi możliwy temat doktoratu i podał stosowne lektury, ale nie zainteresowały mnie one za bardzo, więc zająłem się czymś innym. Po powrocie powiedziałem mu, że może zaproponowałby mi coś innego, na co Trautman się zgodził i znów gdzieś wyjechał. Taka sytuacja powtórzyła się jeszcze raz czy dwa, a po kolejnym powrocie Trautmana, pokazałem mu swoje notatki dotyczące teorii supergrawitacji, którą się pasjonowałem, z prośbą o komentarz. Na co Trautman odparł, uśmiechając się ciepło: *wie pan co, ja się na tym zupełnie nie znam, ale niech pan to spíše i wyśle do jakiegoś czasopisma, to przynajmniej dostanie pan recenzje i będzie pan wiedział, na czym pan stoi*. Traf chciał, że tu Trautman się pomylił, praca została przyjęta do druku bez słowa komentarza (i stała się jedną z moich najlepiej cytowanych publikacji). Kiedy po powrocie z kolejnego długiego wyjazdu pokazałem Trautmanowi szkic mojej rozprawy doktorskiej, Trautman zaproponował, żeby jej promotorem został ktoś inny *ja się na tym zupełnie nie znam, nie zdolam panu pomóc* i przekonał prof. Marka Demańskiego, który właśnie wrócił z USA, by przeprowadził mnie przez ostatnie etapy doktoratu. Jak z wyraźną dezaprobatą wspominał Trautman, w analogicznej sytuacji Infeld, formalny promotor jego rozprawy doktorskiej nie zgodził się na scedowanie promotorstwa na rzecz prof. Plebańskiego, z którym Trautman realnie współpracował.

Po doktoracie nasze drogi się rozeszły. Ostatni raz spotkałem prof. Trautmana kilka lat temu na zebraniu Komitetu Fizyki PAN. Przywitałem się, był jak zwykle ciepły i miły, ale odniosłem wrażenie, że mnie nie za dobrze pamiętał. Mój kolega, a jego ukochany wychowanek, prof. Paweł Nurowski opowiadał mi od czasu do czasu o jego coraz poważniejszych kłopotach ze zdrowiem, o tym, że wymaga opieki, że nie wychodzi już z domu... Zawsze przy tej okazji przypominało mi się, jak prawie czterdzieści kilka lat temu, wchodzę na pierwsze piętro budynku na Hożej, przechodzę przez sekretariat, pukam do drzwi jego gabinetu i słyszę ciche: *Proszę!*



Wykład Andrzeja Trautmana „Fale grawitacyjne – historia i pierwsza detekcja” w ramach cyklu „Zapytaj Fizyka” na Wydziale Fizyki UW, 2016 r.

8 I. Robinson and A. Trautman, "Spherical Gravitational Waves," *Phys. Rev. Lett.* 4 (1960), 431-432 DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.431

I. Robinson and A. Trautman, "Some spherical gravitational waves in general relativity," *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 265 (1962), 463-473 DOI: 10.1098/rspa.1962.0036



ADAM GADOMSKI
(POLITECHNIKA BYDGOSKA)

TADEUSZ JACKOWICZ KORCZYŃSKI (1960–2026)

TADEK, FIZYK, JAKIEGO MAM W MOJEJ PAMIĘCI

Gdy, chyba jeszcze przed rozpoczęciem Stanu Wojennego 1981 r., zwróciłem przypadkowo uwagę na usiłującego zachować równowagę, schodząc po schodach z delikatesów przy ul. Strzody (wówczas) w Gliwicach, przypuściłem, że mój kolega z roku, Tadek Korczyński (1960–2026), zawsze aktywny i pełen inicjatywy student fizyki technicznej Politechniki Śląskiej w Gliwicach, nieco przeholował na jakiejś akademikowej imprezie. Nic bardziej mylnego – nie wiedziałem wówczas, że są to początki nieuleczalnej choroby, z którą wraz z rodziną borykał się przynajmniej przez ok. czterdzieści pięć lat, aż do dnia dzisiejszego. Udźwignęli to jednak razem: On, jego wspañiała żona Grażyna, również koleżanka z roku (świetna studentka!) oraz ich zawsze pomocny i zaangażowany w sprawy syn Radosław z rodziną.

Choroba, rozpoznana niemal pół wieku temu, rozwijała się powoli, lecz nieubłaganie. Tadek jednak – dzięki własnej determinacji, wsparciu rodziny oraz zaangażowaniu przyjaciół, wśród nich niestrudzonego śląskiego barda i oddanego pomocnika Sylwka Szwedę wraz z rodziną – przez długi czas funkcjonował możliwie pełnie w życiu publicznym i zawodowym. Był obecny, rozpoznawalny i zaangażowany. Z czasem choroba wymuszała jednak coraz większe ograniczenia. Tym boleśniej-sze pozostaje poczucie, jak wiele mógłby jeszcze zrobić, osiągnąć i stworzyć, gdyby zachował pełnię sił, zdrowia i twórczej energii.

Niemniej jednak, i tak wiele zdziałał w swoim niezadługim przecieź życiu. Tadek sporo pisał, uprawiał też sztuki plastyczne, w tym ciekawie rozwinięty samodzielnie rodzaj twórczego puentylizmu, proponując w wielu formach wyrazu artystycznego taki puentylistyczny „plamkowy” neo-neoimpresjonizm w wydaniu oryginalnym, bo własnym.

W pamięci mojej ciągle tkwią pewne początki naszej wspólnej drogi – Tadek był członkiem uczelnianego komitetu strajkowego w stanie wojennym 1981 (ja byłem członkiem strajkowego komitetu wydziałowego). O ile mnie pamięć nie zawodzi, wiosną 1982 r. Tadek został zwolniony z jednego ze swoich miejsc internowania, a miał ich trzy – jak głoszą odpowiednie źródła: Strzelce Opolskie, Uherce, Zabrze (Zaborze)

– aby uczestniczyć w pogrzebie dwojga swoich rodziców, Jarosława oraz Edeltraudy. Ja wówczas, za formalną zgodą dziekana naszego wydziału prowadziłem na ten pogrzeb delegację studentów Mat-Fizu Politechniki Śląskiej. Tadek musiał przeżyć wcześniej pogrzeb obojga swoich rodziców, którzy w krótkich odstępach czasu odeszli, pozostawiając Tadek oraz rodzeństwo w nieutulonym smutku i żałobie. Wszystko to działo się w okresie stanu wojennego, który rozpoczął się 13 grudnia 1981 r., a który wywarł silne piętno na naszej wspólnej drodze życiowej.

Jednak w przypadku Tadek oraz jego rodziny to swoiste piętno odzwierciedliło się w sposób twórczy i pozytywny na ich życiu. Np. Grażyna przez wiele lat, z wieloma sukcesami kształciła i przygotowywała do pracy zawodowej przyszłych fizyków, laureatów olimpiad przedmiotowych, w tym mojego chrześniaka, obecnie profesora w gliwickiej placówce naukowej Polskiej Akademii Nauk. Tadek, z kolei, rozwijał się, uczestnicząc w wielu głównie krajowych wernisażach i spotkaniach artystycznych – miałem również okazję gościć go wraz z rodziną oraz przyjaciółmi w miejscu mojego aktualnego zamieszkania (spotkanie odbyło się w miejscowym muzeum), gdzie jego prace wywarły duży wpływ na odbiorców jego dzieł. Itd., itp., jak głoszą słowa piosenki autorstwa Agnieszki Osieckiej...

Co chyba najciekawsze, a powinno się znaleźć w krótkim podsumowaniu, to fakt, iż „gość”, który w Decyzji III/81 o jego internowaniu mógł „doświadczyć stwierdzenia”, że jego pozostawanie na wolności zagrażałoby porządkowi Państwa i porządkowi publicznemu, bo był inicjatorem oraz inspiratorem działań godzących w prawidłowe funkcjonowanie systemu władzy... okazało się autentyczną „wywrotową” prawdą, przekutą na jego i rodziny wartościowe, i wypełnione głęboką treścią, twórcze oraz pełne zaangażowania życie.

Doświadczałem tego na tzw. własnej skórze nieprzerwanie praktycznie przez owe bez mała pięćdziesiąt już lat będąc współuczestnikiem jego ambitnej i nacechowanej twórczym niepokojem drogi życiowej, niemożliwej do zrealizowania bez pomocy i współdziałania jego rodziny oraz oddanego grona przyjaciół.

A black and white portrait of Karol Heinz Jankowski, an older man with glasses, wearing a suit and tie, looking slightly to the right. The background is blurred, showing other people in a social setting.

IRENEUSZ GRABOWSKI, JACEK KARWOWSKI

(UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA W TORUNIU)

KAROL HEINZ JANKOWSKI (1937 – 2025)

W listopadzie 2025 roku pożegnaliśmy Profesora Karola Jankowskiego – wybitnego fizyka teoretyka i chemika kwantowego, uczonego, nauczyciela i organizatora życia naukowego, którego działalność na trwałe wpisała się w historię polskiej chemii kwantowej.

Karol Jankowski urodził się 30 listopada 1937 roku w Olsztynie. Po ukończeniu szkoły podstawowej pracował przez kilka lat jako magazynier, jednocześnie uczęszczając do liceum dla pracujących. Okres ten, jak sam wielokrotnie podkreślał, ukształtował jego stosunek do pracy i ludzi, których cenił za rzetelność, kompetencję i oddanie wykonywanym obowiązkom. Podjął studia na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, gdzie w 1962 roku ukończył fizykę a rok później matematykę. Z UMK w Toruniu związany był przez całe życie zawodowe. Stopień doktora uzyskał w 1966 roku pod kierunkiem prof. Aleksandra Jabłońskiego, a habilitację – w 1971 roku. Pracę rozpoczął w Katedrze Fizyki Doświadczalnej, by następnie związać się z Zakładem Fizyki Chemicznej, gdzie w roku 1982 został profesorem nadzwyczajnym, a następnie w 1990 roku profesorem zwyczajnym. Odbýwał też staże naukowe w wielu ośrodkach zagranicznych, m.in. w Niemczech, Kanadzie i Stanach Zjednoczonych, gdzie współpracował z czołowymi naukowcami na całym świecie.

Jak wspomina Jacek Karwowski: *W 1963 roku zaczęła z udziałem prof. Karola Jankowskiego formować się nieformalna grupa chemii kwantowej. Te seminaria, poznawanie całkowicie nowej dla nas dziedziny wiedzy oraz bogate życie towarzyskie stanowiły jeden z najszczęśliwszych okresów mojego życia zawodowego. Razem odkrywaliśmy nowy świat nauki: wyjazdy zagraniczne na staże i konferencje oraz współpracę z uczonymi, których wcześniej znaliśmy jedynie z publikacji.*

Początkowo grupa zajmowała się półempirycznymi metodami chemii kwantowej – dziedziną, do której Karol Jankowski podchodził z pewnym dystansem. Dzięki wykształceniu matematycznemu naturalnie skłaniał się ku formalizmowi teorii wielu ciał, a szczególnie precyzyjnym metodom badania korelacji elektronowej, co pozostało na zawsze centralnym tematem jego pracy naukowej.

Okolo 1974 roku mieliśmy już silne kontakty z wybitnymi badaczami w Europie Zachodniej i Ameryce Północnej. Dzięki temu, w latach 1976-1989, Karol Jankowski zorganizował sześć Szkół Chemii Kwantowej w ośrodku wypoczynkowym UMK w Bachotku, na Pojezierzu Brodnickim. Wykładowcami byli uczeni z całego świata, a uczestnikami doktoranci i młodzi badacze z krajów bloku wschodniego. Inicjatywa ta odniosła ogromny sukces. W kolejnych edycjach uczestniczyło około 130 osób. Wśród uczestników znaleźli się późniejsi liderzy nauki i życia publicznego: Angela Merkel - kanclerz Niemiec, Joachim Sauer - profesor Uniwersytetu Humboldta w Berlinie, Rudolf Zachradnik - Prezes Czeskiej Akademii Nauk, Zenonas Rudzikas - Prezes Litewskiej Akademii Nauk.

Badania prof. Karola Jankowskiego wniosły fundamentalny wkład do chemii kwantowej, zwłaszcza w obszarze teorii układów wieloelektronowych. Jego prace przyczyniły się do rozwoju teorii sprzężonych klastrow, metod perturbacyjnych dla stanów quasi-zdegenerowanych oraz opracowania podstaw nowej klasy baz do obliczeń chemii kwantowej – znanych dziś na całym świecie jako bazy korelacyjnie zgodne typu Dunninga. Był też współtwórcą modelowych układów H4 i H8, które dzięki swojej prostocie wykorzystywane były w chemii kwantowej do testowania jedno i wieloreferencyjnych metod kwantowo-chemicznych.

Profesor Jankowski nie obawiał się podejmować trudnych ani niekonwencjonalnych problemów i prowadził swoich studentów, doktorantów oraz współpracowników ku nowym kierunkom badań. Pomimo swoich osiągnięć pozostał człowiekiem skromnym, stroniącym od rozgłosu. Był osobą zasadniczą i głęboko przywiązaną do swojego systemu wartości. Zapamiętamy Profesora Karola Jankowskiego jako znakomitego uczonego, wymagającego, lecz inspirującego mentora i kierownika, surowego recenzenta, a równocześnie utalentowanego gawędziarza i często duszę towarzystwa. Jego odejście pozostawia głęboką pustkę w naszej społeczności akademickiej oraz w życiu wszystkich, którzy mieli zaszczyt z nim współpracować.



RECENZJA POSTĘPÓW FIZYKI:

SŁOWNIK BIOGRAFICZNY FIZYKÓW POLSKICH

POD RED. NAUK. ANDRZEJA K. WRÓBLEWSKIEGO

Słownik biograficzny fizyków polskich powstał w ramach projektu

badawczego Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki, który po kilkuletnich staraniach został przyznany w 2018 roku Polskiej Akademii Umiejętności przez ówczesne Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Cały projekt objął siedem słowników biograficznych uczonych polskich działających w zakresie astronomii, chemii, fizyki, geologii, matematyki, botaniki i pedagogiki. Wszystkie zostały wydane przez Polską Akademię Umiejętności.

Redaktorem naukowym *Słownika biograficznego fizyków polskich* (PAU, 2024), a także pomysłodawcą całego projektu wydania tej serii, jest Andrzej Kajetan Wróblewski, którego czytelnikom *Postępów Fizyki* nie trzeba szczegółowo przedstawiać. Profesor Wróblewski ma bardzo bogaty dorobek naukowy, dydaktyczny i popularyzatorski, a zarazem od lat z wielkim zapałem przybliża dzieje fizyki. Jego monumentalne dzieła: *Historia fizyki* (PWN 2006) oraz *Historia fizyki w Polsce* (PWN 2020), na trwałe weszły do kanonu książek, po które każdy fizyk z przyjemnością sięga.

Przy redagowaniu *Słownika* przyjęto zasadę, że zawarte w nim biogramy będą dotyczyć osób, które już nie żyją. Większość biogramów – 980 – opatrzonych jest czarno-białymi fotografiami fizyków lub przedrukami ich portretów. Ze względu na termin zakończenia projektu uznano, że datą zamykającą możliwość zamieszczenia biogramu ma być 31 grudnia 2022 roku. Ograniczenia dolnego oczywiście nie było. Najstarszy biogram dotyczy Witelona, czyli Witela, uznawanego za pierwszego powszechnie znanego uczonego z ziem polskich, zmarłego w drugiej połowie XIII wieku.

Słownik liczy 1617 biogramów autorstwa 58 osób. Z tego 26 autorów opracowało tylko po jednym biogramie, a jedynie 17 autorów napisało 10 lub więcej biogramów. Oprócz redakcji naukowej całego tomu Andrzej K. Wróblewski jest też autorem licznych haseł. Opracował ich najwięcej, bo aż 678. Dużo biogramów napisali również prof. Adam Kiejna z UW – 152 oraz prof. Józef Szudy z UMK – 120.

Nie zawsze mamy w *Słowniku* do czynienia z ludźmi nauki, którzy byli tylko i wyłącznie fizykami. Dotyczy to zwłaszcza dalszej przeszłości, kiedy granice między naukami nie były zbyt sztywne, oraz takich postaci jak Jan Czochralski, którego osiągnięcia są silnie związane z fizyką, mimo że sam był chemikiem i metaloznawcą.

Dwie cechy charakterystyczne *Słownika* szczególnie odróżniają go od innych pozycji biograficzno-encyklopedycznych, z którymi możemy mieć do czynienia, poszukując życiorysów w książkach lub w Internecie.

Po pierwsze, w *Słowniku* znajdziemy biogramy nie tylko luminarzy, którzy wnieśli znaczny wkład w rozwój fizyki lub byli wybitnymi organizatorami badań naukowych, ale także tych, którzy poprzez swoją codzienną, systematyczną pracę dawali często anonimowy wkład w rozwój fizyki w Polsce. Osoby te były autorami zapomnianych już nieraz publikacji, książek lub podręczników, prowadziły wykłady i kształciły

uczniów oraz studentów — zarówno na poziomie wyższym, jak i średnim, jeśli mowa o wyróżniających się nauczycielach. Biogramów tych fizyków nie znajdziemy ani w dostępnych leksykonach, ani w Wikipedii. Wysiłek włożony w to, aby uratować pamięć o tych ludziach, ten swoisty gest *in memoriam*, to piękna i unikalna cecha *Słownika*.

Druga cecha odróżniająca *Słownik* od wielu innych opracowań biograficznych to styl przedstawiania biogramów: literacki, niesformalizowany, pozbawiony zbędnej sprawozdawczości oraz irytujących skrótów, z akcentem położonym na sprawy istotne. Biogramy odwołują się do solidnych źródeł, ale nie stronią od wątków lżejszych i czyta się je z dużą przyjemnością.

Słownik powstał w wyniku kwerendy przeprowadzonej w poszczególnych ośrodkach fizyki, a w odniesieniu do czasów dawniejszych – w wyniku systematycznego przeglądu istniejących źródeł, takich jak składy osobowe wyższych uczelni oraz instytutów badawczych. Cenne okazały się spisy bibliograficzne wydawane przez Kasę im. Mianowskiego, Akademię Umiejętności i Polską Akademię Umiejętności oraz *Bibliografia polska* Estreichera i *Bibliografia polska 1901–1939* wydawana obecnie przez Bibliotekę Narodową. Przejrzano również listy członków PTF i innych towarzystw naukowych oraz programy Zjazdów Fizyków Polskich. Wykorzystano rozproszoną literaturę przedmiotu, obejmującą publikacje jubileuszowe, wspomnieniowe i pamiątkarskie. Korzystano przy tym także z bazy *Google Scholar*, która uwzględniła cytowania w książkach.

Kwerendy archiwalne napotkały nieprzewidziane trudności spowodowane epidemią COVID-19. Wprowadzony 10 marca 2020 roku *lockdown* spowodował zamknięcie instytucji naukowych, uniwersytetów, bibliotek i archiwów, utrzymane z niewielkimi zmianami do połowy 2021 roku. Brak możliwości prowadzenia kwerend był wielkim utrudnieniem w zbieraniu danych. Drugą niesprzyjającą okolicznością, która znacznie ograniczyła dostęp do materiałów archiwalnych, były przepisy ustawy o narodowym zasobie archiwalnym z 1983 roku, a w szczególności ich nowelizacja z 2018 roku. Rygorystyczne stosowanie tych przepisów uniemożliwiłoby wszelką pracę nad *Słownikiem* obejmującym postacie z XX wieku. Jak napisał prof. Wróblewski we wstępie, niektóre dyrekcje archiwów, szczególnie uczelnianych z mniejszych ośrodków, skorzystały z tej możliwości, zamykając swoje zasoby. Uwzględniając wspomniane kłopoty, należy przyjąć, że liczba biogramów mogłaby być jeszcze większa.

Słownik pod redakcją Andrzeja Kajetana Wróblewskiego to jakby inna, wrywkowa wersja jego *Historii fizyki w Polsce*, widziana tym razem przez pryzmat biogramów fizyków różnych pokoleń. Ich alfabetycznie rozrzucone fotografie tworzą swoiste *tableau*, rodzaj mozaiki układającej się — mimo wszystko — w nieprzypadkowy obraz. Moim zdaniem wszyscy, którzy interesują się korzeniami fizyki w Polsce, powinni mieć to dzieło na swoich półkach z książkami.

/oprac. Jerzy E. Garbarczyk/



KRONIKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

MARZEC – MAJ 2026

WARSZAWA: Nowi profesorowie fizyki

Decyzją Prezydenta RP z 7 kwietnia 2026 r. grono polskich profesorów fizyki powiększyło się o dziewięciu naukowców. Wśród nominowanych znaleźli się badacze związani z różnymi obszarami współczesnej fizyki: od fizyki powierzchni i nanostruktur, przez fizykę kwantową, układy złożone, magnetyzm i fizykę jądrową, po fizykę biomedyczną i metody obliczeniowe.

Prof. dr hab. **Grażyna Antczak** jest fizyczką związaną z Uniwersytetem Wrocławskim. Jej praca naukowa koncentruje się wokół zjawisk zachodzących na powierzchniach ciał stałych, zwłaszcza w skali atomowej i nanometrowej. Reprezentuje ten nurt fizyki, w którym precyzyjny opis procesów powierzchniowych staje się podstawą rozumienia własności materiałów i struktur nanoskalowych.



prof. Grażyna Antczak

Prof. dr hab. **Paweł Błasiak** z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN jest fizykiem teoretykiem, którego zainteresowania obejmują podstawy mechaniki kwantowej oraz opis układów kwantowych. W swojej pracy łączy formalną stronę fizyki z pytaniami o naturę splątania, nielokalności i informacji kwantowej, a więc zagadnieniami istotnymi zarówno dla fundamentów teorii, jak i dla nowych technologii kwantowych.

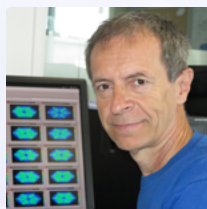


prof. Agata Fronczak

Prof. dr hab. inż. **Agata Fronczak** z Politechniki Warszawskiej reprezentuje fizykę układów złożonych i fizykę statystyczną. Jej działalność pokazuje, jak narzędzia fizyki mogą być używane do opisu nie tylko klasycznych układów materialnych, ale także sieci, struktur społecznych, ekonomicznych i informacyjnych. To przykład badaczki pracującej na styku fizyki, matematycznego modelowania i problemów interdyscyplinarnych.

Prof. dr hab. **Ryszard Gieniusz** z Uniwersytetu w Białymstoku jest fizykiem doświadczalnym zajmującym się magnetyzmem i dynamiką układów magnetycznych. Jego praca wiąże się z badaniami materiałów magnetycznych, fal spinowych i metod spektroskopowych. Reprezentuje nurt fizyki, w którym zaawansowany eksperyment laboratoryjny pozwala śledzić subtelne procesy odpowiedzialne za własności nowoczesnych materiałów.

Prof. dr hab. **Bartłomiej Graczykowski** z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu prowadzi badania na pograniczu fizyki materiałów, nanofizyki i biofizyki. Interesują go zjawiska mechaniczne i cieplne w strukturach o bardzo małych rozmiarach, gdzie klasyczne intuicje często ustępują miejsca efektom skali. Jego profil dobrze ilustruje współczesną fizykę materii miękkiej i nanostruktur, bliską zastosowaniom biologicznym i materiałowym.



prof. Jerzy Grębosz

Prof. dr hab. **Jerzy Leszek Grębosz** z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN jest fizykiem jądrowym, ale także osobą szeroko rozpoznawalną dzięki działalności informatycznej i popularyzatorskiej. Łączy kompetencje badacza z umiejętnością tworzenia narzędzi, opisywania metod i przekazywania wiedzy szerszemu gronu odbiorców. Jest przykładem naukowca, którego aktywność wykracza poza wąsko rozumianą specjalizację badawczą.

Prof. dr hab. **Maria Jolanta Przybylska** z Uniwersytetu Zielonogórskiego jest fizyczką teoretyczną zajmującą się matematycznymi podstawami dynamiki układów fizycznych. Jej praca sytuuje się blisko granicy fizyki i matematyki, tam gdzie pytania o ruch, symetrie, całkowalność i niecałkowalność układów wymagają ścisłego aparatu analitycznego. Reprezentuje tradycję fizyki teoretycznej, w której precyzja matematyczna jest podstawowym narzędziem poznania.

Prof. dr hab. **Piotr Suffczyński** z Uniwersytetu Warszawskiego jest fizykiem biomedycznym, którego zainteresowania obejmują modelowanie procesów neuronalnych i analizę sygnałów mózgowych. Jego działalność pokazuje, jak metody fizyki mogą być stosowane w badaniach nad organizmem człowieka, szczególnie nad funkcjonowaniem mózgu i mechanizmami zaburzeń neurologicznych. To przykład fizyki silnie otwartej na medycynę i neuronaukę.



prof. Piotr Suffczyński

Z kolei tytuł profesora w dyscyplinach nauki chemiczne i nauki fizyczne otrzymała prof. dr hab. **Dominika Kamila Zgid**. Jest ona badaczką związaną z Uniwersytetem Warszawskim, pracującą na pograniczu chemii kwantowej, fizyki materii skondensowanej i metod obliczeniowych. Jej profil dobrze pokazuje, jak coraz częściej granice między dyscyplinami stają się umowne, zwłaszcza tam, gdzie wspólnym językiem badań jest mechanika kwantowa i obliczeniowy opis struktury elektronowej materii.

Wszystkim nowym profesorom serdecznie gratulujemy!

POLSKA: Uczniowie zdawali egzaminy na koniec szkoły

Jak co roku, maj przyniósł ciekawy obraz obecności fizyki w szkolnych egzaminach. Nie tylko tam, gdzie należało się jej spodziewać, czyli na maturze rozszerzonej z fizyki, ale także w arkuszu egzaminu ósmoklasisty z języka polskiego. W arkuszu CKE dla ósmoklasistów pojawiły się dwa teksty wyraźnie związane z nauką, techniką i wyobraźnią: fragment *Przyjaciela Automateusza* Stanisława Lema oraz tekst Stephena Hawkinga *Czy możemy kształtować naszą przyszłość?* Egzamin z języka polskiego odbył się 11 maja 2026 r.



Lem wprowadził uczniów w świat robotów, miniaturyzacji i „elektrycznego przyjaciela”, czyli literackiej zabawy z techniką, sztuczną inteligencją i automatyzacją. Zadania nie sprawdzały oczywiście wiedzy z fizyki ani informatyki, lecz rozumienie tekstu, funkcję narratora, perswazję, interpunkcję i składnię. Jednak sam wybór tekstu sprawił, że technika stała się pełnoprawnym elementem kultury. Uczeń musiał wczuć się w opowieść o wynalazku oraz wykazać się zrozumieniem dla fascynacji osiągnięciami nauki.

Jeszcze bardziej bezpośrednio nauka wybrzmiała w tekście Hawkinga. Brytyjski fizyk pisał o Einsteinie, wyobraźni, akceleratorach cząstek, superkomputerach, teleskopach kosmicznych i kosmologii. W przypisach CKE wyjaśniła uczniom, kim byli Stephen Hawking i Albert Einstein oraz czym jest akcelerator cząstek. Zadania dotyczyły między innymi roli wyobraźni w nauce, znaczenia przyszłych odkryć i postawy badawczej. To ważny sygnał: fizyk pojawił się w arkuszu jako autor refleksji o świecie, ciekawości i odpowiedzialności za przyszłość.

Na egzaminie z matematyki, przeprowadzonym 12 maja 2026 r., obecność fizyki była znacznie słabsza. Nie było w nim zadań jawnie fizycznych, choć pojawiały się sytuacje bliskie myśleniu fizycznemu: odczytywanie danych z diagramu, geometria przestrzenna, obliczanie odległości w linii prostej na mapie czy analiza brył złożonych z sześciątów. Była więc matematyka, która w fizyce jest codziennym narzędziem, ale bez fizycznego kontekstu zjawisk. Paradoksalnie jednak to humanistyczna część egzaminu mocniej przypominała uczniom, że fizyka i nauka jest istotną częścią ich życia.

Inaczej wyglądała matura rozszerzona z fizyki, przeprowadzona 19 maja 2026 r. Już pierwsze zadanie wprowadzało klasyczny model ruchu pionowego w jednorodnym polu grawitacyjnym, z analizą wykresu wysokości od czasu. Dalej pojawiły się ruch po okręgu w płaszczyźnie pionowej, siły napięcia nici, bloczek o niepomijalnym momencie bezwładności, fale ultradźwiękowe, dyfrakcja i załamanie fal, ruch planetoidy po orbicie eliptycznej, przemiana gazu doskonałego, układ ładunków punktowych, optyka geometryczna szklanej kuli, ruch elektronu w polu magnetycznym oraz rozpad beta i czas połowicznego rozpadu neonu-23.

Różnice w arkuszu wobec poprzedniego roku polegały bardziej na przesunięciu akcentów niż na zmianie filozofii egzaminu. Arkusz 2026 był wyraźnie „modelowy”: często wymagał przyjęcia założeń, pracy z wykresem, konstrukcji geometrycznej, wskazania kierunku wektora, wyprowadzenia zależności symbolicznej albo użycia interpretacji jakościowej przed obliczeniem. Było mniej efektownych kontekstów codziennych, więcej czystej fizyki szkolnej w dobrze

kontrolowanych warunkach. Nie był to arkusz pamięciowy. Sprawdzał, czy uczeń rozumie, co oznacza model zjawiska, kiedy można pominąć opory, gdzie działa siła, jak zmienia się długość fali, czym różni się prędkość od przyspieszenia i jak z wykresu wydobyc wielkość fizyczną.

Wspólny obraz tych egzaminów jest ciekawy. W szkole podstawowej fizyka pojawiła się przede wszystkim jako opowieść o ciekawości, wynalazkach, kosmosie i wyobraźni. Na maturze wróciła już jako dyscyplina ścisła: wymagająca rachunku, wektorów, wykresów i konsekwentnego modelowania. Między Lemem, Hawkingiem i arkuszem maturalnym widać więc pełną drogę edukacyjną: od pytania „jak działa świat?” do próby udzielenia odpowiedzi językiem fizyki i matematyki.

WARSZAWA: Jubileuszowa 75. Olimpiada Fizyczna

W kwietniu 2026 r. zakończyła się jubileuszowa, 75. Olimpiada Fizyczna. Finał zawodów odbył się w dniach 11–14 kwietnia w Warszawie, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Wzięło w nim udział 83 uczniów szkół średnich z całej Polski, wyłonionych w kolejnych etapach konkursu. Komitet Główny Olimpiady Fizycznej przyznał 32 osobom tytuł laureata, pozostali uczestnicy finału uzyskali tytuł finalisty.

Zawody finałowe miały tradycyjny przebieg. Pierwszego dnia uczestnicy rozwiązywali zadanie doświadczalne, drugiego dnia — trzy zadania rachunkowe. Kolejny dzień poświęcono wykładom dotyczącym współczesnych problemów fizyki oraz omówieniu rozwiązań zadań olimpijskich. Program finału obejmował także wizytę w Muzeum Powstania Warszawskiego, zwiedzanie laboratoriów Wydziału Fizyki UW oraz mniej formalne aktywności integracyjne.

Tegoroczne zadanie doświadczalne polegało na wyznaczeniu kąta przylegania małych kropli oleju do szkła. Uczestnicy korzystali m.in. z soczewki płasko-wypukłej, latarki oraz oleju rozpylanego na płaskiej powierzchni soczewki. Oświetlenie układu od strony powierzchni wypukłej pozwalało obserwować krople pod niewielkimi kątami. Zadanie wymagało powiązania granicznego kąta obserwacji kropli z kątem przylegania. Jak podkreślono w relacji Komitetu Głównego, zadanie okazało się trudne, ale dobrze różnicowało uczestników.

Zadania teoretyczne obejmowały kilka działów fizyki. Pierwsze dotyczyło niesprężystego, niecentralnego zderzenia małej kulki z dużą kulą spoczywającą na płaskiej powierzchni. Drugie przenosiło uczestników w obszar hydrostatyki i grawitacji na wymagowanej planecie; należało w nim m.in. określić pracę potrzebną do wyciągnięcia sondy z oceanu oraz wyznaczyć masę planety. Trzecie zadanie dotyczyło oddziaływania przewodów, przez które płynęły prądy przemienne o różnych fazach. Pełne teksty zadań i ich rozwiązania udostępniono na stronie Olimpiady Fizycznej.

Uroczystość zakończenia odbyła się 14 kwietnia w Auli Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Dyplomy oraz nagrody rzeczowe i pieniężne wręczyli: Paulina Piechana-Więckiewicz, wiceminister edukacji narodowej, prof. Sambor Grucza, prorektor Uniwersytetu Warszawskiego, Michał Stachyra, członek Zarządu Fundacji Orlen, oraz prof. Andrzej Wysmołek, przewodniczący Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej.

Pierwsze miejsce w 75. Olimpiadzie Fizycznej zajął Borys Wawrzynów z IV Liceum Ogólnokształcącego z Oddziałami Dwujęzycznymi im. S. Staszica w Sosnowcu, przygotowywany



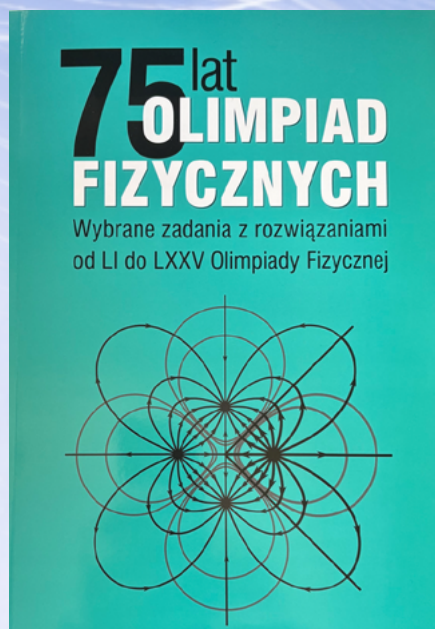
Borys Wawrzynów,
zwycięzca 75. OF

przez Dorotę Marynowską. Drugie miejsce zdobył Dawid Chudzik z XIV Liceum Ogólnokształcącego im. Stanisława Staszica w Warszawie, którego nauczycielem był Leszek Gładczuk. Trzecie miejsce przypadło Mikołajowi Litwinowi z III Liceum Ogólnokształcącego im. Unii Lubelskiej w Lublinie, przygotowywanemu przez Reginę Zawszę-Winiarczyk, Piotra Kononowicza i Waldemara Bereja.

W pierwszej dziesiątce znaleźli się także: Sebastian Bednarek z XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie, Bolko Wieleba z XXI LO im. św. Stanisława Kostki w Lublinie, Jakub Deroń z II LO im. Księżnej Anny z Sapiehów Jabłonowskiej w Białymstoku, Jan Dąbrowski z XIII LO w Szczecinie, Jan Nasieniewski z Uniwersyteckiego LO w Toruniu, Jakub Kamiński z V LO im. Adama Asnyka w Szczecinie oraz Adam Ben Saad z I LO z Oddziałami Dwujęzycznymi im. Mikołaja Kopernika w Krośnie. Laureaci pierwszych dziesięciu miejsc będą reprezentować Polskę w zawodach międzynarodowych: pięciu w Międzynarodowej Olimpiadzie Fizycznej w Bucaramandze w Kolumbii, a pięciu w Europejskiej Olimpiadzie Fizycznej w Göteborgu w Szwecji.

Jubileuszowa edycja miała również dodatkowy wymiar organizacyjny i edukacyjny. Dzięki darowiźnie Fundacji Orlen możliwe było ufundowanie nagród dla nauczycieli, których uczniowie zakwalifikowali się do części doświadczalnej drugiego etapu Olimpiady, a nauczyciele laureatów otrzymali dodatkowe wyróżnienia. Uczestnicy finału otrzymali także zestawy zadania doświadczalnego wykonywanego podczas zawodów. Po raz pierwszy zorganizowano również warsztaty dla nauczycieli, poświęcone przygotowywaniu uczniów do Olimpiady oraz wybranym zadaniom doświadczalnym z poprzednich edycji.

Z okazji 75-lecia Komitet Główny wydał książkę „75 lat Olimpiad Fizycznych”, zawierającą wybrane zadania z rozwiązaniami z ostatnich 25 lat. Uruchomiono także internetową wyszukiwarkę zadań obejmującą wszystkie zadania ze wszystkich edycji Olimpiady Fizycznej oraz bazę laureatów. Jubileusz stał się więc nie tylko okazją do podsumowania kolejnej edycji zawodów, lecz także do przypomnienia znaczenia Olimpiady jako jednej z najważniejszych dróg rozwijania talentów fizycznych w Polsce.



WARSZAWA: Prof. Agnieszka Zalewska Polką XXI wieku

Podczas jubileuszowej gali Konkursu Polka XXI wieku, która odbyła się 6 marca 2026 r. w Reducie Banku Polskiego w Warszawie, wręczono Nagrody Specjalne, przyznawane kobietom o szczególnym dorobku, autorytecie i wpływie na życie publiczne, naukę oraz kulturę. W gronie laureatek znalazła się prof. Agnieszka Zalewska z Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN w Krakowie.

Wyróżnienie to trafiło do uczoney, która od wielu lat należy do grona najwybitniejszych polskich badaczek zajmujących się fizyką wysokich energii. Prof. Zalewska jest związana z najważniejszymi przedsięwzięciami współczesnej fizyki cząstek i od dekad współpracuje z CERN, uczestnicząc w projektach o fundamentalnym znaczeniu dla poznania budowy materii i praw rządzących mikroświatem. Jej działalność naukowa, organizacyjna i międzynarodowa przyczyniła się do umocnienia pozycji polskiej fizyki w światowym obiegu badań.

Szczególnym potwierdzeniem uznania, jakim cieszy się w międzynarodowym środowisku naukowym, było powierzenie jej funkcji przewodniczącej Rady CERN w latach 2013–2015. Było to jedno z najważniejszych stanowisk w europejskiej nauce i zarazem wyraz zaufania do jej kompetencji, doświadczenia i wizji rozwoju badań podstawowych.

Prof. Agnieszka Zalewska jest nie tylko wybitną naukowczynią, lecz także cenioną wykładowczynią i mentorką. Przez lata wspierała rozwój kolejnych pokoleń badaczy, a swoją aktywnością konsekwentnie wzmacniała obecność polskich środowisk naukowych na arenie międzynarodowej. Nagroda Specjalna w konkursie Polka XXI wieku stanowi więc uhonorowanie zarówno jej imponującego dorobku badawczego, jak i wieloletniej służby na rzecz nauki.

Nagrodę w imieniu prof. Agnieszki Zalewskiej odebrała jej córka, dr Anna Kwiecińska.

TORUŃ: 90. urodziny prof. dr. hab. Franciszka Rozpłocha

9 kwietnia 2026 roku w Audytorium Aleksandra Jabłońskiego Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, odbyło się Nadzwyczajne Kolokwium Czwartkowe poświęcone 90. urodzinom prof. dr. hab. Franciszka Rozpłocha — byłego dziekana Wydziału, a zarazem osoby niezmiennie zaangażowanej w działalność Polskiego Towarzystwa Fizycznego.



Profesor Franciszek Rozpłoch urodził się 29 marca 1936 r. w Krostkowie. Studia fizyczne ukończył na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu pod kierunkiem prof. Kazimierza Antonowicza, pioniera badań rezonansowych i fizyki węgla w Polsce. Z UMK związana była cała jego droga naukowa — tutaj uzyskał stopień doktora, habilitację, a w 1993 roku otrzymał tytuł profesora nauk fizycznych.

W latach 1999–2002 pełnił funkcję dziekana Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Jest wybitnym specjalistą w dziedzinie fizyki ciała stałego oraz fizyki węgla. Dwukrotnie sprawował funkcję przewodniczącego Toruńskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Jest także współzałożycielem Polskiego Towarzystwa Węglowego, którego był prezesem.

W ramach uroczystego kolokwium dr hab. Paweł Szroeder, prof. UKW (Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy), wygłosił wykład poświęcony dorobkowi Profesora. Następnie zaprezentowano przegląd badań naukowych rozwijanych w obszarach bliskich zainteresowaniom Jubilata. Wykład dr hab. Anny Ilnickiej, prof. UMK (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu), nosił tytuł „90 kwiatów grafenowych na dziewięćdziesięciolecie”.

Szanownemu Jubilatowi składamy najserdeczniejsze życzenia zdrowia, pomyślności oraz satysfakcji z owoców wieloletniej pracy naukowej.

Organizatorami wydarzenia byli: Instytut Fizyki UMK oraz Toruński Oddział PTF.

WARSZAWA: Finał 30. Konkursu Fizycznego PW

14 marca 2026 roku odbył się finał jubileuszowej, trzydziestej edycji Konkursu Fizycznego Politechniki Warszawskiej – przedsięwzięcia od lat odgrywającego ważną rolę w popularyzacji fizyki wśród uczniów szkół średnich i budowaniu więzi między uczelnią a młodzieżą zainteresowaną studiami technicznymi. Tegoroczna edycja potwierdziła zarówno wysoki poziom merytoryczny konkursu, jak i rosnące zainteresowanie tą inicjatywą: do pierwszego etapu zgłosiło się rekordowa liczba ok. 500 uczestników, z których 38 zakwalifikowano do finału.

Jubileuszowy finał wyróżniał się oryginalną formułą. Zadania przygotowano wokół projektu hipotetycznej kapsuły badawczej PW ReTurnik, dzięki czemu uczestnicy mogli zmierzyć się z problemami pokazującymi praktyczny, inżynierski wymiar fizyki. Finałiści rozwiązywali cztery zadania dotyczące różnych aspektów działania kapsuły, obejmujących m.in. trajektorię ruchu, drgania rezonansowe, elektronikę oraz optyczne wspomaganie zasilania awaryjnego. Taka koncepcja wymagała nie tylko bardzo dobrego przygotowania teoretycznego, lecz także pomysłowości, kreatywnego myślenia i umiejętności łączenia zagadnień fizycznych z inżynierskimi.

Jak podkreślali sami uczestnicy, finałowa formuła pozwoliła im zetknąć się z realnymi problemami technologicznymi i pokazała, że wiedza zdobywana w szkole może być skutecznie wykorzystywana do analizy rzeczywistych wyzwań badawczych. W opinii organizatorów właśnie taki był cel jubileuszowej edycji – by jak najlepiej ukazać charakter fizyki uprawianej na co dzień na Politechnice Warszawskiej.

W finale wyłoniono czterech laureatów oraz dziewięcioro wyróżnionych finalistów. Uzyskane przez nich wyniki składają się również na konkretne korzyści rekrutacyjne, ponieważ laureaci i wyróżnieni otrzymują maksymalną liczbę punktów z fizyki podczas rekrutacji na studia na Politechnice Warszawskiej. Tym samym konkurs pełni nie tylko funkcję popularyzatorską, ale także stanowi ważny element wspierania najzdolniejszych uczniów planujących dalszą edukację w obszarze nauk ścisłych i technicznych.

Symboliczny wymiar trzydziestej edycji podkreśla fakt, że przez trzy dekady Konkurs Fizyczny PW stał się trwałym i rozpoznawalnym elementem działalności uczelni. XXX Konkurs Fizyczny Politechniki Warszawskiej został objęty patronatem honorowym Mazowieckiego Kuratora Oświaty, co dodatkowo potwierdza rangę tego wydarzenia.



KRAKÓW: Konkurs edukacyjny „Magia Żywiołów na Ziemi i w Kosmosie”

11 kwietnia 2026 roku w Auli Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego odbyła się ogólnopolska gala finałowa konkursu edukacyjnego „Magia Żywiołów na Ziemi i w Kosmosie”. To wyjątkowe wydarzenie zgromadziło utalentowanych uczniów, ich nauczycieli oraz przedstawicieli świata nauki. Młodzi pasjonaci, inspirując się jednym z czterech żywiołów – wodą, ogniem, ziemią lub powietrzem – zaprezentowali na żywo przed publicznością swoje autorskie eksperymenty. Niezwykle ważnym aspektem ich badawczych wystąpień było połączenie ziemskich zjawisk przyrodniczych z fascynującymi zagadnieniami z dziedziny astronomii i kosmologii, co doskonale wpisało się w nowoczesną ideę interdyscyplinarnej edukacji STEAM.

Prezentowane projekty były bacznie oceniane przez profesjonalne jury złożone z naukowców i edukatorów, którzy doceniali przede wszystkim poprawność merytoryczną, trafność wniosków oraz naukową kreatywność. Rangę wydarzenia podkreśliła obecność dr Bogny Halskiej-Pionki, pełnomocniczki Prezydenta Miasta Krakowa, która w swoim wystąpieniu zaznaczyła, jak ogromne znaczenie ma wspieranie młodych talentów i budowanie mostów między wczesną edukacją a środowiskiem akademickim. Zwieńczeniem

uroczystości było uhonorowanie najlepszych młodych badaczy – w poszczególnych kategoriach wiekowych najwyższe laury zdobyli odpowiednio: zespół „Żywiolowy Odkrywcą”, drużyna „AeroLab” oraz Julia i Hubert Fliszkiewicz.

Finałowa gala stała się nie tylko przestrzenią do podsumowania naukowej rywalizacji, ale przede wszystkim prawdziwym świętem młodych odkrywców. Dla wielu uczestników była to pierwsza w życiu okazja do zaprezentowania swoich dokonań w murach wyższej uczelni, co pozwoliło im poczuć prawdziwie akademicką atmosferę. Konkurs udowodnił, że nauka oparta na samodzielnym eksperymentowaniu to fascynująca przygoda, która z sukcesem rozwija krytyczne myślenie i pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy rządzące naszym światem.

Relacja z wydarzenia została również zaprezentowana w programie TVP3 „Kronika Krakowska” z dnia 11 kwietnia – materiał (od ok. 17:30 minuty) zawiera wypowiedzi organizatorów oraz uczestników konkursu.



OTWOCK-ŚWIERK: Finał XXI konkursu „Fizyczne Ścieżki”

17 kwietnia 2026 roku w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku odbył się finał XXI edycji ogólnopolskiego konkursu „Fizyczne Ścieżki”. Do instytutu posiadającego jedyny w Polsce czynny reaktor jądrowy przyjechali uczniowie z całej Polski wraz z nauczycielami, by zaprezentować swoje projekty przed jury i uczestniczyć w rozstrzygnięciu jednego z najciekawszych konkursów popularyzujących fizykę wśród młodzieży. Konkurs, współtworzony przez NCBJ i Instytut Fizyki PAN, jest organizowany od 2005 roku i skierowany do uczniów klas VII–VIII szkół podstawowych oraz szkół ponadpodstawowych. Uczestnicy rywalizują w trzech kategoriach: esej, praca naukowa oraz pokaz zjawiska fizycznego.

Tegoroczna edycja, odbywająca się pod patronatem medialnym *Postępów Fizyki*, ponownie pokazała, że „Fizyczne Ścieżki” są konkursem łączącym wysoki poziom merytoryczny z dużą swobodą twórczą. Do XXI edycji zgłoszono 102 prace, przygotowane przez 121 uczniów pod opieką 30 nauczycieli. Do finału zakwalifikowano 13 najlepszych projektów: cztery w kategorii eseju, cztery w kategorii pracy naukowej i pięć w kategorii pokazu zjawiska fizycznego. Uczestnicy reprezentowali 42 miasta, co dobrze pokazuje ogólnopolski zasięg konkursu i jego rosnącą rozpoznawalność.

W kategorii „Praca naukowa” jury przyznało dwa równorzędne pierwsze miejsca. Jedno zdobyła Zofia Makowska z XIV Liceum Ogólnokształcącego im. Stanisława Staszica w Warszawie za pracę „Rola geometrii kontaktu w rezonansie parametrycznym dwóch wahadeł na przykładzie zabawki

Riki-Tiki”. Drugie pierwsze miejsce przypadło zespołowi z Bydgoszczy: Mateuszowi Oleksińskiemu, Michałowi Talaśce i Weronice Grochalskiej za pracę „Właściwości materiałów magnetycznych – badanie oddziaływania diamagnetyka z polem w warunkach domowych”. W kategorii „Pokaz zjawiska fizycznego” zwyciężyła Antonina Siółkowska z Płocka za projekt „Detekcja mionów za pomocą tub Geigera-Müllera”. W kategorii „Esej” pierwsze miejsce zdobyła Maria Karasińska za pracę „Fizyka – zabija magię? A może jest wielkim iluzjonistą?”.

Finał miał nie tylko charakter konkursowy, ale również wyraźny wymiar edukacyjny i środowiskowy. Uczestników powitała prof. Agnieszka Pollo, zastępczyni dyrektora NCBJ ds. naukowych, a w wydarzeniu wzięli udział także przedstawiciele władz samorządowych. Organizatorzy podkreślali, że „Fizyczne Ścieżki” są miejscem, w którym młodzi ludzie mogą nie tylko zaprezentować wiedzę, lecz także rozwijać samodzielność badawczą, umiejętność prezentacji wyników i odwagę w podejmowaniu ambitnych tematów. Według relacji uczestników sam udział w finale był cennym doświadczeniem, pozwalającym zobaczyć, jak wygląda samodzielna praca nad projektem naukowym i jego publiczna prezentacja.

Znaczenie konkursu podkreśla również fakt, że „Fizyczne Ścieżki” został objęty patronatem Ministra Edukacji, a tytuł laureata wiąże się z konkretnymi korzyściami edukacyjnymi, w tym dodatkowymi atutami w procesie rekrutacji na studia. XXI finał potwierdził, że konkurs pozostaje ważnym miejscem spotkania szkolnej ciekawości z prawdziwym myśleniem naukowym: od refleksji filozoficznej nad fizyką, przez domowe eksperymenty i modele, aż po projekty nawiązujące do współczesnych metod badawczych.

WARSZAWA: Finał Turnieju Młodych Fizyków

18 kwietnia 2026 roku w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie odbył się krajowy finał Turnieju Młodych Fizyków 2026 – jednego z najbardziej wymagających konkursów drużynowych dla uczniów szkół średnich zainteresowanych fizyką. W tegorocznej rywalizacji finałowej udział wzięły cztery drużyny: Artemis, Doctus, Fenix oraz Kwazar.

Turniej Młodych Fizyków od lat wyróżnia się formułą odmienną od tradycyjnych konkursów przedmiotowych. Uczestnicy nie rozwiązują wyłącznie zamkniętych zadań rachunkowych, lecz przez wiele miesięcy prowadzą samodzielną pracę badawczą, łącząc eksperyment, teorię i analizę wyników, a następnie publicznie bronią swoich rozwiązań podczas finałowych potyczek. Krajowy finał stanowi zwieńczenie tej całorocznej pracy, a zarazem okazję do wymiany doświadczeń, metod badawczych i pomysłów między uczestnikami reprezentującymi różne ośrodki.

Zwycięzcą tegorocznego finału została drużyna Artemis z Akademickiego Liceum Ogólnokształcącego Politechniki Wrocławskiej, zdobywając 99,6 pkt. Drugie miejsce z wynikiem 96,9 pkt zajęła drużyna Fenix z Klubu Naukowego Fenix w Warszawie, trzecie miejsce przypadło zespołowi Doctus z XLII LO im. Adama Mickiewicza w Krakowie (78,0 pkt), a czwarte – drużynie Kwazar, również z XLII LO im. Adama Mickiewicza w Krakowie, która uzyskała 64,6 pkt. Wyniki te dobrze pokazują wysoki poziom finałowej rywalizacji.

W wydarzeniu uczestniczyli także przedstawiciele środowiska naukowego oraz instytucji wspierających turniej, w tym prezes Polskiego Towarzystwa Fizycznego prof. dr hab. Stanisław Kistryn, prof. dr hab. Bartłomiej Witkowski,

reprezentujący dyrektora Instytutu Fizyki PAN, a także Dawid Kalkowski, przedstawiciel Marszałka Województwa Mazowieckiego. Finały odbyły się we współpracy z Instytutem Fizyki PAN, Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Wydziałem Fizyki Politechniki Warszawskiej. Patronat honorowy nad wydarzeniem objął Marszałek Województwa Mazowieckiego, a patronami medialnymi były TVP3 Warszawa i TVP Info.

WARSZAWA: PLANCKS Polska 2026

W dniach 7–8 marca 2026 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego odbyła się pierwsza edycja PLANCKS Polska 2026, będąca zarazem krajowymi eliminacjami do międzynarodowego konkursu fizyki teoretycznej PLANCKS (Physics League Across Numerous Countries for Kick-ass Students). Zawody są skierowane do studentów kierunków ścisłych i polegają na zespołowym rozwiązywaniu wymagających zadań z różnych działów fizyki.

Tegoroczna odsłona miała rekordową skalę. W wydarzeniu uczestniczyło 18 drużyn z 4 uczelni, czyli łącznie 68 studentów, wspieranych przez 21 wolontariuszy i organizatorów. Konkurs zachował formułę zbliżoną do finału międzynarodowego: czteroosobowe zespoły miały 4 godziny na rozwiązanie 11 zadań przygotowanych przez doktorów i profesorów z polskich uczelni oraz instytutów naukowych. Program uzupełniły także wydarzenia towarzyszące, w tym wykład prof. Stanisława Kistryna pt. „Problem trzech ciał”.

Najlepsze wyniki osiągnęły drużyny z Uniwersytetu Warszawskiego. Pierwsze miejsce zajęła drużyna PLANK Challenge w składzie: Gniewoj Michalewski, Maksymilian Wdowiars-Bilski, Filip Sugier i Andrzej Maroń. Drugie miejsce zdobył zespół Euler Elfs: Filip Baciak, Jerzyk Gamdzyk, Paweł Przybyła i Piotr Borodako, a trzecie – SKIBIDI Enterprise: Jakub Schindler, Adam Gocel, Mateusz Pańtak i Bartek Lech. Dwie najlepsze drużyny uzyskały prawo reprezentowania Polski w międzynarodowym finale konkursu, który odbędzie się 21–25 maja 2026 roku w Eindhoven w Holandii.

Polskie eliminacje zostały zorganizowane przez Polskie Stowarzyszenie Studentów Fizyki przy wsparciu Wydziału Fizyki UW, Fundacji ORLEN, Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz firmy Creotech. PLANCKS Polska 2026 potwierdził, że konkursy skierowane do studentów mogą być nie tylko sprawdzianem wiedzy, ale także ważnym miejscem współpracy, integracji i budowania środowiska młodych fizyków.

KRAKÓW: Wybór nowych władz Oddziału Krakowskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego

W maju 2026 roku odbyły się wybory władz OK PTF na lata 2026–2028. Wyłoniony w głosowaniu Zarząd oraz Komisja Rewizyjna przejęły odpowiedzialność za koordynację działań krakowskiego środowiska fizyków, w tym organizację seminariów oraz inicjatyw popularyzujących naukę w regionie. Przewodniczącym Zarządu Oddziału został prof. Roman Płaneta (UJ). Na sekretarza wybrano Danutę Goc-Jagło, zaś na skarbnika Agatę Kubisiak. Spośród członków Zarządu powołano dwóch wiceprzewodniczących – Piotra Bednarczyka oraz Witolda Zawadzkiego (ds. dydaktyki). Pozostałymi członkami Zarządu zostali wybrani Piotr Fornal, Łukasz Stępień, Maciej Wołoszyn i Marcin Zieliński. Komisję



prof. Roman Płaneta

Rewizyjną Oddziału będą stanowić w najbliższej kadencji Maciej Fidrysiak, Paweł Góra i Andrzej Kądziaława. Przed Zarządem stoi odpowiedzialne zadanie przygotowania jubileuszowego 50. Zjazdu Fizyków Polskich.

WARSZAWA: 3% dla nauki, 100% dla Polski

W maju zainicjowano ogólnopolską akcję „3% dla nauki, 100% dla Polski”, której celem jest zwrócenie uwagi na sytuację finansową nauki i szkolnictwa wyższego w Polsce. W gronie inicjatorów znaleźli się prof. Michał Tomza z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, dr hab. Agata Starosta z Instytutu Biochemii i Biofizyki PAN oraz dr hab. Łukasz Okruszek z Instytutu Psychologii PAN. Organizatorzy rozpoczęli zbiórkę podpisów pod petycją skierowaną do władz państwowych.

Głównym postulatem akcji jest zwiększenie nakładów na naukę do poziomu 3% PKB do 2030 r. Organizatorzy wskazują trzy obszary wymagające zmian: wynagrodzenia pracowników sektora nauki, stabilne i godne warunki dla studentów i doktorantów oraz środki pozwalające prowadzić badania naukowe, w tym badania podstawowe. W petycji podkreślono, że wzrost finansowania miałby obejmować zarówno bezpośrednie wydatki budżetowe, jak i rozwiązania zachęcające biznes do inwestowania w badania i rozwój.

Akcja uzyskała poparcie szeregu gremiów akademickich i naukowych, m.in. Prezydium Polskiej Akademii Nauk, Prezydium KRASP, Rady Głównej Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Rady Młodych Naukowców, Akademii Młodych Uczonych PAN oraz Uniwersyteckiej Komisji Finansowej KRUP. W stanowiskach tych instytucji podkreślano potrzebę trwałego, strategicznego i przewidywalnego finansowania nauki oraz poprawy warunków pracy i rozwoju młodych badaczy.

Kulminacją majowych działań był protest sektora nauki 27 maja o godz. 13.00 pod Sejmem RP, przy Pomniku Armii Krajowej i Polskiego Państwa Podziemnego w Warszawie. Po proteście petycja ma zostać przekazana przedstawicielom władz państwowych.



WARSZAWA, GDAŃSK, CHORZÓW: Ogólnopolski Dzień Inżynierii Materiałowej 2026

27 marca 2026 roku odbyła się czwarta edycja Ogólnopolskiego Dnia Inżynierii Materiałowej, wspólnej inicjatywy Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego oraz uczelni i instytutów naukowych z całej Polski. Tegoroczne wydarzenie przebiegało pod hasłem „Kosmiczne materiały” i pokazywało, jak projektuje się materiały oraz konstrukcje zdolne pracować w warunkach skrajnie odmiennych od ziemskich.

ODIM ma charakter popularyzatorski, ale jego znaczenie wykracza poza prosty pokaz doświadczeń. Inżynieria materiałowa została przedstawiona jako dziedzina łącząca fizykę,

chemię, technikę i przemysł: od badań struktury materiałów, przez projektowanie nowych tworzyw, stopów, kompozytów i powłok funkcjonalnych, po zastosowania w energetyce, lotnictwie, technologiach kosmicznych i nowoczesnej produkcji. W wielu ośrodkach przygotowano wykłady, warsztaty, eksperymenty, pokazy oraz zwiedzanie laboratoriów.

W Warszawie wydarzenia odbywały się m.in. na Politechnice Warszawskiej, w Gmachu Inżynierii Materiałowej przy ul. Wołoskiej 141, a do inicjatywy włączyła się także Wojskowa Akademia Techniczna. W Gdańsku ODIM po raz czwarty zorganizowano na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Program obejmował pokazy i wykłady dotyczące m.in. materiałów kosmicznych, elektrochemicznych źródeł prądu, energetyki wodorowej, termoelektryczności oraz zastosowań inżynierii materiałowej w przemyśle. Uczestnicy mogli również zwiedzać laboratoria Centrum Nanotechnologii A.

W Chorzowie lokalna odsłona ODIM odbyła się w kampusie Uniwersytetu Śląskiego przy ul. 75. Pułku Piechoty 1A. Wykład inauguracyjny „Elektryczne skrzydła przyszłości – czy lotnictwo może być eko?” wygłosił dr Wojciech Gurdziel, omawiając rolę lekkich kompozytów, magazynowania energii i technologii napędu elektrycznego w projektowaniu współczesnych maszyn latających. Po części warsztatowej wydarzenie zwieńczył otwarty Materiałowy Piknik Rodzinny. Współorganizatorem chorzowskiej edycji był Instytut Inżynierii Materiałowej UŚ, a koordynatorem dr hab. Grzegorz Dercz, prof. UŚ.

Charakterystycznym elementem tegorocznego ODIM była także ogólnopolska próba ustanowienia rekordu w kategorii „Najwięcej rakiet origami złożonych w ciągu 4 godzin”. Prosta, angażująca forma nawiązywała do tematu przewodniego i pozwalała włączyć uczestników w symboliczne działanie pokazujące, że inżynieria zaczyna się od wyobraźni, modelu i zrozumienia materiału. Dzięki temu ODIM 2026 połączył prezentację zaawansowanych technologii z dostępną, atrakcyjną popularyzacją nauki.



KATOWICE: XX jubileuszowe Święto Liczby π na Uniwersytecie Śląskim

W dniach 13–14 marca 2026 roku na Uniwersytecie Śląskim odbyły się jubileuszowe, dwudzieste obchody Święta Liczby π . Wydarzenie, organizowane pod hasłem „Kieruj się na π ”, po raz kolejny połączyło popularyzację matematyki, fizyki, chemii, inżynierii materiałowej i nauk pokrewnych. Tegoroczna edycja miała szczególnie szeroki zasięg: obejmowała 130 aktywności w trzech miastach i sześciu lokalizacjach, przygotowanych przez ponad 200 osób

związanych z Wydziałem Nauk Ścisłych i Technicznych UŚ — pracowników, doktorantów, studentów oraz członków kół naukowych.

Obchody rozpoczął wykład Jarosława Juszkiewicza pt. „Czego nauczyło mnie patrzenie w gwiazdy?”. Prelegent, znany popularyzator nauki, przekonywał, że zainteresowanie naukami ścisłymi nie musi zaczynać się od biegłości rachunkowej, lecz często rodzi się z ciekawości świata, wyobraźni i odwagi zadawania pytań. Wystąpienie dobrze oddawało ducha całego wydarzenia, które kierowane było zarówno do uczniów już zainteresowanych naukami ścisłymi, jak i do tych, którzy dopiero szukają własnej drogi do matematyki i fizyki.

Istotną część programu stanowiły aktywności przygotowane przez fizyków. Odbył się Turniej Fizyczny, zorganizowany przez dr. Jerzego Jarosza, prof. UŚ, a także liczne warsztaty i pokazy eksperymentalne. Uczestnicy mogli poznać m.in. podstawy mikroskopii elektronowej i optycznej, zagadnienia optometrii, porowatości materiałów, dyfrakcji rentgenowskiej w materiałach węglowych z biomasy oraz symulacji komputerowych własności fizycznych materiałów. Najmłodszych przyciągały warsztaty niskich temperatur, a zainteresowani fizyką wysokich energii mogli usłyszeć o udziale naukowców z Uniwersytetu Śląskiego w eksperymentach NA61 i ALICE w CERN.

W programie znalazły się również formy rywalizacji i zabawy nauką, m.in. grywalizacja „Optyczny Zawrót Głowy”, pokazująca, że widzenie nie jest prostym rejestrowaniem rzeczywistości, a mózg potrafi twórczo interpretować bodźce wzrokowe. Takie działania dobrze wpisywały się w charakter Święta Liczby π : łączyły naukową poprawność z atrakcyjną, angażującą formą, pozwalając uczestnikom samodzielnie doświadczać zjawisk i zadawać pytania.

Drugiego dnia obchodom towarzyszyły wydarzenia przygotowane wspólnie z Polskim Radiem Katowice. Wśród nich znalazł się parkrun — bieg lub marsz na dystansie „ π z hakiem” — oraz koncert jubileuszowy przeplatany wykładami popularnonaukowymi. Uczestnicy mogli dzięki temu spojrzeć na związki matematyki i fizyki z muzyką, rytmem, proporcjami i strukturą dźwięku.

Jubileuszowe Święto Liczby π pokazało, jak silną i rozpoznawalną inicjatywą popularyzatorską stało się to wydarzenie na Śląsku. Jego szczególną wartością jest połączenie wielu dyscyplin i środowisk: uczniów, nauczycieli, studentów, naukowców i popularyzatorów. Dwudziesta edycja potwierdziła, że liczba π może być nie tylko matematycznym symbolem, ale także pretekstem do rozmowy o tym, jak nauki ścisłe opisują świat — od skali atomowej i materiałowej po gwiazdy, muzykę i ludzkie widzenie.

POZNAŃ: „Spędź dzień z naukowcami” w Poznaniu

Oddział Poznański Polskiego Towarzystwa Fizycznego uruchomił w 2026 roku program „Spędź dzień z naukowcami”, skierowany do uczniów szkół ponadpodstawowych. Inicjatywa ma przybliżyć młodym ludziom świat współczesnej nauki nie przez wykład o pracy badacza, lecz przez bezpośredni kontakt z miejscami, w których ta praca rzeczywiście się odbywa: laboratoriami, aparaturą, zespołami badawczymi i konkretnymi pytaniami naukowymi.

W realizację programu zaangażowały się najważniejsze instytucje naukowe regionu: Wydział Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Instytut Fizyki

Molekularnej PAN, Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej oraz Katedra Fizyki i Biofizyki Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Dzięki temu uczniowie mogą zobaczyć różne oblicza współczesnej fizyki i nauk pokrewnych — od badań podstawowych, przez fizykę materiałów i techniki pomiarowe, po zastosowania w biologii, medycynie, energetyce i nowych technologiach.

Założenie programu jest proste, ale bardzo wartościowe dydaktycznie: licealiści spędzają jeden dzień w wybranym instytucie badawczym. Pod opieką naukowców poznają laboratoria, obserwują lub współwykonują doświadczenia, oglądają nowoczesną aparaturę i rozmawiają o tym, jak wygląda codzienna praca badacza.

Ważnym elementem inicjatywy jest także możliwość odowiedzenia kolejnych zaangażowanych instytucji. Uczniowie nie poznają więc jednego, przypadkowego laboratorium, lecz otrzymują szerszy obraz środowiska naukowego Poznania i różnorodności prowadzonych tam badań. Program pokazuje, że fizyka nie jest zamkniętą specjalnością, lecz dziedziną obecną w wielu obszarach współczesności — od elektroniki i komunikacji, przez przemysł i inżynierię materiałową, po medycynę oraz badania przyrodnicze.



POLSKA: Noc Muzeów

Noc Muzeów 2026, obchodzona w większości miast w nocy z 16 na 17 maja, po raz kolejny pokazała, że fizyka dobrze odnajduje się nie tylko w salach wykładowych i laboratoriach, lecz także w przestrzeni muzeów, centrów nauki, obserwatoriów i otwartych pokazów. W wielu miejscach późny wieczór stał się okazją do spotkania z doświadczeniem, aparaturą, obserwacją nieba i rozmową z naukowcami.

W Warszawie szczególnie wyraźnie obecne były tematy energii, plazmy, światła i nowoczesnych technologii. Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy przygotował w Narodowym Muzeum Techniki ekspozycję „ $E = mc^2$ – wzór, który zmienił świat”, pokaz generowania i utrzymywania plazmy w fuzorze oraz rozmowy o syntezie jądrowej i reaktorze ITER. Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej zaprosił natomiast na pokazy pod hasłem „Kolor! Energia! Fizyka!”, prowadzone w Audytorium Fizyki przez pracowników oraz studentów z kół naukowych CAMAC i Spektron.

Bogaty program przygotowało również Centrum Nauki Kopernik. Zwiedzanie wystaw połączono tam z doświadczeniami w Laboratorium A, spotkaniami z naukowcami, pokazami efektów specjalnych oraz częścią astronomiczną. W Planetarium można było poznać gwiazdozbiory widoczne o tej porze roku i odbyć immersyjny lot przez pierścienie Saturna. Z kolei na patio, przy teleskopach ustawionych przy wsparciu ekspertów PTMA, prowadzono obserwacje nieba podczas nowiu Księżyca.

Fizyka była obecna także w innych miastach. W Krakowie, w Ogrodzie Doświadczeń im. Stanisława Lema, przygotowano warsztaty, pokazy zjawisk i seanse w planetarium, pozwalające samodzielnie doświadczać zjawisk z zakresu optyki, akustyki, mechaniki i hydrostatyki. W Poznaniu środowisko Wydziału Fizyki i Astronomii UAM włączyło się w program „Bajecznego UAM”, prezentując m.in. idee bitów i kubitów, splątania oraz teleportacji kwantowej, a także technologie druku 3D i rzeczywistości mieszanej. W Gdańsku szczególne znaczenie miało otwarcie Gdańskiego Obserwatorium Astronomicznego, połączone z obserwacjami nocnego nieba, prezentacją zdjęć obiektów astronomicznych i zwiedzaniem placówki.

Do naukowego wymiaru Nocy Muzeów dołączyły również centra nauki. W Szczecinie Morskie Centrum Nauki im. prof. Jerzego Stelmacha zaprosiło do eksperymentowania ze zjawiskami związanymi z wodą, falami, żegluga i techniką. W Łodzi zwiedzano Centrum Nauki i Techniki EC1, którego ekspozycja prowadzi od historii elektrowni po zagadnienia mikro- i makroświata. W Kielcach Energetyczne Centrum Nauki przygotowało nocne zwiedzanie wystawy „Energia”, a w Białymstoku Epi-Centrum Nauki zorganizowało „Noc światła i energii”, poświęconą m.in. neonom, wyładowaniom elektrycznym, plazmie, luminescencji i promieniowaniu UV.

KRAKÓW: Copernicus Festival 2026

W dniach 19–24 maja 2026 roku w Muzeum Inżynierii i Techniki w Krakowie odbyła się dwunasta edycja Copernicus Festival. Tegoroczne hasło — „Złożoność” — dobrze oddawało napięcie programu, który prowadził uczestników od pytań o początki Wszechświata i najbardziej fundamentalne prawa fizyki po zagadnienia świadomości, ewolucji człowieka, sztucznej inteligencji i przemian współczesnego społeczeństwa. Organizatorzy podkreślali, że festiwal ma pokazywać związki nauki z innymi obszarami kultury oraz wpływ teorii naukowych na współczesny obraz świata.

W programie znalazły się wykłady, rozmowy, debaty, pokazy filmowe, warsztaty oraz wydarzenia artystyczne. Dla środowiska fizycznego szczególnie interesujące były wątki kosmologiczne i astrofizyczne. Wśród gości festiwalu znalazła się prof. Hiranya Peiris, astrofizyczka z University of Cambridge, zajmująca się m.in. analizą promieniowania mikrofalowego tła. W programie pojawiły się także zagadnienia fal grawitacyjnych oraz rozmowa „Na falach wszechświata” z udziałem Łukasza Lamży i Doroty Gondek-Rosińskiej.

Istotną nowością tegorocznej edycji było włączenie do programu specjalnych scen przygotowanych we współpracy z najważniejszymi instytucjami finansującymi badania: Europejską Radą ds. Badań Naukowych, Narodowym Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowym Centrum Nauki. Szczególne znaczenie miała sesja NCN „Badania podstawowe: realny wpływ”, poświęcona temu, jak projekty prowadzone z ciekawości poznawczej wpływają na gospodarkę i życie społeczne oraz dlaczego warto finansować badania, które nie obiecują natychmiastowego produktu.

Copernicus Festival pozostaje jednym z ważniejszych polskich wydarzeń popularyzujących naukę w formule interdyscyplinarnej. Jego siła polega na tym, że nie sprowadza nauki wyłącznie do prezentacji wyników, lecz pokazuje ją jako sposób rozumienia rzeczywistości: od struktury materii i ewolucji kosmosu, przez procesy biologiczne, po pytania o ludzką świadomość i społeczne skutki nowych technologii. W tej perspektywie fizyka nie jest osobnym blokiem programu, ale jednym z języków opisu złożonego świata.

POSTĘPY FIZYKI

CHASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

BIURO MEDIALNE PTF:

Materiały do działu *Kronika PTF* przygotował zespół Biura Medialnego PTF w składzie: Krzysztof Petelczyc – koordynator, Adam Balcerzak (Szczecin), Mikołaj Baranowski (Poznań), Beata Bochentyn (Gdańsk), Jakub Borkowski (Toruń), Katarzyna Deja (Warszawa), Zbigniew Ficek (Zielona Góra), Janusz Filiks (Lublin), Marcin Jarosik (Częstochowa), Michał Kaczor (Rzeszów), Krzysztof Karpiusz (SDF), Janusz Kuliński (Łódź), Dawid Mazur (Opole), Wojciech Olszewski (Białystok), Adam Pikul (Wrocław), Piotr Rączka (SFP), Grzegorz Siudem (SFENS), Bogumiła Świeżewska (SFOF), Andrzej Wilczek (Katowice), Witold Zawadzki (Kraków), Yuriy Zorenko (Bydgoszcz)

ZAPYTAJ FIZYKA

Dział „Zapytaj Fizyka” powstaje dzięki uprzejmości prof. Piotra Sułkowskiego, we współpracy z projektem „Zapytaj Fizyka” prowadzonym przez Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W ramach tej inicjatywy naukowcy oraz studenci starszych lat odpowiadają na pytania dotyczące fizyki, a projekt obejmuje także popularyzatorskie wykłady. Więcej informacji na stronie zapytajfizyka.fuw.edu.pl.

ŹRÓDŁA I AUTORSTWO ILUSTRACJI:

Okładka: supertramp8 – stock.adobe.com; **str. 1:** 1. Arni – stock.adobe.com, 2. Fotiev Michail – stock.adobe.com, 3. pressmaster – stock.adobe.com; **str. 2:** 1. jrossphoto – stock.adobe.com, 2. National Solar Observatory, AURA and National Science Foundation. Using NASA eclipse path data generated by Fred Espenak, Besselian Elements for August 12, 2026 total solar eclipse. Specific eclipse data from the US Naval Observatory's Astronomical Applications Department. **str. 3:** 1. M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin, 2. P. Štarha, M. Štarha, J. Hoderová, S. Habbal, B. Boe, M. Druckmüller; **str. 4:** 1L. NASA/SDO/Goddard Spaceflight Center, 2L. NASA/SDO/Goddard Spaceflight Center, 1P. ESA/NASA/LASCO; **str. 5:** na podst. Artsiom P, Andreas Völkel/Wirestock, Tomasz Aurora, somchairakin, Paylessimages, bluebackimage – stock.adobe.com, oprac. A. Pikul, K. Petelczyc; **str. 6:** National Solar Observatory, AURA and National Science Foundation. Using NASA eclipse path data generated by Fred Espenak, Besselian Elements for August 2, 2027 total solar eclipse; **str. 7:** vchalup – stock.adobe.com; **str. 11:** GraphicCompressor – stock.adobe.com; **str. 12:** A. Pikul, K. Petelczyc, opracowanie własne; **str. 13:** A. Pikul, K. Petelczyc, opracowanie własne; **str. 15:** 1L. na podst. 10.3390/ma16175814, CC BY 4.0, 2L. na podst. 10.1016/j.actamat.2024.120666, CC BY 4.0, 1P. na podst. 10.1103/fnz7-bzmw, CC BY 4.0; **str. 17:** 1L. Gejsi – stock.adobe.com, 1P. Artsiom P – stock.adobe.com; **str. 18:** 1L. Mopic – stock.adobe.com, 2L. Gorodenkoff – stock.adobe.com, 1P. Alessandro Grandini – stock.adobe.com; **str. 19:** 1L. DVisions – stock.adobe.com, 2L. vchalup – stock.adobe.com, 1P. yamayama design – stock.adobe.com; **str. 20:** 1. olrat – stock.adobe.com, 1P. T. Kacik; **str. 21:** 1L. T. Kacik, 2L. T. Kacik, 1P. T. Kacik; **str. 22:** 1L. T. Kacik, 2L. T. Kacik, 1P. T. Kacik; **str. 24:** ktsdesign – stock.adobe.com; **str. 27:** Hriday – stock.adobe.com; **str. 28:** 1P. A. Siótkowska, oprac. K. Petelczyc, 2P. A. Siótkowska; **str. 29:** A. Siótkowska; **str. 30:** sergnester – stock.adobe.com; **str. 31:** NASA/JSC; **str. 32:** 1. F. Sala – WF/Politechnika Warszawska, 1L. BKiP/Politechnika Warszawska, 1P. J. Mąkowski; **str. 33:** Filip Sala – WF/Politechnika Warszawska; **str. 35:** 1L. BKiP/Politechnika Warszawska, 2L. Pavlo Vakhreshv – stock.adobe.com, 1P. Zapytaj Fizyka – WF/Uniwersytet Warszawski; **str. 36:** 1L. Peter Jurik – stock.adobe.com, 1P. Leo Lintang – stock.adobe.com; **str. 37:** 1. K. Petelczyc – modyfikacja przy użyciu OpenAI ChatGPT (AI), 1L. archiwum Postępów Fizyki; **str. 39:** Archiwum Postępów Fizyki, Archiwum Acta Physica Polonica A, Fizykoteka – WF/Uniwersytet Warszawski, strona: studenci68-73.fuw.edu.pl – oprac. K. Petelczyc; **str. 40:** 1L. Archiwum Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej, 1P. Archiwum Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej, 2P. P. Cybin; **str. 41:** K. Petelczyc; **str. 43:** 1. NickMo – stock.adobe.com, 1P. Dmytro – stock.adobe.com; **str. 44:** EvrenKalinbacak – stock.adobe.com; **str. 45:** 1L. Thomas – stock.adobe.com, 2. игорь соколов – stock.adobe.com; **str. 46:** 1. Archiwum WF/Uniwersytet Warszawski, 1P. Archiwum WF/Uniwersytet Warszawski; **str. 47:** Archiwum WF/Uniwersytet Warszawski; **str. 48:** Archiwum „Zapytaj Fizyka”, WF/Uniwersytet Warszawski; **str. 49:** Fundacja „Połączeni Pasją” – rozszerzenie kadru wykonane przez redakcję przy użyciu Adobe Firefly (AI); **str. 50:** I. Grabowski; **str. 51:** PAU; **str. 52:** 2L. P. Piotrowski – Uniwersytet Wrocławski, 2L. M. Mrowiński – WF/Politechnika Warszawska, 1P. archiwum Jerzego Grębosza, 2P. WF/Uniwersytet Warszawski; **str. 53:** Lukasz – stock.adobe.com; **str. 54:** 1L. J. Mostowski, 2L. skan okładki udostępniony przez J. Mostowskiego, 1P. Fundacja Polka XXI wieku; **str. 55:** 1L. R. Drozdowska – Oddział Toruński PTF, 1P. K. Magda – WFAIS/Uniwersytet Jagielloński w Krakowie; **str. 56:** Narodowe Centrum Badań Jądrowych; **str. 57:** 1L. WFAIS/Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, 1P. M. Mutwil, M. Huć – Politechnika Śląska; **str. 58:** K. Gurdziel – Uniwersytet Śląski; **str. 59:** M. Szramek – WF/Politechnika Warszawska; Zdjęcia portretowe autorów zostały udostępnione przez autorów.

INFORMACJA O WYKORZYSTANIU NARZĘDZI SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Przy opracowaniu części materiałów zamieszczonych w działach *W Skrócie*, *Kwartal Badań* oraz *Kronika PTF* wykorzystano narzędzia sztucznej inteligencji jako wsparcie redakcyjne, w szczególności w pracach nad selekcją, porządkowaniem i wstępnym opracowaniem informacji. Ostateczny dobór treści, ich redakcja oraz odpowiedzialność za publikację należą do redakcji. Algorytmów sztucznej inteligencji użyto także do poprawy jakości części ilustracji.

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Publikujemy teksty rzetelne, atrakcyjne i weryfikowalne, które upowszechniają wiedzę z fizyki, prezentują najnowsze osiągnięcia badań, skuteczne metody dydaktyczne, ważne postaci i wydarzenia oraz pokazują zastosowania i aspekty interdyscyplinarne. Oczekujemy materiałów zgodnych z zasadami dobrego warsztatu naukowego: autor powinien rozróżniać fakty, interpretacje i hipotezy, unikać uproszczeń zniekształcających sens fizyczny oraz sygnalizować założenia, przybliżenia i zakres stosowności modeli. Jednocześnie Postępy Fizyki mają formę popularyzatorską: tekst powinien być zrozumiały dla określonego odbiorcy (na poziomie niewyższym niż reprezentowany przez studentów II stopnia kierunków ścisłych i technicznych) i prowadzić czytelnika spójną narracją od tła i postawienia problemu, przez wyjaśnienie mechanizmu i przedstawienie najważniejszych wyników lub argumentów, po interpretację oraz wnioski istotne również dla osób spoza wąskiej specjalności. Wymagania techniczne są opisane na stronie <https://www.ptf.net.pl/PF/autorzy>, zaś formularz zgłoszenia propozycji artykułów oraz więcej informacji o oczekiwanej tematyce można znaleźć na stronie <https://www.ptf.net.pl/PF/wysluj>. Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania i redagowania tekstów, w tym wprowadzania niezbędnych zmian terminologicznych. Zgodnie z obowiązującym prawem autorskim autorzy będą mogli dokonać korekty autorskiej artykułu przygotowanego do druku. Opublikowanie artykułu w PF wiąże się z nieodpłatnym udostępnieniem go na stronie internetowej PTF na podstawie licencji Creative Commons BY 4.0.

INFORMACJE DLA REKLAMODAWCÓW:

Postępy Fizyki zapraszają do współpracy wydawców książek i serii wydawniczych, instytuty, laboratoria, organizatorów konferencji oraz zespoły realizujące projekty badawcze. Oferujemy reklamę, artykuły sponsorowane i pakiety promocyjne obejmujące m.in. promocję nowych książek, prezentację katalogów wydawniczych oraz upowszechnianie wyników projektów i działalności instytucji związanych z fizyką. Informacje: www.ptf.net.pl/PF/reklama

Strona internetowa: www.ptf.net.pl/PF

Prenumerata: www.ptf.net.pl/PF/prenumerata

Adres e-mail redakcji: postepy.fizyki@ptf.net.pl

Postępy Fizyki są dostępne bezpłatnie w wersji elektronicznej: www.ptf.net.pl/PF/archiwum

Spis treści Postępów Fizyki (od 1949): www.ptf.net.pl/PF/spis-treści



ORGANIZATOR:

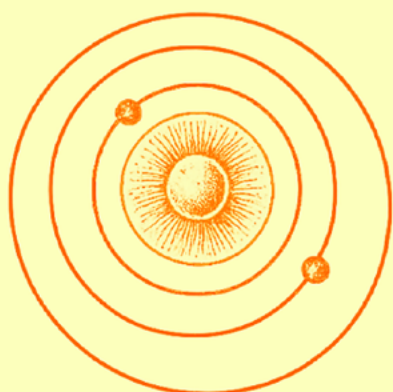


PARTNERZY:

**WYDZIAŁ
FIZYKI**
UNIwersytet
Warszawski



Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

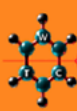


IV KONGRES NAUCZYCIELI FIZYKI

WARSZAWA 2026

4-6 WRZEŚNIA 2026
WYDZIAŁ FIZYKI UW
4KNF.PTF.NET.PL

SPONSORZY:



Międzynarodowy Instytut Astronomicznych Ciąstek
ASTROCENT
Polskie Akademii Nauk



image



PATRONAT:



PATRONAT MEDIALNY:

POSTĘPY FIZYKI





ISSN 0032-5430



02



9 770032 543264