

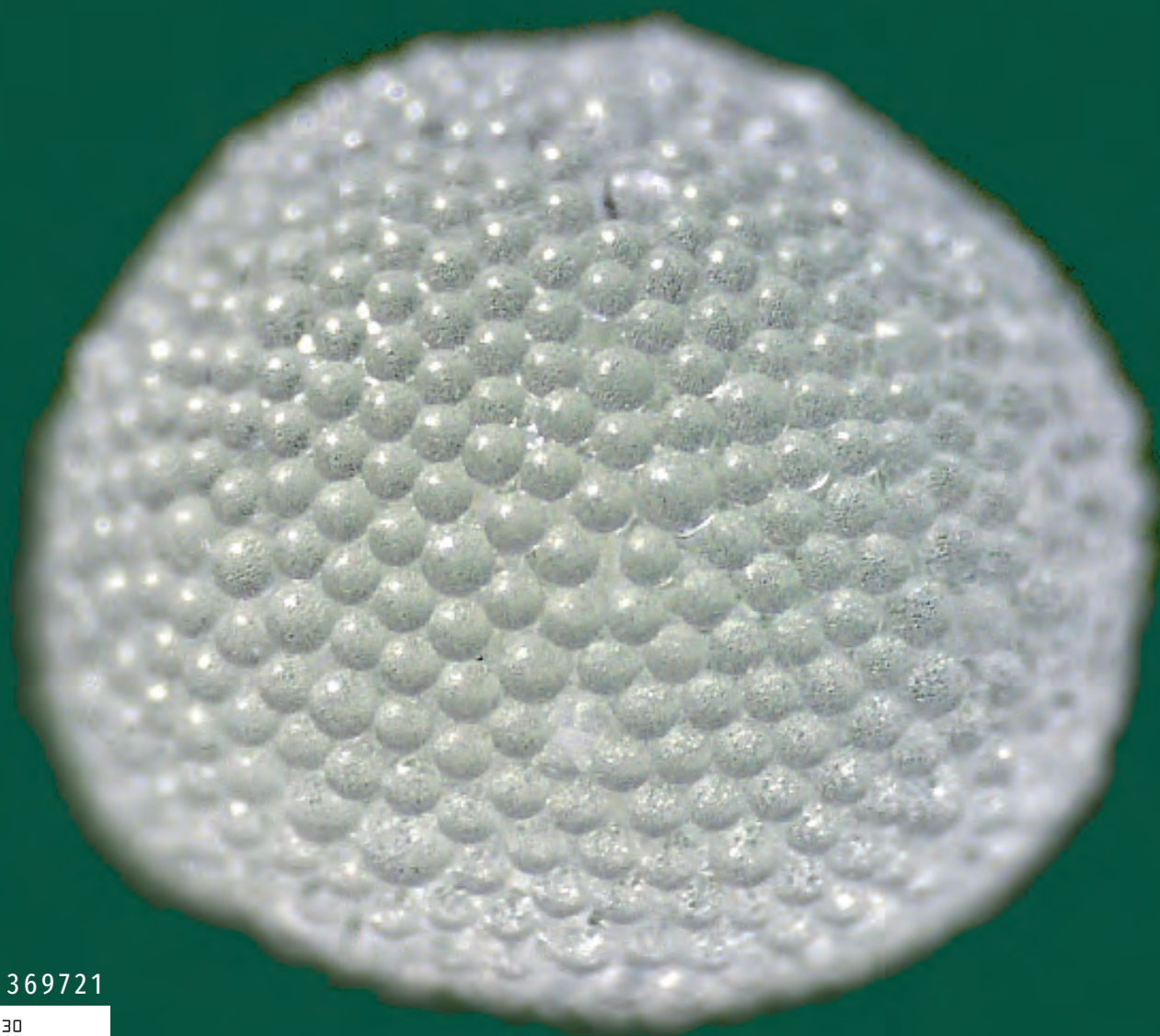
POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

Fizyka w mikroskali
Meteoryty
Zegary Wszechświata

2 / 2024
TOM 75



nr indeksu 369721

ISSN 0032-5430

02

9 770032 543240



POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE (PTF)

www.ptf.net.pl

ZARZĄD GŁÓWNY

Teresa Rząca-Urban (prezes)
Bogdan Kowalski (sekretarz generalny)
Jan Grabski (skarbnik)
Leszek Sirko (prezes honorowy)
Katarzyna Chałasińska-Macukow
Zofia Drzazga
Dariusz Grech
Bohdan Grządkowski
Stanisław Kistrzyn
Adam Maj
Sławomir Miernicki
Józef Spątek
Aneta Szczygielska-Łaciak
Andrzej Ślebarski
Andrzej Wysmołek

BIURO ZARZĄDU

ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
tel. (+22) 553 28 56 pok.4.56 (4. piętro)
e-mail: biuro@ptf.net.pl

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymański (Białystok)
Adam Gadomski (Bydgoszcz)
Ewa Mandowska (Częstochowa)
Jarosław Rybicki (Gdańsk)
Jerzy Bodzenta (Gliwice)
Paweł Zajdel (Katowice)
Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce)
Józef Spątek (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)
Aneta Drabińska (Warszawa)
Ewa Dębowska (Wrocław)
Joanna Kalga (Zielona Góra)

POSTĘPY FIZYKI (PF)

CHASOPIŚMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

ukazuje się od 1949 roku

www.ptf.net.pl

RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący)
Mieczysław Budzyński
Witold Dobrowolski
Józef Spątek
Józef Szudy
Arkadiusz Wójs

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Wojciech Olszewski (Białystok)	Janusz Kuliński (Łódź)
Beata A. Pietrewicz (Bydgoszcz)	Katarzyna Książek (Opole)
Piotr Gębara (Częstochowa)	Mikołaj Lewandowski (Poznań)
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)	Michał Kaczor (Rzeszów)
Lucyna Grządziel (Gliwice)	Agnieszka Włodarkiewicz (Słupsk)
Aleksandra Piórkowska-Kurpas (Katowice)	Janusz Typek (Szczecin)
Maciej Rybczyński (Kielce)	Jakub Borkowski (Toruń)
Witold Zawadzki (Kraków)	Grzegorz Siudem (Warszawa)
Janusz Filiks (Lublin)	Ewa Dębowska (Wrocław)
	Lidia Najder-Kozdrowska (Zielona Góra)

REDAKCJA

Anna Szemberg (redaktor naczelna)
Krzysztof Turzyński
Redakcja „Postępy Fizyki” – Wydział Fizyki UW
Pasteura 5, pok. 2.80 (2. piętro), 02-093 Warszawa
e-mail: postepy.fizyki@ptf.net.pl

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Przyjmujemy do publikacji przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne w języku polskim i angielskim, które otrzymają pozytywne recenzje wydawnicze. Teksty należy przysłać e-mailem na adres: postepy.fizyki@ptf.net.pl w formie przyjętej w czasopiśmie <https://www.ptf.net.pl/PF/archiwum> w systemie LATEX (plik źródłowy + pdf) lub w programie Word; tekst powinien zawierać tytuł w j. polskim i angielskim, afiliację i nr ORCID autora, streszczenie i słowa kluczowe w j. polskim oraz j. angielskim, **bibliografię** wyłącznie załącznikową (patrz wskazówki dotyczące sporządzania bibliografii na stronie PTF: <https://www.ptf.net.pl/PF/autorzy>), podpisy do ilustracji; **ilustracje** mogą być zamieszczone w tekście, ale **należy** je również **przysłać w osobnych plikach** o rozdzielczości co najmniej 300 dpi; w przypadku ilustracji **zapożyczonych** z innych źródeł, podpis musi zawierać źródło pochodzenia ilustracji, przy czym na autorze spoczywa obowiązek uzyskania zgody na jej publikację w jego artykule w *Postęпах Fizyki*. 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.

PRENUMERATA 2024 DLA PODMIOTÓW ZEWNĘTRZNYCH

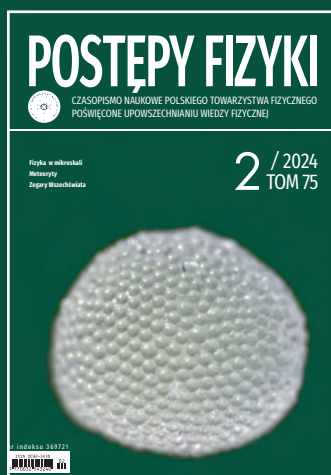
- cena pojedynczego numeru PF wynosi 29,70 PLN (w tym 8% VAT)
 - cena prenumeraty rocznika (4 numery z 9% rabatem) – 108,00 PLN (w tym 8% VAT)
 - **koszty wysyłki czasopisma pokrywa zamawiający**
 - zamówienie prenumeraty należy wysłać na adres postepy.fizyki@ptf.net.pl
- Szczegółowe warunki prenumeraty PF znaleźć można na stronie internetowej PTF <https://www.ptf.net.pl/PF/prenumerata>
- Cena pojedynczego, archiwalnego numeru PF opublikowanego do końca 2019 roku (tj. do tomu 70 włącznie) wynosi 12,00 PLN brutto + **koszty wysyłki**.

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**



Struktura typu *liquid marbles* zbudowana z wodnego rdzenia i otoczki z cząstek polistyrenowych 140 μm



Meteoryt Baszkówka

Szanowni Czytelnicy, POSTĘPY FIZYKI ukazują się od **75 lat!**

Drugi tegoroczny numer naszego kwartalnika może się Państwu wydać nieco „szczuplejszy” od na ogół wydawanych zeszytów. I tak w istocie jest z prozaicznego powodu – braku artykułów do zamieszczenia w PF. W związku z tym gorąco zapraszam do współpracy z Redakcją PF i nadsyłania swoich artykułów do PF oraz informowanie nas o ciekawych projektach badawczych realizowanych przez polskich fizyków, abyśmy mogli zachęcać badaczy do publikowania na naszych łamach (**adres Redakcji PF: postepy.fizyki@ptf.net.pl**).

Serdecznie zapraszam do lektury bieżącego numeru czasopisma

redaktor naczelna

PF są dostępne bezpłatnie w wersji elektronicznej:

<https://www.ptf.net.pl/PF/archiwum>

Spis treści PF (od 1949):

<https://www.ptf.net.pl/PF/spis-treści>

Informacje dla autorów PF:

<https://www.ptf.net.pl/PF/autorzy>

30 lat mössbauerowskich badań meteorytów w Polsce

J. Gałązka-Friedman, M. Jakubowska, M. Woźniak, K. Brzózka, A. Grabias, K. Szopa _____ 3

Fizyka w mikroskali, czyli o kroplach Pickeringa, mikrokapsułkach oraz strukturach *liquid marbles*

T. Kubiak _____ 17

Zegary Wszechświata. Atom. Historia, jakiej nie znacie (Wprowadzenie)

D. J. Helfand _____ 26

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego _____ 30

30 lat mössbauerowskich badań meteorytów w Polsce

30 years of Mössbauer research on meteorites in Poland

Jolanta Gałązka-Friedman^{1*}, Martyna Jakubowska^{1*}, Marek Woźniak^{2*},
Katarzyna Brzózka^{3*}, Agnieszka Grabias^{4*}, Krzysztof Szopa^{5*}

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki

² Uniwersytet Warszawski, Wydział Biologii

³ Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny

⁴ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

⁵ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych

Abstrakt. Spektroskopia mössbauerowska ^{57}Fe jest jedną z najczęściej stosowanych metod badania meteorytów. Początek badań mössbauerowskich w Polsce związany jest z meteorytem Baszkówka, który spadł 25.08.1994 w okolicach Warszawy. W artykule przedstawione są niektóre wyniki 30-letnich mössbauerowskich badań meteorytów, otrzymane przez polski zespół badawczy. Do najważniejszych osiągnięć naszej grupy należy opracowanie metody klasyfikacji chondrytów zwyczajnych, które stanowią 87% meteorytów znajdujących na powierzchni Ziemi. Metoda ta nazwana przez nas metodą 4M (od angielskojęzycznych terminów *meteorites*, *Mössbauer spectroscopy*, *multidimensional discriminant analysis*, *Mahalanobis distance*) jest metodą ilościową, wykorzystującą pewne systematyczności w mössbauerowskich widmach chondrytów zwyczajnych.¹ Podstawowym elementem metody 4M jest baza danych, która w tej chwili składa się z wyników mössbauerowskich pomiarów 87 próbek meteorytów. W artykule omówione są również nowe fazy mineralne zidentyfikowane w meteorycie Morasko. Podano przykłady zastosowania spektroskopii mössbauerowskiej do odróżniania próbek meteorytopodobnych od prawdziwych meteorytów. Omówiliśmy też nasze plany związane z badaniem mechanizmu powstawania chondrytów zwyczajnych oraz z zastosowaniem spektroskopii mössbauerowskiej w przyszłych misjach kosmicznych. Te ostatnie problemy będą rozwiązywane we współpracy z czeską pracownią mössbauerowską Uniwersytetu Palackiego w Olomuńcu.

Słowa kluczowe: spektroskopia mössbauerowska, meteoryty, chondryty zwyczajne, klasyfikacja chondrytów zwyczajnych, meteoryt Baszkówka, próbki meteorytopodobne

Abstract. ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy is one of the most commonly used methods for studying meteorites. The beginning of Mössbauer research in Poland is associated with the Baszkówka meteorite, which fell on 25 August 1994 near Warsaw. The article presents some of the results of 30 years of Mössbauer studies of meteorites by the Polish team. One of the most important achievements of our group is the development of a classification method of ordinary chondrites, which constitute 87% of meteorites found on the earth's surface. This method, which we call the 4M method (meteorites, Mössbauer spectroscopy, multidimensional discriminant analysis, Mahalanobis distance), is a quantitative method that uses certain systematicity in the Mössbauer spectra of ordinary chondrites. The basic element of the 4M method is the database, which currently consists of the results of Mössbauer measurements of 87 meteorite samples. The article also discusses the new mineral phases identified in the Morasko meteorite. Examples of the use of Mössbauer spectroscopy to distinguish meteorite-like samples from real meteorites are given. Our research plans related to the study of the formation mechanism of ordinary chondrites and the use of Mössbauer spectroscopy in future space missions are also discussed. The latter issues will be undertaken in cooperation with the Mössbauer laboratory at Palacký University in Olomouc (Czech Republic).

Keywords: Mössbauer spectroscopy, meteorites, ordinary chondrites, classification of ordinary chondrites, Baszkówka meteorite, meteorite-like samples

25.08.1994 w odległości 25 km na południowy wschód od centrum Warszawy, około godziny 16.00 spadł meteoryt. Zgodnie z tradycją nadawania nazw meteorytom od miejscowości, w której spadły, otrzymał on nazwę

Baszkówka. Meteoryt Baszkówka uważany jest za jeden z najpiękniejszych meteorytów (rys. 1). Swój wygląd zawdzięcza bardzo stabilnemu spadkowi, który odbywał się pionowo, bez koziołkowania i wirowania. Waga Basz-

*Numery ORCID autorów:

Jolanta Gałązka-Friedman 0000-0002-5979-7670,

Martyna Jakubowska 0000-0001-9822-7294,

Marek Woźniak 0000-0002-2606-1034,

Katarzyna Brzózka 0000-0003-4400-0689,

Agnieszka Grabias 0000-0001-5727-8490,

Krzysztof Szopa 0000-0002-7588-7836

1. **Chondryty** – meteoryty kamienne składają się głównie z oliwinu, piroksenów i ziaren stopu Fe-Ni. Ich nazwa pochodzi stąd, że większość z nich zawiera chondry, czyli drobne, najczęściej nieprzekraczające 1 mm średnicy, kuliste skupienia krystaliczne, **Chondryty zwyczajne** to podgrupa meteorytów kamiennych stanowiąca ok. 80% wszystkich znajdujących meteorytów (przyp. red.).



Rys. 1. Meteoryt Baszkówka

kówki wynosiła 15,63 kg. W wyniku różnych nieporozumień specjaliści rozpoczęli badania meteorytu Baszkówka dopiero po upływie pół roku od daty jego spadku.

Jedną z bardzo efektywnych metod badania meteorytów jest spektroskopia mössbauerowska żelaza. Pierwsze wyniki badań meteorytu Baszkówka, przeprowadzonych tą metodą, zostały zaprezentowane na konferencji International Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect (ISIAME) w Johannesburgu w 1996 [1]. **Stanowiły one początek mössbauerowskich badań meteorytów w Polsce.** Od tego czasu badania meteorytów przy użyciu metody spektroskopii mössbauerowskiej prowadzi w Polsce głównie grupa z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej przy współpracy z Katedrą Fizyki Uniwersytetu Radomskiego. Oprócz licznych publikacji tej grupy, które stanowią podstawę niniejszego artykułu, dotychczas ukazały się także dwie polskie prace dotyczące meteorytów Allende oraz El Hammami, opublikowane przez grupę mössbauerowską z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego [2, 3]. W niniejszym przeglądzie przedstawiamy najważniejsze zagadnienia, które związane są z zastosowaniem spektroskopii mössbauerowskiej do badań meteorytów. Omawiamy nie tylko wybrane prace badawcze zakończone sukcesem, ale relacjonujemy również takie, które obarczone były błędnymi wnioskami. Sygnalizujemy także zagadnienia, nad którymi będziemy pracować w najbliższej przyszłości.

Powstawanie meteorytów i ich klasyfikacja

Tworzący się Układ Słoneczny składał się z protogwiazdy otoczonej wirującą mgławicą pyłu i gazów. Lokalne niejednorodności gęstości ośrodka, wzmacniane oddziaływaniem grawitacyjnym, uformowały planetozymale² i inne mniejsze obiekty układu. Podczas dalszych procesów zderzeń powstawały coraz większe ciała – planetoidy i protoplanety.

Materia budująca Układ Słoneczny ulegała wielu procesom. Wielki obłok pyłu i gazu nasycił się coraz liczniejszymi większymi ciałami. Pomiedzy nimi oraz otaczającym je ośrodkiem zachodziły silne interakcje. Najintensywniej zachodziły: wzajemne zderzenia (rozbijanie ciał), akrecja i powtórne scalanie. Tym globalnym procesom towarzyszyły: koagulacja, różnicowanie się (dyferencjacja), solidyfikacja oraz metamorfizm szokowy i termiczny. Swoją rolę miały też związki lotne, w szczególności woda [4]. Wielką rolę w formowaniu się składu i struktury Układu Słonecznego odgrywały utworzone w początkowym okresie chondry i planetozymale. Dowodem na zaistnienie powyższych procesów jest różnorodność w budowie oraz składzie planet skalistych, księżyców oraz planet karłowatych i planetoid, a także ciał macierzystych chondrytów.

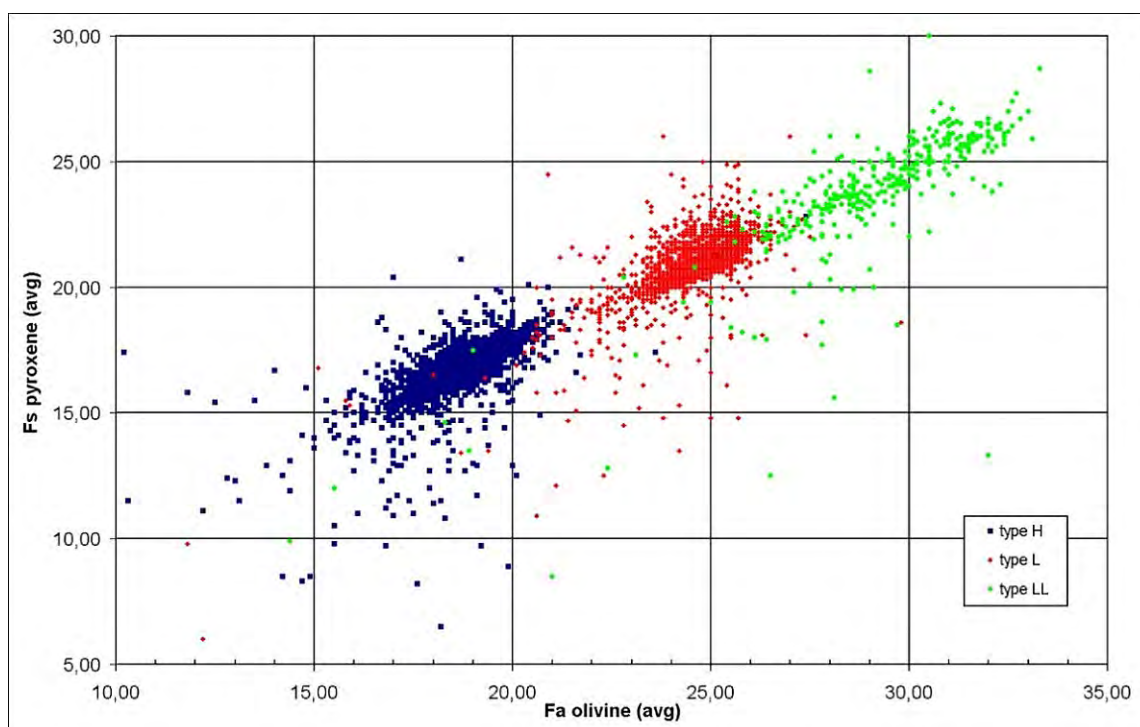
2. Planetozymal – małe ciało niebieskie zbudowane z materii stałej, załazek planety tworzący się na wczesnym etapie ewolucji układu planetarnego (przyp. red.).

Meteoryty docierające na powierzchnię Ziemi to fragmenty planetoid, które powstały w wyniku ich wzajemnych zderżeń. Niewielką grupę meteorytów tworzą również fragmenty wybite z powierzchni Księżyca (meteoryty księżycowe) oraz z powierzchni Marsa (meteoryty marsjańskie). W oficjalnej bazie *Meteoritical Bulletin Database* jest obecnie zarejestrowanych 73 457 meteorytów (dane z 27.01.2024).

Współcześnie meteoryty dzielimy na dwie podstawowe grupy związane z ich geologiczną ewolucją: meteoryty zdyferencjonowane oraz niezdyferencjonowane. Meteoryty zdyferencjonowane pochodzą z ciał macierzystych, na których intensywne i wydajne procesy geologiczne zmodyfikowały skład tworzących je skał i minerałów. Doprowadziło to do uformowania się na nich skorupy, płaszcza i metalicznego jądra. Meteoryty niezdyferencjonowane pochodzą z ciał, na których nie doszło do rozdzielania się materii (dyferencjacji), lecz tworzące je skały podlegały metamorfizmowi termicznemu i ciśnieniowemu, a liczne kolizje ich ciał macierzystych skutkowały tworzeniem brekcji. Meteoryty niezdyferencjonowane tworzą szeroki typ meteorytów kamiennych – należą do nich między innymi chondryty. Meteoryty tego typu mają skład pierwiastkowy zbliżony do składu fotosfery słonecznej, z wyjątkiem najbardziej lotnych pierwiastków [4]. W czasie swojego życia planetoidy (ciała macierzyste) podlegały różnym przemianom, które są podstawą współczesnej klasyfikacji meteorytów [5]; w naszych badaniach zajmujemy się jednak najstarszymi procesami, w wyniku których powstała omówiona niżej

klasyfikacja. Chondryty zwyczajne to najstarsze obiekty Układu Słonecznego, które w formie meteorytów docierają do powierzchni Ziemi. Powstały one około 4,5 miliarda lat temu. Badanie tych chondrytów dostarcza ważnych informacji na temat wciąż nie do końca poznanej wczesnej ewolucji naszego Układu Słonecznego [6, 7, 8].

Podstawą najstarszej klasyfikacji chondrytów zwyczajnych jest porównywanie zawartości żelaza. Na początku XX w. wprowadzono podział chondrytów zwyczajnych, wyróżniając trzy grupy: H (duża zawartość żelaza, ang. *high iron*), L (mała zawartość żelaza, ang. *low iron*) i LL (mała zawartość żelaza i mała zawartość metalu, ang. *low iron, low metal*). Pierwotnie klasyfikacja ta wynikała z badań chemicznych, na podstawie których określano całkowitą zawartość żelaza w meteorytach. W latach 60. XX w., badając minerały w meteorytach za pomocą mikrosondy elektronowej (EMP, ang. *electron microprobe*), określano zawartość fajalitu ($\text{Fe}^{2+}_2\text{SiO}_4$) w oliwinach i ferrosilitu ($\text{Fe}^{2+}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) w piroksenach. Na rys. 2 przedstawiono wykres zawartości ferrosilitu (Fs) w ortopiroksenach w stosunku do zawartości fajalitu (Fa) w oliwinach, wyznaczonych dla dużej populacji chondrytów zwyczajnych. Można zauważyć, że te dwa parametry dość dobrze różnicują wszystkie trzy wymienione grupy chondrytów zwyczajnych i mogą służyć jako kryterium przynależności do danej grupy. Dotychczas nie poznano dobrze mechanizmów odpowiadających za dyferencjację pierwiastków będących metalami (w tym żelaza), które są związane z powstawaniem różnych grup chondrytów zwyczajnych.



Rys. 2. Wykres zawartości ferrosilitu (Fs) w ortopiroksenach w funkcji zawartości fajalitu (Fa) w oliwinach (wyniki otrzymane dla 4712 chondrytów zwyczajnych) [9]

Wymienione wyżej trzy główne grupy chondrytów zwyczajnych (H, L i LL) są jeszcze dzielone na podstawie cech petrologicznych, które uwzględniają stopień zmian termicznych meteorytu. Typy petrograficzne utworzyły się już po powstaniu ciał macierzystych w wyniku zachodzenia procesów termicznych i chemicznych. Można wyodrębnić dwa podzbiory: chondryty zwyczajne zrównoważone (typ petrograficzny 4-7) i chondryty zwyczajne niezrównoważone (typ petrograficzny 3). W typie 3 (chondryty zwyczajne niezrównoważone) dominują chondry o wyraźnych granicach, natomiast oliwiny i pirokseny mają niejednorodny skład chemiczny. Typ ten jest uważany za najbardziej pierwotny. W wyższych typach petrograficznych coraz bardziej zacierają się granice chondr [10].

Mössbauerowskie badania chondrytów zwyczajnych

Duża zawartość żelaza w meteorytach jest przyczyną, dla której spektroskopia mössbauerowska izotopu ^{57}Fe stała się techniką często używaną do badania własności chemicznych tych obiektów. Metoda ta wykorzystuje oddziaływania nadsubtelne, którym podlegają jądra ^{57}Fe , dzięki czemu jest bardzo czuła na lokalne otoczenie atomów żelaza w badanych próbkach. Na podstawie analizy widma mössbauerowskiego można m.in. zidentyfikować związki chemiczne zawierające żelazo, które znajdują się w badanej próbce (nawet w małych ilościach), oznaczyć stosunek zawartości $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, a także określić zawartość żelaza stosując odpowiednią procedurę kalibracyjną.

Typowe widmo mössbauerowskie zrównoważonych chondrytów zwyczajnych składa się z dwóch dubletów związanych z krzemianami: oliwinem $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ i piroksenem $(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ oraz dwóch sekstetów związanych z magnetyczną fazą metaliczną (stopy żelazo-nikiel) i z troiletem (FeS). W meteorytach, które przebywają dłużej w warunkach ziemskich pojawiają się dodatkowe dublety reprezentujące związki żelaza trójwartościowego, będące efektem procesu wietrzenia. Stopy żelazo-nikiel i troilit są fazami mineralnymi, które mogą powstawać tylko w warunkach kosmicznych. Na rys. 3 pokazane są widma mössbauerowskie chondrytów zwyczajnych należących do grup: H, L i LL.

Identyfikacja różnych składowych widma (podwidm), pochodzących od różnych faz mineralnych, dokonywana jest na podstawie ich parametrów nadsubtelnych. Dublety będące sygnałem od faz paramagnetycznych opisujemy dwoma parametrami: przesunięciem izomerycznym (IS) i rozszczepieniem kwadrupolowym (QS) (oba te parametry wyrażane są w mm/s). W sekstetach, które są sygnałem od faz mineralnych zawierających żelazo uporządkowane magnetycznie, trzecim parametrem mössbauerowskim jest wartość wewnętrznego pola magnetycznego podawanego w teslach. Dla troilitu

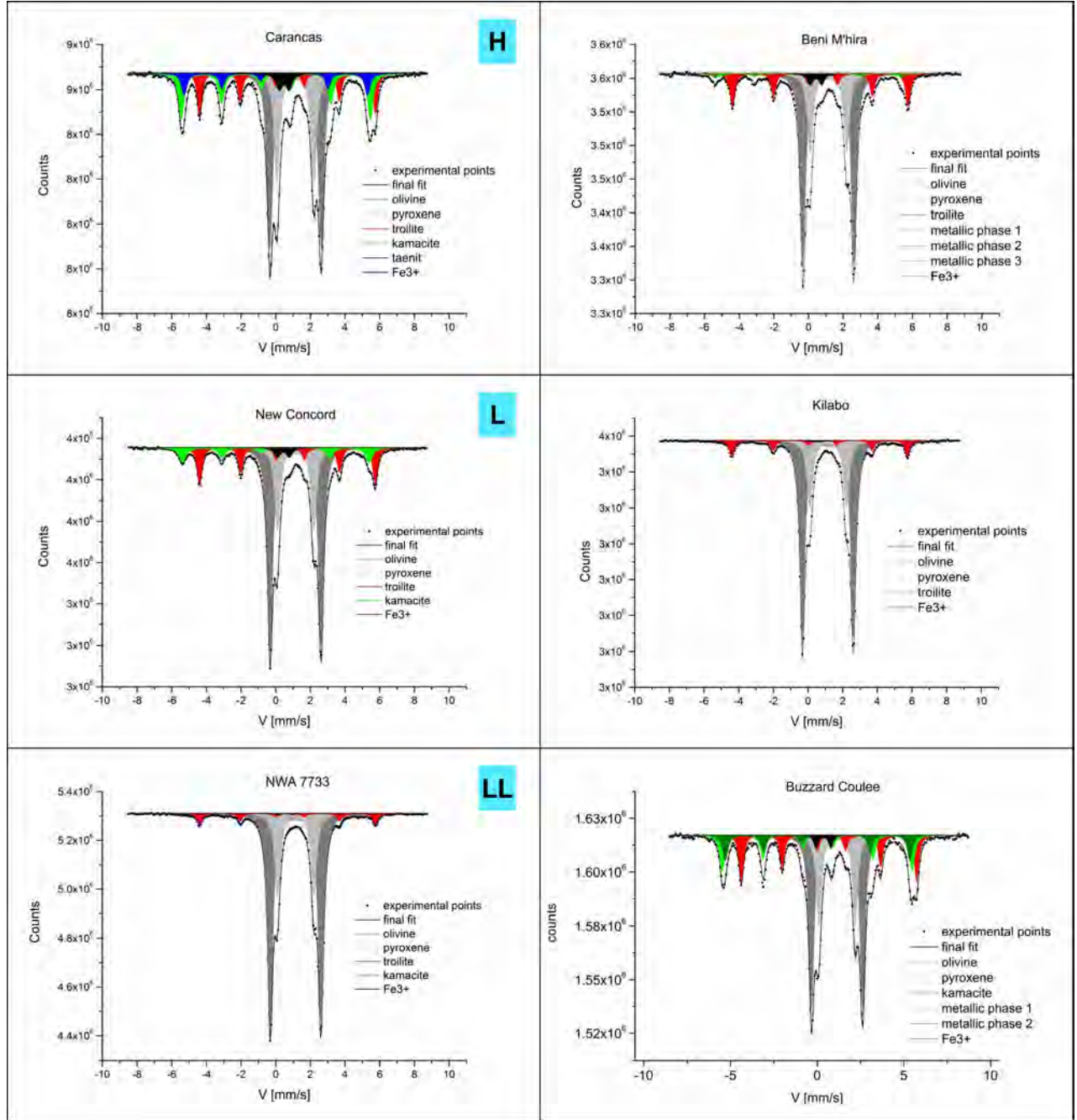
powinien być wyznaczany również dodatkowy parametr – kąt θ (θ), który jest kątem między główną osią gradientu pola elektrycznego i kierunkiem wewnętrznego pola magnetycznego. Z tego powodu widmo troilitu jest nietypowe i stosunkowo łatwo jest odróżnić je od składowych pochodzących od innych faz mineralnych. Na podstawie pola powierzchni, ograniczonej przez poszczególne składowe widma (podwidma), można oszacować proporcje pomiędzy udziałem żelaza w poszczególnych fazach reprezentujących te składowe.

Bardzo łatwo zauważyć, że widma mössbauerowskie chondrytów zwyczajnych zrównoważonych, sklasyfikowanych jako H, L i LL, charakteryzuje pewna systematyczność odnosząca się do proporcji pomiędzy powierzchniami składowych, związanych z czterema głównymi fazami mineralnymi: oliwinem, piroksenem, fazą metaliczną i troiletem. Aby przekonać czytelników, jak zauważalnie różne są widma pochodzące od meteorytów z różnych grup, na rys. 3 po lewej stronie pokazane zostały przykładowe widma chondrytów zwyczajnych H, L oraz LL, a po prawej stronie trzy widma innych chondrytów zwyczajnych bez podania, do jakiej grupy zostały zaklasyfikowane. Identyfikacja tych meteorytów jako H, L lub LL nie będzie trudna, jeśli porównamy proporcje poszczególnych składowych widm po obu stronach rysunku.

Wykorzystując tego typu obserwacje laboratoria mössbauerowskie w Kanpur, Jekaterinburgu i Canberze zaproponowały metodę klasyfikacji chondrytów zwyczajnych na podstawie wykresów typu 2D przedstawiających różne kombinacje powierzchni widm spektralnych, wyrażonych jako procent powierzchni całego widma (rys. 4). Metody te były jakościowe i subiektywne; ich opis można znaleźć w pracy [11].

Nasz zespół postanowił opracować obiektywną metodę ilościową, wykorzystując analizę czterech głównych faz mineralnych widocznych w widmie mössbauerowskim. Artykuł o tej metodzie, nazwanej przez nas 4M (od angielskojęzycznych terminów *meteorites*, *Mössbauer spectroscopy*, *multidimensional discriminant analysis*, *Mahalanobis distance*) został opublikowany w 2019 [9].

W metodzie 4M badana próbka zrównoważonego chondrytu zwyczajnego jest opisywana wektorem [ol (oliwin, pyr (piroksen), met (stop FeNi), tr (troilit)], którego 4 składowe stanowią udziały procentowe powierzchni podwidm mössbauerowskich związanych z oliwinem, piroksenem, metalem i troiletem, co odpowiada w przybliżeniu procentowemu rozkładowi żelaza w tych czterech fazach. Znając wartości składowych tego wektora możemy obliczyć jego odległość od każdego z trzech klastrów (H, L i LL), stworzonych z wykorzystaniem reprezentatywnej bazy danych mössbauerowskich. Na przykład klaster H składa się z wektorów typu [ol, pyr, met, tr] utworzonych na podstawie mössbauerowskich pomiarów chon-



Rys. 3. Widma mössbauerowskie trzech zrównoważonych chondrytów zwyczajnych: Carancas – grupa H, New Concord – grupa L, NWA 7730 – grupa LL oraz testowanych próbek: meteoryt Beni M'hira (grupa L), meteoryt Kilabo (grupa LL) i Meteoryt Buzzard Coulee (grupa H)

drytów zwyczajnych z grupy H. Podobnie tworzone są klastry L i LL. Ze względu na własności wektorów bazy, postanowiliśmy wyznaczać odległość badanej próbki od klastrów grup H, L i LL korzystając z odległości Mahalanobisa [15]. Odległość Mahalanobisa nie jest wielkością intuicyjnie oczywistą, dlatego też została wprowadzona wielkość określająca podobieństwo badanej próbki do klastra grupy H, L lub LL. Jest to *poziom podobieństwa* zdefiniowany poniższymi wzorami

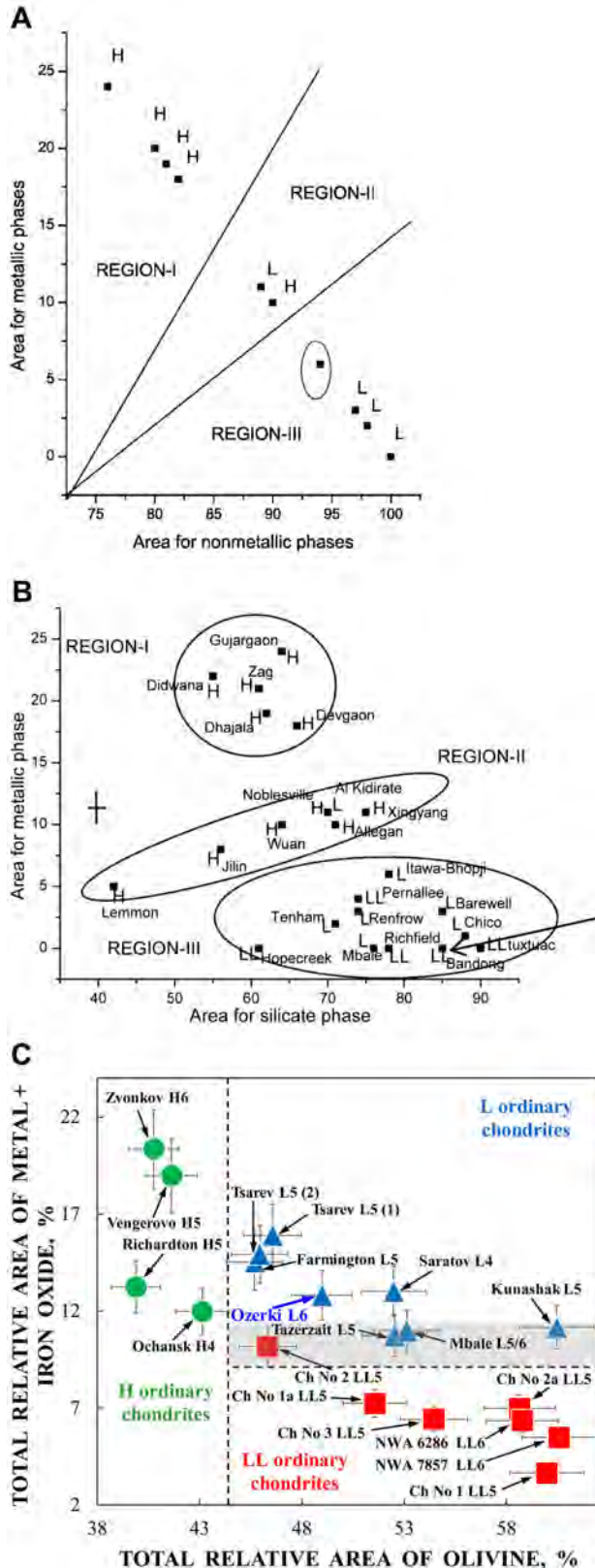
$$S_{\text{cluster}} = (1 - 2P(y \leq d_M, s_{\text{aver}}))100\%,$$

$$P(y \leq d_M; s_{\text{aver}}) = \int_0^{d_M} \frac{1}{s_{\text{aver}} \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-y^2}{2s_{\text{aver}}^2}} dy,$$

gdzie d_M – odległość Mahalanobisa badanych punktów od konkretnego klastra, s_{aver} – średnia wariancja wielowymiarowego klastra.

W pracy [16] podany jest konkretny przykład zastosowania metody 4M do klasyfikacji meteorytu Villalbeto de la Pena, który spadł w Hiszpanii w roku 2004. Kilka lat później grupa mössbauerowska z Hiszpanii starała się sklasyfikować badany meteoryt na podstawie wspomnianych metod jakościowych, analizując wykresy typu 2D.

Próba ta, opisana w artykule [17], nie powiodła się. Natomiast zastosowanie metody 4M do określenia grupy, do jakiej należy badany meteoryt, przy wykorzystaniu danych z tej publikacji, dało poprawny wynik (tab. 1).



Rys. 4. Próby klasyfikowania chondrytów zwyczajnych na podstawie powierzchni spektralnych poszczególnych składowych wyznaczonych z widm mössbauerowskich [12, 13, 14]

Tab. 1. Rozkład procentowy żelaza w czterech głównych fazach meteorytu Villalbeto de la Pena [17]

Oliwin [%]	Piroksen [%]	Metal [%]	Troilit [%]
60,0	24,6	4,3	11,1

Na podstawie powyższych danych obliczono poziomy podobieństwa przedstawione w tab. 2. Wyniki te uzyskano wykorzystując dane z bazy aktualnej w 2021 [35], tj. w chwili pisania artykułu [9]. Poziom podobieństwa do klastra L, wyznaczony za pomocą metody 4M, jest zdecydowanie największy, więc wyniki te potwierdzają, że badany meteoryt należy do grupy L, co jest zgodne z rezultatem określonym za pomocą klasycznej metody klasyfikacji.

Tab. 2. Poziom podobieństwa meteorytu Villalbeto de la Pena do różnych grup chondrytów zwyczajnych

Poziom podobieństwa do grupy		
H	L	LL
8,3%	44,0%	19,9%

Istotnym elementem metody 4M jest baza danych opisująca klastry H, L i LL [35]. Klaster H powstał na podstawie analizy 32 mössbauerowskich widm chondrytów zwyczajnych z grupy H, klaster L – 31 widm chondrytów zwyczajnych z grupy L, a klaster LL – 24 widm chondrytów zwyczajnych z grupy LL. W tabeli 3 podane są wielkości charakteryzujące klastry (wartości średnie i niepewności parametrów): oliwin (ol), piroksen (pir), metal (met) i troilit (tr).

Próbki meteorytów poddawane pomiarom mössbauerowskim na PW zwykle mają masę od 50 mg do 160 mg. Sproszkowane umieszczane są w specjalnych uchwytach (o średnicy czynnej 1,4 cm). Przygotowane w ten sposób próbki nie zawsze spełniają założenia przybliżenia cienkiego absorbentu, jednak nie ma to wpływu na skuteczność metody 4M zastosowanej do klasyfikacji badanych chondrytów, co zostało wykazane w pracy [18].

W widmie mössbauerowskim chondrytów zwyczajnych nie zrównoważonych obserwuje się fazy mineralne występujące także w zrównoważonych chondrytach zwyczajnych, takie jak oliwin, piroksen, troilit, metal. Oprócz tych znanych już nam faz mineralnych można zaobserwować wyraźny dublet [19], który do tej pory był przez nas interpretowany jako efekt wietrzenia. Dublet ten jest związany z powstawaniem krzemianów warstwowych.

W przyszłości będziemy się starali metodę 4M zaadaptować również do badań nie zrównoważonych chondrytów zwyczajnych.

Tab. 3. Zakresy wartości i wartości średnie (wraz z wariancjami) powierzchni pod podwładnymi związanymi z czterema głównymi fazami mineralnymi (wyrażone w procentach całej powierzchni widma), zebrane w bazie danych 87 mössbauerowskich pomiarów zrównoważonych chondrytów zwyczajnych z grup H, L i LL ([35], baza dostępna pod adresem <http://4m.woreczko.pl/all.php>)

Faza mineralna	H (liczebność: 32)		L (liczebność: 31)		LL (liczebność: 24)	
	Zakres wartości	Wartość średnia	Zakres wartości	Wartość średnia	Zakres wartości	Wartość średnia
Oliwin	22,4-48,0	37,4±6,1	38,7-60,5	48,9±5,0	50,0-74,0	60,6±6,2
Piroksen	17,2-33,0	24,0±4,2	18,0-26,7	22,7±2,5	13,6-32,9	23,3±5,2
Metal	9,0-35,1	18,9±7,9	4,6-16,1	9,3±3,4	0,0-7,8	2,7±2,1
Troilit	11,3-23,0	16,2±2,5	7,6-22,4	15,5±2,9	3,7-15,4	10,7±3,2

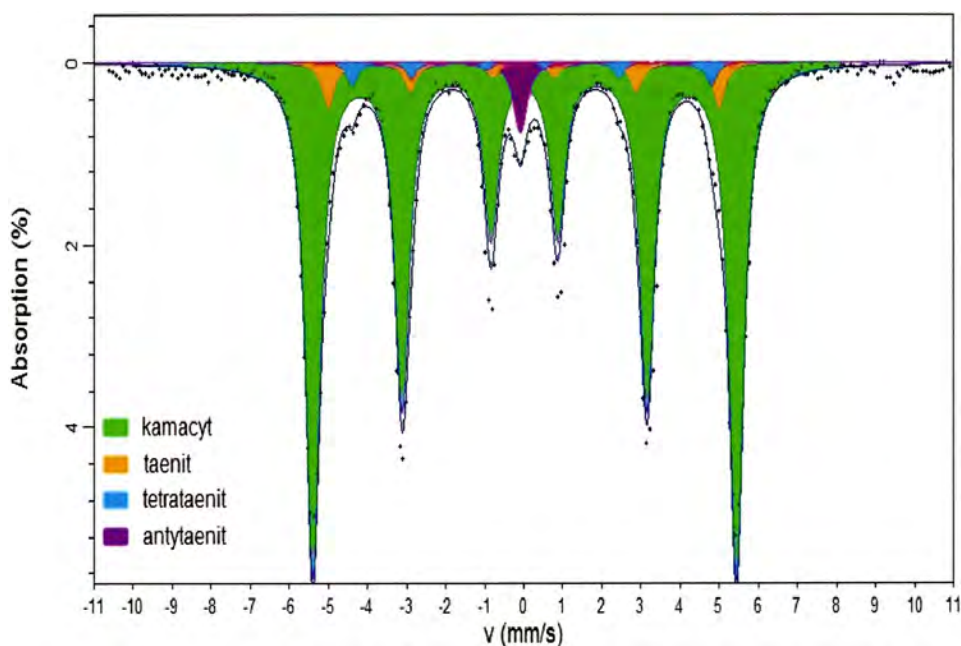
Nowe minerały w meteorycie Morasko

Meteoryt Morasko to nazwa fragmentów meteoroidu, który rozpadł się w atmosferze kilka tysięcy lat temu. Jego elementy spadły na tereny, które obecnie są północną częścią Poznania, a przed laty były małą osadą o nazwie Morasko. Jest to meteoryt żelazny, którego części wciąż są odnajdowane na terenach rezerwatu przyrody Meteoryt Morasko. Całkowita masa odnalezionych fragmentów wynosi ponad 1 tonę. Meteoryt ten był obiektem badań wielu laboratoriów [20, 21, 22]. Uśredniony skład chemiczny meteorytu Morasko jest następujący: żelazo 93%, nikiel 6,56%, kobalt 0,46%, miedź 130 ppm (ang. *parts per million*), gal 102 ppm, german 500 ppm, arsen 11,5 ppm, wolfram 1,7 ppm, złoto 1,47 ppm, iryd 1,0 ppm. Natomiast jego główny skład mineralny to: kamacyt, taenit, troilit, grafit, schreibersyt, rhabdyt, cohenit; najczęstsze minerały akcesoryczne to whitlockit, sfaleryt, moraskoit i czochralskit.

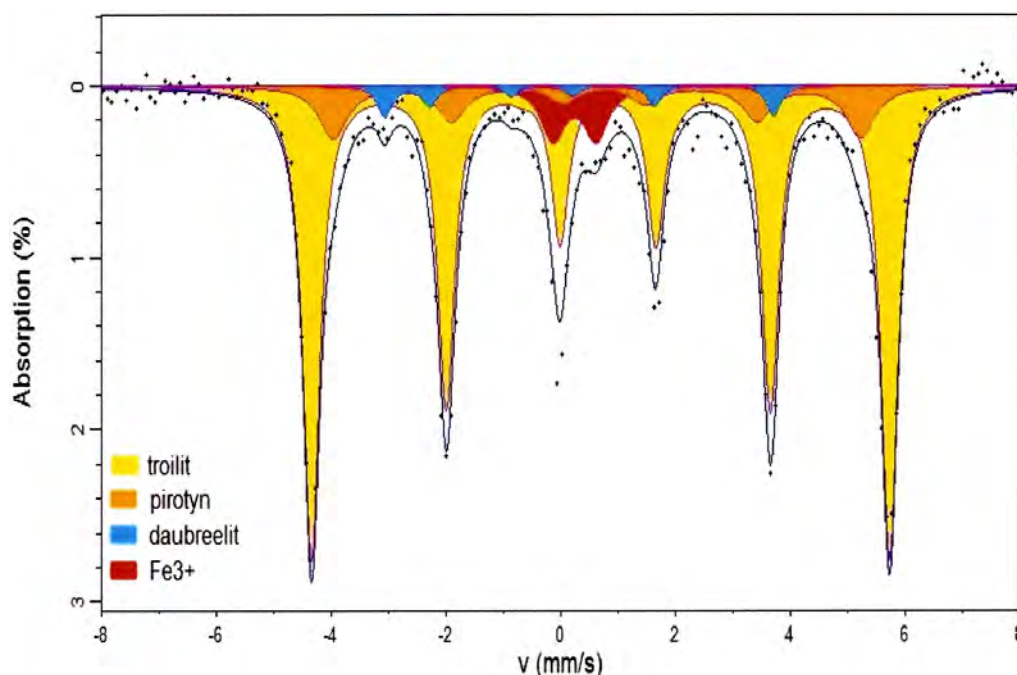
Postanowiliśmy sprawdzić, czy w meteorycie Morasko występują jeszcze inne minerały zawierające że-

lazo. W tym celu zostały przygotowane trzy próbki zawierające głównie wyizolowany kamacyt, troilit i taenit. W widmach mössbauerowskich tych próbek, otrzymanych w temperaturze pokojowej, zidentyfikowano dodatkowe minerały: tetrataenit, antytaenit i daubreelit. Widma mössbauerowskie wyizolowanego kamacytu i wyizolowanego troilitu przedstawione są na rys. 5 i rys. 6, a wyznaczone na ich podstawie parametry mössbauerowskie w tab. 4.

Szczegółowe badania mössbauerowskie [23] wyizolowanych frakcji mineralnych meteorytu Morasko ujawniły współistnienie kilku faz z układu Fe-Ni, a zwłaszcza paramagnetycznej fazy o dużej zawartości niklu. Warto zaznaczyć, że tetrataenit i antytaenit posiadają zbliżone parametry sieciowe, dlatego mogły zostać jednoznacznie zidentyfikowane jedynie metodą spektroskopii mössbauerowskiej ze względu na paramagnetyczny charakter fazy antytaenitu, którą w widmie reprezentuje dobrze wyodrębniona pojedyncza linia. Taka identyfikacja została wykonana po raz pierwszy dla meteorytu żelaznego znalezione go w Polsce.



Rys. 5. Widmo mössbauerowskie próbki zawierającej wyizolowaną fazę kamacytu [23]



Rys. 6. Widmo mössbauerowskie próbki zawierającej wyizolowaną fazę siarczkową [23]

Tab. 4. Parametry mössbauerowskie i procentowa zawartość faz mineralnych w próbkach trzech wyizolowanych faz: kamacytu, troilitu i taenitu [23]

Próbki wyizolowane	Minerał	IS [mm/s]	QS [mm/s]	H[T]	θ [°]	Zawartość [%]
Kamacytu	Kamacyt	$0,02 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$	$33,6 \pm 0,1$	–	87
	Taenit	$0,00 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,01$	$31,0 \pm 0,01$	–	7
	Tetrataenit	$0,00 \pm 0,01$	$0,43 \pm 0,02$	$28,5 \pm 0,01$	–	3
	Antitaenit	$0,08 \pm 0,02$	–	–	–	3
Troilitu	Troilit	$0,76 \pm 0,01$	$-0,84 \pm 0,06$	$30,8 \pm 0,01$	48 ± 9	76
	Pirotyt	$0,7 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,06$	$28,5 \pm 0,07$	48 ± 9	14
	Fe ³⁺	$0,25 \pm 0,07$	$0,75 \pm 0,11$	–	–	6
	Daubreelit	$0,00 \pm 0,09$	$0,65 \pm 0,15$	$21,0 \pm 0,07$	–	4
Taenitu	Taenit (uporządkowany)	$0,14 \pm 0,09$	$0,05 \pm 0,15$	$30,4 \pm 0,7$	–	2
	Taenit (nieuporządkowany)	$0,06 \pm 0,03$	$-0,12 \pm 0,06$	$34,0 \pm 0,02$	–	12
	Tetrataenit	$0,00 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,09$	$29,0 \pm 0,02$	–	7
	Antytaenit	$-0,17 \pm 0,04$	–	–	–	8
	Cohenit	$0,20 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,08$	$21,0 \pm 0,1$	–	64

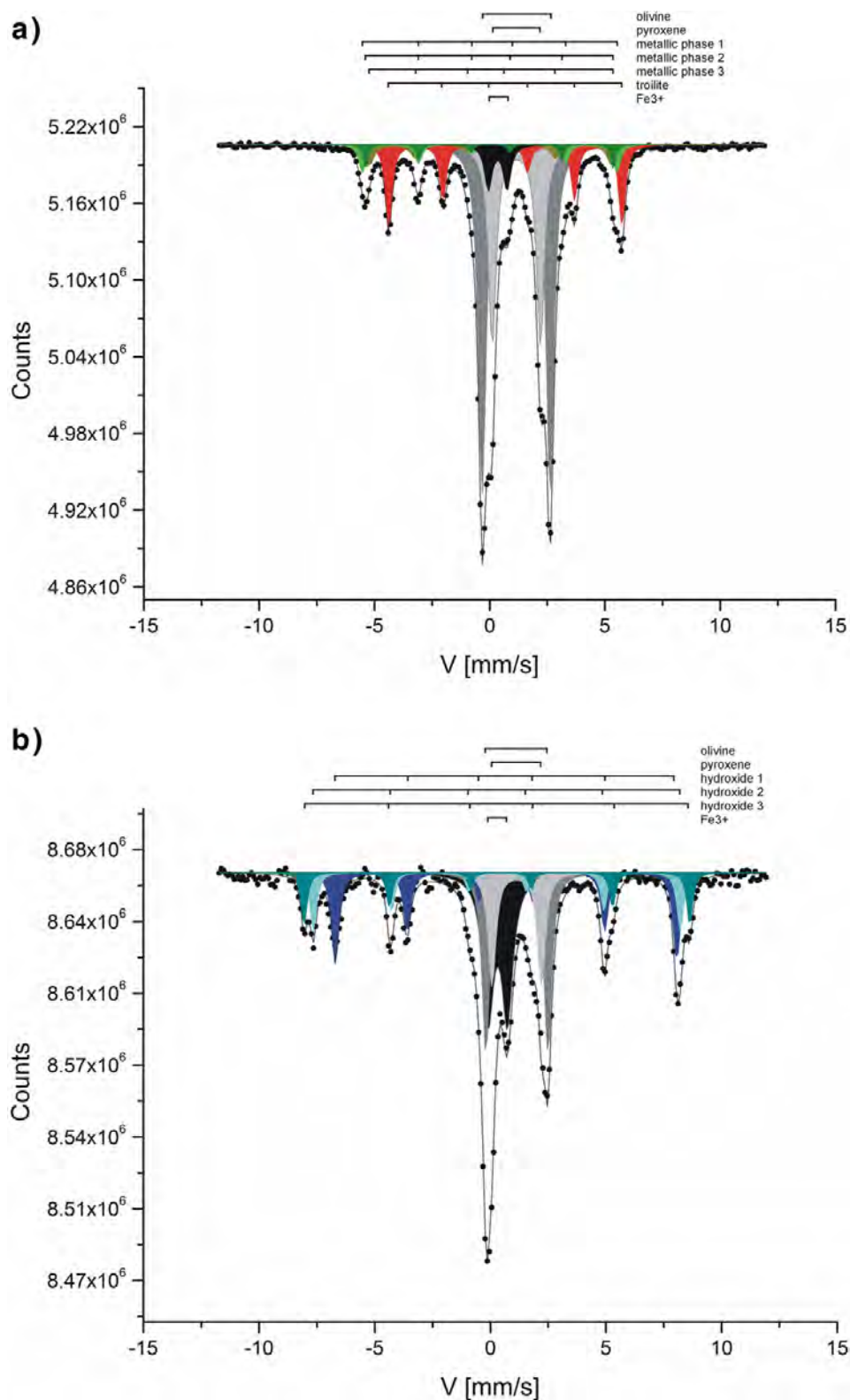
Odróżnianie prawdziwych meteorytów od skał meteorytopodobnych

Dosyć często zdarza się, że do naszego laboratorium zgłaszają się osoby z prośbą o zbadanie skały, o której sądzą, że może być meteorytem. Omówimy cztery takie skały, z których dwie zostały już zarejestrowane jako prawdziwe meteoryty, a dwie pozostałe okazały się próbkami meteorytopodobnymi (ang. *meteorwrong*).

Meteoryt Pułtusk, to obiekt, który rozpadł się w atmosferze, a następnie spadł w postaci deszczu meteory-

towego (30.01.1868). Fragmenty tego meteorytu do dziś znajdują się na bardzo dużym obszarze w okolicy Pułtusk. Całkowita masa odnalezionych fragmentów wynosi kilkaset kilogramów. Meteoryt Pułtusk został zarejestrowany jako chondryt zwyczajny typu H5.

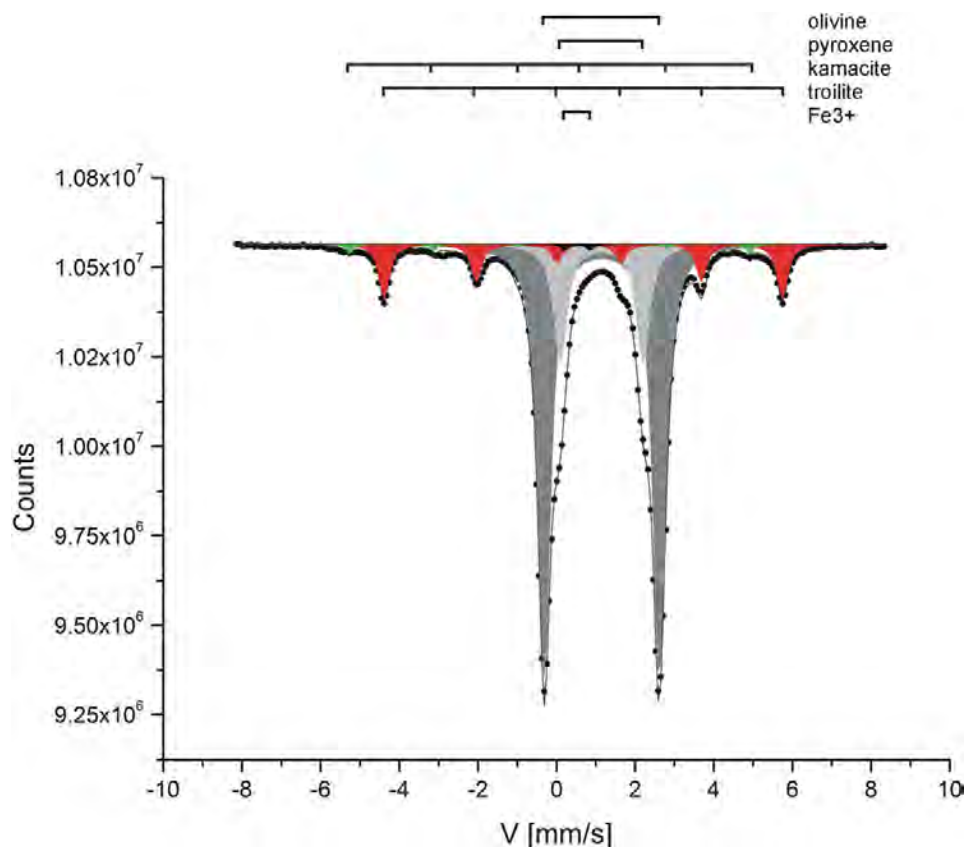
Jedną ze skał znalezionych w pobliżu miejsca upadku meteorytu Pułtusk przekazano nam do identyfikacji (próbka nr 1). Na rys. 7 widoczne są dwa widma mössbauerowskie: widmo zweryfikowanej wcześniej próbki meteorytu Pułtusk (a) i widmo fragmentu przekazanego



Rys. 7. Widmo mössbauerowskie meteorytu Pułtusk (a) oraz skały znalezionej w pobliżu Pułtusk – próbki nr 1 (b) [24]

nam do badania (b). W zweryfikowanej próbce meteorytu Pułtusk zidentyfikowano podwidma pochodzące od oliwinu, piroksenu, trzech metali, troilitu i żelaza trójwartościowego (rys. 7a). Obecność podwidm metali i troilitu świadczy o tym, że próbka ta pochodzi z ko-

smosu. W drugim widmie przekazanej nam do badania próbki stwierdzono podwidma pochodzące od oliwinu, piroksenu, trzech różnych wodorotlenków oraz żelaza trójwartościowego (rys. 7b). Jest to typowe widmo silnie zwietrzałej skały ziemskiej.



Rys. 8. Widmo mössbauerowskie fragmentu meteorytu, który spadł w pobliżu Leoncina – próbka nr 2 [24]

Na rys. 8 pokazano widmo mössbauerowskie małego fragmentu meteorytu, który spadł na Ziemię w sierpniu 2012 w okolicy miejscowości Leoncin (próbka nr 2). Meteoryt ten był niewielkich rozmiarów (ciężar 111 g), a cała powierzchnia znalezionej próbki była pokryta skorupą obtopieniową, co stanowiło dodatkowy argument świadczący o tym, że obiekt ten jest meteorytem. W widmie mössbauerowskim tej próbki można zidentyfikować metal, troilit, oliwin i piroksen. Obecność podwidm metali i troilitu jest dowodem na to, że skała z Leoncina pochodzi z kosmosu. Zastosowanie metody 4M identyfikuje ten meteoryt jako chondryt zwyczajny z grupy LL.

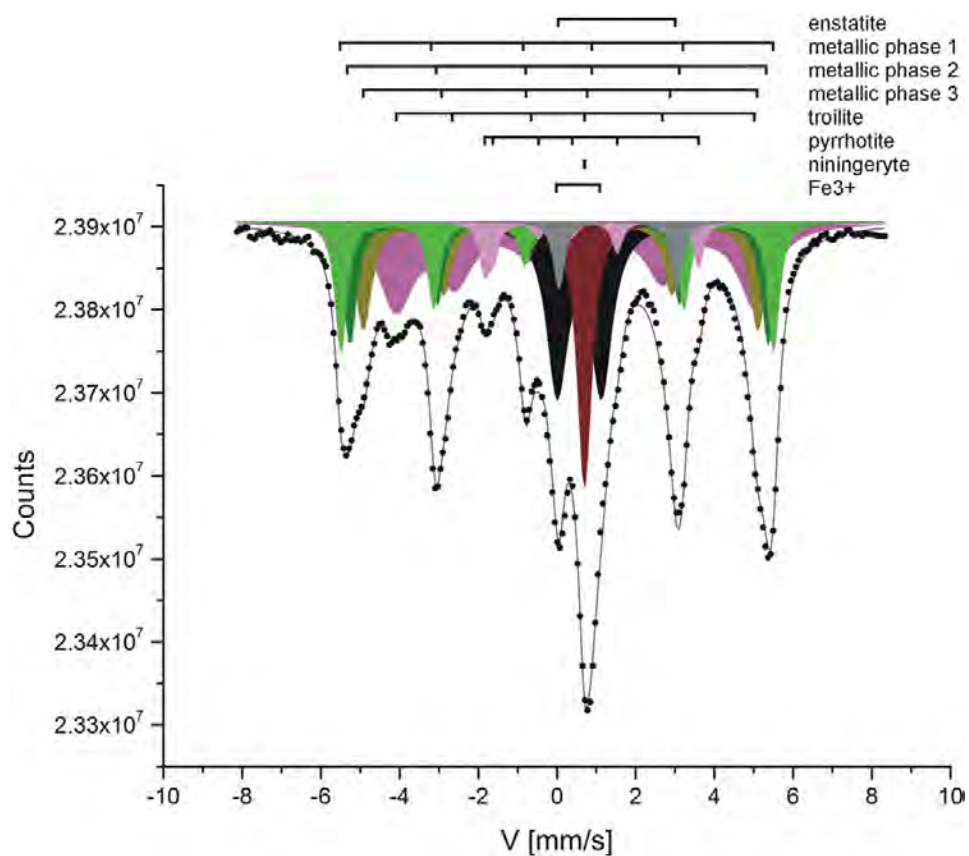
Kolejnym przedmiotem badań był okaz kupiony na giełdzie meteorytowej w Niemczech – próbka nr 3. Widmo mössbauerowskie fragmentu tego okazu pokazane jest na rys. 9. Można w nim zaobserwować podwidma pochodzące od 3 faz metalicznych, troilitu, pirotynu, niningerytu i enstatytu. Identyfikacja takich podwidm przemawia zdecydowanie za tym, że jest to obiekt pochodzenia kosmicznego. Po przeprowadzeniu dodatkowych badań okaz ten został zarejestrowany jako achondryt enstatytowy o nazwie NWA 13266.

Obiekt, który spadł gdzieś w Europie – taką informację otrzymaliśmy od właścicieli próbki nr 4, której widmo mössbauerowskie zostało przedstawione na rys. 10. W tej próbce zidentyfikowaliśmy pięć faz mi-

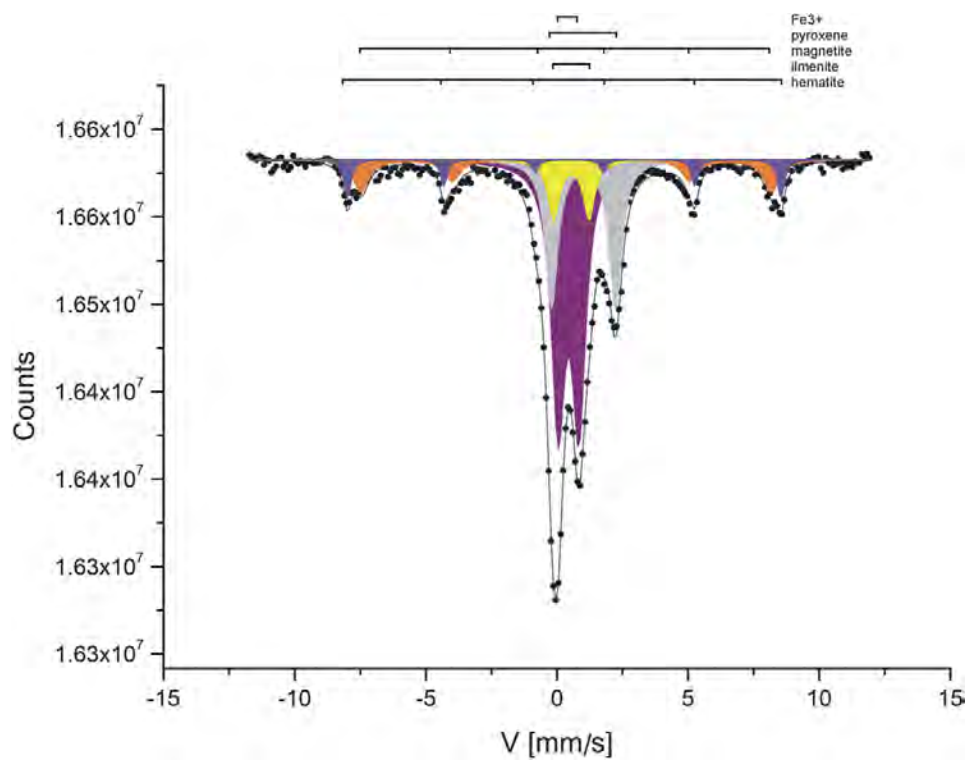
neralnych: piroksen, magnetyt, ilmenit, hematyt i dwulet żelaza trójwartościowego, który stanowi ponad 45% całkowitej powierzchni spektralnej. Taki skład widma mössbauerowskiego nie świadczy o kosmicznym pochodzeniu próbki. Nawet po przyjęciu założenia, że mamy do czynienia z próbką achondrytu, nie jest możliwe wyjaśnienie bardzo wysokiej zawartości żelaza trójwartościowego w obiekcie, którego spadek był obserwowany zaledwie kilka lat temu.

Badania meteorytów Baszkówka, Sołtmany, Allende oraz El Hammami

W opracowaniach widm mössbauerowskich meteorytu Baszkówka (był to pierwszy meteoryt badany przez naszą grupę) największym problemem było znalezienie poprawnych parametrów opisujących podwidmo troilitu. Wartości rozszczepienia kwadrupolowego zmieniały się bardzo gwałtownie, wartości χ^2 nie były satysfakcjonujące, a punkty doświadczalne bardzo złośliwie zbaczały poza krzywe teoretyczne. Przegląd literatury też nam w niczym nie pomógł. Wyniki ostatecznych dopasowań mössbauerowskich parametrów troilitu otrzymanych dla 19 meteorytów w 9 różnych laboratoriach wykazywały niezrozumiały rozrzut [25]. Pomogli nam Rivka Bauminer i Israel Nowik – współpracownicy z Racah Institute



Rys. 9. Widmo mössbauerowskie próbki kupionej na giełdzie meteorytowej w Niemczech – próbka nr 3 [24]



Rys. 10. Widmo mössbauerowskie obiektu, który spadł w Europie – próbka nr 4 [24]

of Physics w Jerozolimie. Podpowiedzieli, że troilit może być takim egzotycznym (kosmicznym) kryształem, w którym główna oś gradientu pola elektrycznego nie jest współliniowa z kierunkiem wewnętrznego pola magnetycznego. Przegląd literaturowy potwierdził to przypuszczenie [26]. Szczęśliwe zakończenie nastąpiło dzięki Israelowi Nowikowi, który udostępnił nam swój program dopasowujący widma mössbauerowskie przy uwzględnieniu kąta θ (θ), to znaczy kąta między główną osią gradientu pola elektrycznego a kierunkiem wewnętrznego pola magnetycznego. Wiedząc, że wartość kąta θ zależy od domieszek, które mogą być różne w ciałach macierzystych różnych meteorytów, postawiliśmy śmiałą hipotezę, że kąt θ może stać się parametrem wskazującym odpowiednie ciała macierzyste. Aby sprawdzić tę hipotezę, postanowiliśmy przeprowadzić badania mössbauerowskie 6 meteorytów. Dla 3 z nich kąt θ miał wartość $(61 \pm 1)^\circ$, a dla 3 pozostałych $(90 \pm 10)^\circ$. Kąt θ 61° otrzymaliśmy dla 2 meteorytów, o których wiadomo było, że mogą pochodzić z tego samego ciała macierzystego. Była to Baszkówka i Mt. Tazerzait. Przez jakiś czas sądziliśmy, że jesteśmy na dobrym tropie. Niestety okazało się, że problem jest bardziej skomplikowany ze względu na niejednoznaczność teoretycznych rozwiązań podających wartość kąta θ .

Transmisyjna spektroskopia mössbauerowska żelaza została wykorzystana do przeprowadzenia badań skorupy obtopieniowej meteorytu Sołtmany [27], która utworzyła się podczas jego przelotu przez atmosferę ziemską. Wyniki wykazały, że skład mineralny skorupy obtopieniowej jest zbliżony do składu mineralnego wnętrza meteorytu, tj. zawiera oliwin, piroksen, kamacyt, taenit, troilit i antytaenit o częściowo nieuporządkowanej strukturze, znaleziony po raz pierwszy w chondrycie Sołtmany. Stwierdzono zatem, że krótki czas przejścia meteorytu przez atmosferę i słaba przewodność cieplna skał chondrytowych powodują, że topienie ablacyjne odbywa się w wąskiej zewnętrznej strefie meteorytu, a w głębszej strefie skorupy obtopieniowej nie zachodzą istotne procesy rekrytalizacji, które mogłyby spowodować powstanie nowych faz mineralnych.

Meteoryty Allende oraz El Hammami badane były przez grupę mössbauerowską z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego [2, 3]. W przypadku chondrytu zwyczajnego El Hammami badania mössbauerowskie wykazały zawartość faz mineralnych: oliwinu, piroksenu i troilitu, jak również fazy metalicznej kamacytu, natomiast dla chondrytu węglatego Allende nie zaobserwowano obecności metalu, a żelazo występowało głównie w oliwinach. W obu meteorytach znaleziono również produkty wietrzenia w formie utlenionego żelaza Fe^{3+} , które stanowiło od 6% do 13% żelaza w badanych próbkach.

Misje kosmiczne i plany na przyszłość

Pierwszy pomysł wysłania na Marsa spektrometru mössbauerowskiego był opublikowany w 1988 [28]. Wkrótce, w ramach projektu naukowców z Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego powstał prototyp spektrometru Marmos [28, 29, 30].

Sprzęt przeznaczony do pracy w ramach misji kosmicznej powinien spełniać rygorystyczne wymagania i ograniczenia związane z warunkami, w jakich ma działać. W szczególności dotyczą one masy urządzeń, zużycia energii, odporności na wstrząsy, przeciążenia, zmiany ciśnienia i temperatury oraz promieniowania kosmicznego. Spektrometr mössbauerowski powinien móc badać próbki o różnym kształcie, a to wyklucza wykonywanie pomiarów w geometrii transmisyjnej. Zaprojektowany Marmos miał zatem pracować w geometrii rozproszeniowej, co pociągało za sobą konieczność użycia źródła promieniowania o aktywności 250–500 mCi. Należało również uwzględnić problemy związane z koniecznością izolacji spektrometru od wibracji podczas jego pracy, niewielkimi w tamtym czasie rozmiarami pamięci urządzeń zbierających i przetwarzających dane oraz bardzo ograniczoną szybkością przesyłania informacji.

Rozwój technologiczny umożliwiający miniaturyzację sprzętu i stopniowe rozwiązywanie wszystkich powyższych problemów sprawił, że pod koniec lat 90. XX w. międzynarodowy zespół naukowców pracujących pod kierunkiem Göstara Klingelhöfera na uniwersytecie Gutenberga w Moguncji w Niemczech skonstruował spektrometr MIMOS II (Miniaturisiertes Mössbauer Spektrometer) [31, 32]. MIMOS II cechował się małymi wymiarami ($5 \times 5 \times 9$ cm), ciężarem 400 g i poborem mocy 1 W oraz wyposażony był w źródło promieniowania gamma o początkowej aktywności 150 mCi. W styczniu 2004 w ramach misji MER (Mars Exploration Rover), prowadzonej przez Amerykańską Agencję Kosmiczną, dwie sondy zawierające jednakowe egzemplarze spektrometru umieszczone na łazikach Spirit i Opportunity wylądowały po przeciwnych stronach marsjańskiego globu, gdzie rozpoczęły badania gleby i skał zarówno powierzchniowych, jak i wydobywanych w wyniku wierceń. Pierwszy z nich realizował swoją misję do 2010, natomiast drugi aż do 2019, co znacznie przekroczyło planowany termin. Pomiary mössbauerowskie wykonywane były znacznie krócej (około 1000 dni) ze względu na malejącą z czasem aktywność źródła promieniowania gamma. Dane z pomiarów wykonanych podczas misji MER są dostępne w oryginalnej formie w Internecie na stronie Planetary Data System. Na podstawie tych danych na Politechnice Warszawskiej powstał katalog widm mössbauerowskich zebranych przez łazik Opportunity [33] dla różnych próbek, w zakresie temperatur 200–280 K.

Sukces tej misji kosmicznej [32, 34] zachęcił niektóre laboratoria do przygotowania planów wysłania podobnego spektrometru mössbauerowskiego na powierzchnię wybranych planetoid. Zespół polski, we współpracy z pracownią mössbauerowską Uniwersytetu Palackiego w Ołomuńcu, rozpoczął prace nad takim zmodyfikowaniem metody 4M, aby można było z niej korzystać w czasie misji kosmicznych. Jest oczywiste, że wówczas pomiary mogą być przeprowadzane tylko w geometrii odbiciowej (wstecznego rozproszenia, ang. *backscattering*). Wykonano wstępne badania, które polegały na

porównaniu pomiarów mössbauerowskich w geometrii transmisyjnej i odbiciowej dla dwóch próbek meteorytu Pułtusk. Wyniki tych pomiarów oraz wykorzystanie ich do metody 4M przedstawiono w tab. 5. Można zauważyć, że dla obu pomiarów poziom podobieństwa jest największy do grupy H, co jest zgodne z grupą określoną klasyczną metodą klasyfikacji. Rezultaty są bardzo obiecujące, jednak dla pełnej weryfikacji należy przeprowadzić analizę znacznie większej liczby różnych próbek meteorytowych, co mamy w naszych obecnych planach badawczych.

Tab. 5. Porównanie wyników identyfikacji meteorytu Pułtusk metodą 4M na podstawie pomiarów mössbauerowskich wykonanych w geometrii transmisyjnej i odbiciowej

Meteoryt (geom. pomiaru)	Grupa	Minerał				Odległość Mahalanobisa			Podobieństwo			Przynależność wg metody 4M
		ol	pyr	met	tr	H	L	LL	H	L	LL	
Pułtusk (transmisyjna)	H	38,0	23,8	16,0	16,4	1,20	2,87	6,94	71,08%	23,70%	0,60%	H
Pułtusk (odbiciowa)	H	32,0	20,1	36,5	8,7	3,41	9,11	22,48	29,04%	0,02%	0,00%	H

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować członkom Polskiego Towarzystwa Meteorytowego za udostępnienie próbek do badań i wsparcie naukowe.

Literatura

- [1] Gałązka-Friedman J., et al., Distribution of iron among metallic, sulphide and silica phases in the new polish chondrite Baszkówka, *International Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect*, abstrakt, ISIAE 1996, Johannesburg 1996.
- [2] Zarek W., et al., Mossbauer study of the El Hammami olivine-bronzite meteorite. *Nukleonika*, 49(suppl. 3), 2004, 59-62.
- [3] Ludwig A., et al., The Investigations of chondritic meteorites by X-ray diffraction and Mössbauer effect methods, *Acta Physica Polonica A*, 100(5), 2001, 761-765.
- [4] Grady M.M., et al., *Atlas of meteorites*, Cambridge University Press, Cambridge 2014.
- [5] McSween H.Y. Jr, Huss G.R., *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge 2010, 482-517.
- [6] Hutchison R., et al., *Chemical and Isotopic Synthesis*, Series: Cambridge Planetary Science, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
- [7] Wood J., The chondrite types and their origins. In *Chondrites and the protoplanetary disk*, edited by Krot A. N., Scott E. R. D., Reipurth B., ASP conference series, 341, San Francisco, California: Astronomical Society of the Pacific, 2005, 953-971.
- [8] Liffman K., Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk Kaua'i, Hawai'i, 2004, *Meteoritics and Planetary Science*, 41(1), 2006, 3-6.
- [9] Woźniak M., et al., Application of Mössbauer spectroscopy, multidimensional discriminant analysis, and Mahalanobis distance for classification of equilibrated ordinary chondrites, *Meteoritics and Planetary Science*, 54, 2019, 1828-1839.
- [10] Łuszczek K., *Chondryty zwyczajne i ich ciała macierzyste*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2021.
- [11] Gałązka-Friedman J., et al., Application of Mössbauer spectroscopy for classification of ordinary chondrites – different database and different methods, *Hyperfine Interactions*, 11, 2020, 241.
- [12] Verma H.C. et al., Mössbauer spectroscopic studies of an oxidized ordinary chondrite fallen at Itawa-Bhopji. India, *Hyperfine Interactions*, 142, 2002, 643-652.
- [13] Verma H.C., et al., Systematics of Mössbauer absorption areas in ordinary chondrites and applications to a newly fallen meteorite in Jodhpur. India, *Meteoritics and Planetary Science*, 38, 2003, 963-967.
- [14] Oshtrakh M.I., et al., Variability of Chelyabinsk meteoroid stones studied by Mossbauer spectro-

- scopy and X-ray diffraction, *Spectrochimica Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 219, 2019, 206-224.
- [15] Mahalanobis P.C., On the generalized distance in statistics, *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, 2, 1936, 49-55.
- [16] Gałązka-Friedman J., et al., 4M method – new application of Mössbauer spectroscopy to classification of meteorites. How it works?, *Hyperfine Interaction*, 242(55), 2021.
- [17] Llorca J., et al., The Villalbeto de la Pena meteorite fall: III. Bulk chemistry, porosity, magnetic properties, ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy and Raman spectroscopy, *Meteoritics and Planetary Science*, 42(suppl. 8), 2007, A177-A182.
- [18] Jakubowska M., et al., The influence of sample thickness on results of Mössbauer spectroscopy of ordinary chondrites and their classification, *Hyperfine Interactions*, 245(1), 2024, 1-13.
- [19] Menzies O.N., et al., A Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction study of ordinary chondrites: Quantification of modal mineralogy and implications for redox conditions during metamorphism, *Meteoritics and Planetary Science*, 40, 2005, 1023-1042.
- [20] Karwowski Ł., et al., Moraskoite, $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$, a new mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland), *Mineralogical Magazine*, 79(2), 2015, 387-398.
- [21] Pilski A.S., et al., Low-Ir IAB irons from Morasko and other locations in central Europe: One fall, possibly distinct from IAB-MG, *Meteoritics and Planetary Science*, 48(12), 2013, 2531-2541.
- [22] Karwowski Ł., et al., Czochralskiite, $\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$, a second new mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland), *European Journal of Mineralogy*, 28(5), 2016, 969-977.
- [23] Wojnarowska A., et al., New mineralogical phases identified by Mössbauer measurements in Morasko meteorite, *Hyperfine Interactions*, 186(1), 2008, 167-171.
- [24] Bogusz P., et al., Mössbauer spectroscopy as a useful method of distinguishing between true and false meteorites, *Hyperfine Interactions*, 240, 2019, 126.
- [25] Gałązka-Friedman J., et al., Comparative Mössbauer studies of the Baszkówka ordinary chondrite and some other meteorites, *Geological Quarterly*, 45(3), 2001, 319-326.
- [26] Kruse O., Mössbauer and X-ray study of the effects of vacancy concentration in synthetic hexagonal pyrrhotites, *Am. Mineral*, 75, 1990, 755-763.
- [27] Karwowski Ł., et al., Mössbauer studies of fusion crust of the Sołtmany meteorite, *Acta Physica Polonica A*, 134(5), 2018, 1076-1079.
- [28] Gałązka-Friedman J., The investigation of the surface of terrestrial planets, *Postępy Astronomii*, 36, 1988, 233.
- [29] Gałązka-Friedman J., Juchniewicz J., Martian Mössbauer Spectrometer MarMös, Project Proposal, Space Research Center, Polish Academy of Sciences, February 1989.
- [30] Gałązka-Friedman J., et al., Martian Mössbauer spectrometer, w: K. Szegoe (ed.), *Environmental Model of Mars*, 2, Pergamon Press, Oxford, UK, 1991, 129-132.
- [31] Klingelhöfer G., et al., Mössbauer spectroscopy in space, *Hyperfine Interactions*, 95, 1995, 305-339.
- [32] Klingelhöfer G., et al., Athena MIMOS II Mössbauer spectrometer investigation, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8067, 2003, 1-18.
- [33] Maliszewski A., et al., The Catalogue of Martian Mössbauer Spectra, *Acta Physica Polonica A*, 119, 2011, 10-11.
- [34] Morris R.V., et al., Mineralogy at Gusev Crater from the Mössbauer Spectrometer on the Spirit Rover, *Science*, 305(5685), 2004, 833-836.
- [35] Metoda 4M – 4M-BASE-v2n, <http://4m.woreczko.pl/> (dostęp 25.05.2024).

Fizyka w mikroskali, czyli o kroplach Pickeringa, mikrokapsułkach oraz strukturach *liquid marbles*

Physics on a microscale. Pickering droplets, microcapsules and *liquid marbles*

Tomasz Kubiak*

Akademia Nauk Stosowanych im. H. Cegielskiego w Gnieźnie

Abstrakt. Mikrostruktury typu rdzeń-powłoka ze względu na ogromny potencjał aplikacyjny są coraz powszechniej wytwarzane i badane przez fizyków. Szczególne zainteresowanie budzą sferyczne obiekty złożone z ciekłego rdzenia i zaadsorbowanych na jego powierzchni cząstek stałych, które tworzą otoczkę. Tak zbudowane krople Pickeringa, mikrokapsułki oraz struktury *liquid marbles* zdolne są do bezpiecznego transportowania i kontrolowanego uwalniania substancji aktywnych, w tym leków przeciwnowotworowych. W niniejszym artykule przedstawiono metodę, wykorzystującą pole elektryczne do formowania kropli Pickeringa zarówno z powłoką jednorodną, jak i heterogeniczną (janusową oraz łaciątą). Omówiono również sposób wzmacniania pokrycia wspomnianych kropli w celu uzyskania mikrokapsulek oraz strategię kontrolowanego wyzwalania ich zawartości z wykorzystaniem bodźca ultradźwiękowego. W ostatniej części tekstu przybliżono metody formowania i funkcjonalizowania struktur *liquid marbles*.

Słowa kluczowe: krople Pickeringa, mikrokapsułki, kontrolowane wyzwalanie, ultradźwięki, *liquid marbles*, marble

Abstract. Core-shell microstructures due to their great application potential are increasingly produced and studied by physicists. Spherical objects composed of a liquid core and solid particles adsorbed on its surface and forming a shell are of particular interest. Pickering droplets, microcapsules and liquid marbles that have such a structure are capable of safely transporting and controlled release of active substances, including anticancer drugs. This article presents an electric field based method of forming Pickering droplets both with a homogeneous and heterogeneous (Janus and patchy) coating. The method of strengthening the shells of the mentioned droplets in order to obtain microcapsules and the strategy of controlled release of their content using an ultrasonic stimulus are also discussed. The last part of the text shows the techniques of forming and functionalizing liquid marbles.

Keywords: Pickering droplets, microcapsules, controlled release, ultrasound, liquid marbles

Projektowanie, wytwarzanie i charakteryzowanie mikrostruktur coraz częściej absorbuje uwagę naukowców, którzy zajmują się biofizyką, fizyką materii miękkiej czy inżynierią materiałową, interdyscyplinarne badania eksperymentalne w tym zakresie są bowiem zorientowane na dostarczenie praktycznych rozwiązań, mogących zrewolucjonizować różne aspekty naszego życia. W przemyśle spożywczym, naftowym, branży kosmetycznej a przede wszystkim w farmacji oraz medycynie szczególnie duży potencjał aplikacyjny mają emulsje Pickeringa, mikrokapsułki oraz opłaszczane nano- lub mikrocząstkami kropelki o angielskiej nazwie *liquid marbles*. Zastosowania biomedyczne wymienionych struktur wiążą się m.in. z bezpiecznym przenoszeniem cząsteczek biologicznych oraz substancji aktywnych, np. leków przeciwnowotworowych. Ładunek zamykamy wewnątrz powłoki, cechującej się ograniczoną przepuszczalnością. W drodze do miejsca docelowego transportowany materiał nie wcho-

dzi zatem w reakcje z otoczeniem, nie ulega dezaktywacji, a jego ewentualne szkodliwe działanie na środowisko jest ograniczone do minimum. Do formowania powłok mikrokapsulek przeznaczonych do zastosowań medycznych najczęściej wykorzystuje się biogodne polimery [1]. Dobrze zaprojektowana powłoka nie tylko zabezpiecza substancję aktywną zawartą w rdzeniu, ale również sprzyja zaplanowanej strategii jej kontrolowanego uwalniania w sposób przedłużony albo wyzwalany w dowolnym miejscu i czasie pod wpływem wybranego bodźca. A zatem przyjrzyjmy się wytwarzanym w laboratoriach mikrostrukturom typu rdzeń-powłoka z punktu widzenia fizyki.

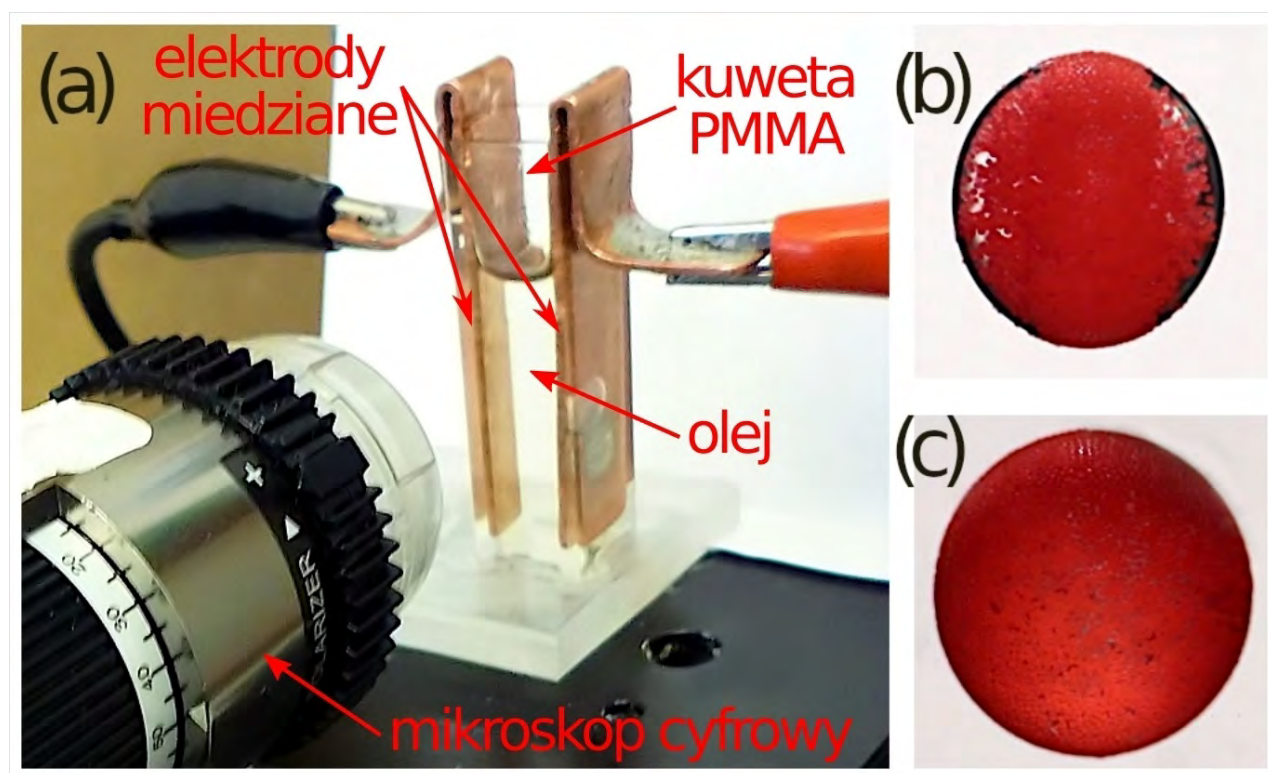
Krople Pickeringa

Układy dyspersyjne dwóch niemieszających się wzajemnie cieczy, z fazą rozproszoną występującą w postaci mikroskopijnych kropelek, znane są powszechnie pod nazwą emulsji. Jeśli powierzchnia zawieszonych kropelek jest dodatkowo stabilizowana nano- bądź mikrocząstkami

*ORCID: 0000-0002-6991-6127

stałymi, to mamy do czynienia z emulsją Pickeringa. Nie trudno się domyślić, że nazwa ta upamiętnia naukowca Percivala Spencera Umfreville'a Pickeringa, który jako pierwszy w 1907 roku zastosował wspomniane rozwiązanie [2]. Poszczególne krople Pickeringa posiadają strukturę typu rdzeń-powłoka. Warstwa cząstek zaadsorbowana na powierzchni międzyfazowej nie tylko zapobiega ich koalescencji, ale również nadaje układowi szereg nowych, pożądanych właściwości. Ważnymi parametrami charakteryzującymi emulsje Pickeringa są: kąt zwilżania (cząstki stałe są częściowo zwilżalne przez obie fazy ciekłe), stosunek promienia nieopłaszczonej kropelki do promienia cząstek tworzących jej powłokę oraz udział objętościowy kropelek w fazie ciągłej [3]. Chociaż wytwarzanie emulsji odbywać się może wieloma technikami, np. poprzez homogenizację ultradźwiękową, emulgację

membranową, mieszanie mechaniczne czy wykorzystanie mikroprzepływów, to w ostatnich latach intensywnie rozwijane są nowe metody wykorzystujące pole elektryczne [4]. Co ciekawe, krople Pickeringa mogą być produkowane nawet pojedynczo i posiadać otoczkę zbudowaną z dwóch lub więcej rodzajów cząstek. Warto zatem przyjrzeć się dokładniej procedurze elektroformowania takich struktur. Nie wymaga ona wykorzystania zaawansowanego sprzętu laboratoryjnego. Potrzebny jest tylko zasilacz, wzmacniacz wysokiego napięcia, generator funkcyjny oraz cyfrowy mikroskop wykorzystujący światło odbite do kontrolowania przebiegu doświadczenia [5-7]. Sam eksperyment przeprowadza się w kuwecie z elektrodami w postaci płytek miedzianych, które nakłada się na jej dwie przeciwległe ścianki (fot. 1(a)).



Fot. 1. (a) Krople Pickeringa formowane są pod kontrolą mikroskopu w kuwecie wyposażonej w parę elektrod miedzianych; (b) pod wpływem działania pola elektrycznego cząstki tworzą pierścień na równiku kropki; (c) po kilku minutach cząstki pokrywają równomiernie całą powierzchnię kropki

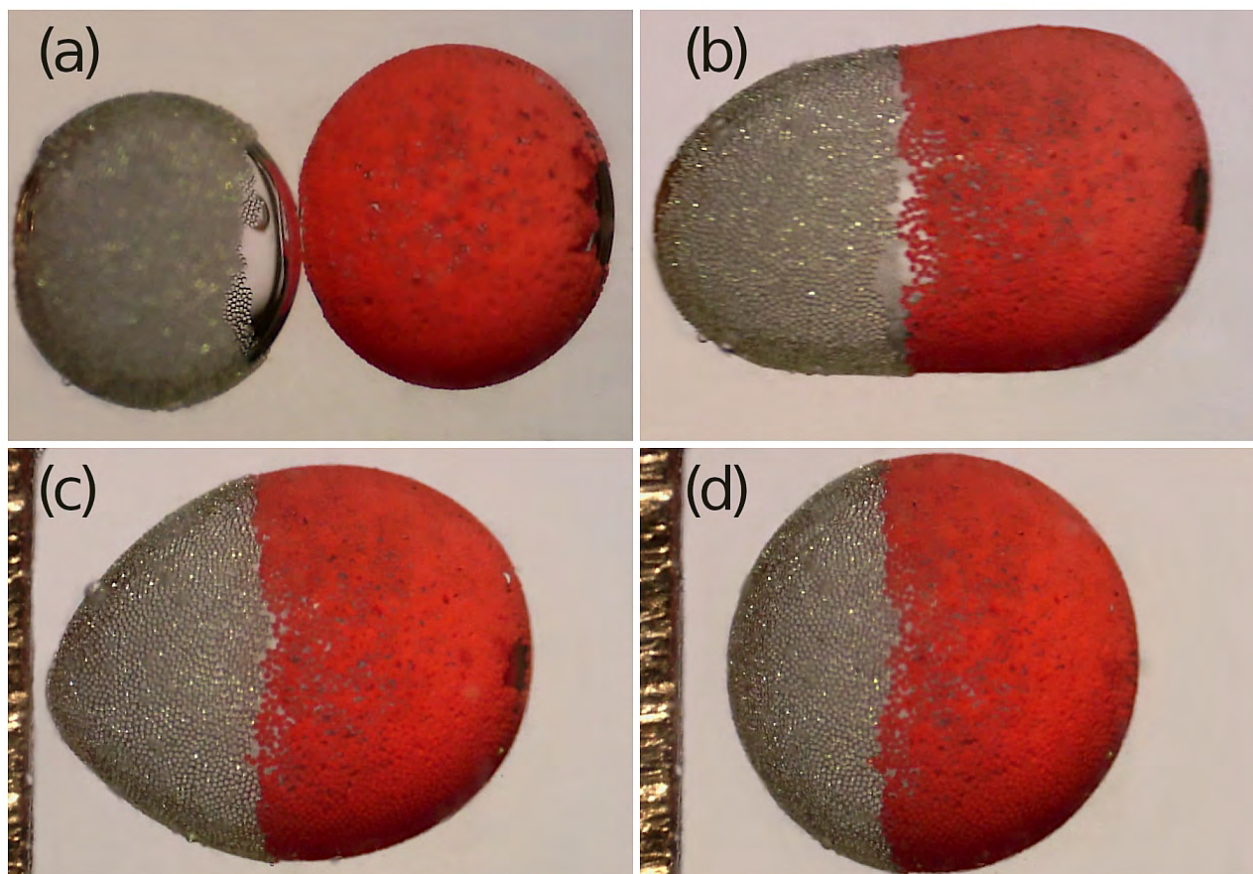
W oleju (np. rycynowym) wypełniającym wspomnianą kuwetę, za pomocą pipety automatycznej formuje się kropelkę utworzoną z układu dyspersyjnego mikrocząstek w cieczy nośnej (np. oleju silikonowym). Po przyłożeniu pola elektrycznego o natężeniu 230 V/mm mikrocząstki pod wpływem sił elektrycznych przemieszczają się stopniowo z wnętrza kropki na jej powierzchnię stanowiącą granicę faz stosowanych olejów. Następnie, w wyniku indukowanego polem elektrycznym przepływu cieczy, kierowane są w stronę równika elektrycz-

nego kropki, gdzie tworzą pierścień (fot. 1(b)). Poszerza się on stopniowo i w czasie nie dłuższym niż kilka minut cała kropelka otoczona zostaje szczelnie powłoką (fot. 1(c)). Po odłączeniu napięcia cały układ pozostaje stabilny, a mikrocząstki utrzymują się na granicy faz. Warto wspomnieć, iż jednym z kluczowych czynników powodzenia całej operacji jest dobór stężenia dyspersji wejściowej. Zbyt małe sprawi, że w pokryciu pozostaną luki. Za duże będzie z kolei skutkowało uzyskaniem powłoki wielowarstwowej. Optymalna koncentracja da

natomiast kroplę Pickeringa w pełni otoczoną monowarstwą cząstek. Warto wspomnieć, iż energia ich wiązania na granicy faz jest proporcjonalna do $a^2\gamma(1 \pm \cos \theta)^2$, gdzie: a – promień cząstki, θ – kąt zwilżania, γ – napięcie powierzchniowe pomiędzy kroplą a otaczającym ją ośrodkiem [7].

Otrzymywanie niejednorodnych kropli Pickeringa jest nieco bardziej skomplikowane, gdyż wykorzystuje się zarówno przepływy elektrohydrodynamiczne, jak i zjawisko elektrokoalescencji. Procedurę tę (fot. 2) najlepiej omówić na przykładzie kropli Janusa, czyli struktury z powłoką utworzoną po połowie z cząstek o odmiennych właściwościach. W pierwszej kolejności w oleju wypełniającym kuwetę w bliskim sąsiedztwie formuje się dwie krople, z których każda zawiera dyspersję innych cząstek. Ich stężenie musi być obliczone tak, aby po

przyłożeniu pola elektrycznego, pokryły powierzchnię rdzenia tylko w około 70%. Gdy takie nie w pełni opłaskczone (pokryte) struktury o jednakowej średnicy zbliżą się do siebie w wyniku działania przepływów elektrohydrodynamicznych i sił elektrostatycznych, a następnie zetkną się nieosłoniętymi częściami swoich powierzchni, nastąpi ich koalescencja [8]. Powierzchnia wynikowej kropli Janusa, zredukowana o ponad 20% w stosunku do sumy powierzchni kropli składowych, będzie posiadała pełną, aczkolwiek niejednorodną pod względem składu, powłokę. Struktury łaciate, mające niejednakowy udział cząstek o odmiennych właściwościach w składzie otoczki, uzyskuje się natomiast w wyniku elektrokoalescencji dwóch lub więcej kropli, które różnią się wielkością albo stopniem pokrycia mikrocząstkami.



Fot. 2. Elektrokoalescencja dwóch kropli częściowo opłaskczonych różnymi cząstkami prowadzi do powstania kropli Pickeringa z powłoką janusową

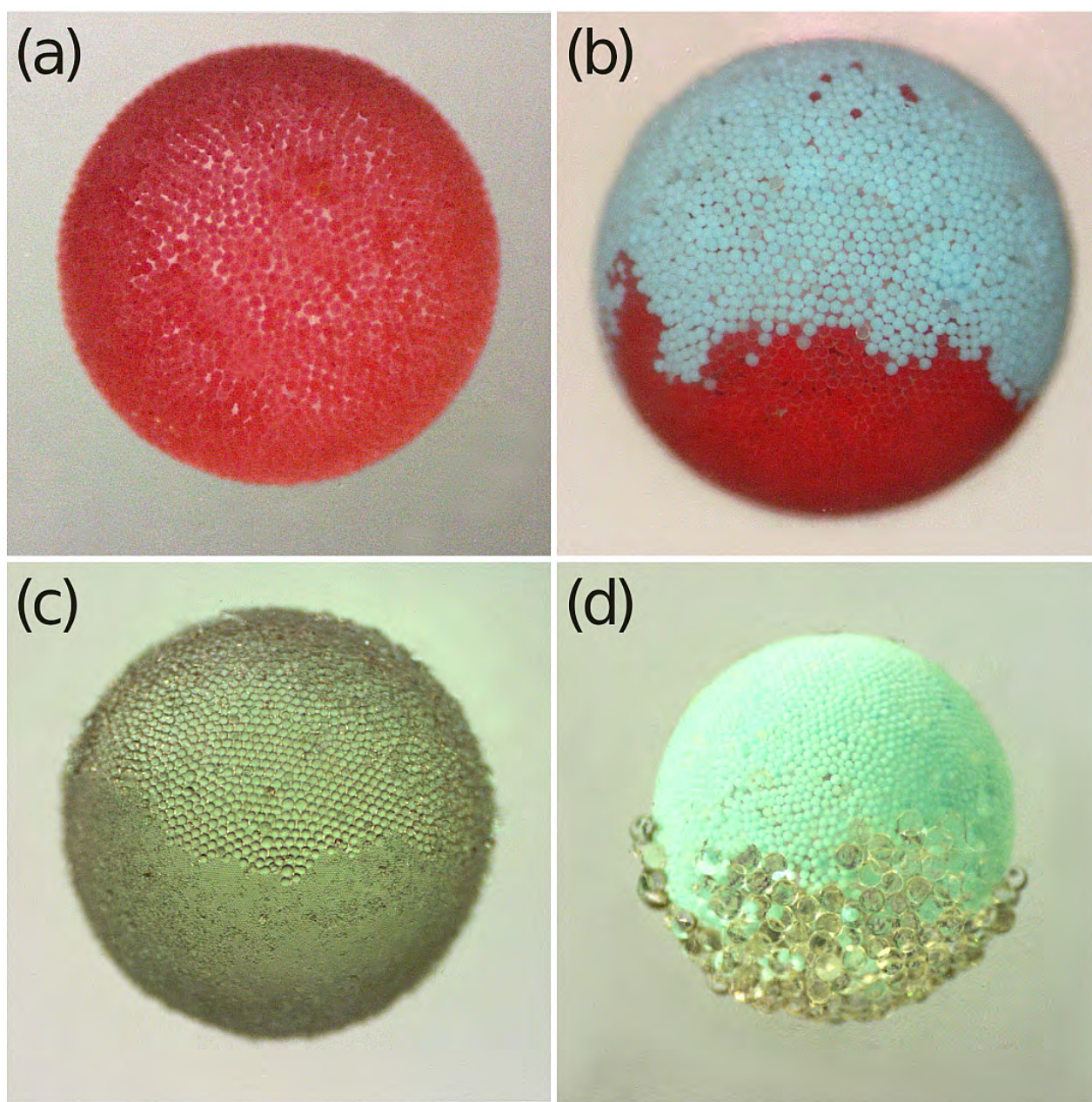
Mikrokapsułki

Cząstki zaadsorbowane i gęsto upakowane na powierzchni kropli Pickeringa nie wykazują tendencji do migracji w obrębie powłoki ani do odrywania się od granicy faz. Należy jednak pamiętać, że nie są one trwale ze sobą związane, więc kształt powłoki będzie elastycznie dopasowywał się do zmian struktury ciekłego

rdzenia. Aby przekształcić kroplę Pickeringa w mikrokapsułkę, należy zablokować i połączyć mikrocząstki tworzące otoczkę i w ten sposób uzyskać mechanicznie stabilne a zarazem sztywniejsze pokrycie. Wzmacnianie powłoki, w zależności od użytego materiału, można uzyskać stosując koagulant lub polikationy, wykorzystując siły van der Waalsa, żelowanie bądź indukowane promie-

niowaniem ultrafioletowym sieciowanie chemiczne [9]. W przypadku mikrosfer polimerowych, zamykających ciekły rdzeń, bardzo popularną metodą jest ich spiekanie. Procedurę tę można przeprowadzić za pomocą energii promieniowania z zakresu mikrofalowego. Co ważne, właściwości mechaniczne oraz przepuszczalność otoczki reguluje się stopniem jej spieczenia, który zależy od czasu działania bodźca termicznego [5], czas obróbki cieplnej reguluje bowiem wzajemną fuzję cząstek a tym samym gładkość i porowatość zewnętrznej powierzchni kapsułki. Zbyt krótki skutkuje większą płynnością powłoki, a zbyt długi może powodować stopienie się

materiału a nawet dezintegrację całej struktury. W przypadku kropli Pickeringa z niejednorodnym pokryciem, utworzonym z dwóch lub więcej rodzajów mikrocząstek, stosuje się czas spiekania dopasowany do materiału wymagającego najkrótszej obróbki termicznej [6]. Dzięki temu poszczególne partie kapsuły Janusa bądź łaciatej uzyskują odmienne właściwości mechaniczne, co dodatkowo sprzyja strategiom kontrolowanego uwalniania substancji z jej wnętrza. Fotografia 3 przedstawia przykładowe kapsułki uzyskane dzięki mikrofalowemu spiekaniu powłoki kropli Pickeringa: jednorodnej (a), janusowej (b-c), łaciatej (d).



Fot. 3. Kapsułki uzyskane w wyniku spieczenia kropli Pickeringa. Powłokę stanowią odpowiednio mikrocząstki: (a) Czerwone polietylenowe $\approx 50 \mu\text{m}$; (b) czerwone $\approx 50 \mu\text{m}$ oraz niebieskie $\approx 45 \mu\text{m}$ polietylenowe; (c) polistyrenowe $40 \mu\text{m}$ i $10 \mu\text{m}$; (d) polistyrenowe $140 \mu\text{m}$ oraz turkusowe polietylenowe $45 \mu\text{m}$

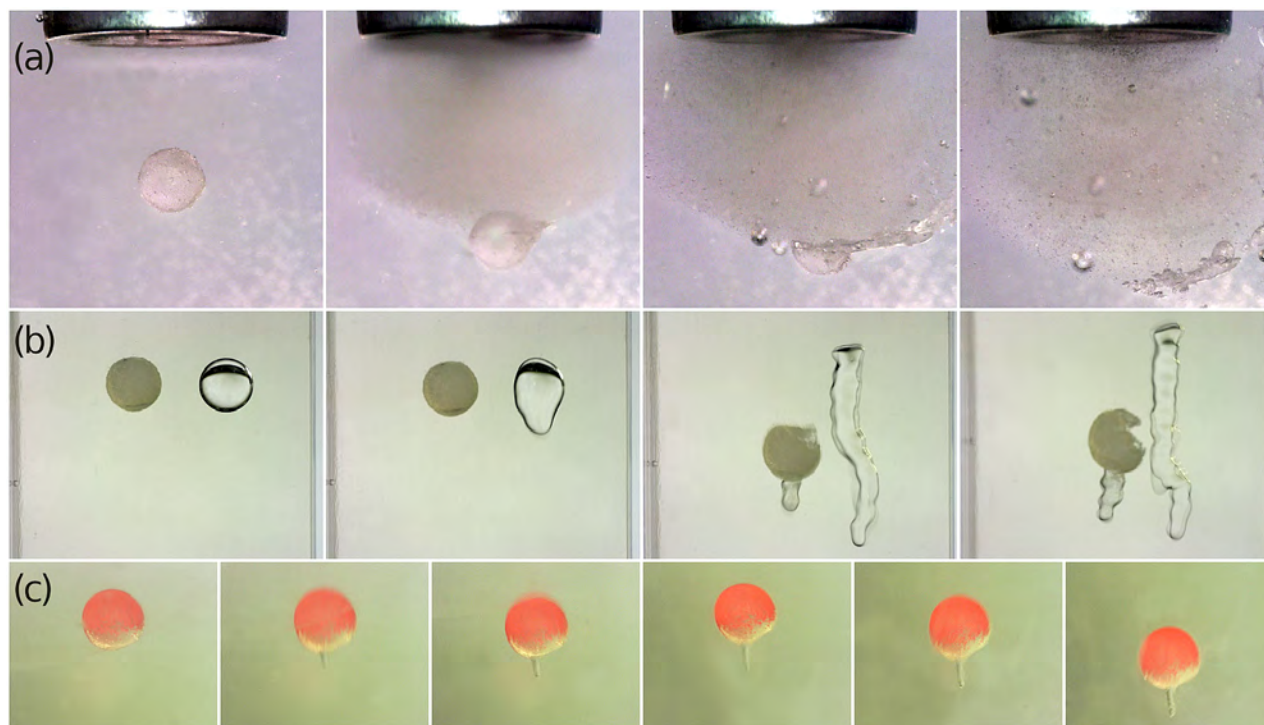
Fizyczne czynniki wspomagające kontrolowane uwalnianie zawartości kapsuł

Podstawową rolą kapsułek jest nie tylko bezpieczne dostarczenie ładunku do wyznaczonego celu, ale również kontrolowane uwalnianie go w tym ściśle zaplanowanym miejscu. Potrzebny jest zatem bodziec, który zainicjuje przekazanie do otoczenia uwężnionej we wnętrzu zawartości. Czynniki wyzwalające można podzielić na trzy grupy: biologiczne (aktywność enzymów), chemiczne (zmiana pH ośrodka) oraz fizyczne (działanie promieniowania podczerwonego, pól elektrycznych lub magnetycznych, temperatury, bezpośrednio przyłożonej siły mechanicznej bądź ultradźwięków) [10, 11]. Spośród nich największy potencjał wydają się mieć fale ultradźwiękowe, które posiadają wystarczającą głębokość penetracji, są łatwe do skupiania oraz szeroko stosowane ze względu na dużą dostępność urządzeń komercyjnych umożliwiających ich emisję [12]. Należy jednak podkreślić, iż nie chodzi tu o generowane przez sonotrody homogenizatorów fale o częstotliwościach 20-50 kHz i dużej mocy wyjściowej, ponieważ te wywołują efekty kawitacyjne. Zdolność wiązki ultradźwięków do inicjowania kawitacji inercyjnej w tkankach określa wskaźnik mechaniczny MI (ang. *mechanical index*)

$$MI = \frac{P_{ra}}{\sqrt{f}},$$

gdzie P_{ra} – wartość szczytowa wytwarzanego podciśnienia [MPa] przeliczona z uwzględnieniem stopnia osłabienia wiązki w tkance, f – średnia częstotliwość fali akustycznej. Maksymalna akceptowalna wartość tego parametru w przypadku diagnostyki ultrasonograficznej wynosi 1,9 [13], przydatne a zarazem bezpieczne do zastosowań medycznych są zatem jedynie ultradźwięki o małych natężeniach i częstotliwościach z zakresu MHz. W przypadku użycia fal akustycznych do wyzwalania ładunku z kapsuł, pojawia się dodatkowo argument przeciwko stosowaniu niskich częstotliwości i dużych mocy, pokazano bowiem, że ultradźwięki o $f = 20$ kHz oraz dużym natężeniu 20-100 W/cm² powodują błyskawiczne rozerwanie, a w zasadzie kompletną defragmentację kapsuły, której towarzyszy wielokierunkowe rozrzucone ich zawartości łącznie z elementami powłoki, co zdecydowanie nie jest korzystne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań [5]. Na fotografii 4(a) widać właśnie takie całkowite rozbicie mikrokapsułki osadzonej w żelu.

W różnych zastosowaniach wskazane jest, aby wyzwalanie substancji czynnej było stopniowe oraz kontrolowane zarówno pod względem czasowym, jak i przestrzennym. W związku z tym opracowano oraz opisano metodę, w której pod wpływem oddziaływania ultradźwięków o częstotliwościach z zakresu 1-4,5 MHz i natężeniu kilku W/cm² następuje jedynie punktowe przekłucie powłoki i w pełni kierunkowe uwolnienie zawartości



Fot. 4. (a) Całkowita defragmentacja mikrokapsułki z powłoką z cząstek polistyrenowych pod wpływem ultradźwięków o $f = 20$ kHz oraz natężeniu 40 W/cm²; (b) wpływ ultradźwięków o $f = 1$ MHz i natężeniu 2,5 W/cm² na kroplę oleju silikonowego i kapsułkę ze spieczoną powłoką zbudowaną z cząstek polistyrenowych o średnicy 10 µm; (c) kontrolowane i ukierunkowane uwalnianie zawartości z kapsułki łaciastej pod wpływem ultradźwięków o $f = 3,5$ MHz i natężeniu 2,5 W/cm²

mikrokapsułki [5]. Jej ciekły rdzeń ulega wówczas rozciągnięciu w kierunku propagacji fali akustycznej, wywierając nacisk na wewnętrzną stronę powłoki. Ta miejscowo pęka pozwalając, aby substancja zamknięta w środku wypłynęła. Efekt jest szczególnie widoczny dla kapsułek o rozmiarach 300 μm –5 mm, przygotowanych przy użyciu oleju silikonowego. Relacja średnicy rdzenia do długości fali akustycznej ma w ich przypadku istotne znaczenie. Gdy w ośrodku wytworzy się fala stojąca, krople mniejsze niż około połowa długości fali ultradźwiękowej migrują w stronę jej węzłów pod wpływem ciśnienia akustycznego. Struktury o średnicy $d \geq 1/2\lambda$ są natomiast rozciągane na kilka długości fal ultradźwiękowych, przenosząc materię pomiędzy sąsiednimi węzłami [5]. Siła akustyczna F_a działająca na kroplę, nawet w przybliżeniu określona jest dosyć skomplikowanym wzorem

$$F_a \approx 2\pi^2 r^3 \lambda^{-1} \langle |p^2| \rangle \beta_o \left(\frac{(5\rho_k - 2\rho_o)}{(2\rho_k + \rho_o)} - \frac{\beta_k}{\beta_o} \right),$$

gdzie r – promień kropli, λ – długość fali, p – ciśnienie akustyczne, β – ściśliwość, ρ – gęstość, indeksy „k” i „o” oznaczają odpowiednio kroplę i otaczający ośrodek [14]. Siła akustyczna wydłuża kroplę, zwiększając jej powierzchnię, działając tym samym przeciw siłom napięcia powierzchniowego F_{NP} . Te ostatnie, również w przybliżeniu, dla wydłużonej sferoidy obliczyć można ze wzoru

$$F_{NP} = -3\pi\gamma\Delta r,$$

gdzie: γ – współczynnik napięcia powierzchniowego, Δr – przyrost długości promienia odkształconej kropli [15]. Stopień deformacji zależy istotnie od natężenia ultradźwięków. Pokazano eksperymentalnie, że gdy przekroczy ono 2 W/cm², kropla oleju rozpada się na mniejsze [5]. W opisie procesu uwalniania zawartości z kapsułek należy dodatkowo zwrócić uwagę na sprężystość ich otoczki. Właściwości mechaniczne powłoki zależą od jej rozmiaru, grubości oraz stopnia połączenia cząstek, które ją budują [7]. Akustyczna siła rozciągająca musi zatem nie tylko pokonać napięcie powierzchniowe kropli cieczy stanowiącej rdzeń, ale również siły utrzymujące integralność powłoki. Na fotografii 4 (b) porównano wpływ ultradźwięków o $f = 1$ MHz na kroplę oleju silikonowego i kapsułkę ze spieczoną powłoką, zbudowaną z cząstek polistyrenowych o średnicy 10 μm .

Warto zwrócić uwagę, że różnice właściwości mechanicznych poszczególnych fragmentów otoczki, jakie występują w przypadku kapsułek janusowych i łaciatych, mogą dodatkowo ukierunkowywać proces uwalniania ładunku z kapsuły, co widać na fot. 4(c). W pierwszej kolejności przebijana będzie ta część powłoki, która wykazuje mniejszą integralność, czyli zbudowana z mikrocząstek słabiej spieczonych [6]. Samą dynamikę procesu

uwalniania reguluje się także dobierając odpowiednio częstotliwości fal akustycznych. Przykładowo strumień substancji wydobywający się z kapsułki, na którą działa fala akustyczna o częstotliwości $f = 3,5$ MHz, jest węższy niż przy 1 MHz, co oczywiście skutkuje bardziej przedłużonym uwalnianiem [7]. Na koniec warto wspomnieć, że działanie fal akustycznych o wysokich częstotliwościach, oprócz punkowego przebijania otoczek, może wywoływać także obserwowany w ośrodkach ciekłych ruch translacyjny kapsułki. Jego przyczyną to strumieniowanie akustyczne, czyli lokalne przemieszczanie się płynu w kierunku od przetwornika. Zjawisko to nie jest obserwowane, gdy kapsułki osadzone są w hydrożelu, który w badaniach naukowych często stanowi fantom imitujący ludzkie tkanki. Pod wpływem ultradźwięków kapsułki ulegają w nim przebiciu, pozostając jednak w spoczynku i utrzymując swą strukturę. Zawartość wypływa z nich wąską, ukierunkowaną stróżką, co jest niezwykle obiecujące w kontekście przyszłych zastosowań biomedycznych.

Krople Pickeringa oraz utworzone z nich mikrokapsułki można potencjalnie stosować w różnych sektorach gospodarki. Warto wymienić chociażby przemysł chemiczny (kapsułkowanie rozmaitych katalizatorów), papierniczy (papier samokopiujący), tekstylny (utrzymywanie trwałych substancji zapachowych neutralizujących nieprzyjemną woń ciała), maszynowy (gromadzenie a także uwalnianie smarów, spoiw i pigmentów), a także sektor obronny (samonaprawiające się kompozyty, gromadzenie substancji odkażających), ochronę środowiska (zamykanie i usuwanie szkodliwych substancji ropopochodnych). Z kolei struktury z biokompatybilnymi powłokami przydadzą się na pewno w rolnictwie (ochrona upraw poprzez długotrwałe uwalnianie środków ochrony roślin) i przetwórstwie spożywczym (wyzwalanie aromatu lub maskowanie zapachu, smaku, koloru), w branży kosmetycznej (produkcja perfum), biotechnologii (transport bakterii, DNA i enzymów), a przede wszystkim w farmacji i medycynie (przeniesienie, a później kontrolowane uwalnianie leków oraz substancji aktywnych).

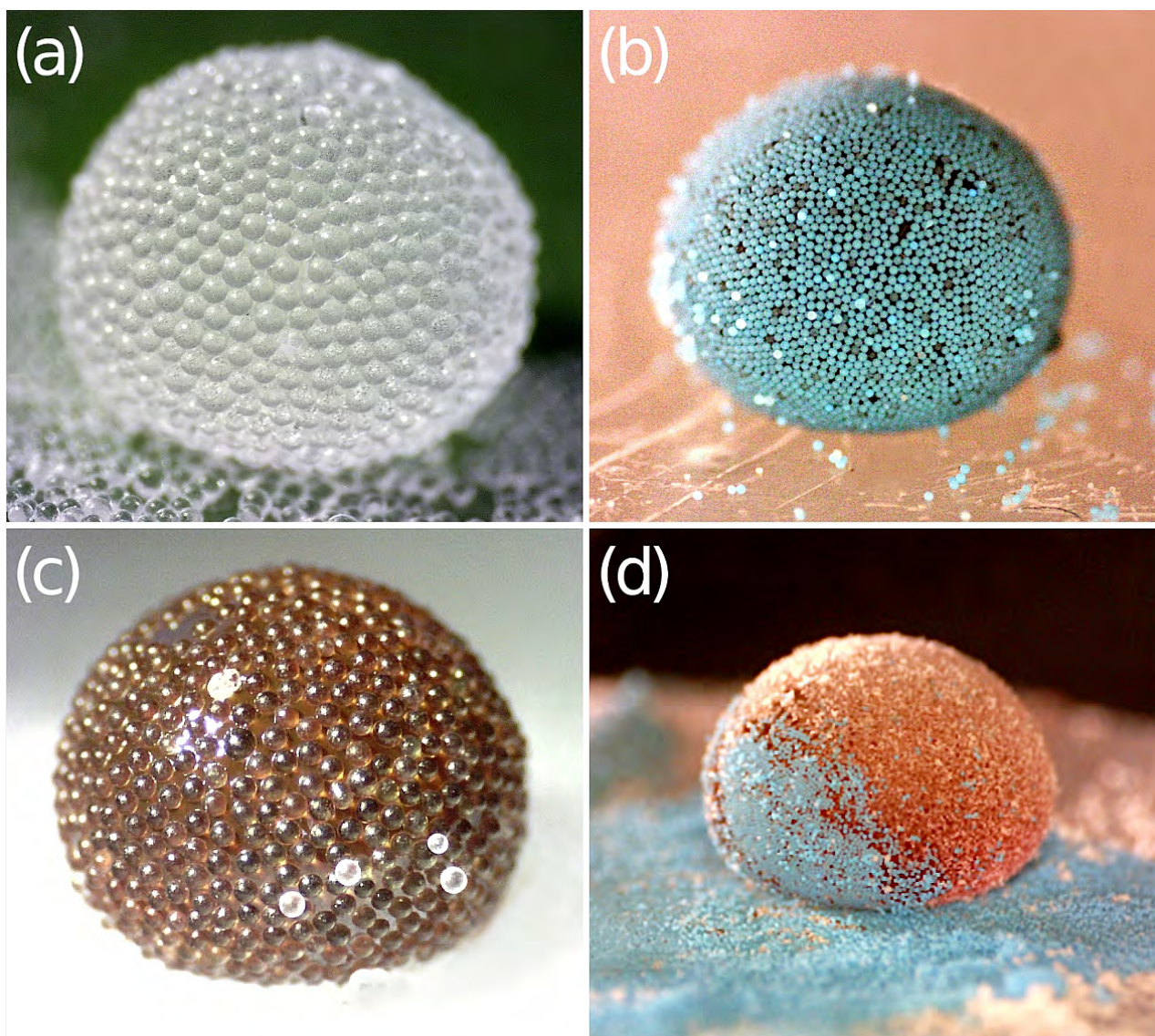
Struktury *liquid marbles* (marble*)

Struktury *liquid marbles* dotychczas nie doczekały się optymalnej i akceptowanej przez ogół naukowców polskiej nazwy. Te kuleczki o średnicy od kilkuset μm do kilku mm mają formę ciekłego rdzenia otoczonego warstwą mikrocząstek. W odróżnieniu od opisanych wcześniej kropli Pickeringa, marble wytwarza się w otoczeniu

*Roboczy termin używany przez autora artykułu i współprac. – przyp. red.).

powietrza a nie w cieczy. Materiał powłoki stanowią mikrocząstki zbudowane z syntetycznych polimerów (np. polistyrenu, polietylenu czy poli(tetrafluoroetylenu)) albo granulki pochodzenia naturalnego, np. proszek kurkumy czy pyłek z widłaka (*Lycopodium*). Te ostatnie cechuje biodegradowalność oraz biokompatybilność, co oznacza, że nadają się do zastosowań biomedycznych nie tylko dzięki braku toksyczności, ale również ze względu na zdolność do zachowania swoich funkcjonalności w środowisku biologicznym [16]. Oczywiście zadaniem powłoki jest izolacja rdzenia od środowiska zewnętrznego, a także utrzymywanie stabilności całej struktury. Szybkość parowania cieczy z jej wnętrza zależy m.in.

od wielkości porów powłoki, która jest determinowana rozmieszczeniem i wielkością mikrocząstek tworzących otoczkę. Mniejsze cząstki oferują gęstsze upakowanie, a zatem szczelniejsze pokrycie, co jest szczególnie istotne, gdy powłoka stanowi monowarstwę. W zależności od przeznaczenia oraz zaplanowanej funkcji, zewnętrzna powierzchnia marbla może być utworzona z mikrocząstek jednego rodzaju (pod względem średnicy i materiału) albo dwóch bądź więcej ich typów (w przypadku odpowiednio struktur janusowych oraz łaciących). Przykłady obrazuje fot. 5. Warto przyrzeć się, jak struktury *liquid marbles* są wytwarzane i przekonać, że ta procedura wcale nie musi być skomplikowana.



Fot. 5. Struktury typu *liquid marbles* zbudowane z: (a) wodnego rdzenia i otoczki z cząstek polistyrenowych 140 μm ; (b) rdzenia z cieczy magnetycznej i otoczki z cząstek polietylenowych 45 μm ; (c) rdzenia z cieczy magnetycznej i otoczki z cząstek polistyrenowych 140 μm ; (d) rdzenia z cieczy magnetycznej i powłoki łaciącej z cząstek polietylenowych 45 μm oraz pyłku z widłaka

Na początku należy przygotować odpowiednie podłoże. Można w tym celu wykorzystać szkło podstawowe pokryte warstwą wosku (zapewniającą hydrofobo-

wość) i posypać je równomierne wybranymi do eksperymentu mikrocząstkami. Następnie za pomocą pipety automatycznej umieścić na wspomnianych cząstkach

kroplę o wybranej objętości. Będzie ona stanowiła rdzeń marbla. Do jego uformowania używa się różnych cieczy, np. wody, HEPESu (popularnego bufora organicznego), ciekłego poliglikolu PEG400 a nawet ferrocieczy (zawiesiny nanocząstek o właściwościach magnetycznych) [17, 18]. Ciekawą alternatywę stanowi hydrożel przygotowany przy użyciu żelatyny lub agaru jako składnika żelującego. Wówczas kropla podgrzanego roztworu nanoszona jest pipetką Pasteura na podłoże, a w miarę oddawania ciepła do otoczenia zastyga tworząc elastyczną kulkę. Ukonstytuowany rdzeń jest turlany następnie mechanicznie po podłożu z mikrocząstek, aby całkowicie otoczyć nimi jego powierzchnię. W celu kontrolowania całego procesu warto wspomagać się cyfrowym mikroskopem optycznym, który umożliwia podgląd obszaru roboczego na ekranie komputera. Jest to szczególnie przydatne, gdy trzeba wytworzyć marbel janusowy albo łaćciaty, tego typu heterogeniczne struktury mają bowiem szersze spektrum zastosowań, ale równocześnie są nieco trudniejsze w przygotowaniu. Jak można je otrzymać? Jedną z metod polega na toczeniu kropli po podłożu, dokładnie wzdłuż granicy pomiędzy obszarami zawierającymi dwa rodzaje cząstek. Wówczas każda z jej półkul uzyska inne pokrycie. Innym, zdecydowanie ciekawszym sposobem jest wykorzystanie koalescencji dwóch (lub więcej) mniejszych kropelek, z których każda jest tylko częściowo opłaszczona, ale różnymi materiałami. Przed połączeniem wspomniane kropelki należy przybliżyć do siebie, by ich nieosłonięte części się zetknęły. Samo przemieszczenie następuje na skutek działania czynnika mechanicznego (np. popychania końcówką pipety) lub magnetycznego (gdy krople w rdzeniu bądź powłoce zawierają materiał magnetyczny).

Warto jeszcze wspomnieć, że struktury *liquid marbles* mogą posiadać również wielowarstwową bądź niejednorodną powłokę uzyskiwaną poprzez kilkukrotne toczenie ich kolejno po różnych podłożach. Istnieje także opcja uzupełniającego posypania otoczki cząstkami o odmiennych właściwościach, aby uzyskać efekt nakrapiania. Dodatkowy materiał wzbogaca właściwości powierzchniowe a tym samym może przyczyniać się do rozszerzenia spektrum zastosowań danego typu marbli. Należy pamiętać, że wszystkie mikrostruktury wytwarzane są po to, aby spełniać określone funkcje. Dużo projektów naukowych skupia się m.in. na aplikacjach biomedycznych. Sensory pH, mikrowiskozymetry (mikrolepkociomierze – przyp. red.), miniaturowe reaktory biochemiczne a nawet swego rodzaju „laboratoria” w kropli, pozwalające np. szybko ustalić grupę krwi, to tylko niektóre z testowanych dotychczas pól eksploatacji [19, 20]. We wnętrzu marbli można ponadto zamykać leki i inne substancje aktywne. Przykładem są biozgodne struktury przenoszące antybiotyk – klarytromycynę rozpuszoną

w oleju lnianym [18]. Co ciekawe, wprowadzenie właściwego ładunku może odbyć się już po uformowaniu marbla i utrwaleniu jego powłoki. Po odparowaniu pierwotnego ciekłego rdzenia, wewnątrz zbudowanej z cząstek skorupki napełniane jest ponownie wybranym roztworem. Jeśli natomiast rdzeń jest kulą hydrożelu, to substancję czynną wstrzykuje się lub wysypuje bezpośrednio do niej. Pozwala to nawet hydrofobowy ładunek przetransportować w izolacji.

Optymalizację produkcji oraz poszerzenie spektrum zastosowań struktur *liquid marbles* zdecydowanie ułatwia ich funkcjonalizacja z wykorzystaniem nanocząstek tlenku żelaza w postaci proszku lub ferrocieczy. Magnetytowy proszek jest wysypywany do rdzenia poprzez otwór nawiercony w powłoce, natomiast dyspersja nanocząstek wstrzykiwana do wnętrza za pomocą pipety lub igły opuszczanej na ruchomym ramieniu. Warto zwrócić uwagę, iż w marblach zamykano już nawet magnetosomy, czyli łańcuchy otoczonych błoną nanocząstek magnetytu (Fe_3O_4) wytworzonych przez bakterie magnetotaktyczne [18]. Dodanie tlenku żelaza do marbli sprawia, że są one podatne na działanie zewnętrznego pola magnetycznego. Dzięki temu można je przemieszczać, zderzać niczym kule bilardowe bądź, w przypadku kropelek nie w pełni opłaszczonych, doprowadzać do magnetokoalescencji. Nanocząstki Fe_3O_4 znajdują również zastosowanie jako medium generujące ciepło z wykorzystaniem zmiennego, zewnętrznego pola magnetycznego (hipertermia magnetyczna – nieinwazyjna metoda leczenia nowotworów). Jeśli rdzeń marbla stanowi ferrociecz, tego typu ogrzewanie pozwala szybciej odparować rozpuszczalnik, osadzając jednocześnie zawieszone w nim nanocząstki na wewnętrznej powierzchni powłoki. Dodatkowo wzrost temperatury sprzyja spiekaniu (ang. *sintering*) polimerowych cząstek, które tworzą otoczkę, a to pociąga za sobą wzmocnienie i uszczelnienie całej struktury [17]. Należy jeszcze dodać, iż do charakterystyki wsadu magnetycznego są używane różne zaawansowane techniki badawcze wykorzystujące fascynujące zjawiska fizyczne. Warto wspomnieć chociażby spektroskopię elektronowego rezonansu paramagnetycznego EPR (ang. *electron paramagnetic resonance*) czy magnetometrię wibracyjną VSM (ang. *vibrating sample magnetometry*). Pierwsza z wymienionych metod pozwala m.in. weryfikować, jakie rodzaje tlenku żelaza obecne są w próbce (maghemit, magnetyt itp.), ocenić ich stężenie oraz interakcje z otoczeniem. Druga technika umożliwia np. wyznaczenie krzywej namagnesowania zastosowanego materiału.

Bibliografia

- [1] Kubiak T., Polymeric capsules and micelles as promising carriers of anticancer drugs, *Poly-*

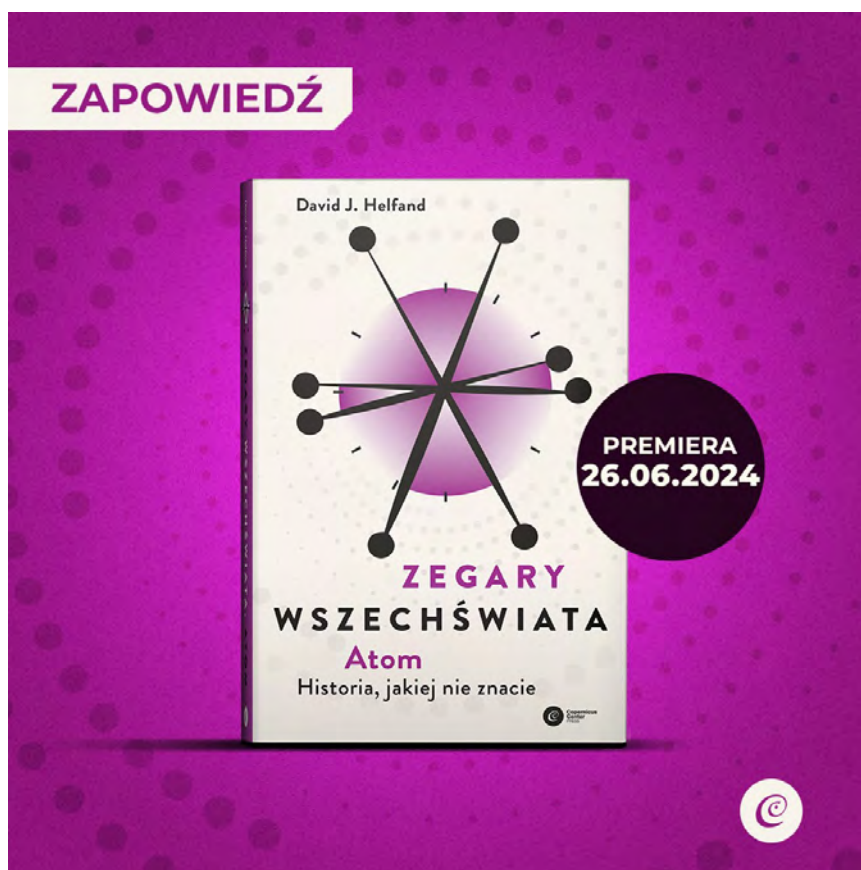
- mers in *Medicine* 52(1), 37-50 (2022) (DOI: 10.17219/pim/145513).
- [2] Yang Y., Fang Z., Chen X., Zhang W., Xie Y., Chen Y., Liu Z., Yuan W., An Overview of Pickering Emulsions: Solid-Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications, *Frontiers in Pharmacology* 8, 287 (2017) (DOI: 10.3389/fphar.2017.00287).
- [3] Pal R., A simple model for the viscosity of Pickering emulsions, *Fluids* 3, 2 (2018) (DOI: 10.3390/fluids3010002).
- [4] Rozynek Z., Bielas R., Józefczak A., Efficient formation of oil-in-oil Pickering emulsions with narrow size distributions by using electric fields, *Soft Matter* 14, 5140-5149 (2018) (DOI: 10.1039/C8SM00671G).
- [5] Kubiak T., Banaszak J., Józefczak A., Rozynek Z., Direction-Specific Release from Capsules with Homogeneous or Janus Shells Using an Ultrasound Approach, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12(13), 15810-15822 (2020) (DOI:10.1021/acsami.9b21484).
- [6] Kubiak T., Zubko M., Józefczak A., The impact of ultrasound on Janus capsules at gel-liquid interface, *Current Applied Physics* 38, 22-29 (2022) (DOI: 10.1016/j.cap.2022.03.008).
- [7] Kubiak T., Zubko M., Józefczak A., Ultrasound-triggered directional release from turmeric capsules, *Particuology* 57, 19-27 (2021) (DOI: 10.1016/j.partic.2020.12.010).
- [8] Rozynek Z., Mikkelsen A., Dommersnes P., Fossum J.O., Electroformation of Janus and patchy capsules, *Nature Communications* 5, 3945 (2014) (DOI: 10.1038/ncomms4945).
- [9] Rodriguez A.M.B., Binks B.P., Capsules from Pickering emulsion templates, *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 44, 107-129 (2019) (DOI: 10.1016/j.cocis.2019.09.006).
- [10] Stavarache C.E., Paniwnyk L., Controlled rupture of magnetic LbL polyelectrolyte capsules and subsequent release of contents employing high intensity focused ultrasound, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 45, 60-69 (2018) (DOI: 10.1016/j.jddst.2018.02.011).
- [11] Urbas R., Milošević R., Kašiković N., Pavlović Ž., Elesini U.S., Microcapsules application in graphic arts industry: a review on the state-of-the-art, *Iranian Polymer Journal* (English Edition) 26 541-561 (2017) (DOI: 10.1007/s13726-017-0541-1).
- [12] Liu T.Y., Huang T.C., A novel drug vehicle capable of ultrasound-triggered release with MRI functions, *Acta Biomaterialia* 7, 3927-3934 (2011) (DOI: 10.1016/j.actbio.2011.06.038).
- [13] Quarato C.M.I., Lacedonia D., Salvemini M., Tucari G., Mastrodonato G., Villani R., Fiore L.A., Scioscia G., Mirijello A., Saponara A., Sperandeo M., A Review on Biological Effects of Ultrasounds: Key Messages for Clinicians, *Diagnostics* 13, 855 (2023) (DOI: 10.3390/diagnostics13050855).
- [14] Leibacher I., Reichert P., Dual J., Microfluidic droplet handling by bulk acoustic wave (BAW) acoustophoresis, *Lab on a Chip* 15, 2896-2905 (2015) (DOI: 10.1039/c5lc00083a).
- [15] Møller P.C.F., Oddershede L.B., Quantification of droplet deformation by electromagnetic trapping, *Europhysics Letters* 88, 48005 (2009) (DOI: 10.1209/0295-5075/88/48005).
- [16] Kubiak T., Wykorzystanie pokryć z poli(glikolu etylenowego) i chitozanu do zapewnienia biokompatybilności nanocząstkom w aplikacjach biomedycznych, *Polimery w Medycynie* 44(2), 119-127 (2014).
- [17] Bielas R., Kubiak T., Kopčanský P., Šafařík I., Józefczak A., Tunable particle shells of thermoresponsive liquid marbles under alternating magnetic field, *Journal of Molecular Liquids* 391, 123283 (2023) (DOI: 10.1016/j.molliq.2023.123283).
- [18] Bielas R., Kubiak T., Molcan M., Dobosz B., Rajnak M., Józefczak A., Biocompatible hydrogel-based liquid marbles with magnetosomes, *Materials* 17(1), 99 (2024) (DOI: 10.3390/ma17010099).
- [19] Sun Y., Zheng Y., Liu C., Zhang Y., Wen S., Song L., Zhao M., Liquid marbles, floating droplets: preparations, properties, operations and applications, *RSC Advances*, 12, 15296-15315 (2022) (DOI: 10.1039/D2RA00735E).
- [20] Avramescu R.E., Ghica M.V., Dinu-Pirvu C., Udeanu D. I., Popa L., Liquid Marbles: From Industrial to Medical Applications, *Molecules* 23, 1120 (2018) (DOI: 10.3390/molecules23051120).

Zegary Wszechświata

Atom

Historia, jakiej nie znacie

David J. Helfand



Wprowadzenie*

W 99,9999999999995% składają się z pustej przestrzeni. Są niemal doskonałą nicością. A mimo to tworzą wszystko, co widzimy i odczuwamy oraz czego dotykamy. Karmią nas i odziewają. Za sprawą ich ruchu jest nam ciepło (lub zimno). Wywołują nasze nadzieje, marzenia i wspomnienia. Mogą istnieć w całkowitym odosobnieniu i wchodzić w skład bardzo skomplikowanych struktur. Odmierzają czas. Potrafią odsłaniać przed nami tajemnice przeszłości, których w żaden inny sposób nie moglibyśmy poznać.

Chodzi oczywiście o **atomy**.

Większość z nas nigdy nie widziała pojedynczego atomu, mimo że są obecne w naszym świecie na każdym kroku. Nie ma w tym nic dziwnego, jeśli uświadomimy

sobie, że nie tylko niemal w całości składają się z pustki, ale w dodatku są to niezwykle małe fragmenty pustki – potrzeba ich 15 trylionów, by mogło powstać jedno ziarenko maku.

Opanowaliśmy jednak tajniki bezpośredniego oddziaływania na te fragmenty niemal doskonałej pustki, możemy więc zadawać im trudne pytania, zmieniać ich stan wewnętrzny i odczytywać ich skomplikowaną historię. Jak trafiłeś do kartki średniowiecznego modlitewnika? Kiedy przyczepiłeś się do ściany jaskini, przenosząc się na nią ze skóry daniela, który ocierał się o skałę? Jaka była temperatura, gdy spadłeś w płatku śniegu na grenlandzki lodowiec? Gdzie byłeś, gdy z dysku materii krążącej wokół świeżo narodzonego Słońca formowała się Ziemia? Co robiłeś razem ze swoimi kolegami w ciągu trzech pierwszych minut istnienia Wszechświata?

Jeśli odpowiednio na nie wpłyniemy, atomy chętnie odpowiedzą na te pytania:

*Przedruk z książki wydawnictwa CCPress (Kraków 2024) za zgodą wydawcy.

– Zostałem dodany nieco później, w 1896 roku – odpowiada z zażenowaniem atom z piętnastowiecznego modlitewnika.

– To było 17 150 lat temu, plus minus jedna dekada – stwierdza atom ze ścian jaskini.

– Temperatura powietrza wynosiła wtedy $-25,5^{\circ}\text{C}$ – informuje atom znaleziony w grenlandzkim lądolodzie na głębokości jednego kilometra.

– Daleko od orbity waszej zachłannej planety – zapewnia atom z pasa planetoid.

– Och, niewiele brakowało, a połączyłbym się wtedy z pewnym uroczym jądrem deuteru – wspomina pierwotny atom z naszego paznokcia.

Atomy chętnie pomogą nam również w poszukiwaniu odpowiedzi na bardziej złożone pytania:

Jak zmieniała się dieta ludzi na przestrzeni dziejów? Kiedy nasi przodkowie zaczęli uprawiać rośliny i porzucili koczowniczy tryb życia? Kiedy i dlaczego po 180 milionach lat całkowitej dominacji na naszej planecie zniknęły dinozaury? Jak to się stało, że w tak krótkim czasie po utworzeniu się Ziemi powstało na niej życie i dlaczego najważniejsze cząsteczki organizmów żywych są lewoskrętne? W jakim okresie historii Wszechświata powstało złoto tworzące teraz obrączkę na moim palcu?

Badając, zliczając, pobudzając i przekształcając naszych małych atomowych historyków, możemy uzyskać szczegółowe odpowiedzi na te i inne pytania. Najpierw jednak powinniśmy przedstawić wspańiałych bohaterów naszej książki tak, jak na to zasługują.

Greckie słowo *atomos* oznacza „niepodzielny” i zgodnie z pierwotną koncepcją atomy miały być najmniejszymi, jakie mogą istnieć, niepodzielnymi kawałkami materii. Dwa i pół tysiąca lat później, gdy idea atomów pojawiła się ponownie na Zachodzie, traktowano ją jako czysto filozoficzne pojęcie. Wyobrażano sobie, że świat jest złożony z wielu różnorodnych substancji i gdybyśmy wzięli fragment jednej z nich, na przykład kawałek drewna, podzielili go na pół, a potem jeszcze raz na pół i jeszcze raz, i tak dalej, to w końcu dotarlibyśmy do najmniejszej możliwej cząstki, czyli do „atomu” drewna. Oczywiście ludzie nie mieli wtedy żadnej możliwości sprawdzenia poprawności tej idei, ale nie wydawała się ona całkowicie pozbawiona sensu.

W starożytnej Grecji pojęcie atomu przegrało w rywalizacji z alternatywną filozofią, która opierała się na prostszym poglądzie, że materia składa się w różnych proporcjach jedynie z czterech podstawowych żywiołów: ziemi, powietrza, ognia i wody. Z tego powodu przez niemal 2000 lat atomowy obraz świata praktycznie w ogóle nie pojawiał się w rozważaniach

zachodnich filozofów. Jednak w XVI stuleciu pieczołowicie przechowane przez islamskich uczonych pojęcie atomu pojawiło się ponownie w zachodniej myśli filozoficznej. Najpierw atomy zostały zrehabilitowane w oczach Kościoła jako dzieło Boga, a potem, w XVIII stuleciu, stały się przedmiotem badań empirycznych.

Obecnie nadal uważamy je do pewnego stopnia za podstawowe składniki materii, ale całkowicie porzuciliśmy już koncepcję ich niepodzielności. Prawdę mówiąc, udało nam się niezwykle szczegółowo poznać podstawowe elementy ich wewnętrznej struktury – wiemy, że posiadają złożone, dodatnio naładowane jądro zbudowane z protonów i neutronów (które same składają się z jeszcze bardziej podstawowych cząstek – kwarków), a wokół niego krążą ujemnie naładowane elektrony, zaliczane do zupełnie innej kategorii cząstek zwanych leptonami. Nawet nasze wyobrażenie tych podstawowych składników w formie „cząstek” – drobin materii znajdujących się w określonym miejscu i poruszających się z ustaloną prędkością – okazało się nieodpowiednie i zamiast niego posługujemy się teraz nieintuicyjną ideą dziwnych kwantowych fal cząstek.

Jeżeli jednak pominiemy na chwilę tę złożoność, możemy powiedzieć, że udało nam się potwierdzić, że najmniejszymi jednostkami wszystkich substancji są atomy (lub ich ściśle określone kombinacje). Co więcej, wiemy, że historia Wszechświata i wszystkiego, co zawiera, jest zapisana w poszczególnych układach elementów tworzących atomy – leptonów i kwarków – które stanowią podstawowe elementy składowe całej zwyczajnej materii znajdującej się obecnie w kosmosie. Dzięki znajomości praw fizyki rządzących zachowaniem tych cząstek możemy odczytać tę historię zupełnie tak samo, jak dzięki znajomości praw gramatyki i składni językowej możemy odczytywać dokumenty historyczne pozostawione przez naszych przodków. Choć atomy nie ulegają wpływowi kulturowym tak jak niektórzy historycy, to jednak są podatne na innego rodzaju wpływy i musimy zachować czujność, gdy je badamy, starając się ustalić, co mogą nam powiedzieć na temat przeszłości.

Najważniejsze jednak jest to, że dzięki „atomowym historykom” możemy się cofnąć do czasów o wiele wcześniejszych niż wydarzenia przedstawiane w najstarszych zapiskach i uzyskać opis ilościowy okresu, który historycy nazywają prehistorią. Co więcej, atomy pozwalają nam poznać historię naszej planety w okresie, gdy nie było na niej jeszcze ludzi. Dzięki nim możemy ustalić, jak przebiegała chronologia zmian klimatycznych na Ziemi i jak zmieniała się jej atmosfera, zbadać początki życia, naro-

dziny Układu Słonecznego, a nawet, nieco autorefleksyjnie, historię samych atomów, która rozpoczęła się w chwili pojawienia się ich podstawowych składników w pierwszych kilku mikrosekundach po Wielkim Wybuchu.

Jak już zauważyliśmy, atomy są maleńkie. Biliony takich mikroskopijnie małych drobin mogą tańczyć walca na główce od szpilki, nie następując sobie przy tym na nogi, robią więc chyba jeszcze większe wrażenie niż aniołowie. Ich struktura wewnętrzna rzeczywiście przypomina skomplikowane figury taneczne naładowanych cząstek, a charakterystyczny rytm ich tańca pozwala rozpoznać je nawet z odległości miliardów lat świetlnych. Choć wydaje się to niezwykle, atomy, które widzimy w odległym kosmosie, są dokładnie takie same jak atomy tworzące nasze ciało.

Jak wyglądają te maleńkie kawałki niemal całkowitej pustki? No cóż, gdybym położył piłkę tenisową na zewnątrz mojej pracowni mieszczącej się na skrzyżowaniu Sto Dwudziestej Ulicy i Broadwayu na Manhattanie i przyjął, że przedstawia ona jądro atomu wodoru (najprostsze jądro, jakie może istnieć), to elektron związany z tym jądrem powinien krążyć po orbicie przecinającej Broadway na wysokości Dziewięćdziesiątej Szóstej i Sto Czterdziestej Piątej Ulicy, a więc w odległości około dwóch kilometrów. Idąc szybkim krokiem, doszlibyśmy tam mniej więcej po półgodzinie. I co ujrzelibyśmy po dotarciu na miejsce? Prawdopodobnie zupełnie nic, ponieważ, po pierwsze, elektron w tej skali byłby o wiele mniejszy od ziarenka piasku (mówiąc dokładniej, przynajmniej 100 tysięcy razy mniejszy), a po drugie, musiałby pędzić z prędkością 2170 kilometrów na sekundę – byłby rozproszoną chmurą ulotnego prawdopodobieństwa i zauważenie go byłoby praktycznie niemożliwe.

Udało nam się już jednak tak dobrze poznać atomy, że potrafimy dość precyzyjnie wpływać na ich zachowanie, a to pozwoliło na skonstruowanie wielu nowoczesnych urządzeń. Atom cezu o liczbie atomowej 55 stanowi na przykład podstawę naszego systemu pomiaru czasu, ponieważ jedną sekundę definiuje się obecnie jako okres równy dokładnie 9 192 631 770 drganiom fali światła emitowanego, gdy atom cezu przechodzi między dwoma stanami wzbudzonymi¹. Tak dokładna definicja jest niezbędna do poprawnego działania urządzeń GPS, na przykład takich, jakie montuje się w telefonach. Na pokładzie satelitów systemu GPS znajdują się zegary atomowe, które odmierzają czas z dokładnością do jednej sekundy na 32 000 lat i właśnie dzięki temu możemy szybko znaleźć drogę do najbliższej kawiarni. Prawdę mówiąc, nawet zwykłe działanie telefonu, który, jak wszystko inne, jest zbudowany z atomów, również

jest możliwe tylko dlatego, że potrafimy precyzyjnie i niezawodnie wykonywać różne operacje na atomach, i to w sposób powtarzalny. Żywność, którą zjadamy, ratujące życie lekarstwa i paliwa napędzające nasze pojazdy – wszystko to działa tylko dlatego, że potrafimy zmieniać układy atomów.

Choć atomy nie są niezniszczalne (w dalszej części książki przekonamy się, jakie są konsekwencje ich zniszczenia i przekształcenia), to jednak są niezwykle trwałymi podstawowymi elementami składowymi materii, które w ziemskich warunkach mogą zachowywać swoje własności przez dowolnie długi czas. Zatem atomy tworzące nasze ciało są atomami pochodzącymi ze zjadanej przez nas żywności, wypijanej wody i wdychanego powietrza (w liczbie 50 tryliardów atomów w każdym gramie). Żywność zbudowana jest z kolei z atomów pochodzących z roślin, które znajdują się na samym dole łańcucha pokarmowego i pobierają atomy z powietrza i substancji przyswajanych za pomocą korzeni. Skład atomowy powietrza i gleby zmienia się w wyniku procesów geologicznych i biologicznych zachodzących na powierzchni planety, przy czym najnowsze tego typu zmiany wynikają ze zbiorowej działalności całego naszego gatunku. Atomy uwalniane i przetwarzane we wszystkich tych procesach trafiły na naszą planetę 4,567 miliarda lat temu z międzygwiazdowego obłoku gazu i pyłu, z którego utworzył się Układ Słoneczny. I owszem, atomy tworzące ten obłok powstały jeszcze wcześniej w procesach zachodzących w zamierzchłej przeszłości, nawet w pierwszych chwilach Wielkiego Wybuchu.

Ta książka, opisująca historię Wszechświata w ciągu 13,8 miliarda lat, jest relacją z fascynującej podróży przedstawioną w formie cyklu opowieści, w których główną rolę zawsze odgrywają atomy. Jak się przekonamy, w naszym dramacie występują dziewięćdziesiąt cztery postacie pierwszoplanowe, znane jako pierwiastki.

Dzięki niezwyklej stabilności atomów i ich indywidualnym cechom, uważny obserwator może odkryć wiele szczegółów nawet bardzo odległej historii. Możemy wykorzystać atomy do ustalenia dokładnych dat powstania różnych przedmiotów, prześledzenia historii rolnictwa i diety naszych przodków, a także ustalenia szczegółów zmian klimatycznych zachodzących w przeszłości w celu zrozumienia, co może nam przynieść przyszłość. Możemy nawet odtworzyć historię Układu Słonecznego i samego Wszechświata. W następnych rozdziałach odkryjemy fałszerstwa dzieł sztuki, ustalimy pochodzenie skradzionych posążków i ustalimy przyczynę śmierci pradawnych ludzi (dowiemy się też przy okazji, co jedli na obiad na krótko przed śmiercią). Określimy, jaka temperatura panowała na

Ziemi przed 100 tysiącami lat i powiążemy jej wartość ze składem ówczesnej atmosfery. Ustalimy wiek naszej planety i Księżyca oraz chwilę, w której powstało życie. Dzięki temu, że udało nam się doskonale zrozumieć strukturę atomów i ich różne odmiany, możemy bowiem odtworzyć historię atom po atomie.

Atomy rejestrują zdarzenia zachodzące zarówno w świecie ożywionym, jak i nieożywionym. Od szkliva nazębnego do roślin i maleńkich skorupiek planktonu, od szklanych kulek wyrzucanych przez wulkany do skał powstających głęboko pod skorupą ziemską i powie-

trza uwięzionego w pęcherzykach w arktycznym lodzie atomy są świadkami historii. Bardzo często dają świadectwo w sposób bezpośredni, ale czasami mają swoje tajemnice i musimy je odkryć, by móc w pełni zaufać temu, czego się od nich dowiadujemy. Mimo że w niektórych przypadkach interpretacja wyników badań jest nieco bardziej skomplikowana, atomy pozostaną naszymi wiernymi przewodnikami, gdy zajmiemy się badaniem dzieł sztuki i żywności, zmian klimatycznych i katastrof planetarnych, a także początków życia i narodzin Wszechświata.

Tłumaczenie Bogumił Bieniok, Ewa L. Łokas

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

LISTOPAD 2023

Toruń. 12.11.2023 Toruński Oddział PTF zorganizował spotkanie otwarte z prof. Andrzejem Draganem na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Gość wygłosił wykład *Herezje w fizyce*, na którym pojawiła się bardzo duża liczba osób. Po wykładzie zorganizowano wśród publiczności losowanie prezentów – książek Andrzeja Dragana *Kwantechizm 2.0* z podpisem autora. Przed wykładem prof. Dragan zwiedził Krajowe Laboratorium FAMO, w którym wiele lat temu (jeszcze jako doktorant) wykonywał doświadczenia w grupie optyki kwantowej prof. Konrada Banaszka.

Toruń. 30.11.2023 w Instytucie Fizyki UMK nastąpiło uroczyste reaktywowanie wahadła Foucaulta, którego

pierwsza wersja z 1998 roku, po kilkunastoletnim okresie działania, została zdemonstrowana na wiele lat. Zamontowane wahadło waży 66,6 kg i ma długość 15,7 m. Aktualna wersja została zaprojektowana bardzo nowocześnie, ma np. podświetlane podłoże z elementami graficznymi (patrz fotografia). Z okazji powrotu wahadła do Instytutu wygłoszone zostały 3 wykłady:

- prof. Wiesław Nowak z Katedry Biofizyki *A jednak się kręci...*,
- prof. Maciej Wróblewski z Katedry Antropologii Literatury i Nowych Mediów *Magia wahadła Foucaulta*,
- mgr inż. Andrzej Florczyk *Rozwiązania techniczne*.

W wydarzeniu wzięło udział ponad 300 osób, w tym władze rektorskie UMK.



(fot. Jakub J. Borkowski Oddz. Toruński PTF)

GRUDZIEŃ 2023

Toruń. 19.12.2023 Toruński Oddział PTF gościł na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK prof. Wiesława Gruszeckiego – biofizyka, prorektora UMCS. Gość wygłosił inspirujący wykład *Żaluzje molekularne w oku człowieka*, w którym opowiedział o fascynujących zagadnieniach związanych z biofizyką i biochemią ludzkiego oka.

STYCZEŃ 2024

Białystok. 08.01.2024 działający przy Wydziale Fizyki UwB Klub Młodego Odkrywcy *Newton, Einstein a teraz my* zorganizował warsztaty dla młodzieży szkolnej z Polski i Ukrainy zatytułowane *Urządzenia mobilne wspomagające młodego fizyka*. Projekt realizowano korzystając z narzędzi i podzespołów elektronicznych przeznaczonych do konkretnych biorozwiązań zarówno przemysłowych, jak i ekologicznych. Uzyskane podczas zajęć wyniki pomiarowe zweryfikowano porównując je z rezultatami doświadczeń przeprowadzonych w laboratoriach Wydziału Fizyki UwB. Dodatkową zaletą projektu była współpraca młodzieży różnej narodowości, która wymagała zespołowego, konstruktywnego i wnikliwego wysiłku myślowego, a często także pokonywania bariery językowej. Projekt ten został wsparty finansowo w ramach ogólnopolskiego konkursu *Razem dla lepszej przyszłości z KMO* zorganizowanego przez Centrum Nauki Kopernik oraz Fundację Deloitte.

LUTY 2024

Białystok. 19.02.2024, z okazji Dnia Nauki Polskiej i 551 rocznicy urodzin Mikołaja Kopernika, pasjonaci astronomii mieli okazję odwiedzić Planetarium UwB. Podczas wizyty obejrzeli film *Explore* prezentujący historię rozwoju astronomii. Następnie dr hab. Marek Nikolajuk, prof. UwB z Wydziału Fizyki UwB zaprosił wszystkich w wirtualną podróż do najbliższych nam gwiazd – Syriusza i Alfa Centauri.

Łódź. Po trzyletniej przerwie, 21.02.2024 w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego odbyły się warsztaty dla licealistów *Hands on Particle Physics Masterclasses CERN* koordynowane przez IPPOG. Warsztaty pozwalają młodzieży zdobyć podstawowe wiadomości o cząstkach elementarnych i pokazują, jak

się je bada za pomocą Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC). Uczestnicy poznali specyfikę badań prowadzonych w eksperymencie ATLAS związanym z rejestracją bozonu Higgsa. Zajęcia rozpoczęły dwa wykłady połączone z dyskusją: *Wprowadzenie do fizyki cząstek elementarnych ze szczególnym uwzględnieniem LHC* oraz *Obserwacja bozonu Higgsa. Wprowadzenie do detektorów i identyfikacji cząstek*. W trakcie wykładów uczestnicy warsztatów poznali metodologię stosowania techniki mas niezmienniczych i identyfikacji cząstek krótkożyciowych oraz kanałów rozpadu bozonu Z i bozonu Higgsa. Na szczegółowych przykładach pokazano, jak należy kategoryzować rozpady. Wykorzystanie zdobytej wiedzy pozwoliło uczestnikom, podzielonym na dwuosobowe zespoły, na samodzielną analizę prawdziwych przypadków zarejestrowanych w eksperymencie ATLAS i określenie mas poszukiwanych bozonów Z i H. Warsztaty te były elementem międzynarodowych warsztatów prowadzonych w lutym i marcu w wielu instytutach Europy i Ameryki Północnej (oraz na wszystkich innych kontynentach) z udziałem 63 moderatorów z CERN reprezentujących duże eksperymenty (ATLAS, ALICE, CMS, LHCb) oraz grupę teoretyczną. Łódzka edycja zakończyła się wideokonferencją z uczestnikami realizującymi w tym dniu to samo zadanie w trzech innych ośrodkach (Nitra – Słowacja, Vila Real – Portugalia, Udine – Włochy). Dyskusję uzyskanych wyników prowadziło dwóch moderatorów z CERN. Poprzednie edycje warsztatów organizowali w Łodzi fizycy z Laboratorium Fizyki Promieniowania Kosmicznego NCBJ. Po likwidacji Laboratorium, rolę organizatora przejął w tym roku Łódzki Oddział PTF, a konkretnie dr Jacek Szabelski (Akademia Nauk Stosowanych im Stefana Batorego w Skierniewicach (ANSB)) i Michał Karbowski (UŁ), skarbnik naszego Oddziału. W warsztatach wzięło udział 60 uczestników.

Organizatorzy dziękują prof. Pawłowi Maślance, dziekanowi Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ, za życzliwą pomoc w organizacji warsztatów. <https://ippog.org/> | <https://physicsmasterclasses.org/>

MARZEC 2024

Toruń. 05.03.2024 Toruński Oddział PTF wraz z kinem studenckim UMK *Niebieski kocyk* zorganizował dla publiczności seans filmu *Oppenheimer*, który w kolejnym tygodniu został nagrodzony aż 7 Oscarami. Wieczór filmowy rozpoczął się od prelekcji przewodniczącego

Oddziału, prof. Wiesława Nowaka. Po seansie odbyła się pasjonująca debata na temat broni i energii atomowej, z udziałem fizyków: prof. Jacka Karwowskiego, prof. Grzegorza Karwasza, prof. Michała Zielińskiego i prof. Wiesława Nowaka. Mimo późnej pory i środka tygodnia sala kinowa wypełniona była po brzegi, a sama debata zakończyła się tuż przed północą. Podczas spotkania dowiedzieliśmy się, że prof. Karwasz znał osobiście Józefa Rotblata (dziś jest członkiem Rady Programowej Fundacji im. Rotblata), jednego ze współtwórców pierwszej bomby atomowej i przeprowadził z nim ciekawy wywiad https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/812 (W *Postęпах Fizyki* 1/2024 ukazał się artykuł prof. Andrzeja Hennela o J. Rotblacie – przyp. red.)

Białystok. W dniach 14-16.03.2024 Wydział Fizyki UwB po raz kolejny zaprosił entuzjastów nauki w ramach cyklu *Spotkań z nauką*, których zadaniem jest upowszechnianie i promowanie nauk ścisłych oraz przyrodniczych wśród młodzieży. W tym roku odwiedzający mogli m.in. wziąć udział w warsztatach pisanie gry 2D, posłuchać o hobbystycznych maszynach CNC (zaawansowane urządzenia do precyzyjnej obróbki materiałów – przyp. red.) lub odbyć wirtualny spacer po Układzie Słonecznym.

Białystok. 23.03.2024 zakończyła się trzecia edycja Młodzieżowego Uniwersytetu Przyrodniczego (MUP) *Nowe technologie w ochronie bioróżnorodności* – wspólnego projektu Wydziałów Biologii, Chemii, Fizyki i Matematyki Uniwersytetu w Białymstoku. W trzech turach zajęć wzięło udział 220 młodych naukowców ze szkół podstawowych oraz ponadpodstawowych. Podczas warsztatów zgłębiali oni wiedzę m.in. na temat symulacji w fizyce, sieci neuronowej w inteligentnym pojeździe przyszłości oraz zielonej energii. Oferta edukacyjna przygotowana przez Wydział Fizyki UwB wzbudziła niemałe zainteresowanie wśród młodzieży. Świadczyła o tym spora liczba celnych i wnikliwych pytań, którymi zasypywani byli prowadzący zajęcia: dr hab. Katarzyna Rećko, prof. UwB oraz dr Wojciech Olszewski.

KWIECIEŃ 2024

Wrocław/Berlin. W ramach obchodów stulecia fizyki kwantowej (przypadającego w 2025), ogłoszonych przez UNESCO oraz Zgromadzenie Ogólne ONZ, Niemieckie Towarzystwo Fizyczne zainicjowało projekt QuanTour, którego zadaniem jest popularyzacja technologii kwantowych oraz zapoznanie szerokiego grona odbiorców

ze specyfiką pracy naukowców w różnych krajach europejskich. W ramach tego projektu źródło emitujące pojedyncze kwanty promieniowania elektromagnetycznego (źródło pojedynczych fotonów), stanowiące niezbędny element sieci kwantowych, będzie przekazywane między europejskimi laboratoriami prowadzącymi badania w tej dziedzinie. Projekt będzie trwał rok i weźmie w nim udział 12 krajów, w tym Polska; źródło dotrze do nas 24.02.2025. Koordynatorem projektu na terenie naszego kraju jest dr inż. Anna Musiał z Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur, Katedra Fizyki Doświadczalnej PWr. Do udziału w projekcie zgłosiły się także uczelnie warszawskie (UW i WAT) oraz Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu. 14.04.2024 w siedzibie Niemieckiego Instytutu Metrologicznego (PTB) w Berlinie odbyła się oficjalna inauguracja projektu, w której wzięła udział delegacja z Politechniki Wrocławskiej, m.in. studenci Fizyki Technicznej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki: Helena Janowska, Paulina Szott i Tomasz Gzyl. Więcej informacji na temat projektu można znaleźć na stronach: <https://www.quantum2025.de/node/22> <https://thesciencetalk.com/quantour/> a to, gdzie aktualnie znajduje się źródło, można śledzić na bieżąco na specjalnie utworzonym profilu na Instagramie: <https://www.instagram.com/quantour.eu/>

Obszarem aktywnym źródła jest nanometrowych rozmiarów struktura półprzewodnikowa – kropka kwantowa. Ogranicza ona ruch elektronów we wszystkich trzech wymiarach przestrzennych, co powoduje, że mogą one znajdować się tylko w stanach, którym odpowiadają ściśle określone, dyskretne wartości energii. W celu zmaksymalizowania liczby użytecznych fotonów, kropkę umieszczono (z dokładności lepszą niż 50 nm) w środku wnęki optycznej ze zwierciadłem Bragga o symetrii cylindrycznej. Struktura ma rozmiar rzędu kilku mikrometrów i jej szczegóły można obejrzeć pod mikroskopem optycznym. Kropki kwantowe są obecnie źródłami nieklasycznych stanów światła o najlepszych parametrach, ale działanie struktur emitujących w podczerwieni wciąż ograniczone jest do temperatur kriogenicznych. W realizacji pierwszego przenośnego i kompaktowego źródła typu plug&play, emitującego w najbardziej interesującym z punktu widzenia zastosowań zakresie telekomunikacyjnym, brała udział Politechnika Wrocławska (dr inż. Kinga Żołnacz i dr inż. Jacek Olszewski z grupy prof. Wacława Urbańczyka z Katedry Optyki i Fotoniki oraz grupa prof. Sęka z Katedry Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki) [1]. Powstało ono w ramach bilateralnego projektu FI-SEQR: *Półprzewodnikowe źródło pojedynczych fotonów do bezpiecznej światłowodowej komunikacji kwantowej w zakre-*

sie $1.3\ \mu\text{m}$. Projekt ten został sfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach 2. edycji konkursu na wspólne projekty w obszarze fotoniki, w ramach współpracy Polska-Berlin-Brandenburgia, we współpracy z firmą FIBRAIN, Uniwersytetem Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Uniwersytetem Technicznym w Berlinie, Instytutem Zusego w Berlinie oraz firmą JCMWave.

[1] Anna Musiał, Kinga Żołnacz, Nicole Srocka, Oleh Kravets, Jan Große, Jacek Olszewski, Krzysz-

tof Poturaj, Grzegorz Wójcik, Paweł Mergo, Kamil Dybka, Mariusz Dyrkacz, Michał Dłubek, Kristian Lauritsen, Andreas Bültner, Philipp-Immanuel Schneider, Lin Zschiedrich, Sven Burger, Sven Rodt, Wacław Urbańczyk, Grzegorz Sęk, Stephan Reitzenstein, “Plug&Play Fiber-Coupled 73 kHz Single-Photon Source Operating in the Telecom O-Band”, *Advanced Quantum Technologies* 3, 2000018 (2020); DOI: 10.1002/qute.202c000018

Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej zwraca się do fizyków

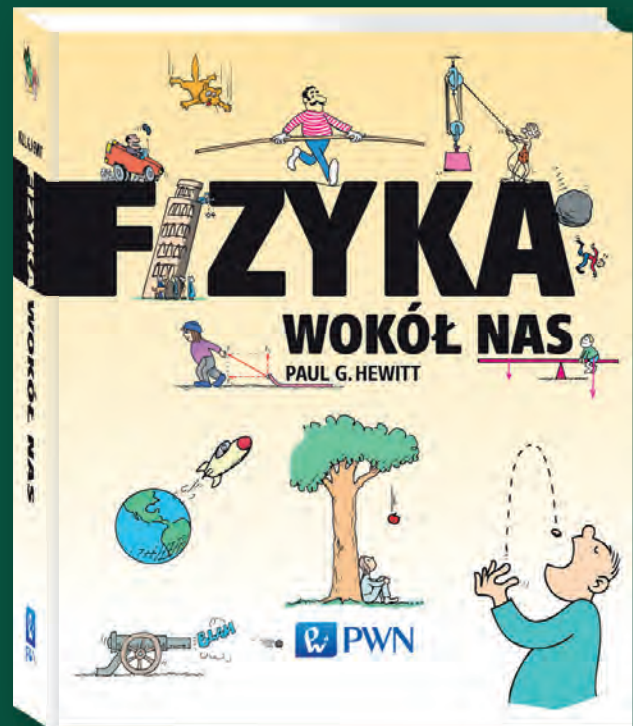


W 2011 roku otwarte zostało Muzeum Lamp Rentgenowskich przy Politechnice Opolskiej. Dzięki zrozumieniu i życzliwości wielu ofiarodawców z całego niemal świata (527), muzeum posiada ponad 1500 eksponatów związanych z promieniowaniem rentgenowskim (lamp i aparatów rentgenowskich, a także detektorów promieniowania jonizującego). Placówka przede wszystkim pełni rolę edukacyjną, stąd też apel do wszystkich użytkowników promieniowania rentgenowskiego, by aktywnie wspierali tę ideę własnymi propozycjami, jak również wzbogacali muzeum o kolejne eksponaty, tj. niesprawne źródła promieniowania rentgenowskiego (bądź ich części), detektory oraz mierniki promieniowania jonizującego itp. Zachęcamy do wirtualnej wycieczki po muzeum <https://muzeum.po.opole.pl>

Nieoceniona

pomoc dla

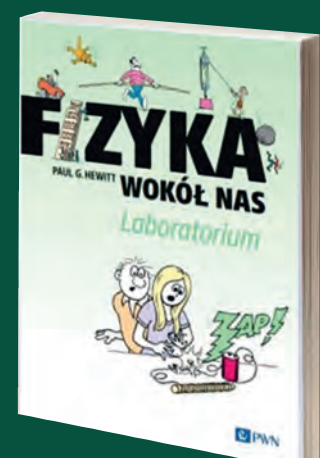
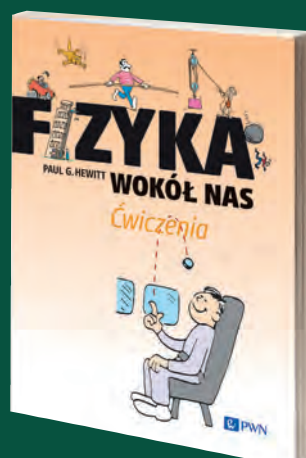
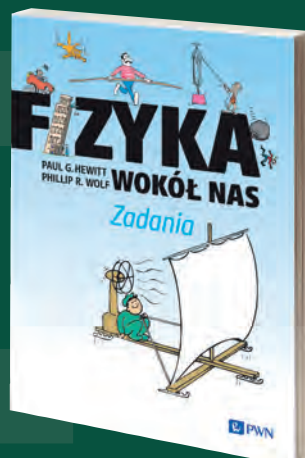
- **uczniów**
- **rodziców**
- **studentów**
- **nauczycieli**



Tłumaczenie 12. wydania angielskojęzycznego oryginału podręcznika *Fizyka wokół nas* autorstwa amerykańskiego fizyka **Paula G. Hewitta**, który zrewolucjonizował nauczanie fizyki i wyznaczył jego nowe standardy. Czytelnik dostaje do rąk niezwykłą opowieść wyjaśniającą istotę otaczających nas zjawisk fizycznych.

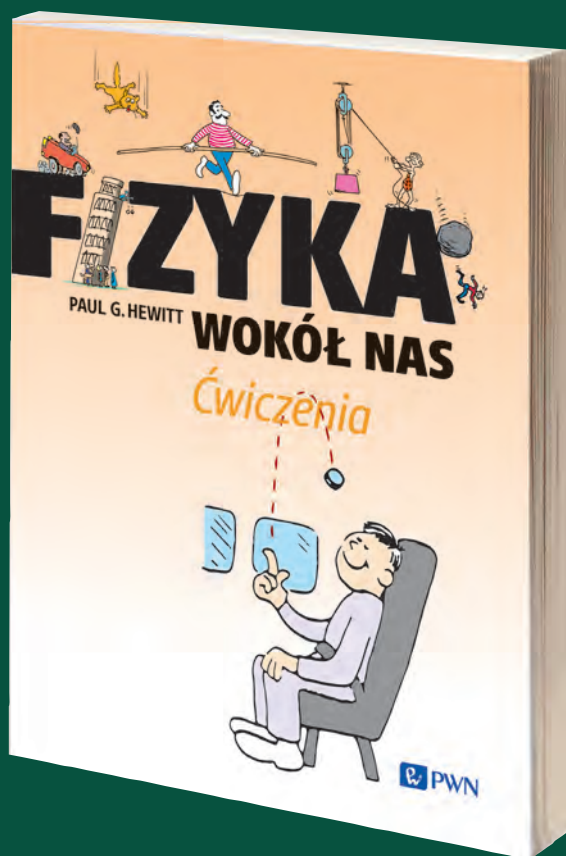
Dzięki przykładom z codziennego życia oraz dużej liczbie ilustracji (fotografii i świetnych rysunków) łatwiej jest zrozumieć prawa rządzące przyrodą. Chociaż autor nie stroni od matematyki i wzorów, to są one tylko pomocą, nie przesłaniają meritum. Niniejsze wydanie uwzględnia najnowsze osiągnięcia fizyki, szczególnie w zakresie atomistki, energetyki czy kosmologii; ma odświeżoną szatę graficzną, zawiera rozszerzoną część ćwiczeniową oraz wprowadzenie do zadań testowych.

Publikacja, z której można czerpać garściami przykłady prostych doświadczeń i zadań koncepcyjnych, szczególnie godna jest polecenia tym wszystkim, którzy nie lubią fizyki, gdyż wydaje im się trudna i nudna. Dygresje i przykłady to najmocniejsza strona podręcznika – jest ich dużo, trafią do każdego i nikt po przejrzaniu książki nie powie, że fizyka to oderwana od życia nauka o równi pochyłej, solenoidach, wahadle matematycznym czy gazie doskonałym.



w przygotowaniu

Ćwiczenia



**Nieoceniona
pomoc dla**

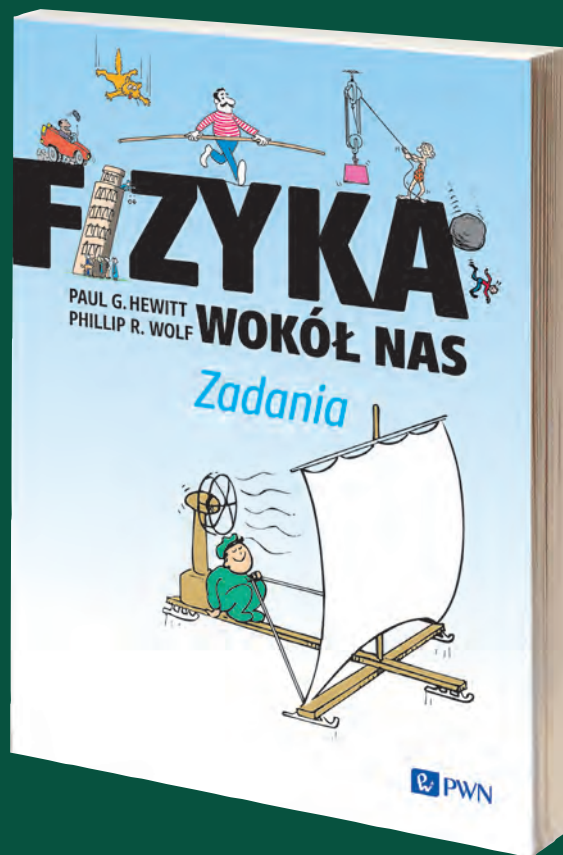
- **uczniów**
- **rodziców**
- **studentów**
- **nauczycieli**

Jak polubić fizykę i szybciej ją zrozumieć? Najlepiej przez praktykę, czyli rozwiązywanie ciekawych problemów i zadań. Kolejna książka Paula G. Hewitta to niezwykła pozycja, w której autor tłumaczy istotę zjawisk fizycznych w ten właśnie sposób. Znajdziesz tu mnóstwo ćwiczeń obliczeniowych, pytań i odpowiedzi rozwiewających błędne przekonania oraz problemów praktycznych, które pomagają uczniom „połączyć to wszystko w całość”. Ćwiczenia te są cennym rozwinięciem i uzupełnieniem podręcznika *Fizyka wokół nas* (wyd. 12.) i pomagają w zrozumieniu przedstawionych tam zagadnień. Książka stanowi nieocenioną pomoc dla uczniów, studentów, rodziców i nauczycieli.

Paul G. Hewitt – amerykański fizyk, autor słynnego podręcznika *Fizyka wokół nas*, który wyznaczył nowe standardy w nauczaniu fizyki na wszystkich kierunkach, także ścisłych. Tworzy również screencasty dotyczące fizyki, umieszczane na YouTube. Za swą działalność edukacyjną został wyróżniony wieloma nagrodami.

Zadania

NOWOŚĆ



**Nieoceniona
pomoc dla**

- **uczniów**
- **rodziców**
- **studentów**
- **nauczycieli**

Czy fizyka wydaje Ci się trudna i nudna? Ten zbiór zadań, kompatybilny z podręcznikiem Paula G. Hewitta *Fizyka wokół nas* (wyd. 12.), **zmieni to!**

Każdy rozdział zawiera wprowadzenie, które przypomina ważne pojęcia fizyczne i definicje niezbędne do rozwiązywania zadań oraz przykładowe problemy ilustrujące, jak można je zastosować w praktyce. Do tego dołączono szereg ciekawych zadań do samodzielnego rozwiązywania. **Wreszcie nauczysz się, jak to robić!** Autorzy kładą nacisk na fizykę, a nie matematykę i twierdzą, że zadania tu zawarte mają na celu nauczanie przeciętnych uczniów czy studentów, a nie tylko rzucenie wyzwania najlepszym i najzdolniejszym.

Jak twierdzi **Paul G. Hewitt:**

*Głównym powodem uczenia się fizyki jest udoskonalenie sposobu postrzegania świata fizycznego. **Lubię fizykę i ty też ją polubisz, ponieważ wreszcie ją zrozumiesz.***

POSTĘPY FIZYKI

75 LAT

